

## Differenzierte Transplantatauswahl in der Kreuzbandchirurgie

J. Höher und T. Tiling

Unfallchirurgische Abteilung Chirurgische Klinik Köln-Merheim,  
II. Chirurgischer Lehrstuhl der Universität Köln (Direktor: Prof. Dr. H. Troidl)

### Graft selection in cruciate ligament surgery

**Abstract.** Over the past century numerous graft materials have been used for the reconstruction of the cruciate ligament of the knee. Among the autologous tissues that are currently recommended as graft materials, the central bone patellar tendon bone graft, a quadrupled hamstring graft and the central quadriceps tendon graft have the greatest clinical significance. With some limitations, allograft materials can also be used. Each of the three mentioned grafts has specific features regarding morphological and structural properties, graft fixation and graft incorporation. Clinical studies have failed to identify any of the three grafts as superior to the others. When choosing the graft for surgery the different anatomy and function of the anterior and posterior cruciate ligaments have to be considered. For the treatment of multiple ligament injuries and for revision cases, thorough preoperative planning is necessary and modified graft selection may be required.

**Keywords:** Ligament reconstruction – Anterior cruciate ligament – Posterior cruciate ligament – Graft selection.

**Zusammenfassung.** In einer fast 100jährigen Entwicklung wurden zahllose körpereigene, körperfremde und synthetische Gewebe zum Ersatz der Kreuzbänder des Kniegelenks eingesetzt. Unter den derzeit favorisierten autologen Geweben haben das zentrale Patellarsehnen-drittel, eine gevierfachtes Sehnenransplantat des Pes anserinus (M. semitendinosus/M. gracilis) und ein zentrales Quadricepssehnenransplantat die größte klinische Bedeutung. Mit einigen Einschränkungen ist auch der Einsatz von Leichentransplantaten gerechtfertigt. Die einzelnen Transplantate weisen spezifische Unterschiede bezüglich der biomechanischen Eigenschaften, der Primärfixation und der Einheilung im Knochenkanal auf. In klinischen Studien konnte eine eindeutige Überlegenheit eines der genannten Transplantate nicht verifiziert werden. Bei der Transplantatauswahl müssen die unterschiedlichen anatomischen und funktionellen

Anforderungen des vorderen und des hinteren Kreuzbandes berücksichtigt werden. Bei der Versorgung komplexer Bandverletzungen und bei Revisionsfällen ist eine sorgfältige, präoperative Planung mit ggf. modifizierter Transplantatwahl erforderlich.

**Schlüsselwörter:** Bandersatz – vorderes Kreuzband – hinteres Kreuzband – Transplantatauswahl.

Die Kreuzbandchirurgie blickt auf ein Jahrhundert zurück, in der bei der Suche nach dem geeigneten Transplantat zum Kreuzbandersatz viele Wege beschritten wurden. Eine Vielzahl neuer Entwicklungen wurde in dieser Zeit publiziert mit einer kaum noch überschaubaren Literatur. Anhand der historischen Entwicklung bis zu den heute bevorzugten Transplantaten sollen die Vor- und Nachteile aufgrund morphologischer und biomechanischer Analysen beschrieben werden. Daraus folgernd werden die unterschiedlichen Entscheidungskriterien für die Auswahl des Transplantats für den vorderen und hinteren Kreuzbandersatz aus klinischer Sicht diskutiert.

### Historische Entwicklung der Transplantate zur Kreuzbandchirurgie

Verschiedene autologe Kollagengewebe in enger anatomischer Beziehung zum Kniegelenk wurden zur Rekonstruktion der Kreuzbänder seit ca. 1900 verwendet. Die erste autologe Kreuzbandplastik mit einem proximal gestielten Streifen aus dem Tractus ileotibialis zur Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes (VKB) geht auf Hey Groves 1917 zurück [36]. Derselbe Autor schlug auch die Verwendung von Pes anserinus-Sehnen zum hinteren Kreuzbandersatz vor [37]. In der Folge wurde von zahlreichen Autoren die Semitendinosussehne, die Gracilissehne und/oder ein Tractus ileotibialis Streifen als autologe distal gestielte Transplantate zum Ersatz der Kreuzbänder eingesetzt. Die verschiedenen Seh-

**Tabelle 1.** Derzeit empfohlene Transplantate zum Ersatz der Kreuzbänder*Autologe Gewebe:*

Autologes Patellarsehnentransplantat (Bone-Tendon-Bone/BTB)  
 Autologes Pes anserinus-Sehnentransplantat  
 (Semitendinosus-/ggf. zusätzlich Gracilissehne, mindestens 3 fach)  
 Quadricepssehnentransplantat

*Allografts (Leichengewebe):*

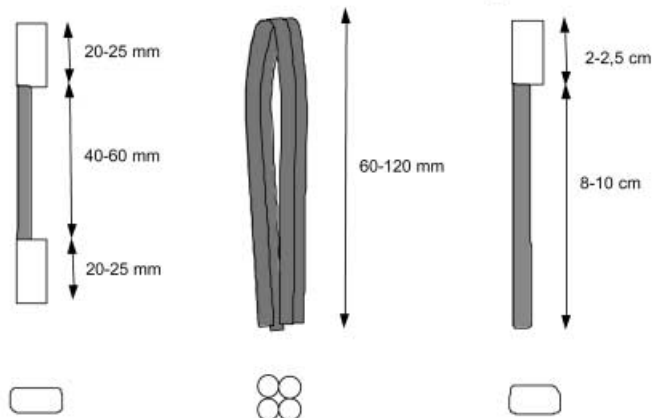
Patellarsehnentransplantat (Bone-Tendon-Bone/BTB)  
 Achillessehnentransplantat  
 Pes anserinus-Sehnentransplantat

nenstransplantate wurden durch Bohrkanäle in Femur und Tibia in das Gelenk eingezogen und in der Regel extraartikulär mit Nähten fixiert. Andere Konzepte beinhalteten eine proximal gestielte Sehnenplastik, bei der durch die erhaltene Muskulatur und den Durchzug der Sehne durch Bohrkanäle in das Gelenk ein dynamischer Stabilisierungseffekt erzielt werden sollte [52, 85]. Weitere Operationstechniken bei der Verwendung von Beugesehnen des Kniegelenks führten dadurch zu einem dickeren Sehnenstransplantat, daß ein gedoppeltes [51] gedreifachtes [47, 80] oder gevierfachtes Transplantat [24, 55, 71] geschaffen wurde. Ein wichtiger Schritt in der Entwicklung der Kreuzbandstransplantate war die Erkenntnis daß „freie“ gegenüber gestielten Transplantate keine verminderte Einheilung erfahren.

Teile der Patellarsehne wurden ebenso zu Beginn des Jahrhunderts als Ersatzgewebe eines Kreuzbandes zunächst distal gestielt eingesetzt [13]. In der Folge wurden Anteile des gesamten Streckapparats (Patellarsehne, Retinaculum, Quadricepssehne) oder auch ein zentrales oder mediales Drittel der Patellarsehne mit anhängigen Knochenblöcken verwendet [2, 16]. Die Entnahme von Knochenblöcken stellte einen wichtigen Entwicklungsschritt bei der Verwendung der Patellarsehne als Kreuzbandersatz dar. Seit den 80er Jahren wurde auch die Quadrizepssehne als Transplantat zum Kreuzbandersatz propagiert [8, 25, 81]. Auch Meniscusgewebe wurde von verschiedenen Autoren zum Ersatz der Kreuzbänder vorgeschlagen und klinisch eingesetzt [17, 86].

Bei autologen Sehnen wurden zunächst meist gestielte Sehnen unter der Vorstellung eingesetzt, die Vasularisation und damit die Einheilung der Sehne zu verbessern. Ähnliche Überlegungen führten beim Patellarsehnentransplantat zum Erhalt der Verbindung zum Hoffa'schen Fettkörper [63]. Beide Konzepte konnten sich klinisch nicht durchsetzen, da kein Vorteil gegenüber freien Transplantaten gezeigt werden konnte [63]. Die Verwendung freier Transplantate ermöglichte damit eine Weiterentwicklung der Operationstechniken bei autologen Geweben. Die positiven Erfahrungen „freier“ autologer Transplantate führten damit auch zur wissenschaftlichen Erprobung homologer Kollagengewebe von Leichenspendern. Diese haben inzwischen unter dem englischsprachigen Begriff „allografts“ Einzug in die klinische Anwendung gefunden.

