



## Fakultät für Medizin

### Abteilung und Poliklinik für Sportorthopädie

Dreidimensionale kernspintomographische Bestimmung der Ansatzpunkte der zwei funktionalen Bündel des vorderen Kreuzbandes nach arthroskopischer Doppelbündelrekonstruktion

Michal Aleksander Najfeld

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Univ. - Prof. Dr. E. J. Rummeny
Prüfer der Dissertation:	1. Priv. -Doz. Dr. St. G. F. Lorenz
	2. Univ. - Prof. Dr. A. Imhoff

Die Dissertation wurde am 30.10.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 15.04.2015 angenommen.

Aus der Abteilung und Poliklinik für Sportorthopädie am Klinikum rechts der Isar  
Technische Universität München  
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Andreas B. Imhoff

---

# Dreidimensionale kernspintomographische Bestimmung der Ansatzpunkte der zwei funktionalen Bündel des vorderen Kreuzbandes nach arthroskopischer Doppelbündelrekonstruktion

Dissertation  
Zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
An der medizinischen Fakultät der  
Technischen Universität München

Vorgelegt von  
Michal Aleksander NAJFELD  
aus Luxembourg  
2014

## Verzeichnis der Abkürzungen:

- VKB: vorderes Kreuzband
- HKB: hinteres Kreuzband
- ISS: Injury Surveillance System
- NCAA: National Collegiate Athletics Association
- AM: anteromediales Bündel
- PL: posterolaterales Bündel
- ap. : anterior posterior
- IKDC: internationales Knie Dokumentations-Komitee
- CT: Computertomographie
- MRT: Magnetresonanztomographie
- OP: Operation
- LARS: Ligament Augmentation & Reconstruction System
- max. : Maximum
- N. : Nervus
- K-Draht : Kirschner-Draht
- BPTB: Bone Patella Tendon Bone
- M. : musculus
- DESS: double echo steady state
- TR: Repetitionszeit
- TE: Echozeit
- FID: Free-Induction Decay
- FISP: Fast Imaging with steady precession
- TLC: Tool command language
- JPEG: Joint Photographic Experts Group
- SD: Standardabweichung

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>6</b>
1.1	EPIDEMIOLOGIE DER VKB RUPTUR.....	6
1.2	ANATOMIE DES VORDEREN KREUZBANDES .....	7
1.3	BIOMECHANIK DES KNIEGELENKES UND DES VORDEREN KREUZBANDES .....	10
1.4	DIAGNOSTIK.....	10
1.4.1	Anamnese .....	10
1.4.2	Inspektion .....	10
1.4.3	Klinische Untersuchung .....	11
1.4.4	Röntgen .....	13
1.4.5	Computertomographie.....	15
1.4.6	MRT Diagnostik.....	15
1.5	THERAPIEMÖGLICHKEITEN .....	16
1.5.1	Konservative Therapie .....	17
1.5.2	Operative Therapie .....	17
1.5.2.1	Transplantatwahl .....	19
1.5.2.2	Femorale Tunnelposition.....	22
1.5.2.3	Tibiale Tunnelposition.....	24
1.5.2.4	Einzelbündel Rekonstruktion .....	25
1.5.2.5	Doppelbündel Rekonstruktion .....	28
1.6	HYPOTHESEN.....	31
<b>2</b>	<b>MATERIAL UND METHODE.....</b>	<b>31</b>
2.1	PROBANDEN .....	31
2.1.1	Einschlusskriterien .....	32
2.1.2	Ausschlusskriterien .....	32
2.2	MAGNETRESONANZ-TOMOGRAPHIE.....	32
2.2.1	Untersuchungsgerät.....	32
2.2.2	Verwendete Untersuchungssequenzen .....	33
2.2.3	Durchführung der MRT Untersuchung .....	34
2.3	NACHBEARBEITUNG UND ANALYSE DER MRT-DATEN .....	34
2.3.1	Verwendete AMIRA Funktionen .....	35
2.3.2	Dezimalgitter.....	39
2.3.3	Auswertung .....	39
2.3.3.1	Axialer Schnitt der Tibia .....	39
2.3.3.2	Frontaler Schnitt der Tibia.....	41
2.3.3.3	Sagittaler Schnitt der Tibia .....	41
2.3.3.4	Sagittaler Schnitt des Femurs .....	42
2.3.3.5	Inklination des Daches der interkondylären Grube.....	45
2.4	STATISTISCHE AUSWERTUNG .....	45
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>46</b>
3.1	FEMORAL SAGITTAL .....	46
3.2	TIBIA SAGITTAL.....	50
3.3	TIBIA AXIAL .....	53
3.4	TIBIA FRONTAL/KORONAL .....	56
3.5	INKLINATION DES DACHES DER INTERKONDYLÄREN GRUBE.....	58
3.6	SIGNIFIKANZ .....	58
<b>4</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>59</b>

<b>5</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNG .....</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>66</b>
	<b>LITERATUR.....</b>	<b>67</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>74</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>77</b>
	<b>DANKSAGUNG.....</b>	<b>78</b>
	<b>LEBENS LAUF .....</b>	<b>79</b>

# **1 Einleitung**

Für die Verbesserung von kardiologischen Beschwerden und die Vorbeugung von chronischen Krankheiten empfiehlt das öffentliche Gesundheitssystem regelmäßige physische Aktivität (Pate 1995). Mit vermehrter sportlicher Aktivität erhöht sich aber auch das Risiko von Verletzungen des Bewegungsapparates. Durch seine Lage und Funktion ist das Kniegelenk sehr starken Kräften bei physischer Aktivität ausgesetzt. Daher ist das Kniegelenk mit 15-30% am häufigsten von Sportverletzungen betroffen (Pate 1995). Die Ruptur des vorderen Kreuzbandes (VKB) ist eine schmerzhafteste Verletzung die häufig eine Operation nach sich zieht und entsprechend für Ausfälle bei der Arbeit und im Sport verantwortlich ist (Prodromos 2007). Gianotti et al. beschreiben, dass 80% der Operationen am Bandapparat des Kniegelenkes am VKB vorgenommen werden und 65% der operierten VKB-Rupturen auf sportlicher Aktivität beruhen (Gianotti 2009). Die Rekonstruktion des VKBs stellt einen wesentlichen Bestandteil der orthopädischen Chirurgie dar (Brucker 2006).

## **1.1 Epidemiologie der VKB Ruptur**

Die jährliche Prävalenz der VKB-Ruptur in der Allgemeinbevölkerung wurde von Meuffels et al. auf 1:3500 geschätzt. Die Verletzung des VKBs resultiert häufig aus pivotierenden Bewegungen wie sie üblicherweise bei Fußball, American Football, Handball oder Basketball vorkommen (Meuffels und Verhaar 2008). Die Prävalenz der VKB-Ruptur der physisch aktiven Allgemeinbevölkerung ist bei Männern größer als bei Frauen, obwohl das Risiko eine VKB Verletzung zu erleiden bei Frauen 2,3 bis 9,7fach größer ist als bei Männern (Gianotti 2008; Hewett 2005). Diese Tatsache wird durch die Tatsache erklärt, dass Männer viel häufiger Sportarten ausüben, die zu einer VKB Ruptur führen können (Gianotti 2008). Das Injury Surveillance System (ISS) der National Collegiate Athletics Association (NCAA) in den USA ist eine Sammlung von Daten aus repräsentativen Colleges und Universitäten und liefert eine einzigartige Stichprobe über einen Zeitraum von 16 Jahren von 15 Sportarten zu einer Altersgruppe (typischerweise 18–23 Jahre). Insgesamt wurden ca. 5.000 VKB Verletzungen, entsprechend einem Durchschnitt von 313 Verletzungen pro Jahr gemeldet. Da die Stichprobe ca. 15% der Gesamtpopulation repräsentiert, entspricht dies einem Durchschnitt von mehr als 2.000 VKB-Verletzungen in diesen 15 Sportarten pro Jahr. Bezogen auf die Gesamtzahl der gemeldeten Verletzungen tritt im American Football die größte Anzahl an VKB-Verletzungen auf (Renstrom 2008). Die Inzidenz der VKB Ruptur steigt mit dem Niveau der Professionalität (Gabbett 2004).

Allein in den USA werden jährlich ungefähr 75 000- 100 000 VKBs rekonstruiert. Das VKB ist derzeit die am meisten untersuchte Struktur des Muskel- und Knochenapparates (Brown und Carson 1999; Harner 2001; Zantop 2008).

## 1.2 Anatomie des vorderen Kreuzbandes

Kenntnisse über die anatomische Lage des VKBs, seines Verlaufs und seiner Lagebeziehung gegenüber dem Dach der interkondylären Notch und dem tibialen Ansatzpunkt, sind elementar für eine erfolgreiche VKB Ersatzbandplastik (Staubli und Rauschning 1994). Das VKB zieht von der medialen Fläche des lateralen Kondylus des Femurs zur Area intercondylaris anterior der Tibia (Moll 2002). Es besteht aus zwei funktionellen Bündeln, dem anteromedialen Bündel (AM) und dem posterolateralen Bündel (PL). Die Namengebung der „ligamenta genu cruciata“ mit Erklärung ihrer stabilisierenden Funktion erfolgte durch Claudius Galen von Pergamon (129–199 v. Chr.). Im Jahre 1836 wurde eine erste biomechanische Beschreibung des Gelenks durch die Gebrüder Weber (Weber 1836) vorgelegt, die ebenfalls auf die Bedeutung für die Stabilisation in der a.-p.-Ebene hinwies. Palmer (Palmer 1957) war 1938 einer der ersten Autoren welcher beschrieb, dass das VKB aus einem anteromedialen und einem posterolateralem Bündel besteht (Colombet 2006). Obwohl Odensten und Gillquist (Odensten und Gillquist 1985) keinen histologischen Nachweis fanden, dass das Ligament in zwei verschiedene Komponente aufgeteilt werden kann, wird heutzutage allgemein postuliert, dass das native vordere Kreuzband sich nicht wie ein Einzelstrang aus Fasern mit konstanter Spannung verhält (Colombet 2006).

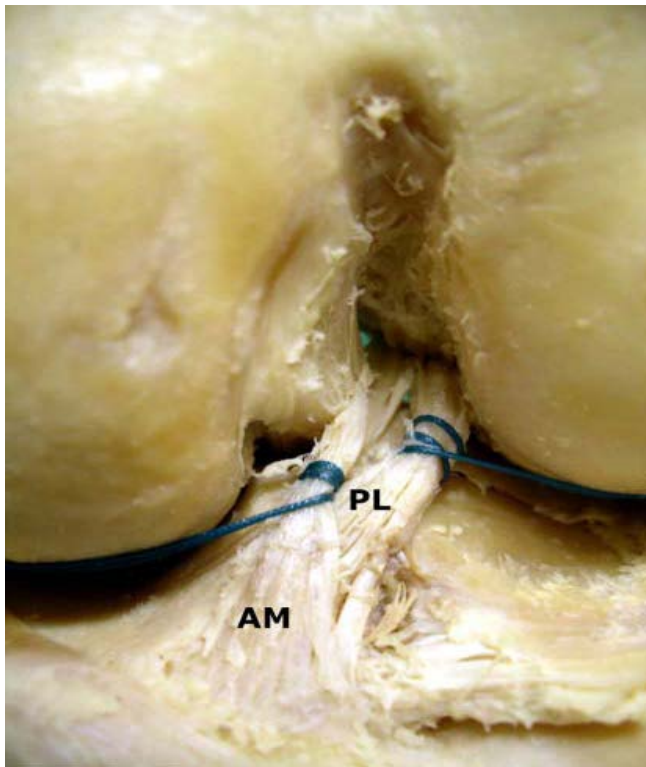


Abbildung 1 Darstellung des anteromedialen und posterolateralen Bündels des VKBs (linkes Knie von vorne ohne Patella)

Tibial ist der Ansatz des VKBs wie in der Abbildung 2 gezeigt durch die Verankerung der Menisken und durch die Gelenkoberflächen begrenzt, so dass diese Begrenzungen ebenfalls als Landmarken für die Tunnelpositionierung benutzt werden können.

Das VKB verläuft in Streckstellung nahezu parallel zum Dach der interkondylären Notch wie in Abbildung 3 dargestellt.

Der femorale Ansatz des VKBs befindet sich an der lateralen konvexen Oberfläche der interkondylären Notch, so dass die Fasern, welche in einer mediolateralen Ansicht proximal erscheinen, eigentlich zum Dach der interkondylären Notch ziehen (Amis und Jakob 1998).  
Abbildung 4

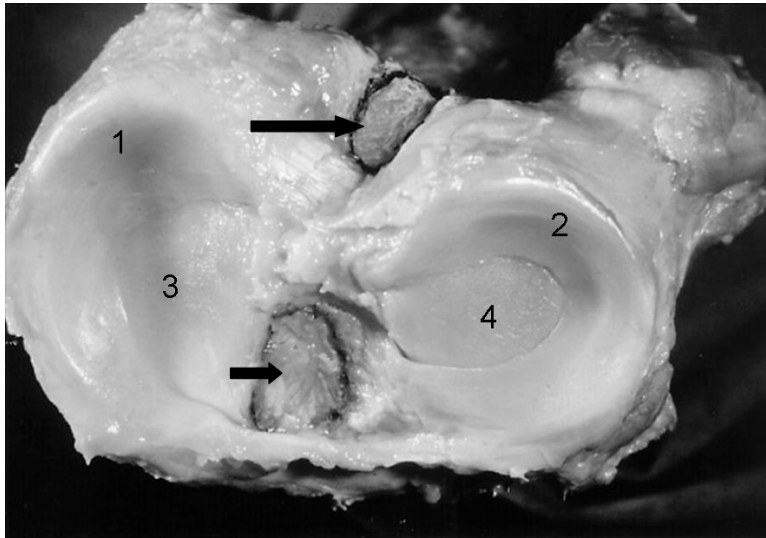


Abbildung 2 Tibialer Ansatzpunkt des VKBs (Mitte unten) begrenzt durch die Ansätze der Menisken und die Gelenkoberflächen (Amis und Jakob 1998) (1: medialer Meniskus; 2: lateraler Meniskus; 3: mediales Tibiaplateau; 4: laterales Tibiaplateau; kurzer Pfeil: distaler Ansatzpunkt des VKBs; langer Pfeil: distaler Ansatzpunkt des HKBs)

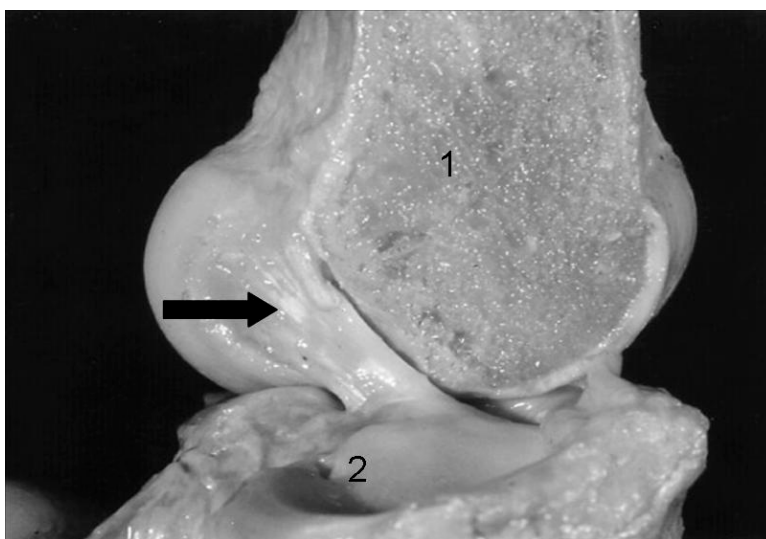
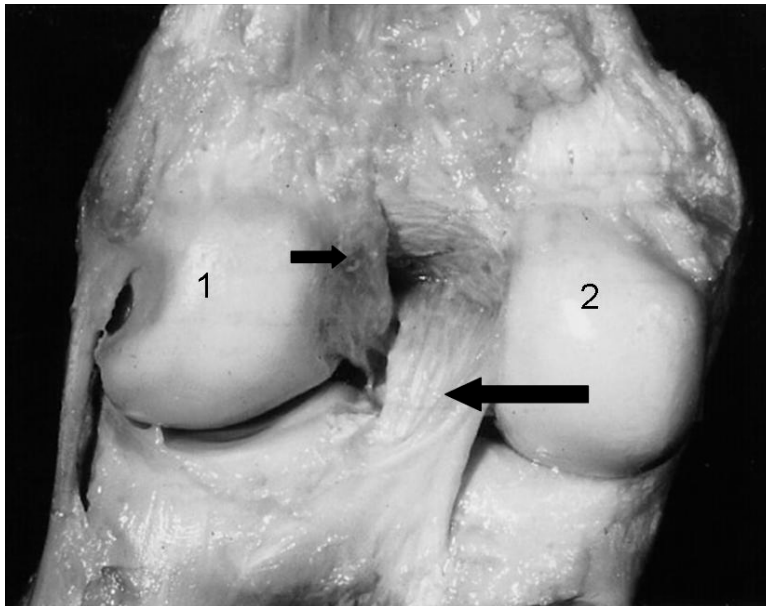


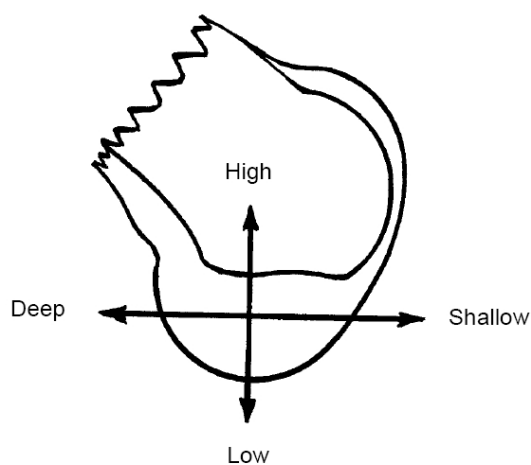
Abbildung 3 Das VKB verläuft in Streckstellung annähernd parallel zum femoralen Dach der interkondylären Notch. Bemerkenswert ist wie die anterioren Fasern des VKBs einem gewölbten Pfad folgen und sich über der anterioren Tibia ausspreizen (Amis und Jakob 1998; Zavras 1995) (1: Femur; 2: Tibia; Pfeil: femoraler Ansatzpunkt des VKBs)





**Abbildung 4** Ansicht von posterior auf die interkondyläre Notch an einem linken Kniegelenk. Das VKB scheint an einer gewölbten Fläche seitlich und am Dach der Notch befestigt zu sein, wobei ein Teil der Fasern bis in die 11Uhr Position ausstrahlt (Amis und Jakob 1998). (1: lateraler Femurkondylus; 2: medialer Femurkondylus; kurzer Pfeil: proximaler Ansatzpunkt des VKBs; langer Pfeil: HKB in seinem Verlauf)

Die allgemeine Terminologie für die Lagebezeichnung des VKB in dem Interkondylärraum ist: deep/shallow und high/low und bezieht sich auf das rechtwinkelig gebeugte Kniegelenk (Abbildung 5). Diese Begriffe sind von Bedeutung für den Chirurgen bei der Positionierung des Transplantates in der Notch während der Operation bei einem rechtwinkelig flektierten Kniegelenk. Eine Verwechslung mit der anatomischen Nomenklatur, welche sich auf ein Kniegelenk in Extension bezieht, kann damit verhindert werden (Amis und Jakob 1998).



**Abbildung 5** Chirurgische Navigationsterminologie für die interkondyläre Notch um Verwechslungen mit der anatomischen Terminologie zu verhindern (Amis und Jakob 1998)

## **1.3 Biomechanik des Kniegelenkes und des vorderen Kreuzbandes**

Die Funktion des VKB besteht in der Sicherung der Stabilität des gebeugten Kniegelenkes und wirkt zudem einer Überstreckung entgegen. Der anteromediale Anteil spannt sich bei Streckung und Innenrotation und limitiert somit die Innenrotation, der posterolaterale Anteil hingegen spannt sich bei Beugung des Unterschenkels (Moll 2002). Biomechanisch haben die zwei Bündel verschiedene Spannungsmuster während des ganzen Bewegungsumfangs der Flexion des Kniegelenkes. Das anteromediale AM-Bündel verhindert besser die anteriore Translation der Tibia bei Beugung des Kniegelenkes über 45°, wo hingegen das PL-Bündel als weniger isometrisch und als wichtiger Begrenzer der vollen Streckung beschrieben wurde. (Boisgard 1999; Colombet 2006; Livesay 1995; Rudy 1996) Die Beschreibung des AM- und des PL-Bündels basiert auf der relativen anatomischen Verankerung an der Tibia. Am femoralen Ansatzpunkt liegt das AM-Bündel anteriorer und proximaler („higher“ and „deeper“) im Vergleich zum PL-Bündel, welches sich weiter posterior und inferior („lower“ and „shallower“) an der lateralen interkondylären Notchwand befindet. (Amis und Jakob 1998)

## **1.4 Diagnostik**

### **1.4.1 Anamnese**

Die Anamnese ebnet den Weg zur richtigen und umfassenden Diagnose insbesondere auch im Hinblick auf Begleitverletzungen. Damit kann gewährleistet werden, dass eine mögliche assoziierte Pathologie im Vorfeld berücksichtigt oder ausgeschlossen werden kann (Zantop 2010). Anhand der Anamnese erfolgt auch die Planung der weiteren Diagnostik (Zantop 2010). Zahlreiche Studien (Arendt und Dick 1995; Boden 2000; Ettliger 1995; Olsen 2004) konnten anhand von Videoanalysen sportartspezifische Verletzungsmechanismen darstellen. Von entsprechender Bedeutung ist die detaillierte Abfrage des Unfallvorgangs und des Verletzungsmechanismus um Rückschlüsse auf mögliche intra-artikuläre Verletzungen zu ziehen. Eine der häufigsten Risikopositionen für Verletzungen des VKBs ist eine geringe Knieflexion, Valgusposition und tibiale Außenrotation (Olsen 2004; Petersen 2005)

### **1.4.2 Inspektion**

Die Inspektion erfüllt zwei wichtige Aufgaben: Erstens kann durch eine aufmerksame, schnell durchzuführende Inspektion die Diagnose VKB Ruptur in die richtige Richtung gelenkt werden. Zweitens können mit Hilfe der Inspektion die Wege der Differentialdiagnose und der assoziierten Pathologien gebahnt werden (Benjaminse 2006; Strobel und Zantop 2010; Torg 1976). Bei einem frischen Distorsionstrauma kann bei deutlich vorhandenem Hämarthros der Verdacht einer VKB Ruptur gestellt werden (Hackenbruch und Muller 1987; Steinbruck und Wiehmann 1988).

Jedoch ist der Umkehrschluss nicht zulässig: das Ausbleiben eines inspektorisch sichtbaren HämARTHROS schließt eine VKB-Ruptur nicht aus (Zantop 2010). Begleitende Pathologien können ebenfalls bei der Inspektion bereits auffallen. Neben einem inspektorisch auffälligen Extensionsdefizit sind insbesondere Prellmarken von enormer Wichtigkeit (Zantop 2010). Prellmarken im Bereich der anteromedialen Tibia können als Zeichen einer Läsion des medialen Kollateralbandes gesehen werden. Prellmarken im Bereich der Tuberositas tibiae hingegen sollten an eine Verletzung des hinteren Kreuzbandes denken lassen (Schulz 2003; Strobel und Stedtfeld 1991). Damit wird das weitere diagnostische Vorgehen, bereits durch die Inspektion geebnet.

### **1.4.3 Klinische Untersuchung**

Für eine standardisierte klinische Untersuchung sollten folgende allgemeine Punkte beachtet werden: Herstellen einer Vertrauensbasis zwischen Patienten und Untersucher, schmerzfreie Lagerung und Durchführung der Tests im Seitenvergleich (Donaldson 1985; Jakob 1987; Steinbruck und Wiehmann 1988).

- **Schubladen-Tests**

In dieser Untersuchung wird das Kniegelenk zwischen 60° und 90° gebeugt, wobei die Fußsohle auf dem Untersuchungstisch fixiert wird. Eine erhöhte Verschieblichkeit im Seitenvergleich der Tibia nach vorne mit dem Fuß in neutraler Position wird als positive vordere Schublade bezeichnet. Die Unterteilung der Ausprägung der Verletzung ist von 1 bis 3 skaliert und ist abhängig von der Verschieblichkeit der Tibia nach vorne (Grad 1 = <5mm, Grad 2 = 5 bis 10mm, Grad 3 = >1cm). Der Schubladentest wird anschließend in 15° Außenrotation des Fußes durchgeführt. Hierbei werden die medialen Strukturen des Kniegelenkes gestrafft. Wenn nun das mediale Tibiaplateau nach vorne subluxiert, deutet dies auf eine Überdehnung der medialen Strukturen hin.

Analog wird bei 30° Innenrotation verfahren, was eine Aussage über die lateralen Strukturen des Kniegelenkes ermöglicht (Katz und Fingerth 1986).

Mit diesem Test kann die vordere und hintere Schublade erfasst werden, jedoch haben aktuellere Studien gezeigt, dass der Schubladentest zwei grundlegende Schwächen aufweist: ein falsch-negatives Ergebnis bei muskulärer Anspannung der ischiokruralen Muskulatur und die Unterscheidung zwischen einer korrekten vorderen Schublade und der posterioren tibialen Subluxation und somit „Pseudo-vorderen Schublade“ bei HKB-Insuffizienz (Zantop 2010). Neben der absoluten Strecke der vorderen Schublade in mm sollte auch das Vorhandensein eines harten oder weichen Anschlages als Instabilitätskriterium gewertet werden (Ostrowski 2006; Zantop 2010).

- **Lachman-Test**

Der Lachman Test ist nach dem Professor John W. Lachman von der Temple University benannt und wird im Liegen durchgeführt (Torg 1976).

Im Gegensatz zum vorderen Schubladen-Test befindet sich das Kniegelenk bei der Durchführung des Lachman-Testes nur in einer Flexionsstellung von ca. 20–30° (Boyer P 1995; Daniel 1985; Katz und Fingerroth 1986; Noulis 1997; Petersen und Zantop 2009). Die eine Hand des Untersuchers greift fest den distalen Oberschenkel und fixiert diesen durchgehend bei der Untersuchung, während die andere Hand die proximale Tibia mit dem Daumen auf dem vorderen Gelenkspalt und den Langfingern dorsal des Gelenkes umschließt. Die Tibia wird nun ruckartig nach vorne gezogen. Der Untersucher beurteilt die Translation nach anterior und die Qualität des Endpunkts (Torg 1976). Eine anteriore Translation mit weichem Anschlag wird als positiv bewertet. Eine Variation der Durchführung des Tests ist der sogenannte stabile Lachman-Test nach Strobel (Strobel und Stedtfeld 1991). Hierbei wird der Oberschenkel des Patienten auf dem Oberschenkel des Untersuchers positioniert und somit eine entspannte Lagerung der zu untersuchenden Extremität erreicht. Mit einer Hand wird dann die anteriore tibiale Translation appliziert und die proximale Tibia nach vorne gezogen während die zweite Hand den Oberschenkel stabilisiert und so eine Mitbewegung verhindert (Zantop 2010). Der Lachman-Test weist bei korrekter Durchführung eine hohe Sensitivität (85%) und eine hohe Spezifität (95%) zur Diagnose der VKB-Ruptur auf (Benjaminse 2006; Katz und Fingerroth 1986; Petersen und Zantop 2009). Obwohl auch für den Lachman-Test eine gewisse Einschränkung der Durchführbarkeit im akuten Stadium besteht, so ist er jedoch deutlich besser anwendbar als der Schubladen-Test (Zantop 2010). Bei frischen anterioren Instabilitäten liegt der Anteil eines positiven Lachman-Testes zwischen 78% und 99%; der Anteil positiver vorderer Schubladen lag zwischen 22% und 70% (Jakob 1987; Sanders und Miller 2005; Schuster 2004).

