

Aus dem Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Femorale Hybridverankerung mit der EndoPearl®
bei der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes
mit der Semitendinosussehne**

Eine prospektive klinische Matched-Group-Analyse

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

André Holtz

aus Berlin

Datum der Promotion: 13.12.2019

Vorwort

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden auf dem 25. AGA-Kongress der Gesellschaft für Arthroskopie und Gelenkchirurgie im Rahmen einer Posterpräsentation veröffentlicht.

In der vorliegenden Arbeit wird „der Patient“ als geschlechtsneutraler Terminus gebraucht, der weibliche und männliche Patienten einschließt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
Abstract.....	III
1 Einleitung und Grundlagen.....	1
1.1 Epidemiologie	2
1.2 Historischer Überblick	4
1.3 Anatomie und Biomechanik des Kniegelenks	6
1.4 Ruptur des vorderen Kreuzbandes	10
1.5 Diagnostik und Untersuchung	14
1.6 Therapiekonzepte	17
1.7 Wissenschaftliche Fragestellung.....	30
2 Methodik.....	32
2.1 Studiendesign und methodisches Vorgehen.....	32
2.2 Patienten.....	33
2.3 Operation und Rehabilitation.....	34
2.4 Untersuchungsmethoden	38
2.5 Statistische Analyse	47
3 Ergebnisse	48
3.1 Studienpopulation und Patientengruppen	48
3.2 Intraoperative Begleitbefunde	50
3.3 Klinische und funktionelle Befunde	51
3.4 Scores.....	57
3.5 Röntgenbefunde	62
3.6 Geschlechterspezifischer Vergleich	62
3.7 Komplikationen	64
3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	65

4 Diskussion	66
4.1 Studiendesign und Patienten	66
4.2 Intraoperative Begleitbefunde	69
4.3 Klinische, subjektive und funktionelle Ergebnisse	70
4.4 Vergleich mit der Literatur	71
4.5 Komplikationen	75
4.6 Limitationen und Stärken	76
4.7 Schlussbetrachtung und Ausblick	78
5 Zusammenfassung	82
6 Literaturverzeichnis	84
Eidesstattliche Versicherung und Anteilserklärung	94
Lebenslauf	96
Danksagung	97

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1.1 Das Kniegelenk
- Abb. 1.2 Die überschlagene Viergelenkkette in Extension und Flexion
- Abb. 1.3 VKB-Ruptur
- Abb. 1.4 Verankerungsprinzipien und Transplantatlängen
- Abb. 1.5 Interferenzschrauben
- Abb. 1.6 EndoPearl
- Abb. 2.1 Transplantat der Semitendinosussehne mit aufgenähter EndoPearl
- Abb. 2.2 Hamstringsehnentransplantat mit aufgenähter EndoPearl
- Abb. 2.3 Lachman-Test
- Abb. 2.4 Vorderer Schubladentest
- Abb. 2.5 Pivot-Shift-Test nach MacIntosh
- Abb. 2.6 Anwendung des KT1000
- Abb. 3.1 Matched Pairs
- Abb. 3.2 Latenz zwischen Trauma und OP
- Abb. 3.3 Schubladentest (70 Grad) präoperativ
- Abb. 3.4 Schubladentest (70 Grad) postoperativ
- Abb. 3.5 Lachman-Test präoperativ
- Abb. 3.6 Lachman-Test postoperativ
- Abb. 3.7 Pivot-Shift-Test präoperativ
- Abb. 3.8 Pivot-Shift-Test postoperativ
- Abb. 3.9 KT1000 Seitendifferenz präoperativ
- Abb. 3.10 KT1000 Seitendifferenz postoperativ
- Abb. 3.11 IKDC-Score präoperativ
- Abb. 3.12 IKDC-Score postoperativ
- Abb. 3.13 Lysholm-Score präoperativ
- Abb. 3.14 Lysholm-Score postoperativ
- Abb. 3.15 Tegner-Aktivitäts-Score prätraumatisch
- Abb. 3.16 Tegner-Aktivitäts-Score postoperativ

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Funktionen des vorderen Kreuzbandes
Tab. 1.2	Indikationen zur operativen Therapie
Tab. 1.3	Fixierungssysteme des vorderen Kreuzbandes
Tab. 1.4	Hybridverankerungen
Tab. 2.1	Einschlusskriterien und Ausschlusskriterien
Tab. 2.2	Matching-Kriterien
Tab. 2.3	Bewertungsblätter des IKDC-Dokumentationsbogens
Tab. 3.1	Von der Studie ausgeschlossene Patienten
Tab. 3.2	Intraoperative Begleitbefunde
Tab. 3.3	Weitere klinische Untersuchungsbefunde postoperativ
Tab. 3.4	Funktionstests postoperativ
Tab. 3.5	Stabilitätstests und Scores postoperativ im Geschlechtervergleich

Abstract

Femorale Hybridverankerung mit der EndoPearl® bei der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes mit der Semitendinosussehne

Fragestellung: Erreicht die femorale Hybridverankerung der Semitendinosussehne mit Interferenzschraube und EndoPearl beim vorderen Kreuzbandersatz (VKB-Ersatz) eine Verbesserung der Kniegelenksfunktion, nachdem experimentelle Ergebnisse für diese Kombination bereits eine überlegene initiale Verankerungsstärke gegenüber der alleinigen Interferenzschraubenverankerung demonstriert haben? Können vorbeschriebene Unterschiede beim Outcome von Frauen und Männern dadurch reduziert werden?

Methodik: Von 1997 bis 1999 erfolgte in 141 Fällen der primäre VKB-Ersatz mit einer solitären femoralen biodegradierbaren Interferenzschraubenverankerung (Gruppe A). Seit 2000 wurden alle vorderen Kreuzbandrekonstruktionen mit einer femoralen biodegradierbaren Hybridverankerung bestehend aus EndoPearl und Interferenzschraube durchgeführt (Gruppe B, n = 482). In allen Fällen erfolgte eine identische tibiale Verankerung und eine prospektive Datenerfassung über mindestens zwei Jahre. Von den Patienten der Gruppe A wurden infolge von Ausschlusskriterien (n = 34) und Lost to follow-up (n = 22) 85 Patienten in die Studie aufgenommen. Als Vergleichsgruppe wurden 85 korrespondierende Patienten aus der Gruppe B nach dem Matched-Pair-Prinzip und definierten Kriterien ermittelt (Geschlecht, Alter, ligamentäre und intraartikuläre Begleitverletzungen, deren operative Versorgung, Zeitdauer zwischen Trauma und VKB-Ersatz). Die Befunddokumentation fand über Knie-Scores und Stabilitäts- sowie Laxizitätsmessungen statt. Zusätzlich zur statistischen Ergebnisauswertung nach der Verankerungsmethode, wurde auch eine Analyse nach dem Patientengeschlecht durchgeführt (Signifikanz $p \leq 0,05$).

Ergebnisse: Präoperativ waren zwischen der Kontrollgruppe (Gruppe A, solitäre Interferenzschraubenverankerung) und der Interventionsgruppe (Gruppe B, femorale Hybridverankerung mit EndoPearl) sowie zwischen den Geschlechtern innerhalb beider Gruppen keine signifikanten Unterschiede aller Untersuchungsparameter erkennbar.

Zwei Jahre postoperativ zeigte die EndoPearl-Gruppe signifikant bessere Ergebnisse im IKDC-Score, beim Pivot-Shift-Test und Lachman-Test sowie bei der a.-p. Laxizitätsmessung mit dem KT1000™ Arthrometer® (Gruppe A: $2,47 \pm 1,63$ mm; Gruppe B: $1,73 \pm 1,43$ mm; $p < 0,001$). Bei den subjektiven und den funktionellen Ergebnissen konnten dagegen weder zwischen den Patientengruppen A und B noch zwischen den Geschlechter-Subgruppen signifikante Unterschiede nachgewiesen werden. Zwischen beiden Geschlechtern innerhalb der Gruppen A und B waren ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zu bestimmen, gleichwohl gruppenübergreifend die männlichen Patienten klinisch tendenziell stabilere Kniegelenke aufwiesen.

Schlussfolgerungen: Beim VKB-Ersatz mit der Semitendinosussehne erreicht die femorale Hybridverankerung mit Interferenzschraube und EndoPearl ein signifikant besseres klinisches Outcome bezüglich gemessener Kniestabilität und IKDC-Score, gegenüber der alleinigen Interferenzschraubenverankerung. Dieser Vorteil an objektiver Kniestabilität widerspiegelt sich nicht in einem ebenfalls besseren subjektiven Outcome. Eine in der Literatur beschriebene signifikant unterschiedliche objektive Kniestabilität der Geschlechter nach der VKB-Rekonstruktion mit der Semitendinosussehne konnte für keine Verankerungsmethode bestätigt werden.

Femoral hybrid fixation with the EndoPearl® for hamstring tendon anterior cruciate ligament reconstruction

Question: Does femoral hybrid fixation combining an interference screw with the EndoPearl improve knee stability and decrease hereof reported gender related differences in anterior cruciate ligament (acl) reconstruction with semitendinosus tendon grafts? Experimental data confirmed superior initial graft fixation strength compared to solitary interference screw fixation.

Methods: Between 1997 and 1999 primary acl reconstruction was performed in 141 cases using femoral interference screw fixation (group A). Since 2000 all acl reconstructions were accomplished using a femoral hybrid fixation with an interference screw and the EndoPearl device (group B, n = 482). Identical tibial fixation technique and prospective follow-up of two years was performed in all cases. Due to exclusion criteria (n = 34) and lost to follow-up (n = 22) 85 patients from group A were included into the study. For comparison 85 matching patients from group B were selected using a matched-pair method with defined criteria (gender, age, ligamentous and intraarticular comorbidity, surgical treatment therefore, time period between trauma and acl reconstruction). Documentation was achieved by using knee scores just as stability and instrumented laxity measurements. Additionally to method based statistical evaluation, a gender related analysis was performed (significance $p \leq 0,05$).

Results: No significant preoperative differences at all examination criteria could be found between group A (solitary interference screw fixation) and group B (femoral hybrid fixation with EndoPearl) or between genders within both groups. Two years postoperatively the EndoPearl group demonstrated significant better results for IKDC-Score, Pivot-shift and Lachman test, as for instrumented a.-p. laxity measurements with KT1000™ Arthrometer® (group A: $2,47 \pm 1,63$ mm; group B: $1,73 \pm 1,43$ mm; $p < 0,001$). Referring to subjective and functional outcome, neither between both groups nor between both genders any significant differences were detectable, despite better objective knee stability in the EndoPearl group. Gender related analysis within group A and B also showed no significant differences, though overall both groups male patients tended towards more stable knees.

Conclusions: Femoral hybrid fixation of semitendinosus tendon grafts for acl reconstruction using an interference screw and the EndoPearl is superior compared to interference screw fixation alone in terms of stability measurement and IKDC-Score. The beneficial objective knee stability is not reflected by likewise better subjective outcome. Previously reported significant gender related differences for objective knee stability after acl reconstruction with semitendinosus tendon were not detected for any fixation method.

1 Einleitung und Grundlagen

Die Kreuzbänder bilden den zentralen Pfeiler der Kniegelenkstabilität. Verletzungen dieser Bänder sind häufig und es gilt als sicher, dass die körpereigene Restitutio ad integrum einer Kreuzbandruptur unmöglich ist^{1,2}. Eine Verletzung des vorderen Kreuzbandes (VKB) geht wegen einer sukzessiven Schädigung der sekundären Kniegelenkstabilisatoren mit der erhöhten Wahrscheinlichkeit einer sekundären Gonarthrose einher³⁻⁹. Daher gilt bei der Mehrzahl der Patienten die operative Rekonstruktion des VKB mit einer sogenannten vorderen Kreuzbandplastik als Therapie der Wahl. Zahlreiche Studien zeugen von einer Wiederherstellung der Kniegelenkstabilität mit sehr guten bis guten klinischen und funktionellen Ergebnissen in über 85 bis 90 Prozent der Kreuzbandplastiken¹⁰⁻¹². Darüber hinaus belegen neuere Untersuchungen, dass die operative Therapie kosteneffektiv ist und langfristig weniger als die Hälfte der finanziellen Mittel des konservativen Ansatzes benötigt werden¹³.

Trotz des wissenschaftlichen Fortschritts in der Kreuzbandchirurgie sind viele Fragen zum pathophysiologischen Verlauf und zur Therapie der VKB-Insuffizienz noch nicht befriedigend beantwortet. In den Fachorganen der Unfallchirurgie und Orthopädie werden speziell Fragen zur Transplantatwahl^{6,14} und zum Verankerungsverfahren¹⁵⁻¹⁷ lebhaft diskutiert. Die zwei favorisierten Transplantate sind das Knochen-Sehnen-Knochen-Transplantat des mittleren Patellarsehnedrittels (engl.: bone-patellar tendon-bone; BPTB) und die Beugesehnen des Pes anserinus (engl.: hamstrings). Beide Optionen weisen spezifische Vor- und Nachteile auf und unterscheiden sich vorrangig in Struktur, Einheilungsverhalten und Entnahmemorbidität¹⁴. Postoperativ sind die Beschwerden und der Muskelabbau bei Verwendung der Hamstringsehnen geringer. Die Kniestabilität wurde bei Gebrauch der Patellarsehne lange Zeit besser bewertet¹⁸, besonders früh-postoperativ. Mittlerweile wurden die biomechanischen Probleme der Verankerungsqualität rein weichgewebiger Hamstringsehnentransplantate mehrheitlich gelöst. Durch den Einsatz von Interferenzschrauben gelingt nun die anatomiegerechte Transplantatverankerung direkt auf dem Gelenkniveau und eine Verbesserung des elastischen und plastischen Dehnungsverhaltens des Gesamtkonstrukts gegenüber der vorher etablierten extrakortikalen, gelenkfernen Verankerung^{15,19}.

Damit werden die biologischen und mechanischen Rahmenbedingungen für das Erreichen einer ungestörten ossären Integration des Hamstringsehnentransplantats geschaffen, was in den vergangenen 20 Jahren zu einem Umdenken bei der Transplantatwahl geführt hat. Aufgrund der geringeren Transplantat-Entnahmemorbidität findet heute eine Bevorzugung der Sehnen des Pes anserinus statt^{6,10,12,14,17,18,20-27}. Bei einer solitären Interferenzschraubenverankerung der rein weichgewebigen Sehnen ist die primäre vordere Kniestabilität gegenüber einem genauso verankerten BPTB-Transplantat allerdings geringer, wenn auch klinisch nicht relevant^{12,17,20,28,29}. Experimentelle Untersuchungen zum Einheilungsverhalten eines knochenfreien Sehnentransplantats zeigen eine tendenziell größere Transplantatmigration im Bohrtunnel^{30,31}, was zu einer qualitativ verminderten Transplantatintegration mit konsekutiv geringerer Kniestabilität führen kann. Vor diesem Hintergrund soll die vorliegende klinische Arbeit Ergebnisse zu einem Verankerungsverfahren von Weichteiltransplantaten vorstellen, welches die strukturellen und pathomorphologischen Vorteile des Hamstringsehnentransplantats mit einer zuverlässigen, technisch einfachen und früh-postoperativ stabilen Fixierung verbindet. Die sogenannte Hybridverankerung mit der EndoPearl.

1.1 Epidemiologie

Das Kniegelenk ist durch die leistungssportliche, aber in besonderem Maße durch die zunehmende freizeitsportliche Betätigung der Gesamtbevölkerung das am häufigsten verletzte Gelenk des Menschen^{32,33}. Neue Trend- und Risikosportarten tragen einen wachsenden Anteil zu den steigenden Fallzahlen von Knieverletzungen bei. Als Ursachen werden anatomische, hormonelle und umweltbedingte Faktoren angeführt. Die komplizierte Anatomie und Biomechanik hat eine vielschichtige Problematik von Erkrankungen und Verletzungen des Kniegelenks zur Folge. Wegen der geringen knöchernen Führung durch die inkongruenten Gelenkpartner sind aktive und passive Stabilisatoren von großer Bedeutung. Diese werden von der gelenkübergreifenden Muskulatur sowie von den Bändern, der Kapsel und den Menisken gebildet. Ligamentäre Verletzungen sind in besonderem Maße für Instabilitäten des Kniegelenks verantwortlich.

Die Kreuzbänder sind mit annähernd der Hälfte der Bandverletzungen am zahlreichsten betroffen, wobei das vordere Kreuzband fünf- bis zehnmal häufiger verletzt wird als das hintere Kreuzband (HKB)^{32,34,35}. Danach folgen die Ruptur des medialen Seitenbandes (MCL) und die kombinierte VKB- und MCL-Ruptur mit 29 bzw. 13 Prozent³⁶. Verletzungen des lateralen Außenbandes (LCL) findet man seltener. In den Ländern der westlichen Welt wird die jährliche Inzidenz auf bis zu eine VKB-Ruptur je 1000 Einwohner geschätzt¹, mit steigender Tendenz. Mehr als zwei Drittel dieser Verletzungen ereignen sich während sportlicher Aktivitäten³⁷. Hierbei sind weibliche Athleten überproportional zahlreich betroffen^{32,38,39}. Dieser Umstand scheint multifaktoriell bedingt zu sein. Etwa durch anatomische Gegebenheiten, wie eine höhere physiologische Laxizität von Gelenken, Bändern und Muskulatur bzw. deren geringere Stärke³⁸, aber auch durch eine engere Fossa intercondylaris bzw. Notch⁴⁰, welche prinzipiell ein Impingement des VKB während der Knieextension begünstigt. Zur Frage, ob die weiblichen Hormone einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit von Kreuzbandverletzungen haben, findet sich in der Literatur kein breiter Konsens^{41,42}.

Die Diagnosehäufigkeit der vorderen Kreuzbandverletzung hat einen steilen Anstieg erfahren, bedingt durch den risikofreudigeren Lebenswandel der Gesellschaft und durch eine Verbesserung der klinischen und apparativen Diagnostik. Operative Rekonstruktionen des Bandes zählen heute zu den häufigsten Kniegelenkseingriffen. Ausdruck der hohen Fallzahlen ist auch die Tatsache, dass Verletzungen des VKB und deren Behandlung zu den am meisten diskutierten Themenkomplexen innerhalb der Sporttraumatologie gehören³³. Denn als Folge einer akuten oder chronischen Ruptur des VKB resultiert eine Instabilität des Kniegelenks⁴³. Die Patienten sind durch Sekundärpathologien wie Meniskusläsionen und Knorpelschäden bedroht^{4,5,9}. So führt die Ruptur des vorderen Kreuzbandes unter allen Sportverletzungen am häufigsten zur Sportinvalidität⁴⁴. Zudem betreffen Verletzungen des VKB überwiegend jüngere und aktive Menschen³², die sich in der Ausbildung oder im Erwerbsleben befinden. Diese Tatsache erlangt durch die hohe Inzidenzrate der Verletzung, über die individuelle Problematik hinaus, auch ein bedeutendes sozioökonomisches Ausmaß^{1,45,46}. Der Anspruch an eine suffiziente Versorgung der vorderen Kreuzbandruptur ist deshalb hoch.

1.2 Historischer Überblick

Schon von Hippokrates und Galen wurden die Kreuzbänder und deren bedeutsame Funktion für das Kniegelenk beschrieben. Entsprechend den Möglichkeiten behandelte man eine Verletzung der Bänder bis weit ins 19. Jahrhundert hinein konservativ. Mit zunehmendem Wissen um die Bedeutung der Kreuzbänder für die Stabilisierung des Kniegelenks und mit den wachsenden Möglichkeiten der Chirurgie, entwickelte sich schließlich ein steigendes Interesse an einer operativen Therapie³³. Den ersten kreuzbandchirurgischen Eingriff führte Robson 1895 in Form einer offenen Primärnaht des rupturierten vorderen Kreuzbandes durch⁴⁷. Für frische Bandverletzungen wurde dieses Vorgehen in der Folgezeit bis Mitte der siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts immer wieder bestätigt^{33,48}. Bei chronischen und komplexen Verletzungen erkannte man hingegen schon frühzeitig die Notwendigkeit einer Bandersatzplastik. Anfänglich gab es Versuche mit Seidenbändern³³, bis Hesse 1914 von der ersten Verwendung eines autogenen Transplantats des freien Fascia-Lata-Streifens durch den russischen Chirurgen Grekow berichtete⁴⁹. In den Folgejahren wurde eine Vielzahl modifizierter Verfahren vorgestellt, welche entweder gestielte oder freie Faszien- (Tractus iliotibialis) und Muskel-Faszien-Transplantate (Patellarsehne und Sehnen der Mm. semitendinosus et gracilis) verwendeten^{33,48,50}. Eine neue Technik beschrieb Jones 1963 unter Verwendung eines distal gestielten Transplantats des mittleren Patellarsehnendrittels mit proximal anhängendem Knochenblock⁵¹. In Anlehnung daran stellte Brückner 1966 ein gänzlich freies Patellarsehnentransplantat mit erstmalig proximalem und distalem Knochenblock vor⁵², welches sich lange Zeit als sogenannter Goldstandard der Transplantatwahl beim Kreuzbandersatz behaupten sollte^{11,20,53-56}. Erst in den Achtzigerjahren des zwanzigsten Jahrhunderts wandte man sich infolge einer verbesserten Methodik und der vergleichsweise geringeren Transplantat-Entnahmemorbidität wieder vermehrt den Sehnen des Pes anserinus zu.

Angelehnt an die Erfahrungen mit autogenem Bandersatz, gab es auch Bemühungen mit diversen synthetischen⁵⁷⁻⁵⁹, xenogenen^{60,61} und allogenen^{62,63} Ersatzplastiken. Trotz anfänglich viel versprechender Resultate und verheißungsvoller Vorteile, wie der Vermeidung von Entnahmemorbidität und Funktionsdefiziten, einer verkürzten Operationsdauer, guter Verfügbarkeit und freier Größenwahl⁵⁰, konnten sich diese Materialien aufgrund von teils gravierenden Mängeln im Langzeitverlauf nicht durchsetzen. Der alleinige Kreuzbandersatz oder die Augmentation mit synthetischen

Materialien aus Gore-Tex, Dacron oder Kohlefaser war komplikationsbehaftet und es traten bald hohe Re-Rupturraten sowie chronische Synovialitiden auf⁶⁴. Allogene Transplantate der Achilles-, Quadriceps- und Patellarsehne, des M. tibialis anterior oder eines Fascia-lata-Streifens wiesen zwar bei den klinischen Langzeitergebnissen im Vergleich mit den etablierten autogenen Plastiken häufig keine wesentlichen Unterschiede und teils auch klare Vorteile in der klinischen Handhabung auf^{65,66}. Jedoch zeigte sich vor dem Hintergrund der sich ausweitenden Verbreitung übertragbarer Infektionskrankheiten wie HIV und Hepatitis, dass eine zuverlässige Viruseliminierung ohne gleichzeitige Beeinträchtigung der Transplantatqualität nicht möglich ist⁶⁷. So lässt sich heutzutage eine Indikation für die Verwendung allogener Transplantate nur noch bei komplexen Bandverletzungen oder bei wiederholten Revisionseingriffen rechtfertigen⁶, da hierbei dem Bedarf an autogenem Bandmaterial seitens des Angebots natürliche Grenzen gesetzt sind.

Infolge dieser Entwicklungen haben sich schließlich die autogenen Transplantate als erste Wahl für die Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes durchgesetzt. Heute werden für den primären vorderen Kreuzbandersatz in 90 Prozent der Fälle hauptsächlich zwei autogene Transplantate favorisiert. Das Knochen-Sehne-Knochen-Konstrukt eines Patellarsehnedrittels und das Hamstringsehnentransplantat^{6,14,26}.

Begleitet wurde die Fortentwicklung der Transplantate und der Verankerungsmethoden von einer Evolution der operativen Techniken. Weg von der klassischen Arthrotomie, über die Miniarthrotomie, hin zum arthroskopischen Kreuzbandersatz³³ mit teils computerassistiertem Navigationssystem⁶⁸.

1.3 Anatomie und Biomechanik des Kniegelenks

1.3.1 Funktionelle Anatomie

Der Komplex des Kniegelenks besteht aus knöchernen und weichgewebigen Strukturen. Die Femur- und Tibiakondylen sowie die Patella, das größte Sesambein des Menschen, bilden mit ihren überknorpelten Gelenkflächen ein tibiofemorales und ein patellofemorales Teilgelenk. In chirurgischer Hinsicht hat sich außerdem die Einteilung in drei tibiofemorale Kompartimente (medial, zentral, lateral) und ein patellofemorales Kompartiment bewährt. Alle Gelenkanteile sind von einer gemeinsamen Kapsel umschlossen und durch einen kräftigen Muskel-Band-Apparat armiert. Diese sichern die komplexe Kniegelenksbeweglichkeit – drei Rotationen und drei Translationen³⁴.

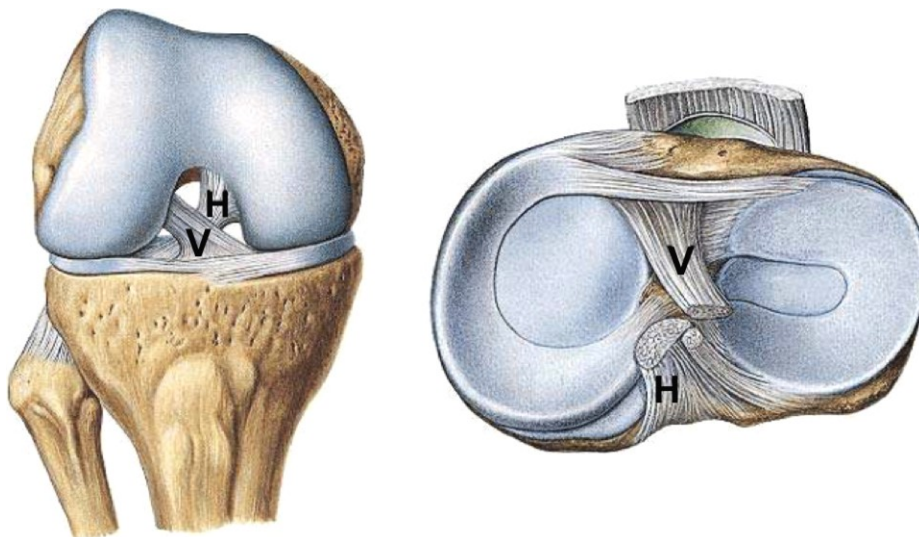


Abb. 1.1 Das Kniegelenk. Anterior-posterior und Tibiaplateau von kranial.⁶⁹
(V: vorderes Kreuzband; H: hinteres Kreuzband)

Die gelenküberspannende Beuge- und Streckmuskulatur als aktiver bzw. dynamischer Stabilisator sowie Bänder, Kapsel und Menisken als passive bzw. statische Stabilisatoren sind wegen der geringen knöchernen Kniegelenkführung von großer Bedeutung. Den Kreuzbändern kommt dabei eine übergeordnete Funktion für die Kniestabilität zu. Das vordere und das hintere Kreuzband (Abb. 1.1) gewährleisten als zentrale passive Führungselemente den harmonischen Ablauf der physiologischen Roll-Gleit-Bewegung und zwingen diese dem Kniegelenk gewissermaßen auf^{70,71}.

Entwicklungsgeschichtlich sind beide Kreuzbänder von dorsal in das Kniegelenk gelangt und nur ventral von der Membrana synovialis bedeckt. Sie liegen demnach intraartikulär, aber extrasynovial². Vom femoralen Ursprung an der Knorpel-Knochengrenze der dorsalen Innenfläche des Condylus lateralis verläuft das VKB bei Extension durch die Fossa intercondylaris nach anterior. Es zieht nach mediodistal zur tibialen Area intercondylaris anterior und inseriert breitflächig medial des Außenmeniskusvorderhorns^{72,73}. Die mittlere Länge des vorderen Kreuzbandes beträgt 32 Millimeter (22 - 41 mm) und die Stärke circa elf Millimeter (7 - 12 mm)^{2,74}. Mikroanatomisch gesehen ist das VKB ein multi-faszikuläres Bündel aus straffem Bindegewebe. Unter funktionellen Gesichtspunkten hat sich die Unterscheidung eines anteromedialen (AMB) und eines posterolateralen Bündels (PLB) durchgesetzt, entsprechend der Position ihrer tibialen Insertionen. Histologisch hingegen lassen sich die anteromedialen Fasern nicht von den posterolateralen Fasern abgrenzen⁷⁵. In mehreren histologischen Untersuchungen konnte Petersen nachweisen, dass die Insertionszonen des VKB den Aufbau chondral-apophysärer, sogenannter direkter Bandansätze aufzeigen. Das straffe Bindegewebe inseriert über eine Faserknorpelzone an Femur und Tibia. Zum Knochen hin ist der Faserknorpel mineralisiert⁷⁶.

Die Gefäßversorgung des VKB erfolgt von proximal über die Arteria genicularis media und von distal über der Arteriae geniculares inferiores. Diese Gefäße bilden einen periligamentären Synovialplexus und einen inhomogenen endoligamentären Plexus⁷⁷. In den chondral-apophysären Insertionszonen und der Faserknorpelzone des distalen Banddrittels finden sich avaskuläre Areale⁷⁸. Diese inhomogene Vaskularisierung des Bandes scheint zum schlechten natürlichen Heilungspotential des VKB beizutragen². Eine Innervation des VKB erfolgt durch artikuläre Äste des Nervus tibialis, welche die Kniegelenkkapsel von dorsal erreichen. Als vasomotorische, propriozeptive und protopathische Nervenfasern verlaufen sie mit dem endoligamentären Gefäßplexus und den ligamentären Faszikeln⁷⁹, weshalb sie bei einer Ruptur des Bandes geschädigt werden können. In den Kreuzbändern wurden nozizeptive Nervenendigungen identifiziert⁸⁰; an den Insertionszonen und auf der Oberfläche des VKB finden sich dehnungs-, druck- und vibrationsempfindliche Mechanorezeptoren^{75,80,81}. Es gibt zahlreiche Hinweise, dass die tiefensensiblen Propriozeptoren im VKB als Sensoren für die Kniegelenkstellung dienen und eine wichtige kinästhetische Funktion für die physiologische Kinematik des Kniegelenks besitzen. Über einen Reflexbogen, den

sogenannten Ligamentum cruciatum anterius Reflex, werden der Tonus und die Aktivität der gelenkstabilisierenden Synergisten des vorderen Kreuzbandes bzw. der ischiocruralen Muskeln gesteuert^{2,75,82}. Der Verlust propriozeptiver Fähigkeiten nach einer VKB-Ruptur soll laut Johansson bei der Entstehung degenerativer Veränderungen im Rahmen der chronischen anterioren Instabilität eine wichtige Rolle spielen⁸⁰. Die Re-Innervation und sensomotorische Verschaltung ist daher wichtig und scheint durch Ochi für die freie vordere Kreuzbandrekonstruktion belegt zu sein⁸³.

1.3.2 Biomechanik und funktionelle ligamentäre Aspekte

Die Kniegelenksbeweglichkeit findet mit der Angabe von Extensions- und Flexionsbewegungen nach der Neutral-Null-Methode (Norm: 5 – 0 – 145 Grad) keine abschließende Beschreibung, sondern umfasst sechs Freiheitsgrade mit Translationen auf drei Ebenen und Rotationen um drei Achsen³⁴. Diese polyzentrische Kinematik wird durch die beiden Kreuzbänder dirigiert. Ihnen, den Menisken und den Kollateralbändern kommt eine wichtige Rolle bei der Gelenkstabilisierung und bei der physiologischen Gelenkführung während der Bewegung zu. Das Zusammenspiel von VKB und HKB folgt dabei vereinfacht dem Modell der ebenen, überschlagenen Viergelenkkette. Mit ihm kann das Roll-Gleit-Prinzip des Kniegelenks, die Form der artikulierenden Flächen und die Lokalisation ihrer Kontaktpunkte im Bewegungsablauf veranschaulicht werden.

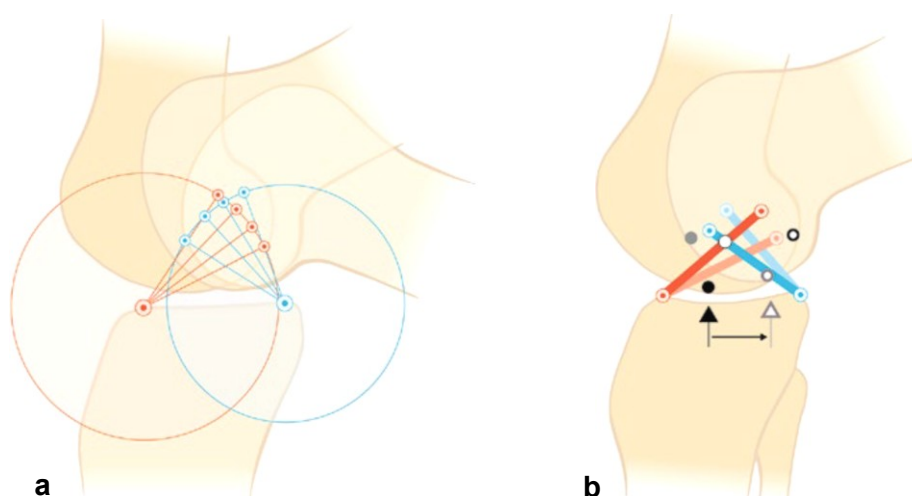


Abb. 1.2 Die überschlagene Viergelenkkette in Extension und Flexion. a) Femorale Insertionen von VKB und HKB auf sagittalen Kreisbahnen. b) Dorsalverlagerung des femoralen Auflagepunktes auf dem Tibiaplateau.⁸⁴

Dabei bilden die Kreuzbänder ein überschlagenes Trapez⁷⁰ und demonstrieren die Verschmelzung von Abrollen und Drehgleiten zum Rollgleiten. Die beiden femoralen Kreuzbandinsertionen beschreiben bei Extensions- und Flexionsbewegungen des Kniegelenks jeweils eine Kreisbahn in der Sagittalebene (Abb. 1.2a). Bei Knieflexion resultiert eine Dorsalverlagerung des femoralen Aufliegepunktes auf dem Tibiaplateau (Abb. 1.2b). Das Roll-Gleit-Verhältnis von 1:2 zu Beginn der Flexion ändert sich bis auf ein Verhältnis von 1:4 bei maximaler Kniebeugung⁷⁰.