Die 80er Jahre waren geprägt von der Einführung verschiedener synthetischer Materialien zum Ersatz

**Abb. 1.** Schematische Darstellung der häufigsten Transplantate zum Kreuzbandersatz: Zentrales Patellarsehnendrittel, gevierfachtes Pes anserinus-Sehnentransplantat, zentrales Quadricepssehnentransplantat

der Kreuzbänder. Neben verschiedenen Fabrikationen wie Kohlenstofffaser (Carbon; [15, 46, 87]), Polyester (Dacron; [18, 57, 66, 78]), Polypropylen (Kennedy-LAD; [48]) und Polytetrafluoräthylen (Gore-Tex), kam hierbei auch eine Bioprothese aus Rinderkollagen [91] zur klinischen Anwendung. In einem kritischen Rückblick muß festgehalten werden, daß die Vielzahl der innovativen Materialien zum Ersatz des vorderen und hinteren Kreuzbandes nicht die hohen Erwartungen der Erstbeschreiber erfüllen konnten, und aus diesem Grund in der aktuellen klinischen Praxis keine Bedeutung mehr haben. Eine Vielzahl an Patienten, die weiterer Revisionseingriffe nach nicht erfolgreicher Gelenkrekonstruktion bedürfen, sind ein „historisches Erbe“ dieser Erfahrungen der Vergangenheit und stellen eine besondere Herausforderung für die Planung neuerlicher Operationen dar.

In der aktuellen Diskussion um Transplantate zum Kreuzbandersatz werden nur autologe Sehnenstransplantate und, mit einigen Einschränkungen allografts, zum Ersatz der Kreuzbänder empfohlen. Bei den autologen Transplantaten kann die Verwendung der Patellarsehne, der Pes anserinus-Sehnen (gedrei- oder gevierfach) oder der Quadrizepssehne als Standard angesehen werden, alle übrigen Transplantate der Vergangenheit haben praktisch keine klinische Bedeutung mehr (Tabelle 1, Abb. 1).

**Patellarsehne (Bone patellar tendon bone = BPTB)**

Das zentrale Drittel der Patellarsehne mit anhängigen Knochenblöcken an beiden Enden ist das meist verwendete Transplantat zur Rekonstruktion sowohl des vorderen als auch des hinteren Kreuzbandes (HKB) [42]. Die Patellarsehne wurde am intensivsten wissenschaftlich untersucht mit den umfangreichsten und längsten klinischen Erfahrungen in der Literatur. Meist wird ein 9–11 mm breites Transplantat verwendet, die Knochenblöcke können mit Meißel, Säge oder oszillierender

Hohlfräse [10] entnommen werden. Die Länge der Patellarsehne variiert und liegt durchschnittlich bei 43 mm (Spanne: < 40 bis zu > 60 mm). Da die Dicke der Patellarsehne etwa 4 mm beträgt, ist ein 10 mm Transplantat deutlich breiter als dick. Die Knochenblöcke werden zur Implantation auf die entsprechende Größe präpariert.

Durch die Knochenblöcke wird die Ligament-Knocheninsertion der Kollagenfasern (mit einer Zone calcifizierter und uncalcifizierter Knorpelzellen) erhalten und die biologische Einheilung ist vom Einwachsen der Knochenblöcke im Bohrkanal abhängig. Die Primärfixation kann durch Einschlagen des Knochenblocks in press-fit Technik [10, 35], durch Interferenzschrauben [50] oder extraartikulär über Fadenarmierung [76] erfolgen. Bei adäquater Fixation ist mit einer Einheilung der Knochenblöcke innerhalb von 4 Wochen zu rechnen [59]. Bei einer langen Patellarsehne kann bei Verwendung der arthroskopischen Technik eine extraartikuläre Fixation des Knochenblocks an der Tibia mit Knochenklammern erforderlich sein [27].

Die Morbidität der Entnahme beinhaltet Schmerzen im Entnahmbereich und eine gestörte Funktion des Streckapparats mit Quadrizepsatrophie und Kraftminderung. Die Komplikation einer Patellalängsfraktur wird mit unter 1 % angegeben [42]. In bis zu 25 % können retropatellare Symptome oder Schmerzen beim Knien durch den Knochendefekt in der Tuberositas tibiae auftreten [73]. Hierdurch können besonders Patienten mit der beruflichen bzw. kulturell-religiösen Notwendigkeit zu knien beeinträchtigt werden.

### **Pes anserinus-Sehnen („hamstrings“)**

Ursprünglich wurde die Semitendinosusehne als distal gestieltes Sehnenstransplantat verwendet [14, 54]. Seit ca. 10 Jahren werden Pes anserinus-Sehnenstransplantate zunehmend zum Ersatz der Kreuzbänder klinisch eingesetzt. Derzeit wird ein mindestens drei-, besser aber ein viersträngiges freies Transplantat empfohlen, bei der entweder die Semitendinosusehne allein [82] oder aber in Kombination mit der Gracilisehne [1, 75] verwendet wird. Die Länge der Semitendinosusehne wurde in der Literatur mit 23 cm angegeben [23], jedoch kann bei Entnahme mit einem Sehnenstripper der aponeurotische Anteil der Sehne nach Ablösung des Muskelgewebes mit als Transplantat verwendet werden. Damit liegt die Länge fast immer über 26 cm und kann in Einzelfällen auch über 30 cm betragen. Bei Verwendung als Vierfachstransplantat wird die Sehne entweder halbiert und mit je 2 gedoppelten Sehnensträngen präpariert [55, 82] oder durch Vernähung der beiden Enden zu einem Schlauch geformt und einmal gefaltet „folded tube-Technik“ (Klein, W., pers. Mitteilung). Ein Vierfach-Semitendinosustransplantat hat meist eine Länge von 6–7 cm [82]. Die Gracilisehne ist gewöhnlich etwas dünner und kürzer als die Semitendinosusehne [11] und wird daher je nach Technik als gedoppelter Strang in Kombination mit der Semitendinosusehne verwendet. Ein Vierfachstransplantat aus der gedoppelten Se-

mitendinosus- und Gracilisehne weist damit eine größere Länge auf. Durch das Vorliegen multipler Stränge eignen sich Pes anserinus-Transplantate gut für eine Doppelkanaltechnik zur Rekonstruktion einzelner Bündel [21].

Als rein sehnige Transplantate sind Pes anserinus-Sehnen auf das Einwachsen der Sehnenoberfläche in den Knochenkanal angewiesen. Man kann diese Heilung als Bindegewebsheilung bezeichnen, die mit der Bildung quer zur Sehnenoberfläche verlaufender Kollagenfasern (sog. Sharpey-ähnlicher Fasern) verbunden ist. Zur Primärfixation können die Enden mit Fäden (z. B. Ethibond) oder Polyestertapes (z. B. Mersilene) armiert und diese extrakortical mit Titanplättchen, Titanringen oder über Schrauben geknüpft [55], direkt mit Knochenklammern am Periost fixiert [11] oder mit speziellen Interferenzschrauben mit abgerundeter Oberfläche (Metall oder resorbierbar) im Knochenkanal verblockt werden [75, 84]. Zahlreiche Varianten der Primärfixation wurden bei den Pes anserinus-Sehnenstransplantaten beschrieben. Jede Technik weist spezifische Vor- und Nachteile auf, die der Operateur kennen muß. Derzeit kann eine abschließende Beurteilung über die ideale Primärfixation nicht gegeben werden. Die Einheilung der Sehnenstransplantate in dem Knochenkanal wird aufgrund tierexperimenteller Untersuchungen mit 8–12 Wochen angegeben [70].