Das Ausmaß des Lachman-Tests wird nach Empfehlung des internationalen Knie Dokumentations-Komitees (IKDC) in 4 Grade eingeteilt: normal (1–2mm Schublade im Seitenvergleich), fast normal (3–5mm Schublade), abnormal (6–10mm Schublade), und stark abnormal (>10mm Schublade) wobei bei jedem Grad zwischen einem weichen und festen Anschlag unterschieden wird (Irrgang 1998). Der Lachman-Test ist ein guter Test um eine Ruptur des VKBs zu bestätigen, seine wahre Stärke ist jedoch der Ausschluss einer Ruptur (Ostrowski 2006).

Der Lachman-Test kann für eine bessere Objektivität auch instrumentiert durchgeführt werden. Es wurden mehrere Instrumente für diese Messung entwickelt, eines der geläufigsten Instrumente ist der KT-1000, welcher auch in dieser Studie benutzt wurde. Die Verwendung des KT 1000 Arthrometer (MEDmetric, Corp, San Diego) ist essentieller Bestandteil des IKDC Scores zur wissenschaftlichen Untersuchung klinischer Ergebnisse (Zantop 2010). Der Apparat wird mit Hilfe von Klettverschlüssen an der proximalen Tibia befestigt. Zusätzlich wird ein Gegenlager auf der Patella positioniert. Die anteriore tibiale Translation wird nun mit Hilfe eines Streckenmessers gemessen, der auf der Tuberositas tibiae positioniert ist. Bei der Kraftapplikation mit dem Handgriff über der Tibia ertönen unterschiedliche akustische Signale bei 68 N, 91 N und 134 N. Die letzte akustische Stufe entspricht einer Last von 134 N und wird für die wissenschaftliche Auswertung der Ergebnisse verwandt (Zantop 2010). Es wird grundsätzlich die Seitendifferenz herangezogen. Eine unter maximaler Kraft gemessene Seitendifferenz von mehr als 3mm kann bei 99% der Patienten mit chronischer Instabilität und bei 95% der Patienten mit einer akuten VKB Ruptur nachgewiesen werden (Rangger 1993).

- **Pivot Shift Test**

Im Gegensatz zu den statischen Tests der anterioren tibialen Translation handelt es sich bei dem erstmalig 1967 von Lemaire beschriebenen Test um einen dynamischen anterioren Subluxations-Test. Der Test gewann deutlich an Bedeutung als 1972 Galway et al. den Begriff des „Pivot Shift“ beschrieben. Die damals beschriebene Testausführung findet auch heute noch Anwendung (Galway 1972). Der Patient befindet sich dabei in Rückenlage, der Knöchel wird mit einer Hand angehoben. Die andere Hand wird im Bereich des Fibulaköpfchens zur Unterstützung des Kniegelenks aufgelegt. Das Bein wird in die volle Streckung gebracht während zugleich mit der Hand am Knöchel eine Innenrotation ausgeübt wird, um die Subluxation der Tibia zu verstärken. Mit der Hand am Fibulaköpfchen wird nun starker Valgusstress auf das Kniegelenk ausgeübt während dieses gebeugt wird. Die plötzliche Reposition der anterioren Subluxation ereignet sich meistens zwischen 20°-30° Beugung und stellt das Kriterium für einen positiven Test dar (Lane 2008). Der Pathomechanismus dieser Untersuchung besteht darin, dass durch die Innenrotation und die volle Streckung des Kniegelenkes das laterale Tibiaplateau stärker subluxiert als das mediale. Die Reposition erfolgt bei etwa 20°-30° Beugung mit einem für den Patienten oft unangenehmen Schnappen (Lane 2008). Der Pivot shift-Test besitzt eine hohe Spezifität (98%) aber geringe Sensitivität (85%) und eignet sich aufgrund des höchsten prädiktiven Werts aller besprochenen Techniken am besten als Bestätigungstest eines gerissenen VKBs (Benjaminse 2006; Ostrowski 2006). Kocher et al. (Kocher 2002) konnten im Rahmen einer aufwendig angelegten Studie zeigen, dass die subjektive Patientenzufriedenheit nicht mit dem Lachman oder der vorderen Schublade korreliert, sondern mit dem Pivot shift-Test, also der Rotationsstabilität.

#### **1.4.4 Röntgen**

Die bildgebende Standarduntersuchung eines verletzten Kniegelenks umfasst die radiologische Darstellung des Kniegelenkes in anterior-posteriorem (ap) und seitlichem Strahlengang. Mit Hilfe der radiologischen Diagnostik können Fraktur oder knöcherne Bandausrisse festgestellt oder indirekte Hinweise auf eine VKB Ruptur gewonnen werden. Von der klinischen Symptomatik ist eine Unterscheidung zwischen einer ligamentären Instabilität und einer anterioren Eminentia-Fraktur meist nicht möglich (Moore 1987). Der Dislokationsgrad bei einem knöchernen Ausriss des VKB wird nach Meyers und McKeever (Meyers und McKeever 1970) klassifiziert. Als pathognomonische radiologische Zeichen für eine ligamentäre Ruptur gelten das sogenannte Sulcus-Zeichen und die Segondfraktur. Beim Sulcus-Zeichen handelt es sich um eine Impaktion des lateralen Femurkondylus in Höhe der Linea terminalis (Abbildung 6). Diese beruht mit großer Wahrscheinlichkeit auf der stattgehabten Subluxationsstellung des lateralen Tibiaplateaus und dem Anschlag an die laterale Femurkondyle.



**Abbildung 6** Typisches Sulcus Zeichen im seitlichen Strahlengang (Zantop 2010)

Die Segondfraktur umschreibt einen assoziierten knöchernen Ausriss des lateralen Kapselbandapparates an seiner Insertion am lateralen Tibiaplateau (Abbildung 7). Selten besteht bei der Segondfraktur eine Indikation zur operativen Therapie des Fragmentes selbst. Sie gilt jedoch als hinweisend für eine VKB-Ruptur (Zantop 2010).



**Abbildung 7** Segond Fraktur knöcherner Kapselausriss am anterolateralen Tibiaplateau(Zantop 2010)

Gehaltene Aufnahmen werden für die Diagnose und Klassifikation von Läsionen des hinteren Kreuzbandes verwendet(Jung 2006; Mariani 2005; Strobel und Stedtfeld 1991; Strobel 2002). Da hintere Instabilitäten klinisch leicht mit vorderen Instabilitäten verwechselt werden können, sollte beim geringsten Verdacht auf eine hintere Instabilität eine gehaltene Aufnahme zur Standarddiagnostik gehören. Das Knie wird in 90°-Flexion in einem Halteapparat fixiert.

Auf die proximale Tibia wird eine standardisierte Kraft von 15 N appliziert. Auf der seitlichen Aufnahme kann die posteriore tibiale Translation gemessen und mit der Gegenseite verglichen werden. Eine posteriore Translation von mehr als 5mm im Seitenvergleich spricht für eine Läsion des hinteren Kreuzbandes. Ab mehr als 13mm besteht häufig eine zusätzliche Läsion der posterolateralen oder posteromedialen Strukturen (Zantop 2010).

### **1.4.5 Computertomographie**

Die Computertomographie besitzt im Rahmen der Diagnostik nach VKB Ruptur nur eine untergeordnete Stellung. Eine mögliche Indikation zur CT besteht bei knöchernen VKB-Ausrissen. Bei Rezidivinstabilität besitzt die CT eine wichtige Funktion. Hier kann anhand der Schnittbildgebung die Tunnelweite und -lage sicher beurteilt werden. Auch die Lage von eingebrachten Implantaten wie z.B. Interferenzschrauben kann sicher eingeschätzt werden. Dreidimensionale Rekonstruktionen erlauben eine präzise Bestimmung der Bohrkanalposition und können so die Planung von Revisionsoperationen erheblich erleichtern (Zantop 2010)

### **1.4.6 MRT Diagnostik**

Die Ruptur des VKBs kann durch eine gute klinische Diagnostik gesichert werden. Trotzdem ist die Durchführung einer präoperativen MRT Diagnostik sinnvoll und hilfreich. Hierbei gilt es Begleitverletzungen zu erfassen, die versorgt werden müssen und den postoperativen Ablauf beeinflussen können. Anhand von Stressreaktionen am Knochen (Bone bruise) können Rückschlüsse auf den Unfallmechanismus getroffen werden (Petersen und Zantop 2009; Zantop 2010). Die Sensitivität der MRT-Diagnostik der VKB-Läsion beträgt zwischen 92 und 100%, die Spezifität beträgt zwischen 85 und 100% (Sanders und Miller 2005; Starman 2007). In Abhängigkeit von der Verletzungsschwere und vom Abstand zum Unfallereignis lassen sich unterschiedliche Befunde erheben (Ödem, intraartikulärer (i.a.) Erguss). Damit ist die MRT für gutachterliche Fragestellungen bei denen der Unfallzusammenhang im Vordergrund steht, die Methode der Wahl (Zantop 2010). Drei verschiedene Schnittebenen werden beim MRT genutzt um das Kniegelenk und seine zentralbegleitende Strukturen darzustellen: sagittal, coronal/frontal und axial (Resnick und Kang 1997). In der schräg sagittalen Schnittebene mit ausgestrecktem Kniegelenk, verläuft die Längsachse des VKBs mit seiner anterioren-superioren Grenze vom posteromedialen Aspekt des lateralen Femurkondylus zur Eminentia intercondylaris und parallel zum femoralen interkondylären Dach, 3 bis 4mm vom inferioren Rand der Blumensaatlinie sowie mit einem Neigungswinkel zum Tibiaplateau zwischen 52° und 56° (Stäubli 1999; Starman 2007; Stäubli und Rauschning 1994; Steckel 2007).

Das MRT eines rupturierten VKBs zeigt direkte und indirekte Zeichen. Direkte Zeichen (Abbildung 8) sind Kontinuitätsunterbrechung, Signalunregelmäßigkeiten im Bandverlauf oder gar das Fehlen des VKB (Empty notch). Bei subakuten Verletzungen (3–4 Wochen nach dem Unfallereignis) beeindruckt die gerissenen VKB-Fasern durch einen horizontalen Verlauf (<52° Neigungswinkel) (Falchok 1996; Katahira 2001; Kwon 2009; Lee 1988; Zantop 2010).

Ein häufiges indirektes Zeichen einer VKB Ruptur ist das Buckelphänomen des hinteren Kreuzbandes. Durch die vordere Subluxationsstellung der proximalen Tibia kommt es zu einer Annäherung der Insertionspunkte und somit zum Buckeln des intakten HKBs. Ein weiteres indirektes Zeichen ist das Auftreten von Knochenkontusionen (bone bruise). Ursächlich für das bone bruise ist die Subluxation zum Zeitpunkt der Verletzung. Somit können anhand der Lokalisation des bone bruise auch Rückschlüsse auf den Verletzungsmechanismus gezogen werden (Zantop 2010). Es gilt zu beachten, dass die MRT-Untersuchung keine funktionelle Analyse des VKB bietet. Vielmehr basiert die Indikation zur Operation auf den Befunden der klinischen Untersuchung (Petersen und Zantop 2009; Zantop 2010).

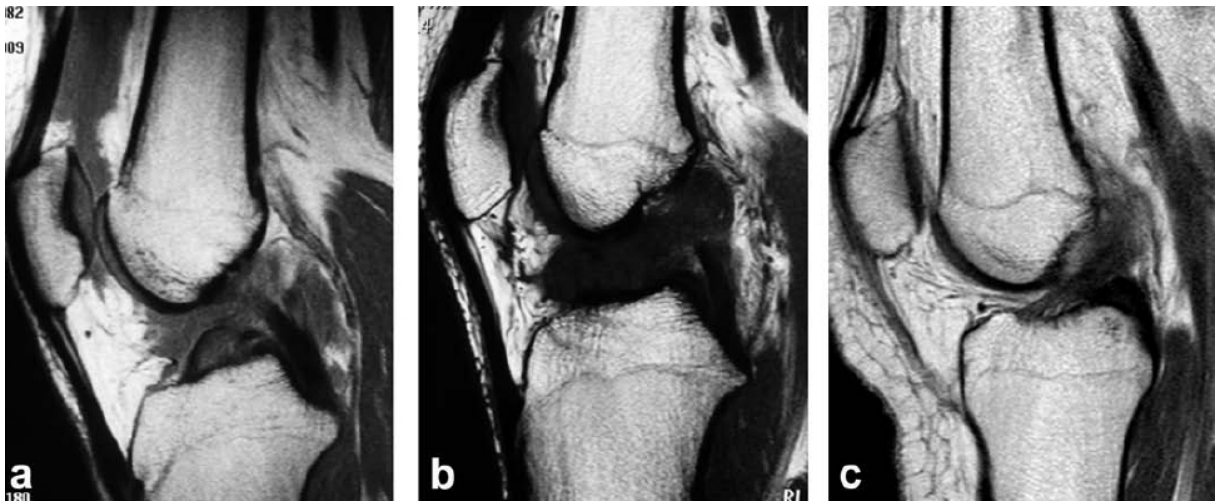


Abbildung 8 MRT-Beispiel der direkten Zeichen einer VKB-Ruptur. a.) Kontinuitätsunterbrechung, b.) fehlende Abgrenzbarkeit, c.) reduzierter Anstiegswinkel (Zantop 2010)

## 1.5 Therapiemöglichkeiten

Eine der wichtigsten Fragen, die sich nach einer VKB-Ruptur stellt ist, wie sich das instabile Kniegelenk ohne operative Versorgung entwickelt. Nach heutigem Wissensstand kommt es durch die erhöhten Scherkräfte häufig zu Meniskusläsionen (Bauer 2010). Die Inzidenz liegt nach einem Jahr bei 40%, nach 5 Jahren bei 60% und nach 10 Jahren bei 80% (Levy und Meier 2003). Bislang liegt jedoch noch keine Studie vor, welche belegt, dass es bei allen Patienten mit vorderer Kniegelenksinstabilität zu Sekundärschäden oder degenerativen Veränderungen kommt. Es konnten einige wenige Parameter als Einflussfaktoren auf die Entwicklung von Sekundärschaden beim instabilen Knie evaluiert werden. Hierzu zählen unter anderem die Aktivität und die ausgeübte Sportart. Insbesondere für „high-risk pivoting sports“ wurden im Verlauf radiologische Veränderungen des Kniegelenkes gefunden (Fink 2001). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass je aktiver der Patient mit instabilem Kniegelenk ist, desto häufiger sekundäre Läsionen auftreten (Bauer 2010). Die Entscheidung zwischen operativer und konservativer Therapie bleibt eine individuelle Entscheidung und erfordert vom Behandler eine genaue Erhebung und Analyse der Verletzung sowie der Anamnese (Bauer 2010).



### **1.5.1 Konservative Therapie**

Trotz der stetig steigenden Zahl an VKB-Ersatzplastiken nach primärer VKB-Ruptur gibt es weiterhin Patienten, welche konservativ therapiert werden und subjektiv zufrieden sind (Bauer 2010). Die größte Gefahr unter konservativer Therapie liegt in der Entwicklung einer persistierenden Instabilität sowie einer Osteoarthrose. Daniel et al. (Daniel 1994) führten 3 Risikofaktoren an, welche im Follow-up vermehrt zu einer operativen Versorgung führen. Dies sind die passive Instabilität (gemessen mit dem KT- 1000), die sportliche und berufliche Aktivität sowie das Alter. Ist die Entscheidung zur konservativen Therapie gefallen, beeinflusst die Durchführung einer suffizienten Behandlung das Outcome.

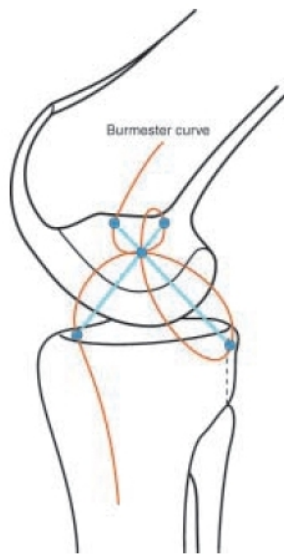
Hierzu gehören initial nach Trauma abschwellende Maßnahmen wie manuelle Lymphdrainage und Cryotherapie. Im weiteren Verlauf sollte ein gezieltes koordinatives sowie muskelaufbauendes physiotherapeutisches Training erfolgen, um eine muskuläre Stabilisierung der vorderen ligamentären Instabilität zu erreichen. Abhängig von der individuellen Belastung kann auch die Verordnung einer stabilisierenden Orthese ohne Bewegungslimitierung erfolgen. Sehr wichtig erscheint auch die regelmäßige klinische fachspezifische Kontrolluntersuchung (Bauer 2010). Im Rahmen dieser Nachuntersuchungen sollte die Entscheidung zur konservativen Therapie stets reevaluiert werden. Bei klinischem Instabilitätsgefühl sollte auch nach längerem Zeitraum die Zuführung zur operativen Therapie erfolgen (Bauer 2010).

### **1.5.2 Operative Therapie**

Dem sportlich aktiven Menschen wird heute aufgrund der oben beschriebenen Folgeschäden die Rekonstruktion des gerissenen VKB empfohlen. Die Anatomie des femoralen Ursprungs und der tibialen Insertion wurde bereits vor Jahrzehnten beschrieben von Müller et al. (Müller 1982), Jakob et al. (Jakob und Staeubli 1990) und Dale et al. (Dale 1990), die Erkenntnisse wurden jedoch nur teilweise in die klinische Praxis umgesetzt. Schwerpunkte der wissenschaftlichen Aktivitäten lagen lange Zeit auf dem Gebiet möglicher Fixationstechniken, der Transplantatwahl oder dem OP-Zeitpunkt. Die erreichte Stabilität in Translation und Rotation ist allerdings ein wesentliches Kriterium für den Erfolg der Rekonstruktion des VKB. Daher wird aktuell versucht das VKB so zu ersetzen, dass es möglichst seiner ursprünglichen anatomischen Lage und Funktion entspricht (Colombet 2006; Mayr 2010). Bislang wurde der Tatsache, dass das VKB eine komplexe anatomische Struktur ist und aus mindestens zwei verschiedenen Bündeln besteht, wenig Beachtung geschenkt (Brucker 2006; Girgis 1975; Harner 2001). Die meisten heutigen Techniken ersetzen das anteromediale Bündel und etablierten diese Methode zum Goldstandard für die VKB-Rekonstruktion mit einem femoralen und einem tibialen Bohrkanal (Zantop 2008). Jonsson et al. berichteten, dass Patienten mit einem positiven pivot-shift Test 2 Jahre nach einer Einzelbündel Ersatzbandplastik, eine erhöhte szintigraphische Aktivität des subchondralen Knochens zeigten (Jonsson 2004). Bei Nachkontrollen zwischen 5 und 9 Jahren zeigten die Patienten zudem ein schwächeres funktionelles subjektives Ergebnis als 2 Jahre nach OP. Um eine spätere Arthrose zu verhindern wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die Beseitigung der pivotierenden Instabilität nach einer VKB-Ersatzbandplastik möglicherweise mehr Bedeutung hat als die anteroposteriore Laxizität. Tashman et al. (Tashman 2004) konnten in vivo

nachweisen, dass die nicht anatomische Einzelbündel Ersatzbandplastik die pivotierende Bewegung nicht beseitigt hat. Dies wurde in vitro sowohl von Gabriel et al. (Gabriel 2004) als auch von Woo et al. bestätigt (Woo 2002). Die Rotationsstabilität ist abhängig von der Tunnelpositionierung, weshalb die Anatomie der Insertionsareale des VKB wieder in den Mittelpunkt der Wissenschaft und chirurgischen Technik gerückt ist (Jonsson 2004; Kocher 2002). Aktuelle in vivo und in vitro Daten haben gezeigt, dass die Idee einer anatomischen Rekonstruktion aus zwei Bündeln des vorderen Kreuzbandes, die Kniebewegung und Kinematik sowie Stabilität besser wiederherstellt (Gabriel 2004; Georgoulis 2003; Ristanis 2003; Woo 2002; Yagi 2002; Zantop 2008).

Für den Zeitpunkt nach dem Trauma, zu dem die operative Versorgung erfolgen sollte, gibt es keine exakten Zeitvorgaben. Der OP-Zeitpunkt kann individuell mit dem Patienten abgestimmt werden. Sollte sich jedoch für eine Akutversorgung entschieden werden, ist zur Minimierung des Arthrofibrosierisikos eine Versorgung innerhalb 48 h nach Verletzung anzusetzen. In manchen Fällen ist aufgrund einer Begleitverletzung ebenfalls eine zeitnahe operative Versorgung anzustreben. Falls eine frühe Operation nicht angestrebt wird, sollte frühestens nach 4–6 Wochen bei reizlosem Lokalbefund ein Eingriff stattfinden. Zeigt sich das Knie ohne Schwellung und mit einer seitengleichen Beweglichkeit ist das postoperative Arthrofibrosierisiko deutlich reduziert (Bauer 2010; Mayr 2004). Ein weiterer Faktor, welcher bei der operativen Therapie eine wesentliche Rolle spielt ist das möglichst physiologische Transplantatverhalten, damit ein annähernd normaler Roll-Gleit-Mechanismus entsteht (Csizy und Friederich 2002). Der klinische Erfolg des Eingriffs zeichnet sich durch langfristig stabile Gelenke und einen physiologischen Bewegungsablauf bei voll erhaltener Kniegelenkbeweglichkeit aus. Eine anatomische Bohrkanaalführung ist zur Erlangung physiologischer Spannungsverhältnisse im Transplantat unabdingbar (Csizy und Friederich 2002). Es wird eine „physiologische“ oder „relative“ Isometrie angestrebt. Hierfür wird der Begriff der „Anatomometrie“, der 1986 von Werner Müller vorgeschlagen wurde, benutzt (Csizy und Friederich 2002). In der Vergangenheit wurde eine absolute Isometrie angestrebt. Man versteht darunter den gleichbleibenden Abstand der femoralen und tibialen Bandinsertionen im Bewegungsablauf (Zavras 2001). Sämtliche isometrischen Insertionspunkte liegen auf der von Menschik u. Jank 1974 beschriebenen, allerdings für 43° Flexion berechneten, Burmesterkurve (Friederich 1993; Friederich und Biedert 1996) (Abbildung 9).



**Abbildung 9 Burmester-Kurve (Csizy und Friederich 2002)**

In der Realität weist jedoch auch ein intaktes VKB keine ideale Isometrie auf, was dieses Konzept wiederum fragwürdig erscheinen lässt (Csizy und Friederich 2002). Die erreichte Stabilität ist ein wesentliches Kriterium für den Erfolg der Rekonstruktion des VKB und bei stark kniebelastenden Sportarten von größter Bedeutung. Kocher et al. (Kocher 2002) und Jonsson et al. (Jonsson 2004) konnten zeigen, dass die Stabilität von der Tunnelpositionierung abhängt.

### ***1.5.2.1 Transplantatwahl***

Die Frage der Transplantatwahl stellt einen zentralen Punkt in der operativen Versorgung der vorderen Kreuzbandruptur dar. Prinzipiell wäre vom zu implantierenden Transplantat zu fordern, dass es dem nativen VKB ähnliche Struktureigenschaften aufweist (Buchner 2010). Woo et al. beschrieben die Struktureigenschaften des Femur-VKB-Tibia Komplexes mit einer maximalen VKB Last bei jüngeren Körperspendern von durchschnittlich 2160 N bei einer durchschnittlichen Steifigkeit von 242 N/mm, wobei die Struktureigenschaften des Transplantats in hohem Maße vom Querschnitt des Transplantates abhängig sind (Woo 1991). Wünschenswert ist eine schnelle Inkorporation bzw. Einheilung des Transplantates ohne größere Fremdreaktionen mit der Konsequenz der möglichst schnellen Wiederaufnahme der Belastbarkeit und Koordination. Ein weiterer elementarer Punkt ist, dass die Entnahme der Sehnen zu einer möglichst geringen Morbidität und Funktionseinschränkung durch den Verlust der Sehne selbst führt (Kartus 2001). Als Ersatzmöglichkeiten des VKB stehen folgende Transplantate zur Verfügung: Patellarsehne, Semitendinosus, Semitendinosus/Gracilis, Quadrizepssehne, Allografts. Für die autologen Transplantate (z.B. Fascia lata Streifen – bessere Alternativen) wie auch für den Einsatz von Kunstbändern wie zum Beispiel Gore-Tex, Dacron, Kohlefaserband oder LARS sieht die Literatur auf Grund der hohen Komplikationsraten für den Primärerersatz des VKB keine Indikation (Mayr 2010).

- **Patellarsehne (Bone-Tendon-bone)**

Die mit zwei Knochenblöcken aus der Patella und Tibia gewonnene Patellarsehne (Bone-tendon-bone) galt lange Zeit und gilt bei vielen operativ tätigen Kreuzbandchirurgen auch heute noch als Goldstandard der VKB-Chirurgie (Fu und Schulte 1996; Kim 2009; Mayr 2010). Sie weist dem nativen VKB vergleichbare Struktureigenschaften auf (max. Last zwischen 1784 N und 1997 N, Steifigkeit 210 N/mm (Woo 1991)), bietet eine Vielzahl von Fixationsmöglichkeiten (Pressfit/implantatfrei, Schrauben, transfemoral, extrakortikal) und gewährleistet die sichere Einheilung der anhängenden Knochenblöcke. Tierstudien zeigen, dass die Knochenblöcke nach 6 Wochen komplett inkorporiert sind, was den Vorteil einer frühen funktionellen Nachbehandlung mit sich bringen könnte (Papageorgiou 2001; Park 2001), die grundsätzliche Schwächung des Transplantats im Rahmen der „Ligamentisierung“ wird dabei aber nicht berücksichtigt (Claes 2011). Dennoch bringt die Entnahme der Patellarsehne auch klinisch relevante Nachteile mit sich. Mögliche intra- bzw. postoperative Komplikationen sind unter anderem Verletzungen des Streckapparates (Patellafraktur, Patellarsehnenruptur). Weiterhin weist die Patellarsehnenplastik eine erhöhte Entnahmemorbidität auf, die zu Narbenbildung, Sensibilitätsstörungen im Bereich des N. saphenus und vor allem zu verstärkter Schmerzsymptomatik beim Knien, patellofemorale Krepitationen, sowie zu Reizungen/Tendinitiden der Patellarsehne führen kann, was man in der Gesamtheit unter dem Begriff des vorderen Knieschmerzes subsummiert. Diese Entnahmemorbidität lässt sich durch Optimierung der Entnahmetechnik (z.B. Entnahme durch 2 Minischnitte) reduzieren, dennoch muss man die Patellarsehne als Transplantat der Wahl bei Patienten mit kniender Position im Sport oder Beruf oder bei Sportlern, die auf die Unversehrtheit ihres Extensorenmechanismus angewiesen sind, zurückhaltend beurteilen (Buchner 2010).

