

# Kinematik und angewandte Physiologie und Pathophysiologie der Ligamente

*M. Jagodzinski, W. Müller, N. Friederich*

## **2.1 Kreuzbänder – 17**

- 2.1.1 Kreuzbänder und Bewegungsumfang des Kniegelenks – 17
- 2.1.2 Die Folgen falscher Reinsertion abgerissener vorderer Kreuzbänder – 18
- 2.1.3 Hyperextension und vorderes Kreuzband – 20
- 2.1.4 Vorderes Kreuzband und Menisken – 20
- 2.1.5 Kreuzbandinsuffizienz und Meniskusläsion – 20
- 2.1.6 Die vordere Kreuzbandinsuffizienz und das Lateral-Pivot-shift-Phänomen – 22

## **2.2 Kollateralbänder – 25**

- 2.2.1 Mediales Kollateralband – 25

## **2.3 Die Ideallinien der Bandinsertionen und das Prinzip der Dynamisierung von Gelenkbändern – 27**

## **2.4 Retinaculum und Pes anserinus als »dynamisierte Ligamente« – 27**

- 2.4.1 Das Retinaculum longitudinale mediale patellae als dynamischer, anteromedialer Längsstabilisator – 27
- 2.4.2 Der Pes anserinus als aktiver Hilfsstabilisator der medialen Seite – 27

## **2.5 Das mediale Bandsystem während der Bewegung – 28**

- 2.5.1 Spezialbedingungen für die vordersten Faserzüge des medialen Kollateralbandes – 28
- 2.5.2 Verschieblichkeit des medialen Kollateralbandes gegenüber dem Tibiakopf – 29

## **2.6 Das laterale Kollateralband – 30**

- 2.6.1 Die tiefen ligamentären Strukturen der Außenseite – 30

## **2.7 Das laterale Bandsystem während der Bewegung – 31**

## **2.8 Der Tractus iliotibialis als direktes femorotibiales laterales Seitenband – 33**

## **2.9 Das theoretische Zusammenspiel der Kreuz- und Seitenbänder – 34**

2.9.1 Verlust der Isometriebedingungen bei falschen Bandansatzpunkten – 35

2.9.2 Gang- und Rastpolkurve – 37

## **2.10 Automatische Rotation – Schlussrotation – Initialrotation – 38**

2.10.1 Die ungleiche Länge der Kondylenrollen und die automatische Rotation – 39

2.10.2 Automatische Schluss- und Initialrotation beim schnellen Bewegungsablauf  
und beim Gehen auf unebenem Gelände – 43

## **2.11 Die Kreuzbänder und die Bewegung des Kniegelenks in mehr als einer Ebene – 43**

## **2.12 Die räumliche Viergelenkkette und der Zentralpfeiler – 43**

2.12.1 Der zentrale Drehpfeiler »pivot central« – 43

2.12.2 Insuffizienz des Zentralpfeilers und arthrotische Entwicklung – 44

2.12.3 Der zentrale Drehpfeiler bei zunehmender Flexion – 44

2.12.4 Weitere Funktionsmöglichkeiten der Elemente des Zentralpfeilers – 46

## **2.13 Das posteromediale Gelenkeck (Semimembranosuseck) – 47**

2.13.1 Die einzelnen Funktionselemente des Semimembranosusecks – 48

## **2.14 Das Zusammenspiel der Ligamente bei der Rotation – 49**

2.14.1 Innenrotation, Wringmechanismus der Kreuzbänder und Form  
des lateralen Tibiaplateaus – 49

2.14.2 Die willkürliche Rotation, ihr Ausmaß und ihre Drehachse – 50

2.14.3 Die passive und aktive Stabilisierung durch das Semimembranosuseck  
bei der Rotation und beim Schub in anteroposteriorer Richtung – 50

2.14.4 Der funktionsmäßige Synergismus des Semimembranosusecks  
mit dem hinteren Kreuzband – 52

2.14.5 Der funktionsmäßige Synergismus des Semimembranosusecks mit dem  
vorderen Kreuzband und die Funktion des medialen Meniskus – 52

## **2.15 Das posterolaterale Gelenkeck (Popliteuseck) – 53**

2.15.1 Die einzelnen Funktionselemente des Popliteusecks – 53

## **2.16 Die propriozeptiv gesteuerte, aktive Stabilisierung – 54**

## **Literatur – 55**

Auch wenn das Konzept der Viergelenksskette angesichts der in den letzten Jahrzehnten herausgearbeiteten Komplexität der Spannungsänderungen in einzelnen Bandanteilen altmodisch erscheint, so ist es auch nach mehr als 30 Jahren noch ein hilfreiches Werkzeug, um die Bewegungsabläufe im Kniegelenk besser nachvollziehen zu können. Insbesondere haben die Hinweise zu den anatomiegerechten Kreuzbandrekonstruktionen nichts an Aktualität verloren, da immer noch in über 60% der Revisionsfälle nach vorderer Kreuzbandplastik nicht anatomiegerechte Bohrkanalpositionen gefunden werden (Diamantopoulos et al. 2008).

## 2.1 Kreuzbänder

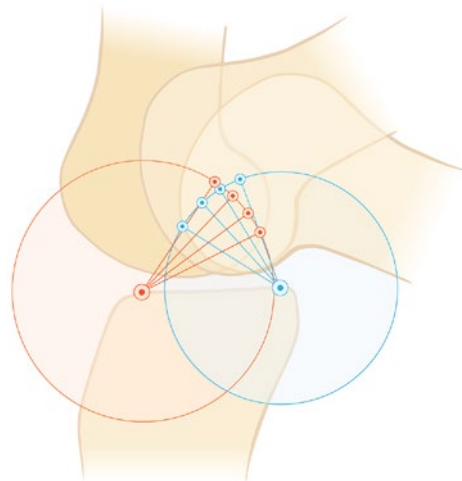
Die vereinfachte, 2-dimensionale Darstellung der Kreuzbänder wird von jeweils einem Kreissektor gebildet. Auf diesem liegen die Insertionspunkte der beiden Bänder während der Extension und Flexion (■ Abb. 2.1). Diese Konstruktion hat logischerweise nur für die Ideallinie Gültigkeit. Von den vielen für die mechanische Festigkeit notwendigen Kreuzbandfasern finden nicht alle auf der Ideallinie Platz. Die sich daraus ergebenden Folgerungen werden im Folgenden besprochen.

Die Gesetze dieser Kreuzbandviergelenkkette, welche als Getriebe den Zwangslauf der Gelenkflächen mit der Rückverlagerung des Auflagepunktes bestimmen (■ Abb. 2.2), sind allein für diesen Funktionsablauf verantwortlich. Dieser Zwangslauf bleibt auch erhalten, wenn die Seitenbänder ganz wegfallen und die geführte Extensions-/Flexions-Bewegung zwischen Femur und Tibia in einer Ebene bleibt. In der 3-dimensionalen Bewegung wird zusätzlich die Rotationsfähigkeit der Gelenkflächen gesteuert, die später genauer betrachtet wird.