Bei Kenntnis der exakten Anatomie des Pes anserinus und Verwendung eines Sehnenstrippers ist zur Entnahme der Semitendinosus- und Gracilisehne lediglich eine kleine Hautinzision an der anteromedialen Tibia erforderlich. Wichtige technische Details der Entnahme sind die Identifizierung und Durchtrennung eines kräftigen Kollagenzügels zur Gastrocnemiusloge bei der Semitendinosusehne um ein zu kurzes Abtrennen der Sehne zu vermeiden [41, 65]. Die Entnahmemorbidität der Pes anserinus-Sehnen besteht initial in einer möglichen Hämatombildung in der Muskelloge und einem Kraftdefizit für die Flexion im Kniegelenk und für die Innenrotation der Tibia. Das Kraftdefizit kann nach Literaturangaben innerhalb von 9–12 Monaten nach der Entnahme kompensiert werden [90].

### **Quadrizepssehne**

Das zentrale Quadrizepssehnenstransplantat eignet sich sowohl zum Ersatz des vorderen als auch des hinteren Kreuzbandes [8, 25, 81]. Die Entnahmetechnik wurde von Fulkerson ausführlich beschrieben [26]. Das Transplantat wird mit einem Knochenblock aus der Patella am distalen Ende entnommen, welches ähnlich wie beim Patellarsehnenstransplantat in der Regel eine Länge von 20 mm aufweist. Das proximale Ende des Transplantats hat ein ca. 8–9 cm langes freies Sehnenende. Daher nimmt das Quadrizepssehnenstransplantat eine Zwitterstellung zwischen dem Pes anserinus und einem Patellarsehnenstransplantat ein, da es an einem Ende einer Weichteilfixation auf der anderen einer knöchernen Fixation und Einheilung bedarf. Aufgrund einer größeren Dicke der Quadrizepssehne ist der Durchmesser

des ligamentären Anteils etwa doppelt so groß wie der eines Patellarsehnentransplantats gleicher Breite [81]. Zur Armierung des freien Sehnenendes eignet sich entweder eine Bunellnaht oder eine modifizierte whipstitch Technik mit kräftigem Nahtmaterial (z. B. Ethibond, Stärke 3 oder 6 [25]). Da ein freies Sehnenende existiert kann durch eine Weichteil-Interferenzschraube eine gelenknahe Verankerung auf jeder Seite erfolgen. Eine Aufspaltung des freien Sehnenendes ermöglicht das Schaffen zweier unabhängiger Schenkel, die für eine 2-Kanal-Technik des HKB eingesetzt werden können. Zur Morbidität der Sehnenentnahme liegen nur wenig Angaben in der Literatur vor. Zur Transplantatentnahme ist in jedem Fall eine gesonderte Hautinzision erforderlich, die sich aufgrund der Lokalisation nicht mit der Schaffung anderer Bohrlöcher kombinieren läßt. Der Sehnenedefekt kann problemlos geschlossen werden, jedoch muß bei der Entnahme beachtet werden, den oberen Rezessus nicht zu eröffnen. Im Vergleich zum Patellarsehnentransplantat soll die Entnahme der Quadrizepssehne mit einer geringeren postoperativen Morbidität verbunden sein (Stäubli, persönliche Mitteilung).

### Allografts

Unter dem angloamerikanischen Begriff „allografts“ werden homologe (d. h. artgleiche aber speziesschiedene) Gewebe von Leichenspendern zusammengefaßt. Derzeit stellen allografts eine akzeptierte Alternative zu autologen Transplantaten unter der Voraussetzung dar, daß ein sorgfältiges Screening für mögliche Viruserkrankungen erfolgte, Sterilitätsgrundsätze bei der Entnahme und Aufbewahrung eingehalten wurden und daß eine adäquate Behandlung zur Konservierung (Tiefrierung oder Gefriertrocknung) erfolgte [42]. In klinischen und tierexperimentellen Studien wurde gezeigt, daß allografts ähnlich wie autologe Transplantate, revascularisiert werden und vital sind, d. h. ein Einwachsen von aktiven Bindegewebszellen erfahren [4, 44]. Allerdings scheint das Einwachsen gegenüber autologen Transplantaten langsamer zu erfolgen [44]. Im Vergleich mit autologen Transplantaten sind initial und nach Aufbewahrung unter Tiefkühlung [43, 89] die mechanischen und strukturellen Eigenschaften ähnlich. Durch den Vorgang des Einfrierens und Auftauens werden jedoch Schädigungen der Zell- und Bindewebsmatrix verursacht, die die langfristige Einheilung verzögern können [49].

Da Verfahren der sekundären Sterilisation wie Gassterilisation mit Äthylendioxid und Gammasterilisation toxisch bedingte Osteolysen am Knochen verursachen [45] bzw. die mechanischen Eigenschaften des Kollagens negativ beeinflussen [79], ist es derzeitiger Standard, allografts primär unter sterilen Bedingungen zu entnehmen und unter Tiefrierung in einem sterilen Milieu aufzubewahren. Die Übertragung viraler Erkrankungen (z. B. HIV, Hepatitis) ist trotz steriler Handhabung, entsprechend anderer Organtransplantationen, zwar gering jedoch nicht auszuschließen. Entsprechende Screenings bei den Spendern sind obligat.

Klinische Ergebnisse bis zu 7 Jahren nach Implantation von allografts zum Ersatz des vorderen Kreuzbandes zeigen vergleichbare Ergebnisse zu autologen Transplantaten [32, 60, 61]. Entzündliche bzw. immunologische Reaktionen auf die Implantation von allografts scheinen klinisch keine Bedeutung zu haben. Endgültige Daten liegen hierzu in der Literatur jedoch nicht vor. Die Indikation zur Verwendung von allografts wird von den meisten Chirurgen jedoch auf Revisionseingriffe, Eingriffe bei komplexen Instabilitäten und ältere Patienten beschränkt [42].

In Transplantationszentren können für den Eigenbedarf allografts im Rahmen der Explantation nach den o. g. Richtlinien entnommen und gelagert werden. Darüberhinaus können über kommerzielle Unternehmen aus Deutschland (Deutsches Institut für Zell- und Gewebeersatz GmbH, Berlin) oder aus den USA (z. B. Cryolife Inc., Kennesaw, Georgia) oder über die europäische Transplantatvergabestelle „Eurotransplant“ in Leyden, (Niederlande) im Bedarfsfall allografts per Kurierdienst kurzfristig bezogen werden. Generell sind Patellarsehnen als Bone-tendon-Bone-Transplantate, und Achillessehnen mit kalkanearum Knochenblock (halbiert oder ganz) verfügbar. Aus den USA können auch Pes anserinus-Sehnentransplantate bezogen werden. Der Lieferpreis schwankt in Abhängigkeit von der Herkunft der allografts zwischen DM 500,- und einigen Tausend D-Mark.

### Biomechanischer und struktureller Vergleich der Transplantate und Einheilungsverhalten

Ein biomechanischer und struktureller Vergleich der aktuell verwendeten Transplantate ist in Tabelle 4 gegeben. Es gilt zu berücksichtigen, daß die Angaben auf unterschiedlichen Studien beruhen, so daß auch Unterschiede des Studiendesigns und der Meßprotokolle für die gefundenen Unterschiede verantwortlich sein können. Weiterhin repräsentieren die Daten lediglich den Zeitpunkt Null nach der Operation. Neben Meßdaten wie Maximallast und Steifigkeit, kann der Transplantatquerschnitt für den Vergleich herangezogen werden. Für das biomechanische Verhalten der Transplantate nach der Implantation ist jedoch fast immer die Qualität der Primärfixation verantwortlich. Eine biomechanische Evaluation der Kreuzbandtransplante unmittelbar nach der Operation erfordert daher immer die Berücksichtigung des gesamten Konstrukts.

Das Einwachsen der Transplantate im knöchernen Bohrkanal ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Bei der Verwendung von Knochenblöcken am Transplantatende kann mit einer verlässlichen Integration der Blöcke im spongiösen Bohrkanal im Sinne der Knochenbruchheilung innerhalb von 3–4 Wochen gerechnet werden [42, 59]. Die mechanisch sensible und durch eine Zone calcifizierten und uncalcifizierten Knorpels charakterisierte Übergangszone zwischen Kollagenfasern und Knochen wird bei der Verwendung von Knochenblöcken erhalten [59].