- **Kniebeugesehnen(Hamstrings: Semitendinosus/Gracilis)**

Die alleine oder zusammen mit der Gracilissehne entnommene Semitendinosussehne stellt derzeit neben der Patellarsehne das am häufigsten benutzte Transplantat für die Ersatzplastik des VKB dar. Auch hier sind die Struktureigenschaften mit dem nativen VKB vergleichbar (max. Last 2442 N und Steifigkeit 238 N/mm (Woo 1991)), je nach Präparationstechnik sind 2-, 3-, 4- oder 5-strängige Transplantate mit unterschiedlichem Durchmesser möglich, die eine hohe Anzahl von Fixationsstrategien (extra-kortikal, Interferenzschraube, Crosspins, Hybrid Techniken, implantatfrei) und auch Doppelbündelrekonstruktionen ermöglichen. Die Morbidität (vorderer Knieschmerz, Schmerzen beim Knien, Sensibilitätsstörungen) nach Entnahme der Beugesehnen ist geringer als nach Entnahme der Patellarsehne, ebenso scheint bei vergleichbarer Langzeitstabilität und vergleichbaren klinischen Ergebnissen die Anzahl degenerativer Veränderungen im Vergleich zur Patellarsehne verringert (Buchner 2010). Nachteil dieser Weichteiltechnik ist die im Vergleich zu den Knochenblöcken der Patellarsehne im Tierversuch langsamere Inkorporation der Sehne postoperativ, die theoretisch zu einem vorsichtigeren Nachbehandlungsregime führen sollte.

Entnahmemorbiditäten wie Hämatombildung und Sensibilitätsstörungen sind auch bei dieser Technik beschrieben und können unter Umständen durch Veränderung der Entnahmetechnik (z.B. Entnahme in der Kniekehle) reduziert werden (Buchner 2010). Ein wichtiger Punkt ist neben der Schwächung der Flexionskraft (deep flexion) vor allem die signifikant reduzierte Innenrotationskraft nach der Entnahme der Hamstrings, die vor allem bei Entnahme beider Sehnen zum Tragen kommt, so dass es vor allem bei Sportlern, die auf letztere Muskelfunktion besonders angewiesen sind (z.B. Tänzer), vermieden werden sollte, beide Sehnen zu entnehmen (Burks 2005; Segawa 2002; Tashiro 2003).

- **Quadrizepssehne**

Die Quadrizepssehne erfreut sich, obwohl zur Zeit noch seltener durchgeführt als oben genannte Verfahren, zunehmender Beliebtheit als Transplantatmöglichkeit. Mittelfristige Ergebnisse (3–5 Jahre) zeigen den etablierten Verfahren gleichwertige klinische Resultate, längerfristige Ergebnisse stehen allerdings noch aus (Chen 2006; Geib 2009; Gorschewsky 2007; Lee 2007; Lee 2004). Auch hier sind die Struktureigenschaften vergleichbar dem nativen VKB und dem Patellarsehnentransplantat (max. Last 2173 N; (Staeubli 1999)), eine Entnahme ist mit und ohne Knochenblock möglich, so dass die Quadrizepssehne sich auch gut bei Revisionsrekonstruktionen eignet.

Neben der noch fehlenden Langzeiterfahrung ist hier allerdings auch die Beeinträchtigung des Streckapparates (z.B. Gewichtheber) zu berücksichtigen, obwohl die Entnahmemorbidität geringer zu sein scheint als bei den Patellarsehnentransplantaten (Chen 2006; Gorschewsky 2007; Han 2008; Kim 2009; Kocher 2002; Krych 2008; Lee 2007; Lee 2004).

- **Allografts**

Allografts spielen im klinischen Alltag in Europa aufgrund der Gesetzeslage eine untergeordnete Rolle. Vorteile sind die fehlende Entnahmemorbidität und die Vermeidung der direkten Affektion der Muskelkraft. Zu berücksichtigen sind allerdings die Möglichkeit der Übertragung viraler oder bakterieller Infektionen, die Schwierigkeit und der Aufwand der Transplantatbeschaffung sowie der langsamere Remodeling (Heilungs-) prozess im Vergleich zu den autologen Transplantaten (Buchner 2010). Aus diesen Gründen sind Allografts nur bedingt für die Primärversorgung der isolierten VKB-Ruptur indiziert, ihre Indikation sollte aber in Ausnahmefällen überprüft werden (multiligamentäre Instabilität, multiple Revision). Metaanalysen zeigen, dass Allografts ähnliche mittelfristige (3–5 Jahre) klinische Ergebnisse erzielen können wie autologe Sehnen, solange Sterilisierungsprozesse vermieden werden, die das allogene Transplantat irreversibel schädigen (Krych 2008; Peterson 2001).

### 1.5.2.2 Femorale Tunnelposition

Die Tunnelpositionierung der VKB-Rekonstruktion ist einer der wichtigsten Faktoren, die das klinische Ergebnis bestimmen. Fehlplatzierungen sind der häufigste Grund der Revisionschirurgie bei Patienten mit persistierender Instabilität. Um postoperative Bewegungseinschränkungen im Sinne von Extensions- oder Flexionsdefiziten oder Störungen der Gelenkskinematik mit verbleibender Instabilität zu vermeiden, sollte das Ziel des VKB-Ersatzes eine möglichst anatomiegerechte Wiederherstellung der zerstörten Strukturen sein (Mayr 2010).

#### - Femorale Landmarken und Visualisierung

Im klinischen Alltag wird der femorale Tunnel als Erstes angelegt. Damit der Tunnel anatomisch richtig positioniert werden kann, ist die Darstellung und Visualisierung des femoralen Ursprungs von essentieller Bedeutung. Hierfür ist das Ablösen der am posterioren Femurkondylus inserierenden Kapsel notwendig. Die Kapselverwachsung und ggf. bestehende vordere oder hintere Osteophyten können zu ungewollter Abweichung von der geplanten Tunnelposition führen. Lange Zeit galt die hintere Begrenzung der Fossa interkondylaris als einzige anatomische Landmarke. Im angloamerikanischen Bereich wird dieser Punkt häufig als „over the top“ Position bezeichnet und dient als Widerlager, um Zielgeräte zur femoralen Positionierung zu verwenden (Mayr 2010) (Abbildung 10).

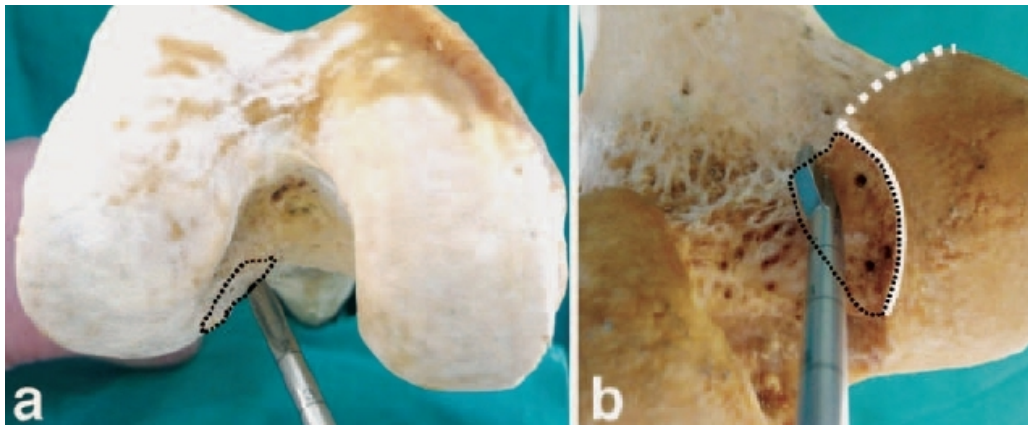


Abbildung 10 Zielgeräte zur Platzierung des femoralen Tunnels nutzen häufig die hintere Begrenzung der Fossa interkondylaris als Widerlager (a). Eine zusätzlich Landmarke ist der Übergang der Knochen-Knorpel-Grenze (durchgehende Linie) zur Linea interkondylaris (gestrichelte Linie) (Mayr 2010).

Eine häufige Erhebung vor der Linea interkondylaris ist die so genannte „resident's ridge“, welche bei falscher Benutzung als Widerlager für das Zielgerät zu einer anterioren Fehlanlage des femoralen Bohrkanal führt. Zusätzlich spiegelt die Anheftung der VKB Fasern an der Linea interkondylaris nur die hintere obere Begrenzung des VKB Ursprunges wider. Dieser Punkt korreliert mit dem Ursprung der Fasern, die dem anteromedialen (AM) VKB-Bündel zugeordnet werden können.

Das funktionell zweite VKB-Bündel, das posterolaterale (PL) Bündel, kann nur schwer von der Linea interkondylaris referenziert werden (Mayr 2010). Grund dafür ist die Ausdehnung der VKB Insertion entlang des Knorpel-Knochenüberganges der sich nach vorne unten erstreckt (Petersen und Zantop 2007; Zantop 2008). Aus diesem Grund wird empfohlen das Arthroskopieportal für die Visualisierung von anterolateral nach anteromedial zu wechseln. Damit ist eine gute Einsicht gewährleistet.

In diesem Zusammenhang erscheint auch die häufig verwandte Uhr-Position als problematisch, da es sich um eine strikte 2-dimensionale Beschreibung handelt. Da die Uhr-Position nur die Frontalebene und nicht die Sagittalebene beschreiben kann, sollte eine Tunnelbeschreibung isoliert basierend auf der Uhr-Position nicht erfolgen. Die Tunnelposition sollte die 3-dimensionale Entität für die Beschreibung behalten (Mayr 2010). Die femorale Insertionszone des VKB hat eine ovale bis halbmondartige Form mit einem Längsdurchmesser von ca. 18mm und einem Querdurchmesser von ca. 11mm (Girgis 1975). Die Insertion kann im Rahmen einer Einzelbündelrekonstruktion mit einem einfachen Tunnel von ca. 8–10mm oder im Rahmen einer Doppelbündelrekonstruktion mit 2 Tunneln mit Durchmessern von 6–7mm für das AM-Bündel und 5–6mm für das PL-Bündel ausgefüllt werden. Das Zentrum des AM-Bündels ist in der femoralen Notch oben und hinten gelegen, während das PL Bündel unten und vorne inseriert (Mayr 2010; Woo 2002; Zantop 2008).

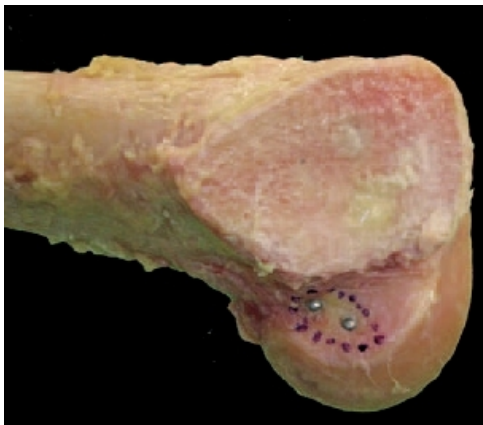


Abbildung 11 Femoraler Ursprungs des VKBs in 90° Flexion (punktierte Linie) Das Zentrum der beiden Bündel AM und PL ist mit K-Drähten markiert (AM high deep, PL low shallow) (Mayr 2010; Petersen und Zantop 2007)

### **-Techniken der Bohrkanalanlage**

Der femorale Tunnel kann in arthroskopischer Technik in drei unterschiedlichen Ansätzen angelegt werden: Transtibiale Technik (welche bei den von uns untersuchten Kniegelenken verwendet wurde), Outside/in Technik, Mediale Portaltechnik.

Bei der *transtibialen Technik* wird der femorale Tunnel durch den zuvor angelegten tibialen Tunnel angelegt. Die Technik ist schnell und zeigt nur eine geringe Affektion des Hoffa'schen Fettkörpers. Abebe et al. konnten allerdings zeigen, dass eine anatomische Platzierung des femoralen Bohrkanals nur in seltenen Fällen zu erreichen ist (Abebe 2009).

Damit bringt die *transtibiale Technik* die Gefahr der steilen femoralen Fehlplatzierung der so genannten „high-noon“ Position. Dieses Problem kann nur durch einen stark horizontal angelegten tibialen Tunnel erleichtert werden, dabei besteht jedoch wiederum die Gefahr einer Läsion der Gelenkfläche des medialen Tibiaplateaus und ein großflächiger ovaler intra-artikulärer Tunnelausgang. Die transtibiale Technik ist daher für die femorale Tunnelplatzierung heute nicht mehr zu empfehlen (Mayr 2010).

Bei der sogenannten „*outside-in*“- Technik erfolgt die femorale Tunnelpositionierung über eine Zusatzinzision im Bereich des Tractus iliotibialis von proximal-lateral nach distal-medial.

Hierfür wird ein spezielles Zielinstrument verwendet. Ein Vorteil ist die unabhängige femorale und tibiale Tunnelposition was auch Vorteile bei Revisionseingriffen hat. Nachteile sind die Gefahr eines femoralen „blow out“ und eine mögliche Irritation des Tractus iliotibialis (Mayr 2010).

Bei der derzeit in der Abteilung für Sportorthopädie favorisierten medialen Portaltechnik erfolgt die femorale Tunnelanlage durch den anteromedialen oder einen zusätzlich angelegten medialen Arthroskopiezugang. Der femorale Tunnel wird dabei unabhängig von der tibialen Tunnelgröße und –position angelegt und kann somit auch bezüglich des Durchmessers individuell angepasst werden. Ein wichtiger Vorteil ist die sichere und einfache Korrekturmöglichkeit der femoralen Tunnelposition mit der K-Draht-Positionierung durch das mediale Portal. Das anteromediale bzw. mediale Portal sollte medial und knapp über dem Innenmeniskusvorderhorn angelegt werden. Eine vorausgehende Sondierung mit der Kanüle ist wichtig, um eine zu hohe (Gefahr kurzer femoraler Tunnel), zu tiefe (Gefahr der Schädigung des Innenmeniskusvorderhornes) und zu mediale Portallokalisation (Gefahr iatrogenen Knorpelläsion am medialen Femurkondylus beim Bohrvorgang) zu vermeiden. Da die Nachteile, wie schlechtere Visualisierung bei hoher Knieflexion und der limitierte Einsatz älterer transfemorale Fixationssystemen im Vergleich zu den Vorteilen dieser Technik nur von untergeordneter Bedeutung erscheinen, ist die mediale Portaltechnik die zur Zeit empfohlene Technik (Mayr 2010; Petersen und Zantop 2007; Zantop 2008).

### ***1.5.2.3 Tibiale Tunnelposition***

#### **- Tibiale Landmarken und Visualisierung**

Die Visualisierung der tibialen Insertion erfolgt mit dem Arthroskop über das hohe anterolaterale Portal und Blickrichtung auf die 6-Uhr-Position. Bei geringeren Flexionsgraden (60°) ist eine gute Übersicht ohne Beeinträchtigung durch den Hoffa'schen Gelenkkörper gegeben. Die Einteilung der VKB Fasern in 2 unterschiedliche funktionelle Bündel richtet sich nach dem tibialen Insertionsgebiet. Die Fasern des AM-Bündels setzen im anteromedialen Insertionsgebiet an, während die Fasern des PL-Bündels im posterolateralen Bereich des tibialen Insertionsgebietes ansetzen. Beide Bündel zusammen bilden eine dreieckige Form. Diese aufgefächerte charakteristische Form wird im Schrifttum oft als „Entenfuß“ bezeichnet wird (Duck's foot)(Mayr 2010). Die tibiale Insertionszone befindet sich zwischen der medialen und lateralen tibialen Eminentia intercondylaris und deren ventralen Ausläufern. Die anatomische Landmarke für die tibiale AM-Insertion ist die hintere Begrenzung des Außenmeniskusvorderhornes.



Die PL-Insertion ist dorsal durch den Vorderrand des hinteren Kreuzbandes begrenzt. Ziel der tibialen Tunnelplatzierung sollte eine anatomische Bohrkanallage sein. Bei einer Doppelbündel-Rekonstruktion sollten die Tunnel möglichst exakt in diesen Zonen liegen, bei einer Einzelbündel-Rekonstruktion dazwischen (Mayr 2010; Woo 2002).

- **Technik der Bohrkanalanlage**

Im Vergleich zu älteren Rekonstruktionstechniken erzeugt diese deutlich weiter vorn platzierte Tunnellage allerdings bei vielen Operateuren Zweifel in Bezug auf eine freie postoperative Beweglichkeit ohne Extensionsdefizit. Früher erfolgte die tibiale Tunnelanlage weiter posterior mit Referenz zum HKB. Hiermit sollte ein Anstoßen des Transplantates an das Dach der Fossa intercondylaris, ein so genanntes Transplantat-„Impingement“ verhindert werden. Allerdings ist ein Kontakt von Fasern auch beim intakten VKB ohne auftretendes Streckdefizit physiologisch. Der tibiale Tunnel wird mit einem Zielgerät in outside-in-Technik angelegt (Mayr 2010; Petersen und Zantop 2007). In der Analyse der Anatomie des intakten VKB zeigt sich, dass das AM-Bündel mit zunehmender Streckung an Spannung verliert und sich um den vorderen Anteil der Fossa intercondylaris winden kann. Dieser Kontakt kann also als physiologisch angesehen werden.

Bei einer transtibialen Rekonstruktionstechnik mit einem steilen femoralen Tunnel und anteriorer tibialer Tunnellage (Anlage in 90°-Knieflexion) kann es zu einem vorzeitigen Anstoßen des Transplantates an das Dach der Fossa intercondylaris und somit zu einem Extensionsdefizit kommen. Eine tibial anatomische Tunnelposition in Kombination mit einer femoral anatomischen Kanallage führt zu einem größeren resultierenden Vektor gegen eine ventralisierende tibiale Translationskraft. In dieser Kombination kommt es zu keinem Extensionsdefizit trotz der anterioren tibialen Tunnellage (Mayr 2010; Zantop 2008).

#### ***1.5.2.4 Einzelbündel Rekonstruktion***

In der Einzelbündel Rekonstruktionstechnik sollte der femorale Bohrkanal in der Mitte der femoralen Insertion platziert werden. Da der Punkt der größten Isometrie außerhalb der femoralen Insertion lokalisiert ist und somit nicht anatomisch ist, wird das Konzept der Isometrie orientierten femoralen Tunnelplatzierung nicht mehr verfolgt. Vielmehr wird eine die Anatomie respektierende Tunnelposition mit Berücksichtigung der funktionellen Bündelstruktur angestrebt. Der Tunnel sollte zur Sicherung der Rotationsstabilität neben Fasern des AM-Bündels auch Fasern des PL-Bündels rekonstruieren. Die Portalanlage ist ein wichtiger Faktor, der den Verlauf der folgenden Operationsschritte deutlich beeinflusst. Das mediale Portal sollte in 90°-Flexion angelegt werden, um ein Kulissenphänomen beim Einnehmen der Knieflexionsstellung zum Bohren (ca. 110°–130°-Flexion) zu vermeiden. Das Portal wird medial und tief angelegt um eine iatrogene Knorpelläsion am medialen Femurkondylus zu verhindern. Nach Ablösen der Kapsel erfolgt das Einbringen eines geeigneten Zielgerätes und die Probebohrung mit einem K-Draht. (Abbildung 12)



**Abbildung 12** K-Draht Platzierung nach der Probebohrung in der Mitte der alten Insertion des VKB in 120° Flexion. Das Arthroskop liegt dabei im antero-lateralen Zugang.

Nach dem Ankörnen erfolgt die Kontrolle der Position über den medialen Portalblick. Der femorale Tunnel sollte im Zentrum der VKB-Insertion angelegt werden (Mayr 2010) (Abbildung 12 und 13).



**Abbildung 13** Die Bohrung des Tunnels liegt mittig in der alten Insertion des VKB und der Durchzugsfaden zeigt den „shallow“ Rand des Bohrkanals. Die Bohrung erfolgte mit einem speziellen Portalzielgerät mit einem offset von 7mm (Fa. Arthrex, Karlsfeld) Sicht ins Kniegelenk über das anteromediale Portal in 80° Flexion.

Es gilt zu bedenken, dass sich die Orientierung des Ursprunges in arthroskopischer Knieflexionsstellung von der Extensionstellung deutlich unterscheidet. Das bedeutet, dass eine arthroskopisch scheinbar zu weit vorne und unten gelegene Tunnelposition, sich in Extensionstellung nach proximal und posterior dreht. Ein Belassen von Restfasern des VKB zur Markierung der Insertionszone („Footprint“) ist für die Orientierung hilfreich. Bei anatomischer Lage der Probebohrung wird der K-Draht anschließend bikortikal eingebracht. Hierbei muss eine hohe Knieflexion über 120 Grad eingenommen werden, da sonst aufgrund der geringen Angulation zum lateralen Femurkondylus die Gefahr eines Ausbrechens des femoralen Bohrkanals, ein sogenanntes „tunnel blowout“ besteht. Anschließend wird der K-Draht entsprechend dem Transplantatdurchmesser und abhängig von der Fixierungstechnik überbohrt. Die femorale Tunnelposition kann durch eine Visualisierung durch das mediale Portal dargestellt werden (Mayr 2010). (Abbildung 14)



**Abbildung 14** Darstellung des femoralen Bohrkanals mit Durchzugfaden, der für die Implantation des Transplantates benutzt wird

Als nächstes erfolgt die tibiale Platzierung des Bohrkanals, wobei auch hier die Lage des Kanals in der Mitte der tibialen Insertion sein sollte. Der tibiale Tunnel wird mit Hilfe eines Zielgerätes angelegt, das durch das mediale Portal in das Gelenk eingeschoben wird. Am Zielgerät lässt sich die Länge des tibialen Tunnels ablesen. Bei zu kurzem tibialen Tunnel sollte der Winkel des Zielgerätes in der Sagittalebene erhöht und somit der Tunnel verlängert werden. Die Tunnellänge kann für Knochenblocktransplantate (BPTB) oder Hamstring-Transplantate mit geplanter extra-kortikaler Fixation wichtig sein.

Zunächst wird über den Zielbügel ein K-Draht im Insertionsgebiet platziert. In Extension sollte es zu keinem Anschlag des K-Drahtes am Dach der Fossa intercondylaris kommen. Bei anatomischer Position wird der Draht mit einem dem Transplantatdurchmesser angepassten Bohrer überbohrt (Mayr 2010) (Abbildung 15).



**Abbildung 15** Anatomische Lage des K-Drahtes (2), welcher jetzt mit einem Bohrkopf entsprechend dem Durchmesser des Transplantates, überbohrt werden kann. Die Knie befindet sich in 70-80°Flexion und das Arthroskop liegt im anterolateralen Zugang. (1) Tibialer Ansatzpunkt des VKB, (2) K-Draht, (3) medialer Femurkondylus, (4) lateraler Femurkondylus, (5) z.T alte Fasern des originalen VKB.

Anschließend wird das Transplantat mit Hilfe des Führungsfadens über den tibialen Bohrkanal ins Gelenk und dann weiter in den femoralen Bohrkanal gezogen. Die Fixation des Transplantates femoral kann mit verschiedenen Techniken verankert werden (z.B. gelenkfern: „Endobutton CL“ „Suture disc“ (Smith&Nephew, Marl), gelenknah: bioresorbierbare Interferenzschraube).

In vorliegender Studie wurden die Transplantate mit bioresorbierbaren Interferenzschrauben (Fa. Arthrex, Karlsfeld) gelenknah fixiert. Dabei wird das Transplantat zwischen der Schraube und der knöchernen Wand des Bohrkanals eingeklemmt. Für eine Vorspannung des Transplantates wird das Kniegelenk unter straffem Zug am tibialen Ende des Transplantats 10-mal durch den vollen Bewegungsumfang gebeugt und gestreckt, bevor es tibial fixiert wird (Kim 2009). Anschließend erfolgt eine letzte arthroskopische Kontrolle der Spannung, Position, sowie eines etwaigen Notchimpingments.

### **1.5.2.5 Doppelbündel Rekonstruktion**

Die Strategie der femorale Tunnelanlage bei einer Doppelbündelrekonstruktion gleicht dem Ablauf der Einzelbündeltunnelanlage. Bei einem kleinen femoralen Insertionsareal sollte keine doppelte femorale Tunnelanlage erfolgen. Bei doppelter Tunnelanlage besteht auch die erhöhte Gefahr einer Fehlplatzierung. Daher ist eine Doppelbündelrekonstruktion bei unklarer Größe der Insertion und nicht ausreichender Visualisierung nicht zu empfehlen (Mayr 2010). Das AM-Bündel entspringt im oberen und hinteren Anteil; das PL-Bündel entspringt im vorderen unteren Anteil des femoralen Ursprunges (Abbildung 16). Um iatrogene Schäden am Peroneusnerv zu vermeiden erfolgt die Überbohrung in mindestens 100° Flexion. Die Distanz zwischen dem Zentrum der Insertionszone des AM- und PL-Bündels beträgt ca. 8–10mm. Somit kann auch bei einer Tunnelgröße von 6–7 mm für das AM- und 5–6mm für das PL-Bündel bei normaler Insertionsgröße eine gute knöchernen Brücke erhalten werden (Brucker 2005; Brucker 2006; Mayr 2010).



**Abbildung 16** Darstellung der femoralen Tunnels mit Durchzugsfäden nach Überbohrung mit 7mm (AM Bündel, rechts im Bild) und 6mm (PL Bündel links im Bild) mit Hilfe des anteromedialen Portals.

Um ein enges Anliegen der Transplantate an der Tunnelwand zu gewährleisten, ist jedoch ein möglichst kleiner Durchmesser der Bohrkanäle zu wählen. Der Abstand des PL-Bündels vom Knorpel-Knochen Übergang beträgt 5–6mm.

Als Transplantate für eine Doppelbündel-Rekonstruktion eignen sich am besten die Sehnen der Mm. semitendinosus et gracilis, die über eine quere Inzision am Pes anserinus angeschlossen und mit einem Sehnenstripper entnommen werden. Sie werden auf einem separaten Tisch abhängig von Ihrer Breite präpariert und von Muskelgewebe befreit. In der Regel werden die beiden Transplantate doppelläufig angelegt, wobei die dickere Sehne des M. semitendinosus für das AM-Bündel und die Sehne des M. gracilis als Transplantat für das PL-Bündel verwendet wird. In der Länge beträgt für das AM- und das PL-Transplantat ungefähr 14 cm bzw. 12 cm und im Durchmesser 7 mm bzw. 5 mm (Brucker 2005).