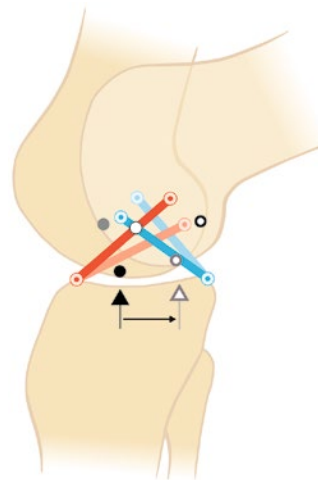
### 2.1.1 Kreuzbänder und Bewegungsumfang des Kniegelenks

Der Bewegungsaussschlag wird durch die Anordnung dieser Kreuzbandviergelenkkette bestimmt. Lagen ihre proximalen Drehpunkte z. B. auf einer Geraden, welche zur Femurlängsachse im rechten Winkel steht, dann würde eine Kniebeweglichkeit von  $50^{\circ}$ - $0^{\circ}$ - $70^{\circ}$ , also  $50^{\circ}$  Hyperextension und nur  $70^{\circ}$  Flexion resultieren (■ Abb. 2.3). Soll die normale Kniebeweglichkeit von  $5^{\circ}$ - $0^{\circ}$ - $145^{\circ}$  ermöglicht werden, müssen die femoralen Ursprungspunkte der Kreuzbänder auf einer Geraden liegen, welche mit der Femurlängsachse einen Winkel von  $40^{\circ}$  bildet.

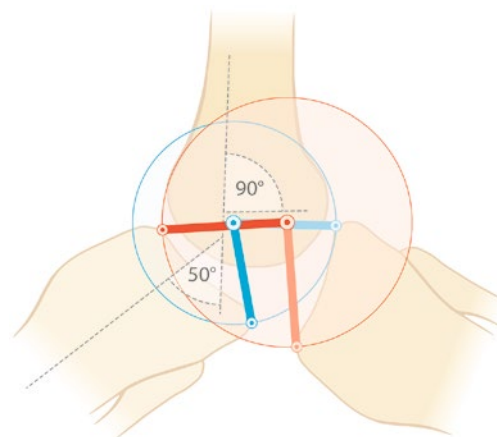
Das Dach der Fossa intercondylaris bildet tatsächlich mit der Längsachse einen Winkel von ca.  $40^{\circ}$  (■ Abb. 2.4). Damit gibt es allein schon durch die beiden Kreuzbänder eine Limitierung der Extensionsbewegung mit Verhinderung der Hyperextension. Wenn die Extension bzw. Hyperextension erzwungen wird, kommt es zu einer für das schwächere vordere Kreuzband kritischen Situation mit der Möglichkeit einer akuten Läsion (■ Abb. 2.10). Die Untersuchungen der Kniegelenke mit chronischer Insuffizienz des vorderen Kreuzbandes bestätigen, dass in diesen Fällen immer eine pathologische Überstreckbarkeit vorliegt. Nun ist die Frage, inwieweit sich Kniegelenke mit steiler



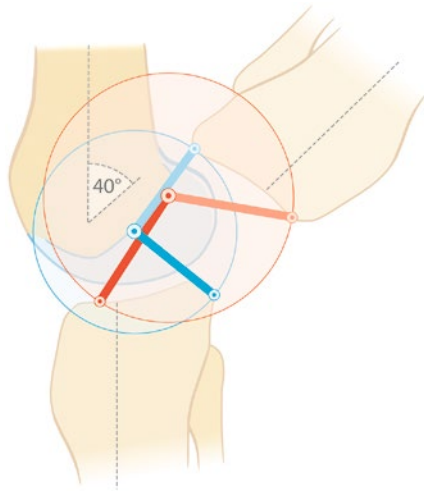
■ Abb. 2.1 Die beiden Kreuzbänder bewegen sich während der Extension/Flexion nach dem Prinzip des überschlagenen Gelenkvierecks auf Kreisbahnen, wenn man das Kniegelenk schematisch auf eine Ebene reduziert



■ Abb. 2.2 Mit den sich auf Kreisbahnen bewegenden Kreuzbandinsertionspunkten gekoppelt kommt es physiologischerweise zur automatischen Rückverlagerung des femoralen Auflagepunktes auf dem Tibiaplateau



■ Abb. 2.3 Lagen die Ursprungspunkte der Kreuzbänder am Femur auf einer Linie, welche mit der Femurlängsachse einen Winkel von  $90^{\circ}$  bildet, dann ergäbe sich daraus eine Beweglichkeit von  $50^{\circ}$ - $0^{\circ}$ - $70^{\circ}$  Grad. (Nach Menshik 1974)



■ **Abb. 2.4** Nur wenn die femoralen Ursprungspunkte der Kreuzbänder auf einer Linie liegen, welche mit der Femurlängsachse einen Winkel von  $40^\circ$  bilden, ist von der Kinematik her die normale Beweglichkeit an einem Kniegelenk von  $5^\circ$ - $0^\circ$ - $145^\circ$  gegeben. Der Kreissektor (—) ventral vom vorderen Kreuzband deutet die mit dem vorderen Kreuzband verbundene Hyperextensionsproblematik an

Notch von »Durchschnittskniegelenken« unterscheiden. Interessanterweise finden sich diese gerade bei Patienten mit Hyperextension (Howell et al. 1992). Dies kann als Anpassung der Form auf die Überstreckbarkeit und den fehlenden Widerstand des Kreuzbandes gewertet werden.

Auch das hintere Kreuzband hat in maximaler Flexionsstellung einen Anschlag am knöchernen Dach zwischen den Kondylenrollen. Dieser Anschlag in der Endstellung ist nicht so verletzungsgefährdend für das hintere Kreuzband, wie es der Hyperextensionsanschlag für das vordere ist (■ Abb. 2.5).

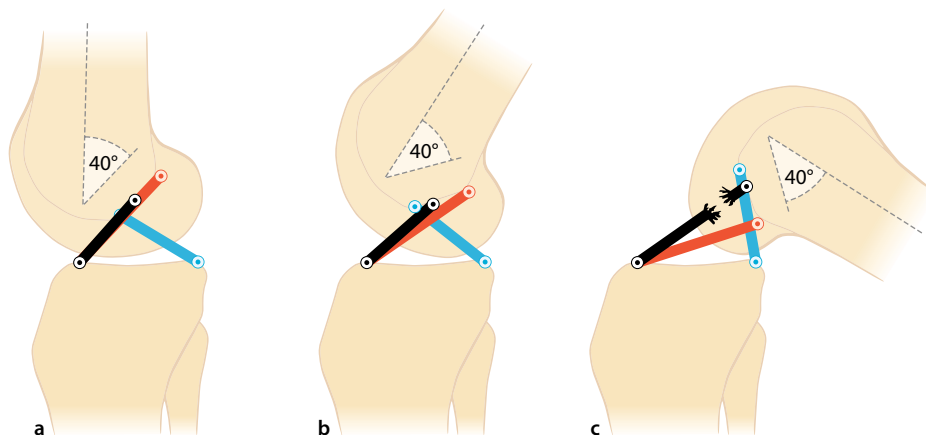


■ **Abb. 2.5a,b** a Anatomisches Schnittpräparat sagittal in der Medianebene (Präparat: v. Hochstetter) und b Erläuterungsskizze bestätigen die extreme Kreuzbandlage bei passiv erreichter maximaler Flexion, bei welcher das hintere Kreuzband schon etwas abgeknickt verläuft