Im Gegensatz dazu ist die Einheilung von reinen Sehnentransplantaten eine Bindegewebsheilung. Aus dem Hämatom zwischen Sehne und Knochenkanal entsteht durch die Bildung von Sharpey-ähnlichen Fasern eine mechanische Festigkeit der Sehnen-Knochen-Verbindung nach etwa 8–12 Wochen [70]. Jüngere Untersuchungen weisen darauf hin, daß die Festigkeit dieser Verbindung bei geringerem Totraum zwischen Sehne und Bohrkanal besser ist und daß eine Kompression der Sehne in Form von Interferenzschrauben die Bildung einer Knorpelzone zwischen Knochen und Sehnenoberfläche fördert [83]. Bis zum Vorliegen weiterer Untersuchungen gilt die knöcherne Einheilung über Knochenblöcke als die ideale Voraussetzung zum Einheilen des Transplantats im Bohrkanal [42].

Die Ergebnisse tierexperimenteller Studien zur Revascularisierung und zum Kollagenumbau von Kreuzbandtransplantaten weisen nach einer initialen Transplantatnekrose auf eine Gefäßneueinsprossung und einen allmählichen Umbau des Kollagengerüsts hin [3], bei dem jedoch nur etwa 60–80 der initialen Reißfestigkeit wiedererlangt werden [16]. Während in allen Tierversuchen dieser Umbau mit einer Phase einer deutlichen biomechanischen Schwächung des Transplantats einhergeht [29], sprechen die guten klinischen Erfahrungen der Frührehabilitation und Ergebnisse von Frühbiopsien gegen eine Nekrose und Schwächung des Transplantats im Menschen [47, 77]. Bezüglich des Kollagenumbaus konnten bislang keine Unterschiede zwischen autologen Patellarsehnen und Pes anserinus-Sehnentransplantaten gefunden werden. Wie bereits oben erwähnt scheint dieser Umbau bei allografts allerdings langsamer zu erfolgen.

Klinische Studien zum Vergleich zwischen einem zentralen Patellarsehnentransplantat und einem gevierfachen Pes anserinus-Sehnentransplantat konnten im wesentlichen keine Unterschiede im Outcome zeigen [1, 64]. Tendentiell erscheint jedoch bei einem Patellarsehnentransplantat die Rate von chondropathischen Beschwerden und Problemen beim Knien größer zu sein, während Pes anserinus-Transplantate eine etwas größere Laxizität aufweisen [20]. Die individuelle Transplantatwahl richtet sich in der klinischen Praxis oft nach der Einschätzung der Operateurs, welche im wesentlichen von seiner „operativen Schule“ und persönlichen Erfahrungen bestimmt wird. In Tabelle 5 sind die Vor- und Nachteile eines Patellarsehnen-, Quadrizepssehnen- und Pes anserinus-Sehnentransplantats zusammenfassend dargestellt.

### Das „ideale“ Transplantat und Entscheidungskriterien für die Transplantatwahl

Um ein geeignetes Transplantat zum Kreuzbandersatz auszuwählen, sind Kenntnisse der strukturellen und funktionellen Eigenschaften der intakten Kreuzbänder eine wichtige Voraussetzung. Es gilt zu bedenken, daß beide Kreuzbänder keine parallele Faseranordnung besitzen, sondern verschiedene Faserregionen eine unterschiedliche Länge und Orientierung im Gelenk aufwei-

**Tabelle 2.** Eigenschaften des „idealen“ Transplantats zum Kreuzbandersatz

---

Leichte und rasche Entnahme/Verfügbarkeit
Keine Entnahmemorbidität (Schmerz, Funktionsverlust, etc.)
Vollständige Reproduktion der Insertionsanatomie und der Funktion individueller Faserbündel des intakten Kreuzbandes
Möglichkeit der rigiden Verankerung
Rasche Revascularisation und Einheilung an den Fixationspunkten
Endgültige mechanische und ultrastrukturelle Eigenschaften sollten dem Kreuzband eines jungen Erwachsenen entsprechen

---

**Tabelle 3.** Entscheidungskriterien zur Transplantatauswahl

---

Initiale mechanische und strukturelle Eigenschaften des Transplantats zum Zeitpunkt Null
Entnahmemorbidität
Einkanal- oder 2-Kanal (2-Bündel)-Technik
Transplantatfixation
Dauer und Qualität der Einheilung und biologischer Umbau
Einsatz als VKB- bzw. HKB-Ersatz
Notwendigkeit anderer Rekonstruktionen (bei komplexen Bandverletzungen, Knieluxationen)
Verfügbarkeit bei Sekundäreingriff bzw. Revisionen

---

sen. Darüberhinaus findet sich kein uniformes Spannungsverhalten der Fasern, sondern verschiedene Faserregionen sind in Abhängigkeit vom Gelenkwinkel und von der Art und Höhe der äußeren Kräfte auf das Kniegelenk gespannt [42]. Ein Transplantat mit paralleler Faseranordnung und uniformer Faserlänge kann daher lediglich einen unvollständigen Ersatz dieser komplexen Struktur und Funktion darstellen. Neben der mechanischen Funktion weisen die Kreuzbänder eine bislang unzureichend quantifizierbare, propriozeptive Funktion auf [42].

Die Eigenschaften eines „idealen Transplantats“ zur Rekonstruktion der Kreuzbänder sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Derzeit erfüllt kein Transplantat alle genannten Eigenschaften in perfekter Weise. Um dennoch für die spezifische, klinische Situation ein geeignetes Transplantat auswählen zu können, muß der Chirurg verschiedene Entscheidungskriterien berücksichtigen, die in der Folge näher dargestellt werden (Tabelle 3).

### Anforderungen an ein Transplantat zum vorderen Kreuzbandersatz

Die durchschnittliche Faserlänge des VKB wird mit 38 mm angegeben [28]. Funktionell unterscheidet man ein anteromediales und ein posterolaterales Faserbündel. Unter den experimentellen Bedingungen eines anterioren Tibiaschubs sind die inneren Kräfte im anteromedialen Bündel weitgehend gleichförmig bei verschiedenen Beugewinkeln des Gelenks, während das posterolaterale Bündel besonders in Strecknähe sehr hohe

**Tabelle 4.** Vergleich morphologischer und mechanischer Eigenschaften verschiedener Transplantate zum Kreuzbandersatz

	Maximallast (N)	Steifigkeit (N/mm)	Querschnitts-Fläche (mm <sup>2</sup> )	Länge (mm)
Normales VKB	2160 ± 157 [75]	242 ± 26 [75]	–	38 [23]
HKB-AL Bündel	1494 ± 390 [28]	306 ± 130 [28]	–	38–42 [23]
HKB-PM Bündel	242 ± 66 [28]	75 ± 31 [28]	–	–
Patellarsehne BTB (10 mm)	2977 ± 516 [14]	455 ± 56 [14]	36,8 ± 5,7 [70]	52,2 ± 4,8 [70]
Semitendinosus (einfach)	1216 ± 50 [54]	186 ± 9 [54]	8,6 ± 1,5	–
Gracilissehne (einfach)	838 ± 30 [54]	170 ± 11 [54]	13,6 ± 3,9	–
Semitendinosus/Gracilis (2 x 2 fach)	4090 ± 295 [25]	776 ± 204 [25]	52 ± 5 [25]	100–120mm
Quadricepssehne (ein Knochenblock, 10 mm)	2352 ± 495 [70]	325,6 ± 70 [70]	64,6 ± 8,4 [70]	86,4 ± 9,0 [70]

**Tabelle 5.****a Autologes Patellarsehnentransplantat***Vorteile:*

Knöcherner Fixationsmöglichkeit auf beiden Seiten  
Hohe primäre Maximallast und Steifigkeit  
Häufigstes Transplantat für den VKB und HKB-Ersatz mit den umfangreichsten und längsten klinischen Erfahrungen

*Nachteile:*

Möglichkeit der Entnahmemorbidität mit Schmerzen beim Knien und retropatellarer Symptomatik  
Längendiskrepanz (Überlänge) zum intakten VKB und damit Unmöglichkeit der insertionsnahen Fixation in allen Fällen