Durch die knöchernen Geometrie des Femorotibialgelenks zwingen die Kreuzbänder dem medialen und lateralen Kompartiment getrennte Roll-Gleit-Bewegungen auf. Die ungleichmäßige Ausbildung der Femurkondylen führt bei endgradiger Kniestreckung zu einer Außenrotation von fünf bis zehn Grad, die sogenannte Schlussrotation. Bei Kniebeugung werden die Femurkondylen durch die Kreuzbänder am Überrollen der Tibiahinterkanten und der Meniskushinterhörner gehindert⁴³. Erst wenn nach der Entfernung aller Weichteile und der Seitenbänder von einem Kniepräparat auch das vordere oder hintere Kreuzband durchtrennt werden, tritt das sogenannte Schubladenphänomen mit einer vorderen oder hinteren Schublade auf und der Bewegungsablauf ist desintegriert^{43,85}.

Zu den Hauptfunktionen des vorderen Kreuzbandes zählt demnach die Verhinderung der anterioren Translation⁸⁶ (Tab. 1.1). Das VKB limitiert als sekundärer Stabilisator aber auch die Innen- und Außenrotation⁸² sowie Varus-Valgus-Bewegungen. Es legt sich bei Innenrotation im gebeugten Kniegelenk von ventral um das hintere Kreuzband und limitiert diese Bewegung⁷⁵. Entsprechend ist das Kniegelenk ohne vorderes Kreuzband in Streckstellung nicht ausreichend stabil, wodurch es bei Rotationen zum unwillkürlichen Einknicken des Unterschenkels kommen kann⁸⁵ (engl.: giving way). Das VKB dirigiert und limitiert folglich die polydirektionale Kniebeweglichkeit, weshalb eine Verletzung des Bandes einen nachhaltigen Einfluss auf die Kniefunktion erlangt.

- Zentrales Führungselement der physiologischen Roll-Gleit-Bewegung
- Verhinderung der anterioren Subluxation der Tibia
- Begrenzung von Extension, Innenrotation und Abduktion
- Stellglied im propriozeptiven Regelkreis

Tab. 1.1 Funktionen des vorderen Kreuzbandes.

Auf funktioneller Ebene verhält sich das VKB bei der Roll-Gleit-Bewegung nicht isometrisch. Es besteht ein differenziertes Zusammenspiel seiner zwei Bündel mit einem reziproken Spannungsverhalten bei Streck- und Beugebewegungen als auch bei Rotationsbewegungen im Kniegelenk. In Kniestreckung ist das PLB angespannt und das AMB relativ entspannt; bei Kniebeugung wird das AMB gespannt, während die Spannung des PLB abnimmt^{72,75}. Dabei wickelt sich das AMB um den Rest des Bandes, sodass die zwei Bündel nicht länger parallel zueinander verlaufen⁸⁷. Während das AMB der primäre Widerstand gegen anteriore Tibiatranslation ist, stabilisiert das PLB das Knie nahe der vollen Streckung vor allem gegen Rotationskräfte⁸⁸.

Bei weiterer Betrachtung der anatomischen Gegebenheiten, lassen sich die Ursprungs- und Ansatzareale von Kreuzbändern und Seitenbändern der geometrisch-kinematischen Gesetzmäßigkeit der Burmester-Kurve unterordnen⁸⁹. Sie beschreibt Veränderungen des sogenannten Momentenzentrums im Schnittpunkt der Kreuz- und Seitenbänder und deren Festigung in der Streck- und Beugephase des Kniegelenks. In der mittleren Beugstellung tritt dagegen eine Lockerung der Bänder auf. Die Kniegelenksbewegung folgt somit nicht alleine dem Diktat der Kreuzbänder, sondern ist ebenfalls von den auf der Burmester-Kurve lokalisierten Insertionspunkten der Seitenbänder abhängig⁷⁰.

1.4 Ruptur des vorderen Kreuzbandes

Das Überschreiten der elastischen Elongationsreserve durch äußere Gewalteinwirkung führt meist zur vollständigen und selten zur teilweisen Kontinuitätsunterbrechung des vorderen Kreuzbandes. Man unterscheidet die frische oder akute, weniger als 14 Tage zurückliegende VKB-Ruptur, von der subakuten, mehr als zwei Wochen zurückliegenden Ruptur. Bei einem länger als acht Wochen vorausgegangenem Trauma spricht man von einer chronischen VKB-Insuffizienz⁹⁰. Die häufigste Verletzungsform des VKB bei Erwachsenen und Jugendlichen ist die interligamentäre Ruptur^{44,91} (Abb. 1.3a). Zu unterscheiden ist die komplette Ruptur von der Partialruptur infolge einer Läsion des AMB oder PMB. Circa drei Viertel dieser Fälle finden sich proximal, intermediäre und distale Rupturen sind seltener^{44,92}. Im Wachstumsalter ist der knöcherne Ausriss der Eminentia intercondylaris häufig⁹¹ (Abb. 1.3b).

Eine isolierte Ruptur des vorderen Kreuzbandes scheint pathophysiologisch nur in Ausnahmefällen aufzutreten⁶. Hingegen finden oft Traumatisierungen anderer Kapsel-Band-Strukturen oder Knieinnenstrukturen⁴⁴ sowie komplexe Begleitverletzungen statt. Hierbei sind besonders die Menisken (Außenmeniskus häufiger als Innenmeniskus⁹³), Knorpeloberflächen (Femurkondylen) und Kapsel-Band-Strukturen (HKB, MCL, Popliteussehne), aber auch der Knochen selber (engl.: bone bruise) betroffen⁹².

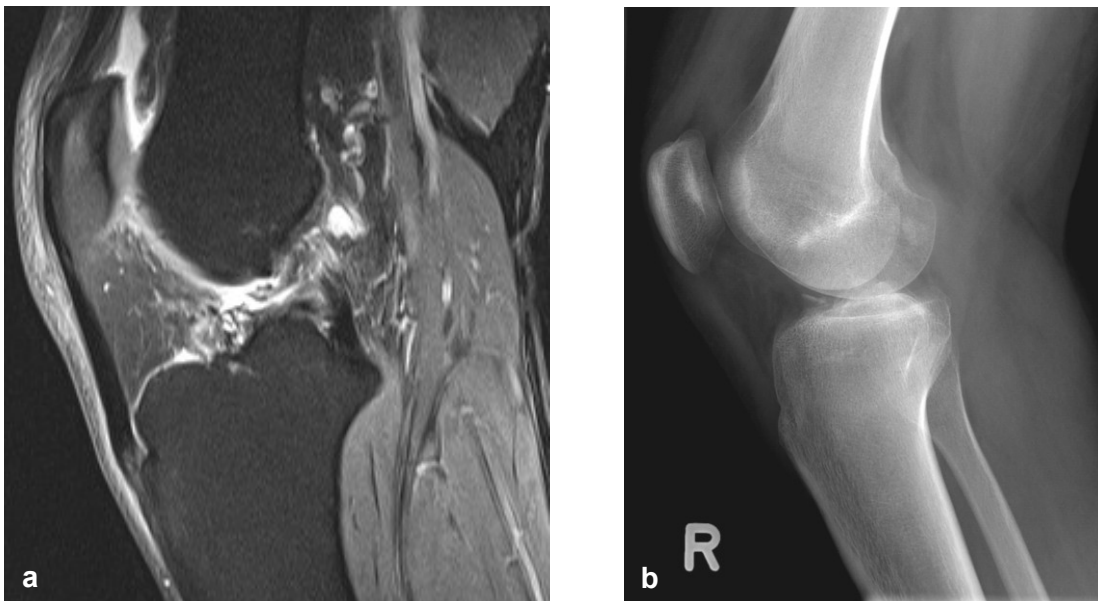


Abb. 1.3 VKB-Ruptur. a) interligamentär; b) knöcherner Ausriss femoral

1.4.1 Unfallmechanismus

Je nach Schwere und Richtung von direkt oder indirekt einwirkenden Kräften sowie abhängig von der Kniegelenkstellung (Beugung, Rotation) im Moment des Unfalls, werden oft mehrere Bänder und andere Binnenstrukturen des Kniegelenks verletzt. Die Verletzungsmechanismen, welche zur Ruptur des VKB führen, sind vielfältig und können am belasteten als auch am unbelasteten Kniegelenk auftreten. Typischerweise führen plötzliche Rotationen unter leichter Kniebeugung und forcierter Valgus-Varus-Fehlstellung bei gleichzeitig feststehendem Unterschenkel zu Verletzungen der Kreuzbänder.

Bewegungsabläufe mit Traumata in Flexions-Valgus-Außenrotation und Flexions-Varus-Innenrotation^{44,92} ereignen sich üblicherweise beim Skifahren und bei Stop-and-go-Sportarten mit schnellen Abstoppbewegungen und Richtungswechseln, sogenannte Cutting action-Bewegungen (diverse Ballsportarten, Kampfsport)⁹⁴. Weitere häufige Verletzungsmuster sind Hyperextensions- und Hyperflexionstraumata sowie die Landung mit extensionsnah flektiertem Kniegelenk³⁴.

1.4.2 Pathophysiologie und Pathomechanismus

Ligamentäre Knie Traumata führen zur Gelenkinstabilität. Man unterscheidet einfache Instabilitäten mit pathologischer Beweglichkeit um eine einzige Achse und komplexe Rotationsinstabilitäten mit pathologischer Beweglichkeit um mehrere Achsen^{34,44}. Die Roll-Gleit-Bewegung zerfällt nun in ein partielles Rollen mit Nachholen des Gleitens⁷¹.

Die Femurkondylen rollen auf die Meniskushinterhörner und gleiten auf ihnen nach dorsal. Diese unphysiologische Belastung kann zur degenerativen Schädigung der Hinterhörner führen. Da die Stabilität des Kniegelenks in Flexionsstellung geringer ist als in Streckstellung, ist die Wahrscheinlichkeit von Rotationstraumata mit Meniskus- und Bandläsionen erhöht. Nach Untersuchungen von Zantop kann eine Kontraktion des M. quadriceps femoris bei einem Knieflexionswinkel von 22 Grad eine exzentrische Muskelspannung mit Kräften von bis zu 5000 N im vorderen Kreuzband erzeugen⁹⁴. Diese Kräfte übersteigen die Reißfestigkeit des nativen VKB von 1700 bis 2100 N deutlich^{17,20,95} und es kommt nach der Elongation schließlich zur Ruptur des Bandes.

Ein gesundes vorderes Kreuzband dehnt sich um 15 bis 25 Prozent, bevor eine plastische Deformation und dadurch ein Verlust an vorderer Stabilität eintreten, die Dehnungsreserve ist somit gering. Zudem nehmen die mechanische Zugfestigkeit und die lineare Steifheit des Bandes mit dem Lebensalter signifikant ab⁹⁵. Infolge der VKB-Ruptur kann die Tibia bei leicht gebeugtem Knie nach anterior subluxieren und vermehrt innenrotieren, sodass es zum sogenannten Pivot-Shift-Phänomen kommt³⁴. Die Patienten klagen über eine subjektive Instabilität und Gangunsicherheit. Durch die Überlastung der sekundären Kniegelenkstabilisatoren droht eine Gonarthrose. Aus dieser Kausalkette resultiert die Zielsetzung einer mechanischen und funktionellen Stabilisierung des Kniegelenks mittels einer vorderen Kreuzbandrekonstruktion.

1.4.3 Klinischer Befund

Kennzeichen vieler frischer Kapsel-Band-Läsionen und deshalb für eine VKB-Läsion unspezifisch, sind eine rasche Schwellung und schmerzhafte Bewegungseinschränkung des Kniegelenks mit Schonhaltung und einem Streck- oder Beugedefizit. Demzufolge ist die valide klinische Untersuchung der Kreuzbänder nach einem frischen Kniegelenkstrauma nicht immer möglich. Bei komplexeren Verletzungen kann eine kutane Hämatomfärbung über den verletzten Anteilen der Gelenkkapsel sichtbar sein. Ein begleitender Hämarthros ist hinweisend auf die Zerreißung von Kapsel-Band-Strukturen oder auf einen basisnahen Meniskusriss, jedoch hierfür nicht obligat⁹². Enthält dieser auch Fettaggen, besteht der Verdacht auf eine knöcherner Verletzung der Gelenkflächen oder auf einen knöchernen Kreuzbandausriss. Seröse Gelenkergüsse findet man hingegen bei bereits chronischen Verletzungsprozessen.

Nach dem Abklingen der akuten Symptome können rezidivierende Episoden mit schmerzhaften Subluxationen, jeweils gefolgt von einer mehrtägigen Knieschwellung, für eine Kreuzbandverletzung kennzeichnend sein. Charakteristischerweise kommt es auf unebenem Untergrund oder bei Richtungswechseln, beispielsweise beim Aussteigen aus dem PKW oder beim Treppabgehen, zum unvermittelten Nachgeben des Kniegelenks, dem sogenannten Giving way-Phänomen. Eine chronische vordere Kreuzbandverletzung imponiert klinisch zudem oft mit einer Umfangsminderung der Oberschenkelmuskulatur, vor allem durch Atrophie des M. vastus medialis, und mit einer polydirektionalen Laxizität des Kniegelenks durch die Mikrotraumata bedingte, fortschreitende Lockerung des gesamten Kapsel-Band-Apparats.

Bei chronischer Insuffizienz findet durch die genannten Pathomechanismen eine vermehrte Belastung von Menisken, Kapsel-Band-Strukturen, Knorpeloberflächen und hinterem Kreuzband statt. Folglich kann es neben progredienten Schmerzen und Funktions- sowie Aktivitätseinschränkungen, im weiteren Verlauf zu Läsionen dieser Strukturen bis hin zu arthrotischen Veränderungen des Kniegelenks kommen^{4,5,7,9,96}. Besonders für jüngere Patienten mit einem hohen Aktivitätslevel, scheint ein schneller Progress dieser Kausalität zuzutreffen⁴⁶. Zielgerichtete Untersuchungen müssen die Verdachtsdiagnose einer Ruptur des vorderen Kreuzbandes daher rasch verifizieren.

1.5 Diagnostik und Untersuchung

Die frühzeitige Diagnose einer VKB-Ruptur ist wichtig, um durch einen baldigen Therapiebeginn das Fortschreiten der Kniegelenksverletzung zu begrenzen und um ein gutes Behandlungsergebnis zu ermöglichen. Für die Diagnostik von Verletzungen des Kapsel-Band-Apparats und der Menisken haben Anamnese und klinische Untersuchung des Kniegelenks, trotz aller technischer Errungenschaften, nach wie vor entscheidende Bedeutung. Nach einer VKB-Ruptur weisen sie den Weg für das sich anschließende, diagnostische Prozedere. Eine rechtfertigende Indikation sowie ein rationaler und ökonomischer Einsatz von aufwendigen Diagnoseinstrumenten sind nur dann gegeben. Die sich anschließende Bildgebung dient in hingen der Diagnosesicherung und der Planung des weiteren therapeutischen Vorgehens.

1.5.1 Anamnese und klinische Untersuchung

Eine ausführliche Anamnese mit der Analyse des Verletzungsmechanismus ist der Beginn einer jeden Erstuntersuchung. Der Unfallhergang und die darauffolgende Symptomatik können Indizien für die Art und die Komplexität des Traumas geben. So wird von Kreuzbandpatienten im Moment des Unfalls gelegentlich ein „Plopp“-Geräusch oder ein Krachen vernommen⁹². Die Anamnese sollte auch differenzialdiagnostische Überlegungen mit einschließen. Vorverletzungen am betroffenen Knie müssen erfragt und dokumentiert werden, da sie gutachterliche Relevanz erlangen können⁹¹. Freizeit- und Berufsanamnese helfen, die Erwartungshaltung des Patienten bezüglich der Behandlung zu erfassen.

Der Untersuchungsdurchgang sollte nach einem einheitlichen Schema ablaufen. Zu Beginn verschafft sich der Untersucher einen richtungweisenden Überblick anhand von Anamnese, Ganganalyse und Inspektion am stehenden und liegenden Patienten. Es folgen Palpation des Kniegelenks, Bewertung von Muskelatrophie des Beins und Bewegungsumfang des Kniegelenks sowie eine allgemeine Prüfung der Bandstabilität. Bei Verdacht auf eine Verletzung des VKB konzentriert sich die weitere Untersuchung auf die Stabilitätsprüfungen des Kniegelenks. Dabei wird der zentrale und seitliche Halte- und Führungsapparat durch Seitenband- und Kreuzbandprüfungen begutachtet.

Neben der Untersuchung auf eine vordere oder hintere Schublade, finden in erster Linie die im Kapitel 2.4.2 näher erläuterten Tests Anwendung. Der Lachman-Test, speziell bei frischer Läsion, und der Pivot-Shift-Test, zusätzlich bei chronischer Insuffizienz. Durch seine hohe Sensibilität und Spezifität für eine VKB-Ruptur ist der Lachman-Test der wichtigste Test der initialen klinischen Untersuchung^{92,97}. Er ist relativ schmerzarm durchführbar und wird von einem Hämarthros nur wenig beeinträchtigt. Der Pivot-Shift-Test kann dagegen schmerzhaft und bei frischer VKB-Läsion mitunter falsch-negativ⁹² ausfallen, gibt aber als einziger Test Auskunft über die Rotationsinstabilität des Kniegelenks. Er lässt auch am ehesten eine Aussage zur Degeneration der sekundären Kniegelenkstabilisatoren zu, sodass er Bedeutung für die Diagnose der chronischen Insuffizienz und für die Verlaufskontrolle nach erfolgter VKB-Rekonstruktion erlangt. Für die quantitative Bewertung der vorderen Schublade hat sich die instrumentelle Messung der anterior-posterioren Translation etabliert (Kapitel 2.4.2). Durch den apparativen Charakter ist dieser Test gut reproduzierbar und der Personen gebundene Mess- und Untersuchungsfehler (Performance Bias) kann begrenzt werden.

Bei der gesamten Diagnostik und ausdrücklich bei den Stabilitätsuntersuchungen am Kniegelenk ist stets der Vergleich mit der Gegenseite erforderlich. Der genaue Ablauf der einzelnen Untersuchungen wird im Methodik-Kapitel ausführlich erläutert.

1.5.2 Bildgebende Diagnostik

Röntgen

Die Röntgenuntersuchung dient bei Verdacht auf eine Kreuzbandläsion heute primär dem Ausschluss eines knöchernen Ausrisses oder anderer ossärer Beteiligungen. Weichgewebige Kniebinnenstrukturen sind auf nativen Röntgenbildern nicht direkt beurteilbar. Allerdings können indirekte Weichteilzeichen wie ein Gelenkerguss auf ein Trauma hindeuten und die Verdachtsdiagnose einer Kapsel-Band-Läsion erhärten.

Für die primäre Bildgebung der VKB-Ruptur werden Aufnahmen im anterior-posterioren (45 Grad Flexion), im lateralen (Hyperextension) und im axialen Strahlengang angefertigt. Im chronischen Stadium erfolgen Belastungsaufnahmen nach Rosenberg. Zur Bewertung sekundärer Arthrosezeichen werden dabei beide Kniegelenke in 45 Grad Flexion von posterior-anterior geröntgt. Allen anderen Einstellungen bleiben besondere Fragestellungen vorbehalten⁹¹.

Magnetresonanztomographie (MRT)

Die MRT hat die Diagnostik von Bandläsionen revolutioniert. Sie besitzt in der Bildgebung des vorderen Kreuzbandes den größten Stellenwert und hat ihre Indikation ausdrücklich in klinisch nicht eindeutigen Fällen einer VKB-Läsion sowie bei Verdacht auf primär versorgungspflichtige weichgewebige Verletzungen. Die MRT die valideste nicht-invasive Untersuchungstechnik mit einer Sensitivität von 75 bis 95 Prozent und einer Spezifität von 95 bis 100 Prozent für eine VKB-Ruptur⁹¹. Dennoch sollte eine Diagnosefindung in der MRT immer unter Beachtung des klinischen Befundes erfolgen.

Auch wenn sich allein mit dem Lachman- und Pivot-Shift-Test mehr als 90 Prozent der frischen VKB-Rupturen nachweisen lassen⁹², wird in der klinischen Routine bei faktisch jedem Patienten eine MRT des Kniegelenks durchgeführt, da sie Rückschlüsse auf klinisch stumme Begleitverletzungen der sekundären Kniegelenkstabilisatoren zulässt und schließlich der individuellen Planung des operativen Zeitpunktes und Vorgehens dient.

Computertomographie (CT)

Die CT besitzt bei der Diagnostik von Kreuzbandrupturen nur eine geringe Bedeutung und lediglich eine Indikation zur Beurteilung größerer knöcherner Begleitverletzungen.

Sonographie

Die sonographische Beurteilung der Kreuzbänder ist schwierig und besitzt beim Kniegelenkstrauma einen untergeordneten Stellenwert. Eine Berechtigung hat die Sonographie dennoch bei der Ergussdiagnostik, zur Beurteilung poplitealer Zysten und periartikulärer Veränderungen sowie im Rahmen sogenannter Stressuntersuchungen⁹⁸.

Diagnostische Arthroskopie

Durch die weit verbreitete Verfügbarkeit der MRT bedarf es zur Sicherung der Diagnose einer Kreuzbandruptur lediglich in Ausnahmefällen der Arthroskopie. Sie dient heute prinzipiell einem therapeutischen Ziel und sollte neben der Befundsicherung einer VKB-Ruptur, auch die Möglichkeit der einzeitigen Therapie gewährleisten. Die Arthroskopie bietet die höchste diagnostische Sicherheit aller Untersuchungsverfahren, ist aber mit den Risiken eines chirurgischen Eingriffs verbunden.

1.6 Therapiekonzepte

Vor dem Hintergrund der geringen natürlichen Heilungstendenz des vorderen Kreuzbandes bei interligamentärer Ruptur^{2,99} einerseits und im Wissen um das Schicksal des Kreuzbandinsuffizienten Kniegelenks andererseits, stellt sich die Frage nach der adäquaten Therapie einer VKB-Ruptur. Es existieren keine starren Kriterien für die Wahl eines Therapiekonzepts. Vielmehr muss unter Berücksichtigung spezifischer Indikationen und Kontraindikationen, der klinischen Gesamtsituation (Grunderkrankungen, Begleitverletzungen, Morphotyp) und des Patientenwunsches (Aktivitätsniveau, individuelle Anforderungen, Motivation) die Wahl zwischen einer konservativen und einer operativen Therapie der VKB-Ruptur getroffen werden.

Lässt man Begleitverletzungen außer Acht, sind vor allem Art und Intensität des ausgeübten Sports, die berufliche Situation und der Lebensstil des Patienten für die Therapiewahl von maßgeblicher Bedeutung; das Patientengeschlecht und das Alter spielen eine untergeordnete Rolle⁶. Das gestiegene Gesundheitsbewusstsein in der Gesamtbevölkerung führt dazu, dass sich Patienten aller Altersgruppen wieder sportlich betätigen wollen und einen Anspruch darauf geltend machen⁹⁹. Bei demzufolge verschwimmenden Altersgrenzen, lassen sich keine allgemeingültigen Empfehlungen für eine konservative oder operative Therapie auf der Grundlage des Patientenalters aussprechen. Letztlich ist es das Ziel jeder Therapie, den Stabilitätsanforderungen des Patienten im täglichen Leben gerecht zu werden und zukünftige, aus der Kreuzbandverletzung resultierende Beschwerden, zu verhindern oder zu minimieren.

1.6.1 Konservative Therapie

Unter konservativer Therapie versteht man die Behandlung eines Krankheitszustandes mit Hilfe medikamentöser und physikalischer Maßnahmen. Der konservative Ansatz bei der Therapie einer vorderen Kreuzbandruptur verfolgt das Prinzip einer durch physiotherapeutisches Training forcierten muskulären Stabilisierung. Er fußt auf der Vermutung, dass ein Kniegelenk durch funktionelle Kompensation auch ohne intaktes VKB gut funktionieren kann und die chirurgische Rekonstruktion des Bandes nur passive Stabilität erreichen und nicht zwangsläufig die Entwicklung arthrotischer Degenerationserscheinungen verhindern würde^{4,8,100-102}.

Andererseits kann durch eine konservative Behandlung die Stabilität des Kniegelenks für sportliche Belastungen und selbst für alltägliche Beanspruchungen nicht immer ausreichend wiederhergestellt werden. Häufigkeit und Ausmaß von Meniskus- und Knorpelalterationen korrelieren positiv mit dem Grad der Knieinstabilität^{3,100,103,104}. Die veränderte Biomechanik führt zu unphysiologischen Belastungen des Kniegelenks, in deren Folge es zur sukzessiven Schädigung der sekundären Kniegelenkstabilisatoren und konsekutiv zur Früharthrose mit reduziertem Aktivitätsniveau kommt^{5,46,96,103,105}. Bei konservativ versorgten Patienten besteht daher ein signifikanter Zusammenhang zwischen gesteigerter sportlicher Aktivität und der Entwicklung einer Gonarthrose⁹⁶.

Aufgrund dieser Problematik stellt die konservative Therapie nur für Patienten mit Partialruptur oder isolierter Ruptur des vorderen Kreuzbandes, in Kombination mit geringer pathologischer Laxizität, moderater körperlicher Aktivität, bereits fortgeschrittener Gonarthrose oder höherem Lebensalter, eine Alternative zum operativen Eingriff dar^{6,106,107}. Diese Patienten sollten darüber hinaus einen risikobewussten Lebensstil pflegen, pivotierende Sportarten meiden und im Alltag die VKB-Insuffizienz kompensieren können.

1.6.2 Operative Therapie

Der operativen Therapie liegt die Annahme zugrunde, dass das vordere Kreuzband für die physiologische Funktion des Kniegelenks wichtig ist und die Ruptur des Bandes unvermeidlich zur Kniegelenksdegeneration führt, wohingegen seine chirurgische Rekonstruktion eine weitgehend normale Gelenkfunktion wiederherstellen kann. In vergleichenden Studien wird der chirurgischen Intervention ein signifikant besseres Langzeitergebnis und dem konservativen Ansatz eine überwiegend ungünstige Prognose bestätigt^{3,5,108}. Deshalb wird im klinischen Alltag die operative Versorgung einer vorderen Kreuzbandruptur durch die arthroskopische Rekonstruktion angestrebt^{27,44}. Begleitschäden anderer Kniebinnenstrukturen können hierbei gut beurteilt und einzeitig mit der vorderen Kreuzbandruptur arthroskopisch therapiert werden. Eine zusätzliche Schädigung der Menisken oder des Knorpels kann allerdings zu schlechteren Langzeitergebnissen nach einer VKB-Rekonstruktion führen, als ohne entsprechende Begleitverletzungen^{55,104,109}.

Indikationen und Zeitpunkt

1. Indikationen^{6,92}

Nach der Diagnose einer vorderen Kreuzbandruptur ist die Indikation zum Bandersatz nicht unweigerlich gegeben. Jeder Patient bedarf im Hinblick auf die optimale Therapie einer individuellen Betrachtung, weshalb es auch zu einem Abweichen vom obenstehend empfohlenen Vorgehen kommen kann. Die weitgehend anerkannten OP-Indikationen für einen vorderen Kreuzbandersatz leiten sich vorrangig von den Begleitbefunden und dem Lebensstil des Patienten ab.

- Kinder und Jugendliche
- in Freizeit oder Beruf körperlich aktiver Patient
- Knorpelläsion
- adressierbare Meniskuläsion
- primär versorgungspflichtige Begleitverletzung anderer passiver Kniegelenkstabilisatoren (hinteres Kreuzband, laterale oder höhergradige mediale Kollateralband-Verletzung, posterolaterale Rotationsinstabilität)
- unter konservativer Behandlung therapierefraktäre funktionelle Instabilität

Tab. 1.2 Indikationen zur operativen Therapie.

Das Alter des Patienten stellt unter Berücksichtigung des Lebensstils nur eine relative Indikation dar. Bei Kindern und Jugendlichen wird die Indikation dagegen grundsätzlich gestellt, da die genannten Sekundärschäden aufgrund des erhöhten kindlichen Bewegungsdrangs sehr frühzeitig auftreten können. Auch bei Schwerarbeitern, Berufssportlern und leistungsorientierten Freizeitsportlern der im Kapitel 1.4.1 genannten Risiko-Sportarten ist ein operatives Vorgehen vor der erneuten aktiven bzw. sportlichen Betätigung indiziert^{27,102}.

2. Zeitpunkt

Bei gegebener Operationsindikation einer vorderen Kreuzbandruptur (Tab. 1.2) liegt die Notwendigkeit einer möglichst frühzeitigen Rekonstruktion des Bandes vor, um die Risiken von degenerativen Kniegelenksprozessen so gering wie möglich zu halten^{8,55}.

Ein später Operationszeitpunkt erhöht das Risiko von Verletzungen der sekundären Kniegelenkstabilisatoren¹⁰⁹. Ist die Indikation zur Operation gestellt, bestimmt maßgeblich der klinische Zustand des verletzten Kniegelenks den optimalen Zeitpunkt der VKB-Plastik⁹². Die Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes sollte erfolgen, wenn das betroffene Kniegelenk reizfrei ist, also keinen Erguss mehr aufweist und eine schmerzlose freie Extension bei einer Flexion von mindestens 120 Grad erlaubt. Dieser Zustand ist in den meisten Fällen sechs bis acht Wochen nach dem Trauma erreicht. Bis zu diesem Termin wird das Gelenk funktionell konservativ behandelt⁹².

Verfahren

Die Kreuzbandrekonstruktion stellt hohe Anforderungen an das Verständnis und die Fertigkeiten des Operateurs. Sie setzt Erfahrungen mit verschiedenen chirurgischen und arthroskopischen Techniken, Transplantaten und Verankerungssystemen voraus. In der Fachliteratur sind über 400 verschiedene Operationsmethoden veröffentlicht worden³⁴. Diese können der Reihenfolge ihrer historischen Anwendung nach in drei Verfahren unterteilt werden.

- Primäre Naht, extraartikuläre Stabilisierung und intraartikuläre Ersatzplastik.

Da das intraartikuläre Rekonstruktionsverfahren des VKB heutzutage der Standard und Grundlage der vorliegenden Arbeit ist, wird im Folgenden nur auf dieses Verfahren näher eingegangen. Es wird entweder über zwei Zugänge oder als „All-inside“-Variante (tibial outside-in, femoral inside-out) mit nur einem Zugang durchgeführt¹¹⁰. Darüber hinaus kann man die Einbündel- von der Doppelbündel-Technik unterscheiden. Letztgenannte Variante soll die komplizierte Anatomie des VKB und seine funktionellen Bündel (AMB und PLB) besser rekonstruieren können^{24,27}, sodass die Rotationsinstabilität gegenüber der Einbündel-Technik effektiver adressiert wäre. Jedoch ist der Komplexität des aufwendigeren chirurgischen Eingriffs Rechnung zu tragen, da der theoretische Nutzen nur bei fehlerfreier Durchführung gegeben ist⁶. Die Literatur vermittelt ein uneinheitliches Bild über den Erfolg der Methode, diesem Anspruch gerecht zu werden. Bei gegebener Indikation kann der Rotationsinstabilität auch durch eine anterolaterale Stabilisierung begegnet werden¹¹¹.

Transplantate

Um bei einer erneuten körperlichen und sportlichen Betätigung instabilitätsbedingte degenerative Veränderungen zu verhindern, sollte die Ersatzplastik idealerweise die gleichen strukturellen und biomechanischen Eigenschaften wie das native vordere Kreuzband besitzen. Die Herausforderung besteht darin, die multifaszikuläre Struktur und den feingeweblichen Aufbau des VKB optimal zu rekonstruieren. Das Transplantat sollte eine sichere Fixierung und eine schnelle Einheilung gewährleisten sowie eine geringe Entnahmemorbidity aufweisen. Damit sind die Voraussetzungen gegeben, um die Kinematik und Stabilität des verletzten Kniegelenks wiederherstellen zu können¹⁰⁸.

Keines der gegenwärtig eingesetzten Transplantate entspricht vollkommen diesen Anforderungen. Als Ergebnis experimenteller Studien und klinischer Erfahrungen werden heute am gleich- und gegenseitigen Knie entnommene autogene Sehnen für den VKB-Ersatz favorisiert^{6,14,26}. Darüber hinaus stehen auch allogene Transplantate zur Verfügung. Vollsynthetische und xenogene Bandprothesen haben sich hingegen nicht durchgesetzt und sind als obsolet zu betrachten. Die bevorzugten autogenen und allogenen Kreuzbandtransplantate sind gegenwärtig zum einen das mittlere Drittel der Patellarsehne (BPTB) und zum anderen die Beugesehnen des Pes anserinus (Semitendinosussehne ohne oder mit Gracilissehne). Mit nachrangiger klinischer Bedeutung erfolgt auch die Verwendung des mittleren Drittels der Quadricepssehne¹⁴.