### 2.1.2 Die Folgen falscher Reinsertion abgerissener vorderer Kreuzbänder

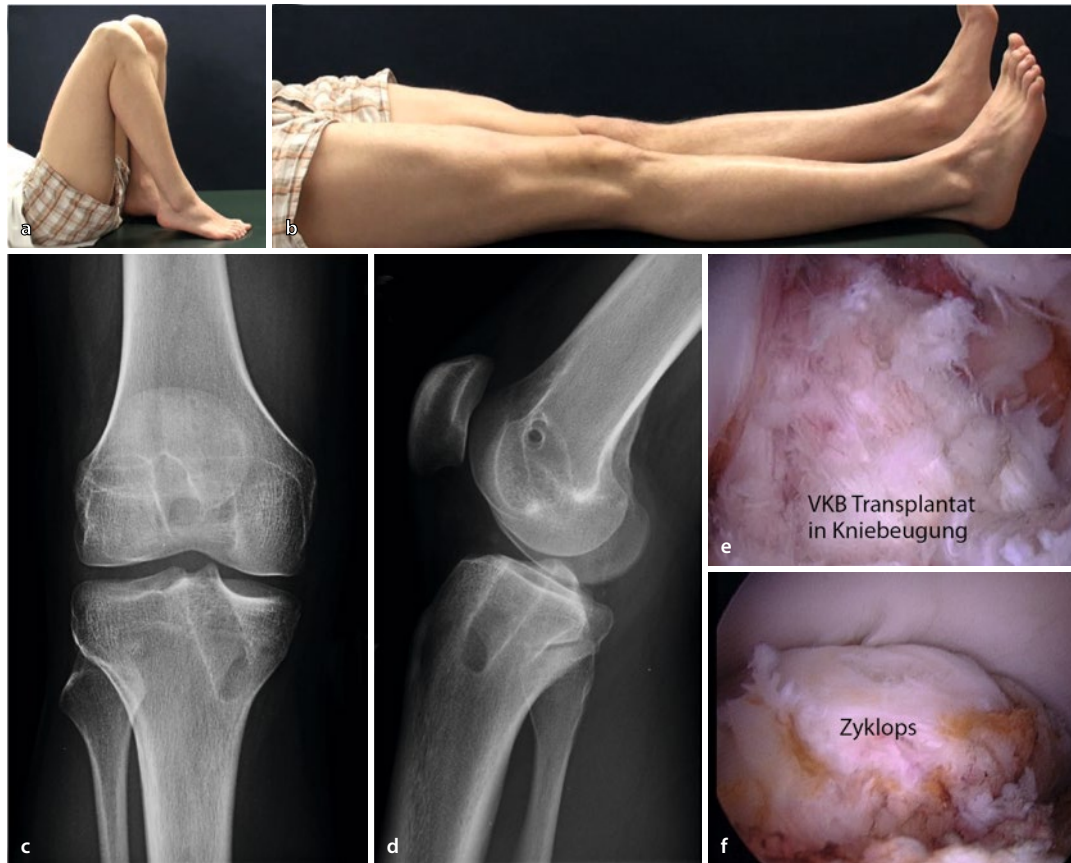
Es geschieht häufig, dass bei Kreuznähten und -rekonstruktionen die Insertion zu weit ventral im Dach der Fossa intercondylaris

erfolgt (■ Abb. 2.6). Dies hat zur Folge, dass das bei Flexion zu kurze vordere Kreuzband die Flexion verhindern würde. Dafür ist das Band bei den gegebenen Hebelarmen und Muskelkräften zu schwach. Als schwächstes Glied muss es bei der Flexion also einreißen oder überdehnt werden. Dies betrifft



■ **Abb. 2.6a–c** Falsch eingesetzte Kreuzbänder können sich während einer Flexion nicht auf Kreisbahnen bewegen; so erschlafft ein zu weit nach (a) ventral refixiertes vorderes Kreuzband bei ca.  $40^\circ$  Flexion (b). Bei  $120^\circ$  Flexion muss es wegen mangelnder Länge zerreißen (c)





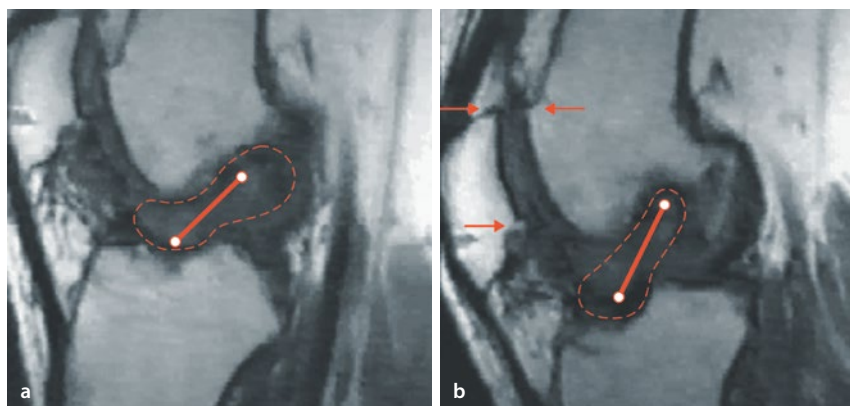
■ **Abb. 2.7a–f** Aktiver Sportler mit Beuge- (a) und Streckdefizit (b) 2 Jahre nach Kreuzbandrekonstruktion mit weit ventral (c, d) gelegenen Bohrkanal femoral: Durch die Zunahme der Spannung in Flexion (e) kommt es zu erhöhtem Knorpeldruck femorotibial und damit verbundenen Gelenkknorpelschäden, sowie zur Transplantatschädigung mit Zykllopsbildung und Streckhemmung (f) und Bohrkanalerweiterung (c, d)

nicht nur das Band, sondern auch die Bandfixation (■ Abb. 2.7). Abgebrochenes Verankerungsmaterial kann dann zum Reizzustand mit chronischer Synovialitis führen und für eine entsprechende sekundäre Destruktion des Knorpels verantwortlich sein.

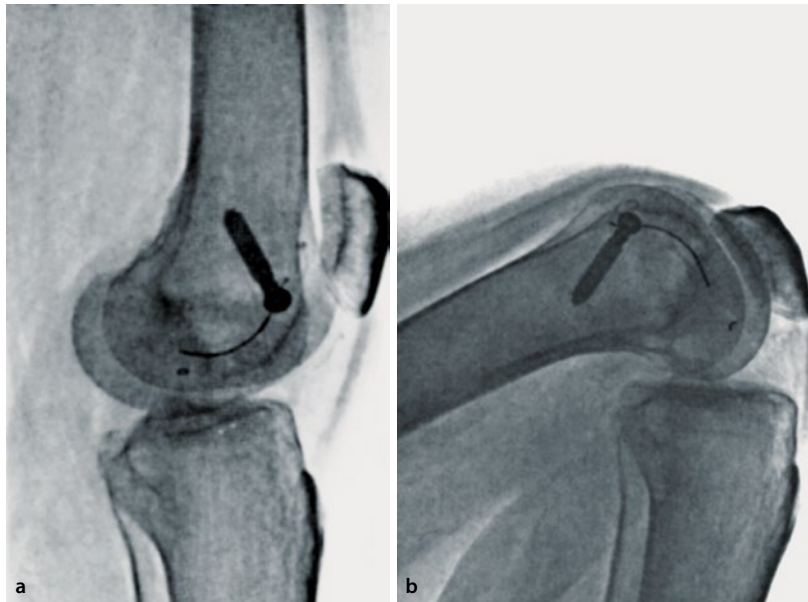
Die Bewegungsbilder zweier solcher Fälle belegen das Fehlverhalten des falsch reinsertierten Kreuzbandes durch die sichtbare Drahtnaht (■ Abb. 2.8). In Extension (links im Bild) sind die

Bruchenden des Drahtes beisammen, während sie in Flexion weit auseinander liegen (■ Abb. 2.6).