In vorliegender Arbeit wurden analog zu Lorenz et al. zunächst die tibialen Bohrkanäle angelegt (Lorenz 2007). Hierzu wurden zwei Kirschner-Drähte in das Zentrum des tibialen AM- und PL-Bündels gesetzt. Auf einen ausreichenden Abstand der Drähte am Eintrittspunkt der Drähte am Tibiakopf von mindestens 2cm wurde geachtet. Die Bohrdrähte wurden mit den der Größe der Transplantate entsprechenden Bohrern, meist 7mm für das AM-Bündel und 5mm für das PL-Bündel überbohrt. Der femorale AM-Tunnel wurde transtibial mit einem Zielgerät in mindestens 110° Beugung angelegt. Hierzu wurde ein Bohrdraht bikortikal vorgelegt und auf eine Tiefe von 25mm mit einem Kronenbohrer der entsprechenden Größe (meist 7mm) überbohrt. Über ein zusätzliches mediales Arthroskopieportal erfolgte mit einem weiteren Zielgerät die Anlage des femoralen PL-Tunnels. Hierzu wurde in 90° Beugung ein Bohrdraht bikortikal vorgelegt und mit einem Kronenbohrer auf 20mm Tiefe überbohrt. Nach sorgfältigem Ausspülen des Bohrmehls erfolgte der Einzug zunächst des AM-Bündels. Die femorale Fixierung erfolgte mit Bio-Interferenzschrauben (Fa. Arthrex, Karlsfeld) entsprechend der Größe des Bohrkanals. Im Anschluss wurde das PL-Bündel eingezogen und mit einem Swive Lock-Anker 5,5x19mm (Fa. Arthrex, Karlsfeld) fixiert. Die tibiale Fixierung erfolgte mittels Bio-Interferenzschrauben in 45° und 15° Beugung für das AM- bzw. das PL-Bündel.

Diese transtibiale Technik gilt aufgrund der schwer oder gar nicht erreichbaren anatomischen femoralen AM-Insertion inzwischen als obsolet. Es soll deshalb, auch wenn sämtliche Patienten dieser Studie in der alten Technik operiert wurden, die derzeit angewendete Technik hier beschrieben werden. Der femorale AM-Tunnel wird dabei als erstes platziert und muss im anatomischen Ursprung zu liegen kommen (deep und high). Hierfür kann ein Zielgerät mit 4-5mm off-set über ein anteromediales oder mediales Arthroskopieportal verwendet werden. Nach Ankörnen wird der mediale Portalblick durchgeführt. Bei anatomischer Position wird der anschließend bikortikal eingebrachte K-Draht abhängig von der geplanten Fixierungstechnik endgültig überbohrt (Abbildung 16). Das Zentrum des PL-Tunnels wird mit einer Probebohrung unter Verwendung eines speziellen PL-Bündel Zielgerätes oder frei Hand festgelegt. Nach Kontrolle über den medialen Portalblick erfolgt wiederum das Überbohrendes bikortikalen K-Drahtes. Der abschließende Blick durch das mediale Portal dokumentiert die femorale Tunnelposition. Das Zentrum des tibialen AM-Tunnels wird auf Höhe des Außenmeniskusvorderhorns geplant, während das Zentrum des PL-Tunnels posterolateral knapp ventral des HKBs angelegt wird (Mayr 2010) (Abbildung 17).



**Abbildung 17** Positionierung der beiden K-Drähte bei der Doppelbündelrekonstruktion des VKB. Lage der beiden K-Drähte in den alten anatomischen Ansätzen des nativen VKB. Die Sicht erfolgt über das anterolaterale Portal und das Knie befindet sich in 70-80° Flexion. (1) K-Draht für AM-Bündel, (2) K-Draht für PL-Bündel, (3) laterales Tibiaplateau, (4) lateraler Femurkondylus, (5) mediales Tibiaplateau, (6) medialer Femurkondylus.

Der Abstand zwischen diesen beiden Bohrdrähten ist ca. 8–10 mm. Somit kann bei umsichtiger Überbohrung auch tibial eine Brücke zwischen den beiden Tunneln erhalten werden. Über einen tibialen Zielbügel werden die zwei K-Drähte in die anatomische Insertionszone eingebracht. Am Eintrittspunkt an der Tibia sollten die Drähte einen Abstand von mind. 2cm haben um eine Konfluenz der Kanäle zu vermeiden. Bei regelrechter Lage der K-Drähte und Überprüfung eines etwaigen Notchimpingments in voller Extension erfolgt die Überbohrung der K-Drähte entsprechend der Transplantatdurchmesser. Zwei Fadenschlaufen werden in den entsprechenden Bohrkanälen zum Einzug der Transplantate eingelegt (Abbildung 18). Zunächst erfolgt über eine Fadenschlaufe der Einzug des AM-Bündels und die femorale Fixierung mit einer Bio-Interferenzschraube. Im Anschluss wird mit dem PL-Bündel auf gleiche Weise verfahren. Nach Präkonditionierung der beiden Transplantate durch zehnmaliges Durchbewegen des Kniegelenkes werden beide Transplantate in 10-20° Beugung mit Biointerferenzschrauben fixiert. Nach Fixation (Abbildung 19) wird überprüft, ob eine volle Streckung erreicht wird (Brucker 2005; Mayr 2010).



**Abbildung 18** Nach Überbohrung der beiden tibialen Bohrdrähte werden die beiden Fadenschlaufen in ihren respektiven Tunnels für das AM- und PL-Bündel durchgezogen. Blick vom anterolateralen Portal in 80° Flexion.



Abbildung 19 Darstellung der Doppelbündel-Rekonstruktion nach Fixation über das anterolaterale Portal in 80° Flexion.

## 1.6 Hypothesen

Ziel dieser Arbeit ist die folgende Haupthypothese zu beweisen:

- Die Bohrkanäle der operierten Patienten weichen nicht mehr als 5% von den Werten der anatomischen Ansatzpunkte der Kontrollgruppe (einer anatomischen Studie von Lorenz et al. (Lorenz 2009)) ab. Somit kann mit einer transtibialen Operationstechnik ein anatomisches Ergebnis der Bohrkanalanlage erzielt werden.

Die Nebenhypothesen lauten:

- Es besteht kein Unterschied zwischen den Operateuren und der ausgeführten Operation bezüglich der geplanten Bohrkanäle und Ansatzstellen im Knochen.
- Die Lage der tibialen Bohrkanäle hat einen Einfluss auf die Lage der femoralen Bohrkanäle

## 2 Material und Methode

### 2.1 Probanden

Es wurden 63 Patienten in Doppelbündel-Technik im Zeitraum von Mai 2004 bis November 2005 operiert. Mit den weiter unten aufgeführten Ein- und Ausschlusskriterien konnten 50 Patienten in die Studie eingeschlossen werden. Von diesen 50 Patienten waren 24 Patienten bereit sich mittels MRT und klinischer Untersuchung nachuntersuchen zu lassen. Die restlichen Patienten konnten entweder nicht mehr erreicht werden (n=26) oder waren aus verschiedenen Gründen nicht bereit sich in der Klinik untersuchen zu lassen: zu weiter Anfahrtsweg, keine Kostenerstattung, oder aus zeitlichen Gründen.

Bei den 24 untersuchten Patienten wurden 2 Datensätzen fehlerhaft aufgezeichnet und konnten nicht mehr wiederholt werden. Somit blieben 22 Patienten, deren Daten untersucht werden konnten.

Es wurden 7 weibliche und 15 männliche Patienten an 14 linken und 8 rechten Kniegelenken operiert und untersucht im Alter von 22 bis 51 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 32 Jahren zum Zeitpunkt der Untersuchung. Der Durchschnitt des Follow-up betrug 1 Jahr und 10 Monate zum Zeitpunkt der Untersuchung, wobei das kürzeste Follow-up 1 Jahr und das längste 2 Jahre und 6 Monate betragen.

Für die klinische und kernspintomographische Untersuchung lag ein genehmigter Ethikantrag der Universitätsklinik Ulm vor.

### **2.1.1 Einschlusskriterien**

Einschlusskriterien waren:

- Das Erreichen des Mindestalters von 18 Jahren zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung und das Einverständnis des Patienten.
- Die Rekonstruktion des VKB erfolgte nach der Doppelbündel-Methode, wobei die Sehnen des M. semitendinosus und des M. gracilis verwendet wurden.
- Es lag eine isolierte Ruptur des VKB ohne therapiebedürftige Begleitverletzungen z.B. am Meniskus, Knorpel oder HKB vor.
- Der Wohnort des operierten Patienten befand sich in München oder näherer Umgebung da keine Fahrtkosten rückerstattet wurden.

### **2.1.2 Ausschlusskriterien**

Ausschlusskriterien waren:

- Kontraindikationen für eine MRT-Untersuchung wie z.B. Schwangerschaft, Herzschrittmacher oder andere magnetische chirurgische Implantate.
- Revisions-Operationen nach bereits stattgehabter Kreuzbandplastik

## **2.2 Magnetresonanz-Tomographie**

### **2.2.1 Untersuchungsgerät**

Die Studie wurde an einem 1,5 Tesla Kernspintomographen MAGNETOM Avanto syngo MR B15 (Siemens AG, Erlangen) durchgeführt.



## 2.2.2 Verwendete Untersuchungssequenzen

Wichtig für die MRT Untersuchung sind die Protonen, vor allem wegen Ihrer Eigenschaft einen Spin zu besitzen. Durch den Spin, die Drehung um die eigene Achse, sind die Protonen magnetisch. Bei Applikation eines magnetischen Feldes richten sich die Protonen parallel in der Achse dieses Feld aus. Durch kurzes Ein- und Ausschalten kurzer elektromagnetischer Impulse kippen die Protonen aus ihrer parallelen Achse heraus und geben ein Signal ab. Dieses kann gemessen werden. Das Signal, welches durch die Kippung der Protonen gemessen werden kann, ist abhängig von der Protonendichte und damit dem Wassergehalt im Gewebe. Durch die Variation der Anregungsdauer und die Pausen zwischen den elektromagnetischen Impulsen sowie Kippung des elektromagnetischen Feldes lassen sich unterschiedlich kontrastierte Bilder erzeugen.

Die unterschiedlichen Wiederholungsraten der elektromagnetischen Impulse sowie unterschiedliche Messzeiten der Kippung der Protonen stellen die Hauptparameter der MRT-Untersuchung dar. Spezielle Sequenzen sind durch spezifische Repetitionszeiten und Echozeiten gekennzeichnet.

Für die Auswertung kam eine 3D-DESS (double echo steady state) Sequenz zur Anwendung, die zur Gruppe der Steady-State Gradientenechosequenzen gehört, welche auch bei kurzen Repetitionszeiten (TR) ein gutes Signal-zu-Rausch Verhältnis aufweisen und sich zudem durch zwei Haupteigenschaften kennzeichnen. Erstens ist die TR-Zeit bei steady state Sequenzen zu kurz, damit die transversale Magnetisierung zerfallen kann bevor der nächste elektromagnetische Puls appliziert wird und zweitens sind die schnittflächenselektiven elektromagnetischen Pulse gleichmäßig verteilt. Wenn Phasen-kohärente elektromagnetische Pulse mit gleichem Flipwinkel appliziert werden mit einer konstanten TR-Zeit, welche kürzer ist als die T<sub>2</sub>-Zeit des Gewebes wird ein dynamisches Gleichgewicht zwischen der transversalen und longitudinalen Magnetisierung erreicht (Chavhan 2008). Dieses Gleichgewicht führt zu zwei verschiedenen Signalen. Das erste Signal S<sup>+</sup> ist ein post Erregungs-Signal welches aus FID (free induction decay) besteht, welcher vom letzten elektromagnetischen Puls abstammt. Das zweite Signal S<sup>-</sup> ist ein Reformierungsecho welches aus der Refokussierung des Residualechos kurz vor der nächsten Erregung entsteht (Gyngell 1988). Basierend auf der Theorie von Bruder et al. (Bruder 1988) erlaubt die simultane Aufzeichnung zwei verschiedener Steady-State Echosequenzen S<sup>+</sup> = FISP und S<sup>-</sup> = PSIF zwei verschiedene Bildsequenzen mit unterschiedlichem Kontrast. Die DESS-Sequenz welche eine 3D-Gradientenecho-Technik, bei der zwei verschiedene Gradientenechos (FISP-Sequenz und PSIF-Sequenz) innerhalb einer Wiederholzeit TR aufgenommen werden, addiert das FISP-Bild zum PSIF-Bild welches stark T<sub>2</sub>-gewichtet ist. Somit kombiniert die DESS-Sequenz die Signale der FISP- (Fast imaging with steady precession) und PSIF-Sequenz (eine zeitlich umgekehrte FISP-Sequenz) (Hardy 1996; Nitz 1999; Redpath und Jones 1988; Thomasson 1996) und weist einen ausgeprägten T<sub>2</sub>-Kontrast auf. Das primäre Anwendungsgebiet dieses Kontrastes ist die Gelenkdiagnostik, weil sie den Vorteil hat, dass bei dieser Sequenz die Gelenkflüssigkeit ein hohes Signal ausweist und sich somit besser von Knorpelstrukturen abgrenzen lässt.

Als Sequenzparameter wurden verwendet:

- Repetitionszeit TR = 18.28 ms
- Echozeiten: TE<sub>1</sub>/TE<sub>2</sub> = 5.16/12 ms (FISP- und PSIF-Echo )
- Flipwinkel:  $\alpha = 18^\circ$
- Auflösung: 0.8 x 0.8 x 0.8 mm (= isotrop)
- Field of view (3D-Block): 200 x 150 x 90 mm
- Messzeit: 8'06''

### **2.2.3 Durchführung der MRT Untersuchung**

Die Untersuchung dauerte durchschnittlich 25 min. Der Patient lag auf dem Rücken mit gestreckten Beinen. Er wurde gebeten in kurzer Hose mit dem Bein freiliegend und dem Knie in einer Spule liegend auf dem Tisch des Kernspintomographen Platz zu nehmen. Es wurde eine 8 Kanal-Knie-Spule mit 8 integrierten Verstärkern verwendet. Die Untersuchung erfolgte nach den integrierten 3D Messprotokollen des Geräteherstellers. Der Datensatz wurde mittels multiplaner Rekonstruktion nachbearbeitet und anschließend auf CD-ROM gespeichert.

## **2.3 Nachbearbeitung und Analyse der MRT-Daten**

Die weitere Analyse der Daten erfolgte mit dem Programm AMIRADev (Mercury Computer Systems, Inc, Merignac Cedex, France), einem wissenschaftlichem Visualisierungssystem für dreidimensionale Datensätze und der Fähigkeit zur interaktiven Bildsegmentierung und PowerPoint (Microsoft Inc, Redmond, USA), einem Präsentationsprogramm.

Folgende Operationen wurden mit AMIRA ausgeführt:

1. Rotation der Datensätze in der Transversalebene im Koordinatensystem, so dass die posterioren Begrenzungen des lateralen und medialen Kondylus des Femurs deckungsgleich sind.
2. Rotation der Datensätze in der Frontalebene, so dass die Tangente zum Tibiaplateau parallel zur x-Achse des Koordinatensystems ist.
3. Darstellung der Bohrkanäle in multiplanaren Ansichten, so dass das Zentrum der gelenknahen Bohrkanalöffnungen für alle Bohrkanäle femoral und tibial bestimmt und markiert werden konnte.

Die Vermessung der Landmarken wurde mit AMIRA und PowerPoint durchgeführt:

4. Auswertung nach Bernard (Bernard 1997) femoral und nach Stäubli (Staubli und Rauschnig 1994) femoral und tibial, zudem Auswertung der transversalen tibialen Ebene in Anlehnung an Bernard (Lorenz 2009).

Die Rotation der MRT-Datensätze ist notwendig, damit eine standardisierte Messung für jeden Patienten erfolgen konnte.

### **2.3.1 Verwendete AMIRA Funktionen**

#### *Alignment Skript:*

Das „Alignment“-Skript wurde auf Basis von TLC (Tool Command Language) von Dipl.-Ing. Christian König und Dr. biol. hum. Markus O. Heller aus dem Julius Wolff Institut Berlin entwickelt. Es erlaubt, Landmarken in der frontalen und axialen Ebene zu definieren und die gewünschte Rotation der MRT Daten am tibialen Plateau und der posterioren Begrenzung der Kondylen durchzuführen. Ausgehend von der Positionierung der Landmarken werden die rotatorischen Abweichungen des MRT-Datensatzes von der medio-lateralen Achse in der frontalen und axialen Ebene berechnet und der Bilddatensatz um den entsprechenden Winkel rotiert. Der so neu ausgerichtete 3D Datensatz wird dann abgespeichert und steht für weitere Messungen zur Verfügung.

Diese Korrektur ist notwendig, da die Knie der Patienten abweichend von der Längsachse gescannt wurden (Abbildung 20). Die erste Korrektur erfolgt in der frontalen/coronalen Ebene, so dass die axialen Schichten parallel zum tibialen Plateau verlaufen. Dazu wird ein coronales Schnittbild ausgewählt, in dem das Plateau definiert wird. Zwei Landmarken werden gesetzt und der Schnittwinkel zur Horizontalen berechnet. Der Datensatz wird dann um den entsprechenden Betrag rotiert und das neu entstandene Bild wird zwischengespeichert (Abbildung 21).

Die zweite Korrektur erfolgt in der transversalen/axialen Ebene, so dass die coronaren Schichten parallel zur posterioren Begrenzung der Kondylen verlaufen. Analog zur ersten Korrektur werden erneut zwei Landmarken an die posterioren Kondylen gesetzt und der Schnittwinkel der Verbindungsgerade mit der medio-lateralen Achse bestimmt. Der Datensatz wird erneut um diesen Schnittwinkel rotiert und ist nun fertig ausgerichtet (Abbildung 22). Der endgültige Datensatz wird dann abgespeichert und steht der Messung zur Verfügung. Diese Prozedur wurde an jedem Datensatz angewandt bevor die eigentliche Messung durchgeführt wurde.



Abbildung 20 MRT-Datensatz vor der Korrektur in der frontalen Schnittfläche

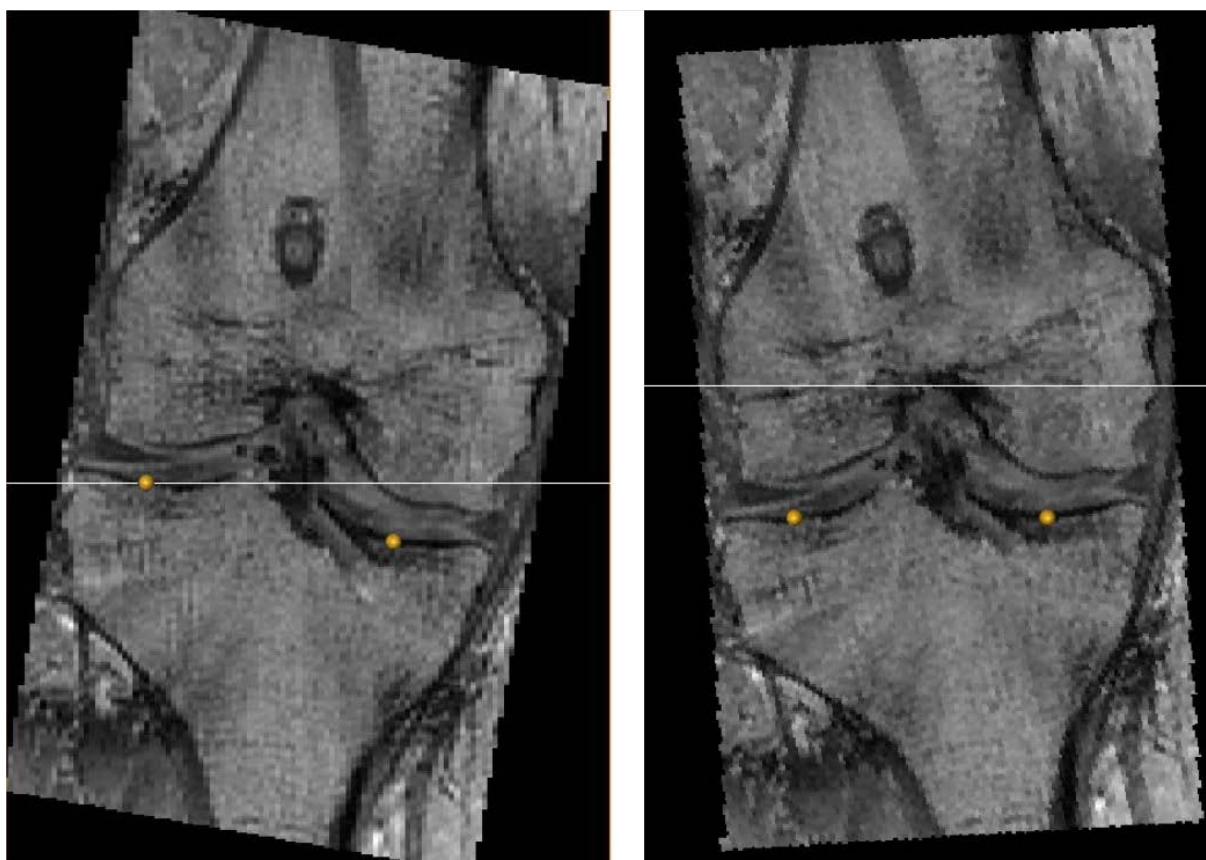


Abbildung 21 Tibia in frontaler Schnittfläche vor und nach der Korrektur des MRT-Datensatzes



Abbildung 22 Femur in axialer Schnittfläche nach der Korrektur des MRT-Datensatzes

Orthoslice-Funktion:

Die Orthoslice-Funktion in AMIRA stellt eine Schicht aus dem Datensatz in einer der drei aufeinander senkrecht stehenden Standardebenen dar. An diesem Schichtbild können Punkte, Längen und Winkel bestimmt werden, welche später in die Summationsbilder übertragen werden können. Die Orthoslice-Funktion dient vor allem zur detaillierten Darstellung verschiedener Strukturen.

Standard View-Modus:

Der Standard View ist ein spezieller Modus in dem die frontale, axiale und sagittale Schnittfläche gleichzeitig betrachtet und bearbeitet werden können. Er ermöglicht die gleichzeitige Manipulation eines Punktes in allen Standardebenen und somit dessen genaue dreidimensionale Lokalisation (Abbildung 23).

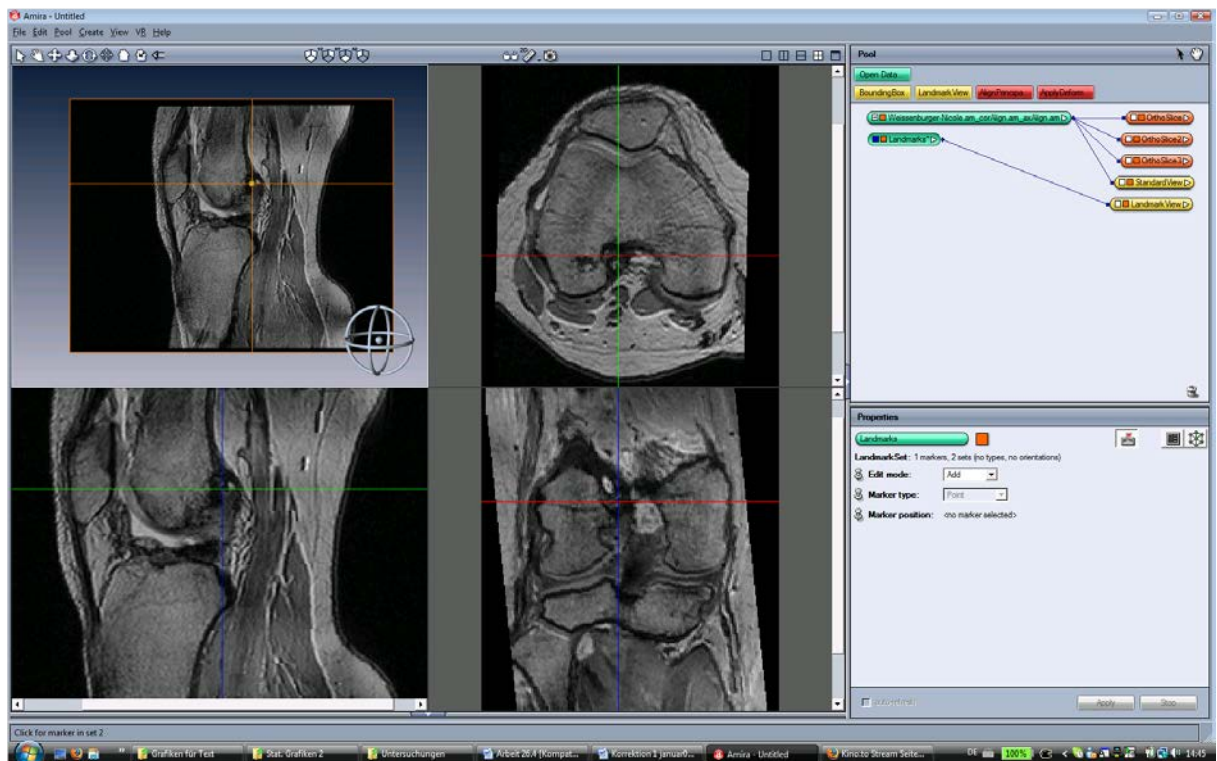


Abbildung 23 Standard View- Modus im AMIRA Programm

Projection View-Funktion:

Der Projection View-Funktion erzeugt ein Summationsbild aller Schnittbilder eines Datensatzes. Durch verschiedene Einstellungen lässt sich damit eine Darstellung erzeugen, die einem konventionellen Röntgen ähnlich ist. Der Projection View übernimmt Landmarken, die in einem einzelnen Orthoslice gesetzt wurden in das erzeugte Summationsbild. Es kann damit der in den einzelnen Schnittbildern festgelegte Austrittspunkt der Bohrkanäle im Summationsbild ausgewertet werden (Abbildung 24).

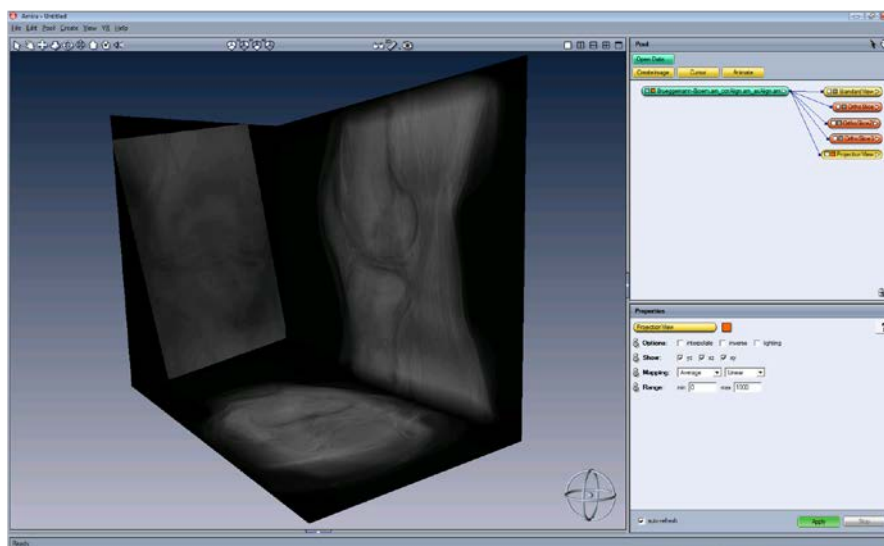


Abbildung 24 Projection View-Funktion im AMIRA Programm

#### Set Landmarks-Funktion:

Mit dieser Funktion des Programms können Landmarken in die einzelnen Orthoslices positioniert werden.