Bei den Transplantaten werden gemäß der Beschaffenheit ihrer Transplantatenden grundsätzlich freie Sehnentransplantate (Hamstringsehnen, Quadricepssehne proximal) von Transplantaten mit anhängendem Knochenblock (Patellarsehne, Quadricepssehne distal) unterschieden. Daraus resultieren zwei Verankerungskonzepte mit verschiedenen langen ossären Integrationszeiten^{17,31}.

- Sehne zu Knochen (6 bis 12 Wochen)
- Knochen zu Knochen (4 bis 6 Wochen)

1. Patellarsehne

Die autogene Patellarsehne (BPTB) wurde von vielen Autoren lange Zeit als sogenannter Goldstandard bei der Transplantatwahl bezeichnet und für den vorderen Kreuzbandersatz weltweit am häufigsten verwendet^{11,20,53-56}. Insbesondere die im Vergleich zu reinen Sehnentransplantaten vorteilhafte, schnellere ossäre Integration

(chondral-apophysärer Insertionsmodus⁷⁵) in die Bohrkanäle von Femur und Tibia über anhängende Knochenblöcke¹⁴, favorisierte das Transplantat des mittleren Patellarsehnendrittels. In den vergangenen zwei Dekaden mehrten sich aber Berichte über eine charakteristische Entnahmemorbidität des Patellarsehnentransplantats. Andauernde Veröffentlichungen zu den Themen Arthrofibrose, vermehrter vorderer Knieschmerz und Schmerzen beim Knien¹², Quadricepsschwäche und Streckdefizit^{14,21,24}, Patellarsehnenriss, Patellafraktur^{14,34} und Arthrose^{25,26} ließen Kreuzbandchirurgen nach alternativen Transplantaten für den Kreuzbandersatz suchen.

2. Hamstringsehnen

Gegenüber der Patellarsehne kann das Transplantat der mehrfach gedoppelten Hamstringsehnen die komplexe Bündelstruktur des nativen VKB besser reproduzieren. Biomechanische Untersuchungen konnten zudem signifikant höhere Werte der vierfach gelegten Hamstringsehnen für Reißfestigkeit und Steifigkeit belegen^{15,23}.

Die mechanischen Eigenschaften der beiden genannten Sehnentransplantate stellen im Hinblick auf das Langzeitergebnis des vorderen Kreuzbandersatzes keine Entscheidungshilfe mehr dar, denn Anwendung heute üblicher Techniken verfügen beide Transplantate im Vergleich mit dem intakten nativen VKB über gleichwertige oder höhere Reißfestigkeiten und Steifigkeiten^{14,17,99}. Dagegen erlangt die charakteristische Verlaufsmorbidität der Transplantate für viele Operateure eine zunehmende Entscheidungsrelevanz bei der Transplantatwahl. Neben der deutlich komplikationsärmeren Sehnenentnahme und der Fähigkeit zur Regeneration der Hamstringsehnen am Entnahmeort¹¹², wird in der Literatur die geringere postoperative Morbidität des Hamstringsehnentransplantats gegenüber dem Patellarsehnentransplantat beschrieben^{12,14,18,21,53}. Pinczewski und Kollegen konnten anhand von Langzeitdaten über 20 Jahre zeigen, dass beide Transplantatalternativen vergleichbar gute objektive und subjektive Ergebnisse erreichen, die Patienten mit Hamstringsehnentransplantat aber signifikant seltener Knieschmerzen und signifikant weniger radiologisch nachweisbare Arthrosezeichen aufwiesen²⁶. Auch andere Autoren berichteten in Vergleichsstudien von einander ähnlichen funktionellen Ergebnissen des Patellar- und Hamstringsehnentransplantats, zumeist ohne eindeutige Überlegenheit einer der beiden Sehnen^{12,14,25,53,55}.

In Anbetracht der gleichwertigen funktionellen Ergebnisse und der entscheidenden Vorteile bei der langfristigen Morbidität, kam es in den vergangenen zwei Jahrzehnten zu einem Paradigmenwechsel beim Kreuzbandersatz, hin zur favorisierten Wahl der autogenen Hamstringsehnen^{10,12,14,17,18,20-26}.

Transplantatverankerung

1. Grundlagen

Unabhängig vom Transplantattyp, ist dessen stabile Einheilung in den Knochen die Voraussetzung für das Gelingen der Kreuzbandersatzplastik^{16,75}. Bis zur vollständigen biologischen Integration der Sehne ist deren Verankerung das mechanische Bindeglied zum Knochen und die wesentliche Schwachstelle des gesamten Konstrukts^{17,99,113}. Gleichzeitig stellen Rehabilitationsprotokolle bereits in der früh-postoperativen Phase hohe Anforderungen an die initiale Transplantatfestigkeit¹¹⁴.

Im Vergleich zum Patellarsehnentransplantat ist die vollständige biologische Integration eines knochenfreien Hamstringsehnentransplantats mechanisch anspruchsvoller und stellt eine größere Herausforderung an die Primärfixierung dar^{16,17}. Die periostaldiaphysäre Insertion, welche lange Zeit als einzig möglicher Insertionsmodus eines reinen Sehnentransplantats betrachtet wurde⁷⁵, ist aufgrund der direkten bindegewebigen Insertion zwischen Sehne und Knochen einer erhöhten mechanischen Belastung ausgesetzt, gegenüber der chondral-apophysären Insertion des nativen VKB und der Patellarsehne mit anhängendem Knochenblock⁷⁶. Dementsprechend berichteten mehrere Studien von einer geringeren Primärstabilität des Hamstringsehnentransplantats, in Abhängigkeit von dessen Mehrsträngigkeit und dem verwendeten Verankerungssystem. Sie scheint bedingt zu sein durch eine langsamere Transplantateinheilung und eine im Langzeitverlauf vergleichsweise größere Elongation mit vermehrter anterior-posteriorer Laxizität^{12,17,20} sowie durch Bohrkanaufweitungen infolge von Transplantat-Tunnel-Bewegungen^{28,29}. Brand und Kollegen machten dafür die gängigen Verankerungsverfahren verantwortlich, da keines die biomechanischen Eigenschaften einer natürlichen Kreuzbandinsertion erreichen würde¹⁷.

Durch die wissenschaftliche Fokussierung auf die Verankerungstechnik von rein weichgewebigen Ligamenten konnte die Arbeitsgruppe von Prof. Weiler nachweisen, dass die Art der Transplantatverankerung einen wesentlichen Einfluss auf die ossäre

Sehnenintegration hat^{113,115}. Die anatomische Interferenzschraubenverankerung von weichgewebigen Transplantaten auf Höhe des Gelenkniveaus ermöglicht eine dem nativen VKB entsprechende, direkte ossäre Integration mit chondral-apophysärer Insertion¹¹³. Nachfolgende klinische Untersuchungen zum VKB-Ersatz mittels dieser Technik zeigten gleichwertige Stabilitätsergebnisse des Hamstring- und Patellarsehnen-transplantats¹⁸.

2. Verankerungsprinzipien

Dem Prinzip nach unterscheidet man anatomische, semi-anatomische und nicht-anatomische Verankerungen von Kreuzbandplastiken. Die Fixierung der knöchernen bzw. ligamentären Transplantatenden bei Knochen-Sehne(-Knochen)-Transplantaten bzw. reinen Sehnen-transplantaten erfolgt entweder intraossär, durch anatomische und semi-anatomische Techniken, oder in extrakortikaler Position, durch nicht-anatomische Techniken^{15-17,31,99,116,117} (Abb. 1.4a-c). Bei der semi-anatomischen Verankerung handelt es sich um eine intraossäre Transplantatfixierung, die nicht auf Höhe des Gelenkniveaus stattfindet.

Weiterhin unterscheidet man die indirekte Verankerung, bei der das Transplantat über anhängendes Fadenmaterial fixiert wird, von der direkten Transplantatverankerung ohne Interponat. Fadenmaterial birgt dabei das Risiko einer Knotenlockerung, was zu einem nicht reversiblen Entlangrutschen des Transplantats am Fixierungsort^{15,17} (engl.: graft slippage) und somit zu einer Konstruktlockerung beitragen kann.

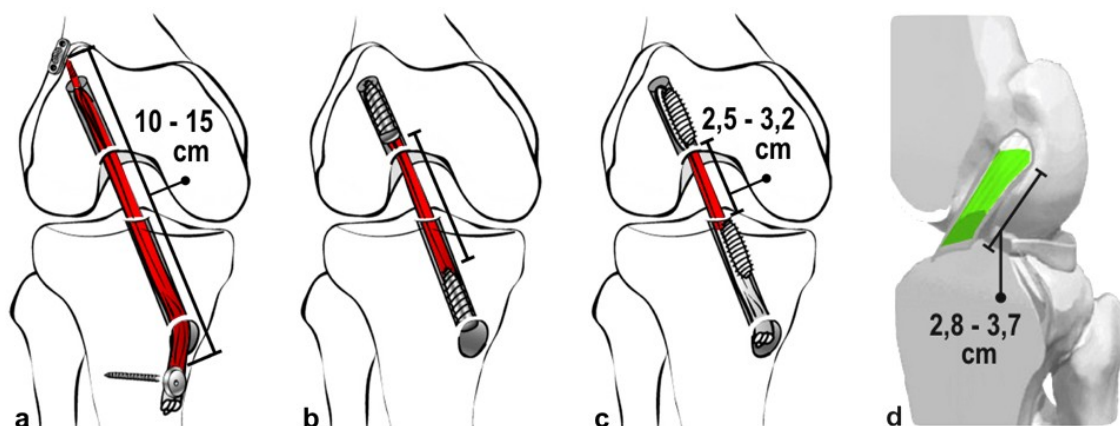


Abb. 1.4 Verankerungsprinzipien und Transplantatlängen. a) indirekt, femoral und tibial nicht-anatomisch; b) direkt, femoral anatomisch, tibial semi-anatomisch; c) direkt, femoral und tibial anatomisch¹⁹; d) natives VKB¹⁶

Abhängig von der gewählten Fixierungstechnik sowie der Gesamtlänge und der Eigenelastizität des Transplantats, erfolgt bei Kniebeuge- und Streckbewegungen oder bei anterior-posterioren Translationen eine reversible Deformierung des gesamten Konstrukts mit longitudinalen und sagittalen Transplantat-Tunnel-Bewegungen (sogenannter Bungee cord effect und Windshield whiper effect)¹⁵. Diese primär bei nicht-anatomischen Verankerungstechniken vorkommenden Effekte verursachen intraossäre Scherbewegungen des Transplantats gegen die Tunnelwand und korrelieren negativ mit der Konstruktsteifigkeit (Elongation ÷ applizierte Kraft). Sie werden sowohl für das Auftreten von Bohrtunnelaufweitungen^{28,30} als auch für Transplantatrupturen am Tunneleingang¹⁶ verantwortlich gemacht. Die Bewegungen verzögern zudem das Sehneneinheilungsverhalten¹⁶ und haben wahrscheinlich einen negativen Einfluss auf die Knochen-Band-Heilung. Eine mangelnde Primärstabilität für die gewünschte frühfunktionelle Nachbehandlung kann die Folge sein³⁰, gleichwohl bisher in keiner Studie ein negativer Effekt aufgeweiteter Tunnel auf das klinische Ergebnis nach der VKB-Rekonstruktion belegt werden konnte. Klinische Relevanz können Tunnelerweiterungen jedoch in der Revisionschirurgie erlangen^{16,30,99}.

Aus biologischer und biomechanischer Sicht wird deshalb heute die direkte und anatomische Transplantatverankerung auf dem Niveau der Gelenkoberfläche empfohlen^{16,17,20,31,99,116}, dem Ort der nativen VKB-Insertion. Gegenüber indirekten und gelenkfernen Techniken gewährleistet diese Position eine kürzere Transplantatlänge zwischen beiden Verankerungen, vergleichbar mit der intraartikulären Länge des nativen VKB (Abb. 1.4a-d). Das hat bedeutende biomechanische Vorteile.

- Geringere viskoelastische und -plastische Deformierung des Gesamtkonstrukts mit Reduktion von Transplantatbewegungen im Bohrtunnel und dadurch
- eine höhere Kniestabilität und Transplantatisometrie^{16,31,73,99,115}.

3. Verankerungsverfahren

Das Verankerungsverfahren stellt einen wesentlichen Prädiktor für den Erfolg einer biologischen Transplantatintegration im Bohrtunnel dar. Trotz vieler methodischer Verbesserungen beim vorderen Kreuzbandersatz, nimmt durch die steigende Inzidenz von Sportverletzungen im Allgemeinen und vorderer Kreuzbandrupturen im Besonderen auch die Anzahl der Transplantat-Re-Rupturen bei adäquatem Trauma deutlich zu¹¹⁸.

Deshalb sollte die Wahl der Verankerungsmethode beim primären VKB-Ersatz auch deren Revidierbarkeit berücksichtigen¹⁶. In Abhängigkeit vom Transplantattyp (knöcherne oder ligamentäre Transplantatenden) und vom Verankerungsprinzip (anatomisch, nicht-anatomisch) unterscheidet man mehrere Fixierungssysteme.

- Fixationsbutton, Staple, Naht über Knochenbrücke (nicht-anatomisch, indirekt)
- Kortikalisschraube (nicht-anatomisch, direkt oder indirekt), ggf. mit gezahnter Unterlegscheibe
- EndoPearl oder Knochenblock aufgenäht (semi-anatomisch, indirekt)
- Transfixationssystem (semi-anatomisch, direkt)
- Interferenzschraube (anatomisch oder semi-anatomisch, direkt)
- Press-fit-Verankerung bei Transplantaten mit anhängendem Knochenblock und bei reinen Sehnen-Transplantaten mit Spongiosazylinder (anatomisch, direkt)

Tab. 1.3 Fixierungssysteme des vorderen Kreuzbandes.

Obwohl viele solitäre Fixierungssysteme im Vergleich zum nativen VKB überlegene oder gleichwertige experimentelle Verankerungsfestigkeiten erreichen, scheint aufgrund von biologischen und biomechanischen Störvariablen in vivo eine weniger suffiziente Transplantatverankerung zu resultieren⁹⁹, besonders bei nicht-anatomischen Fixierungen. Neben einer hohen initialen Verankerungsfestigkeit bedarf es auch einer Optimierung der langfristigen Einheilung des Transplantats auf dem Gelenkniveau.

Aufgrund ihrer Relevanz für diese Untersuchung, wird im Folgenden nur auf Interferenzschrauben und die EndoPearl näher eingegangen.

Interferenzschrauben

Kurosaka und Kollegen beschrieben erstmalig die Transplantatverankerung mit einer speziellen Madenschraube¹¹⁹, die sogenannte Interferenzschraube (Abb. 1.5). Eine direkte Fixierung des Transplantats mit Interferenzschrauben aus Metall oder biodegradierbaren Materialien ermöglicht dessen anatomische Verankerung am Ort der nativen VKB-Insertion und folglich eine kürzere Länge des Transplantats selbst¹²⁰. Schädliche Transplantat-Tunnel-Bewegungen können weitgehend neutralisiert und die Gracilissehne bei ausreichend langer Semitendinosussehne geschont werden.

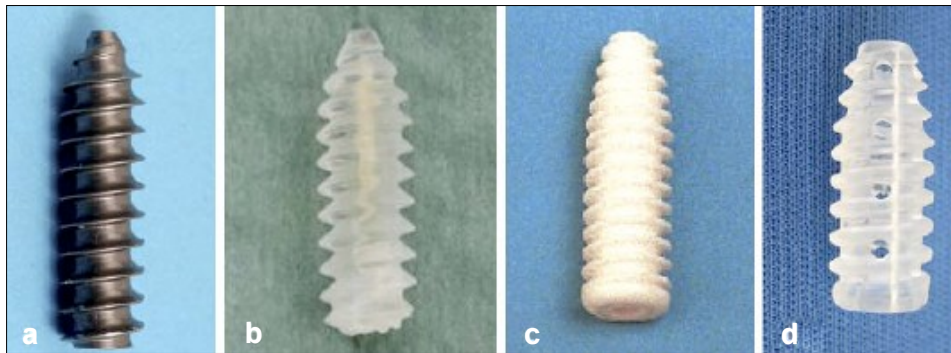


Abb. 1.5 Interferenzschrauben. a) Titan; b) Poly-L-Lactid; c) Calciumphosphat; d) Poly-L/DL-Lactid perforiert ¹¹⁷

Die überwiegend verwendeten biodegradierbaren Interferenzschrauben erreichten in biomechanischen und klinischen Studien im Vergleich mit Titanschrauben gleichwertige bis überlegene Versagenslasten ¹²⁰⁻¹²³. Sie ermöglichen eine ungestörte bildgebende Diagnostik und durch ein weniger scharfkantiges Gewinde wird das Risiko einer Transplantatschädigung während der Schraubeninsertion vermindert ^{15,17,123}. Außerdem werden Revisionseingriffe nicht unnötig durch die Präsenz von Metallimplantaten erschwert. Am Beispiel einer biodegradierbaren Interferenzschraube konnte die Arbeitsgruppe von Prof. Weiler im Tierversuch demonstrieren, dass die anatomische Verankerung eines Weichteiltransplantats unter Kompression am Tunneleingang zu einer direkten Bandinsertion auf dem Gelenkniveau führt ¹¹³. Bei der nicht-anatomischen Verankerung entsteht durch Transplantat-Tunnel-Bewegungen dagegen eine zell- und gewebereiche fibröse Zwischenschicht, welche morphologisch einer indirekten Bandinsertion entspricht und biomechanisch durch Scherinstabilitäten gekennzeichnet ist. Die Interferenzschraubenverankerung ermöglicht einen breiten Sehne-Knochen-Kontakt mit einem geringen Zwischenraum und somit ein gutes Transplantat-Tunnel-Matching, wodurch der nachteilige synoviale Einstrom in die Bohrtunnel begrenzt und eine Transplantatbewegung in ihnen reduziert wird. Konsekutiv können die ossäre Transplantateinheilung unterstützt und eine hohe Konstruktsteifigkeit erreicht werden ^{16,17,113}. Allerdings ist nach alleiniger Verwendung der Interferenzschraube eine Transplantatmigration in Richtung des Gelenkspalts möglich, weshalb es zum Graft slippage-Phänomen kommen kann ^{30,31}. Daher wird für die Interferenzschraubenfixierung eines Weichteiltransplantats von einigen Autoren das Prinzip der Hybridverankerung empfohlen, insbesondere tibial ^{16,31}.

Hybridverankerung und EndoPearl

Die Hybridverankerung kombiniert zwei Verankerungsverfahren an demselben Transplantatende unter Ausnutzung bzw. Kompensation der biomechanischen und biologischen Vor- bzw. Nachteile^{16,31}, wobei jedes Verfahren für sich ausreichend Verankerungsfestigkeit bieten soll. Beispielsweise werden bei der Verankerung eines Weichteiltransplantats die Nachteile der gelenkfernen Fixierung (große Eigenelastizität, Bohrkanalausweitung) durch die hohe Steifigkeit einer anatomischen, das Transplantat auf dem Gelenkniveau komprimierenden Verankerung ausgeglichen¹⁵. Biomechanisch betrachtet entsteht eine kürzere und folglich weniger mobile Transplantatlänge. Die initial geringere Fixierungsfestigkeit der anatomischen Weichteilverankerung wird wiederum durch die hohe primäre Versagenslast der gelenkfernen Fixierung kompensiert. Im Sinne der Hybridverankerung existieren für die femorale und die tibiale Transplantatverankerung mehrere Kombinationsmöglichkeiten^{15,16,19,27,30,124-128}.

Femorale Kombinationen	<ul style="list-style-type: none"> • Spongiosazylinder + Interferenzschraube / Staple • Interferenzschraube + EndoPearl / Staple • Transfixationssystem + Interferenzschraube / Spongiosazylinder • Fixationsbutton + Interferenzschraube / Spongiosazylinder
Tibiale Kombinationen	<ul style="list-style-type: none"> • Spongiosazylinder + Fixationsbutton / Staple / Naht über Knochenbrücke oder Schraube • Interferenzschraube + Fixationsbutton / Staple / Naht über Knochenbrücke oder Schraube • Interferenzschraube + EndoPearl

Tab. 1.4 Hybridverankerungen. Femorale und tibiale Kombinationsmöglichkeiten.

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchte femorale Hybridverankerung verbindet die anatomische, direkte Interferenzschraubenverankerung einerseits mit der semi-anatomischen, indirekten Transplantatverankerung durch die EndoPearl (Linvatec ConMed, Largo, FL, USA) andererseits. Diese biodegradierbare Perle (Poly-DL-Lactid) wird an das femorale Ende des Transplantats genäht. Mit ihrer verblockenden Lage in der Tiefe des Bohrtunnels noch vor der Schraubenspitze soll sie als funktioneller Widerhaken ein sekundäres Entlangrutschen des anhängenden Transplantats an der Interferenzschraube verhindern. In biomechanischen Untersuchungen zur EndoPearl konnte die Arbeitsgruppe von Prof. Weiler nachweisen, dass die Verankerungsfestigkeit des Ligaments deutlich erhöht und eine Transplantatauslockerung verhindert wird¹²⁷.

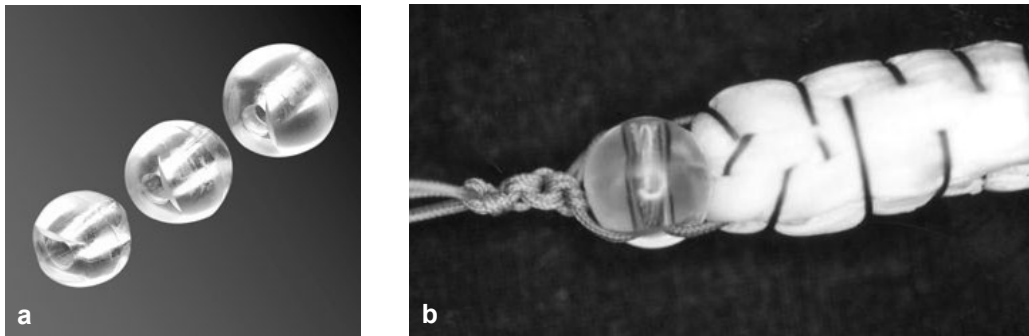


Abb. 1.6 EndoPearl. a) verschiedene Größen (Fa. Linvatec); b) auf das Transplantat genäht ¹²⁷

Revision nach primärem vorderen Kreuzbandersatz

Infolge der steigenden Anzahl primärer Rekonstruktionen des vorderen Kreuzbandes wird auch eine zunehmende Häufigkeit operativer Revisionseingriffe beobachtet ¹¹⁸. Postoperative Infektionen, Bewegungseinschränkungen, Instabilitäten und Schmerzen stellen das klinisch vordergründige Beschwerdebild dar ³⁴ und machen bei frustraner konservativer Therapie eine operative Revision notwendig. Die Literatur zur primären VKB-Rekonstruktion beschreibt Revisionsraten von bis zu 15 Prozent ¹¹⁸, abhängig vom operativen Verfahren und von der Transplantatwahl beim primären Eingriff ^{27,118,129,130}. Eine andere Ursache für die zunehmende Zahl von Revisionsoperationen liegt scheinbar darin begründet, dass viele Chirurgen wenig Routine mit dem VKB-Ersatz besitzen. In den USA ergab eine Befragung, dass 85 Prozent der Kreuzbandchirurgen weniger als zehn Rekonstruktionen pro Jahr durchführen, bei einem Mittelwert von 174 (\pm 105) Rekonstruktionen pro Jahr und Operateur ²⁷.

Der häufigste Grund für eine Revision ist die wiederkehrende Instabilität des Kniegelenks durch ein Transplantatversagen, zumeist infolge eines erneuten adäquaten Traumas (ätiologisch am wichtigsten), einer mangelhaften Transplantateinheilung (Bungee cord effect, Bohrkanalausweitung, inadäquates Rehabilitationsregime) und operationstechnischen Fehlern ^{27,30,118,129,130}. Letztere sind hauptsächlich die nicht-anatomische Tunnelpositionierung und die beim primären VKB-Ersatz unzureichend therapierten Begleitpathologien, als auch ein zu früher Operationstermin. Postoperative Bewegungsbeeinträchtigungen des Knies sind oft bedingt durch die Arthrofibrose, eine exzessive Bindegewebsvermehrung im Kniegelenk aufgrund von inflammatorisch-reparativen Prozessen, oder durch das Zyklusyndrom, ein Narbengewebeknoten im ventralen Bereich des Bandersatzmaterials ¹³¹.

1.7 Wissenschaftliche Fragestellung

Die hohe Anzahl wissenschaftlicher Publikationen zur Transplantatverankerung beim vorderen Kreuzbandersatz suggeriert, dass die ideale Technik weiterhin gesucht wird. Vor allem, wenn durch eine frühzeitige Rehabilitation die schnelle Wiederherstellung der Kniegelenksfunktion gefordert und eine baldige Rückkehr in Alltag und Sport erwartet werden, bedarf es einer Fixierungstechnik, welche neben der möglichst anatomischen Einheilung des Transplantats auch eine adäquate Primärstabilität gewährleistet.

Die Interferenzschraubenverankerung von autogenen Hamstringsehnentransplantaten ist eine zuverlässige Fixierungstechnik, die zu guten funktionellen Langzeitergebnissen nach dem vorderen Kreuzbandersatz führt. Jedoch ist die primäre Stabilität eine Schwachstelle des Gesamtkonstrukts. Das Risiko einer Transplantatmigration während der frühen Phase der Transplantatintegration ist erhöht. Zur Verbesserung dieses biomechanischen Mangels wurde die Hybridverankerung von Kreuzbandtransplantaten vorgestellt. Die in der vorliegenden Arbeit beschriebene Technik bedient sich dieses Prinzips unter Verwendung der EndoPearl. Damit soll ein Entlangrutschen des Transplantats an der Interferenzschraube verhindert werden. Prof. Weiler demonstrierte in einer biomechanischen Studie zur Beugesehnenverankerung überlegene Ergebnisse bei der initialen Verankerungsstärke, der Versagenslast und der Steifheit für die Kombination der EndoPearl mit einer biodegradierbaren Interferenzschraube¹²⁷. Die Studienlage klinischer Ergebnisse unter Verwendung einer Hybridverankerung mit der EndoPearl ist sehr überschaubar. Lediglich Arneja und Kollegen verwendeten in einer klinischen Untersuchung, übereinstimmend mit der vorliegenden Studie, bei allen Patienten ein bilateral mit biodegradierbaren Interferenzschrauben verankertes Semitendinosussehnen-Transplantat und in der Interventionsgruppe zusätzlich die EndoPearl in femoraler Position¹²⁴. Die Patientenzahl der Interventionsgruppe mit vollständiger Nachbeobachtung (engl.: follow-up) war mit 15 Patienten aber sehr gering und der Beobachtungszeitraum betrug lediglich 18 Monate.

Ein anderer Aspekt, welcher die Stabilität der Verankerung von Weichteiltransplantaten zu beeinflussen scheint, ist in den charakteristischen Gegebenheiten der Geschlechter zu suchen. Mehrere Autoren berichteten nach der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes unter Verwendung eines Hamstringsehnentransplantats und einer solitären Interferenzschraubenverankerung von signifikanten Stabilitätsunterschieden

des Kniegelenks, beim Vergleich beider Geschlechter^{12,25,132,133}. Die häufig größere anterior-posteriore Translation bei weiblichen Kreuzbandpatienten wurde einer reduzierten Primärstabilität zugeschrieben. Durch die geringere Knochendichte bei Frauen soll eine schwächere biomechanische Verankerung entstehen. Ausgehend von dieser Vermutung konnten Hill und Kollegen für die tibiale Hybridfixierung zusätzlich zur Interferenzschraube eine signifikante Verbesserung der anterior-posterioren Laxizität nachweisen¹³⁴. Allerdings kam in ihrer Untersuchung femoral keine Hybridverankerung zum Einsatz und das Patientenkollektiv bestand nur aus Frauen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde bei der Auswertung der vorliegenden Studiendaten auch auf geschlechterspezifische Unterschiede im Outcome der Patientengruppen eingegangen.

Aus diesen Überlegungen leiten sich die wissenschaftlichen Fragestellungen der vorliegenden Untersuchung ab:

1. Kann die femorale Hybridverankerung des autogenen Hamstringsehnentransplantats durch die Kombination einer Interferenzschraube und einer EndoPearl gegenüber der femoral alleinigen Interferenzschraubenverankerung eine Verbesserung der subjektiven und objektiven Kniegelenksfunktion erreichen?
2. Gibt es geschlechterspezifische Unterschiede im postoperativen Outcome der beiden Untersuchungsgruppen?

2 Methodik

2.1 Studiendesign und methodisches Vorgehen

2.1.1 Design der Studie

Die vorliegende Untersuchung ist eine Interventionsstudie mit prospektiver Datenerhebung über mindestens zwei Jahre und retrospektiver Datenauswertung. Aus der Interventionsgruppe und der Kontrollgruppe gingen durch Paarbildung nach definierten Kriterien sogenannte Matched Pairs hervor.

2.1.2 Methodisches Vorgehen

Am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité - Universitätsmedizin Berlin wird am Campus Virchow-Klinikum seit 1997 die primäre Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes mit einem vierfach gelegten autogenen Hamstringsehnentransplantat durchgeführt. Dabei kam zwischen September 1997 und Dezember 1999 in 141 Fällen femoralseitig eine solitäre biodegradierbare Interferenzschraubenverankerung zum Einsatz (Gruppe A bzw. Kontrollgruppe). Auf der Grundlage dieses Vorgehens fand eine Weiterentwicklung der Beugesehnenverankerung durch die Arbeitsgruppe von Prof. Weiler statt. Als Resultat erfolgt die femorale Transplantatverankerung seit Januar 2000 stets in Hybridtechnik mit der EndoPearl zusätzlich zur Interferenzschraube. Von dieser Patientengruppe wurden alle bis Ende Juli 2004 operierten Patienten für die vorliegende Studie berücksichtigt (Gruppe B bzw. Interventionsgruppe, n = 482).

In beiden Patientengruppen kam eine identische tibiale Verankerung mittels einer biodegradierbaren Interferenzschraube und einem Knoten des Fadenmaterials über eine Knochenbrücke zum Einsatz. Alle Operationen wurden zur Reduktion eines Performance Bias von nur zwei Operateuren nach demselben Prinzip und in identischer Technik vorgenommen. Die Gruppen A und B unterschieden sich lediglich in der namensgebenden femoralen Verankerungstechnik. Aufgrund der am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie nacheinander stattfindenden klinischen Anwendung der beiden Operationsmethoden, erfolgte keine klassische Randomisierung der Patienten.

Die sich ablösende Aufeinanderfolge beider Methodenanwendungen ließ andererseits keine Einflussnahme auf die Gruppenzuordnung der Patienten zu, sodass eine natürliche Verteilung aller Patientenmerkmale auf beide Untersuchungsgruppen resultierte und eine selektive Verzerrung (Selection Bias) ausgeschlossen wurde. Im Ergebnis ist dieses Vorgehen mit dem Prinzip einer Randomisierung vergleichbar. Um eine pathomorphologisch homogene Studienpopulation zu erhalten und Confounder zu vermeiden, wurden für die Gesamtpopulation Einschluss- und Ausschlusskriterien definiert. Aus den verbliebenen Patienten beider Gruppen wurden dann mit Hilfe der Paarbildung Matched Pairs mit möglichst homogen verteilten Merkmalen gebildet, die sich nur in der Operationsmethode unterscheiden sollten. Jedem Patienten der Gruppe A wurde dadurch ein bestmöglich passender Patient der Gruppe B zugeordnet.

2.2 Patienten

2.2.1 Einschlusskriterien und Ausschlusskriterien

Die Studienpopulation bestand aus Patienten, die einen primären VKB-Ersatz mit einer Interferenzschraubenverankerung des Semitendinosussehnen-Transplantats erhielten (n = 623). Alle Patienten wurden vor dem Einschluss in die Studie über das Studienprotokoll aufgeklärt. Maßgeblich entscheidend für die Studienteilnahme waren die Einschluss- und Ausschlusskriterien sowie die schriftliche Einverständniserklärung des Patienten.

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none"> • primäre Ruptur des vorderen Kreuzbandes • Patienten ab dem 15. Lebensjahr • Operationszeitraum von 09/1997 bis 07/2004 • Nachuntersuchungen über mindestens 2 Jahre 	<ul style="list-style-type: none"> • bilaterale Insuffizienz des vorderen Kreuzbandes • Insuffizienz des hinteren Kreuzbandes • Insuffizienz des medialen Kollateralbandes \geq Grad 2 • laterale oder posterolaterale Instabilität • Re-Ruptur ipsilateral oder Ruptur kontralateral während des zweijährigen Nachuntersuchungszeitraums • systemische muskuloskeletale Erkrankung • sonstiger chirurgischer Eingriff am betroffenen Knie im zweijährigen Intervall

Tab. 2.1 Einschlusskriterien und Ausschlusskriterien.

2.2.2 Matched Pairs

Um eine möglichst hohe Deckungsgleichheit beider Patientengruppen zu erreichen, wurden nach genau definierten Kriterien sogenannte Matched Pairs mit jeweils einem Patienten aus beiden Gruppen gebildet. Falls mehrere Matching-Partner zueinander passend waren, wurde der Patient mit der höchsten Deckungsgleichheit bei den Nachuntersuchungszeitpunkten und dem präoperativen Aktivitätsniveau gewählt.