Die kinematographische MRT hat diese Beobachtungen untermauert. Eine ventrale Position des tibialen Bohrkanals führt zum vorzeitigen Kontakt des Transplantats mit dem Interkondylendach und verursacht pathologisches Impingement. Eine anteriore Position des femoralen Bohrkanals führt zu einer Überdehnung des Transplantats in der Flexion. Die Folgen kön-



■ **Abb. 2.8** Kniegelenk wie in ■ Abb. 2.7 mit falsch rekonstruiertem vorderem Kreuzband. In Streckstellung zeigt das Transplantat ein pathologisches Impingement durch vorzeitigen Kontakt mit dem Interkondylendach, die Stabilität des Gelenkes bleibt erhalten, während am flektierten Kniegelenk das Transplantat unter Zug gerät und die Flexion einschränkt



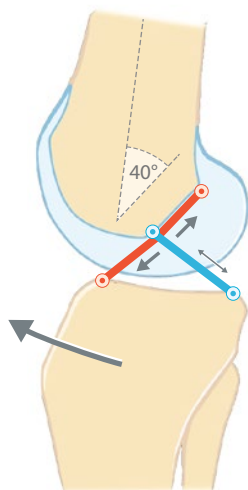
■ **Abb. 2.9a,b** Weiteres historisches Dokument eines falsch, zu weit proximal-ventral reinserierten vorderen Kreuzbandes mit Ermüdungsfraktur der Drahtnaht. In Extension sind die Rissenden beisammen (a), in Flexion besteht eine erhebliche Diastase (b). Man beachte auch die Patella-Femur-Relation in Extension

nen ein Versagen des Transplantats oder retropatellare Knorpelschäden durch Druckerhöhung während der forcierten Flexion sein (■ Abb. 2.6a).

### 2.1.3 Hyperextension und vorderes Kreuzband

Die schwungvolle Hyperextension in Innenrotation mit viel kinetischer Energie oder auch die Hyperextension mit passiver Gewalt kann das vordere Kreuzband (VKB) an der vorderen Kondylendachkante verletzen (■ Abb. 2.10). Genau dort befindet sich nach Grant und Basmajian (Grant et al. 1965) eine Rinne, in

welche das vordere Kreuzband bei Extensionsstellung zu liegen kommt. An der Kante dieser »Notch« von Grant kann es bei Hyperextension abgeknickt und zerrissen werden, während gleichzeitig die synergistischen Ligamentstrukturen medial im Semimembranosuseck und lateral im Popliteuseck nur überdehnt sein können. Einen besonderen Stellenwert hat dies für hyperlaxe Patienten, bei denen häufig die Kombination einer gotischen Notch, eines steilen Interkondylendachs, zu einem ausgeprägten Impingement des VKB in der Extension führt. Diese zumeist weiblichen Individuen zeigen eine Prädisposition zu VKB-Rupturen, die Rekonstruktion des VKB stellt eine besondere Herausforderung dar.



■ **Abb. 2.10** Die Hyperextensionsbewegung mit Schwung (großer Pfeil) führt vor allem in IR zu großen Spannungs Kräften im vorderen Kreuzband (dicke kurze Pfeile), welches zudem am Vorderrand der Fossa intercondylaris eine zunehmende Abknickung erleidet. Auch das hintere Kreuzband wird gespannt (dünner Pfeil)

### 2.1.4 Vorderes Kreuzband und Menisken

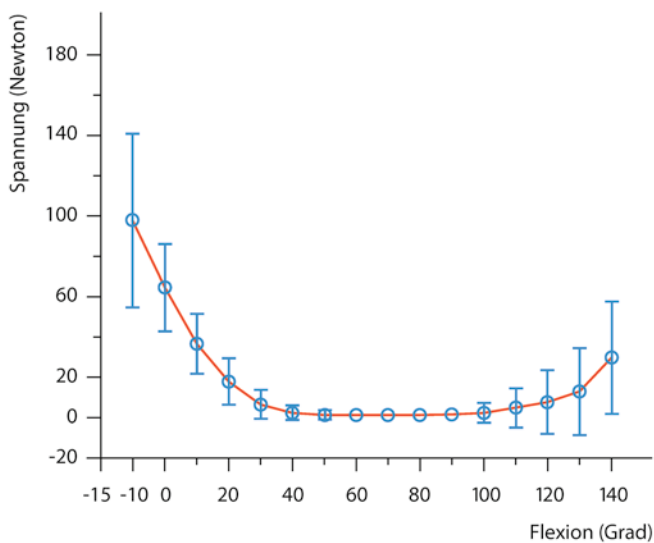
Die beiden Sagittalschnitte durch das mediale und das laterale Gelenkkompartiment (■ Abb. 2.13 und ■ Abb. 2.14) veranschaulichen, wie wenig Kongruenz das Knie von der Form der Knochen und der Gelenkflächen her aufweist. Die vorhandene Kongruenz ist eine rein funktionelle, deren Kernstück das Getriebe der Kreuzbänder bildet. Alle anderen passiven und dynamischen Strukturen richten sich danach aus, so auch die Menisken. Diese verbessern die momentanen Kongruenzverhältnisse, müssen aber bei jeder Bewegung ausweichen, damit sie nicht bei der Verlagerung des Auflagepunktes des Femurs unter die »Räder«, d. h. unter die Kondylenrollen, kommen.

### 2.1.5 Kreuzbandinsuffizienz und Meniskusläsion

Wie Artmann und Wirth (1974) demonstrieren konnten, führt die vordere Kreuzbandinsuffizienz tatsächlich zu einer Desinte-



■ **Abb. 2.11a–d** Bei Patienten mit Hyperlaxität kommt es in der vollen Extension zu einer enormen Dehnung des vorderen Kreuzbands entlang der Interkondylennotch (b, großer Pfeil). In der 0-Grad Stellung sind zwar die Fasern des vorderen Kreuzbands gespannt, jedoch verlaufen diese parallel zum Interkondylendach. Klinisches Bild (a, c) und sagittales MRT (b, d)



■ **Abb. 2.12** Ein knöchern ausgelöstes und mit einem Kraftsensor reinseriertes vorderes Kreuzband nimmt während der Passivbewegung zwischen 10 Grad und 120 Grad Beugung kaum Last auf. Die stärkste Spannungszunahme erfolgt in voller Extension. (Aus Jagodzinski et al. 2006)



■ **Abb. 2.13** Sagittalschnitt durch die mediale Kniegelenkhälfte. Er zeigt die Kontaktsituation Femur/Tibia mit nur punktförmiger Auflage des Femurs auf der Tibia. Hier wird auch deutlich, wie am Kniegelenk die Stabilität nicht von der Knochenform und der Kongruenz der Gelenkflächen gegeben ist, sondern dass die ganze Stabilisierung vom ligamentären System übernommen werden muss. Man beachte die Lage der Menisken und des Hoffa-Fettkörpers, die Grenzmulde zwischen femoropatellarer und femorotibialer Gelenkfläche am Femur und die Kontaktfläche der Patella. (Präparat: v. Hochstetter)

gration der Roll-Gleit-Bewegung, also zu einem Zerfall in partielles Rollen mit Nachholung des Gleitens.