**b Autologes gevierfachtes Pes anserinus-Sehnentransplantat***Vorteile:*

Höchste primäre Maximallast  
Kosmetisch günstigste Entnahmemöglichkeit mit geringer Morbidität  
Nachahmung mehrerer Faserbündel durch Mehrfachstränge

*Nachteile:*

Biomechanisch ungünstige Primärfixation bei zahlreichen Techniken und damit kompromittierter Einheilung im Bohrkanal  
Verlust bedeutet (passagere) Schwächung eines VKB-Synergisten

**c Autologes Quadrizepssehnenentransplantat***Vorteile:*

Größere Dicke und Umfang des Transplantats im Vergleich zur Patellarsehne bei gleicher Breite  
Häufige Verfügbarkeit (besonders bei Revisionen), da seltene Nutzung als Primärtransplantat  
Kombination von Knochen- und sehniger Fixation ermöglicht eine knöcherner Fixationsmöglichkeit der einen und eine individuelle, insertionsnahe Fixation und der anderen Seite  
Größere Sehnenlänge als bei der Patellarsehne

*Nachteile:*

Zusatzinzision zur Entnahme  
Ggf. unsichere Sehnenfixation auf einer Seite des Transplantats

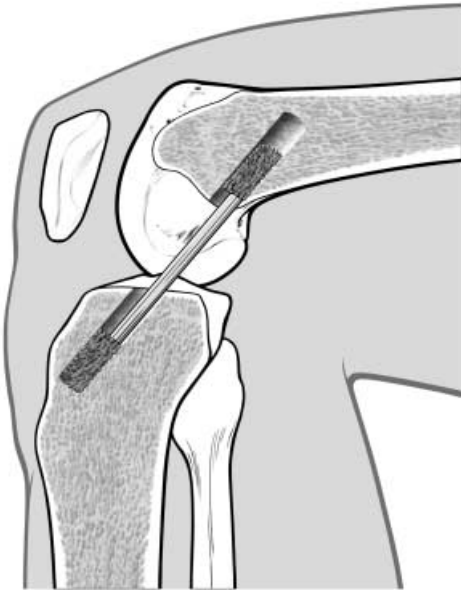
innere Kräfte aufweist [74]. Da die inneren Kräfte des posterolateralen Bündels des VKB in Strecknähe (der Hauptfunktionsstellung für das VKB) sogar größer sind als die des anteromedialen Bündels, erscheint eine Rekonstruktion dieses Faseranteils von großer Bedeutung für die spätere Funktion des Transplantats. Unter normalen Alltagsbelastungen sind die inneren Kräfte im VKB nur gering und liegen bei etwa 20 % der Versagenswerte [42]. Die strukturellen und biomechanischen Eigenschaften des intakten Kreuzbandes junger Erwachsener wurden unter Laborbedingungen bestimmt und dienen als

Referenz für die Beurteilung von Transplantaten. Für das VKB wurde eine Maximallast von 2160 ± 157 N und eine Steifigkeit von 242 ± 26 N/mm ermittelt [88]. Die Dehnung der Fasern des anteromedialen Bündels in vivo z. B. bei der aktiven Kniestreckung beträgt ca. 6 % [7], während die Elongation beim Versagen in vitro 15 % beträgt [88]. Während der Kniebewegungen entsteht besonders an der femoralen Insertion ein ständiger Wechsel der Insertionsrichtung der VKB-Fasern. Dies hat zur Folge, daß ein Transplantat besonders am femoralen Bohrkanaleingang einer hohen mechanischen Biegebelastung zu widerstehen hat. Besonders bei synthetischen Materialien wurde an dieser Prädilektionsstelle sowohl unter klinischen als auch unter experimentellen Bedingungen eine Ermüdung bzw. Ruptur beobachtet [22].

Beim Ersatz des VKB gilt konzeptionell die Platzierung von 2 Bohrkanälen in Femur und Tibia mit dem Ziel eines möglichst isometrisch bzw. anatomischen Faserverlaufs als die Methode der Wahl [42] (Abb. 2). Für diese Technik ist jedes einschenkelige Transplantat geeignet, was eine ausreichende Länge besitzt, um im Bohrkanal eine rigide Fixierung und die verlässliche Einheilung zu gewährleisten. Bei der Rekonstruktion in o.g. Weise wird die erforderliche, intraartikuläre Länge des Transplantats mit durchschnittlich 23 mm angegeben [56]. Für ein gevierfachtes Semitendinosustransplantat wird bei 20 mm gewünschter Länge in jedem Bohrkanal daher eine minimale Transplantatlänge von 65 mm gefordert [82].

Bezüglich der Zielvorstellung, ein Transplantat möglichst insertionsnah zu fixieren, ergibt sich bei Verwendung eines Patellarsehnentransplantats das Dilemma, das der ligamentäre Anteil des Transplantats zwischen den Knochenblöcken durchschnittlich um ca. 20 mm zu lang ist [56]. Im Einzelfall kann bei Ligamentlängen von 55–60 mm die Extralänge sogar bis zu 40 mm ausmachen. Während bei der 2-Kanal-OP-Technik der zusätzliche Sehnenanteil im Femur plziert wird, kann bei der Einkanaltechnik ein beträchtlicher Totraum im tibialen Bohrkanal entstehen. Dies kann postoperativ vermutlich über einen sogenannten „Scheibenwischer-effekt“ [39] zur Bildung eines bindegewebig ausgefüllten Totraums mit radiologisch sichtbarer Aufweitung der Bohrkanäle (Bohrkanalerweiterung) führen [67], deren klinische Bedeutung noch unklar ist.

Bei der Fixation von Pes anserinus-Sehnentransplantaten muß bei Verwendung einer gelenkfernen Fixation



**Abb. 2.** Schematische Darstellung eines Transplantats zur vorderen Kreuzbandplastik in arthroskopischer Einkanaltechnik am Beispiel des zentralen Patellarsehnendrittels

über Faden- und/oder Tapematerialien mit einer beträchtlichen Transplantatbewegung innerhalb des Bohrkannals, dem sog. Bungee- oder Hosenträger-Effekt [38] und einer Auslockerung der Fixation unter zyklischer Belastung in der postoperativen Phase gerechnet werden [40]. Die Verwendung modifizierter Fixationstechniken der Pes anserinus-Transplantate in jüngerer Zeit mit bioresorbierbaren Interferenzschrauben scheinen letztgenannte Probleme in geringerer Ausprägung aufzuweisen [84].

Von verschiedenen Autoren wurde eine bereits früher beschriebene [58] 2-Kanal-Technik propagiert [21, 72], bei der mit 2 verschiedenen Transplantatschenkeln der Semitendinosussehne das anteromediale und das posterolaterale Faserbündel über je 2 selektive Bohrkannäle rekonstruiert werden. Vergleichende klinische Studien zum Wert dieser Technik liegen derzeit nicht vor. Ebenso wenig konnte bislang unter experimentellen Bedingungen ein Vorteil der 2-Bündel-Technik dokumentiert werden.