Matched Pairs – Kriterien
1. Geschlecht
2. Alter <ul style="list-style-type: none"> • ± 3 Jahre bei Patientenpaaren der Altersgruppe von 15 bis 30 Jahren • ± 5 Jahre bei Patientenpaaren der Altersgruppe von 30 bis 40 Jahren • ± 8 Jahre bei Patientenpaaren ab einem Alter von 40 Jahren
3. Komorbiditäten <ul style="list-style-type: none"> • Meniskusstatus • mediale Seitenbandläsion • Chondropathie (Lokalisation: Tibia/Femur med./lat., Trochlea, retropatellar; Grad: keine, I/II°, III/IV°)
4. Zeitliche Latenz zwischen Trauma und operativer Versorgung der VKB-Ruptur (bis 12 Monate oder mehr)

Tab. 2.2 Matching-Kriterien.

2.3 Operation und Rehabilitation

Der arthroskopisch assistierte vordere Kreuzbandersatz erfolgte gruppenübergreifend entweder unter Allgemeinanästhesie oder mittels Spinalanästhesie und in Rückenlage des Patienten. Auf Höhe des proximalen Oberschenkels wurde eine hohe Beinstütze am OP-Tisch angebracht, sodass ohne Assistenz bei gestrecktem und weit gebeugtem Kniegelenk operiert werden konnte. Das operative Vorgehen war bei der Kontrollgruppe (Gruppe A) und der Interventionsgruppe (Gruppe B) prinzipiell gleich. Es unterschied sich nur durch die zusätzliche Augmentation der EndoPearl in der Interventionsgruppe. Postoperativ erhielten alle Patienten einen elastischen Kompressionsverband, Kälteapplikation, orale Analgesie als auch eine subkutane Thromboseprophylaxe. Vor der stationären Entlassung wurde das betroffene Kniegelenk bei allen Patienten in zwei Ebenen geröntgt.

2.3.1 Arthroskopisch assistierter vorderer Kreuzbandersatz

Transplantatentnahme und Präparation

Die Transplantatentnahme erfolgt über eine drei Zentimeter lange Inzision mediodistal der Tuberositas tibiae. Nach der Präparation bis auf den Pes anserinus erfolgen die Fascienspaltung und die Sehndarstellung der Musculi semitendinosus et gracilis. Die an ihrer tibialen Insertion gestielte Semitendinosussehne wird mit einem Sehnenstripper nach femoral hin ausgelöst und abschließend an der tibialen Ansatzstelle vom Knochen gelöst. Dabei sollte die Sehnenlänge mindestens 28 Zentimeter betragen, um nach zweimaliger Doppelung über jeweils einen № 5 Ethibondfaden (Ethicon, Somerville, NJ, USA), ein Vierfachtransplantat mit einer Transplantatlänge von 7,5 Zentimetern oder mehr zu erhalten.

Nach der Entfernung von Muskelresten mit einem Raspatorium am Nebentisch, wird die Semitendinosussehne auf einem Sehnenboard eingespannt und an beiden Enden mit einem № 5 Ethibondfaden armiert. Die Sehne wird anschließend vierfach gelegt, wodurch ein größerer Transplantatquerschnitt entsteht. Circa zwei Zentimeter vor dem femoralen Transplantatende erfolgt eine Abnaht mit einem resorbierbaren Faden, der später die Einzugsstiefe in den Bohrkanal anzeigt. Das distale Transplantatende wird ebenfalls mit einem resorbierbaren Faden vernäht. In der Interventionsgruppe (Gruppe B) erfolgt zusätzlich die Annaht der EndoPearl an das femorale Transplantatende mit einem ein Millimeter dicken, nicht resorbierbaren Faden, welcher später ebenfalls als Einzugsfaden in den femoralen Bohrkanal dient.



Abb. 2.1 Transplantat. Semitendinosussehne mit aufgenähter EndoPearl.¹³⁵

Tunnelpräparation

Zu Beginn finden eine diagnostische Arthroskopie zur Dokumentation und Behandlung von Begleitverletzungen als auch ein gründliches Debridement der dorsolateralen Fossa intercondylaris statt. Nach dem Einbringen eines femoralen Offset-Zielgeräts in das Kniegelenk erfolgt zuerst die Anlage des femoralen Transplantattunnels. Das Knie wird auf 120 Grad gebeugt und das Zielgerät zwischen der lateralen Notchwange und dem Außenmeniskushinterhorn positioniert. Durch das kanülierte Zielgerät wird ein Ösendraht (K-Draht) in der lateralen Femurkondyle platziert und so weit vorgeschoben, bis seine Spitze den lateralen Oberschenkel perforiert. Über den Ösendraht erfolgt mit Hilfe eines kanülierten Bohrers die Anlage des femoralen Transplantattunnels. Nach der Entfernung des Bohrers wird über die Öse des K-Drahtes ein Shuttle-Faden durch den femoralen Tunnel vorgelegt. Anschließend wird der Tunneleingang mit Hilfe eines Shavers gesäubert, Bohrmehl entfernt und die anatomische Positionierung des Tunnels arthroskopisch dokumentiert. Die Anlage des tibialen Transplantattunnels erfolgt mit einem tibialen Zielgerät und ebenso mit kanülierten Bohrern über einen K-Draht. Beide Tunneldurchmesser ergeben sich aus dem Querschnitt des Transplantats und der Beschaffenheit des Transplantatendes (mit oder ohne EndoPearl). Für die Präparation der femoralen Tunnellänge gilt es zu beachten, dass in der Gruppe B zur beabsichtigten Schraubenlänge zusätzlich zehn Millimeter für die EndoPearl addiert werden müssen.

Transplantatverankerung

Der im femoralen Tunnel vorgelegte Shuttle-Faden wird bis in den tibialen Tunnel und sein Fadenende bis über das Hautniveau tibial heraus gezogen. Mit dessen Hilfe kann der am femoralen Transplantatende befestigte Einzugsfaden in entgegengesetzter Richtung durch die beiden Bohrtunnel gezogen und das Transplantat von tibial nach femoral in beide Tunnel eingezogen werden (Abb. 2.2b). Die Transplantatverankerung erfolgt bilateral mit einer Poly-DL-Lactid- oder Poly-L-DL-Lactid-Interferenzschraube. Bei der Interferenzschraubenfixierung des Transplantats dient zur Bestimmung des Schraubendurchmessers auf der femoralen Transplantatseite eine einfache Gleichung.

- $\text{Tunneldurchmesser} = \text{Transplantatdurchmesser} = \text{Schraubendurchmesser}$

Es wird mit der femoralen Verankerung begonnen, wiederum in tiefer Kniebeugung. Bringt man die femorale Interferenzschraube direkt zwischen dem Transplantat und der knöchernen Tunnelwand ein, ergibt sich während des Eindrehens oft der unerwünschte Effekt der Transplantatrotation um die Schraube herum. Um das zu verhindern, wird vor dem Einbringen der femoralen Interferenzschraube mit Hilfe eines Meißels eine kleine Knochenschuppe vom proximalen Tunnelrand abgeschlagen (engl.: bone wedge) und dann die Schraube zwischen dieser Knochenschuppe und der Tunnelwand, etwa zwei Millimeter unter dem Kortikalisniveau positioniert. Durch kräftigen Zug am distalen Ende des Transplantats kann die initiale Festigkeit des femoralen Konstrukts getestet werden. Das Kniegelenk wird abschließend gespült und das arthroskopische Vorgehen beendet.

Die tibiale Verankerung des Transplantats erfolgt in extensionsnaher Stellung des Kniegelenks unter Schub der Tibia nach dorsal und Anspannung des Transplantats. Die tibiale Schraube wird dorsal des Transplantats positioniert und so weit in den Tunnel eingebracht, bis sich die Schraubenspitze kurz unter dem Gelenkniveau befindet. Eine tibiale Backup-Verankerung gelingt durch eine Naht des transplantatanhängenden Fadenmaterials über eine zusätzlich präparierte Knochenbrücke (Abb. 2.2d).

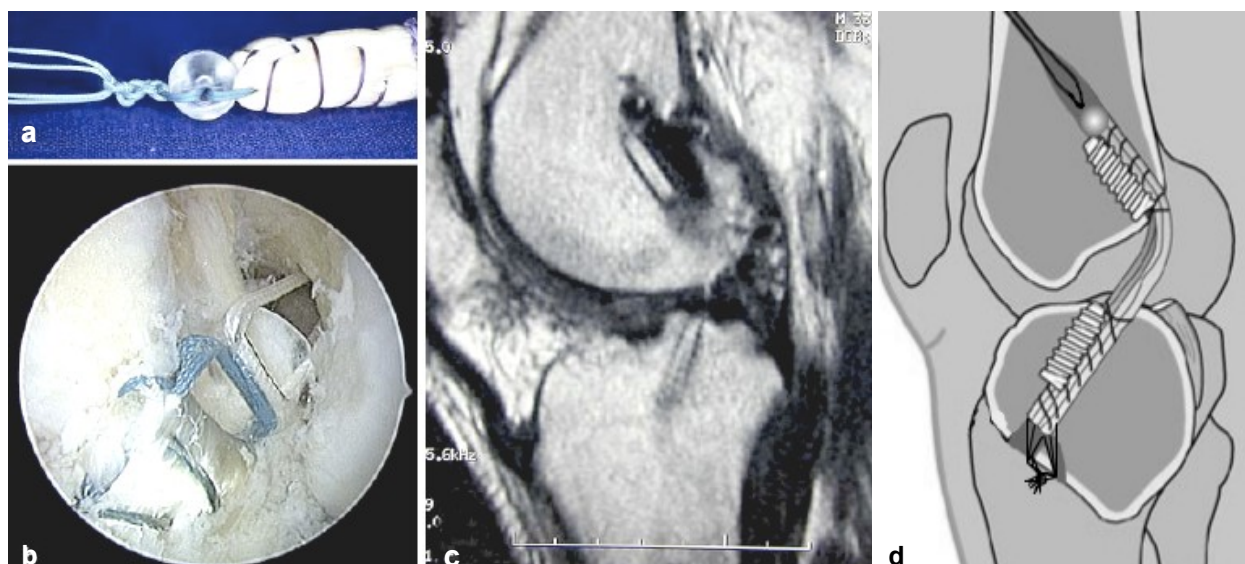


Abb. 2.2 Hamstringsehnen transplantat mit aufgenähter EndoPearl. a) femorales Transplantatende; b) Einzug des Transplantats; c) femorale Hybridverankerung¹¹⁷; d) bilaterale Hybridverankerung, femoral¹³⁵

2.3.2 Nachbehandlung und Rehabilitation

In der stationären und ambulanten Nachbehandlung des operierten Kniegelenks durchliefen beide Patientengruppen ein identisches Rehabilitationsprogramm für einen Zeitraum von vier Monaten. Die physiotherapeutische Betreuung begann am ersten postoperativen Tag mit isometrischer Beübung des M. quadriceps femoris sowie mit passiven Bewegungsübungen und manueller Lymphdrainage zur Wiederherstellung des physiologischen Bewegungsumfanges. Eine Ruhigstellung des Kniegelenks erfolgte in der ersten postoperativen Woche mit einer Null-Grad-Knieschiene und die Belastung an Unterarmgehstützen war auf 15 Kilogramm begrenzt. Ab der zweiten postoperativen Woche wurde die Flexion in einer funktionellen Orthese freigegeben. Eine Vollbelastung war den Patienten schmerzadaptiert ab der vierten Woche gestattet. Die Orthese wurde sechs Wochen nach der Operation entfernt und nach drei Monaten war ein langsamer Belastungsaufbau mit nicht-pivotierenden Sportarten erlaubt (Schwimmen, Radfahren, Joggen auf ebenem Untergrund). Pivotierende Sportarten und Kontaktsportarten waren erst nach sechs Monaten gestattet, eine komplette Restitution der physiologischen Kniegelenksfunktion vorausgesetzt (Reizfreiheit, freier Bewegungsumfang, Aufbau der gelenkstabilisierenden Muskulatur ≥ 90 Prozent im Seitenvergleich, subjektive und objektive Kniestabilität).

2.4 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen fanden bei allen Patienten zu festgelegten Zeitpunkten statt. Prä- und intraoperativ (zusammen U1) sowie sechs Wochen (U2), drei, sechs, zwölf und 24 Monate (U3-U6) postoperativ. Sie sahen eine methodische Zweiteilung vor, in einen Patiententeil mit schriftlichen Selbstauskünften und einen anamnestischen bzw. klinischen Teil mit Dokumentationen des Untersuchers. Sämtliche Nachuntersuchungen erfolgten in der Sprechstunde des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité, Campus Virchow-Klinikum. Die Dokumentation der Untersuchungsergebnisse erfolgte bei allen Patienten standardisiert und zu jedem Untersuchungstermin nach einem einheitlichen Schema.

- 1. Anamnese, 2. klinische Untersuchung, 3. instrumentelle Tests, 4. funktionelle Tests, 5. Scores und 6. Bildgebung.

Zu Beginn wurden die Patienten gebeten, schriftlich Fragen zu beantworten. Anschließend erfolgten die persönliche Befragung, Untersuchung und Dokumentation durch den Autor oder einen anderen ärztlichen bzw. wissenschaftlichen Mitarbeiter der Studiengruppe. Bei unsicheren Befunden wurden die betreuenden Ärzte Prof. Dr. med. Andreas Weiler und Dr. med. Michael Wagner hinzugezogen.

2.4.1 Anamnestiche Methoden

Alle Patienten wurden vor jeder Untersuchung gebeten, zwei Fragebögen zum gegenwärtigen Gesundheitszustand und zum Zustand des betroffenen Kniegelenks auszufüllen. Diese Bögen gehörten zum subjektiven Teil des nachfolgend näher erläuterten IKDC-Scores (Kapitel 2.4.3) und beinhalteten Fragen zur Gesundheit im Allgemeinen sowie zum Kniegelenk im Besonderen. Es wurde dabei vor allem auf das Aktivitätsniveau, Schmerz- und Schwellungsverhalten sowie auf die Instabilität und Funktion des Kniegelenks eingegangen. Die im Kapitel 2.4.3 dargestellten Lysholm-Score und Tegner-Aktivitäts-Score gestatteten die Erhebung weiterer subjektiver Daten. Sie wurden durch Befragung während der klinischen Untersuchung ermittelt.

2.4.2 Klinische Untersuchungsmethoden

Die klinische Untersuchung orientierte sich am „IKDC-Formblatt zur Untersuchung des Kniegelenkes“. Der Untersuchungsablauf ist exemplarisch in der Einleitung dargestellt und enthielt klinische Tests und Prüfungen

- der Kreuzbänder,
- des medialen und lateralen Bandapparats in Extension und 20 Grad Flexion,
- des passiven Bewegungsumfangs,
- der Kompartimente auf Krepitationen,
- auf einen Gelenkerguss und
- auf Umfangsdifferenzen der Ober- und Unterschenkel.

Klinische Relevanz bei der Diagnostik der vorderen Kreuzbandruptur und bei den Nachuntersuchungen nach erfolgter Kreuzbandrekonstruktion hatten speziell die im Folgenden näher erläuterten Tests zur Bandstabilität und zur Kniefunktion.

Lachman-Test

Der Lachman-Test ist einer der wichtigsten klinischen Funktionstests bei Verdacht auf eine Verletzung des vorderen Kreuzbandes. Er dient der Beurteilung von Morphologie und Stabilität des Bandes. Der Test verfügt über die höchste Sensibilität und Spezifität aller klinischen Untersuchungen zur Diagnose der vorderen Kreuzbandruptur⁹⁷. Am liegenden Patienten reproduziert er bei 20 bis 30 Grad flektiertem Knie- und Hüftgelenk die vordere Tibiatranslation in Relation zum oberhalb des Kniegelenks fixierten Femur (Abb. 2.3). Durch das forcierte ruckartige Ventralziehen des proximalen Unterschenkels mit der anderen Hand wird die vordere Subluxation des Tibiakopfes provoziert.

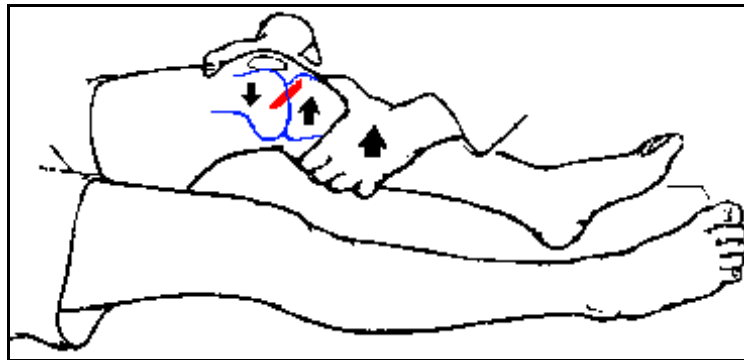


Abb. 2.3 Lachman-Test. (modifiziert¹³⁶)

Der Lachman-Test erfährt eine quantitative und eine qualitative Bewertung.

- Normale oder verlängerte anterior-posteriore Tibiakopftranslation.
- Fester oder weicher vorderer Anschlag.

Ein fester Anschlag kennzeichnet ein zumindest partiell intaktes vorderes Kreuzband, ein weicher Anschlag steht hingegen für eine Bandinsuffizienz. Der feste Anschlag mit gleichzeitig verlängerter Translation kann auf eine Partialruptur des VKB hinweisen. Die graduelle Einteilung der verlängerten Translation erfolgt in „normal“ (1 - 2 mm), „fast normal“ (3 - 5 mm), „abnormal“ (6 - 10 mm) und „stark abnormal“ (> 10 mm)⁹⁰. Bei großen oder korpulenten Patienten kann der stabile Lachman-Test nach Strobel hilfreich sein⁴³. Der Oberschenkel des Untersuchers dient dabei als Widerlager für den auf ihm gelagerten Patientenoberschenkel, sodass eine stabilisierte Lagerung des verletzten Kniegelenks und die gewünschte Hüftbeugung von 30 Grad erreicht werden.

Vorderer Schubladentest

Ein weiterer Translationstest ist der passive Schubladentest bei 90 Grad Knieflexion in Neutralstellung, Außenrotation und Innenrotation. Gegenüber dem Lachman-Test ist er weniger spezifisch für die VKB-Ruptur. Der Untersucher fixiert mit seinem Oberschenkel den auf die Liege gesetzten Patientenfuß in der jeweiligen Rotationsstellung, indem er sich leicht auf den Vorfuß setzt. Durch Umgreifen des Tibiakopfes kann der Untersucher mit sagittalen Subluxationsbewegungen das Ausmaß der vorderen Schublade erfassen (Abb. 2.4). Die Testbewertung erfolgt analog zum Lachman-Test. Nach Müller gilt es dabei zu beachten, dass erst dann eine vordere Schublade vorliegt, wenn eine hintere Schublade ausgeschlossen wurde⁸⁵. Die Rotationsstellungen erlauben zusätzlich eine Mitbeurteilung des medialen oder lateralen Kapsel-Band-Apparats. Insgesamt ist der Test dennoch kritisch zu bewerten, da trotz VKB-Ruptur eine negative vordere Schublade möglich ist, wenn die Kollateralbänder funktionell vollständig erhalten sind.

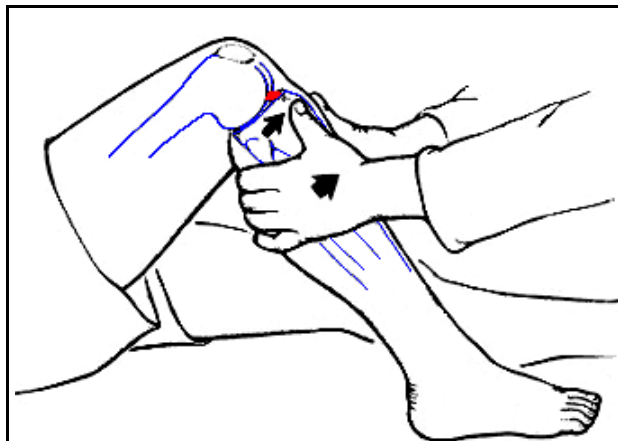


Abb. 2.4 Vorderer Schubladentest. (modifiziert¹³⁶)

Pivot-Shift-Test

„Pivot shift“ beschreibt ein ruckartiges Verrutschen des zentralen Stützpfählers (engl.: pivot central) und damit des momentanen Drehzentrums im Kniegelenk. Dieses für Kniegelenksinstabilitäten kennzeichnende Subluxationsereignis wird durch vordere Subluxationstests provoziert. Der von Lemaire 1967 erstbeschriebene Pivot-Shift-Test ist der bekannteste Subluxationstest. Von zahlreichen Modifikationen wurde für die vorliegende Arbeit die Variante des passiven Pivot-Shift-Tests nach MacIntosh benutzt.

In Rückenlage des Patienten steht der Untersucher an der betroffenen Seite und hält an der Ferse das im Kniegelenk gestreckte Patientenbein mit leichter Innenrotation des Unterschenkels (Abb. 2.5). Unter moderatem Valgusstress am proximalen Unterschenkel wird das Kniegelenk langsam flektiert und aus der subluxierten Stellung zurück in die Normalstellung gebracht. Da das vordere Kreuzband extensionsnah ein wichtiger Widerstand gegen die Innenrotation ist², kann diese Funktion mit einem pivotierenden Testverfahren klinisch überprüft werden. Somit weist ein positiver Pivot-Shift-Test auf eine Insuffizienz des VKB hin. Es kommt bei 30 Grad Flexion durch das Zurückgleiten des Tractus iliotibialis zu einer fühlbaren Reposition des bis zu diesem Zeitpunkt nach ventral subluxierten lateralen Tibiaplateaus.

Das Manöver ist wegen seiner Schmerzhaftigkeit für den frisch traumatisierten Patienten und der damit verbundenen muskulären Gegenspannung in der akuten Phase der Verletzung nicht sehr sensibel und häufig falsch-negativ. Darum ist der Pivot-Shift-Test in der Diagnostik des frisch verletzten Kniegelenks ohne Narkose wenig aussagekräftig, sollte dagegen aber ein obligater Bestandteil der präoperativen Narkoseuntersuchung und sämtlicher Nachuntersuchungen sein⁹¹.

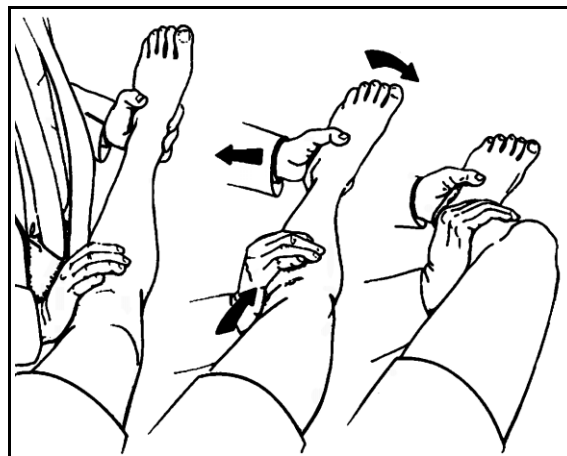


Abb. 2.5 Pivot-Shift-Test nach MacIntosh. (modifiziert¹³⁶)

KT1000™ Knee Ligament Arthrometer® (KT1000)

Das KT1000 (MEDmetric® Corporation, San Diego, USA) dient durch eine apparative Translationsmessung (Abb. 2.6) der quantitativen Objektivierung des Lachman-Tests. Bei dem Test wird am 20 bis 30 Grad gebeugten Kniegelenk des liegenden Patienten

die anteriore Translation der Tuberositas tibiae gegenüber der Patalla gemessen. Das Gerät wird mit Haltebändern am ventralen Unterschenkel befestigt. Lagerungshilfen gewährleisten die Flexion im Kniegelenk und kontrollieren über den Fuß die Rotation des Beins. Durch apparativ übertragenen ventralen Zug am proximalen Unterschenkel kommt es zur Translation des Tibiakopfes, unter gleichzeitigem Abstützen des Gerätes auf Patella und distaler Tibia. Die Translation wird über einen skalierten Wegmesser angezeigt und entsprechend den applizierten Zugkräften (67, 89, 134 Newton) über drei ansteigende Signaltöne akustisch wiedergegeben. Wahlweise kann auch mit maximaler manueller Kraft gezogen werden. Das Testergebnis wird als Seitenunterschied in Millimetern aus der Messung der Gegenseite minus den Messwert der evaluierten Seite angegeben. Als pathologisch wird eine Differenz von mehr als drei Millimetern angesehen¹³⁷. Im Rahmen dieser Studie wurden die Werte für die dritte Zugstufe und das manuelle Maximum bei einem Kniebeugewinkel von 20 Grad dokumentiert.

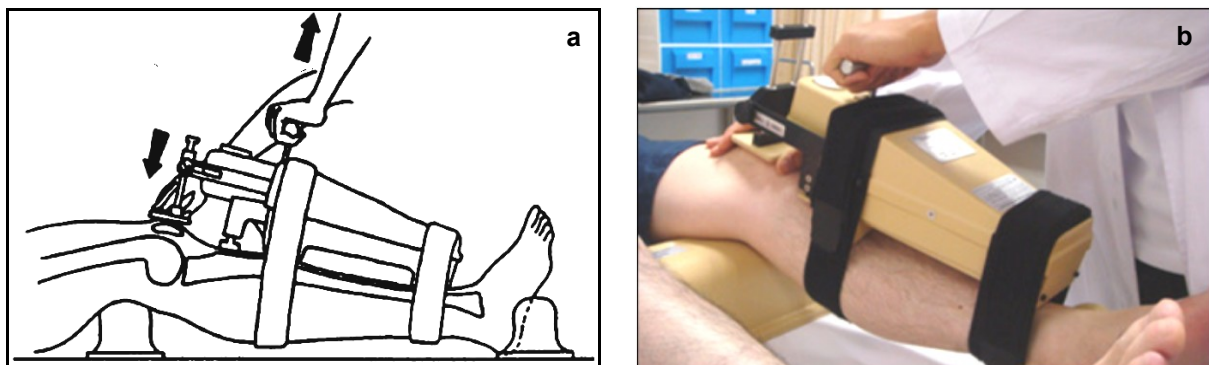


Abb. 2.6 Anwendung des KT1000. a) schematisch (modifiziert¹³⁷); b) klinisch

Aktive Funktionstests

Im Rahmen der U1- bis U6-Patientenuntersuchungen mussten aktive Funktionstests der Kniegelenke durchgeführt werden. Beim Sprung aus dem Einbeinstand wurde der Patient aufgefordert, erst mit dem gesunden und anschließend mit dem betroffenen Bein, so weit wie möglich vorwärts zu springen und auf dem jeweiligen Sprungbein zu landen (Einbeinsprung-Test). Für jedes Bein wurden drei Versuche dokumentiert und anschließend gemittelt. Die abschließende Bewertung des Tests erfolgte in Prozent der gemittelten Sprungweiten der betroffenen gegenüber der normalen Seite. Das Ergebnis wurde mit „normal“ bei über 90 Prozent, „fast normal“ bei über 75 Prozent, „abnormal“

ab 50 Prozent und darunter als „stark abnormal“ bewertet. Der Einbeinsprung-Test war Teil des im Folgenden vorgestellten IKDC-Scores. Mit dem Kniebeugen aus dem Stand und einem Entengang mussten die Patienten auch zwei dem Score der orthopädischen Arbeitsgruppe Knie der Schweizer Gesellschaft für Orthopädie entlehnte Funktionstests ausführen. Die Qualität der Testausführungen wurde in vier Kategorien beurteilt.

2.4.3 Scores

Die Datenerhebung während den Befragungen und Untersuchungen der Patienten orientierte sich an den international anerkannten IKDC-, Lysholm- und Tegner-Scores.

IKDC-Score

Das „International Knee Documentation Committee“ (IKDC, Internationaler Ausschuss zur Dokumentation von Knieverletzungen) wurde 1987 durch eine Gruppe amerikanischer und europäischer Kniechirurgen gegründet. Diese entwarfen eine einheitliche Terminologie und mehrere Formblätter zur Anamnese und Untersuchung des knieverletzten Patienten. Als Resultat entstand ein Standard evaluationsblatt für die Untersuchung des Kniegelenks, mit welchem die Grundlage für eine international einheitliche und vergleichbare Dokumentation geschaffen wurde.

In dem aus sieben verschiedenen Testgruppen bestehenden Bewertungsteil des Evaluationsblattes werden klinische, funktionelle und radiologische Befunde, im Unterschied zu früheren Scores, ausschließlich qualifiziert (A - „normal“, B - „fast normal“, C - „abnormal“, D - „stark abnormal“) und nicht mehr numerisch bewertet. Das jeweils schlechteste Einzelergebnis einer jeden Gruppe gibt die Gruppenbewertung an. Aus den sieben Gruppenbewertungen bestimmt wiederum die schlechteste Gruppe das Gesamtergebnis des Bewertungsteils. Dadurch wird vermieden, dass eine konkrete Pathologie durch gute Einzelergebnisse in derselben Testgruppe kaschiert wird. Nachfolgende Versionen des Evaluationsblattes erfuhren eine Erweiterung durch subjektive Faktoren wie Symptome, Sportaktivität und Funktionsfähigkeit als auch demografische, chirurgische und allgemein-gesundheitliche Fragestellungen. Damit sollte die Vergleichbarkeit der erfassten Knie traumata und der Publikationen zu dieser Thematik verbessert werden ⁹⁰.

Insgesamt stehen inzwischen sechs Formblätter zur umfassenden Beurteilung des Kniegelenks zur Verfügung (demographisches Formblatt, Formblatt zur Beurteilung des gegenwärtigen Gesundheitszustandes, Formblatt zur subjektiven Beurteilung des Knies, Formblatt zur Anamnese des Knies, chirurgisches Dokumentationsblatt, Formblatt zur Untersuchung des Knies).

Für die vorliegende Untersuchung wurde ein modifizierter IKDC-Dokumentationsbogen in der Version des Jahres 2000 benutzt. Es kam ein aus drei Teilen bestehender und drei Formblätter beinhaltender Dokumentationsbogen zur Anwendung.

Dokumentationsteil	<ul style="list-style-type: none"> • Persönliche Daten des Patienten, Untersuchungsdatum, aktuelles Aktivitätsniveau, Morphotyp, Muskelatrophie und Bewegungsausmaß im Seitenvergleich • bei der U1 zusätzlich Unfallursache, betroffene Seite, Zustand der Gegenseite, Voroperationen, prätraumatisches und postoperatives Aktivitätsniveau
Objektiver Bewertungsteil	<p>Beurteilung durch den Untersucher in sieben Gruppen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erguss • passives Bewegungsdefizit • Bandapparat • Kompartimentbefunde • Transplantat-Entnahmemorbidität • Röntgenbefund • Funktionstest (Einbeinsprung)
Subjektiver Patiententeil	<p>Eigenbeurteilung des Patienten</p> <ul style="list-style-type: none"> • gegenwärtiger allgemeiner Gesundheitszustand • Kniebeschwerden (Schmerz, Schwellung, Giving way) • Kniefunktion (sportliche Aktivität und Funktionsfähigkeit in Alltag und Beruf)

Tab. 2.3 Bewertungsblätter des IKDC-Dokumentationsbogens.

Lysholm-Score

Der numerische, vorwiegend subjektive Evaluations-Score ist eine durch Tegner und Lysholm 1985 modifizierte Variante des von Lysholm und Gillquist 1982 vorgestellten Evaluationssystems von Kniebandverletzungen^{138,139}. Mit dem Score werden zu 95 Prozent subjektive und zu fünf Prozent objektive Kriterien der Kniegelenksfunktion bestimmt. Der Patient bewertet sein betroffenes Knie und dessen Funktionalität im

täglichen Leben in sieben subjektiven Kategorien (Hinken, Gebrauch einer Gehhilfe, Treppensteigen, Hocken, Instabilität, Schwellung, Schmerzen). In einer objektiven Kategorie bestimmt der Untersucher den Oberschenkelumfang im Seitenvergleich, zur Verifizierung einer immobilitätsbedingten Atrophie. Bei absoluter Beschwerdefreiheit können in insgesamt acht Kategorien zusammen maximal 100 Punkte erreicht werden; je höher der Score, desto besser die Kniefunktion. Innerhalb jeder einzelnen Kategorie erfolgt die Punktvergabe nach Leistungsstufen, wobei physiologische Werte die höchste Punktzahl erreichen. Die Kategorien „Instabilität“ und „Schmerzen“ werden mit einem gemeinsamen Anteil von 60 Prozent der erreichbaren Punkte überproportional stark gewichtet. Die Scoreauswertung führt anhand des erreichten Gesamtpunktwertes zur Einstufung der Kniefunktion in die Kategorien „ausgezeichnet“ (90 - 100 Punkte), „gut“ (89 - 80 Punkte), „befriedigend“ (79 - 70 Punkte) und „schlecht“ (< 70 Punkte).

Tegner-Aktivitäts-Score

Der Score stellt eine von Tegner und Lysholm 1985 vorgestellte Aktivitätsskala dar, bei der verschiedene Aktivitäten des Patienten ihrer Kniebelastung nach in elf Stufen eingeteilt werden. Diese betreffen die Arbeits- und Sportbelastung des Patienten und reichen von einer Bewegungsunfähigkeit (Stufe 0), über sitzende Tätigkeit, leichte, mäßige und schwere Arbeit, bis hin zu kniegefährdenden Wettkampfsportarten (Stufe 10)¹³⁹. Der Score eignet sich zum Vergleich des prä- und postoperativen Aktivitätsniveaus des Patienten mit dessen prätraumatischer Aktivität und wurde während jeder Patientenuntersuchung erneut evaluiert.