Das Femur rollt bei zerrissenem vorderem Kreuzband auf den Meniskus und dessen Hinterhorn hinauf und gleitet auf ihm förmlich zurück (■ Abb. 2.14, ■ Abb. 2.15). Die in der Originalausgabe beschriebenen Szenarien der zunächst ein- und später zweiseitigen Menishektomie mit konsekutiver Bandplastik gehören heute der Vergangenheit an. Das Verständnis um die herausragende Bedeutung der Menisken zum Erhalt der Integrität des Kniegelenks hat aus der Ära der Menishektomien eine Ära der Meniskusnähte und der partiellen Resektionen hervorgebracht sowie Implantationen von Meniskusersatzprodukten und Meniskustransplantationen.

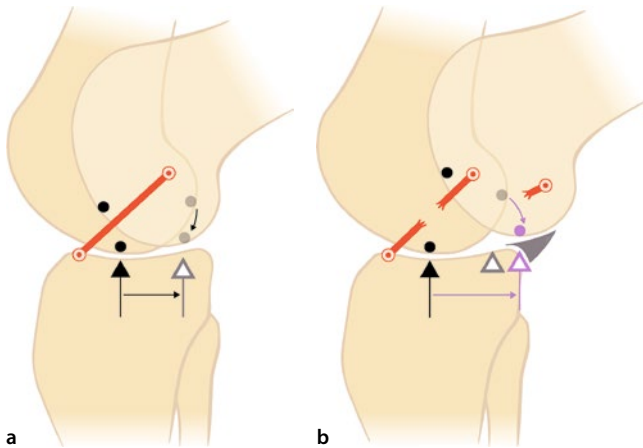
Der Zerfall der funktionellen Kongruenz bei vorderer Kreuzbandruptur verursacht später, wie das Olsson et al. (1972) am Hund beschrieben haben, zur Bildung von reaktiv-degenerativen Osteophyten. So führt dieser Circulus vitiosus weiter über die Instabilität und den Spätschaden zur Arthrose. Auch wenn die veränderte femorotibiale Kontaktfläche und die Abnahme der

Knorpeldicke nach VKB-Ruptur belegt wurden (Scarvell et al. 2005, Frobell et al. 2011), ist bis heute keine Studie existent, die den protektiven Effekt einer VKB-Rekonstruktion auf die Arthroserate belegt (Streich et al. 2011).

➤ **Gut dokumentiert ist allerdings, dass ein intaktes oder anatomiegerecht rekonstruiertes VKB vor Meniskusrissen schützt (Frobell et al. 2010) und dass es Sportlern, vor allem Fußballspielern, die Weiterführung ihrer Karriere über Jahre ermöglicht, was ohne den VKB-Ersatz nicht gewährleistet wäre.**

Gudde und Wagenknecht berichteten 1972 über 50 Fälle mit sehr schlechten Resultaten nach medialer Menishektomie bei unbehandelten vorderen Kreuzbandläsionen. Sie fanden bei der Nach-





■ **Abb. 2.14** Funktion des intakten vorderen Kreuzbandes (a). Der Ausfall seiner Funktion führt zu einem Überschießen der Rollbewegung (b), was sowohl medial als auch lateral eine pathologische Rückverlagerung des Femurauflagepunktes zur Folge hat. Dadurch werden die Meniskushinterhörner als nächste Beanspruchungslinie über Gebühr zur Abbremsung dieser Rollbewegung eingesetzt und erliegen damit einer chronischen Abnutzung mit Usur. a regulärer Auflagepunkt in Flexion; b pathologischer Auflagepunkt bei vorderer Kreuzbandinsuffizienz

kontrolle an diesen Kniegelenken passive Hyperextensionsmöglichkeiten, vordere Schubladen zwischen 10 und 20 mm und Arthroseosteophyten.

Vor allem bei aktiven Sportlern zeigen Meniskusnähte bessere Heilungsraten, wenn keine vordere Knieinstabilität vorliegt.

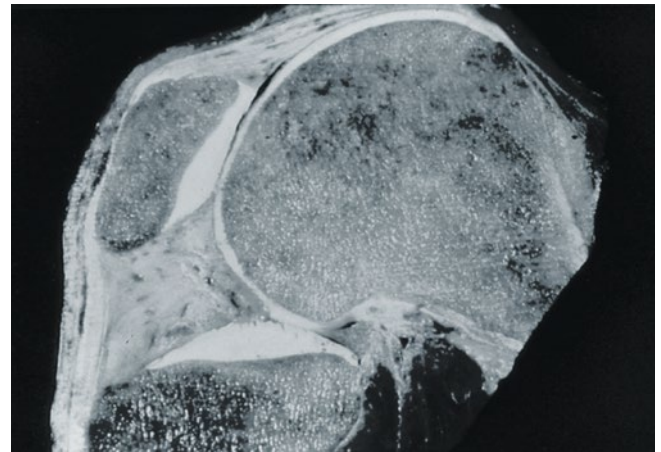
### 2.1.6 Die vordere Kreuzbandinsuffizienz und das Lateral-Pivot-shift-Phänomen

Slocum und Larson lenkten 1968 die Aufmerksamkeit auf die pathologische Rotationsfreiheit bei kombinierten Instabilitäten und gaben damit dem Studium über die Auswirkung von Rupturen der einzelnen Ligamente eine neue Richtung.

Die Namen der Kanadier Macintosh und Galway (1980) sind heute mit dem Begriff des »lateral pivot shift« eng verbunden. »When I pivot, my knee shifts« – von dieser Patientenschilderung leitet sich der klinische Begriff des »pivot shift« ab. 1972 schrieb Galway einen ersten Bericht, bis heute sind zahlreiche Quantifizierungsversuche des »pivot shift« unternommen worden.

Der Verdacht lag nahe, dass die Insuffizienz des vorderen Kreuzbandes für dieses Subluxationsphänomen verantwortlich war, das ein ganzes Syndrom von Begleitveränderungen, wie Abflachung des Femurkondylus, Knorpelerosionen und laterale Meniskusrupturen nach sich ziehen konnte (■ Abb. 2.16). Segal et al. haben 1980 den zwangsläufigen Ablauf dieser Sekundärveränderungen topographisch und chronologisch dargestellt.

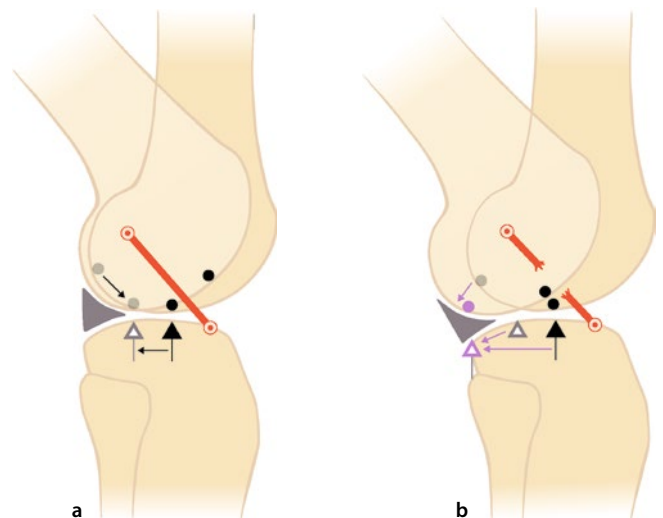
Jakob und Noesberger konnten 1977 am stabilen Leichenknie feststellen, dass die Durchtrennung des vorderen Kreuzbandes Grundbedingung für die Auslösbarkeit dieses Phänomens war. Eine zusätzliche Durchtrennung des medialen hinteren tiefen Ligamentes (Semimembranosuseck) und lateraler Strukturen verstärkte das Phänomen.