#### Measuring-Funktion:

Funktion zur Bestimmung der Distanzen und des Winkel in den einzelnen Orthoslices und Projection Views des Datensatzes. Die Kalibrierung ist durch die vorgegebene Größe der Voxel (*volumetric picture elements*) des MRT-Datensatzes gegeben.

### **2.3.2 Dezimalgitter**

Mit PowerPoint (Microsoft Inc. Redmond, USA) wurde ein Gitter mit 100 Unterteilungen in x- und y-Richtung erstellt. Das Gitter kann an die Größe der lateralen Interkondylarwand bzw. das Tibiaplateau angepasst werden. Die x- und y-Position der Messpunkte an Femur und Tibia werden somit in Relation zum Gesamtdurchmesser der Interkondylarwand bzw. des Tibiaplateaus in Prozent beschrieben. Modifiziert nach der Methode von Bernard (Bernard 1997) werden die Austrittspunkte der Bohrkanäle am Femur in der lateralen Ansicht des Knies bestimmt. Tibial werden die Austrittspunkte der Bohrkanäle in der axialen Schnittfläche der Tibia bestimmt (Abbildung 26 und Abbildung 31).

### **2.3.3 Auswertung**

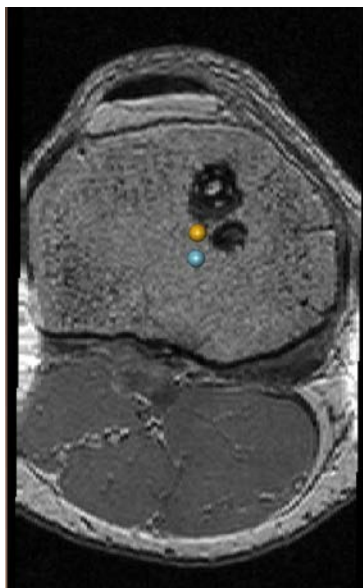
Die Auswertung erfolgte mit den oben beschriebenen Funktionen und Skripten des Programms AMIRADev (Mercury Computer Systems, Inc, Merignac Cedex, France) sowie mit Hilfe des Programms PowerPoint (Microsoft Inc./ Office, Redmond, USA).

#### ***2.3.3.1 Axialer Schnitt der Tibia***

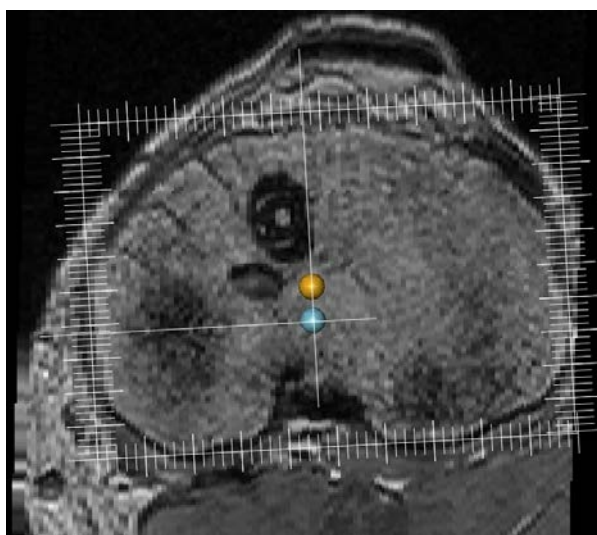
Die Bestimmung der gelenknahen tibialen Bohrkanalöffnungen in axialer, sagittaler und frontaler Ebene erfolgte im Standard View-Modus. Zunächst wurde die axiale Schnittfläche so eingestellt, dass die Bohrkanalöffnung noch vollständig sichtbar war. Unter gleichzeitiger Kontrolle der zwei anderen Ebenen wurde in die Mitte der Kanalöffnung eine Landmarke gesetzt. Die Koordinaten dieses Punktes wurden für weitere Messungen gespeichert. Dieses Verfahren wurde sowohl beim anteromedialen Bündel als auch beim posterolateralen Bündel angewandt. Der gelbe und blaue Punkt repräsentieren die Mitte der Bohrkanalöffnung des anteromedialen bzw. posterolateralen Bündels (Abbildung 25). Mit der OrthoSlice-Funktion wird ein Bildschirmfoto der ersten axialen Schnittfläche distal der tibialen Gelenkfläche, in der kein Gelenkknorpel der tibialen Gelenkfläche mehr zu erkennen ist angefertigt, wobei die beiden vorher markierten Landmarken ihre Position behalten.

Das Bild wird in PowerPoint übertragen und das Dezimalgitter aufgesetzt. Das Gitter wird tangential an die posteriore Tibiabegrenzung, die als Basis dient, gelegt. Die weiteren Gitterbegrenzungen werden an die laterale, mediale und anteriore Tibiakante platziert.

Aufgrund der interindividuell unterschiedlichen Kniegelenkgrößen wird die Position der Austrittspunkte der beiden Bündel in relativen Werten angegeben. Der Nullpunkt des Koordinatensystems wird am ventrolateralen Eckpunkt des Dezimalgitters definiert. Von diesem Punkt ausgehend werden die Positionen der Austrittspunkte der beiden Bündel des vorderen Kreuzbandes ausgemessen und in Prozent des Gesamtdurchmessers antero-posterior sowie medio-lateral angegeben (Abbildung 26).



**Abbildung 25 Tibia axial mit gesetzten Landmarken.**

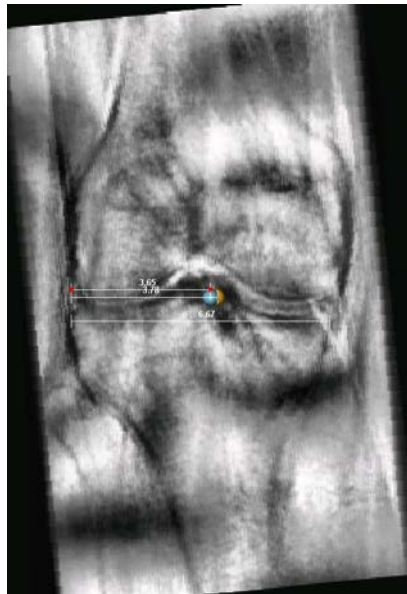


**Abbildung 26 Tibia axial mit aufgesetztem Dezimalgitter. Als Basis dienen die posterioren Kondylen, die mediale und laterale Begrenzung liegt rechtwinklig zur Basis tangential am Tibiaplateau. Die anteriore Begrenzung liegt parallel zur Basis tangential am Tibiaplateau**



### **2.3.3.2 Frontaler Schnitt der Tibia**

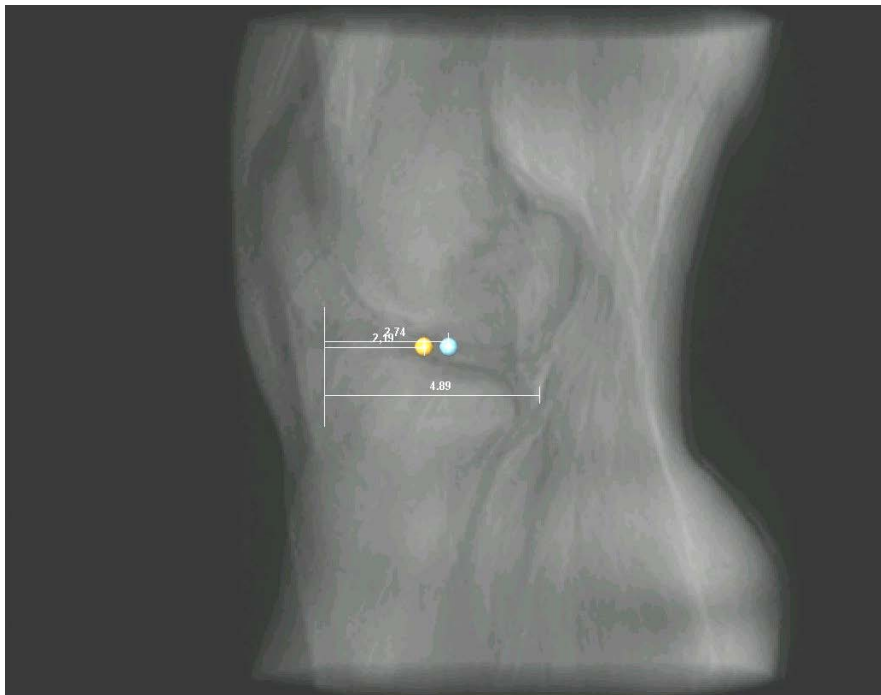
Der Datensatz wird im Standard View-Modus unter Einstellung der frontalen Schnittfläche aufgerufen, so dass die beiden austretenden Bündel AM und PL genau in der Mitte ihrer Austrittsstelle angeschnitten werden. Die Landmarken werden unter gleichzeitiger Kontrolle der zwei anderen Schnittflächen gesetzt (Abbildung 27). Nach Übertragung der Daten in den Projection View werden die Austrittspunkte als Ratio der gesamten Breite der Tibia zur Distanz vom lateralen Rand gemessen.



**Abbildung 27** Frontaler Projection View mit ausgemessenen Landmarken sowie der Gesamtbreite der Tibia.

### **2.3.3.3 Sagittaler Schnitt der Tibia**

Zur tibialen gelenknahen Auswertung der Bohrkanäle in sagittaler Schnittfläche nach Stäubli et al. (Stäubli und Rauschning 1994) wird der Datensatz erneut im Standard View-Modus aufgerufen. Unter Verwendung der gleichen Landmarken wie in der axialen Untersuchung wird die sagittale Schnittfläche als Hauptebene dargestellt. Ihre Position wird im Projection View nach Stäubli (Stäubli und Rauschning 1994) als Ratio zwischen dem längsten Durchmesser der Tibia, gemessen von der Vorderkante der Tibia bis zum posterioren Rand der Tibia, und der Distanz vom anterioren Rand aus gemessen bestimmt (Abbildung 28). Es wird analog bei jedem Patienten verfahren.



**Abbildung 28** Tibia sagittal in Projection View mit gesetzten Landmarken sowie Ausmessung nach Stäubli (Stäubli und Rauschnig 1994)

### ***2.3.3.4 Sagittaler Schnitt des Femurs***

Die Auswertung der Austrittspunkte in der sagittalen Schnittfläche am Femur erfolgt nach modifizierter radiologischer Quadranten Methode wie Bernard et al. (Bernard 1997) beschrieben. Der MRT-Datensatz wird im Standard View-Modus aufgerufen und die sagittale Schnittfläche wird eingestellt. Unter gleichzeitiger Berücksichtigung der anderen 2 Schnittflächen lässt sich der Austrittspunkt des AM-Bündels und des PL-Bündels an der lateralen Wand der Notch bestimmen (Abbildung 29). Die Landmarken werden in die Mitte des Bohrkanals in der sagittalen Schnittfläche platziert. Das resultierende Bild (Abbildung 30) wird als JPEG mit hoher Auflösung gespeichert. Mit Hilfe von PowerPoint wird ein Dezimalgitter dem Bild überlagert. Folgende Parameter wurden vor Anlegung des Dezimalgitters bestimmt um dessen Position genau definieren zu können.

- Distanz t: Diese definiert den gesamten sagittalen Durchmesser des lateralen Kondylus gemessen entlang der Blumensaatlinie und begrenzt durch den posterioren und ventralen Knochenrand des lateralen Kondylus (Bernard 1997).
- Distanz h: Diese definiert die Höhe des interkondylären Bereiches, gemessen von der Blumensaatlinie bis zur Tangente vom distalen subchondralen Knochen des Kondylus und parallel zur Blumensaatlinie.

Diese beiden Größen erlauben es die beiden Achsen x und y des Koordinatensystems des Dezimalgitters zu definieren und zu begrenzen. Der Ausgangspunkt (0;0) wird an der posterioren proximalen Ecke des lateralen Kondylus auf der Blumensaatlinie festgelegt. Ausgehend vom Ausgangspunkt und den beiden Achsen können die vorher bestimmten Punkte im neu definierten Koordinatensystem festgelegt werden. Durch seine relativen Werte ist das Dezimalgitter für jeden Patienten geeignet und unabhängig von dessen Kniegröße. (Abbildung 31)

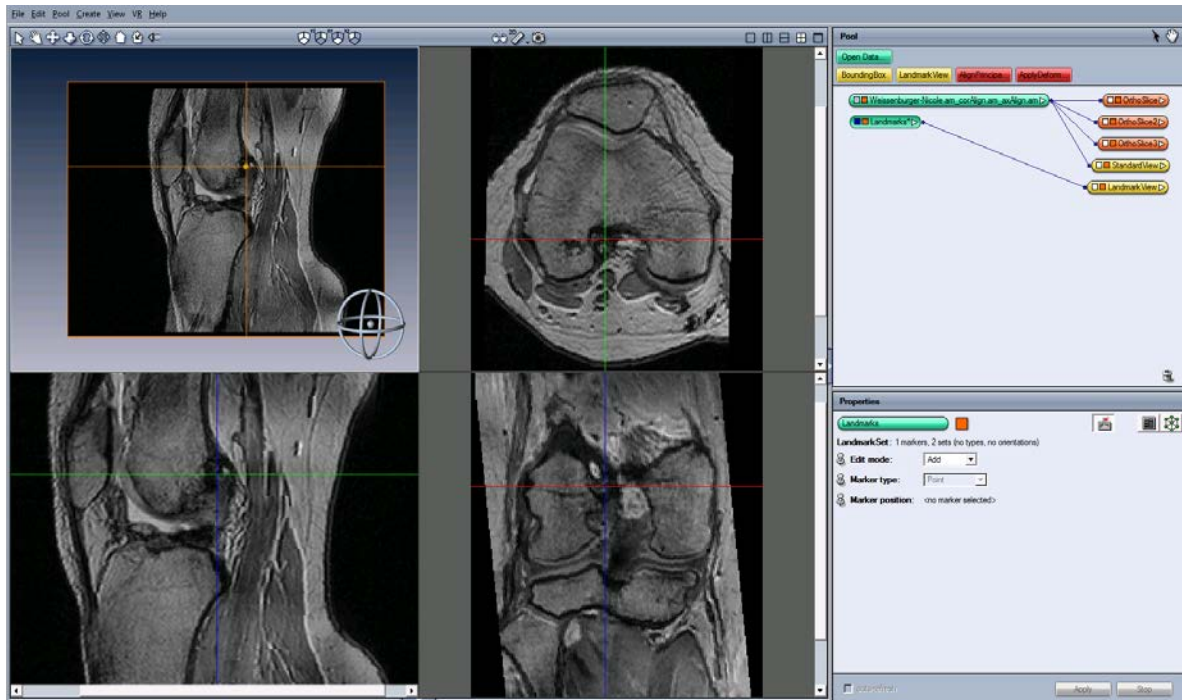


Abbildung 29 Standard View-Modus: Setzen der Landmarken am sagittal geschichteten Femur unter gleichzeitiger Kontrolle der zwei anderen Schnittebenen.

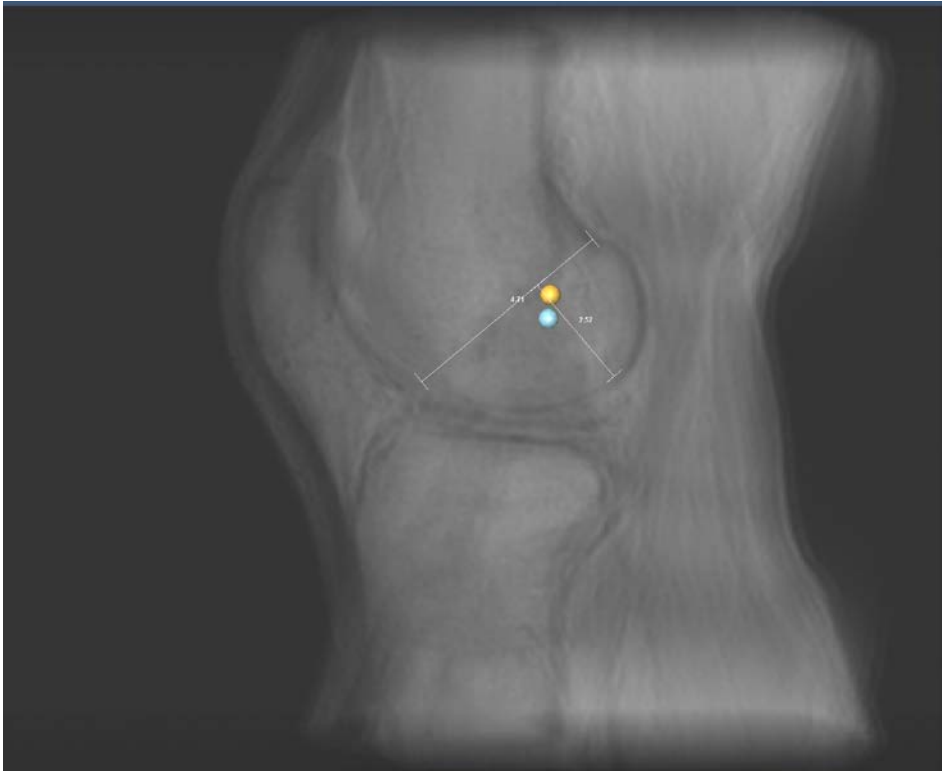


Abbildung 30 Femur sagittal im Projection View nach Setzen der Landmarken. Messung der Strecken t und h.

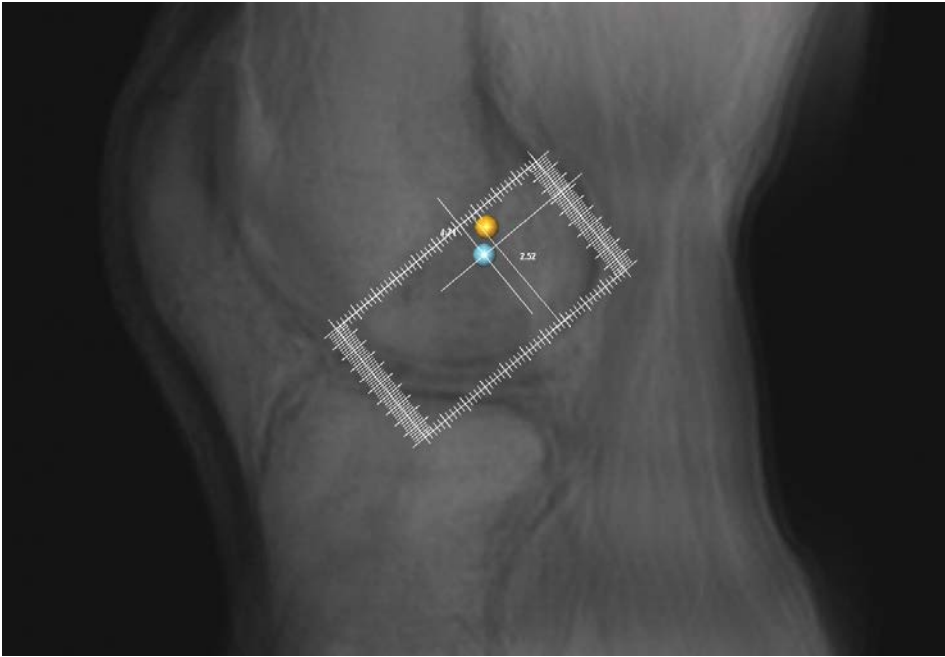


Abbildung 31 Femur sagittal im Projection View mit Dezimalgitter für die Ausmessung der Austrittspunkte modifiziert nach Bernard et al. (Bernard 1997)

### 2.3.3.5 Inklinaton des Daches der interkondylären Grube

Die Berechnung der Inklinaton des Daches der interkondylären Grube/Notch erfolgt nach der Technik von Howell et al. (Howell 1992). Der Winkel wird zwischen der Tangente der posterioren inferioren Grenze des interkondylären Daches und der sagittalen Mittelachse des Femurschaftes bestimmt. Dabei kommt die sagittale Schnittebene des MRT-Datensatzes im Projection View zur Anwendung. Es wird ein seitliches röntgenähnliches Bild erzeugt. Zunächst wird die Tangente eingezeichnet, danach folgend die Mittelachse des Femurschaftes, welche durch die Mitte von 2 vorher eingezeichneten Linien verläuft, die rechtwinkelig zum Femurschaft stehen. Der Winkel wird mit Hilfe von drei Punkten bestimmt, welche der Untersucher definiert (Measuring Function). Es handelt sich dabei um einen Punkt an der Tangente, einen an der Mittelachse und einen Punkt, der durch die Kreuzung der beiden anderen Geraden definiert ist (Abbildung 32).

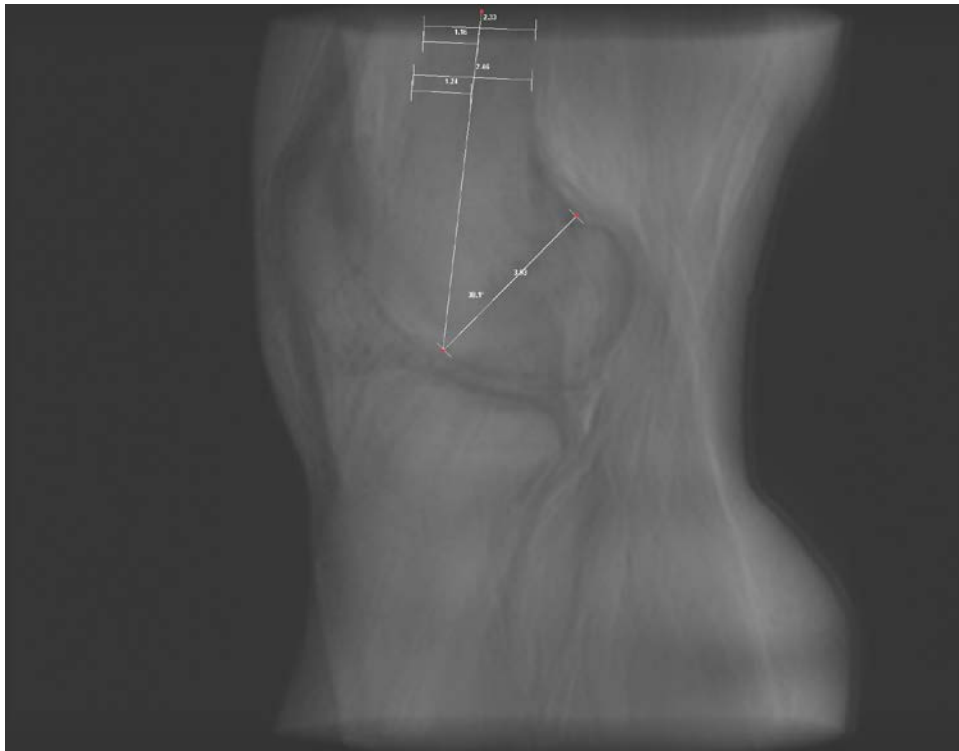


Abbildung 32 Ausmessung des Inklinationswinkels nach Howell et al. (Howell 1992)

## 2.4 Statistische Auswertung

Deskriptive Statistiken werden präsentiert als Median und Spannweite (Minimum, Maximum) für metrische Daten bzw. Anzahl und relative Häufigkeiten für kategoriale Daten. Zum Vergleich von Kontrollen und operierten Knien wurden für die eindimensionalen Größen Mann-Whitney-U-Tests und für die zweidimensionalen Größen bivariate Lokationstests, die eine multivariate Erweiterung des Mann-Whitney-Tests darstellen, durchgeführt. Als Kontrollgruppe dienen die Werte, die durch Lorenz et al. (Lorenz 2009) an 12 Leichenkniegelenken mit der gleichen Methode untersucht und in der gleichen Abteilung vermessen wurden.

Für sämtliche Tests wurde ein zweiseitiges Signifikanzniveau von  $\alpha=5\%$  festgelegt. Nonparametrische Tests wurden durchgeführt, da die Normalverteilungsannahme verletzt ist. Zur Veranschaulichung wurden Boxplots für die eindimensionalen und Streudiagramme für die zweidimensionalen Variablen erstellt. Es wurden ebenfalls Boxplots für die zweidimensionalen Variablen angelegt, nachdem diese in ein eindimensionales System übertragen wurden. Zum Vergleich der Chirurgen wurden die Ergebnisse der verschiedenen Operateure farblich markiert. Die Analysen wurden mit den statistischen Programmpaketen SPSS 16.0 (SPSS Inc., Chicago; USA) und R 2.8.0 (R Development Core Team (2008)) durchgeführt.

- **Mann-Whitney-Test**

Der Mann-Whitney-Test ist ein statistischer Test, der zur Überprüfung der Signifikanz der Übereinstimmung zweier Verteilungen dient. Er analysiert 2 Stichproben A und B mit  $x_1$  und  $x_2$  Werten. Dabei wird jeder Wert einer Stichprobe mit einem Wert der anderen verglichen. Die Nullhypothese besagt, dass  $A=B$  ist, also kein Unterschied zwischen den beiden Stichproben besteht.

Der Test kann einseitig ( $A<B$  oder  $A>B$ ) oder zweiseitig ( $A=B$ ) ausgelegt werden. Nachdem der kritische Wert  $\alpha$  festgelegt wurde (5%) kann überprüft werden, ob die Nullhypothese möglich ist oder verworfen werden kann.

- **Multivariater Rang-Test**

Der multivariate Rang-Test ist ein statistischer Test für die Häufigkeitsverteilung gepaarter Stichproben. Dieser Test erweitert den Vorzeichen-Test dadurch, dass nicht nur die Richtung der Differenz berücksichtigt wird, sondern auch die Stärke. Er zählt zu den nonparametrischen Tests, da er nicht abhängig vom Verteilungstyp ist.

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Femoral sagittal**

Die Identifikation des separaten AM- und PL-Bündels war bei allen 22 Patienten möglich.

Die einzelnen relativen Distanzen der gelenknahen Eintrittsstellen des vorderen Ersatzkreuzbandes an der medialen Wand des lateralen Kondylus wurden mit Hilfe des vorher angebrachten Dezimalgitters bestimmt. Die ausführlichen Daten sind in Tabelle 1 dargestellt.

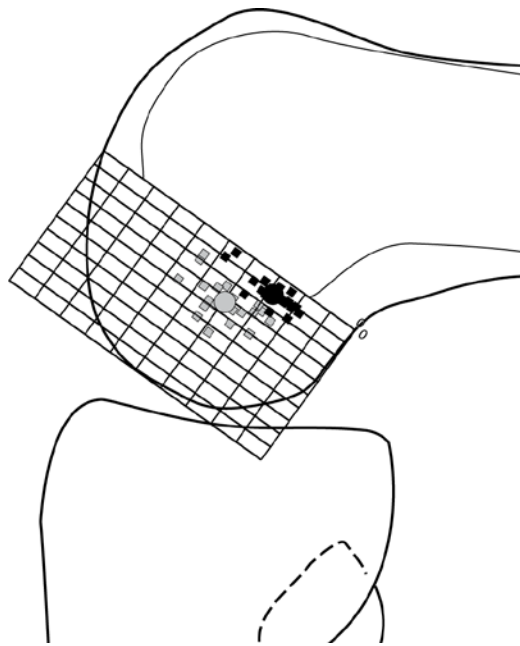
Der geometrische Mittelwert für den Mittelpunkt des Ansatzpunktes des AM-Bündels beträgt  $x = 28\%$  (range 18% - 48%; Standardabweichung (SD) 7,9%) und  $y = 12\%$  (range 4% - 22%; SD 4,7%). Für das PL-Bündel wurde ein Mittelwert von  $x = 40\%$  (range 26% - 57%; SD 8,9%) und  $y = 33\%$  (range 22% - 54%; SD 9,5%) gemessen. Der Mittelwert für die Distanz t und die Distanz h beträgt 4,5cm (range 3.93 - 5.24 cm; SD 0.28cm) bzw. 2,5cm (range 2.14 - 2.68cm; SD 0.15cm).