2.4.4 Bildgebung

Bei allen Patienten sollten präoperativ und postoperativ gehaltene Schubladenstress-Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen angefertigt werden. Um die anteriore Translation der Tibia objektivieren zu können, erfolgte dabei das Röntgen in 90 Grad Flexion und mit von dorsal apparativ appliziertem Druck. Eine klinisch erhöhte Laxizität des rekonstruierten Kreuzbandes konnte durch den Vergleich mit Voraufnahmen und mit Aufnahmen der normalen Gegenseite radiologisch verifiziert werden. Außerdem wurden durch die Bildgebung degenerative knöcherne Veränderungen erfasst.

2.5 Statistische Analyse

2.5.1 Arbeitshypothese

Die femorale Hybridverankerung durch die Kombination einer biodegradierbaren Interferenzschraube mit der EndoPearl verbessert die Kniestabilität und vermindert geschlechterspezifische Unterschiede gegenüber der femoralen Verankerung durch eine solitäre biodegradierbare Interferenzschraube, bei der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes unter Verwendung der autogenen Semitendinosussehne.

2.5.2 Zielkriterien

Erstrangige Bedeutung für die Beurteilung des Therapieerfolges und für den Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren hatten definierte Kriterien der Datenerhebung.

- Objektive Kniestabilität (vorderer Schubladentest, Lachman-Test, Pivot-Shift-Test, KT1000-Messung, mediale und laterale Aufklapptests),
- Objektive Funktionalität des Kniegelenks (aktive Funktionstests),
- Subjektive Patientenzufriedenheit (Scores) und
- Subjektive Einschätzung der Patientenaktivität (Scores).

2.5.3 Testverfahren

Für die statistische Bearbeitung der erhobenen Daten wurden ein parametrischer und ein nicht-parametrischer Test verwendet.

- Chi-Quadrat-Test: Er prüft, ob die nominalen Daten homogen verteilt sind und einer homogenen Grundgesamtheit entstammen (IKDC-Score).
- Wilcoxon-Mann-Whitney-Test: Er prüft auf signifikante Unterschiede der beiden Studiengruppen hinsichtlich ihrer ordinalskalierten bzw. metrischen Merkmale (KT1000-Messergebnisse, Lysholm-Score, Matching-Kriterien).

Abschließend erfolgte die statistische Auswertung aller Testergebnisse mit Hilfe des SPSS-Statistik-Programms, Version 14 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Zur Bestimmung der statistischen Signifikanz wurde die obere Grenze der Irrtumswahrscheinlichkeit bei einem p-Wert von $\leq 0,05$ festgelegt (Signifikanzniveau).

3 Ergebnisse

3.1 Studienpopulation und Patientengruppen

Die beiden Patientengruppen der vorliegenden Studie wurden aus einer Gesamtpopulation von 442 zwischen 1997 und 2004 operierten Patienten ermittelt. Patientengruppe A „ohne“ EndoPearl umfasste 141 Patienten, Patientengruppe B „mit“ EndoPearl wurde von 301 Patienten gebildet. Unter Berücksichtigung der Einschluss- und Ausschlusskriterien wurden in beiden Patientengruppen insgesamt 220 Patienten von der Studie ausgeschlossen (Gruppe A: n = 52; Gruppe B: n = 168). Gründe hierfür waren vorangegangene oder gleichzeitig mit dem VKB-Ersatz stattfindende chirurgische Eingriffe am ipsi- oder kontralateralen Knie (A: n = 19; B: n = 79), mit Ausnahme einer gleichseitigen einzeitigen Meniskusversorgung, sowie klinische Ausfälle im zweijährigen Follow-up (A: n = 11; B: n = 12) und ein unvollständiges zweijähriges postoperatives Follow-up (A: n = 22, Follow-up Rate = 84,4 %; B: n = 77, Follow-up Rate = 74,4 %).

Ausschlusskriterien	Gruppe A („ohne“), n = 52/141	Gruppe B („mit“), n = 168/301
Prä- und intraoperativ („ohne“: n = 19; „mit“: n = 79)	<ul style="list-style-type: none"> • chirurgische Intervention in der Anamnese (n = 5) oder einzeitig* mit dem VKB-Ersatz (n = 14) 	<ul style="list-style-type: none"> • chirurgische Intervention in der Anamnese (n = 40) oder einzeitig* mit dem VKB-Ersatz (n = 35) • muskuloskeletale Erkrankung (n = 4)
Klinische Ausfälle bzw. Komplikationen im Follow-up („ohne“: n = 11; „mit“: n = 12)	<ul style="list-style-type: none"> • Re-Ersatz bei Re-Trauma (n = 5) • Re-Ersatz bei Insuffizienz (n = 3) • Arthrofibrose (n = 2) • gegenseitiger VKB-Ersatz (n = 1) 	<ul style="list-style-type: none"> • Re-Ersatz bei Re-Trauma (n = 4) • Re-Ersatz bei Insuffizienz (n = 1) • Arthrofibrose / Zyklops (n = 4) • Schraubenbruch tibial (n = 1) • gegenseitige VKB-Ruptur (n = 2)
Unvollständiges klinisches Follow-up („ohne“: n = 22; „mit“: n = 77)	<ul style="list-style-type: none"> • Wohnortwechsel (n = 10)** • fehlendes Interesse (n = 7)** • nicht mehr erreichbar (n = 5) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wohnortwechsel (n = 25)** • fehlendes Interesse (n = 16)** • derzeit verhindert (n = 13)** • nicht mehr erreichbar (n = 23)

Tab. 3.1 Von der Studie ausgeschlossene Patienten.

*) ausgenommen gleichseitige einzeitige Meniskusversorgung; **) bei Beschwerdefreiheit; ASK: Arthroskopie

Mit den in die Studie eingeschlossenen Patienten (A: n = 89; B: n = 133) wurden gemäß definierter Kriterien (Kapitel 2.2.2) nach dem Matched-Pair-Prinzip homogene weibliche und männliche Paare aus je einem Patienten beider Gruppen gebildet. Hierbei ließ sich für vier der 89 Patienten ohne EndoPearl kein korrespondierender Patient mit EndoPearl finden, sodass 85 Matched Pairs für die Studiauswertung zur Verfügung standen. 85 Patienten ohne EndoPearl bildeten die Kontrollgruppe und 85 Patienten mit EndoPearl die Interventionsgruppe. Die verbliebenen Patienten der Gruppe B (n = 48) wurden, mangels weiterer zur Paarbildung verfügbarer Matching-Partner der Gruppe A, nicht für die Matched-Pair-Analyse berücksichtigt.

Geschlechterverteilung, Altersverteilung, Latenz vom Trauma bis zur Operation

In beiden Patientengruppen war mit jeweils 40 Prozent Frauen (n = 35) und 60 Prozent Männern (n = 51) eine identische Geschlechterverteilung gegeben (Abb. 3.1). Das durchschnittliche Patientenalter zum Zeitpunkt der VKB-Rekonstruktion betrug in Gruppe A 29 Jahre (15 - 60 Jahre) und in Gruppe B 30 Jahre (15 - 59 Jahre; p = 0,765). Durch die Bildung von Matched Pairs waren die im Studienprotokoll definierten Altersgruppen in der Kontroll- und der Interventionsgruppe gleich häufig vertreten. Der Zeitraum vom ursächlichen Trauma bis zur definitiven Versorgung der VKB-Ruptur war in beiden Gruppen ähnlich lang. Die Operation erfolgte meist binnen zwölf Monaten nach dem Trauma (Abb. 3.2). In beiden Patientengruppen betrug das Follow-up nach dem VKB-Ersatz mindestens zwei Jahre. Das in der Kontrollgruppe mit 27,3 Monaten (24 - 103) gegenüber der EndoPearl-Gruppe mit 24,8 Monaten (24 - 78) geringfügig längere Intervall, blieb klinisch und statistisch ohne Signifikanz (p = 0,64).

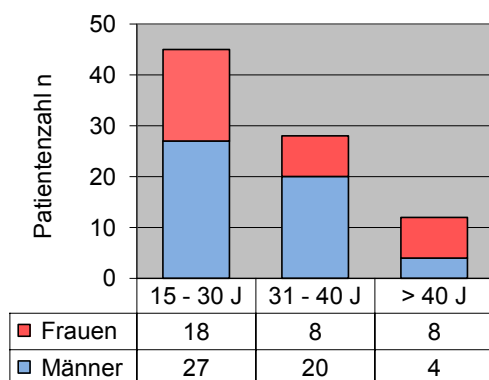


Abb. 3.1 Matched Pairs nach Alter und Geschlecht.

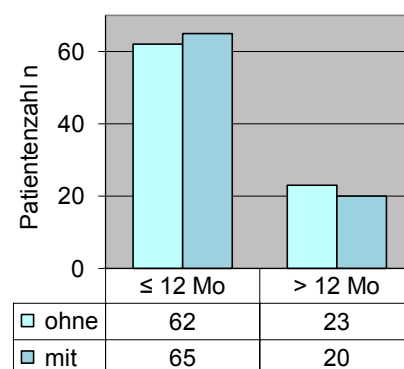


Abb. 3.2 Latenz zwischen Trauma und OP.

3.2 Intraoperative Begleitbefunde

Jede arthroskopische Kreuzbandrekonstruktion begann mit der Sicherung der Diagnose und der Befundung von Begleitverletzungen des Kniegelenks. Chondropathien und Meniskusläsionen waren in beiden Patientengruppen nach Quantität und Qualität homogen abgebildet (Tab. 3.2). Veränderungen an den Knorpeloberflächen fanden sich zumeist medial und retropatellar. Erst- und zweitgradige Läsionen (n = 66) waren dabei signifikant häufiger vertreten als höhergradige (n = 18) und es zeigte sich auch ein deutlicher Unterschied bei deren Inzidenz in Korrelation zur Versorgungslatenz. Die binnen von zwölf Monaten nach dem Trauma operierten Patienten wiesen weniger und geringergradige Chondropathien auf, als diejenigen mit späterer operativer Versorgung der VKB-Ruptur. Patienten ohne Knorpelveränderungen (n = 86) waren überwiegend innerhalb des ersten posttraumatischen Jahres operiert worden.

Das Verletzungsmuster der Menisken war gruppenübergreifend nahezu gleich und medial betont, insbesondere bei männlichen Patienten. Die Latenz der VKB-Rekonstruktion hatte keine signifikant abweichenden Meniskusbefunde zur Folge, weder zwischen beiden Patientengruppen noch innerhalb der Kontroll- und Interventionsgruppe. Gleichwohl waren Patienten ohne Meniskusläsionen (n = 108) häufiger im ersten posttraumatischen Jahr operiert worden. Meniskusverletzungen wurden im Rahmen der VKB-Rekonstruktion versorgt. In beiden Gruppen erfolgte bei je 15 Patienten (17,6 %) ein meniskuserhaltender Eingriff und bei je 16 Patienten (18,8 %) wurde eine partielle Meniskusresektion durchgeführt.

Befund	Gruppe A („ohne“)	Gruppe B („mit“)
Instabilität MCL, Grad I	15 (17,6 %)	14 (16,4 %)
Knorpelläsion		
- keine	43 (50,6 %)	43 (50,6 %)
- CM Grad I – II	32 (37,6 %)	34 (40,0 %)
- CM Grad III – IV	10 (11,8 %)	8 (9,4 %)
Meniskusläsion		
- keine	54 (63,5 %)	54 (63,5 %)
- IM	20 (23,5 %)	18 (21,2 %)
- AM	7 (8,2 %)	9 (10,6 %)
- IM + AM	4 (4,7 %)	4 (4,7 %)

Tab. 3.2 Intraoperative Begleitbefunde.

(MCL: mediales Kollateralband; CM: Chondromalazie; IM: Innenmeniskus; AM: Außenmeniskus)

3.3 Klinische und funktionelle Befunde

3.3.1 Klinische Untersuchungsbefunde

Schubladentest (a.-p. Translation)

Präoperative Daten

Zum präoperativen Untersuchungszeitpunkt zeigte sich in beiden Patientengruppen bei mehr als Dreiviertel der Patienten eine zweit- bis drittgradig verlängerte vordere Schublade (Gruppe A: n = 69; Gruppe B: n = 66).

Postoperative Daten

In der abschließenden Nachuntersuchung hatten 86 Prozent der EndoPearl-Patienten keine und 14 Prozent eine erstgradig verlängerte vordere Schublade, gegenüber 66 bzw. 31 Prozent der Patienten in der Kontrollgruppe. Drei Patienten der Kontrollgruppe zeigten einen zweit- oder höhergradig positiven vorderen Schubladentest. Im Gruppenvergleich waren die postoperativen Ergebnisse der EndoPearl-Gruppe signifikant besser ($p = 0,015$).

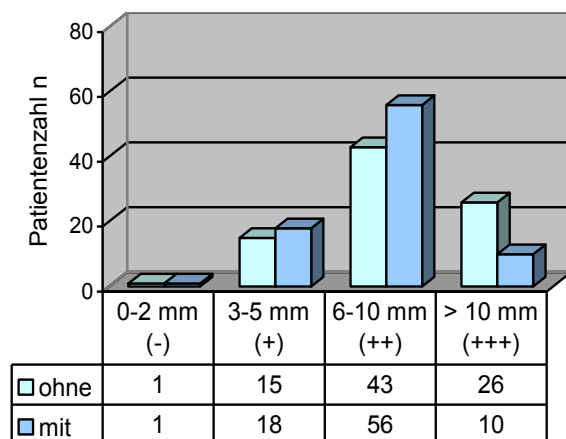


Abb. 3.3 Schubladentest (70 Grad) präoperativ.

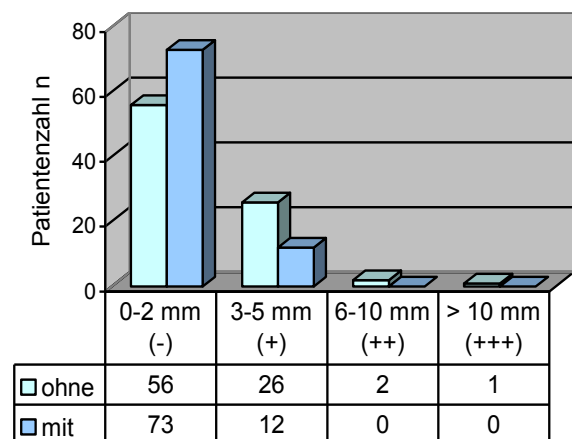


Abb. 3.4 Schubladentest (70 Grad) postoperativ.

Prä- versus postoperative Daten

Zwei Jahre nach der VKB-Rekonstruktion war in beiden Gruppen eine hochsignifikante Reduktion der vorderen Schublade zu verzeichnen. Die EndoPearl-Patienten erreichten eine deutlichere Verbesserung mit signifikant mehr „normalen“ Ergebnissen ($p = 0,015$).

Lachman-Test

Präoperative Daten

In der präoperativen Untersuchung war der Lachman-Test bei mehr als Dreiviertel aller Patienten zweit- bis drittgradig verlängert (≥ 6 mm). Es war kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen bei den ermittelten Werten belegbar ($p = 0,111$).

Postoperative Daten

In der abschließenden Nachuntersuchung zeigten signifikant mehr EndoPearl-Patienten einen normwertigen Lachman-Test mit maximal zwei Millimetern Seitendifferenz bei 134 N eingesetzter Zugkraft (Gruppe A: 49,4 %; Gruppe B: 77,6 %; $p = 0,001$). Die restlichen EndoPearl-Patienten (22,4 %) wiesen eine erstgradig verlängerte anterior-posteriore Translation auf. Alle Patienten dieser Gruppe hatten einen festen vorderen Endpunkt. Dagegen zeigten mehr als die Hälfte der Patienten ohne EndoPearl einen erstgradig (45,9 %) oder höhergradig (4,7 %) verlängerten Lachman-Test.

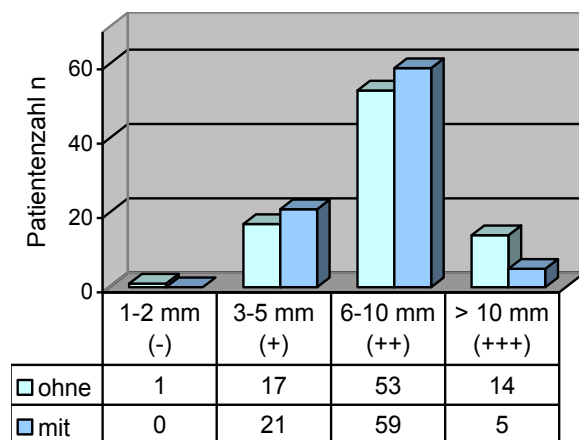


Abb. 3.5 Lachman-Test präoperativ.

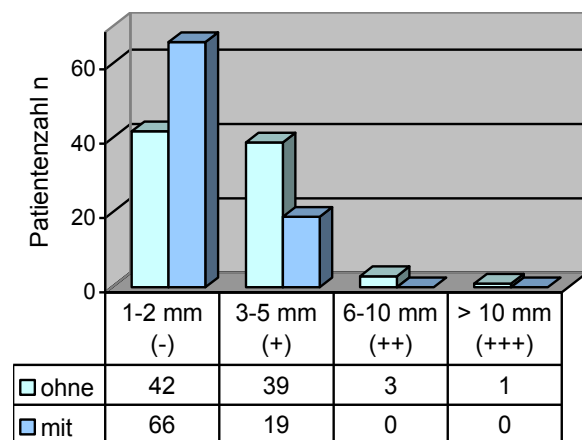


Abb. 3.6 Lachman-Test postoperativ.

Prä- versus postoperative Daten

Die Abschlussuntersuchung konnte gruppenübergreifend signifikante Verbesserungen der Ergebnisse des Lachman-Tests dokumentieren (A: $p < 0,001$; B: $p < 0,001$). In der EndoPearl-Gruppe war der Zugewinn an Kniestabilität durch die Verringerung der vorderen Tibiatranslation jedoch signifikant deutlicher nachweisbar.

Pivot-Shift-Test nach MacIntosh

Präoperative Daten

Bis auf zwei Patienten der Kontrollgruppe, hatten sämtliche Studienpatienten bei der präoperativen Untersuchung einen positiven Pivot-Shift-Test. Der gruppenübergreifende Vergleich der Testergebnisse zeigte keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,258$).

Postoperative Daten

Die Patienten der EndoPearl-Gruppe zeigten beim abschließenden Pivot-Shift-Test signifikant stabilere Kniegelenke ($p = 0,007$). Bei 88 Prozent dieser Patienten lag ein negativer Pivot-Shift-Test vor, entgegen 69 Prozent der Patienten in der Kontrollgruppe.

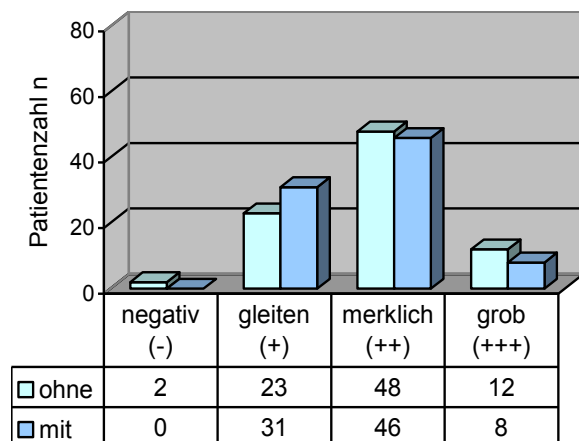


Abb. 3.7 Pivot-Shift-Test präoperativ.

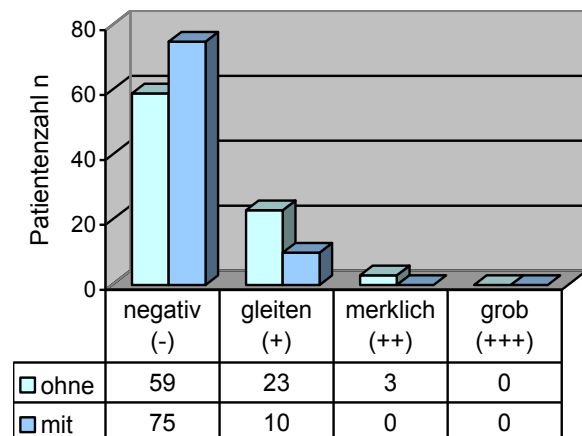


Abb. 3.8 Pivot-Shift-Test postoperativ.

Prä- versus postoperative Daten

Durch den Pivot-Shift-Test war gruppenübergreifend eine signifikante Verbesserung der postoperativen Kniegelenkstabilität nachweisbar (A: $p < 0,001$; B: $p < 0,001$). Der Gewinn an Stabilität erreichte bei den EndoPearl-Patienten qualitativ und quantitativ ein höheres Niveau.

Neben den Funktionstests und der subjektiven Beurteilung des Patienten, zählten vor allem die Untersuchungsbefunde der genannten Stabilitätstests und des KT1000 zu den Hauptzielkriterien der Datenerhebung. Ihnen kam in dieser Hinsicht eine besondere Aufmerksamkeit zu, da sie mit der Funktion des Kniegelenks im Alltag korrelieren.

KT1000 Arthrometer

Präoperative Daten

Die Messungen der vorderen Tibiatranslation mit dem KT1000 zeigten präoperativ für die gesamte Studienpopulation mehrheitlich pathologische Werte ohne signifikante Laxizitätsunterschiede zwischen beiden Patientengruppen (A: 5,53 mm \pm 2,31 mm; B: 5,95 mm \pm 2,15 mm; $p = 0,063$). Nur sieben Patienten (8,2 %) der Kontrollgruppe und sechs Patienten der Interventionsgruppe (7,1 %) hatten normale Seitendifferenzen.

Postoperative Daten

Nach einem Follow-up von mindestens zwei Jahren waren im Gruppenvergleich signifikant geringere vordere Laxizitäten bei den mit der EndoPearl versorgten Patienten nachweisbar (A: 2,47 mm \pm 1,63 mm; B: 1,73 mm \pm 1,43 mm; $p < 0,001$). In der Interventionsgruppe zeigten 66 Patienten (77,6 %) eine normale Seitendifferenz bis zwei Millimeter, entgegen 51 Patienten (60,0 %) in der Kontrollgruppe.

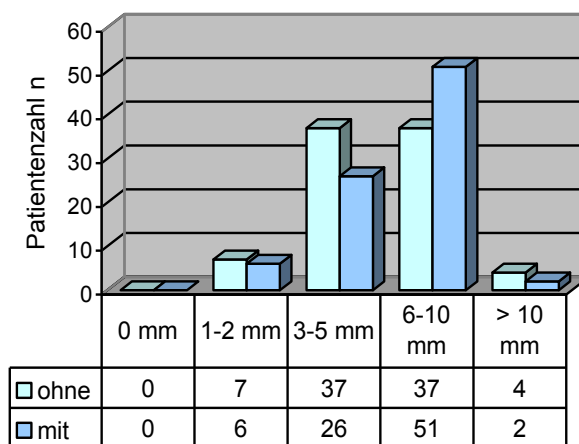


Abb. 3.9 KT1000 Seitendifferenz präoperativ.

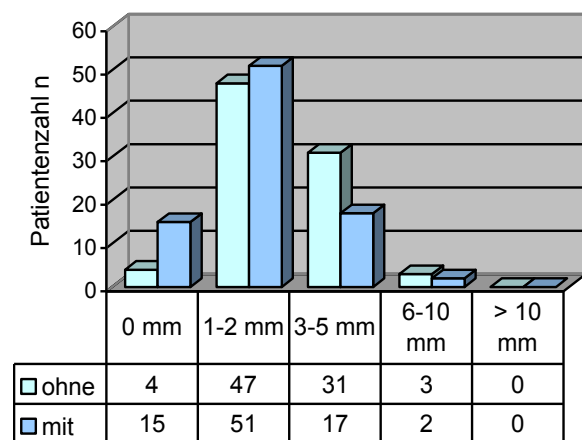


Abb. 3.10 KT1000 Seitendifferenz postoperativ.

Prä- versus postoperative Daten

Alle Patienten erreichten nach der VKB-Rekonstruktion signifikant gebesserte Ergebnisse bei den KT1000-Messungen (A: $p < 0,001$; B: $p < 0,001$). 82 Patienten der Kontrollgruppe (96,5 %) und 83 Patienten der Interventionsgruppe (97,6 %) präsentierten zwei Jahre postoperativ „normale“ oder „fast normale“ Seitendifferenzen. Die EndoPearl-Patienten hatten dabei signifikant mehr „normale“ Werte aufzuweisen.

Umfangsdifferenz der Beine

Die gemittelten Werte der Beinumfangs von operierter und gesunder Seite wiesen zwei Jahre nach der VKB-Operation im Gruppenvergleich signifikante Differenzen auf. In der EndoPearl-Gruppe zeigten die Patienten deutlich weniger muskuläre Dysbalancen (Gruppe A/B: „0 cm“ = 37/56, „1 - 2 cm“ = 44/28, „> 2 cm“ = 4/1; $p = 0,003$). Bei der präoperativen Untersuchung hatte kein solcher Gruppenunterschied vorgelegen.

Krepitationen

Laterale und mediale Krepitationen waren in der gesamten Studienpopulation wenig und nicht signifikant unterschiedlich vorhanden (A: $n = 3$; B: $n = 4$). Dem entgegen waren vordere Krepitationen insgesamt deutlich häufiger und vor allem in der Gruppe A nachweisbar, ohne dass die betroffenen Patienten Alltagsbeschwerden angaben. Präoperativ hatten hierbei keine Gruppenunterschiede bestanden. Die Einteilung der Krepitationen erfolgte laut IKDC in „keine“, „mild“, „geringer Schmerz“ und „Schmerz“.

Passiver Bewegungsumfang

Die Auswertung der postoperativen Kniebewegungsumfänge im Seitenvergleich erfolgte nach IKDC durch eine Einteilung der Seitendifferenz in „< 3“, „< 6“, „< 10“, „> 10“ Grad. Sie offenbarte signifikant weniger Streckdefizite in der Kontrollgruppe ($p = 0,036$), wobei die Patienten dieser Gruppe schon präoperativ signifikant weniger Streckdefizite aufwiesen (Gruppe A: A = 72, B = 10, C = 1, D = 2; Gruppe B: A = 55, B = 26, C = 3, D = 1; $p = 0,013$). Bei genauer Betrachtung verfügten gleichwohl alle Patienten der Interventionsgruppe über eine „normale“ oder „fast normale“ passive Extension.

Erguss, Flexion, Valgusstress, Varusstress

Unter allen anderen klinischen Befunden waren im Gruppenvergleich weder präoperativ noch postoperativ signifikante Unterschiede nachweisbar. Lediglich die Untersuchung der medialen Kollateralbänder zeigte quantitative, aber knapp noch nicht signifikante Unterschiede zu Gunsten der Interventionsgruppe ($p = 0,054$). Außenbandverletzungen oder höhergradige Insuffizienzen des Innenbandes waren in beiden Patientengruppen zu keinem Untersuchungszeitpunkt nachweisbar.

IKDC-Bewertung	Gruppe A („ohne“) n = 85				Gruppe B („mit“) n = 85			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Crepitatio anterior (p < 0,001)	53	31	1	0	73	12	0	0
Streckdefizit (p = 0,036)	81	4	0	0	73	12	0	0
Erguss (p = 0,65)	83	2	0	0	82	3	0	0
Flexion (p = 0,192)	78	7	0	0	82	3	0	0
Valgusstress (p = 0,054)	79	6	0	0	84	1	0	0
Varusstress (p = 0,312)	82	3	0	0	84	1	0	0

Tab. 3.3 Weitere klinische Untersuchungsbefunde postoperativ.

3.3.2 Funktionelle Untersuchungsbefunde

Einbeinsprung, Kniebeugen und Entengang

Zur weiteren Objektivierung der Kniegelenksfunktion erfolgten drei aktive Funktionstests der Kniegelenke im Seitenvergleich. Bei den abschließenden Nachuntersuchungen erreichte die Kontrollgruppe im Einbeinsprung-Test etwas mehr „normale“ Werte. Für die Testbewertung in Prozent wurde die betroffene zur gesunden Seite ins Verhältnis gesetzt und in vier Gruppen eingeteilt (A: > 90, B: 90 - 76, C: 75 - 50, D: < 50). Die nach je drei Sprüngen eines jeden Beins gemittelten Ergebnisse korrelierten mit dem schon prätraumatisch vorhandenen, gering höheren Aktivitätsniveau in der Kontrollgruppe (Tegner-Aktivitäts-Score), stellten aber keinen signifikanten Gruppenunterschied dar. Zusätzlich zu diesem im IKDC-Score geforderten Test führten wir bei den Nachuntersuchungen zwei weitere aktive Funktionstests durch. Beim Kniebeugetest aus dem Stehen erreichte die EndoPearl-Gruppe signifikant bessere Ergebnisse gegenüber der Kontrollgruppe (p = 0,039). Der Entengang wurde ebenfalls von den EndoPearl-Patienten mit mehr „normalen“ Testbewertungen absolviert. Dieser Gruppenunterschied erreichte jedoch kein Signifikanzniveau (p = 0,062). Ein Patient der Kontrollgruppe wagte es nicht, den Entengang durchzuführen, zeigte beim Einbeinsprung und dem Kniebeugen jedoch ausschließlich „normale“ Testergebnisse. Ansonsten fielen bei diesen zwei zusätzlichen Tests die Gesamtergebnisse beider Gruppen ausschließlich „normal“ oder „fast normal“ aus (Tab. 3.4).

Bewertung	Gruppe A („ohne“) n = 85				Gruppe B („mit“) n = 85			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Einbeinsprung	72	12	1	0	68	16	0	1
Kniebeugen	74	11	0	0	83	2	0	0
Entengang	72	12	0	1	79	6	0	0

Tab. 3.4 Funktionstests postoperativ.

3.4 Scores

3.4.1 IKDC-Score

Die Befundauswertung der normierten Befragungs- und Untersuchungsbögen dieses Scores qualifiziert die Kniefunktion des Patienten für eine von vier IKDC-Bewertungen. A - „normal“, B - „fast normal“, C - „abnormal“ und D - „stark abnormal“.

Präoperative Daten

Zwischen den beiden Patientengruppen fand sich kein signifikanter Unterschied bei den gruppenübergreifend schlechten präoperativen Gesamtergebnissen des IKDC-Scores ($p = 0,088$). In der gesamten Studienpopulation bekamen 167 Patienten (98,2 %) eine „abnormale“ oder „stark abnormale“ IKDC-Bewertung. Bei Betrachtung der subjektiven Einzelbewertungen beklagten die Patienten der EndoPearl-Gruppe stärkere Schmerzen und eine deutlichere Einschränkung der Kniefunktion. Die Kontrollgruppe fühlte sich hingegen bei der beruflichen Tätigkeit und der Sportausübung mehr beeinträchtigt. Diese präoperativen Gruppeunterschiede erreichten kein Signifikanzniveau.

Postoperative Daten

Die postoperativen Ergebnisdaten des IKDC-Scores waren in der EndoPearl-Gruppe signifikant besser ($p = 0,003$). Alle Patienten dieser Gruppe erreichten eine „normale“ oder „fast normale“ Gesamtqualifikation. In der Kontrollgruppe kamen dagegen sechs Patienten zu einer „abnormalen“ und eine Patientin zu einer „stark abnormalen“ Gesamtbewertung. Diese Patientin präsentierte eine ausgeprägte generelle Laxizität und bei allen Stabilitätstests „abnormale“ Ergebnisse, gleichwohl sie eine gute Kniefunktion im Alltag und eine Beschwerdefreiheit bei moderatem Sport angab.

Bei kategorischer Ergebnisbetrachtung der Stabilitätstests hatten die Patienten mit femoraler Hybridverankerung (Gruppe B) einen signifikanten Vorteil mit ausschließlich „normalen“ und „fast normalen“ Bewertungen beim vorderen Schublade-Test, beim Lachman-Test und beim Pivot-Shift-Test. In der Kontrollgruppe mit solitärer Interferenzschraube (Gruppe A) fanden sich dagegen bei jedem dieser Tests mindestens drei Patienten mit einer „abnormalen“ oder „stark abnormalen“ Qualifikation ihrer Kniegelenksfunktion. In den subjektiven Einzelbewertungen des operierten Kniegelenks für Funktionalität, Schmerzverhalten und Sportausübung waren ebenfalls die EndoPearl-Patienten zufriedener, wenn auch ohne signifikanten Vorteil. Fragen zum Schwellungsverhalten, zu einem Unsicherheitsgefühl und Giving way im betroffenen Kniegelenk oder zu einer Einschränkung der beruflichen Tätigkeit wurden von beiden Patientengruppen nicht signifikant unterschiedlich beantwortet und fast ausschließlich als „normal“ bewertet.

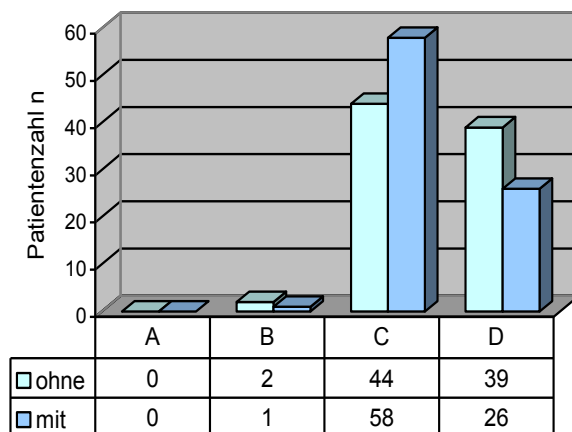


Abb. 3.11 IKDC-Score präoperativ.