■ **Abb. 2.15** Sagittalschnitt durch die laterale Kniegelenkhälfte. Man sieht die Relation des Meniskushinterhorns zu der Femurkondylenrolle und dem Tibiaplateau bei starker Flexion mit dem sehr weit hinten liegenden Kontaktpunkt Femur/Tibia. Deutlich sichtbar ist auch die konvexe Form des lateralen Tibia-»Plateaus« und die besonders große Schichtdicke des Gelenknorpels sowohl am lateralen Tibiaabschnitt wie auch an der Patella. (Präparat: Macintosh)

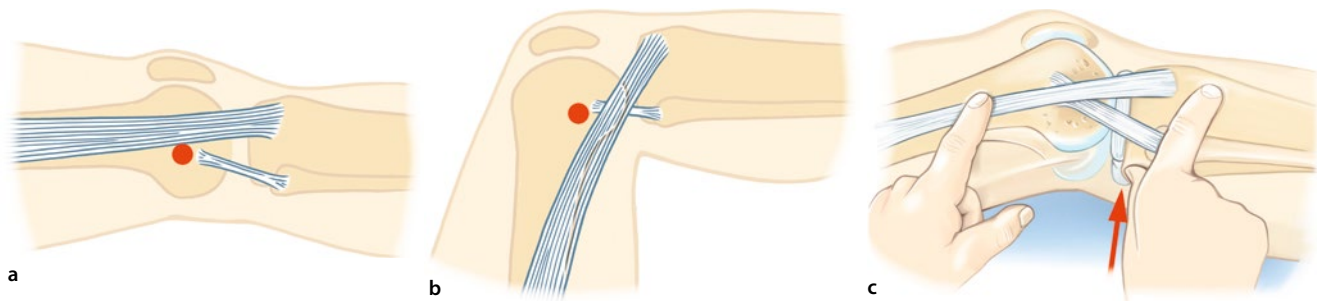
Bei völliger Durchtrennung der tiefen und langen Bänder auf der medialen Seite war das Phänomen nicht mehr auslösbar, weil das Knie nicht mehr, wie für diesen Test wichtig, unter Valgusstress gesetzt werden konnte. Auch Galway et al. sprachen 1979 von einem vorderen Kreuzbandinsuffizienzsyndrom.

Zur weiteren Erklärung des Phänomens muss kurz auf den Test von Macintosh (Galway und Macintosh 1980) Bezug genommen werden. Bei einer vorderen Kreuzbandinsuffizienz gibt es bei ca. 30–40° Flexion ein eindruckliches Subluxationschnappen, wenn das gestreckte Knie unter Valgus- und Innenrotationsstress langsam flektiert wird.



■ **Abb. 2.16a,b** Bei Insuffizienz des vorderen Kreuzbandes rollt das Femur besonders leicht über die dorsale Hälfte des Tibiaplateaus hinunter. Dieses Phänomen liegt auch dem »lateral pivot shift«, einem klinischen Zeichen der vorderen Kreuzbandinsuffizienz, zugrunde





**Abb. 2.17a–c** Der Tractus iliotibialis als gemischt passives und aktives laterales Halteelement hat die physiologische Eigenheit, dass er während der Bewegung des Kniegelenks zwischen 0 und ca. 40° Flexion auf der Extensorenseite der Flexionsachse liegt (a). Bei der weiteren Flexion gleitet er über die Drehachse und damit den lateralen Femurkondylus nach hinten und funktioniert synergistisch mit den Flexoren (b). Auch diese Tatsache spielt beim Zustandekommen des Lateral-Pivot-shift-Phänomens eine Rolle. Der Pivot-shift Test kann nach Slocum in Seitenlage des Patienten unter Anheben des verletzten Unterschenkels durch Vor- und Zurückschieben der Tibia provoziert werden (c)

Beobachtet man diesen Vorgang am Kniegelenk kurz vor dem Schnapppunkt, dann sieht man einen zunehmenden pathologischen Vorschub der Tibia, der im Moment des Schnappens ruckartig verschwindet. Nach dieser Reposition finden sich Femur und Tibia wieder in einer dem Flexionswinkel entsprechenden normalen Relation zueinander. Das Phänomen veranschaulicht deutlich die Desintegration der Roll-Gleit-Bewegung als eine Folgeerscheinung der vorderen Kreuzbandsinsuffizienz.

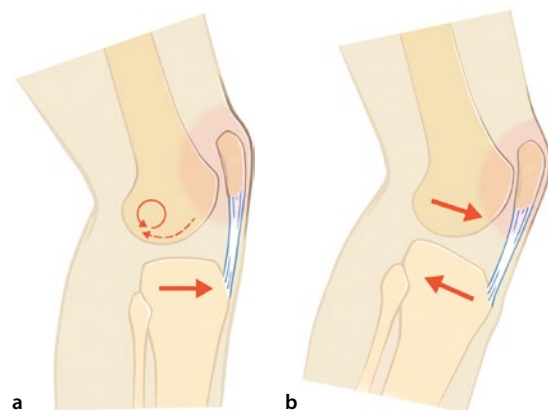
Wirth und Artmann stellten 1974 in einem anderen Zusammenhang die Entkoppelung der Roll-Gleit-Bewegung bei

Verlust des VKB fest. Die Desintegration der Roll-Gleit-Bewegung bedeutet in der hier vorliegenden Pivot-shift-Situation, dass das Femur bis zu 30° Flexion nur rollt und so zu weit nach dorsal auf dem Tibiaplateau zu liegen kommt (Abb. 2.18, Abb. 2.19). Begünstigt wird dies durch die kranialkonvexe Form des lateralen Tibiaplateaus, und erzwungen wird das Phänomen durch den starken Valgusdruck, der das Rollen gegenüber dem Gleiten favorisiert, wenn gleichzeitig durch die Innenrotation der Tibia der Tractus iliotibialis straff gespannt wird (Abb. 2.17). Der Tractus drückt die laterale Kondylenrolle mit ihrer dorsalen Y-förmigen Verbreiterung während des Rollens auf der Tibia nach hinten, bis er zwischen 30 und 40° Flexion den Kulminationspunkt der Rolle und gleichzeitig die momentane Flexionsachse überstrichen hat. In diesem Moment kann das Femur wieder in die normale Auflageposition nach vorne zurückschnappen. Da das Femur via Hüftgelenk mit der Masse des Rumpfes verbunden ist, macht es die schnelle Bewegung nicht mit, sondern es ist die Tibia, welche gegenüber dem Femur zurückspringt (Abb. 2.20, Abb. 2.21).