### Anforderungen an ein Transplantat zum hinteren Kreuzbandersatz

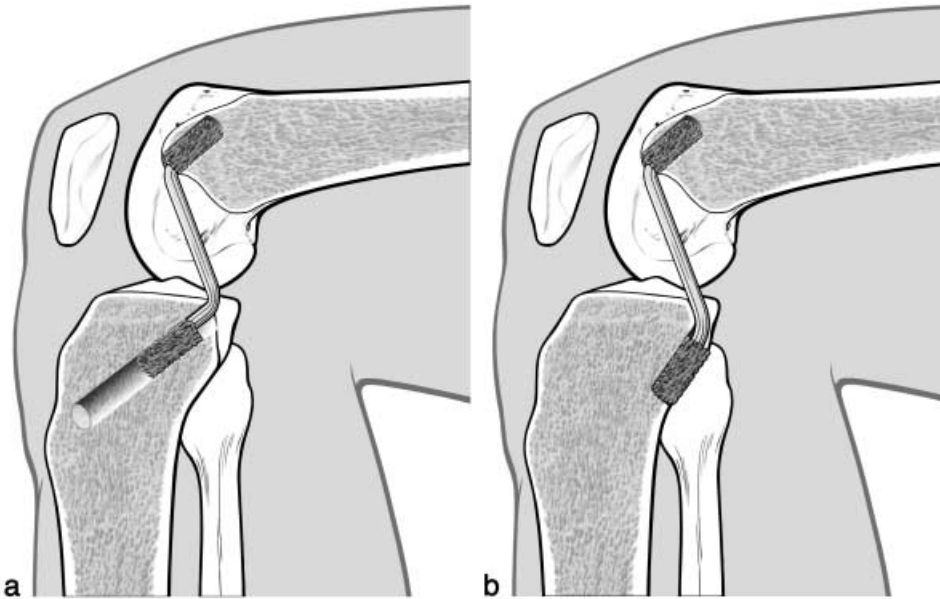
Im Gegensatz zum vorderen Kreuzband ist das hintere Kreuzband mit 38–42 mm länger als das VKB, und es weist eine noch komplexere Anatomie auf [28]. Funktionell unterscheidet man ein kräftiges anterolaterales und ein kleineres posteromediales Faserbündel [31]. Die Maximallast des anterolateralen Bündels wurde bei älteren Spendern mit ca. 1500 N bestimmt und die des posteromedialen Bündels mit 250 N [33]. Nach Extrapolation dieser Daten auf junge Erwachsene muß von einer Maximallast des HKB von bis zu 5000 N ausgegangen werden [68]. Während die tibiale Insertions-

fläche mit ca. 12 × 12 mm beschrieben wird, erstreckt sich die femorale Insertionsfläche über eine längsovale Länge von über 23 mm. Aus klinischer Sicht kann ein einschenkliges Transplantat die komplexe Funktion der 2 Faserbündel nur schwer übernehmen. Bei Entschluß zu einem einschenkligem Transplantat sollte in jedem Fall das anterolaterale Bündel rekonstruiert werden [31]. Experimentelle Untersuchungen stützen die Vermutung daß die Verwendung eines zweibündeligen bzw. Y-förmigen Transplantats mit 2 separaten femoralen Bohrkannälen biomechanisch günstiger ist als die herkömmliche Einbündeltechnik [34, 69]. Für eine femorale 2-Kanal-Technik können sowohl Pes anserinus-Transplantate als auch ein gesplittetes Quadrizepssehnen- oder Patellarsehnentransplantat verwendet werden.

Konzeptionell muß beim HKB-Ersatz zwischen einer tibialen Bohrkannaltechnik und einer direkten Fixation an der Dorsalseite der Tibia (sog. Inlay-Technik) unterschieden werden (Abb. 3). Die direkte Fixation wird in der Regel über die Schraubenfixation eines in einer Nut versenkten Knochenblocks an der Dorsalseite der Tibia erzielt [6]. Bei Anlage eines tibialen Bohrkannals erfährt das Transplantat eine starke Umlenkung am tibialen Bohrkannalausgang (sog. „killer turn“), welche eine lokale Streßbelastung des Transplantats an dieser Stelle und die Passage eines Knochenblocks beim Einziehen, wie z. B. bei einem Patellarsehnentransplantat erschweren kann [53]. Die intraarticuläre Abstand der Bohrkannäle wird mit 35 mm angegeben [56]. Bei Verwendung eines Patellarsehnentransplantats kann ein Problem in einer unzureichenden ligamentären Länge bestehen, so daß einer der Knochenblöcke in das Gelenk hineinragt [53]. Zur Vermeidung kann präoperativ die Patellarsehnenslänge anhand eines seitlichen Röntgenbildes abgeschätzt werden.

### Transplantatwahl bei komplexen Knieverletzungen und Revisionseingriffen

Bei komplexen Knieverletzungen richtet sich die Transplantatwahl nach dem Verletzungsmuster, der Intaktheit der autologen Transplantate und der Anzahl der geplanten Rekonstruktionen. Wenn Gewebe, die zur Transplantatentnahme vorgesehen sind, mitverletzt sind ist eine autologe Entnahme von der Gegenseite möglich oder die Verwendung von allografts indiziert. Falls beispielsweise nach Knieluxationen beide Kreuzbänder mit einem Bandersatz versorgt werden sollen, sind 2 Transplantate erforderlich. Nach Ansicht der Autoren eignet sich hierzu z. B. die Quadrizepssehne für den HKB-Ersatz und ein Pes anserinus-Transplantat zum Ersatz des VKB. Eine gleichzeitige Entnahme von Patellarsehne und Quadrizepssehne sollte vermieden werden, da durch die Entnahme von 2 Knochenblöcken aus der Patella die Gefahr einer Patellafraktur größer ist. Gleichzeitige Seitenbandinstabilitäten werden in der akuten Verletzung mit einer Primärnaht versorgt und erfordern daher kein autologes Transplantatmaterial. Bei der chronischen hinteren und posterolateralen Kniegelenkinstabilität dagegen wird neben dem HKB-



**Abb. 3.** Schematische Darstellung der hinteren Kreuzbandplastik am Beispiel des zentralen Patellarsehnedrittels in tibialen Bohrkanal (a) und tibialer Inlay-Technik (b)

Ersatz eine Rekonstruktion des posterolateralen Ecke empfohlen, so daß auch hier ein zweites Transplantat erforderlich ist. In diesen Fällen wird von den Autoren ein Quadricepssehnen-Transplantat für das HKB und ein Pes anserinus-Sehnen-Transplantat zur Rekonstruktion der posterolateralen Ecke bevorzugt. In den USA wird bei komplexen Knieverletzungen die Indikation zur Verwendung von allografts großzügig gestellt, insbesondere um dem Patienten die zusätzliche Entnahmemorbidität der autologen Materialien zu ersparen [31].

Bei Revisionsfällen richtet sich die Transplantatwahl nach den noch verfügbaren autologen Geweben und der sich durch die fehlgeschlagene Primäroperation bestehenden Pathologie des Knochens. Fehlplazierte Bohrkanäle oder ausgedehnte Bohrkanalerweiterungen können die Transplantatwahl hierbei wesentlich beeinflussen. Gewöhnlich wird bei einer fehlgeschlagenen Operation mit einer Patellarsehne eine Versorgung mit einem Pes anserinus-Transplantat der betroffenen Seite angestrebt und umgekehrt. Während bei Verwendung der Patellarsehne durch die Entnahme größerer Knochenblöcke evtl. vorliegende Bohrkanalauflösungen bzw. Fehllagen der Bohrlöcher oft kompensiert werden können, ist bei Pes anserinus-Transplantaten die Möglichkeit zur Anlage größerer Bohrkanäle eingeschränkt und wird vom Durchmesser des Transplantats bestimmt. Dem Quadrizepssehnen-Transplantat kommt bei allen Revisionsfällen der Kreuzbänder eine besondere Bedeutung zu, da die Verwendung der Quadrizepssehne als Primärtransplantat in fast allen Regionen wenig verbreitet ist. Generell wird von den Autoren in Revisionsfällen ein Transplantat mit einer knöchernen Fixationsmöglichkeit vorgezogen, da die Einheilung des neuen Transplantats durch einen bindegewebigen Sklerosarium im Bohrkanal bzw. einen Substanzverlust der Spongiosa beeinträchtigt werden kann.

Eine Modifikation der Transplantatfixation ist in Abhängigkeit von der Pathologie des femoralen oder tibialen Knochens bei der Transplantatwahl ebenso zu be-

rücksichtigen. Nach Ansicht der Autoren ist bei Revisionsfällen mit fehlender Verfügbarkeit an Transplantaten vom betroffenen Kniegelenk, die Entnahme eines autologen Transplantats der Gegenseite der Verwendung von allografts vorzuziehen. Bei Revisionen von HKB-Ersatzplastiken ist bei primärer Technik mit einem tibialen Bohrkanal ein Verwechslungswechsel mit einer Fixation mit Inlay-Technik zu erwägen.