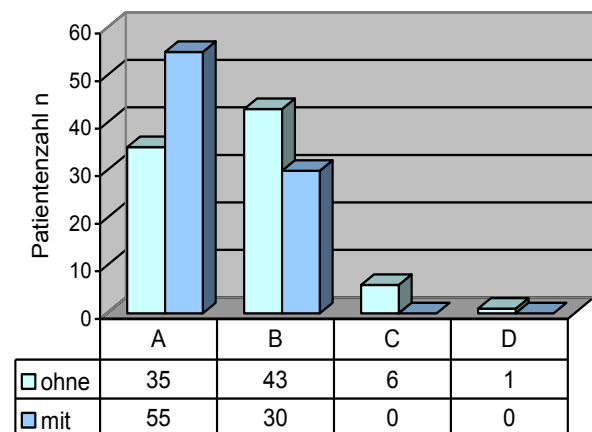


Abb. 3.12 IKDC-Score postoperativ.

Prä- versus postoperative Daten

Beim Abschluss der Nachuntersuchungen nach mindestens zwei postoperativen Jahren konnte in beiden Patientengruppen eine signifikante Verbesserung sowohl des IKDC-Gesamtergebnisses ($p < 0,001$) als auch aller einzelnen Bewertungskategorien dokumentiert werden. Einzig die passive Kniestreckung erfuhr in der Kontrollgruppe nur eine zahlenmäßige und keine signifikante Verbesserung der Beweglichkeit ($p = 0,107$).

Nachdem die Patienten der EndoPearl-Gruppe in den Einzelkategorien Funktionalität und Schmerzverhalten präoperativ schlechtere Angaben machten als die Patienten der Kontrollgruppe, bewerteten sie diese Kategorien zwei Jahre postoperativ nun besser als ihre Vergleichspatienten. Bei der Sportausübung fühlten sich die EndoPearl-Patienten ebenfalls weniger beeinträchtigt. Die berufliche Tätigkeit war postoperativ in beiden Gruppen übereinstimmend nicht eingeschränkt. Nur zwei Patienten der Gruppe A und ein Patient der Gruppe B bemerkten eine leichte Einschränkung bei ihrer täglichen Arbeit. Alle postoperativen Gruppenunterschiede in den subjektiven Einzelkategorien waren rein quantitativer Natur und blieben ohne Signifikanz.

3.4.2 Lysholm-Score

Der hauptsächlich subjektive Score bewertet die Kniefunktion eines Patienten entsprechend der Summe der gesammelten Bewertungspunkte als „ausgezeichnet“, „gut“, „befriedigend“ oder „schlecht“.[^]

Präoperative Daten

Zum präoperativen Zeitpunkt wurden von beiden Patientengruppen mehrheitlich übereinstimmende Bewertungen des Schwellungsverhaltens, der Schmerzen und der Funktionalität (Hinken, Gebrauch einer Gehhilfe, Treppensteigen, Instabilität) des betroffenen Kniegelenks abgegeben. Auch die erhobenen Umfangsdifferenzen der Oberschenkel waren im Gruppenvergleich nicht signifikant unterschiedlich. In der Kategorie „Hocken“ bewerteten die Patienten der EndoPearl-Gruppe ihr Kniegelenk dagegen signifikant schlechter (Gruppe A: A = 26, B = 23, C = 25, D = 11; Gruppe B: A = 8, B = 21, C = 35, D = 21; $p < 0,001$), was auch in den schlechteren präoperativen Ergebnissen der klinischen Funktionstests „Kniebeugen“ und „Entengang“ Ausdruck findet. Insgesamt war zwischen den beiden Patientengruppen kein signifikanter Unterschied bei den gruppenübergreifend „schlecht“ bewerteten Gesamtergebnissen des präoperativ erhobenen Lysholm-Scores nachzuweisen ($p = 0,88$).

Postoperative Daten

Die Auswertung des postoperativen Lysholm-Scores zeigte ebenfalls keine signifikant verschiedenen Gesamtergebnisse für beide Studiengruppen ($p = 0,22$). Die Patienten der Interventions- und Kontrollgruppe hatten im Mittel ein „ausgezeichnetes“ Ergebnis.

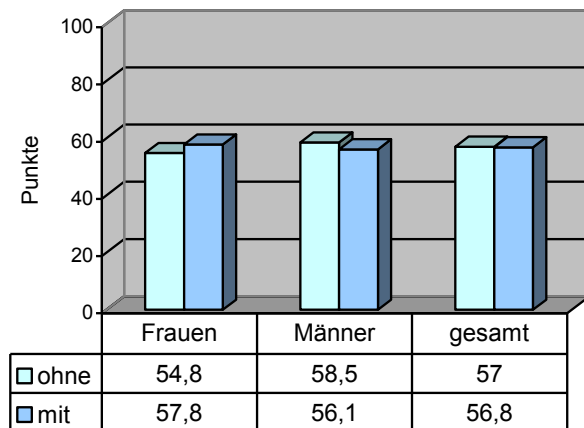


Abb. 3.13 Lysholm-Score präoperativ.

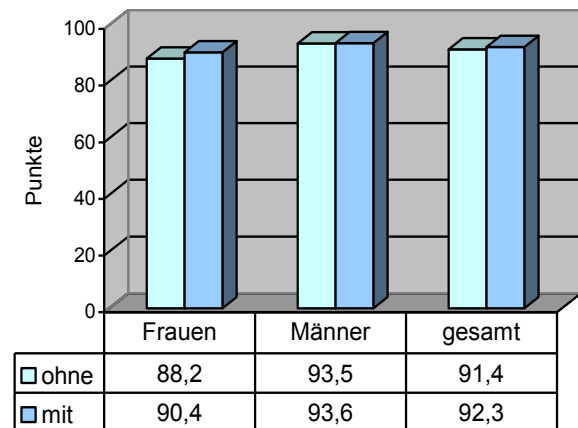


Abb. 3.14 Lysholm-Score postoperativ.

Prä- versus postoperative Daten

Bei allen Patienten konnten im Vergleich der prä- und postoperativ evaluierten Daten des Lysholm-Scores hochsignifikante Verbesserungen aller Kategorien belegt werden (A: $p < 0,001$; B: $p < 0,001$). Der detaillierte Vergleich zeigte bei den postoperativen Messungen der Oberschenkelumfänge in der Kontrollgruppe signifikant mehr muskuläre Dysbalancen durch Atrophien am betroffenen Bein ($p = 0,003$). Präoperativ hatte bei den Umfangsmessungen kein signifikanter Gruppenunterschied bestanden.

3.4.3 Tegner-Aktivitäts-Score

Der Score bewertet die körperliche Aktivität der Patienten durch die Bestimmung der Arbeits- und Sportbelastung in definierten Leistungskategorien von Null bis Zehn.

Prätraumatische Aktivität

Die meisten Studienpatienten waren vor der Kreuzbandverletzung sportlich aktiv und einige gingen einer schweren körperlichen Berufstätigkeit nach. Das Aktivitätsspektrum reichte von Radfahren, Ski-Langlauf und zweimaligem Jogging pro Woche (Kategorie 4) bis zu kniegefährdenden Wettkampfsportarten (Kategorie 9). Vor dem Unfall betrieben zwar mehr EndoPearl-Patienten aktiv Wettkampfsport, aber insgesamt gingen die Patienten der Kontrollgruppe stärker kniebelastenden Sportarten nach. Die gemittelte körperliche Aktivität der Patienten in beiden Studiengruppen war vor der Kreuzbandverletzung nicht signifikant verschieden (A: 6,47; B: 6,29).

Präoperative Aktivität

Nach der Kreuzbandverletzung waren alle Studienpatienten in ihrer körperlichen Leistungsfähigkeit deutlich eingeschränkt. Der Gruppenvergleich offenbarte keine signifikanten Differenzen der gemittelten Aktivitäten (A: 2,48; B: 2,31). In beiden Gruppen waren zusammen lediglich acht Patienten imstande, Sport auszuüben. Vier Patienten konnten weiterhin ihrer Tätigkeit als Handwerker nachgehen (Kategorie 5).

Postoperative Aktivität

Die abschließende Nachuntersuchung belegte eine hochsignifikante Verbesserung der körperlichen Aktivität in beiden Patientengruppen (A: 6,07; B: 5,99). Im Vergleich zur präoperativen Situation erreichten alle Studienpatienten eine Leistungssteigerung und elf Patienten auch wieder die oberen drei Aktivitätslevels. Ein Patient der Kontrollgruppe war schmerzbedingt im Sport eingeschränkt. Zwischen beiden Patientengruppen ließ sich kein signifikanter Unterschied der gemittelten postoperativen Aktivität nachweisen.

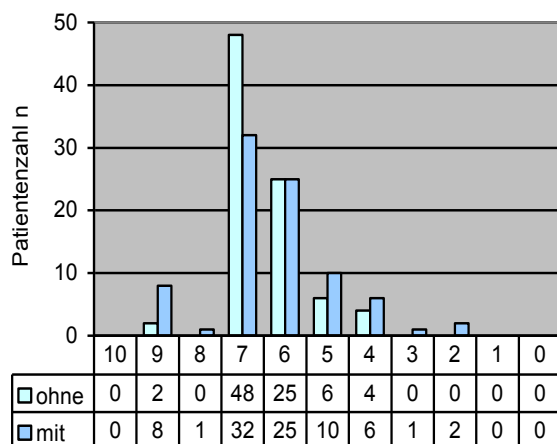


Abb. 3.15 Tegner-Aktivitäts-Score prätraumatisch.

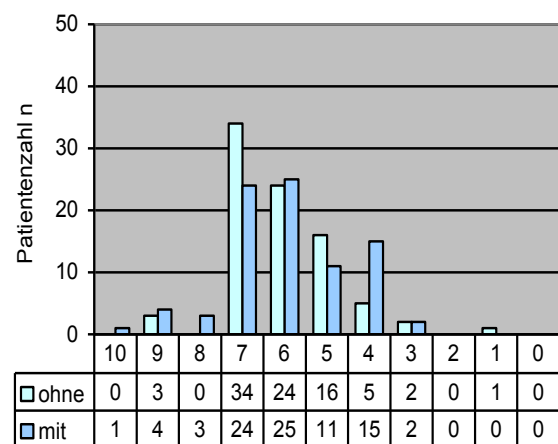


Abb. 3.16 Tegner-Aktivitäts-Score postoperativ.

Prätraumatische versus präoperative versus postoperative Aktivität

Trotz einer postoperativ hochsignifikanten Steigerung der sportlichen Aktivität, war im Vergleich zum prätraumatischen Zustand gruppenübergreifend eine Tendenz hin zu einer geringeren körperlichen Betätigung zu verzeichnen (Aktivitätsminderung: A: - 0,4; B: - 0,3). Nur die bereits prätraumatisch aktiven Leistungssportler konnten ihr Belastungsniveau zwei Jahre postoperativ wieder erreichen.

3.5 Röntgenbefunde

Präoperativ wurde bei jedem Studienpatienten die im Methodenteil beschriebene Röntgendiagnostik durchgeführt. Eine Erstellung von postoperativen Röntgenbildern zur Verlaufskontrolle, war jedoch nicht jederzeit umzusetzen. Oft waren die Patienten bei subjektiver Beschwerdefreiheit lediglich bereit, sich einer klinischen Untersuchung zu unterziehen und die Dokumentationsfragebögen auszufüllen. Insbesondere wenn keine größeren Beschwerden vorlagen, wurde die Röntgenuntersuchung von vielen Patienten als unnötig betrachtet und abgelehnt. Eine vergleichende Befundauswertung der nicht repräsentativen Anzahl an postoperativen Röntgenaufnahmen war daher nicht sinnvoll.

3.6 Geschlechterspezifischer Vergleich

In beiden Patientengruppen konnten beim Vergleich der Ergebnisse von weiblichen und männlichen Patienten keine relevanten geschlechterspezifischen Unterschiede in den präoperativen und postoperativen Stabilitätstests und Scores belegt werden (Tab. 3.5). Es war allerdings eine Tendenz hin zu besseren Ergebnissen bei den Männern einer jeden Gruppe erkennbar. Bei den objektiven Kriterien für anterior-posteriore Translation und Kniestabilität ließen sich mittels Lachman-Test und KT1000-Messungen keine signifikanten Differenzen zwischen den Geschlechtern belegen. Dagegen hatten die männlichen Patienten im Pivot-Shift-Test gruppenübergreifend stabilere Knie, sowohl präoperativ als auch postoperativ. Die EndoPearl-Männer zeigten postoperativ sogar signifikant mehr „normale“ Werte als die Frauen dieser Gruppe ($p = 0,006$). Die Frauen der EndoPearl-Gruppe hatten dabei dennoch ausschließlich „sehr gute“ (76,5 %) bzw. „gute“ (23,5 %) Stabilitätsergebnisse und präsentierten gegenüber den Frauen als auch gegenüber den Männern der Kontrollgruppe deutlich stabilere Kniegelenke.

Die Ergebnisse der erhobenen Scores (IKDC, Lysholm, Tegner) konnten in beiden Patientengruppen keine signifikanten geschlechterspezifischen Unterschiede abbilden. Auffallend war aber, dass die EndoPearl-Frauen, trotz der im gruppeninternen Vergleich unterlegenen Pivot-Shift-Ergebnisse, beim IKDC-Score postoperativ bessere Resultate und mehr „normale“ Gesamt-Qualifikationen erreichten, als die Männer der EndoPearl-Gruppe (Frauen: 67,6 %; Männer: 62,7 %; $p = 0,643$). In der Kontrollgruppe erhielten hingegen deutlich mehr männliche Patienten ein „normales“ postoperatives Gesamtergebnis des IKDC-Scores (Männer: 49,0 %; Frauen: 29,4 %; $p = 0,239$).

Bei der Auswertung der postoperativen Ergebnisse des Lysholm-Scores fand sich in beiden männlichen Untergruppen eine höhere Punktebewertung. In der Kontrollgruppe mit solitärer Interferenzschraubenverankerung zeigte sich sogar ein beinahe signifikanter Geschlechterunterschied ($p = 0,052$). Im Median hatten die Männer dieser Gruppe „ausgezeichnete“ Bewertungen des Lysholm-Scores, die Patientinnen hingegen nur „gute“ Ergebnisse. In der EndoPearl-Gruppe erreichten beide Geschlechter ohne signifikanten Unterschied „ausgezeichnete“ Score-Bewertungen ($p = 0,496$). Den Bewertungen des Tegner-Aktivitäts-Scores nach, waren die männlichen Patienten gruppenübergreifend zu jedem Untersuchungszeitpunkt körperlich aktiver. Dieser Aktivitätsunterschied verringerte sich postoperativ nur marginal.

Test / Score	Patientengruppe	Männer (n = 51)				Frauen (n = 34)			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Lachman	Gruppe A („ohne“), $p = 0,555$	27	22	1	1	15	17	2	0
	Gruppe B („mit“), $p = 0,457$	41	10	0	0	25	9	0	0
KT1000	Gruppe A („ohne“), $p = 0,233$	34	16	0	1	16	15	2	1
	Gruppe B („mit“), $p = 0,133$	41	10	0	0	25	7	2	0
Pivot-Shift	Gruppe A („ohne“), $p = 0,377$	38	11	2	0	21	12	1	0
	Gruppe B („mit“), $p = 0,006$	49	2	0	0	26	8	0	0
IKDC	Gruppe A („ohne“), $p = 0,239$	25	22	3	1	10	21	3	0
	Gruppe B („mit“), $p = 0,643$	32	19	0	0	23	11	0	0
Lysholm	Gruppe A („ohne“, Punkte), $p = 0,052$	93,5				88,2			
	Gruppe B („mit“, Punkte), $p = 0,496$	93,6				90,4			
Tegner	Gruppe A („ohne“, Kategorie gemittelt)	6,31				5,71			
	Gruppe B („mit“, Kategorie gemittelt)	6,35				5,44			

Tab. 3.5 Stabilitätstests und Scores postoperativ im Geschlechtervergleich.

3.7 Komplikationen

Die von Komplikationen betroffenen Patienten wurden als klinische Ausfälle bewertet und gemäß den Studienkriterien nicht für die Matched-Pair-Analyse berücksichtigt. Für die Erfassung von Komplikationen wurden alle Patienten betrachtet, die nach der Berücksichtigung der präoperativen und intraoperativen Ausschlussgründe in der Studienpopulation verblieben und für eine klinische Untersuchung bzw. Befragung zur Verfügung standen (Gruppe A: n = 117; Gruppe B: n = 199; Tab. 3.1). Unter diesen 316 Patienten kam es innerhalb des zweijährigen Nachuntersuchungsintervalls bei drei Patienten zu einer gegenseitigen VKB-Ruptur (A: n = 1; B: n = 2). Insgesamt 20 Patienten (6,3 %) zeigten Komplikationen des operierten Kniegelenks (A: n = 10 / 8,5 %; B: n = 10 / 5,0 %) durch:

- Transplantatversagen bei adäquatem Re-Trauma (A: n = 5 / 4,3 %; B: n = 4 / 2,0 %) und bei Insuffizienz (A: n = 3 / 2,6 %; B: n = 1 / 0,5 %). Bei allen betroffenen Patienten wurde ein Re-Ersatz durchgeführt.
- Prolongierte schmerzhafte Bewegungseinschränkungen bei Arthrofibrose (A: n = 2 / 1,7 %; B: n = 3 / 1,5 %) und Zyklops (B: n = 1 / 0,5 %). Es erfolgte jeweils eine Arthroskopie (Arthrolyse, Debridement, Spülung), bei der sich die Transplantate aller Patienten als suffizient intakt darstellten.
- Anhaltende Belastungsbeschwerden (B: n = 1) bei einem Bruch der tibialen Interferenzschraube. Das im Gelenk flottierende Fragment wurde mittels Arthroskopie geborgen.

3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der vorliegenden Untersuchung zur vorderen Kreuzbandrekonstruktion mit der Semitendinosussehne zeigten die Patienten der Kontrollgruppe (solitäre femorale Interferenzschraubenverankerung, Gruppe A) und der Interventionsgruppe (femorale Hybridverankerung mit der EndoPearl, Gruppe B) keine signifikanten Unterschiede bei den demographischen und statistischen Daten oder bei den perioperativen Befunden. Es konnten auch keine signifikant verschiedenen intraoperativen Begleitbefunde oder präoperativen Ausgangsbefunde bei den Scores sowie den manuellen und instrumentellen Stabilitätstests nachgewiesen werden.

Nach einem postoperativen Zeitraum von mindestens zwei Jahren präsentierte die Interventionsgruppe signifikant bessere Ergebnisse beim IKDC-Score, bei der instrumentellen Laxizitätsmessung (KT1000-Arthrometer) und bei den manuellen Stabilitätsmessungen (vorderer Schublidentest, Lachman-Test, Pivot-Shift-Test). Beim Lysholm-Score und dem Tegner-Aktivitäts-Score waren hingegen keine signifikanten Unterschiede gegenüber der Kontrollgruppe nachweisbar. Im Vergleich der prä- und postoperativen Daten konnten dennoch für beide Patientengruppen signifikante Verbesserungen aller Untersuchungsparameter und Scores festgestellt werden.

Beim geschlechterspezifischen Vergleich der erhobenen Parameter waren zu keinem Untersuchungszeitpunkt relevante klinische oder subjektive Unterschiede zwischen Frauen und Männern belegbar, weder in der Kontrollgruppe noch in der Interventionsgruppe.

Es lässt sich abschließend festhalten, dass unter Berücksichtigung der objektiven und subjektiven Untersuchungsergebnisse die Patienten beider Gruppen von der operativen Versorgung der vorderen Kreuzbandverletzung profitierten. Bei den objektiven Tests erreichten im Gruppenvergleich die Patienten mit der Hybridverankerung bestehend aus Interferenzschraube und EndoPearl signifikant bessere Ergebniswerte. Andererseits wurde die subjektive Kniegelenksfunktion von den Patienten beider Gruppen annähernd gleich gut bzw. nicht signifikant unterschiedlich bewertet. Beim Geschlechtervergleich zeigten die Männer gruppenübergreifend in den meisten Tests und Untersuchungen tendenziell bessere Resultate.

4 Diskussion

Die Kreuzbandchirurgie unterliegt einer fortwährenden Suche nach der optimalen Versorgung einer problembehafteten Verletzung. Es wurde eine große Variationsbreite an Rekonstruktionsverfahren des vorderen Kreuzbandes vorgestellt, wovon sich in den vergangenen 20 Jahren die arthroskopische Versorgung mittels Beugesehnenplastik als Standard etabliert hat. Die Verankerung der knochenfreien Hamstringsehnen stellt den Operateur aber vor charakteristische Herausforderungen. Nach der wissenschaftlichen Fokussierung auf die Verbesserung dieser Situation wurde die Hybridverankerung von Beugesehnen vorgestellt. Das weitgehende Fehlen publizierter klinischer Erkenntnisse zur hybriden Sehnenverankerung mit der EndoPearl war der Anlass zur Durchführung einer klinischen Studie am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité Berlin.

Die vorliegende Arbeit demonstriert die Ergebnisse einer Matched-Group-Analyse zum vorderen Kreuzbandersatz mit einem autogenen Hamstringsehnentransplantat. Sie untersucht die über einen zweijährigen Untersuchungszeitraum erhobenen klinischen Daten von insgesamt 170 Patienten und geht der Fragestellung nach, ob die femorale Hybridverankerung mit der EndoPearl (Interventionsgruppe) gegenüber der solitären Interferenzschraubenverankerung (Kontrollgruppe) eine Verbesserung der subjektiven und objektiven Kniegelenksfunktion erreichen kann. Aufgrund des zunehmenden Wissens um deren klinische Bedeutung, wird bei der Datenanalyse auch auf geschlechterspezifische Unterschiede im Behandlungsergebnis der beiden Patientengruppen eingegangen.

4.1 Studiendesign und Patienten

Zwischen 1997 und 2004 erfolgte am Campus Virchow-Klinikum des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité Berlin bei 623 Patienten der primäre vordere Kreuzbandersatz mit einem Semitendinosussehnen-Transplantat. Für die femorale Transplantatverankerung wurde ab dem Jahr 1997 eine solitäre biodegradierbare Interferenzschraube verwendet (Gruppe A, n = 141). Im gleichen Zeitraum konnte die Arbeitsgruppe von Prof. Weiler in biomechanischen Studien eine signifikant überlegene Transplantatverankerungsfestigkeit durch die zusätzliche Verwendung der EndoPearl

gegenüber der alleinigen Interferenzschraubenfixierung von reinen Hamstringsehnen demonstrieren¹²⁷. Im Sinne einer bestmöglichen Patientenversorgung wurde für die femorale Transplantatverankerung ab dem Jahr 2000 bei allen Patienten die EndoPearl zusätzlich zur Interferenzschraube eingesetzt (Gruppe B, n = 482). Es war daher keine zeitgleiche Randomisierung der Patienten auf beide Verankerungstechniken möglich. Dieser Umstand stellte keinen abbildbaren statistischen Mangel dar, da einerseits alle Patienten jeweils nach der einzigen angewandten Methode operiert wurden und andererseits durch das Studiendesign unter Bildung von Matched Pairs eine große Homogenität zwischen den zwei eingeschlossenen Patientenkollektiven geschaffen werden konnte. Die Auswertung der prä- und intraoperativen Befunddaten ergab insofern keine klinisch relevanten Unterschiede zwischen den beiden Patientengruppen.

Von den 623 Patienten der Gesamtpopulation standen nach der Anwendung der Ausschlusskriterien in beiden Patientengruppen zusammen 222 Patienten für die Paarbildung zur Verfügung. 89 Patienten der Gruppe A für die Bildung der Kontrollgruppe und 133 Patienten der Gruppe B für die Bildung der Interventionsgruppe. Der höhere Studienausschluss von Patienten der Gruppe B lag maßgeblich begründet in einem zu kurzen postoperativen Intervall (< 24 Monate; n = 181) zum Zeitpunkt der Datensichtung für die Paarbildung. Diese Patienten konnten nicht für die Auswertung herangezogen werden. Die anderen für die Studie unberücksichtigten Patienten beider Untersuchungsgruppen erfüllten entweder die weiteren definierten Ausschlusskriterien (n = 121) oder sie hatten ein unvollständiges zweijähriges Follow-up (n = 99).

Unter den von der Studie ausgeschlossenen Patienten fand sich gruppenübergreifend ein hoher Anteil an Patienten mit einem vorangegangenen gegenseitigen VKB-Ersatz (n = 34). Komorbiditäten wie eine gleichseitige HKB-Ruptur (n = 19), welche vorwiegend einzeitig versorgt wurde (n = 13), und eine gegenseitige vordere Kreuzbandverletzung (n = 10) waren ebenfalls häufige Ausschlussgründe. Die Follow-up-Raten beider Patientengruppen (A: 84,4 %; B: 74,4 %) sind vergleichbar mit den Daten anderer Studien zum vorderen Kreuzbandersatz. Aufgrund zunehmender Arbeitsmobilität und häufiger Wohnortwechsel, ist ein Trend hin zu geringerer Nachuntersuchungstreue zu verzeichnen (gruppenübergreifendes Lost to follow-up: n = 99; 22,4 %). Besonders wenn ein Patient Beschwerdefreiheit erlangt hatte, war es ihm schwer zu vermitteln, sich über einen längeren Zeitraum wiederkehrenden Untersuchungen zu unterziehen.

Die geringere Patientenanzahl der Kontrollgruppe stellte den limitierenden Faktor für die Gesamtanzahl der Matched Pairs dar. Nach der Berücksichtigung der Einschluss- und Ausschlusskriterien standen in ihr 89 Patienten für die Paarbildung zur Verfügung. In der Interventionsgruppe wäre aufgrund der größeren Ausgangspopulation (A: n = 141; B: n = 301; Tab. 3.1) eine Paarbildung mit 133 Patienten möglich gewesen. Die ungleiche Anzahl verfügbarer Patienten (A: n = 89; B: n = 133) barg im Rahmen der Paarbildung die Möglichkeit einer Verzerrung des Gruppen-Gesamtergebnisses, durch eine Positivselektion von klinisch besseren EndoPearl-Patienten (Selection Bias). Ungeachtet dessen zeigten die nach der Paarbildung verbliebenen, nicht selektierten Patienten beider Untersuchungsgruppen (A: 4 von 89; B: 48 von 133), gegenüber den jeweils ausgewählten 85 Matched-Pair-Patienten der eigenen Gruppe, vergleichbare Gesamtergebnisse ohne signifikante Unterschiede bei allen erhobenen Daten.

Matched Pairs

Infolge der Paarbildung nach dem Matched-Pair-Prinzip waren auch zwischen den zwei Patientengruppen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Patientenalters und der Geschlechterverteilung vorhanden. Eine nominelle männliche Übergewichtung liegt in der höheren Inzidenz von Kreuzbandverletzungen in der männlichen Bevölkerung begründet. Die durchschnittliche Latenz vom Trauma bis zur operativen Versorgung war gruppenübergreifend ähnlich lang. Der zwischen beiden Gruppen geringe quantitative Unterschied von drei Patienten, die innerhalb des ersten Jahres nach dem Trauma versorgt wurden (Gruppe A: n = 62; Gruppe B: n = 65), ist durch die Willkür der Fristsetzung begründet (\leq bzw. $>$ 12 Monate) und stellt bei tageweiser Betrachtung keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Patientengruppen dar. Auch das um durchschnittlich 3,5 Monate gering längere, postoperative Nachuntersuchungsintervall der Kontrollgruppe markierte keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,64$) und war durch das Studiendesign mit zwei sich einander ablösenden Operationstechniken und zwei aufeinander folgenden Patientengruppen bedingt. Die Patienten der Kontrollgruppe, bei denen zum Zeitpunkt der Datensichtung und trotz einer um mehr als zwei Jahre zurückliegenden Operation, noch keine Abschlussuntersuchung dokumentiert war, erhielten ihre im weiteren Verlauf durchgeführte, abschließende Nachuntersuchung vergleichsweise später nach der Operation, als die Patienten der Interventionsgruppe (A: $t_{\max} = 103$ Monate; B: $t_{\max} = 78$ Monate).

4.2 Intraoperative Begleitbefunde

Zwischen den Patienten der Kontrollgruppe und denen der Interventionsgruppe fanden sich bei den intraoperativ erhobenen Kniebefunden keine signifikanten Unterschiede. Die im Gruppenvergleich übereinstimmende Anzahl erstgradiger Instabilitäten des medialen Kollateralbandes steht dabei im Gegensatz zu den präoperativ erhobenen Ergebnissen der klinischen Untersuchung beim Valgusstresstest. Bei diesem hatten die Patienten der Kontrollgruppe zwar nicht signifikant, aber doch häufiger pathologische Werte aufgewiesen. Die Diskrepanz könnte sowohl auf eine untersucherbedingte Verzerrung (Performance Bias) als auch auf eine patientenspezifische Verzerrung der subjektiven Testbewertung (Tagesform, Empathie des Untersuchers) zurückgeführt werden. Einerseits wurden die Patienten im Laufe der Jahre von verschiedenen Untersuchern erstbegutachtet, aber nur von zwei Operateuren operiert. Andererseits waren die Patienten der Interventionsgruppe laut dem IKDC-Score präoperativ schmerzgeplagter, weshalb die Höhe des pathologischen Grades beim Valgustest vom Untersucher eventuell unterschätzt wurde, angesichts eines aktiven Gegenspannens des Patienten. Dagegen war bei der intraoperativen Untersuchung unter Narkose ein reflektorisches muskuläres Gegenspannen des Patienten ausgeschlossen.

Knorpelläsionen fanden sich bei etwa jedem zweiten Patienten. Die in beiden Patientengruppen häufiger geringergradig und medial oder retropatellar auftretenden Läsionen werden auch von anderen Autoren in gleicher Ausprägung und Lokalisation als Hauptbefunde beschrieben und sind oftmals Abbild der Unfallmechanismen sowie der chronischen Pathologie. Anhand der vorliegenden Daten wurde auch die Abhängigkeit der Ausprägung dieser Knorpelläsionen von der Latenz der operativen Versorgung nach dem ursächlichen Trauma dargelegt. Ein frühzeitiger vorderer Kreuzbandersatz reduzierte die Wahrscheinlichkeit pathologischer Knorpelbefunde und sekundärer multifokaler Knorpelläsionen. Dieser Umstand wird durch die Empfehlungen der Fachgesellschaften zur zeitigen Versorgung der VKB-Läsion gebührend anerkannt.

Auch Meniskuspathologien waren überwiegend medial zu finden. Laut Rupp und Kollegen ist die vordere Kreuzbandläsion gemäß üblichen Verletzungsmustern zum Zeitpunkt des Traumas eher mit Verletzungen des Außenmeniskus assoziiert⁹³. Die Abweichung der Ergebnisse, als auch die anderer Autoren¹²⁴, von dieser Aussage, mag in der unterschiedlich langen posttraumatischen Latenz der operativen Versorgung begründet liegen. Längere Zeiträume zwischen Trauma und Kreuzbandersatz können

zur sukzessiven Schädigung der sekundären Kniegelenkstabilisatoren führen⁶. Bei den Menisken ist zumeist der mediale Meniskus davon betroffen. Eine positive Korrelation zwischen der Latenz der Kreuzbandversorgung und der Inzidenz von Meniskusläsionen fand sich in der gesamten Patientenpopulation hingegen nicht. Die gruppenübergreifend signifikante Häufung beim männlichen Geschlecht kann anhand der vorliegenden Daten nicht erklärt werden und steht den Ergebnissen von Arendt und Kollegen entgegen⁴⁰, die in ihrer Datenanalyse von Knieverletzungsmustern bei College-Sportlern eine Häufung von Begleitverletzungen des Kniegelenks beim weiblichen Geschlecht sahen.

4.3 Klinische, subjektive und funktionelle Ergebnisse

In den zwei Patientengruppen kam es nach dem vorderen Kreuzbandersatz bei beiden Geschlechtern zu einer deutlichen Verbesserung der objektiven Kniestabilität und Funktionalität (KT1000-Messung, IKDC-Score) wie auch der subjektiven Patientenzufriedenheit (Lysholm-Score). Der Vergleich beider Gruppen untereinander zeigte dagegen signifikante Unterschiede bei allen postoperativen Stabilitätstests und dem IKDC-Score im Allgemeinen. Sowohl beim Lachman-Test ($p < 0,001$), beim Pivot-Shift-Test ($p = 0,007$) als auch beim vorderen Schubladentest ($p = 0,015$) präsentierten die Patienten der EndoPearl-Gruppe signifikant stabilere operierte Kniegelenke. Die instrumentell mit dem KT1000 gemessene vordere Kniestabilität war postoperativ bei den EndoPearl-Patienten mit durchschnittlich 1,73 Millimetern Seitendifferenz (SSD) gegenüber der Kontrollgruppe mit durchschnittlich 2,47 Millimetern SSD hochsignifikant besser ($p < 0,001$). Auch der IKDC-Score war in der EndoPearl-Gruppe postoperativ signifikant höher ($p = 0,003$). 65 Prozent der EndoPearl-Patienten ($n = 55$) erreichten eine „ausgezeichnete“ Bewertung, entgegen 41 Prozent der Patienten in der Gruppe mit solitärer Interferenzschraube ($n = 35$). Die subjektive Patientenzufriedenheit (Lysholm-Score) war hingegen bei beiden Patientengruppen zu allen Untersuchungszeitpunkten nicht signifikant unterschiedlich. Zwei Jahre postoperativ erreichten alle Patienten im Mittel ein „ausgezeichnetes“ Ergebnis (A: $91,4 \pm 11,3$; B: $92,3 \pm 11,2$; $p = 0,22$).