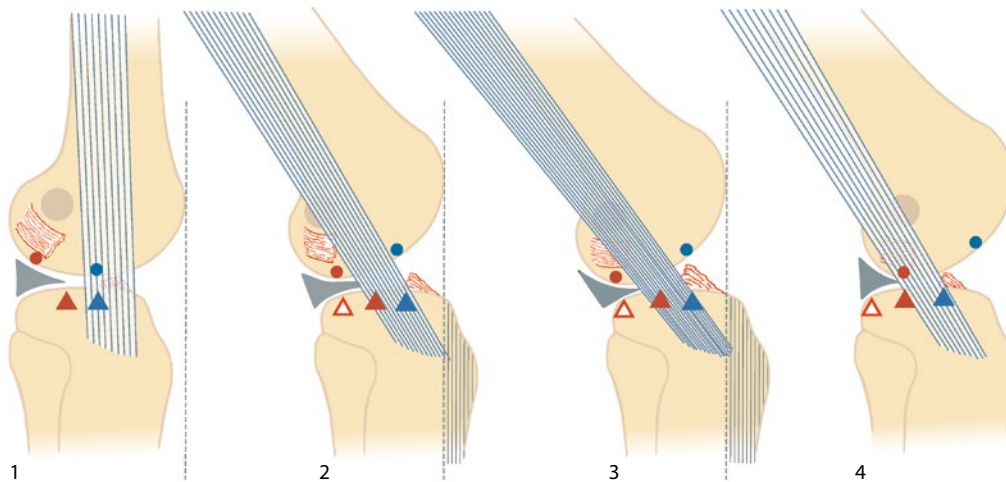
Zu dieser Erklärung muss man hier auf eine weitere Eigenheit der Kniephysiologie näher eingehen, ohne die das Phänomen in dieser Art kaum ausgelöst werden könnte.



**Abb. 2.18a,b** Silhouette des Tractus iliotibialis von der Aussenseite (a). Phasen eines Lateral-Pivot-shift-Phänomens. In Seitenlage wird präoperativ das Kniegelenk im von Slocum angegebenen Stresstest bis an den Punkt heran flektiert, wo man unmittelbar nach einem weiteren Flektieren das Schnapp-Phänomen beobachten kann. Hier wird der extrem gespannte Tractus iliotibialis, der noch ventral von der Flexionsachse zur Tibia zieht, und auch die vordere Schubladenposition der Tibia gezeigt (b). Diese ist nach Weiterführen der Flexion um wenige Grade in die Normalposition zurückgesprungen. Die Silhouette zeigt auch deutlich, dass der Tractus jetzt hinter der queren Flexionsachse durchzieht. Die dynamische Untersuchung zeigt Video 2.18 ([www.springermedizin.de/vzb-knie](http://www.springermedizin.de/vzb-knie))



**Abb. 2.19a,b** Die Skizze verdeutlicht in der Silhouette das vermehrte Abrollen (Drehpfeil und gestrichelter Pfeil) des Femurs nach hinten mit dem relativen Vorverschieben der Tibia (a) (gerader Pfeil) und die Reposition der beiden Gelenkteile im Moment des Zurückschnappens (b)



**Abb. 2.20** Schematische Darstellung des Lateral-Pivot-shift-Phänomens bei vorderer Kreuzbandinsuffizienz in 4 Phasen. **Phase 1.** Normale Ausgangsstellung in Streckung. **Phase 2.** Vermehrtes Nach-hinten-Rollen des Femurs bei der vorderen Kreuzbandinsuffizienz. Der Tractus iliotibialis verläuft noch ventral von der queren Flexionsachse und dem lateralen Kondylenhöcker. Die Tibia steht in vorderer Schubladenposition. **Phase 3.** Hält den Moment des Überschnappens des Tractus über die Flexionsachse und den Kondylenhöcker fest. Der Tractus ist am stärksten gespannt und die Tibia weist den größten Vorschub auf. **Phase 4.** Der Tractus liegt jetzt hinter der queren Flexionsachse und hinter dem Kondylenhöcker. Das Femur konnte in seine dem Flexionswinkel entsprechende Auflageposition an der Tibia nach ventral zurückschnappen. In umgekehrter Richtung konnte die Tibia sichtbar aus ihrer Vorschubposition in die normale Kontaktposition zum Femur zurückspringen. Dies wird während des Lateral-Pivot-shift-Phänomens deutlicher gesehen als die Bewegung des Femurs. Die nach proximal konvexe Wölbung des lateralen Tibiaplateaus (Abb. 2.15) spielt neben vorderer Kreuzbandinsuffizienz und Pathophysiologie des Tractus auch noch eine zusätzliche formbedingte Rolle beim Zustandekommen des Schnapp-Phänomens; • schematisch für Flexionsachse

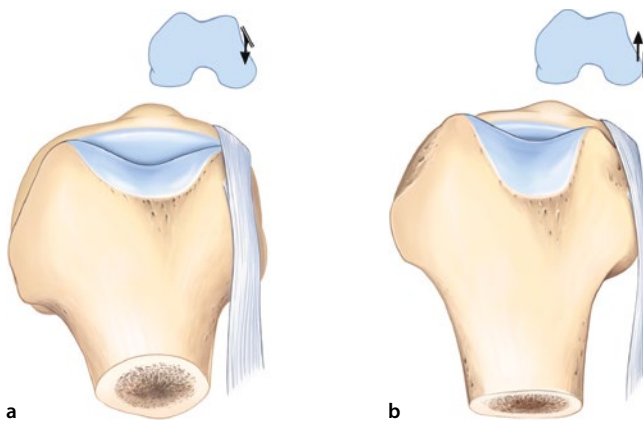
Der Tractus iliotibialis hat eine komplexe Aufgabe und spielt daher mehrere Rollen im Funktionsgeschehen. Er ist als Sehne des M. tensor fasciae latae mit diesem zusammen während einer Knieflexion von 0–30° Extensor und zwischen 40–145° Flexor des Kniegelenks. Die Passage über die momentane quere Flexionsachse erfolgt bei 30–40°-Flexionsstellung des Kniegelenks. Diese neutrale Funktionslage des Tractus wird auch beim Test

von Slocum (Slocum und Larson 1968) (Abb. 2.17c) für die Prüfung der Schubladenfreiheit ausgenutzt.

Gleichzeitig ist der Tractus ein sehr eindrucksvolles Beispiel für ein dynamisiertes Ligament. Er inkorporiert als Ausläufer des Septum intermusculare femorotibiale Bandfasern, welche vom proximalen Teil des Femurkondylus zum Tuberculum von Gerdy<sup>1</sup> an die Tibia ziehen. Dieser Bandanteil ist bei der anterolateralen Instabilität nicht mehr suffizient und spielt als Instabilitätsfaktor ebenfalls eine Rolle bei der Auslösbarkeit dieses Lateral-Pivot-shift-Phänomens. Mehr über dieses »femorotibiale Außenband« und dessen physiologische Bedeutung wird später berichtet.

Für die ausreichende Besprechung des Lateral-Pivot-shift-Phänomens ist zusätzlich von Bedeutung, dass das Femur umso weiter nach dorsal rollen und somit subluxieren kann, je größer die vordere Kreuzbandinsuffizienz und je größer auch die Insuffizienz des femorotibialen Bandanteils des Tractus ist. Die weiteren Tests von Hughston und Losee zur selben Problematik werden im Abschnitt »Untersuchung« (Kap. 4.2, S. 92 ff.) zur Darstellung kommen.