Abbildung 35 zeigt die einzelnen Punkte tibial und femoral jeweils verbunden. Hierbei zeigt sich eine Tendenz von zu weit oberflächlich ("shallow" in der Nomenklatur nach Amis et al. (Amis und Jakob 1998)) gebohrter femoralen Kanälen bei zu weit ventral angelegten tibialen AM-Tunneln, einem Problem der transtibialen Operationstechnik.

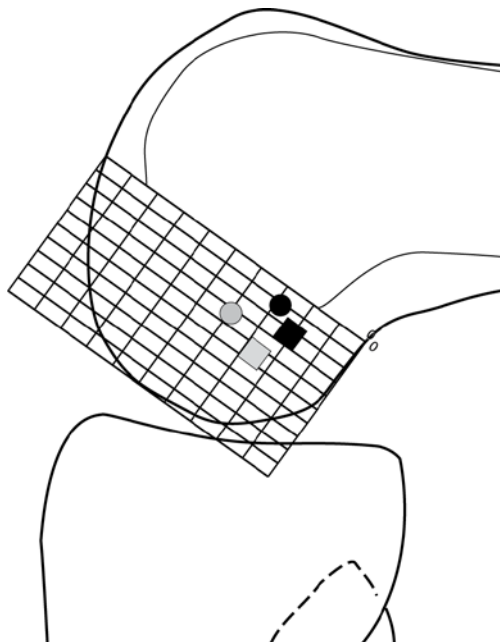
Der statistische Vergleich der 22 operierten Patienten erfolgte mit der Kontrollgruppe von Lorenz et al. (Lorenz 2009) und ergab einen statistisch signifikanten Unterschied  $p < 0,001$  für beide Bündel. (Abbildung 36 und 37)

Patient/Chirurg	AM x [%]	AM y [%]	PL x [%]	PL y [%]	t [cm]	h [cm]
1C	22	11	40	34	4,8	2,51
2C	30	15	33	32	4,66	2,43
3A	24	4	44	42	4,43	2,6
4A	30	14	38	28	4,71	2,52
5A	48	10	56	38	4,21	2,33
6B	29	10	34	42	4,66	2,51
7C	21	12	28	24	4,63	2,66
8C	30	10	38	28	4,43	2,68
9D	33	8	42	24	4,57	2,42
10A	20	10	24	26	4,5	2,44
11A	20	19	27	40	4,55	2,69
12B	32	14	48	32	4,63	2,32
13A	36	22	54	20	4,51	2,14
14A	24	12	42	38	4	2,49
15A	24	11	30	22	4,53	2,32
16B	26	22	44	38	5,24	2,56
17C	28	6	36	34	4,44	2,32
18B	23	10	30	28	4,34	2,59
19A	24	12	38	54	4,12	2,29
20A	36	12	44	28	4,53	2,59
21B	46	4	54	16	4,63	2,61
22D	18	12	44	50	3,93	2,43
Mittelwert	28	12	39	33	4,5	2,5
SD	7,9	4,7	8,9	9,6	0,28	0,15
Konfidenzintervall 95%	24,7 - 31,3	10,0 - 14,0	35,3 - 42,7	29 - 37	4,4 - 4,6	2,4 - 2,6

Tabelle 1 Ergebnisse des femoralen Ansatzes für das AM- und PL-Bündel



**Abbildung 33** Femorale Ansatzpunkte der operierten Patienten des AM-(schwarz) und PL-Bündels (grau) in 90° gebeugtem Kniegelenk mit Mittelwerten (Kreise) im Dezimalgitter



**Abbildung 34** Femorale Ansatzpunkte des AM-(schwarz) und PL-(grau) Bündel als Mittelwerte dieser Studie (Kreis) und den Werten der Kontrollgruppe (Lorenz 2009) (Quadrat)



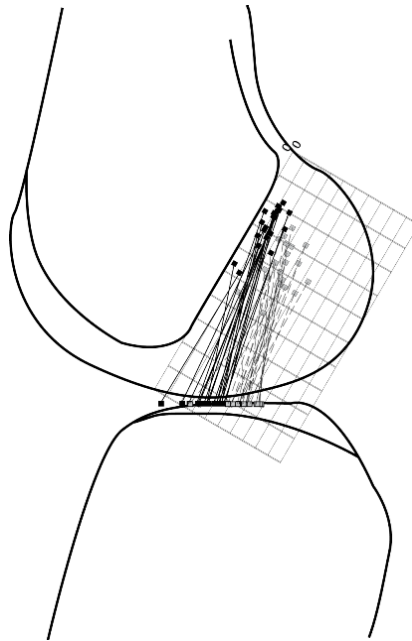


Abbildung 35 Zusammengehörende femorale und tibiale Punkte der AM-(schwarze Punkte, durchgezogene Linie) und PL-(graue Punkte; gestrichelte Linie)Bohrkanäle.

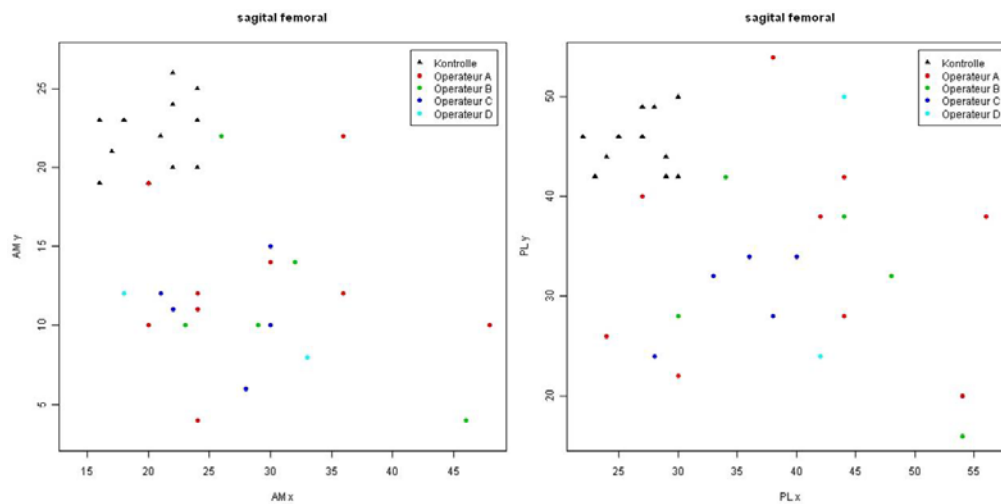


Abbildung 36 Statistische Auswertung der Ansatzpunkte des AM- und PL-Bohrkanäle der Patienten gegenüber der Kontrollgruppe (Lorenz 2007) (Leichenkniegelenke) mit Berücksichtigung der Operateure. Die Punkte werden in einem zwei Achsen-System aufgezeichnet. Die Farbkodierung der Punkte steht für den einzelnen Operateur. Die linke Abbildung zeigt das AM-Bündel und seine Verteilung der Ansatzpunkte im Vergleich mit der Kontrollgruppe. Die rechte Abbildung zeigt die entsprechende Darstellung für das PL-Bündel.

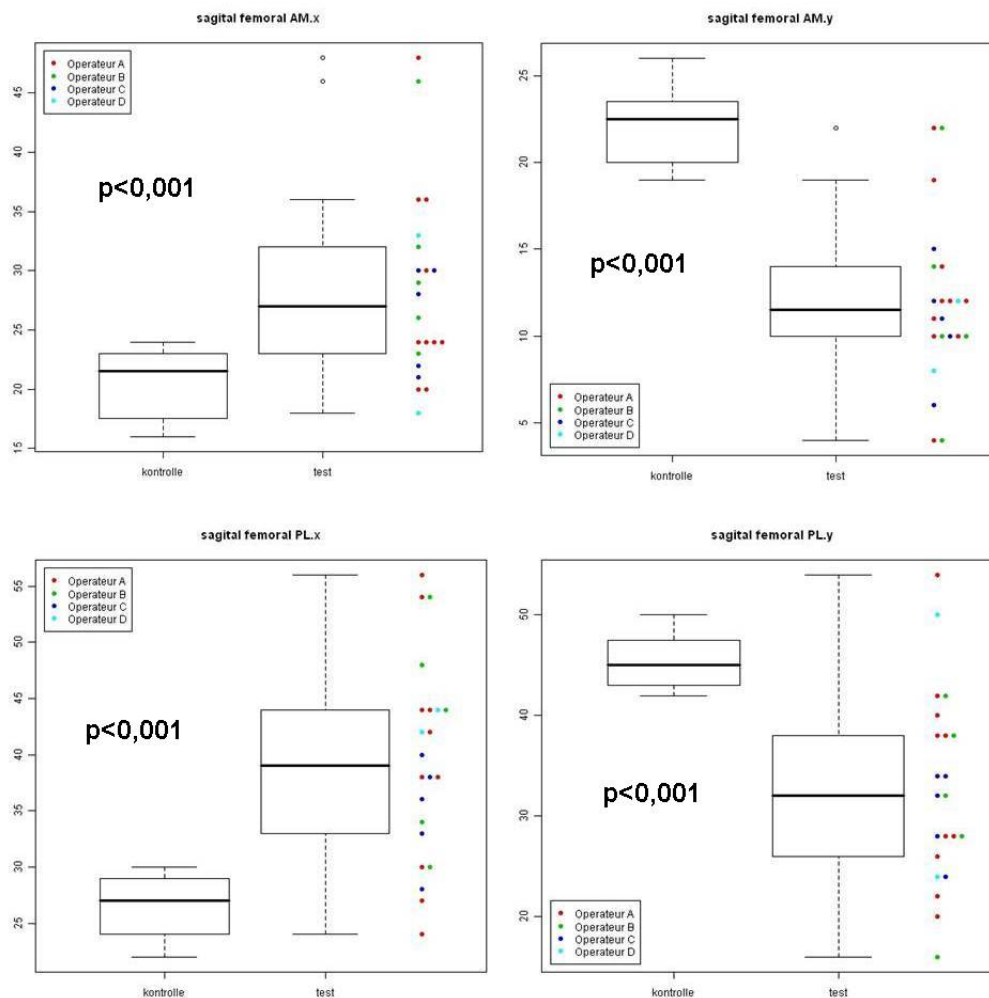


Abbildung 37 Statistische Auswertung der einzelnen Ansatzpunkte (x-Wert links; y-Wert rechts) des AM-(oben) und PL-(unten) Bündels am Femur sagittal.

### 3.2 Tibia sagittal

Eine Zusammenfassung der Messergebnisse der Untersuchung wird in Tabelle 2 dargestellt. In der sagittalen Schnittfläche wurden die Austrittspunkte als ratio zwischen der Gesamtbreite sagittal des Tibiaplateaus zum Abstand des anterioren Randes berechnet. Es konnte ein Mittelwert für das AM-Bündel von 43 % (range 28% - 53%; SD 5,5%) bestimmt werden. Analog konnte ein Mittelwert für das PL-Bündel von 54% (range 37% - 60%; SD 4,8%) bestimmt werden.

Der statistische Vergleich der 22 operierten Patienten mit der Kontrollgruppe mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests, ergab knapp keinen statistisch signifikanten Unterschied ( $p=0,054$ ) für das AM-Bündel. Jedoch zeigt der Test einen signifikanten Unterschied für das PL-Bündel ( $p= 0,018$ ). (Abbildung 39)

Tibia sagittal	AM [%]	PL [%]
1C	40	51
2C	47	58
3A	40	51
4A	49	60
5A	28	37
6B	43	53
7C	49	59
8C	35	49
9D	46	55
10A	40	55
11A	48	55
12B	43	52
13A	53	59
14A	40	54
15A	45	54
16B	45	55
17C	47	59
18B	46	54
19A	37	53
20A	41	52
21B	42	52
22D	45	56
Mittelwert	43	54
SD	5,5	4,8
Konfidenzintervall 95%	41 - 45	52 - 56

**Tabelle 2** Messergebnisse der tibialen Untersuchung sagittal der operierten Patienten. Die Buchstaben nach der fortlaufenden Nummerierung kennzeichnen den verantwortlichen Operateur

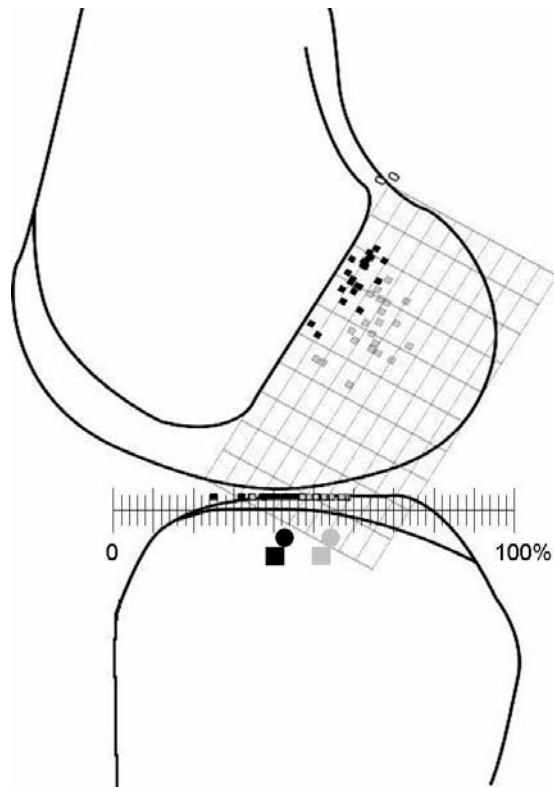


Abbildung 38 Ansatzpunkte des AM- (schwarz) und PL-Bündels (grau) in sagittaler Schnittfläche an der Tibia und dem Femur im Dezimalgitter. Die beiden größeren Kreise markieren die Mittelwerte dieser Studie und die beiden großen Quadrate die Mittelwerte der Kontrollgruppe (Lorenz 2009) des tibialen Ansatzes.

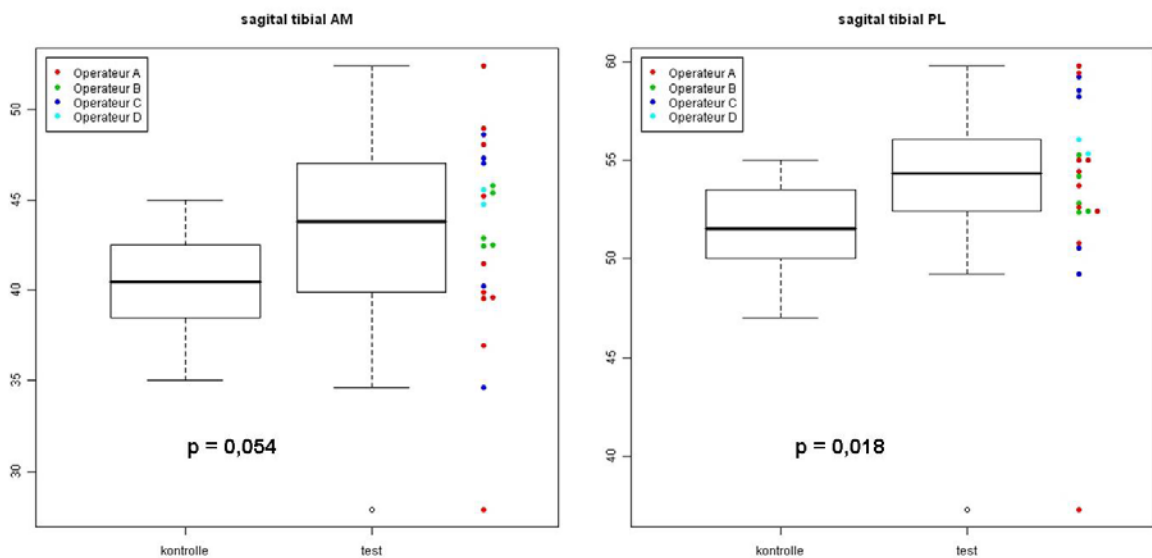


Abbildung 39 Statistische Auswertung der tibialen Ansatzpunkte in sagittaler Ansicht operierte Patienten vs. Kontrolle mit Berücksichtigung der Operateure

### 3.3 Tibia axial

Die Auswertung der Messergebnisse wird in Tabelle 3 präsentiert. Aufgrund der interindividuell unterschiedlichen Kniegröße erfolgt die Darstellung der Bohrkanalposition an der Tibia relativ zum Durchmesser in antero-posteriorer und medio-lateraler Ausrichtung. Bei allen 22 Patienten konnten die Kanäle für das AM-Bündel und PL-Bündel in der axialen Schnittfläche der Tibia separat determiniert und markiert werden. In der axialen Ebene konnten für das AM-Bündel folgende Positionen im Dezimalgitter bestimmt werden: x = 55% (range 42% - 62%; SD 4,3%), y = 45% (range 36% - 52%; SD 5,8%). Der Mittelwert für das PL-Bündel wurde mit x = 53% (range 4% - 55%; SD 4,1%) und y = 56% (range 40% - 62% ; SD 4,8%) bestimmt.

Die statische Auswertung mit Hilfe eines multivariaten Rang Tests ergab einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,001$ ) für das AM- und PL-Bündel im Vergleich mit der Kontrollgruppe (Abbildung 40 und 41).

Patient/Chirurg	AM x [%]	AM y [%]	PL x [%]	PL y [%]
1C	55	46	54	56
2C	56	52	56	62
3A	56	46	45	55
4A	58	52	54	62
5A	42	30	48	40
6B	58	48	57	58
7C	51	48	48	58
8C	56	36	55	50
9D	59	50	58	60
10A	57	42	56	57
11A	54	52	60	58
12B	56	43	53	52
13A	48	52	47	59
14A	62	39	61	54
15A	53	46	52	57
16B	56	46	55	57
17C	54	46	52	59
18B	55	40	54	54
19A	53	38	53	52
20A	50	40	49	53
21B	61	44	55	54
22D	56	49	54	60
Mittelwert	55	45	53	56
SD	4,3	5,8	4,1	4,8
Konfidenzintervall 95%	53,2 - 56,8	42,6 - 47,4	51,3 - 54,7	54 - 58

Tabelle 3 Messergebnisse der tibialen axialen Ausmessung der Austrittspunkte

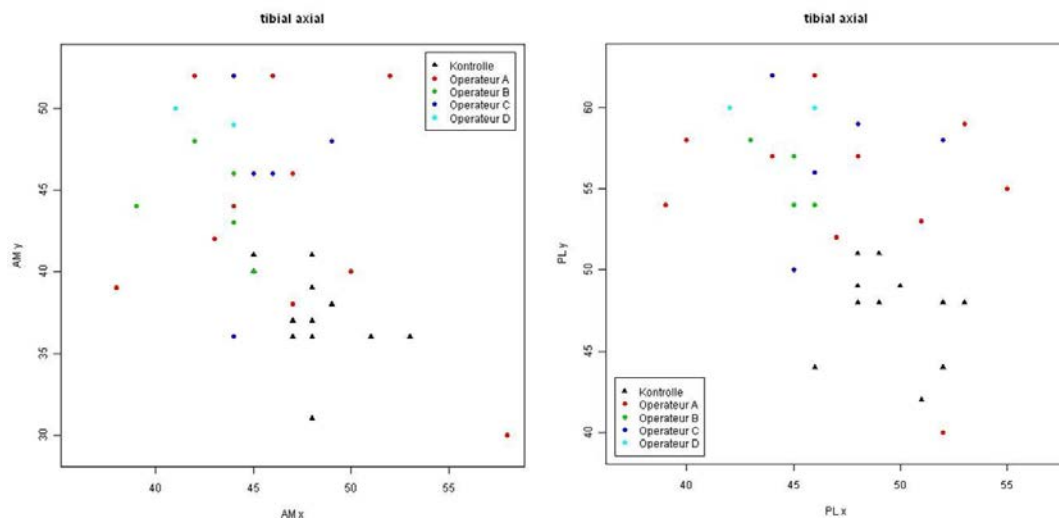


Abbildung 40 Statistische Auswertung der tibialen axialen Austrittspunkte des AM- und PL-Bündels im zweidimensionalen System mit Berücksichtigung der Operateure

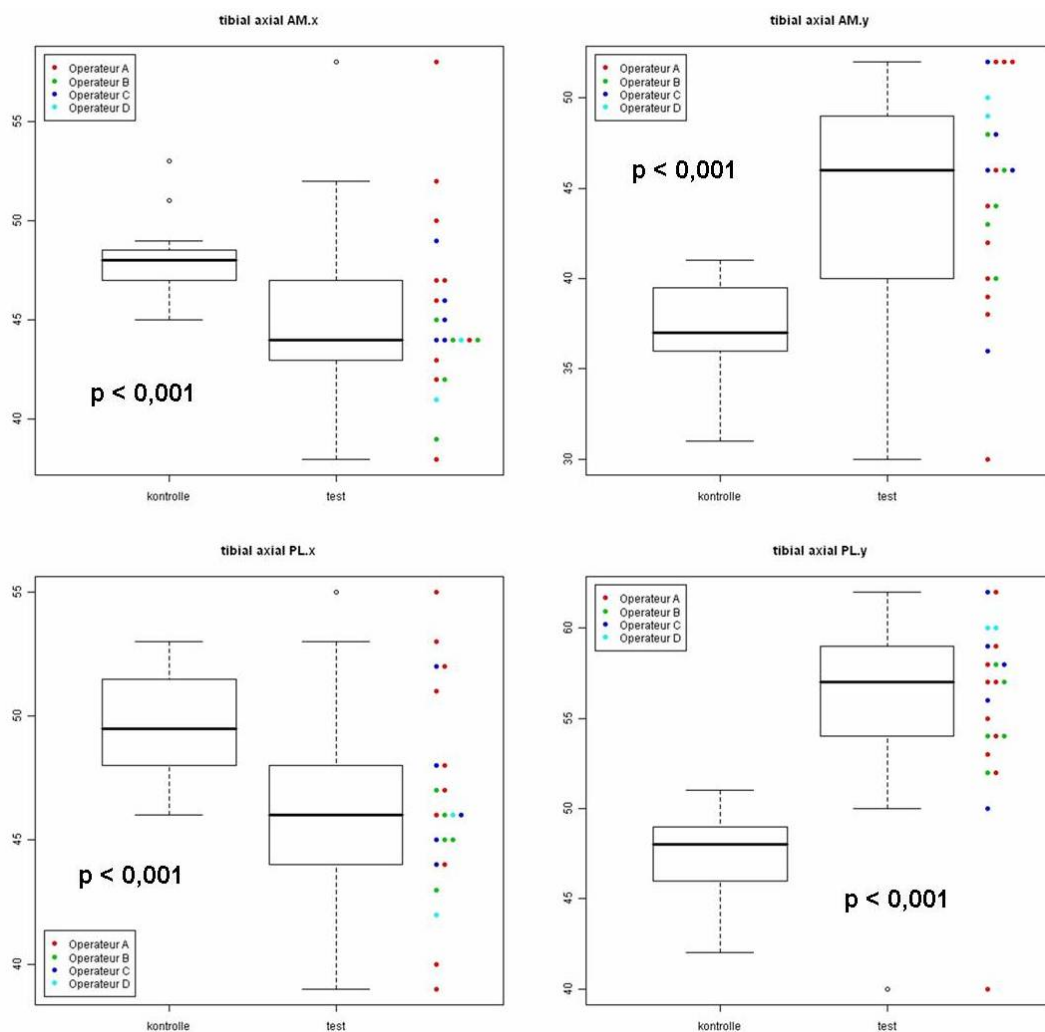


Abbildung 41 Statistische Auswertung der einzelne tibialen axialen Austrittspunkte des AM- und PL-Bündels mit Berücksichtigung der Operateure

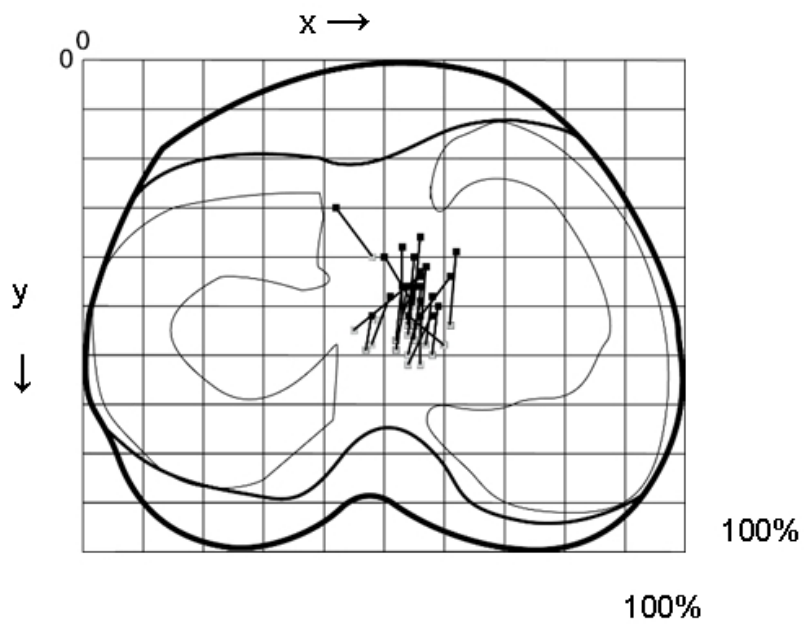


Abbildung 42 Tibia in axialer Schnittfläche mit den Austrittspunkten des AM- und PL- Bündels, wobei jedes AM- Bündel mit seinem korrespondierendem PL- Bündel verbunden ist im Dezimalgitter