## Literatur

1. Aglietti P, Buzzi R, Zaccherotti G, De Biase P (1994) Patellar tendon versus doubled semitendinosus and gracilis tendons for anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 22: 211; 217
2. Alm A (1973) Survival of part of patellar tendon transposed for reconstruction of anterior cruciate ligament. *Acta Chir Scand* 139: 443
3. Amiel D, Kleiner JB, Akeson WH (1986) The natural history of the anterior cruciate ligament autograft of patellar tendon origin. *Am J Sports Med* 14: 449
4. Arnoczky SP, Warren RF, Ashlock MA (1986) Replacement of the anterior cruciate ligament using a patellar tendon allograft. An experimental study. *J Bone Joint Surg Am* 68: 376
5. Bartsch H (1987) Operative Behandlung der chronischen Kniebandinstabilität und Erfahrungen mit über 870 PTFE-Prothesen. *H Unfallheilk* 189: 971
6. Berg EE (1995) Posterior cruciate ligament tibial inlay reconstruction. *Arthroscopy* 11: 69
7. Beynon B, Howe JG, Pope MH, Johnson RJ, Fleming BC (1992) The measurement of anterior cruciate ligament strain in vivo. *Int Orthop* 16: 1
8. Blauth W (1984) Die zweizügelige Ersatzplastik des vorderen Kreuzbandes aus der Quadrizepssehne. *Unfallheilkunde* 87: 45
9. Bolton CW, Bruchman WC (1985) The gore-tex expanded polytetrafluorethylene prosthetic ligament. *Clin Orthop* 196: 202
10. Boszotta H (1997) Arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction using a patellar tendon graft in press-fit technique: surgical technique and follow-up. *Arthroscopy* 13: 332
11. Brown Jr CH, Steiner ME, Carson EW (1993) The use of hamstring tendons for anterior cruciate ligament reconstruction. Technique and results. *Clin Sports Med* 12: 723



12. Brückner H (1966) Eine neue Methode der Kreuzbandplastik. *Chirurg* 37: 413
13. Campbell WC (1939) Reconstruction of the ligaments of the knee. *Am J Surg* 8: 473
14. Cho KO (1975) Reconstruction of the anterior cruciate ligament by semitendinosus tenodesis. *J Bone Joint Surg Am* 57: 608
15. Claes L, Neugebauer R (1985) In vivo and in vitro investigation of the long-term behaviour and fatigue strength of carbon fiber ligament replacement. *Clin Orthop* 196: 99
16. Clancy WG, Narechania RG, Rosenberg RD, Gmeiner JG, et al (1981) Anterior and posterior cruciate ligament reconstruction in rhesus monkeys. *J Bone Joint Surg Am* 63: 1270
17. Collins HR, Hughston JC, DeHaven KE, Bergfeld JA, Evans CM (1974) The mensicus as a cruciate ligament substitute. *Am J Sports Med* 2: 11
18. Contzen H (1985) Alloplastischer Bandersatz. *Unfallchirurgie* 11: 242
19. Cooper DE, Deng XH, Burstein AL, Warren RF (1993) The strength of the central third patellar tendon graft. *Am J Sports Med* 21: 818
20. Corry IS, Webb JM, Clingeffer AJ, Pinczewski LA (1999) Arthroscopic reconstruction of the anterior cruciate ligament. A comparison of patellar tendon autograft and four strand hamstring tendon autograft. *Am J Sports Med* 27: 444
21. Eichhorn HJ, Pröpper E (1999) Die Vorteile der vorderen Kreuzbandrekonstruktion mit der Doppelkanal- und Doppelbuttontechnik. 16. Kongress der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Arthroskopie. München
22. Ferl JG, Goldenthal KL, Mishra NK (1988) FDA regulation of prosthetic ligament devices. In: Friedman MJ, Ferkel RD (eds) Prosthetic ligament reconstruction. Saunders, Philadelphia
23. Ferrari JD, Ferrari DA (1991) The semitendinosus: anatomic considerations in tendon harvesting. *Orthop Rev* 20: 1085
24. Fowler PJ (1993) Semitendinosus tendon anterior cruciate ligament reconstruction with LAD augmentation. *Orthopedics* 16: 449
25. Fulkerson JP, Langeland R (1995) An alternative cruciate reconstruction graft: the central quadriceps tendon. *Arthroscopy* 11: 252
26. Fulkerson JP, Langeland RH (1996) The central quadriceps tendon graft for cruciate ligament reconstruction. *Oper Tech Orthop* 6: 135
27. Gerich TG, Cassim A, Lattermann C, Lobenhoffer P (1997) Pullout strength of tibial graft fixation in anterior cruciate ligament replacement with a patellar tendon graft: interference screw versus staple fixation in human knees. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 5: 84
28. Girgis FG, Marshall JL, Al Monajem ARS (1975) The cruciate ligaments of the knee joint: Anatomical and experimental analysis. *Clin Orthop* 106: 216
29. Grana WA, Egle DM, Mahnken R, Goodhart CW (1994) An analysis of autograft fixation after anterior cruciate ligament reconstruction in a rabbit model. *Am J Sports Med* 22: 344
30. Hamner DL, Brown C, Steiner ME, Hecker AT, Hayes WC (1999) Hamstring tendon grafts for reconstruction of the anterior cruciate ligament. biomechanical evaluation of the use of multiple strands and tensioning techniques. *J Bone Joint Surg Am* 81: 549
31. Harner CD, Höher J (1998) Evaluation and treatment of posterior cruciate ligament injuries. *Am J Sports Med* 26: 871
32. Harner CD, Olsen E, Irrgang JJ, Silverstein S, et al. (1996) Allograft versus Autograft anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Orthop* 324: 134
33. Harner CD, Xerogeanes JW, Livesay GA, Carlin GJ, et al (1995) The human posterior cruciate ligament complex: an interdisciplinary study. Ligament morphology and biomechanical evaluation. *Am J Sports Med* 23: 736
34. Harner CD, Jansushak MA, Kanamori A, Vogrin TM, Yagi M, Woo SL (2000) Biochemical analysis of a double bundle PCL reconstruction. *Am J Sports Med* 28: 144
35. Hertel P (1996) Frische und alte Kniebandverletzungen. *Unfallchirurg* 99: 686
36. Hey Groves EW (1917) The crucial ligaments of the knee joint: their function, rupture and the operative treatment of the same. *Br J Surg* 7: 505
37. Hey Groves EW (1920) The crucial ligaments of the knee joint: their function, rupture, and the operative treatment of the same. *Br J Surg* 7: 505
38. Höher J, Livesay GA, Ma CB, Withrow JD, et al (1999) Hamstring graft motion in the femoral bone tunnel using titanium button/polyester tape fixation. *J Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 7: 215
39. Höher J, Möller HD, Fu FH (1999) Bone tunnel enlargement. Fact or fiction? *J Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 6: 231
40. Höher J, Sakane M, Vogrin TM, Withrow JD, et al (1998) Viskoplastische Elongation eines gevierfachen Semitendinosussehnenkonstrukt mit Tape- und Fadenfixierung unter zyklischer Belastung. *Arthroskopie* 11: 52
41. Ivey M, Prud, Homme J (1993) Anatomic variations of the pes anserinus: a cadaver study. *Orthopedics* 16: 601
42. Jackson DW, Frank CB (1997) The science of reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Am* 79: 1556
43. Jackson DW, Grood ES, Cohn BT (1991) The effects of in situ freezing of the anterior cruciate ligament. An experimental study in goats. *J Bone Joint Surg Am* 73: 201
44. Jackson DW, Grood ES, Goldstein JD, Rosen MA, et al. (1993) A comparison of patellar tendon autograft and allograft used for anterior cruciate ligament reconstruction in the goat model. *Am J Sports Med* 21: 176
45. Jackson DW, Windler GE, TM S (1990) Intraarticular reaction associated with the use of freeze-dried, ethylene oxide-sterilized bone-patella tendon-bone allografts in the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 18: 1
46. Jenkins D (1988) Carbon fiber in ligament reinforcement. In: Friedman MJ, Ferkel RD (eds) Prosthetic ligament reconstruction. Saunders, Philadelphia
47. Johnson LL (1993) The outcome of a free autogenous semitendinosus tendon graft in human anterior cruciate reconstructive surgery: a histological study. *Arthroscopy* 9: 131
48. Kennedy JC (1983) Application of prosthesis to anterior cruciate ligament reconstruction and repair. *Clin Orthop* 172: 125
49. King G, Edwards P, Brant R (1992) Freeze-thawing impairs long term healing of a rabbit medial collateral ligament autograft model. *Trans Orthop Res Soc* 17: 660
50. Kurosaka M, Yoshiya S, Andrish JT (1987) A biomechanical comparison of different surgical techniques of graft fixation in anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 15: 225
51. Larson RV (1996) Anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring tendons. *Oper Tech Orthop* 6: 138
52. Lindemann K (1950) Über den plastischen Ersatz der Kreuzbänder durch gestielte Sehnenverpflanzung. *Z Orthop* 79: 316
53. Lobenhoffer P, Lattermann C, Krettek C, Blauth M, Tscherné H (1996) Rupturen des hinteren Kreuzbandes: heutiger Behandlungsstand. *Unfallchirurg* 99: 382
54. Macey HB (1939) A new operative procedure for repair of ruptured cruciate ligaments of the knee joint. *Surg Gynecol Obstet* 79: 108
55. Maeda A, Shino K, Horibe S, Nakata K, Buccafusca G (1996) Anterior cruciate ligament reconstruction with multistranded autogenous semitendinosus tendon. *Am J Sports Med* 24: 504
56. Miller MD, Olszewski AD (1997) Cruciate ligament graft intra-articular distances. *Arthroscopy* 13: 291
57. Mockwitz J (1985) Der alloplastische Ersatz der veralterten, vorderen, isolierten Kreuzbandruptur – Technik und Ergebnisse. *Unfallchirurgie* 11: 289
58. Mott HW (1983) Semitendinosus anatomic reconstruction for cruciate ligament insufficiency. *Clin Orthop* 172: 90
59. Nagano M, Yoshiya S, Kuroda R, Kurosaka M, Mizuno K (1997) Remodeling and healing process of bone-patellar tendon bone graft in a bone tunnel. *Trans Orthop Res Soc*: 78