Obwohl die Quantifizierung des Lateral-Pivot-shift-Phänomens mit diversen Apparaten einschließlich der Navigation versucht wird (Tanaka et al. 2012), ist die Untersuchung wie auch der Lachman-Test stark von der Entspannung der Muskulatur, insbesondere der Kniebeugemuskulatur abhängig. Dies gelingt jeweils reproduzierbar in Narkose. Bei Patienten mit Abwehr-



**Abb. 2.21a,b** Tractus iliotibialis beim Zustandekommen des Pivot-shift-Phänomens (Transversalschnitt). In den ersten 40° Flexion, in welchen das Knie in IR und unter Valgusstress manuell langsam flektiert wird, drückt der Tractus die V-förmige Kondylenrolle rückwärts und zwingt sie in die reine Rollbewegung, wie das bei vorderer Kreuzbandinsuffizienz möglich wird. Sobald die Flexion zwischen 40 und 50° den kritischen Winkel überschritten hat, liegt der Tractus neben und hinter dem Kulminationspunkt des lateralen Femurkondylenhöckers und erlaubt diesem das Zurückschnellen in seine ungezwungene Normalposition. Der Tractus ist in diesen Fällen in seinem ligamentären Teil nicht mehr richtig via Septum intermusculare an der lateralen Kondylenrolle befestigt

<sup>1</sup> In der offiziellen Nomenklatur heißt dieses Tuberculum von Gerdy »Tuberositas tractus iliotibialis«. Die Bezeichnung nach dem französischen Anatomen Gerdy ist heute aber allgemein geläufig, weil sie eine Verwechslung der zwei nebeneinander liegenden Tuberositates (T. tibiae und T. tractus iliotibialis) vermeiden hilft.

spannung, Verletzung der medialen Stabilisatoren und bei arthrotischer Umformung des Gelenks mit Ausmoldung des Tibiaplateaus kann das Ausmaß der vorderen Knie-Instabilität stark unterschätzt werden (Tanaka et al. 2012).

## 2.2 Kollateralbänder

Entsprechend der Idealkonstruktion der Kreuzbänder als überschlagene Vieregelenkkette gibt es eine ideale Konstruktion für die Kollateralbänder. Auch diese können sich während des kinematischen Ablaufs auf einer zumindest angenäherten Kreislinie bewegen. Diese Strecke entspricht nur einem kleinen Sektor des Kreises bei bewegtem Femur (■ Abb. 2.22, ■ Abb. 2.23) und einem etwas größeren bei bewegter Tibia.

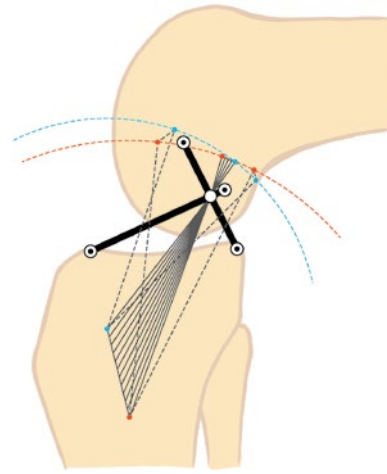
Menschik beschreibt 1974 nach Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule in Wien die »Burmesterkurve« und zitiert das 1888 erschienene Lehrbuch der Kinematik des Münchner Mathematikers Burmester.

Nach Burmester (in Menschik 1974, 1987) gibt es eine Kurve, welche sich aus einer sog. »Scheitelskubik« und einer »Angelkubik« zusammensetzt (■ Abb. 2.24). Diese Kurve ist für die Ansatzstellen der Ligamente am Knie von fundamentaler Bedeutung. Verbindet man einen Punkt auf der Scheitelskubik über einer Geraden, welche durch einen Kreuzungspunkt P der Vieregelenkkette geht, mit einem Punkt auf der Angelkubik, dann bewegen sich diese beiden Punkte bei Bewegungen der Kette derartig auf angenäherten Kreisbahnen, dass ihr Abstand voneinander auf der Geraden praktisch gleich bleibt. Dabei wird noch nicht ganz klar, inwiefern es im Idealfall wirkliche oder sonst nur annähernde Kreisbahnen sind. Auch wenn dieses Modell nicht für alle Fasern eines Bandes Gültigkeit besitzt, so lassen sich damit doch wesentliche Merkmale der Kinematik und der Anordnung der Bandstrukturen am Gelenk gut erfassen. Es erscheint deutlich einfacher als ein Finite Elemente Modell (FEM), das für jedes Gelenk einen individuellen Fingerabdruck ausdrücken kann (■ Abb. 2.24a) (Weiss et al. 2001). Tatsächlich bestätigen aktuelle FEM Berechnungen, dass für die Insertionen Flächen wichtiger werden als Punkte und dass diese eine hohe interindividuelle Streuung besitzen (Weiss et al. 2005, Siebold et al. 2012).

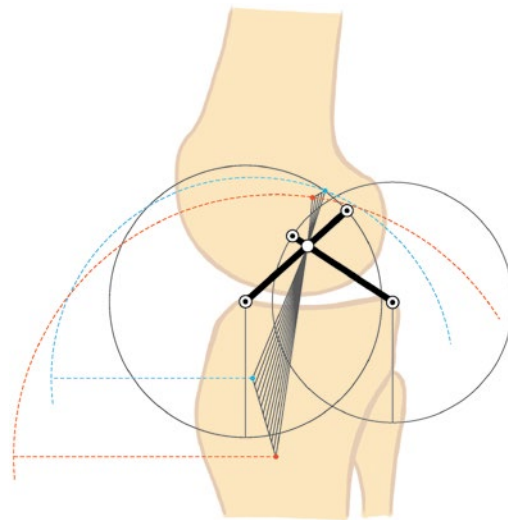
Für die weitere Darstellung wird das vereinfachte Modell mit den Kreisbögen verwendet. Die Bandansätze liegen an den theoretisch zu erwartende Stellen und auch der Verlauf der Ligamente entspricht der Theorie (■ Abb. 2.25).

### 2.2.1 Mediales Kollateralband

Verbindet man bei einer Flexionsstellung von 43° Punkte aus dem Kulminationspunkt der Angelkubikschleife unter Passieren des Kreuzungspunktes mit den dazugehörigen Punkten des absteigend auslaufenden Schenkels der Angelkubik, dann erhält man eine Konstruktion für das mediale Kollateralband, welche in Form und Länge dem natürlichen medialen Kollateralband entspricht (■ Abb. 2.26). Dieses weist in Wirklichkeit eine Überkreuzung des Faserwerks auf (■ Abb. 2.25). Es erweckt den Ein-



■ **Abb. 2.22** So wie sich die Insertionspunkte der ideal konstruierten Kreuzbänder auf einer Kreislinie bewegen, so bewegen sich auch die Insertionspunkte der in Faserzüge zerlegten Kollateralbänder im Idealfall auf Kreislinien. Die Seitenbandpositionen (---) zeigen die Endstellung in Extension und in Flexion an



■ **Abb. 2.23** Kreislinien (---) der Kreuzbandbewegungen; der kleinere Kreis gehört zum i. d. R. kürzeren, hinteren Kreuzband, der größere Kreis zum längeren, vorderen Kreuzband. Die gestrichelten Linien gehören zu den ventral und dorsal begrenzenden Randfasern des medialen Seitenbandes und ergeben ebenfalls einen kleineren Kreis für die ventralen und einen größeren für die dorsal an der Tibia ansetzenden Begrenzungsfasern

druck, als ob hier ein weiteres System einer überschlagenden Vieregelenkkette vorliege. In einer FEM ergeben sich für das mediale Seitenband Bandanteile, die während der unterschiedlichen Beugstellungen in unterschiedlicher Stärke belastet werden. Die Belastung erhöht sich dabei durch einen simulierten Valgus-/Rotationsstress von 5°, insbesondere in den strecknahen Winkelstellungen (■ Abb. 2.24a). Der am meisten isometrienähe Anteil des Lcm entspricht dem »prime static stabilizer« von Warren, Marshall und Girgis.

Das Knie

Form, Funktion und ligamentäre

Wiederherstellungschirurgie

Jagodzinski, M.; Friederich, N.F.; Müller, W.

2016, X, 210 S., Hardcover

ISBN: 978-3-642-45000-6