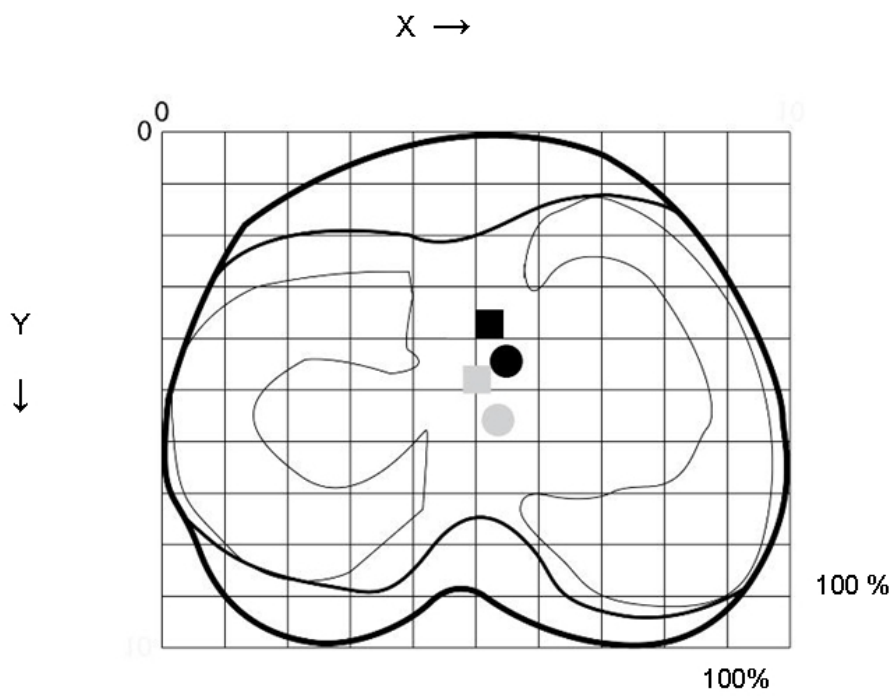


Abbildung 43 Tibia in axialer Schnittfläche mit den Mittelwerten der operierten Patienten (Kreis) und der Leichenkniegelenk/Kontrollgruppe (Quadrat) im Dezimalgitter

### 3.4 Tibia frontal/koronal

Die Ergebnisse der Messungen in der koronaren Ebene sind in Tabelle 4 aufgeführt. Es konnten in allen 22 Patienten zwei unterschiedliche Tunnelöffnungen dargestellt werden. Die Ratio zwischen der Gesamtbreite des Tibiaplateaus in coronarer Sicht und dem Abstand von lateral gemessen ergab folgende Werte: AM = 55% (range 48% - 60%; SD 2,8%) und PL = 53% (range 47% - 59%; SD 3%)

Die statische Auswertung mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests ergab beim Vergleich der 22 operierten Patienten mit der Kontrollgruppe einen signifikanten Unterschied für das AM-Bündel ( $p < 0,001$ ) und das PL-Bündel ( $p = 0,035$ ) (Abbildung 44)

Tibial frontal	AM [%]	PL [%]
1C	55	53
2C	53	53
3A	57	55
4A	55	51
5A	57	51
6B	58	56
7C	50	47
8C	54	50
9D	55	53
10A	57	56
11A	53	59
12B	56	52
13A	48	47
14A	60	59
15A	54	53
16B	54	52
17C	54	52
18B	53	52
19A	52	52
20A	52	51
21B	59	53
22D	56	54
Mittelwert	55	53
SD	2,8	3
Konfidenzintervall 95%	53,8 - 56,2	51,7 - 54,3

Tabelle 4 Messergebnisse der frontal/koronaren Auswertung des Austrittspunkte



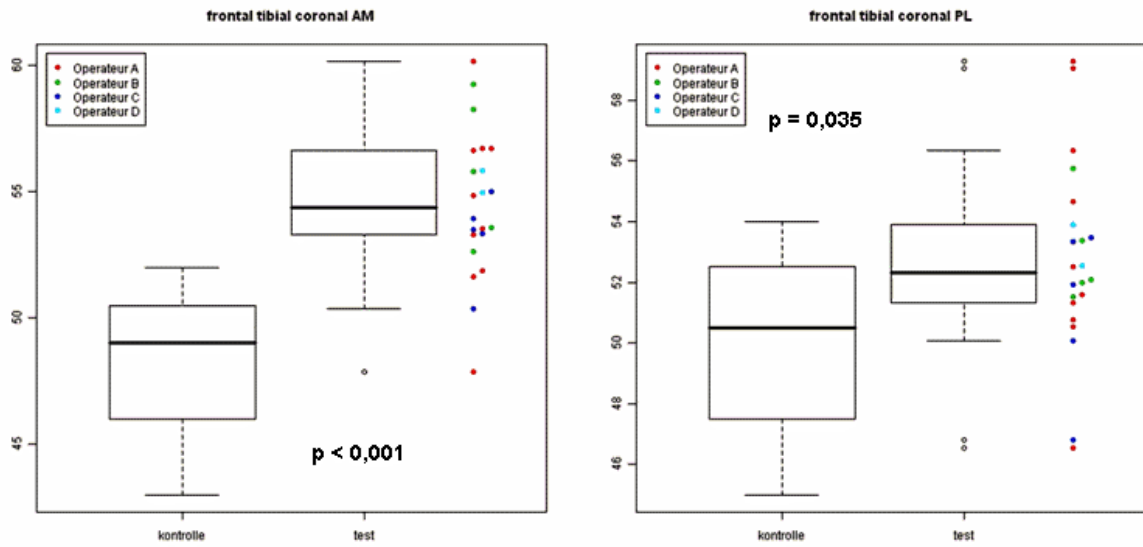


Abbildung 44 Statistische Auswertung der tibialen frontalen Austrittspunkte in einem eindimensionalen System mit Berücksichtigung der Operateure

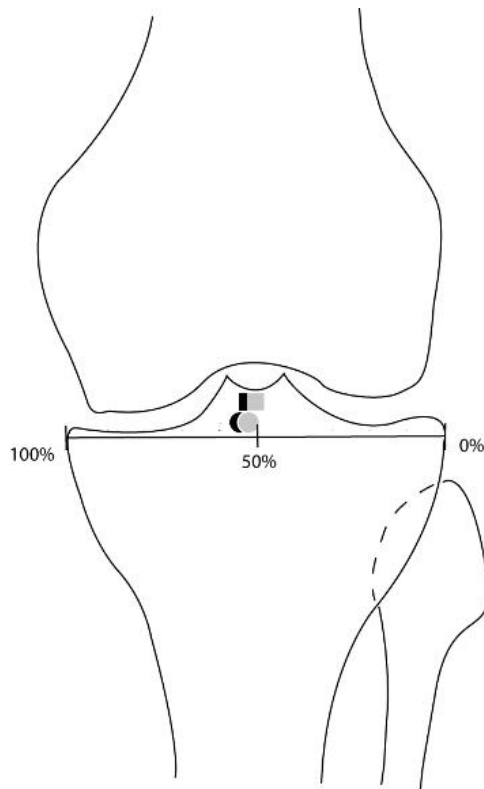


Abbildung 45 Frontale Ansicht der Tibia mit den Mittelwerten der operierten Patienten (Kreis) und der Kontrollgruppe (Quadrat) im Verhältnis zur breitesten Stelle des Tibiakopfes

### 3.5 Inklination des Daches der interkondylären Grube

Die Inklination des Daches konnte für 21 der 22 Patienten bestimmt werden. Bei einem MRT-Datensatz lies sich aufgrund des zu kurz abgebildeten Femurschaftes keine Mittelachse bestimmen (Abbildung 33). Die durchschnittliche Inklination betrug 37,6° (SD: 2,7°) mit einem Maximum von 43,3° und einem Minimum von 31,7°.

### 3.6 Signifikanz

Die Tabellen 5 und 6 geben die statistische Auswertung der 22 operierten Patienten im Vergleich mit der Kontrollgruppe. Bei der Auswertung mit dem Dezimalgitter in sagittaler Ansicht am Femur und axialer Ansicht an der Tibia konnte ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Bei der Auswertung der tibialen Bohrkanäle in frontaler Ansicht der zwei Einzelwerte konnte ebenfalls ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden, sowie für das PL-Bündel in sagittaler Ansicht. Nur für den Einzelwert beim AM-Bündel in sagittaler Ansicht konnte kein signifikanter Unterschied zur Kontrollgruppe nachgewiesen werden.

Multivariater Rangtest Kontrollgruppe vs. Studie	
sagittal femoral AM	p<0,001
sagittal femoral PL	p<0,001
tibial axial AM	p<0,001
tibial axial PL	p<0,001

Tabelle 5 Statistische Auswertung der Messergebnisse zur Überprüfung der Signifikanz der Übereinstimmung der zwei Einzelwerte

Mann-Whitney-U-Test / Kontrollgruppe vs. Studie	
frontal/coronal tibial AM	p<0,001
frontal/coronal tibial PL	p=0,035
sagittal tibial AM	p=0,054
sagittal tibial PL	p=0,018

Tabelle 6 Statistische Auswertung der Messergebnisse mit Signifikanzniveau für gepaarte Stichproben

## 4 Diskussion

Ziel dieser Studie war es zu untersuchen ob die Doppelbündelrekonstruktion des VKB ein anatomisches Ergebnis erreichen kann und die Austrittspunkte der Kanäle der operierten Patienten mit den anatomischen Ansatzpunkten, wie in der Literatur bereits beschrieben übereinstimmen. Zantop et al. haben gezeigt, dass die anatomische Platzierung des PL-Bündels in einer Kinematik des Kniegelenkes resultiert, welche näher an der Kinematik eines intakten Kniegelenkes ist als die nicht anatomische Platzierung (Zantop 2008).

Besonders am femoralen Ansatzpunkt haben kleine Veränderungen an der Platzierung des Tunnels große Wirkung auf das Transplantatlängenverhältnis des VKBs während der Kniegelenksbewegung (Hefzy und Grood 1986; Muneta 1993; Zavras 2005). Eine Tunnelposition außerhalb der anatomischen Insertionspunkte kann als Fehlplatzierung definiert werden. Diese Fehlplatzierungen sind der häufigste Grund der Revisionschirurgie bei Patienten mit persistierender Instabilität oder Bewegungseinschränkungen. Das Ziel des VKB-Ersatzes sollte nach van Eck et al. eine möglichst funktionelle Wiederherstellung des VKB bezüglich der Größe, der Orientierung der Kollagenfasern und der Insertionen sein (van Eck 2010). Die Anatomie des femoralen Ursprungs und der tibialen Insertion des VKB wurden bereits vor Jahrzehnten beschrieben aber die Erkenntnisse wurden nur teilweise in die klinische Praxis umgesetzt. Schwerpunkte der wissenschaftlichen Aktivitäten lagen lange Zeit auf dem Gebiet möglicher Fixationstechniken, Transplantatwahl oder OP-Zeitpunkt (Mayr 2010). Die erreichte Stabilität ist allerdings ein wesentliches Kriterium für den Erfolg der Rekonstruktion des VKB und bei stark kniebelastenden Sportarten von größter Bedeutung. Da Studien von Kocher et al. (Kocher 2002) und Jonsson et al. (Jonsson 2004) zeigen konnten, dass diese von der Tunnelpositionierung abhängt, ist die Anatomie der Insertionsareale des VKBs wieder in den Mittelpunkt der Wissenschaft und chirurgischen Technik gerückt (Mayr 2010).

Die vorliegende Studie hat hochauflösende Bilder der operierten Kniegelenke in einem MRT realisiert, wobei die Schnittdicke 0,8mm betrug. Der Vorteil des MRT bestand darin, dass die Rotation des Kniegelenkes nachträglich verändert werden konnte, was es ermöglichte, exakte Rekonstruktionen in axialer, frontaler und sagittaler Schicht zu erhalten. Des Weiteren erlaubte die dreidimensionale DESS Sequenz des MRT eine bessere Differenzierung zwischen der Gelenkflüssigkeit, welche ein hohes Signal ausweist, und den Knorpelstrukturen sowie den Bändern. Somit war die Bestimmung der Austrittspunkte und der Knochenknorpelgrenzen im dreidimensionalen Verfahren genauer möglich als im klassischen zweidimensionalen Röntgenverfahren.

Die Literatur beschreibt verschiedene Verfahren zur Bestimmung und Vermessung des femoralen Ansatzpunktes des AM- und PL-Bündels des VKBs. Aglietti et al. (Aglietti 1995) beschrieben die femorale Insertion als Streckenverhältnis entlang der Blumensaatlinie. Sie bildeten eine Ratio zwischen dem Abstand der Insertion vom Eingang des Interkondylarraums zur Gesamtstrecke des Notchdaches bis zum posterioren Kondylus. Diese Methode beschreibt lediglich eindimensional die Lage des Kanals und trifft keine Aussage über die Höhe der Insertion. Das Verfahren wurde deshalb durch die zweidimensionale Quadranten Methode von Bernard et al. (Bernard 1997) verfeinert.

Harner et al. (Harner 1994) verwendeten ähnlich wie Aglietti eine Einteilung entlang der Blumensaatlinie. Während Harner als Basis lediglich das Notchdach verwendete, verwendeten Aglietti et al. den gesamten Durchmesser des Femurs entlang der Blumensaatlinie. (Abbildung 46,47 und 48)

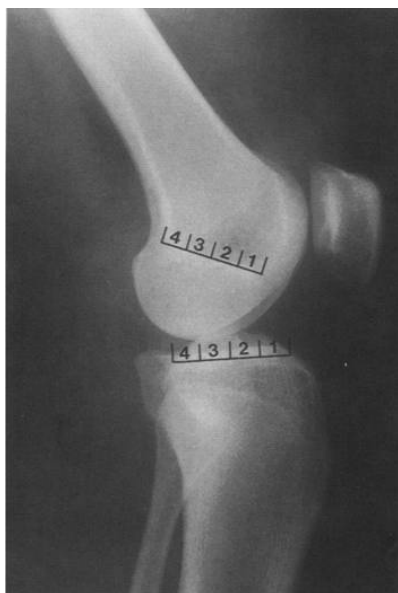


Abbildung 46 Die eindimensionale Einteilung der Quadranten nach Harner et al. (Harner 1994)

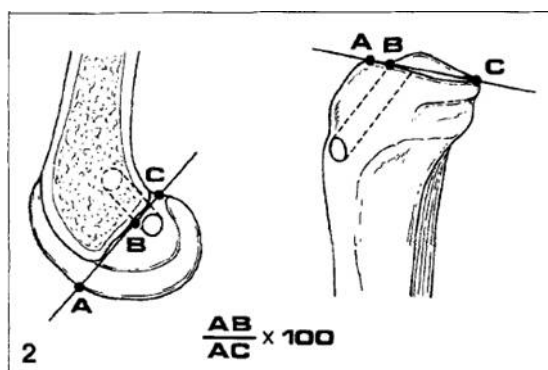


Abbildung 47 Darstellung der Messung von Aglietti et al. (Aglietti 1995)

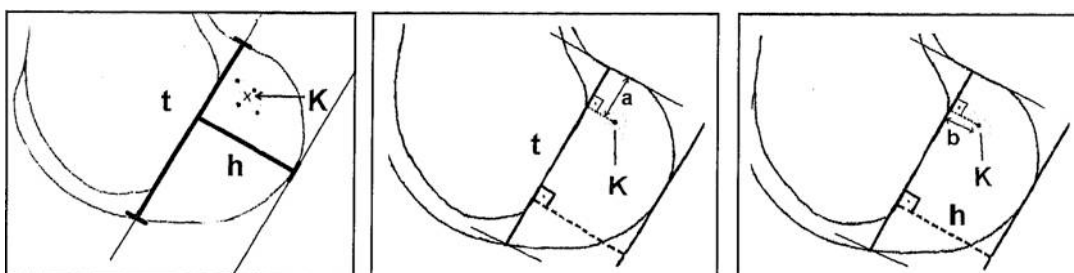


Abbildung 48 Zweidimensionale Beschreibung der Position des Bohrkanals nach Bernard et al. (Bernard 1997)

Edwards et al. haben eine chirurgische Modifikation basierend auf der Quadrantenklassifikation der Blumensaatlinie von Harner et al. eingeführt (Edwards 2008). Die Messungen von Harner, Edwards und Aglietti berücksichtigen lediglich eindimensional die Position in Bezug auf die Blumensaatlinie. Für diese Studie wurde daher eine Modifikation der Quadrantenmethode nach Bernard et al. (Bernard 1997) verwendet, weil diese auch den Abstand vom Notchdach beschreibt, also zweidimensional ist. Zudem ist die Einteilung weitgehend als Standard etabliert, leicht anzuwenden und mit dem Messverfahren unserer Kontrollgruppe übereinstimmend.

Für die Tibia besteht ein allgemeiner Konsens den Ansatzpunkt des VKB als Ratio zwischen der Distanz von der Vorderkante der Tibia zum Ansatzpunkt und der Gesamtbreite des Tibiaplateaus in sagittaler Ansicht auszudrücken (Amis und Jakob 1998; Good 1987; Staeubli 1999). Aglietti et al. beschrieben den Ansatzpunkt in Prozent von der Tangente zur Vorderkante des Tibiaplateaus (Aglietti 1995), eine Methode welche ungenau erscheinen kann besonders bei degenerativ veränderten Kniegelenken (Lorenz 2009). Einige anatomische und radiologische Studien haben diese Methode für die Beurteilung der Lokalisation des AM- und PL-Bündels modifiziert (Colombet 2006; Zantop 2008). Tsukada et al. haben die tibialen Ansatzpunkte in transversaler/axialer Schnittebene an anatomischen Präparaten beschrieben (Tsukada 2008). Im Gegensatz zu dieser Studie konnte unsere Studie mit Hilfe des MRT die Knochengrenzen am Tibiaplateau besser darstellen und Fehlinterpretationen durch Weichteilinterposition vermeiden, da Tsukada et al. anatomische Präparate verwendet haben und die Messung an Digitalfotos durchführten.

Bernard et al. (Bernard 1997) liefern ein Argument, das die Diskrepanz zwischen der klinischen und anatomischen femoralen Bohrkanallage zum Teil erklären könnte: der Operateur hat die Tendenz zu weit anterior/shallow zu bohren aus Angst einen Bruch in der hinteren Wand des Bohrkanals zu verursachen. Zudem sind die Bohrkanäle im Vergleich zu sämtlichen anatomischen Studien zu hoch angelegt (Tabelle 7). Diese Tendenz der zu hohen Positionierung wurde durch Piasecki et al. und Steiner et al. beschrieben bei der transtibialen Bohrung des Femurtunnels, wenn der tibiale Tunnel zu weit distal angesetzt wurde (Piasecki 2011) (Steiner 2009). Bei dieser Operationstechnik ist die Platzierung des femoralen Tunnels erheblich von der tibialen Anlage des Tunnels abhängig (Piasecki 2011). Darüber hinaus ist an der Tibia zu beobachten, dass ein nicht anatomisch platzierter AM-Bohrkanal tibial zum einem schlecht platzierten PL-Bündel tibial führt (Abbildung 42) und des weiteren zum einem schlecht platzierten AM-Bündel femoral (Abbildung 35).

Autor	Studie	Femur Sagittal				Tibia Sagittal		Tibia Frontal	
		AM-x %	AM-y %	PL-x %	PL-y %	AM %	PL %	AM %	PL %
Mochizuki (Mochizuki 2006)	Anatomisch	-	28	-	53	-	-	-	-
Yamamoto (Yamamoto 2004)	Klinisch	25	16	29	42	-	-	-	-
Zantop (Zantop 2008)	Radiologisch	18,5	22,3	29,3	53,6	36	52	-	-
Colombet (Colombet 2006)	Anatomisch	26,4	25,3	32,3	47,6	36	52	-	-
Tskukada (Tsukada 2008)	Anatomisch	25,9	17,8	34,8	42,1	37,6*	50,1*	53,5*	48,8*
Lorenz (Lorenz 2009)	Radiologisch	21	22	27	45	41	52	52	50
Unsere Studie	Radiologisch	28	12	39	33	43	54	55	53

**Tabelle 7 Ergebnisse für die sagittale Schnittfläche des Femurs und der Tibia sowie die frontale Schnittfläche der Tibia. AM-x/AM-y/PL-x/PL-y: Ratio zwischen der Höhe und der Distanz von der Blumensaatlinie, sowie der Länge und der Distanz vom tiefen (deep) Rand des lateralen Kondylus für das AM-Bündel bzw. PL-Bündel. Tibia sagittal AM/PL : Ratio der Gesamtbreite des Tibiaplateaus sagittal an der breitesten Stelle und der Distanz von der Vorderkante des Tibiaplateaus zum AM- bzw. PL-Bündel. (Amis und Jakob 1998) Tibia frontal AM/PL: Ratio der Gesamtbreite des Tibiaplateaus frontal an der breitesten Stelle und der Distanz vom lateralen Rand des Tibiaplateaus zum AM- bzw. PL- Bündel .(Lorenz 2009) (-)(-) keine Daten, (\*) Messung erfolgte in axialer Orientierung**

Eine weitere Schwierigkeit in der korrekten Platzierung des VKB liegt nach Harner et al. in der Kaliberschwankung des VKB sowie dem spiraligen Verlauf der einzelnen Fasern (Harner 1999).

Diese Rotation der VKB-Fasern ist durch die knöchernen Ansätze bedingt. Der femorale Ursprung inseriert vor allem in der longitudinalen Achse des Femurs, wobei der tibiale Ansatz in der antero-posterioren Achse inseriert (Petersen und Tillmann 2002; Zantop 2010). Girgis et al. (Girgis 1975) beschrieben den femoralen Ansatz als ein Segment eines Kreises mit einer geraden anterioren Seite und einer konvexen posterioren Seite. Andere Autoren, welche eine laser-digitale Methode benutzen, fanden heraus, dass das VKB einen mehr kreisartigen (Harner 1999) oder ovalen (Odensten und Gillquist 1985) Ansatz besitzt. Wegen dieser Messungen ist der femorale Ansatzpunkt der Schlüssel für ein gutes klinisches Ergebnis bei Einzelbündeltechnik sowie bei der Doppelbündeltechnik (Zantop 2010). In unserer Studie wurden die Austrittspunkte als geometrische Mittelpunkte der Bohrkanalöffnungen markiert und nicht wie bei Harner et al. an den nativen Insertionszonen (Harner 1999). Dies mag ein zusätzlicher Faktor für die unterschiedlichen Ergebnisse sein, da die nativ spiralige Anordnung der VKB-Fasern zu einer nicht oval- oder kreisrunden Insertionsfläche führt.

Durch den Gebrauch einer hochauflösenden MRT Sequenz konnten die Daten in axialer, frontaler und sagittaler Schnittfläche rekonstruiert werden und besser mit der Kontrollgruppe verglichen werden, welche im selben Messverfahren jedoch auf Grundlage einer hochauflösenden Computertomographie bearbeitet wurde (Lorenz 2009).

Das Zentrum des AM-Bündels lag bei 28% und 12% und des PL-Bündels bei 39% und 33% von der Tiefe der Blumensaatlinie bzw. der Höhe des lateralen Kondylus. Lorenz et al. (Lorenz 2009) beschrieben das Zentrum des AM-Bündels bei 21% und 22% und des PL Bündels bei 27% und 45%. Die Tendenz den Bohrkanal zu weit anterior zu setzen, welche durch Bernard et al. (Bernard 1997) beschrieben wurde, scheint sich hier auch im Vergleich mit den anderen Studien aus Tabelle 7 zu bestätigen.

In den Studien aus Tabelle 7 sowie auch in unserer Kontrollgruppe (Lorenz 2009) wurden gesunde Kniegelenke untersucht und der Ansatzpunkt eines gesunden VKB markiert. Die Messergebnisse sollen helfen, den korrekten anatomischen Ansatzpunkt für das Transplantat des VKB zu finden. Allerdings wird das Transplantat nach dem Einbringen in den Bohrkanal unter Zug gebracht und somit aus dem Zentrum des Bohrkanals gezogen. Die Bestimmung des Zentrums des neuen VKBs entspricht nicht mehr dem Zentrum des Bohrkanals. Auch die Fixierung mit Bio-Interferenzschrauben, wie in dieser Studie durchgeführt, führt zu einer Fixierung des VKB am femoralen und tibialen Bohrkanalrand. Dies kann in der klinischen Anwendung zu Abweichungen in der Insertion führen, ob diese Abweichungen eine klinische Relevanz haben, bleibt allerdings unklar.

Der tibiale Ansatz wurde wie unsere anatomische Kontrollgruppe (Lorenz 2009) nach der Methode von Stäubli und Rauschning (Staubli und Rauschning 1994) untersucht, welche herausgefunden haben, dass der Mittelpunkt des gesamten VKB in sagittaler Ansicht bei 43% der gesamten sagittalen Breite des Tibiaplateaus liegt. Die anatomische Kontrollgruppe von Lorenz et al. ergab 41% für das AM-Bündel und 52% für das PL-Bündel. Die vorliegende klinische Nachuntersuchung ergab 43% für das AM-Bündel und 54% für das PL-Bündel. Mit einem  $p=0,054$  konnte kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen dem AM-Bündel der Kontrollgruppe und unserer Studie festgestellt werden. Das PL-Bündel korrelierte ebenfalls mit den Werten der Kontrollgruppe 52% ( $\pm 3\%$ ) und den Werten von Colombet et al. (Colombet 2006) und Zantop et al. (Zantop 2010).

Die Werte für das AM-Bündel wurden in den Studien von Colombet und Zantop weiter anterior beschrieben als in unserer Studie. Einer der möglichen Gründe könnte die Definition des Zentrums des Ansatzes sein. Colombet et al. haben den Durchschnitt von 6 manuellen Messungen bestimmt, während in der Kontrollgruppe der geometrische Mittelpunkt statistisch über eine Computerberechnung bestimmt wurde. Zudem haben Colombet et al. das Zentrum des Ansatzareals als Projektion der mittleren Fasern des AM- und PL-Bündels gegenüber dem gesamten Insertionsareals definiert (Lorenz 2009). Da das native femorale und tibiale Insertionsareal der beiden Bündel nicht zirkulär ist, kann eine manuelle Messung mit einem erhöhten Messfehler einhergehen. Nach unserem Verständnis ist deshalb eine rechnergestützte Bestimmung wie in der Kontrollgruppe sowie eine Bestimmung mit der Möglichkeit den Messpunkt gleichzeitig in drei Ebenen zu bestimmen, die genauere Methode.

Die Ansatzpunkte wurden an der Tibia auch in axialer Ebene beschrieben wie in der Studie von Tsukada et al. (Tsukada 2008) und unserer Kontrollgruppe von Lorenz et al. (Lorenz 2009). Während die Werte von Tsukada et al. und Lorenz et al. sehr gut übereinstimmen, zeigt sich im Vergleich mit unserer Studie eine Verschiebung der Werte nach posterior.

Während die Werte für AM-x und PL-x nahe beieinander liegen besteht zwischen den Werten für AM-y und PL-y eine signifikante Diskrepanz. Diese könnte durch die transtibiale Bohrung erklärt werden. Da ein zu weit anteriorer femoraler Bohrkanaal zu schlechten klinischen Ergebnissen führt (Loh 2003; Scopp 2004; Steiner 2009) und dieser abhängig vom tibialen Bohrkanaal ist (Piasecki 2011), haben die Chirurgen bereits den tibialen Bohrkanaal weiter posterior angelegt um der femoralen Fehlplatzierung vorzubeugen. Dabei ist der anatomische Ansatzpunkt tibial verlassen worden. Zudem bringt ein zu weit anterior angelegter tibialer Ansatzpunkt mit sich, dass das Transplantat in voller Extension am Notchdach anschlagen kann. Dadurch wäre eine exzessive Notchplastik nötig um die freie Beweglichkeit wiederherzustellen (Staubli und Rauschnig 1994).

Die Bestimmung der Bohrkanaalöffnungen auf axialen Schnittbildern ist bislang noch nicht sehr verbreitet. Sie kann aber sehr hilfreich bei Revisionsfällen sein, da eine Fehllage der tibialen Bohrkanaäle nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ bestimmt werden kann. Es wird damit auch die Entscheidung, ob eine einzeitige Revision möglich ist oder eine zweizeitige Revision mit Auffüllung Bohrkanaäle notwendig erscheint, erleichtert (Lorenz 2009).