60. Noyes FR, Barber SD (1993) Allograft reconstruction of the anterior and posterior cruciate ligaments: report of ten-year experience and results. *Instruct Course Lect* 42: 381
61. Noyes FR, Barber-Westin SD (1998) Reconstruction of the anterior cruciate ligament with human allograft. Comparison of early and later results. *J Bone Joint Surg Am* 78: 524
62. Noyes FR, Butler DL, Grood ES (1984) Biomechanical analysis of human ligament grafts used in knee ligament repairs and reconstructions. *J Bone Joint Surg Am* 66: 344
63. Noyes FR, Butler LE, Paulos LE, Grood ES (1983) Intra-articular cruciate ligament reconstruction, part I. *Clin Orthop* 172: 71
64. Otero AL, Hutcheson L (1993) A comparison of the doubled semitendinosus/gracilis and central third of the patellar tendon autografts in arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 9: 143
65. Pagnani MJ, Warner JP, O'Brien SJ, Warren RF (1993) Anatomic considerations in harvesting the semitendinosus and gracilis tendons and a technique of harvest. *Am J Sports Med* 21: 565
66. Pässler HH, Stadler J, Berger R (1987) Erste Ergebnisse der operativen Behandlung von 200 veralterten Kreuzbandrupturen mit einem Kunststoffband. *H Unfallheilk* 189: 963
67. Peyrache MD, Dijan P, Christel P, Witvoet J (1996) Tibial tunnel enlargement after anterior cruciate ligament reconstruction by autogenous bone-patellar tendon-bone graft. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 4: 2
68. Race A, Amis AA (1994) The mechanical properties of the two bundles of the human posterior cruciate ligament. *J Biomech* 27: 13
69. Race A, Amis AA (1998) PCL reconstruction. In vitro biomechanical comparison of „isometric“ versus single and double-bundled „anatomic“ grafts. *J Bone Joint Surg Br* 80: 173
70. Rodeo SA, Arnoczky SP, Torzilli PA, Hidaka C, Warren RF (1993) Tendon-healing in a bone tunnel. *J Bone Joint Surg Am* 75: 1795
71. Rosenberg TD (1993) Technique for endoscopic method of ACL reconstruction. *Acufex Microsurgical, Technical Bulletin*
72. Rosenberg TD (1999) Technique for endoscopic method of ACL reconstruction. *Acufex Microsurgical, Technical Bulletin*
73. Sachs RA, Daniel DM, Stone ML, Garfein RF (1989) Patellofemoral problems after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 17: 760
74. Sakane M, Fox RJ, Woo SL-Y, Livesay GA, et al (1997) In situ forces in the anterior cruciate ligament and its bundles in response to anterior tibial loads. *J Orthop Res* 15: 285
75. Scranton P, Pinczewski L, Auld M, Khalfayan E (1996) Outpatient endoscopic quadruple hamstring anterior cruciate ligament reconstruction. *Oper Tech Orthop* 6: 177
76. Shelbourne KD, Gray T (1997) Anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous patellar tendon graft followed by accelerated rehabilitation. A two- to nine-year followup. *Am J Sports Med* 25: 786
77. Shelbourne KD, Whitaker HJ, McCarroll JR, Rettig AC, Hirschman LD (1990) Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 18: 292
78. Siebert HR, Rüger JM, Pannike A (1985) Experimentelle Untersuchungen zum Bandersatz. *Unfallchirurgie* 11: 247
79. Smith CW, Young IS, Kearney JN (1996) Mechanical properties of tendons: changes with sterilization and preservation. *J Biomech Engl* 118: 56
80. Staehelin AC, Weiler A (1997) All-inside anterior cruciate ligament reconstruction using semitendinosus tendon and soft threaded biodegradable interference screw fixation. *Arthroscopy* 13: 773
81. Stäubli HU, Schatzmann L, Brunner P, Rincon L, Nolte LP (1996) Quadriceps tendon and patellar ligament: cryosectional anatomy and structural properties in young adults. *J Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 4: 100
82. Svenson TM, Harner CD, Fu FH (1995) Endoscopic ACL reconstruction using a quadrupled semitendinosus graft. *Pittsburgh Orthop J* 6: 25
83. Weiler A, Hoffmann RF, Staehelin A, Bail HJ, et al (1998) Hamstring tendon fixation using interference screws: a biomechanical study in a calf tibial bone. *Arthroscopy* 14: 29
84. Weiler A, Hoffmann R, Bail H, Rehm O, Südkamp N (1999) Tendon healing in a bone tunnel: histological analysis after biodegradable interference fit fixation. *Arthroscopy* 15: 548
85. Wirth CJ, Jäger M (1984) Dynamic double tendon replacement of the posterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 12: 39
86. Wittek A (1927) Über Verletzungen der Kreuzbänder des Kniegelenks. *Dtsch Z Chir* 200: 491
87. Wolter D (1983) Die Biokompatibilität von Kohlenfasern und Kohlenstoffmikropartikeln. In: Burri C, Claes L (Hrsg). *Alloplastischer Bandersatz*. Huber, Bern
88. Woo SL-Y, Hollis JM, Adams DJ, Lyon RM, Takai S (1991) Tensile properties of the human femur-anterior cruciate ligament-tibia complex: the effects of specimen age and orientation. *Am J Sports Med* 19: 217
89. Woo SL-Y, Orlando CA, Camp JF (1986) Effects of postmortem storage by freezing on ligament tensile behavior. *J Biomech* 19: 399
90. Yasuda K, Tsujino J, Ohsoshi Y, Tanabe Y, Kanedak (1995) Graft site morbidity with autogenous semitendinosus and gracilis tendons. *Am J Sports Med* 23: 706
91. Zichner L (1985) Kreuzbandersatz mit heterologen Bindegewebsstrukturen. *Unfallchirurgie* 11: 238

Dr. J. Höher  
 Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie  
 Universitätsklinikum Charité,  
 Campus Virchow-Klinikum der Humboldt-Universität zu Berlin  
 Augustenburger Platz 1  
 13353 Berlin  
 E-Mail: jhoeher t-online.de