Eine fehlende Korrelation zwischen der subjektiven Kniefunktion und der objektiven Kniestabilität wurde auch von anderen Autoren beschrieben^{12,21,133}. Die vorliegenden Daten des Tegner-Aktivitäts-Scores nach zwei postoperativen Jahren belegen zudem eine gruppenübergreifend hochsignifikante Verbesserung der durchschnittlichen

körperlichen Aktivität, ohne einen signifikanten Unterschied zwischen den zwei Patientengruppen bei den postoperativen Aktivitätslevels (A: 6,07; B: 5,99). Es war im Vergleich zum prätraumatischen Zustand aber in beiden Gruppen eine Tendenz, hin zu einer weniger intensiven körperlichen Betätigung zu verzeichnen. Diese Tatsache mag auch durch das zunehmende Alter jedes einzelnen Patienten im Studienverlauf begründet sein. Die größte Patientengruppe wurde von den 15- bis 30-Jährigen gebildet. Dieser Zeitraum ist eine Lebensphase mit vielen Veränderungen. Es steht sukzessive weniger Zeit für sportliche Betätigung zur Verfügung, was oft zu einem reduzierten Aktivitätslevel führt (Schule > Ausbildung > Arbeit / Karriere > Familie).

Bei den weiteren klinischen und funktionellen Tests fanden sich zum Teil signifikant bessere Ergebnisse in der EndoPearl-Gruppe. So zeigten deren Patienten zwei Jahre postoperativ signifikant weniger muskuläre Dysbalancen und anteriore Krepitationen sowie signifikant bessere Resultate beim aktiven Kniebeugetest im Stehen, als die Patienten der Kontrollgruppe ohne EndoPearl. Alle anderen klinischen und funktionellen Ergebnisdaten waren gruppenübergreifend nicht signifikant verschieden.

4.4 Vergleich mit der Literatur

Die meisten Autoren beschränken sich in ihren Publikationen auf instrumentell gemessene Stabilitätsergebnisse und Score-Gesamtergebnisse. Weitere klinische, funktionelle und subjektive Resultate werden oft nur zusammengefasst und indirekt über mehrere Scores wiedergegeben. Um einen Literaturvergleich zur Stabilitätstestung zu ermöglichen, hat sich das untersucherunabhängige und reproduzierbare Messungen liefernde KT1000 etabliert³⁴. Häufig werden nur dessen Resultate publiziert und als Indikator für die objektive Stabilität der Bandversorgung betrachtet. Daher war mangels einer detaillierten Nennung der einzelnen Score- und Untersuchungsergebnisse durch andere Autoren sowie aufgrund der mehrheitlich heterogenen Studienprotokolle, kein allumfassender Vergleich der in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Ergebnisse mit der Literatur möglich. Für den Ergebnisvergleich lag der Fokus deshalb auf den zu Beginn dieser Arbeit definierten Zielkriterien zur objektiven Kniestabilität, zur subjektiven Funktionalität und zur Patientenzufriedenheit (Kapitel 2.5.2). Danach entsprechen die vorliegenden Untersuchungsergebnisse denen anderer Autoren unter Verwendung eines viersträngigen Transplantats der Hamstringsehnen^{12,25,53,55,104}.

Zur Interferenzschraubenfixierung eines Hamstringsehnentransplantats finden sich in der Literatur zahlreiche Publikationen klinischer Ergebnisse. Auch bei der Suche nach Hybridverankerungen von reinen Sehnentransplantaten zeigt sich ein gewisses Angebot (Kapitel 1.6.2). So wurden für die femorale hybride Transplantatverankerung mit Interferenzschrauben mehrere Augmentationen vorgestellt, beispielsweise mit einem Staple¹³⁴, Fixationsbutton¹²⁸ oder Transfixationssystem¹⁹. Die Studienlage klinischer Ergebnisse zur Hybridverankerung mit der EndoPearl ist jedoch übersichtlich. Nur in der Untersuchung von Arneja und Kollegen zur Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes mit einem viersträngigen Hamstringsehnentransplantat wurde bei allen operierten Patienten eine biodegradierbare Interferenzschraubenfixierung verwendet und in der Interventionsgruppe zusätzlich die EndoPearl in femoraler Position gebraucht¹²⁴. Daneben finden sich in der Literatur zur EndoPearl einige weitere biomechanische und klinische Untersuchungen des vorderen Kreuzbandes, allerdings mit anderen Transplantaten und abweichenden Vergleichsverankerungen.

4.4.1 Methodische Ergebnisse

Arneja und Kollegen erhielten in ihrer Untersuchung zur EndoPearl Ergebnisse, die mit den vorliegenden Resultaten vergleichbar sind¹²⁴. Es wurden insgesamt 13 Frauen und 22 Männer in eine Interventionsgruppe (EndoPearl; n = 18) und in eine Kontrollgruppe (n = 17) randomisiert. Im Unterschied zur vorliegenden Untersuchung betrug das dokumentierte Follow-up lediglich 18 Monate und für das Transplantat wurde zusätzlich zur Semitendinosussehne die Gracilissehne verwendet. An klinischen Ergebnissen wurden nur die Seitendifferenzen (SSD) der KT1000-Stabilitätstestung berichtet. Hierbei zeigte die Interventionsgruppe 18 Monate postoperativ signifikant stabilere Kniegelenke bzw. bessere Testergebnisse (EndoPearl-Gruppe: 1,60 mm; Kontrollgruppe: 2,78 mm; p = 0,002). Das ist vergleichbar mit den Resultaten der vorliegenden Arbeit nach 24 postoperativen Monaten (EndoPearl-Gruppe: 1,73 mm; Kontrollgruppe: 2,47 mm). Die subjektive Evaluierung erfolgte mit Hilfe des ACL-QOL-Fragebogens (Anterior Cruciate Ligament Quality of Life). Übereinstimmend mit dem vorliegenden Lysholm-Score, ließ sich kein signifikanter Gruppenunterschied in der postoperativen Patientenzufriedenheit belegen. Das Autorenteam sieht den klinischen Nutzen der EndoPearl durch den Gewinn an vorderer Kniestabilität in der Interventionsgruppe bestätigt.

Die bilaterale Beugesehnenverankerung mit einer solitären Interferenzschraube wurde, analog zum Vorgehen in der Kontrollgruppe der vorliegenden Studie, von mehreren Autoren untersucht. Charlton und Kollegen berichteten von ebenfalls guten Stabilitäts- und Score-Ergebnissen der 65 Studienpatienten ihrer retrospektiven Untersuchung zur Interferenzschraubenverankerung eines vierlagigen Hamstringsehnentransplantats¹⁰⁴. Zwei Jahre postoperativ konnten 47 Patienten objektiv und subjektiv (n = 36) oder nur subjektiv (n = 11) reevaluiert werden. Deren gemittelte Werte der KT1000-Messung (2,03 mm SSD), des Lysholm-Scores (91 Punkte) und des Tegner-Aktivitäts-Scores (Aktivitätsstufe 5,7) entsprachen annähernd den Resultaten in der Kontrollgruppe der vorliegenden Untersuchung nach 24 Monaten (2,47 mm SSD; 91,4 Punkte; Stufe 6,07). In der Zusammenschau sehen die Autoren ihr Vorgehen beim VKB-Ersatz als sicher und effektiv bestätigt. Auch Corry und Kollegen erhielten gute Stabilitätswerte bei der Interferenzschraubenverankerung einer Hamstringsehne. Im Rahmen ihres Vergleichs mit der Patellarsehne wurde zur Transplantatverankerung bei allen Patienten bilateral eine solitäre Interferenzschraube aus Metall benutzt¹². In der Hamstringsehnen-Gruppe (n = 75) betrug die gemittelte SSD bei der KT1000-Messung zwei Jahre postoperativ 1,7 Millimeter. Abgesehen von dieser besseren vorderen Kniestabilität, entsprachen die weiteren Ergebnisse der Hamstringsehnen-Gruppe (IKDC-Score: 93 % normale oder fast normale Qualifikation; Lysholm-Score: 91 % ausgezeichnete oder gute Resultate) denen der Kontrollgruppe in der vorliegenden Arbeit.

4.4.2 Geschlechterspezifische Ergebnisse

Beim Vergleich der Subgruppen ihrer Studie bemerkte die Arbeitsgruppe von Corry bei den Frauen der Hamstringsehnen-Gruppe gegenüber den Männern derselben Gruppe einen durch Transplantatelongation bedingten, signifikanten Verlust an vorderer Kniestabilität¹². Ein solcher Geschlechterunterschied war in der Patellarsehnen-Gruppe nicht nachweisbar. Die zwischen den Geschlechtern verschiedene vordere Kniestabilität beim Gebrauch der Hamstringsehnen wurde, unabhängig von der Transplantatfixierung, auch von anderen Autoren beschrieben und auf Geschlechterunterschiede bei der Knochendichte und dem Transplantatdurchmesser zurückgeführt^{132,133}. Für ein rein weichgewebiges Transplantat wird darum vor allem bei Frauen eine Hybridverankerung empfohlen. Corry und Kollegen sahen die ermittelten Stabilitätsunterschiede ebenso

durch die geringere tibiale Knochendichte von Frauen mit einer konsekutiv geringeren Stabilität der Interferenzschraubenverankerung begründet. Dieselbe Arbeitsgruppe konnte in einer anschließenden Untersuchung zweier weiblicher Patientengruppen eine signifikante Verbesserung der Kniestabilität durch die tibiale Hybridverankerung des Hamstringsehnen-Transplantats mittels Interferenzschraube und Staple erreichen¹³⁴, im Vergleich mit der in der vorangegangenen Studie verwendeten bilateral solitären Interferenzschraubenfixierung. Darüber hinaus zeigte sich im weiteren Follow-up der vorangegangenen Studie von Corry, dass die Stabilitätsunterschiede zwischen den Geschlechtern bei der Verwendung eines Hamstringsehnen-Transplantats zeitlich begrenzt sein können. Die Re-Evaluation der Patellarsehnen- und Hamstringsehnen-Gruppe konnte ab drei Jahren postoperativ keinen signifikanten Stabilitätsunterschied mehr zwischen den Frauen und Männern der Hamstringsehnen-Gruppe nachweisen²⁵.

In der vorliegenden Untersuchung erreichten beide Geschlechter der EndoPearl-Gruppe beim Lachman- und vorderen Schubladen-Test deutlich bessere Ergebnisse als die jeweilige Vergleichsgruppe mit solitärer Interferenzschraubenversorgung. Auch bei der instrumentellen Laxizitätsmessung (KT1000) zeigten in der EndoPearl-Gruppe beide Geschlechter signifikant bessere Ergebnisse als ihre entsprechende Kontroll-Subgruppe. Der signifikante Gruppenunterschied beim Pivot-Shift-Test zugunsten der EndoPearl-Gruppe ging hingegen auf die hochsignifikant besseren Resultate der männlichen Subgruppe zurück. Die Männer der EndoPearl-Gruppe zeigten gegenüber den Männern der Kontrollgruppe ($p = 0,008$) als auch gegenüber den beiden weiblichen Subgruppen signifikant bessere Bewertungen beim Pivot-Shift-Test ($p = 0,006$ bzw. $p < 0,001$). Allerdings waren die Pivot-Shift-Ergebnisse der männlichen EndoPearl-Patienten schon präoperativ signifikant besser als die entsprechenden Ergebnisse der weiblichen EndoPearl-Patienten. Die Frauen der EndoPearl-Gruppe zeigten beim Pivot-Shift-Test zwar gleichermaßen deutlich stabilere Kniegelenke als ihre weibliche Kontrollgruppe, jedoch war dieser Unterschied nicht signifikant ($p = 0,312$). Abgesehen von den Pivot-Shift-Ergebnissen wiesen die EndoPearl-Patientinnen bei allen anderen Tests keine signifikant abweichenden Stabilitätsergebnisse gegenüber der männlichen EndoPearl-Subgruppe auf. Beim Vergleich des IKDC-Gesamtscores aller Subgruppen erreichten die Frauen der Interventionsgruppe die besten Resultate und gegenüber ihrer Kontroll-Subgruppe sogar hochsignifikant bessere Bewertungen ($p = 0,004$).

Zwischen den zwei männlichen Subgruppen fand sich hingegen kein signifikanter Unterschied ($p = 0,166$), trotz besserer Bewertungen in der Interventionsgruppe.

In der Gesamtheit der Stabilitätstests zeigten die Männer beider Gruppen postoperativ stabilere Kniegelenke. Diese Stabilitätsunterschiede erreichten jedoch keine Signifikanz innerhalb der jeweiligen Patientengruppe. Dagegen präsentierten im Quervergleich die männlichen Patienten der EndoPearl-Gruppe signifikant stabilere Kniegelenke als die Frauen der Kontrollgruppe. Zwischen den Männern der Kontrollgruppe und den Frauen der Interventionsgruppe fand sich kein solcher Unterschied. Auch wenn beim Lysholm-Gesamtscore keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Patientengruppen nachweisbar waren, profitierten doch vor allem die EndoPearl-Frauen gegenüber ihrer Kontroll-Subgruppe ohne EndoPearl von der operativen Versorgung der VKB-Ruptur. Beide Männer-Subgruppen und die Frauen mit EndoPearl erreichten beim Lysholm-Score im Mittel „ausgezeichnete“ Ergebnisse, die Frauen ohne EndoPearl hatten hingegen nur „gute“ Ergebnisse. Insgesamt konnten die in der Literatur beschriebenen signifikanten geschlechterspezifischen Unterschiede der postoperativen Kniestabilität nach der Verwendung eines Hamstringsehnentransplantats, in der vorliegenden Untersuchung für keines der beiden Verankerungsverfahren bestätigt werden.

4.5 Komplikationen

In der Literatur zum vorderen Kreuzbandersatz werden zum Teil sehr unterschiedliche Komplikationsraten berichtet. Je nach Autor und Transplantat wird bei bis zu 25 Prozent der Rekonstruktionen von unbefriedigenden Ergebnissen und komplikativen Verläufen ausgegangen¹³⁰. Infektionen, Arthrofibrosen und das Transplantatversagen aufgrund einer Insuffizienz oder eines adäquaten Traumas zählen zu den häufigsten Gründen. Für das Hamstringsehnentransplantat fanden Colvin und Kollegen in ihrer Metaanalyse Versagensraten von vier bis 27 Prozent¹¹⁶. In der vorliegenden Untersuchung war das Transplantatversagen mit 13 Fällen (4,3 %) die häufigste Komplikation, wobei neun Patienten eine Transplantatruptur bei adäquatem Re-Trauma erlitten (Gruppe A: 4,6 %; Gruppe B: 2,1 %) und vier Patienten eine Insuffizienz des rekonstruierten Kreuzbandes entwickelten (A: 2,8 %; B: 0,5 %). Diese 13 Patienten erhielten einen Revisions-Kreuzbandersatz. Arthrofibrosen ($n = 2$) und Zyklospänomene ($n = 1$) fanden sich im Vergleich mit der Literatur bei den Patienten der vorliegenden Studie ebenso^{25,53,133}

bzw. weniger häufig¹³¹. In beiden Untersuchungsgruppen hatte weder das Geschlecht noch das Alter der Patienten einen signifikanten Einfluss auf die Komplikationsrate. Bei einer älteren Patientenkohorte wäre ein solcher Effekt möglicherweise wahrnehmbar gewesen, denn auch wenn dem Alter des Patienten bei der Indikationsstellung eine immer geringere Bedeutung zukommt, ist ihm bei den biomechanischen Eigenschaften der autogenen Transplantate eine negativ-inverse Abhängigkeit beizumessen. Woo und Kollegen zeigten, dass die Steifheit und die maximale Reißfestigkeit des VKB bei jungen Menschen dreifach höher ist als diejenige älterer Patienten, und dass die Transplantatqualität mit dem Alter abnimmt⁹⁵. Die mit dem Alter abnehmende und zwischen den Geschlechtern verschiedene Knochenqualität kann auch zu Problemen bei der Verankerung des Transplantats führen, vor allem tibial bei Frauen. Brand und Kollegen beschrieben für Hamstringsehnen-transplantate eine direkt von der Knochendichte abhängige Versagenslast der Interferenzschraubenverankerung¹⁴⁰.

4.6 Limitationen und Stärken

4.6.1 Limitationen

In Vergleichsstudien ist selbst bei statistischer Adjustierung ein ergebnisverzerrender Störeinfluss (Confounder) durch zwischen den Vergleichsgruppen heterogen verteilte Patientenmerkmale prinzipiell nicht sicher auszuschließen. Es liegt unvermeidlich eine reduzierte interne Validität vor. Auch die vorliegende Arbeit enthält potenzielle Limitationen. Nach der klinikinternen Weiterentwicklung der Verankerungstechnik von weichgewebigen Sehnen fand eine zeitlich aufeinander folgende und sich ablösende klinische Anwendung der beiden in dieser Arbeit verglichenen Techniken statt. Folglich war keine zeitgleiche Randomisierung der Patienten in die zwei Untersuchungsgruppen möglich, was eine Ergebnisverzerrung begünstigt haben könnte. Der verhältnismäßig lange Zeitraum der Datenerhebung von 1997 bis 2004 hatte zur Folge, dass einerseits mehrere Nachuntersucher involviert wurden und andererseits die seit dem Jahr 2000 angewandte Hybridverankerung länger praktiziert wurde, weshalb zwei unterschiedlich große Patientengruppen entstanden. Das kann jeweils einen systematischen Fehler (Bias) darstellen, ist aber im klinischen Alltag kaum zu verhindern. Ebenso lässt sich bei unverblindeten Studien ein sogenannter Detection Bias grundsätzlich nicht vermeiden.

Trotz der Paarbildung anhand definierter Matching-Kriterien zur Verhinderung signifikanter Merkmalsunterschiede zwischen beiden Untersuchungsgruppen, wies die Kontrollgruppe schon präoperativ bei allen nicht-instrumentellen Stabilitätstests jeweils etwas mehr Patienten mit schlechteren Ergebnissen auf. Diese nicht signifikanten Gruppenunterschiede können infolge der individuellen Qualifikation der Testergebnisse durch mehrere Untersucher bedingt sein (Performance Bias). Dagegen wurden die Operationen von nur zwei verschiedenen Operateuren in derselben Technik durchgeführt, was ebenfalls aber weniger wahrscheinlich eine Ergebnisverzerrung erlaubt haben könnte. Die Möglichkeit der Selektion von klinisch gesünderen Patienten der Interventionsgruppe im Rahmen der Paarbildung, könnte ebenso zu einer Verzerrung der präoperativen Stabilitätsergebnisse geführt haben (Selection Bias). Da die Kontrollgruppe mit ihrer geringeren Patientenzahl die Gesamtzahl der Matched Pairs vorgab, musste diesen wenigen Patienten ein Partner aus der größeren Patientenanzahl der Interventionsgruppe zugeordnet werden. Aufgrund des größeren Angebotes an Patienten mit vollständigem zweijährigen Follow-up, wäre in der EndoPearl-Gruppe theoretisch eine bevorzugte Auswahl von klinisch besseren Patienten möglich gewesen. Diese Hypothesen werden ganz objektiv durch die nicht signifikant verschiedenen präoperativen Testergebnisse bei den KT1000-Messungen entkräftet, da mit diesem Test untersucherunabhängig reproduzierbare Ergebnisse ermittelt werden. Des Weiteren zeigten die selektierten gegenüber den nicht-selektierten EndoPearl-Patienten keine signifikanten Unterschiede, sodass auch ein signifikanter Selection Bias ausgeschlossen werden kann.

Schließlich besteht die Möglichkeit, dass die Ergebnisunterschiede zwischen beiden Gruppen allein durch eine Verbesserung der operativen Fertigkeiten der Operateure bedingt sind. Da sich die beiden verglichenen Verankerungstechniken nur in der femoralen Transplantatverankerung unterscheiden, baut die EndoPearl-Hybridtechnik gewissermaßen auf der schon zuvor praktizierten Verankerungstechnik mit bilateral alleiniger Verwendung einer Interferenzschraube auf. Die Lernkurve der gesamten Operationstechnik beschränkte sich bei der Hybridverankerung nur auf die zusätzliche femorale EndoPearl-Verankerung. Der Wechsel von dem vor 1997 angewandten VKB-Ersatz mit der Patellarsehne hin zum Gebrauch der Hamstringsehnen, hatte theoretisch eine längere operative Lernkurve zur Folge als der Wechsel von der solitären Interferenzschraubenverankerung zur Hybridverankerung der Hamstringsehnen.

4.6.2 Stärken

Das Design der vorliegenden Studie schloss eine Einflussnahme der Studienmitarbeiter auf die Gruppenzuordnung der Patienten grundsätzlich aus. Da alle Studienpatienten in der zum jeweiligen Operationszeitpunkt einzigen angewandten Technik versorgt wurden (vor oder ab dem Jahr 2000), erfolgte jederzeit eine automatische Patientenzuordnung sowie eine homogene Verteilung von bekannten und nicht bekannten Confoundern auf die zwei nacheinander gebildeten Patientengruppen. Im Vergleich mit anderen Arbeiten zum VKB-Ersatz unterstreichen die überdurchschnittlich vielen Paarbildungs-Kriterien der Matched-Pair-Analyse und die zahlreichen Testvariablen der Untersuchungen den Anspruch dieser Studie an eine sehr hohe Strukturgleichheit und an eine große Ergebnisdifferenzierung, sowohl innerhalb als auch zwischen den beiden Patientengruppen. Die Zahl der eingeschlossenen Patienten ist für eine klinische Matched-Group-Studie zum vorderen Kreuzband vergleichsweise hoch. Zusammen mit dem zweijährigen Follow-up und der hohen Nachuntersuchungstreue (geringes Lost to follow-up) wird damit die hohe statistische Teststärke und die Aussagekraft der Studienergebnisse betont. Durch die geringe Anzahl an Operateuren ($n = 2$), in Relation zur Größe der gesamten Patientenkohorte ($n = 623$), konnten operationstechnische Störvariablen weitestgehend begrenzt werden. Das in beiden Patientengruppen identische operative Vorgehen erhöhte die Wahrscheinlichkeit, dass gruppenspezifische Unterschiede bei den Untersuchungsergebnissen, allein auf die EndoPearl als einzige Parameteränderung zwischen den beiden Operationstechniken zurückzuführen sind.

4.7 Schlussbetrachtung und Ausblick

4.7.1 Schlussbetrachtung

In experimentellen Studien zur Beugesehnenverankerung konnte die Arbeitsgruppe von Prof. Weiler für die Kombination einer biodegradierbaren Interferenzschraube mit der EndoPearl bereits überlegene Ergebnisse bei der initialen Fixierungsstärke, der Versagenslast und der Steifheit demonstrieren¹²⁷. Weitere Autoren konnten auch bei der Verwendung anderer Sehnentransplantate und im Vergleich mit unterschiedlichen Referenzverankerungen hervorragende Ergebnisse für die Hybridverankerung von rein weichgewebigen Sehnentransplantaten mit der EndoPearl erzielen^{125,126,141-144}.

Soweit der aktuellen Literatur zur primären Versorgung einer vorderen Kreuzbandruptur zu entnehmen ist, präsentiert die vorliegende Arbeit erstmals ausführliche klinische Studienergebnisse zur femoralen Hybridverankerung der Semitendinosussehne mittels Interferenzschraube und EndoPearl, bei einem Nachuntersuchungszeitraum von mindestens zwei Jahren. Die Studienergebnisse bestätigen das positive Potenzial einer zusätzlichen Verwendung der EndoPearl bei der Beugesehnenverankerung, gegenüber einer solitären Interferenzschraubenfixierung. Sie zeigen, dass die mit der EndoPearl versorgten Patienten unabhängig vom Geschlecht objektiv stabilere Kniegelenke haben und eine bessere Wiederherstellung der Kniegelenksfunktion erreichen. Die zu Beginn der vorliegenden Arbeit aufgestellten Arbeitshypothesen werden dadurch bestätigt.

Eine femorale Hybridverankerung des Weichteiltransplantats mit der EndoPearl kann die Verankerungsfestigkeit erhöhen und einer Transplantatlockerung entgegenwirken. Damit werden die dringend erforderlichen Voraussetzungen für eine früh-funktionelle Nachbehandlung bereitet. Ein Vorteil der Hybridtechnik liegt in der Kompensation von ungünstigen Rahmenbedingungen der femoralen Transplantatverankerung. Einerseits ist durch die Interaktion der EndoPearl und der biodegradierbaren Interferenzschraube eine Reduktion der femoral ausgeprägteren Transplantat-Tunnel-Bewegungen möglich. Andererseits ist mit der EndoPearl die Möglichkeit gegeben, bei einem Mismatching zwischen Transplantat und Tunnel - aufgrund einer unpräzisen Tunnelpräparation, einer Tunnelerweiterung im Rahmen von Revisionseingriffen oder einer Größenvariation des Transplantats - durch ihre zusätzliche Fixierung, die initiale Verankerungsfestigkeit des Gesamtkonstrukts entscheidend zu verbessern. Die EndoPearl bietet hierbei die Option, durch eine Unterdimensionierung des Interferenzschraubendurchmessers gegenüber den Durchmessern von Tunnel und Transplantat, das Schraubendrehmoment auf das Sehngewebe zu reduzieren, ohne gleichzeitig die Verankerungsstärke zu verringern. Dadurch werden Schädigungen des Transplantats sowie die Wahrscheinlichkeit einer Transplantatrotation um die Schraube herum vermindert^{19,128,143}. Der gleiche optionale Ansatz begünstigt den Gebrauch der EndoPearl bei einer geringen Knochendichte.

In der vorliegenden Untersuchung zeigten die beiden Patientengruppen zwei Jahre postoperativ eine deutliche Verbesserung aller Untersuchungsparameter und Scores, verglichen mit der präoperativen Situation. Das entspricht den Ergebnissen vieler anderer Autoren bei Untersuchungen zum vorderen Kreuzbandersatz und bestätigt die breiten Empfehlungen der orthopädischen und unfallchirurgischen Fachgesellschaften

zur operativen Versorgung einer vorderen Kreuzbandruptur. Der Gruppenvergleich offenbarte allerdings für die EndoPearl-Gruppe signifikant bessere Ergebnisse bei den klinischen Messungen für manuelle Stabilität und instrumentelle Laxizität sowie für den IKDC-Score. Bei der subjektiven Datenerhebung waren hingegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Patientengruppen der vorliegenden Untersuchung erkennbar. Der abschließende geschlechterspezifische Vergleich innerhalb dieser beiden Untersuchungsgruppen konnte keine relevanten Unterschiede bei den klinischen und subjektiven Ergebnissen von Frauen und Männern nachweisen.

4.7.2 Ausblick

Trotz vieler Fortschritte in Theorie und Praxis gelingt es der Kreuzbandchirurgie noch nicht, eine Restitutio ad integrum der Kreuzbandverletzung zu erreichen. Unklar scheint außerdem, inwieweit die Rekonstruktion des VKB tatsächlich eine posttraumatische Arthroseprävention erreichen kann²⁶. Die experimentelle und klinische Forschung zur Kreuzbandversorgung widmet sich deshalb diversen Bereichen der konservativen und operativen Therapie. Das Ziel jeder methodischen oder prozeduralen Veränderung von etablierten Therapieverfahren sollte es sein, durch einen optimal stabilisierenden und gleichzeitig weniger Gewebe traumatisierenden Eingriff, die Restitution des Kniegelenks zu verbessern und zu beschleunigen. Nur so können die Voraussetzungen für eine gute Transplantateinheilung und ein stabiles Rekonstruktionsergebnis geschaffen sowie eine Verbesserung von Biomechanik und Funktion des operierten Gelenks erreicht werden.

In operativer Hinsicht und auch die Rahmenbedingungen betreffend birgt die Transplantatfixierung weiterhin Verbesserungspotential für eine näher an der originären Verankerung orientierten Stabilität und für ein natürlicheres biomechanisches Verhalten. Um das wesentliche operative Ziel einer suffizienten und anatomiegerechten primären Transplantatfixierung erreichen zu können, stellt die korrekte Tunnelpositionierung eine unerlässliche Grundvoraussetzung dar. Dieser anspruchsvolle Operationsschritt kann mit der Integration eines computerassistierten Navigationssystems (z. B. OrthoPilot®, Aesculap AG) anscheinend besser visualisiert, präziser durchgeführt und im Ergebnis optimiert werden. Für minderjährige Patienten und andere Patienten mit anatomischen Besonderheiten treffen diese Erwartungen umso mehr zu⁶⁸. Die Verwendung von bioaktiven Substanzen soll dagegen eine Verbesserung der Transplantateinheilung im

Bohrkanal bewirken und adressiert die Rahmenbedingungen des sogenannten Transplantat-Remodelings. Dieser Umbauprozess repräsentiert die vulnerable Phase der ossären Integration des Ligaments im Bohrkanal. In diesem Zusammenhang wurden Therapiekonzepte zur biologischen Stimulation des Heilungsprozesses durch Wachstumsfaktoren beschrieben¹⁴⁵. Es konnte bereits *in vitro* und im Tierexperiment gezeigt werden, dass durch einen Gentransfer bzw. eine den Heilungsprozess positiv beeinflussende, regulatorische Genexpression mit Aktivierung oder Hemmung spezifischer intrinsischer, posttraumatischer Vorgänge im Kniegelenk, sowohl eine Verbesserung der lokalen Ausgangssituation für die initiale Transplantateinheilung als auch eine Verbesserung der strukturellen und funktionellen Transplantateigenschaften erreicht werden können. Beispielsweise wird durch einen Gentransfer in die Fibroblasten hinein versucht, eine intrazelluläre Modulation der Expression von Wachstumsfaktoren zu bewirken^{145,146}. Gemeinsam mit der Entwicklung resorbierbarer, gewebeinduzierender und zellbeimpfter Biomaterialien als Grundgerüst des Neoligaments, lassen sich diese therapeutischen Forschungsansätze unter dem Sammelbegriff des sogenannten Tissue Engineerings zusammenfassen¹⁴⁶.

Die aufgezeigten Weiterentwicklungen könnten die Möglichkeit für eine dem autogenen Transplantat entsprechende ossäre Integration des allogenen Transplantats eröffnen. Fortschritte in der Sehnenaufbereitung vorausgesetzt, wäre dann ein klinisch relevanter Einsatz allogener Ligamente denkbar. Postoperative Morbidität und Rekonvaleszenzzeit könnten gegenüber der Verwendung von autogenen Ligamenten reduziert werden. Auch alternative operative Verfahren, wie das Prinzip des Healing-Response und das Ligamys-System, nutzen die intrinsischen Vorgänge im Kniegelenk während der posttraumatischen Phase. Diese Konzepte finden allerdings nur bei bestimmten Rupturformen (femorale Ausriss / Avulsion, partielle Ruptur) und zeitig nach dem Kreuzbandtrauma Anwendung. Sie wollen die verbliebenen Reste des verletzten VKB mit dem Ziel seiner Regeneration erhalten, statt es durch eine Plastik zu ersetzen. In der Theorie vielversprechend, ist ein nachhaltiger und den etablierten Techniken überlegener Erfolg dieser Verfahren aktuell jedoch noch nicht belegt. Schließlich hält die Nachbehandlung des operierten Kniegelenks ein nicht ausreichend ausgeschöpftes Verbesserungspotential bereit. Unter vielen Fachkollegen besteht der Konsens, dass der Erfolg einer Kreuzbandoperation zu einem erheblichen Teil von einer adäquaten physiotherapeutischen Nachbehandlung abhängt.

5 Zusammenfassung

Eine Verletzung des vorderen Kreuzbandes kann die Kniegelenksfunktion erheblich beeinträchtigen und bei dem Patienten sekundär zu degenerativen Veränderungen führen. Die Indikation zur operativen Versorgung des Bandes wird daher breit gestellt. In den meisten Fällen ist nur durch eine Kreuzbandrekonstruktion die Chance gegeben, dem Anspruch des Patienten auf ein Wiedererlangen der gewohnten aktiven Teilnahme am gesellschaftlichen Leben, gerecht zu werden. Das Ziel einer Rekonstruktion, die physiologischen Gegebenheiten des VKB in optimaler Weise nachzubilden, unterliegt allerdings diversen Variablen. Die Verankerung des Transplantats, speziell diejenige eines reinen Sehnen transplantats besitzt dabei eine Schlüsselstellung, welche einen großen Einfluss auf den Erfolg und den Misserfolg der gesamten Behandlung erlangt. Interferenzschrauben sind die am häufigsten eingesetzten Fixierungsinstrumente zur Verankerung von Sehnen transplantaten. Für die Transplantatverankerung von rein weichgewebigen Sehnen mit Interferenzschrauben wurden jedoch Limitationen und geschlechterspezifische Unterschiede in der postoperativen Kniestabilität berichtet.

Die Hybridverankerung mit einer biodegradierbaren Interferenzschraube und der EndoPearl ermöglicht eine zuverlässige Fixierung von Beugesehnen transplantaten. Experimentelle Untersuchungen konnten für diese Kombination eine hervorragende primäre Verankerungsstärke belegen. Die vorliegende Untersuchung demonstriert nun auch anhand klinischer Ergebnisse die signifikante Überlegenheit der femoralen Hybridverankerung einer Semitendinosussehne mit der EndoPearl gegenüber der solitären Interferenzschraubenverankerung. Von 623 Patienten, die zwischen September 1997 und Juli 2004 am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité einen primären vorderen Kreuzbandersatz mit einem Beugesehnen transplantat erhielten, wurden nach dem Matched-Pair-Prinzip 85 Patientenpaare gebildet und in die Studie eingeschlossen. Die Patienten eines jeden Paares unterschieden sich nur in der femoralen Transplantatverankerung, bestehend aus einer solitären biodegradierbaren Interferenzschraubenverankerung in der Kontrollgruppe und einer biodegradierbaren Hybridverankerung mit Interferenzschraube und EndoPearl in der Interventionsgruppe. Die tibiale Verankerung erfolgte immer mittels biodegradierbarer Interferenzschraube und Sicherungsfixierung des armierenden Fadenmaterials über eine Knochenbrücke.

Nach einem Nachuntersuchungszeitraum von mindestens zwei Jahren zeigten die Patienten der EndoPearl-Gruppe signifikant bessere Ergebnisse bei allen manuellen und instrumentellen Messungen der Kniegelenkstabilität. Auch im IKDC-Score, dem Standard-Evaluationsblatt der internationalen Kniegelenkchirurgie, erreichten die EndoPearl-Patienten postoperativ signifikant bessere Gesamtbewertungen. Die über den Lysholm-Score erfasste subjektive Kniefunktion war dagegen weder zwischen den beiden Untersuchungsgruppen noch zwischen den Geschlechter-Subgruppen einer jeden Gruppe signifikant unterschiedlich. Diese Abweichung deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen anderer Autoren, die eine unterschiedliche Bewertung der klinischen und subjektiven Gelenkstabilität nach einem vorderen Kreuzbandersatz berichteten. Ein ebenfalls vorbeschriebener geschlechterspezifischer Unterschied bei der objektiven Kniestabilität zugunsten der männlichen Patienten konnte auch in der vorliegenden Arbeit tendenziell in beiden Untersuchungsgruppen belegt werden. Den vorangegangenen Publikationen entgegen, erreichte dieser Unterschied insgesamt aber kein Signifikanzniveau.

Hinsichtlich der wissenschaftlichen Fragestellung wurde mit den hier vorliegenden Ergebnissen nachgewiesen, dass beim vorderen Kreuzbandersatz durch die femorale Hybridverankerung der Semitendinosussehne mit einer Interferenzschraube und der EndoPearl gegenüber der solitären Interferenzschraubenverankerung eine signifikant bessere objektive Kniestabilität erreicht wird. Geschlechterspezifische Unterschiede der Kniegelenkstabilität können darüber hinaus vermindert werden. Der Gewinn an initialer Stabilität des Gesamtkonstrukts hat entscheidenden Einfluss auf die Nachbehandlung und das Langzeitüberleben der vorderen Kreuzbandrekonstruktion. Die EndoPearl gibt dem Operateur ein einfaches Instrument an die Hand, das in Kombination mit einer Interferenzschraube sowohl den biomechanischen Anforderungen einer anatomischen und physikalisch frühzeitig belastbaren Transplantatverankerung entspricht als auch dem Patientenanspruch nach einer uneingeschränkten und früh-postoperativ stabilen Kniegelenksfunktion gerecht wird.

6 Literaturverzeichnis

1. Rupp S, Kohn D. The anterior cruciate ligament as focus of interest. *Orthopäde* 2002;31:701.
2. Duthon VB, Barea C, Abrassart S, Fasel JH, Fritschy D, Menetrey J. Anatomy of the anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14:204-213.
3. Fink C, Hoser C, Benedetto KP, Hackl W, Gabl M. Long-term outcome of conservative or surgical therapy of anterior cruciate ligament rupture. *Unfallchirurg* 1996;99:964-969.
4. Gillquist J, Messner K. Anterior cruciate ligament reconstruction and the long-term incidence of gonarthrosis. *Sports Med* 1999;27:143-156.
5. Kannus P, Jarvinen M. Conservatively treated tears of the anterior cruciate ligament. Long-term results. *J Bone Joint Surg Am* 1987;69:1007-1012.
6. Beynon BD, Johnson RJ, Abate JA, Fleming BC, Nichols CE. Treatment of anterior cruciate ligament injuries, part 1. *Am J Sports Med* 2005;33:1579-1602.
7. Roos H, Adalberth T, Dahlberg L, Lohmander LS. Osteoarthritis of the knee after injury to the anterior cruciate ligament or meniscus: the influence of time and age. *Osteoarthritis Cartilage* 1995;3:261-267.
8. Jomha NM, Borton DC, Clingeleffer AJ, Pinczewski LA. Long-term osteoarthritic changes in anterior cruciate ligament reconstructed knees. *Clin Orthop Relat Res* 1999;188-193.
9. Murrell GA, Maddali S, Horovitz L, Oakley SP, Warren RF. The effects of time course after anterior cruciate ligament injury in correlation with meniscal and cartilage loss. *Am J Sports Med* 2001;29:9-14.
10. Freedman KB, D'Amato MJ, Nedeff DD, Kaz A, Bach BR. Arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction: a metaanalysis comparing patellar tendon and hamstring tendon autografts. *Am J Sports Med* 2003;31:2-11.
11. Yunes M, Richmond JC, Engels EA, Pinczewski LA. Patellar versus hamstring tendons in anterior cruciate ligament reconstruction: A meta-analysis. *Arthroscopy* 2001;17:248-257.
12. Corry IS, Webb JM, Clingeleffer AJ, Pinczewski LA. Arthroscopic reconstruction of the anterior cruciate ligament. A comparison of patellar tendon autograft and four-strand hamstring tendon autograft. *Am J Sports Med* 1999;27:444-454.
13. Mather RC, Koenig L, Kocher MS, Dall TM, Gallo P, Scott DJ, Bach BR, Spindler KP. Societal and economic impact of anterior cruciate ligament tears. *J Bone Joint Surg Am* 2013;95:1751-1759.
14. Weiler A, Scheffler SU, Höher J. Transplant selection for primary replacement of the anterior cruciate ligament. *Orthopäde* 2002;31:731-740.
15. Weiler A, Scheffler SU, Südkamp NP. Current aspects of anchoring hamstring tendon transplants in cruciate ligament surgery. *Chirurg* 2000;71:1034-1044.

16. Wagner M, Scheffler SU, Weiler A. Vorderer Kreuzbandersatz: Verankerung des Transplantates. *Arthroskopie* 2005;18:27-35.
17. Brand JC Jr., Weiler A, Caborn DN, Brown CH Jr., Johnson DL. Graft fixation in cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2000;28:761-774.
18. Wagner M, Kaab MJ, Schallock J, Haas NP, Weiler A. Hamstring tendon versus patellar tendon anterior cruciate ligament reconstruction using biodegradable interference fit fixation: a prospective matched-group analysis. *Am J Sports Med* 2005;33:1327-1336.
19. Wagner M, Weiler A. Hamstring tendon interference screws fixation. In: Prodromos C, ed. *The anterior cruciate ligament - Reconstruction and Basic Science*. Philadelphia: Elsevier Science, 2007:284-298.
20. Fu FH, Bennett CH, Lattermann C, Ma CB. Current trends in anterior cruciate ligament reconstruction. Part 1: Biology and biomechanics of reconstruction. *Am J Sports Med* 1999;27:821-830.
21. Eriksson K, Anderberg P, Hamberg P, Olerud P, Wredmark T. There are differences in early morbidity after ACL reconstruction when comparing patellar tendon and semitendinosus tendon graft. A prospective randomized study of 107 patients. *Scand J Med Sci Sports* 2001;11:170-177.
22. Rosenberg TD, Deffner KT. ACL reconstruction: semitendinosus tendon is the graft of choice. *Orthopedics* 1997;20:396, 398.
23. Hamner DL, Brown CH Jr., Steiner ME, Hecker AT, Hayes WC. 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* 1999;81:549-557.
24. Woo SL, Wu C, Dede O, Vercillo F, Noorani S. Biomechanics and anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Surg Res* 2006;1:2.:2.
25. Pinczewski LA, Deehan DJ, Salmon LJ, Russell VJ, Clingeleffer AJ. A five-year comparison of patellar tendon versus four-strand hamstring tendon autograft for arthroscopic reconstruction of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 2002;30:523-536.
26. Thompson SM, Salmon LJ, Waller A, Linklater J, Roe JP, Pinczewski LA. Twenty-Year Outcome of a Longitudinal Prospective Evaluation of Isolated Endoscopic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Patellar Tendon or Hamstring Autograft. *Am J Sports Med* 2016;44:3083-3094.
27. Zantop T, Kubo S, Petersen W, Musahl V, Fu FH. Current techniques in anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2007;23:938-947.
28. Barber FA, Spruill B, Sheluga M. The effect of outlet fixation on tunnel widening. *Arthroscopy* 2003;19:485-492.
29. Hoher J, Livesay GA, Ma CB, Withrow JD, Fu FH, Woo SL. Hamstring graft motion in the femoral bone tunnel when using titanium button/polyester tape fixation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1999;7:215-219.
30. Boszotta H. Probleme bei vorderer Kreuzbandplastik Bungee-Effekt, Tunnelerweiterung, Impingement. *Arthroskopie* 2005;18:36-40.

31. Scheffler SU, Südkamp NP, Gockenjan A, Hoffmann RF, Weiler A. Biomechanical comparison of hamstring and patellar tendon graft anterior cruciate ligament reconstruction techniques: The impact of fixation level and fixation method under cyclic loading. *Arthroscopy* 2002;18:304-315.
32. Miyasaka KC, Daniel DM, Stone ML, Hirshman P. The incidence of knee ligament injuries in the general population. *Am J Knee Surg* 1991;4:43-48.
33. Eberhardt C, Jager A, Schwetlick G, Rauschmann MA. History of surgery of the anterior cruciate ligament. *Orthopäde* 2002;31:702-709.
34. Kohn D. *Orthopädie und Orthopädische Chirurgie. Knie.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2005.
35. Südkamp NP, Weiler A. *Ligamentäre Kniegelenksverletzungen und Meniskusverletzungen.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1999:466-489.
36. Ruesegger M, Jakob RP. Diagnosis of acute and chronic injuries of the knee joint. *Orthopäde* 1993;22:343-350.
37. Smith BA, Livesay GA, Woo SL. Biology and biomechanics of the anterior cruciate ligament. *Clin Sports Med* 1993;12:637-670.
38. Arendt EA. Musculoskeletal injuries of the knee: are females at greater risk? *Minn Med* 2007;90:38-40.
39. Harmon KG, Ireland ML. Gender differences in noncontact anterior cruciate ligament injuries. *Clin Sports Med* 2000;19:287-302.
40. Arendt EA, Dick R. Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature. *Am J Sports Med* 1995;23:694-701.
41. Beynon BD, Bernstein IM, Belisle A, Brattbakk B, Devanny P, Risinger R, Durant D. The effect of estradiol and progesterone on knee and ankle joint laxity. *Am J Sports Med* 2005;33:1298-1304.
42. Wojtys EM, Huston LJ, Lindenfeld TN, Hewett TE, Greenfield ML. Association between the menstrual cycle and anterior cruciate ligament injuries in female athletes. *Am J Sports Med* 1998;26:614-619.
43. Strobel MJ, Stedtfeld HW, Eichhorn HJ. *Diagnostik des Kniegelenkes.* Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1995.
44. Wilcke A. *Vordere Kreuzbandläsion: Anatomie, Pathophysiologie, Diagnose, Therapie, Trainingslehre, Rehabilitation.* Darmstadt: Steinkopff Verlag, 2004.
45. de Loes M, Dahlstedt L, Thomee R. A 7-year study on risks and costs of knee injuries in male and female youth participants in 12 sports. *Scand J Med Sci Sports* 2000;10:90-97.
46. Noyes FR, Mooar PA, Matthews DS, Butler DL. The symptomatic anterior cruciate-deficient knee. Part I: the long-term functional disability in athletically active individuals. *J Bone Joint Surg Am* 1983;65:154-162.
47. Robson AW. VI. Ruptured Crucial Ligaments and their Repair by Operation. *Ann Surg* 1903;37:716-718.
48. Pässler HH. *Geschichte der vorderen Kreuzbandchirurgie: Alte und neue Fakten.* *Arthroskopie* 1997;10:222-228.

49. Hesse E. Über den Ersatz der Kreuzbänder des Kniegelenks durch freie Fascientransplantation. *Verh Dtsch Ges Chir* 1914;43:188-189.
50. Burger C, Prokop A, Andermahr J, Jubel A, Rehm KE. 100 Jahre Kreuzbandchirurgie: Die Beantwortung der wichtigsten Fragen in der Literatur der 90er Jahre. *Akt Traumatol* 2000;30:73-87.
51. Jones KG. Reconstruction of the anterior cruciate ligament. A technique using the central one-third of the patellar ligament. *J Bone Joint Surg Am* 1963;45:925-932.
52. Brückner H. Eine neue Methode der Kreuzbandplastik. *Chirurg* 1966;37:413-414.
53. Aune AK, Holm I, Risberg MA, Jensen HK, Steen H. Four-strand hamstring tendon autograft compared with patellar tendon-bone autograft for anterior cruciate ligament reconstruction. A randomized study with two-year follow-up. *Am J Sports Med* 2001;29:722-728.
54. Benedetto KP. Der Gold-Standard beim Kreuzbandersatz. *Chirurg* 1995;66:1061-1070.
55. Eriksson K, Anderberg P, Hamberg P, Lofgren AC, Bredenberg M, Westman I, Wredmark T. A comparison of quadruple semitendinosus and patellar tendon grafts in reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br* 2001;83:348-354.
56. Shelbourne KD, Wilckens JH. Current concepts in anterior cruciate ligament rehabilitation. *Orthop Rev* 1990;19:957-964.
57. Dahlstedt L, Dalen N, Jonsson U. Goretex prosthetic ligament vs. Kennedy ligament augmentation device in anterior cruciate ligament reconstruction. A prospective randomized 3-year follow-up of 41 cases. *Acta Orthop Scand* 1990;61:217-224.
58. Kennedy JC, Willis RB. Synthetic cruciate ligaments: preliminary report. *J Bone Jt Surg* 1976;58-B:142.
59. Wilk RM, Richmond JC. Dacron ligament reconstruction for chronic anterior cruciate ligament insufficiency. *Am J Sports Med* 1993;21:374-379.
60. Bircher E. Ueber Binnenverletzungen des Kniegelenkes. *Arch Klin Chir* 1933;177:290-359.
61. Micheli E. Riconstruzione dei legamenti crociati del ginocchio con tendine di canguro. Risolto a distanza. *Boll Soc Piemont Chir* 1933;3:874-883.
62. Levitt RL, Malinin T, Posada A, Michalow A. Reconstruction of anterior cruciate ligaments with bone-patellar tendon-bone and achilles tendon allografts. *Clin Orthop Relat Res* 1994;67-78.
63. Shino K, Kimura T, Hirose H, Inoue M, Ono K. Reconstruction of the anterior cruciate ligament by allogeneic tendon graft. An operation for chronic ligamentous insufficiency. *J Bone Joint Surg Br* 1986;68:739-746.
64. Jensen K, Klein W. Probleme und Komplikationen beim künstlichen Kreuzbandersatz. *Arthroskopie* 1990;3:15-23.

65. Saddemi SR, Frogameni AD, Fenton PJ, Hartman J, Hartman W. Comparison of perioperative morbidity of anterior cruciate ligament autografts versus allografts. *Arthroscopy* 1993;9:519-524.
66. Shelton WR, Papendick L, Dukes AD. Autograft versus allograft anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 1997;13:446-449.
67. Smith CW, Young IS, Kearney JN. Mechanical properties of tendons: changes with sterilization and preservation. *J Biomech Eng* 1996;118:56-61.
68. Angele P, Eichhorn HJ. Präzisierung der vorderen Kreuzbandrekonstruktion - Navigation und exzentrische Dilatatoren. *Arthroskopie* 2013;26:52-60.
69. Putz R, Pabst R. Untere Extremität. In: Sobotta, ed. *Atlas der Anatomie des Menschen*. Band 2, 21. Auflage. München: Urban & Fischer Verlag, 2000.
70. Menschik A. Mechanik des Kniegelenks, Teil 1. *Z Orthop* 1974;112:481-495.
71. Wirth CJ, Artmann M. Verhalten der Roll-Gleitbewegung des belasteten Kniegelenkes bei Verlust und Ersatz des vorderen Kreuzbandes. *Arch Orthop Unfallchir* 1974;78:356-361.
72. Fuss FK. Anatomy of the cruciate ligaments and their function in extension and flexion of the human knee joint. *Am J Anat* 1989;184:165-176.
73. Morgan CD, Kalmam VR, Grawl DM. Isometry testing for anterior cruciate ligament reconstruction revisited. *Arthroscopy* 1995;11:647-659.
74. Fu FH, Harner CD, Johnson DL, Miller MD, Woo SL. Biomechanics of knee ligaments: basic concepts and clinical application. *Instr Course Lect* 1994;43:137-48.:137-148.
75. Petersen W, Tillmann B. Anatomy and function of the anterior cruciate ligament. *Orthopäde* 2002;31:710-718.
76. Petersen W, Tillmann B. Die Insertionszone des vorderen Kreuzbandes. *Ann Anat* 1995;178:265.
77. Arnoczky SP, Rubin RM, Marshall JL. Microvasculature of the cruciate ligaments and its response to injury. An experimental study in dogs. *J Bone Joint Surg Am* 1979;61:1221-1229.
78. Petersen W, Hansen U. Blood supply of the anterior cruciate ligament. An immunohistochemical study in human cadavers. *J Orthop Sci* 1996;5:332-334.
79. Kennedy JC, Alexander IJ, Hayes KC. Nerve supply of the human knee and its functional importance. *Am J Sports Med* 1982;10:329-335.
80. Johansson H, Sjolander P, Sojka P. A sensory role for the cruciate ligaments. *Clin Orthop Relat Res* 1991;161-178.
81. Raunest J, Sager M, Burgener E. Proprioception of the cruciate ligaments: receptor mapping in an animal model. *Arch Orthop Trauma Surg* 1998;118:159-163.
82. Grüber J, Wolter D, Lierse W. Anterior cruciate ligament reflex (LCA reflex). *Unfallchirurg* 1986;89:551-554.

83. Ochi M, Iwasa J, Uchio Y, Adachi N, Kawasaki K. Induction of somatosensory evoked potentials by mechanical stimulation in reconstructed anterior cruciate ligaments. *J Bone Joint Surg Br* 2002;84:761-766.
84. Jagodzinski M, Friederich N, Müller W. *Das Knie*. 2016:1-14.
85. Müller W. *Das Knie. Form, Funktion und ligamentäre Wiederherstellungschirurgie*. Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer, 1982.
86. Fukubayashi T, Torzilli PA, Sherman MF, Warren RF. An in vitro biomechanical evaluation of anterior-posterior motion of the knee. Tibial displacement, rotation, and torque. *J Bone Joint Surg Am* 1982;64:258-264.
87. Hollis JM, Takai S, Adams DJ, Horibe S, Woo SL. The effects of knee motion and external loading on the length of the anterior cruciate ligament (ACL): a kinematic study. *J Biomech Eng* 1991;113:208-214.
88. Petersen W, Zantop T. Anatomy of the anterior cruciate ligament with regard to its two bundles. *Clin Orthop Relat Res* 2007;454:35-47.:35-47.
89. Friedrich NF, O'Brien WR. Zur funktionellen Anatomie der Kreuzbänder. In: Jakob RP, Stäubli HU, eds. *Kniegelenk und Kreuzbänder. Anatomie, Biomechanik, Klinik, Rekonstruktion, Komplikationen, Rehabilitation*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1990.
90. Hefti F, Müller W, Jakob RP, Stäubli HU. Evaluation of knee ligament injuries with the IKDC form. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1993;1:226-234.
91. Kohn D, Schneider G, Dienst M, Rupp S. Diagnosis of rupture of the anterior cruciate ligament. *Orthopäde* 2002;31:719-730.
92. Strobel MJ. *Arthroskopische Chirurgie*. Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer Verlag, 1998.
93. Rupp S, Seil R, Kohn D. Meniskusläsion. *Orthopäde* 2002;31:812-828.
94. Zantop T, Petersen W. Die Nicht-Kontakt-Verletzung des vorderen Kreuzbandes: Epidemiologie, Unfallmechanismen und Prävention. *Orthopädische Praxis* 2004;40:16-23.
95. Woo SL, Hollis JM, Adams DJ, Lyon RM, Takai S. Tensile properties of the human femur-anterior cruciate ligament-tibia complex. The effects of specimen age and orientation. *Am J Sports Med* 1991;19:217-225.
96. Fink C, Hoser C, Benedetto KP. Development of arthrosis after rupture of the anterior cruciate ligament. A comparison of surgical and conservative therapy. *Unfallchirurg* 1994;97:357-361.
97. Malanga GA, Andrus S, Nadler SF, McLean J. Physical examination of the knee: a review of the original test description and scientific validity of common orthopedic tests. *Arch Phys Med Rehabil* 2003;84:592-603.
98. Kwasny O, Sebök C, Müllner T, Krestan C, Trattng S. Drehtrauma des Kniegelenks. *Trauma Berufskrankh* 2000;2:370-375.
99. Elliott MJ, Kurtz CA. Peripheral versus aperture fixation for anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Sports Med* 2007;26:683-693.

100. Daniel DM, Stone ML, Dobson BE, Fithian DC, Rossman DJ, Kaufman KR. Fate of the ACL-injured patient. A prospective outcome study. *Am J Sports Med* 1994;22:632-644.
101. Meuffels DE, Favejee MM, Vissers MM, Heijboer MP, Reijman M, Verhaar JA. Ten year follow-up study comparing conservative versus operative treatment of anterior cruciate ligament ruptures. A matched-pair analysis of high level athletes. *Br J Sports Med* 2009;43:347-351.
102. Fink C, Hoser C, Hackl W, Navarro RA, Benedetto KP. Long-term outcome of operative or nonoperative treatment of anterior cruciate ligament rupture--is sports activity a determining variable? *Int J Sports Med* 2001;22:304-309.
103. Stäubli HU, Jakob RP. Natürlicher Verlauf der unbehandelten Ruptur des vorderen Kreuzbandes. In: Jakob RP, Stäubli HU, eds. *Kniegelenk und Kreuzbänder: Anatomie, Biomechanik, Klinik, Rekonstruktion, Komplikationen, Rehabilitation*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1990:243-251.
104. Charlton WP, Randolph DA Jr., Lemos S, Shields CL Jr. Clinical outcome of anterior cruciate ligament reconstruction with quadrupled hamstring tendon graft and bioabsorbable interference screw fixation. *Am J Sports Med* 2003;31:518-521.
105. Fithian DC, Paxton LW, Goltz DH. Fate of the anterior cruciate ligament-injured knee. *Orthop Clin North Am* 2002;33:621-36, v.
106. Buss DD, Min R, Skyhar M, Galinat B, Warren RF, Wickiewicz TL. Nonoperative treatment of acute anterior cruciate ligament injuries in a selected group of patients. *Am J Sports Med* 1995;23:160-165.
107. Ciccotti MG, Lombardo SJ, Nonweiler B, Pink M. Non-operative treatment of ruptures of the anterior cruciate ligament in middle-aged patients. Results after long-term follow-up. *J Bone Joint Surg Am* 1994;76:1315-1321.
108. Andersson C, Odensten M, Gillquist J. Knee function after surgical or nonsurgical treatment of acute rupture of the anterior cruciate ligament: a randomized study with a long-term follow-up period. *Clin Orthop Relat Res* 1991;255-263.
109. Laxdal G, Kartus J, Ejerhed L, Sernert N, Magnusson L, Faxen E, Karlsson J. Outcome and risk factors after anterior cruciate ligament reconstruction: a follow-up study of 948 patients. *Arthroscopy* 2005;21:958-964.
110. Stähelin AC, Weiler A. All-inside anterior cruciate ligament reconstruction using semitendinosus tendon and soft threaded biodegradable interference screw fixation. *Arthroscopy* 1997;13:773-779.
111. Wagner M, Kittl C, Weiler A. Anterolaterale Stabilisierung: Operationstechnik. *Arthroskopie* 2017;30:44-48.
112. Eriksson K, Kindblom LG, Hamberg P, Larsson H, Wredmark T. The semitendinosus tendon regenerates after resection: a morphologic and MRI analysis in 6 patients after resection for anterior cruciate ligament reconstruction. *Acta Orthop Scand* 2001;72:379-384.
113. Weiler A, Hoffmann RF, Bail HJ, Rehm O, Südkamp NP. Tendon healing in a bone tunnel. Part II: Histologic analysis after biodegradable interference fit fixation in a model of anterior cruciate ligament reconstruction in sheep. *Arthroscopy* 2002;18:124-135.

114. Shelbourne KD, Klotz C. What I have learned about the ACL: utilizing a progressive rehabilitation scheme to achieve total knee symmetry after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sci* 2006;11:318-325.
115. Weiler A, Peine R, Pashmineh-Azar A, Abel C, Südkamp NP, Hoffmann RF. Tendon healing in a bone tunnel. Part I: Biomechanical results after biodegradable interference fit fixation in a model of anterior cruciate ligament reconstruction in sheep. *Arthroscopy* 2002;18:113-123.
116. Colvin A, Sharma C, Parides M, Glashow J. What is the best femoral fixation of hamstring autografts in anterior cruciate ligament reconstruction?: a meta-analysis. *Clin Orthop Relat Res* 2011;469:1075-1081.
117. Scheffler SU, Petersen W, Weiler A. Fixation von Kreuzbandtransplantaten. *Arthroskopie* 2007;20:105-114.
118. Wagner M, Scheffler SU, Weiler A. Revisionsersatz des vorderen Kreuzbandes. *Arthroskopie* 2007;20:139-149.
119. Kurosaka M, Yoshiya S, Andrish JT. A biomechanical comparison of different surgical techniques of graft fixation in anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 1987;15:225-229.
120. Weiler A, Windhagen HJ, Raschke MJ, Laumeyer A, Hoffmann RF. Biodegradable interference screw fixation exhibits pull-out force and stiffness similar to titanium screws. *Am J Sports Med* 1998;26:119-126.
121. Barber FA, Elrod BF, McGuire DA, Paulos LE. Preliminary results of an absorbable interference screw. *Arthroscopy* 1995;11:537-548.
122. Benedetto KP, Fellingner M, Lim TE, Passler JM, Schoen JL, Willems WJ. A new bioabsorbable interference screw: preliminary results of a prospective, multicenter, randomized clinical trial. *Arthroscopy* 2000;16:41-48.
123. Zantop T, Weimann A, Schmidtko R, Herbort M, Raschke MJ, Petersen W. Graft laceration and pullout strength of soft-tissue anterior cruciate ligament reconstruction: in vitro study comparing titanium, poly-d,l-lactide, and poly-d,l-lactide-tricalcium phosphate screws. *Arthroscopy* 2006;22:1204-1210.
124. Arneja S, Froese W, MacDonald P. Augmentation of femoral fixation in hamstring anterior cruciate ligament reconstruction with a bioabsorbable bead: a prospective single-blind randomized clinical trial. *Am J Sports Med* 2004;32:159-163.
125. Kocabey Y, Nawab A, Caborn DN, Nyland J. Endopearl augmentation of bioabsorbable interference screw fixation of a soft tissue tendon graft in a tibial tunnel. *Arthroscopy* 2004;20:658-661.
126. Nagarkatti DG, McKeon BP, Donahue BS, Fulkerson JP. Mechanical evaluation of a soft tissue interference screw in free tendon anterior cruciate ligament graft fixation. *Am J Sports Med* 2001;29:67-71.
127. Weiler A, Richter M, Schmidmaier G, Kandziora F, Südkamp NP. The EndoPearl device increases fixation strength and eliminates construct slippage of hamstring tendon grafts with interference screw fixation. *Arthroscopy* 2001;17:353-359.

128. Weimann A, Zantop T, Herbolt M, Strobel MJ, Petersen W. Initial fixation strength of a hybrid technique for femoral ACL graft fixation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14:1122-1129.
129. Bach BR. Revision anterior cruciate ligament surgery. *Arthroscopy* 2003;19 Suppl 1:14-29.:14-29.
130. Weiler A, Schmeling A, Stöhr I, Kaab MJ, Wagner M. Primary versus single-stage revision anterior cruciate ligament reconstruction using autologous hamstring tendon grafts: a prospective matched-group analysis. *Am J Sports Med* 2007;35:1643-1652.
131. Bosch U. Arthrofibrosis. *Orthopäde* 2002;31:785-790.
132. Noojin FK, Barrett GR, Hartzog CW, Nash CR. Clinical comparison of intraarticular anterior cruciate ligament reconstruction using autogenous semitendinosus and gracilis tendons in men versus women. *Am J Sports Med* 2000;28:783-789.
133. Salmon LJ, Refshauge KM, Russell VJ, Roe JP, Linklater J, Pinczewski LA. Gender differences in outcome after anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring tendon autograft. *Am J Sports Med* 2006;34:621-629.
134. Hill PF, Russell VJ, Salmon LJ, Pinczewski LA. The influence of supplementary tibial fixation on laxity measurements after anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring tendons in female patients. *Am J Sports Med* 2005;33:94-101.
135. Wagner M, Holtz A, Weiler A. Femorale Hybridverankerung versus solitäre Interferenzschraubenverankerung bei der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes. Eine prospektive Matched-Group-Analyse. 25. AGA-Kongress. Interlaken: 2008.
136. Scott WN. Diagnosis and Treatment. In: *Ligament and Extensor Mechanism Injuries of the Knee*, ed. Mosby-Year Book. St. Louis: 1991:94-95.
137. Daniel DM, Stone ML, Sachs R, Malcom L. Instrumented measurement of anterior knee laxity in patients with acute anterior cruciate ligament disruption. *Am J Sports Med* 1985;13:401-407.
138. Lysholm J, Gillquist J. Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale. *Am J Sports Med* 1982;10:150-154.
139. Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res* 1985;43-49.
140. Brand JC Jr., Pienkowski D, Steenlage E, Hamilton D, Johnson DL, Caborn DN. Interference screw fixation strength of a quadrupled hamstring tendon graft is directly related to bone mineral density and insertion torque. *Am J Sports Med* 2000;28:705-710.
141. Cheung P, Chan WL, Yen CH, Cheng SC, Woo SB, Wong TK, Wong WC. Femoral tunnel widening after quadrupled hamstring anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Surg (Hong Kong)* 2010;18:198-202.
142. Harding N, Barber FA, Herbert MA. The effect of the EndoPearl on soft-tissue graft fixation. *J Knee Surg* 2002;15:150-154.

143. Shen PH, Lien SB, Shen HC, Wang CC, Huang GS, Chao KH, Lee CH, Lin LC. Comparison of different sizes of bioabsorbable interference screws for anterior cruciate ligament reconstruction using bioabsorbable bead augmentation in a porcine model. *Arthroscopy* 2009;25:1101-1107.
144. Stalder M, Farshad M, Snedeker JG, Meyer DC. Interference screws should be shorter than the hamstring tendon graft in the bone tunnel for best fixation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2013;21:584-588.
145. Dallo I, Chahla J, Mitchell JJ, Pascual-Garrido C, Feagin JA, LaPrade RF. Biologic Approaches for the Treatment of Partial Tears of the Anterior Cruciate Ligament: A Current Concepts Review. *Orthop J Sports Med* 2017;5:2325967116681724.
146. Leong NL, Petrigliano FA, McAllister DR. Current tissue engineering strategies in anterior cruciate ligament reconstruction. *J Biomed Mater Res A* 2014;102:1614-1624.

Eidesstattliche Versicherung und Anteilserklärung

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, André Holtz, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: »Femorale Hybridverankerung mit der EndoPearl® bei der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes mit der Semitendinosussehne. Eine prospektive klinische Matched-Group-Analyse.« selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum, Unterschrift

Anteilsklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Herr André Holtz hatte folgenden Anteil an der Publikation:

Wagner M, Holtz A, Weiler A: Femorale Hybridverankerung versus solitäre Interferenzschraubenverankerung bei der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes. Eine prospektive Matched-Group-Analyse. 25. AGA-Kongress, Interlaken: 2008

Beitrag im Einzelnen:

Die obenstehende Posterpublikation basiert auf einer von Herrn André Holtz durchgeführten Erhebung und anschließenden statistischen Auswertung von klinischen und anamnestischen Befunden der Studienpatienten in der Kniesprechstunde des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité.

Datum, Unterschrift und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Datum, Unterschrift des Doktoranden

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Andreas Weiler danke ich für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas. Darüber hinaus gilt ihm und insbesondere Herrn Dr. med. Michael Wagner mein besonderer Dank für die konstruktive Auseinandersetzung mit dem Thema und die langjährige wissenschaftliche Betreuung der Arbeit.

Weiterhin möchte ich den ärztlichen und wissenschaftlichen Mitarbeitern in der Poliklinik und der Klinik des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité für ihre beständige Unterstützung herzlich danken. Allen voran gilt dieser Dank der Studienassistentin Frau Jessica Schallock.

Meine innige und größte Dankbarkeit gebührt meiner Familie, aber auch meinen Freunden und einigen Schutzengeln, ohne die mein bisheriger Weg und das Erreichen dieser Zeile nicht möglich gewesen wäre.

Danke