Die Messungen in unserer Studie wurden für die Tibia in axialer, sagittaler und frontaler Ebene jedes Mal neu berechnet. Somit konnte in dieser Studie auch gezeigt werden, dass die unterschiedlichen Messverfahren zu vergleichbaren Ergebnissen führten. AM- und PL-Bündel in frontaler Ebene ergaben 55% bzw. 53%, dieselben Werte wurden erreicht in der axialen Vermessung für AM-x und PL-x. Die Position der AM- und PL- Bündel in sagittaler Ebene ergaben 43% bzw. 54% und in der axialen Ebene 45% bzw. 56%. Der kleine Unterschied kann sich durch die verschiedene Höhen des Tibiaplateaus erklären, in denen die Werte bestimmt wurden.

Der Inklinationwinkel der Notch in unserer Studie ergab einen Mittelwert von  $37,6^\circ (\pm 2,7)$ . Howell et al.(Howell und Barad 1995) ermittelten einen Mittelwert von  $35^\circ$ , Anderson et al. (Anderson 1987) einen Mittelwert von  $38,8^\circ$ , Staubli et al. (Staubli und Rauschnig 1994) einen Mittelwert von  $39,8^\circ$  und Scuderi et al.(Scuderi 1993) einen Mittelwert von  $39^\circ$ . Damit sind unsere Werte übereinstimmend mit den vorher durchgeführten Studien.

Eine schwache Verbindung zwischen dem Inklinationwinkel der Notch und der vollen Extension des Kniegelenkes wurde bereits von Howell et al. festgestellt ( $r^2 = 0.207$ ) (Howell und Barad 1995). Ein Kniegelenk mit einer gewissen Extension kann verschiedene Grade des Inklinationswinkels haben. Wenn das Interesse jedoch bei einer Vermeidung einer extensiven Notchplastik oder des *Impingement* der Notch liegt, sollte die Platzierung des tibialen Bohrkanaals personalisiert werden unter Berücksichtigung des Extensionsgrades des Kniegelenkes und des Inklinationswinkels der Notch (Howell und Barad 1995).

Mauch et al.(Mauch 2007) zeigten, dass erfahrene Chirurgen auch ohne die Kenntnis des Inklinationswinkels gute klinische Ergebnisse bei der Rekonstruktion des VKB erreichen können. Somit kann der Inklinationwinkel als ein zu berücksichtigender Parameter bei Versagern dienen, jedoch nicht bei der primären VKB-Rekonstruktion.

Die vorliegende Arbeit hat mehrere Limitationen. Alle Patienten wurden nur mit der transtibialen Operation versorgt. Somit konnte nur eine in der neueren Literatur obsolete Operations-Technik evaluiert werden. Bei dieser Technik besteht ein erhöhtes Risiko einer Fehlplatzierung des femoralen Bohrkanaals aufgrund der Abhängigkeit vom tibialen Bohrkanaal.



Bei anatomisch angelegtem tibialen Bohrkanal enden nur 60% der femoralen Bohrkanäle am anatomischen Ansatzpunkt (Piasecki 2011). Dies zeigt und bestätigt auch die vorliegende Studie. Interessant wäre sicher eine Fortsetzung der Arbeit mit Patienten, deren femorale Kanäle über ein mediales Arthroskopieportal angelegt wurde.

Eine weitere Limitierung dieser Studie ist die Anlage der Bohrkanäle, welche nicht orthograd erfolgte und somit zu keinen kreisförmigen Austritten aus dem Knochen führte. Die somit eingesetzten Transplantate lagen nicht im geometrischen Mittelpunkt des Bohrkanals, welcher an den anatomischen Ansatzpunkt angelegt wurde. Dies muss in Zukunft noch stärker berücksichtigt werden und Lorenz et al. (Lorenz 2009) haben bereits zwei Vorschläge diesbezüglich in Ihrer Studie angebracht. Eine retrograde Bohrung am Femur (Kim 2005) oder flexible Bohrhülsen würden eine orthograde Bohrung erlauben (Cain und Clancy 2002).

## **5 Schlussfolgerung**

Eine korrekte anatomische Bohrkanallage ist essentiell für eine erfolgreiche VKB-Rekonstruktion. Die lange Zeit angewandte transtibiale Bohrung birgt auf Grund der von der tibialen Bohrung abhängigen femoralen AM-Bohrung die Gefahr einer Fehlplatzierung insbesondere der femoralen Bohrkanäle (Piasecki 2011). Die vorliegende Arbeit konnte die systematische Fehlplatzierung zeigen, die OP-Technik wurde deshalb auf ein Verfahren geändert, bei dem die Bohrkanalanlage unabhängig voneinander erfolgt. Außerdem konnte die Studie durch Grafiken zeigen, dass am femoralen Ansatzpunkt beide Bohrungen für AM-Bündel und PL-Bündel ebenfalls miteinander verkoppelt sind.

Die vorliegende Arbeit evaluiert die bildgebenden Ergebnisse nach Doppelbündel-Rekonstruktion des VKB und erlaubt Aussagen über die Genauigkeit der Operationsmethode. Außerdem wurde ein Messverfahren entwickelt, was insbesondere bei Revisionen die Planung erleichtern kann und Hinweise auf einen Versagensmechanismus gibt.

Zu guter Letzt kann die angewandte Methode auch zur Qualitätskontrolle der Operationen und der ausführenden Operateure dienen.

## 6 Zusammenfassung

Die Rekonstruktion des VKB mit der Doppelbündelmethode erfordert exakte Platzierung der Bohrkanäle an den anatomischen Ansatzpunkten um ein gutes klinisches Ergebnis zu erhalten. In der Literatur wurden in mehreren Studien (Bernard 1997; Colombet 2006; Lorenz 2009; Mochizuki 2006; Staubli und Rauschning 1994; Tsukada 2008; Yamamoto 1992; Zantop 2010) anatomisch, radiologisch und klinisch die Ansatzpunkte des nativen VKB bestimmt. Diese Studie vergleicht die Bohrkanallage von Patienten, deren VKB in Doppelbündel-Technik rekonstruiert wurde, mit der nativen VKB-Insertion aus einer vorab durchgeführten anatomischen Arbeit (Lorenz 2009).

Ziel war der Arbeit war der Nachweis, dass die Werte dieser Studie nicht signifikant von den Werten der Kontrollgruppe (Lorenz 2009) abweichen.

Zudem sollte gezeigt werden, dass aufgrund der inzwischen obsoleten OP-Technik (transtibiale Bohrung des femoralen AM-Tunnels über den tibialen AM-Tunnel) ein ungünstig platzierter tibialer Bohrkanal einen ebenfalls schlecht platzierten femoralen Bohrkanal bedingt.

22 Patienten, welche eine primäre Rekonstruktion des VKBs mit der Doppelbündel-Methode und eine transtibiale Bohrung des femoralen anteromedialen Bohrkanals erhielten, wurden in die Studie eingeschlossen. Die Untersuchung erfolgte kernspintomographisch mittels einer dreidimensionalen DESS Sequenz, welche eine Bestimmung der Bohrkanalplatzierungen in axialer, frontaler und sagittaler Ebene erlaubte. Die Bohrkanalöffnungen des AM- und PL-Tunnels wurden identifiziert und der geometrische Mittelpunkt bestimmt.

**Femoral** wurden die Positionen mit Hilfe eines Dezimalgitters, welches von der Blumensaatlinie und der lateralen Femurkondyle begrenzt wurde, in sagittaler Orientierung gemessen.

**Tibial** wurden die Ansatzpunkte als Ratio zwischen dem geometrischen Mittelpunkt der Bohrkanalöffnung am Ansatzpunkt und dem mediolateralen sowie sagittalen Durchmesser des Tibiaplateaus bestimmt. Darüber hinaus wurden die tibialen Ansatzpunkte in einer axialen Ebene mit Hilfe eines Dezimalgitters am ersten Schnitt unterhalb des tibialen Knorpels ermittelt.

Die Position der geometrischen Mittelpunkte ergaben folgende Werte am Femur: für das AM-Bündel  $x = 28\% \pm 7.9\%$  und  $y = 12\% \pm 4.7\%$ , für das PL-Bündel  $x = 39\% \pm 8.9\%$  und  $y = 33\% \pm 9.6\%$ . In der sagittalen Schnittebene ergaben die tibialen Mittelpunkte der Ansatzpunkte folgende Werte: AM-Bündel =  $43\% \pm 5.5\%$  und PL-Bündel  $54\% \pm 4.8\%$  der Gesamtbreite des Tibiaplateaus von der Vorderkante der Tibia aus gemessen. In der frontalen Schnittebene ergaben die Mittelpunkte der Ansatzpunkte: AM-Bündel =  $55\% \pm 2.8\%$  und PL-Bündel =  $53\% \pm 3\%$  der Gesamtbreite des Tibiaplateaus vom lateralen Tibiarand aus gemessen.

In der axialen Schnittebene der Tibia ergaben sich anhand eines Dezimalgitters folgende Werte: AM-Bündel:  $x = 55\% \pm 4.3\%$  und  $y = 45\% \pm 5.8\%$ ; PL-Bündel:  $x = 53\% \pm 4.1\%$  und  $y = 56\% \pm 4.8\%$ .

Der statistische Vergleich mit der Kontrollgruppe (Lorenz 2009) hat in allen Vergleichen, bis auf den sagittalen Ansatzpunkt an der Tibia für das AM-Bündel ( $p=0,054$ ) einen signifikanten Unterschied ergeben. Durch Beobachtung der statistischen Grafiken (Abbildung 41, 44) konnte auch festgestellt werden, dass kein Chirurg mehr oder weniger genau mit der Platzierung der Ansatzpunkte lag.

Diese Studie diene dem Vergleich der nach Operation platzierten Ansatzpunkte und der nativen Ansatzpunkte und konnte zeigen, dass die neu platzierten Ansatzpunkte sich signifikant von den nativen Insertionen unterscheiden und vom Chirurgen unabhängig sind. Zudem konnte mit Hilfe von grafischen Darstellungen beobachtet werden (Abbildung 35), dass aufgrund der OP-Technik ein ungünstig platzierter tibialer AM-Bohrkanal meist zu einem ungünstigen femoralen AM-Bohrkanal führt, da die Bohrung des femoralen Kanals in Abhängigkeit vom tibialen Kanal erfolgt. Da der femorale PL-Kanal in Abhängigkeit vom femoralen AM-Kanal angelegt wurde, setzte sich die Fehlerkette dann auch in der Anlage des femoralen PL-Kanals fort.

## Literatur

- Abebe, E. S., C. T. Moorman, 3rd, T. S. Dziedzic, C. E. Spritzer, R. L. Cothran, D. C. Taylor, W. E. Garrett, Jr. und L. E. DeFrate (2009). "Femoral tunnel placement during anterior cruciate ligament reconstruction: an in vivo imaging analysis comparing transtibial and 2-incision tibial tunnel-independent techniques." *Am J Sports Med* **37**(10): 1904-11.
- Aglietti, P., G. Zaccherotti, P. P. Menchetti und P. De Biase (1995). "A comparison of clinical and radiological parameters with two arthroscopic techniques for anterior cruciate ligament reconstruction." *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* **3**(1): 2-8.
- Amis, A. A. und R. P. Jakob (1998). "Anterior cruciate ligament graft positioning, tensioning and twisting." *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* **6 Suppl 1**: S2-12.
- Anderson, A. F., A. B. Lipscomb, K. J. Liudahl und R. B. Addlestone (1987). "Analysis of the intercondylar notch by computed tomography." *Am J Sports Med* **15**(6): 547-52.
- Arendt, E. und R. Dick (1995). "Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature." *Am J Sports Med* **23**(6): 694-701.
- Bauer, G., M. Buchner, H. Schmitt, M. Engelhardt, M. Krüger-Franke, K.-P. Benedetto, H. Mayr, A. Ellermann und O. Milter (2010). "OP-Indikation." *GOTS-Expertenmeeting:Vorderes Kreuzband*: 53-58.
- Benjaminse, A., A. Gokeler und C. P. van der Schans (2006). "Clinical diagnosis of an anterior cruciate ligament rupture: a meta-analysis." *J Orthop Sports Phys Ther* **36**(5): 267-88.
- Bernard, M., P. Hertel, H. Hornung und T. Cierpinski (1997). "Femoral insertion of the ACL. Radiographic quadrant method." *Am J Knee Surg* **10**(1): 14-21; discussion 21-2.
- Boden, B. P., G. S. Dean, J. A. Feagin, Jr. und W. E. Garrett, Jr. (2000). "Mechanisms of anterior cruciate ligament injury." *Orthopedics* **23**(6): 573-8.
- Boisgard, S., J. P. Levai, B. Geiger, K. Saidane und B. Landjerit (1999). "Study of the variations in length of the anterior cruciate ligament during flexion of the knee: use of a 3D model reconstructed from MRI sections." *Surg Radiol Anat* **21**(5): 313-7.
- Boyer P, D. P., Christel P, Paoletti X (1995). "Influence of examiner experience and gender on interrater reliability of KT-1000 arthrometer measurements." *Phys Ther.* **75**(10): 898-906.
- Brown, C. H., Jr. und E. W. Carson (1999). "Revision anterior cruciate ligament surgery." *Clin Sports Med* **18**(1): 109-71.
- Brucker, P. U., S. Lorenz und A. B. Imhoff (2005). "Anatomic Fixation in Double Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction." *Operative Technique in Orthopaedics* **15**: 135-139.
- Brucker, P. U., S. Lorenz und A. B. Imhoff (2006). "Aperture fixation in arthroscopic anterior cruciate ligament double-bundle reconstruction." *Arthroscopy* **22**(11): 1250 e1-6.

- Bruder, H., H. Fischer, R. Graumann und M. Deimling (1988). "A new steady-state imaging sequence for simultaneous acquisition of two MR images with clearly different contrasts." Magn Reson Med **7**(1): 35-42.
- Buchner, M., G. Bauer, K. P. Benedetto, K. Dann, A. Ellermann, H. Mayr und H. Schmitt (2010). "Transplantatwahl." GOTS-Expertenmeeting:Vorderes Kreuzband: 59-66.
- Burks, R. T., J. Crim, B. P. Fink, D. N. Boylan und P. E. Greis (2005). "The effects of semitendinosus and gracilis harvest in anterior cruciate ligament reconstruction." Arthroscopy **21**(10): 1177-85.
- Cain, E. L., Jr. und W. G. Clancy, Jr. (2002). "Anatomic endoscopic anterior cruciate ligament reconstruction with patella tendon autograft." Orthop Clin North Am **33**(4): 717-25.
- Chavhan, G. B., P. S. Babyn, B. G. Jankharia, H. L. Cheng und M. M. Shroff (2008). "Steady-state MR imaging sequences: physics, classification, and clinical applications." Radiographics **28**(4): 1147-60.
- Chen, C. H., T. Y. Chuang, K. C. Wang, W. J. Chen und C. H. Shih (2006). "Arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction with quadriceps tendon autograft: clinical outcome in 4-7 years." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **14**(11): 1077-85.
- Claes, S., P. Verdonk, R. Forsyth und J. Bellemans (2011). "The "ligamentization" process in anterior cruciate ligament reconstruction: what happens to the human graft? A systematic review of the literature." Am J Sports Med **39**(11): 2476-83.
- Colombet, P., J. Robinson, P. Christel, J. P. Franceschi, P. Djian, G. Bellier und A. Sbihi (2006). "Morphology of anterior cruciate ligament attachments for anatomic reconstruction: a cadaveric dissection and radiographic study." Arthroscopy **22**(9): 984-92.
- Csizy, M. und N. F. Friederich (2002). "[Bore canal site in surgical reconstruction of the anterior cruciate ligament. Position--placement errors--anatomic measurement]." Orthopade **31**(8): 741-50.
- Dale, D. (1990). Knee Ligaments: Structure, Function, Injury, and Repair, Lippincott Williams & Wilkins.
- Daniel, D. M., M. L. Stone, B. E. Dobson, D. C. Fithian, D. J. Rossman und K. R. Kaufman (1994). "Fate of the ACL-injured patient. A prospective outcome study." Am J Sports Med **22**(5): 632-44.
- Daniel, D. M., M. L. Stone, R. Sachs und L. Malcom (1985). "Instrumented measurement of anterior knee laxity in patients with acute anterior cruciate ligament disruption." Am J Sports Med **13**(6): 401-7.
- Donaldson, W. F., 3rd, R. F. Warren und T. Wickiewicz (1985). "A comparison of acute anterior cruciate ligament examinations. Initial versus examination under anesthesia." Am J Sports Med **13**(1): 5-10.
- Edwards, A., A. M. Bull und A. A. Amis (2008). "The attachments of the anteromedial and posterolateral fibre bundles of the anterior cruciate ligament. Part 2: femoral attachment." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **16**(1): 29-36.
- Ettlinger, C. F., R. J. Johnson und J. E. Shealy (1995). "A method to help reduce the risk of serious knee sprains incurred in alpine skiing." Am J Sports Med **23**(5): 531-7.
- Falchok, F. S., S. Tigges, W. A. Carpenter, T. P. Branch und R. G. Stiles (1996). "Accuracy of direct signs of tears of the anterior cruciate ligament." Can Assoc Radiol J **47**(2): 114-20.
- Fink, C., C. Hoser, W. Hackl, R. A. Navarro und K. P. Benedetto (2001). "Long-term outcome of operative or nonoperative treatment of anterior cruciate ligament rupture--is sports activity a determining variable?" Int J Sports Med **22**(4): 304-9.
- Friederich, N. F. (1993). "[Knee joint function and the cruciate ligaments. Biomechanical principles for reconstruction and rehabilitation]." Orthopade **22**(6): 334-42.
- Friederich, N. F. und R. M. Biedert (1996). "[Knee joint ligament reconstruction--indications, results]." Ther Umsch **53**(10): 780-6.
- Fu, F. H. und K. R. Schulte (1996). "Anterior cruciate ligament surgery 1996. State of the art?" Clin Orthop Relat Res(325): 19-24.

- Gabbett, T. J. (2004). "Incidence of injury in junior and senior rugby league players." Sports Med **34**(12): 849-59.
- Gabriel, M. T., E. K. Wong, S. L. Woo, M. Yagi und R. E. Debski (2004). "Distribution of in situ forces in the anterior cruciate ligament in response to rotatory loads." J Orthop Res **22**(1): 85-9.
- Galway, Beaupre und MacIntosh (1972). "Pivot Shift: A clinical sign of symptomatic anterior cruciate insufficiency." J Bone Joint Surg Am **54**: 763-764.
- Geib, T. M., W. R. Shelton, R. A. Phelps und L. Clark (2009). "Anterior cruciate ligament reconstruction using quadriceps tendon autograft: intermediate-term outcome." Arthroscopy **25**(12): 1408-14.
- Georgoulis, A. D., A. Papadonikolakis, C. D. Papageorgiou, A. Mitsou und N. Stergiou (2003). "Three-dimensional tibiofemoral kinematics of the anterior cruciate ligament-deficient and reconstructed knee during walking." Am J Sports Med **31**(1): 75-9.
- Gianotti, S. M., S. W. Marshall, P. A. Hume und L. Bunt (2008). "Incidence of anterior cruciate ligament injury and other knee ligament injuries: A national population-based study." J Sci Med Sport.
- Gianotti, S. M., S. W. Marshall, P. A. Hume und L. Bunt (2009). "Incidence of anterior cruciate ligament injury and other knee ligament injuries: a national population-based study." J Sci Med Sport **12**(6): 622-7.
- Girgis, F. G., J. L. Marshall und A. Monajem (1975). "The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis." Clin Orthop Relat Res(106): 216-31.
- Good, L., M. Odensten und J. Gillquist (1987). "Precision in reconstruction of the anterior cruciate ligament. A new positioning device compared with hand drilling." Acta Orthop Scand **58**(6): 658-61.
- Gorschewsky, O., A. Klakow, A. Putz, H. Mahn und W. Neumann (2007). "Clinical comparison of the autologous quadriceps tendon (BQT) and the autologous patella tendon (BPTB) for the reconstruction of the anterior cruciate ligament." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **15**(11): 1284-92.
- Gyngell, M. L. (1988). "The application of steady-state free precession in rapid 2DFT NMR imaging: FAST and CE-FAST sequences." Magn Reson Imaging **6**(4): 415-9.
- Hackenbruch, W. und W. Muller (1987). "[Examination of the injured knee joint]." Orthopade **16**(2): 100-12.
- Han, H. S., S. C. Seong, S. Lee und M. C. Lee (2008). "Anterior cruciate ligament reconstruction: quadriceps versus patellar autograft." Clin Orthop Relat Res **466**(1): 198-204.
- Hardy, P. A., M. P. Recht, D. Piraino und D. Thomasson (1996). "Optimization of a dual echo in the steady state (DESS) free-precession sequence for imaging cartilage." J Magn Reson Imaging **6**(2): 329-35.
- Harner, C. D., G. H. Baek, T. M. Vogrin, G. J. Carlin, S. Kashiwaguchi und S. L. Woo (1999). "Quantitative analysis of human cruciate ligament insertions." Arthroscopy **15**(7): 741-9.
- Harner, C. D., J. R. Giffin, R. C. Duntzman, C. C. Annunziata und M. J. Friedman (2001). "Evaluation and treatment of recurrent instability after anterior cruciate ligament reconstruction." Instr Course Lect **50**: 463-74.
- Harner, C. D., P. H. Marks, F. H. Fu, J. J. Irrgang, M. B. Silby und R. Mengato (1994). "Anterior cruciate ligament reconstruction: endoscopic versus two-incision technique." Arthroscopy **10**(5): 502-12.
- Hefzy, M. S. und E. S. Grood (1986). "Sensitivity of insertion locations on length patterns of anterior cruciate ligament fibers." J Biomech Eng **108**(1): 73-82.
- Hewett, T. E., G. D. Myer, K. R. Ford, R. S. Heidt, Jr., A. J. Colosimo, S. G. McLean, A. J. van den Bogert, M. V. Paterno und P. Succop (2005). "Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study." Am J Sports Med **33**(4): 492-501.

- Howell, S. M. (1992). "Arthroscopic roofplasty: a method for correcting an extension deficit caused by roof impingement of an anterior cruciate ligament graft." *Arthroscopy* **8**(3): 375-9.
- Howell, S. M. und S. J. Barad (1995). "Knee extension and its relationship to the slope of the intercondylar roof. Implications for positioning the tibial tunnel in anterior cruciate ligament reconstructions." *Am J Sports Med* **23**(3): 288-94.
- Irrgang, J. J., H. Ho, C. D. Harner und F. H. Fu (1998). "Use of the International Knee Documentation Committee guidelines to assess outcome following anterior cruciate ligament reconstruction." *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* **6**(2): 107-14.
- Jakob, R. P. und H. U. Stäubli (1990). *Kniegelenk und Kreuzbänder: Anatomie, Biomechanik, Klinik, Rekonstruktion, Komplikationen, Rehabilitation*. Berlin, Springer.
- Jakob, R. P., H. U. Stäubli und J. T. Deland (1987). "Grading the pivot shift. Objective tests with implications for treatment." *J Bone Joint Surg Br* **69**(2): 294-9.
- Jonsson, H., K. Riklund-Ahlstrom und J. Lind (2004). "Positive pivot shift after ACL reconstruction predicts later osteoarthritis: 63 patients followed 5-9 years after surgery." *Acta Orthop Scand* **75**(5): 594-9.
- Jung, T. M., C. Reinhardt, S. U. Scheffler und A. Weiler (2006). "Stress radiography to measure posterior cruciate ligament insufficiency: a comparison of five different techniques." *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* **14**(11): 1116-21.
- Kartus, J., T. Movin und J. Karlsson (2001). "Donor-site morbidity and anterior knee problems after anterior cruciate ligament reconstruction using autografts." *Arthroscopy* **17**(9): 971-80.
- Katahira, K., Y. Yamashita, M. Takahashi, N. Otsuka, Y. Koga, T. Fukumoto und K. Nomura (2001). "MR imaging of the anterior cruciate ligament: value of thin slice direct oblique coronal technique." *Radiat Med* **19**(1): 1-7.
- Katz, J. W. und R. J. Fingerhuth (1986). "The diagnostic accuracy of ruptures of the anterior cruciate ligament comparing the Lachman test, the anterior drawer sign, and the pivot shift test in acute and chronic knee injuries." *Am J Sports Med* **14**(1): 88-91.
- Kim, S. G., H. Kurosawa, K. Sakuraba, H. Ikeda, S. Takazawa und Y. Takazawa (2005). "Development and application of an inside-to-out drill bit for anterior cruciate ligament reconstruction." *Arthroscopy* **21**(8): 1012.
- Kim, S. J., P. Kumar und K. S. Oh (2009). "Anterior cruciate ligament reconstruction: autogenous quadriceps tendon-bone compared with bone-patellar tendon-bone grafts at 2-year follow-up." *Arthroscopy* **25**(2): 137-44.
- Kocher, M. S., J. R. Steadman, K. Briggs, D. Zurakowski, W. I. Sterett und R. J. Hawkins (2002). "Determinants of patient satisfaction with outcome after anterior cruciate ligament reconstruction." *J Bone Joint Surg Am* **84-A**(9): 1560-72.
- Krych, A. J., J. D. Jackson, T. L. Hoskin und D. L. Dahm (2008). "A meta-analysis of patellar tendon autograft versus patellar tendon allograft in anterior cruciate ligament reconstruction." *Arthroscopy* **24**(3): 292-8.
- Kwon, J. W., Y. C. Yoon, Y. N. Kim, J. H. Ahn und B. K. Choe (2009). "Which oblique plane is more helpful in diagnosing an anterior cruciate ligament tear?" *Clin Radiol* **64**(3): 291-7.
- Lane, C. G., R. Warren und A. D. Pearle (2008). "The pivot shift." *J Am Acad Orthop Surg* **16**(12): 679-88.
- Lee, J. K., L. Yao, C. T. Phelps, C. R. Wirth, J. Czajka und J. Lozman (1988). "Anterior cruciate ligament tears: MR imaging compared with arthroscopy and clinical tests." *Radiology* **166**(3): 861-4.
- Lee, S., S. C. Seong, C. H. Jo, H. S. Han, J. H. An und M. C. Lee (2007). "Anterior cruciate ligament reconstruction with use of autologous quadriceps tendon graft." *J Bone Joint Surg Am* **89 Suppl 3**: 116-26.
- Lee, S., S. C. Seong, H. Jo, Y. K. Park und M. C. Lee (2004). "Outcome of anterior cruciate ligament reconstruction using quadriceps tendon autograft." *Arthroscopy* **20**(8): 795-802.

- Levy, A. S. und S. W. Meier (2003). "Approach to cartilage injury in the anterior cruciate ligament-deficient knee." Orthop Clin North Am **34**(1): 149-67.
- Livesay, G. A., H. Fujie, S. Kashiwaguchi, D. A. Morrow, F. H. Fu und S. L. Woo (1995). "Determination of the in situ forces and force distribution within the human anterior cruciate ligament." Ann Biomed Eng **23**(4): 467-74.
- Loh, J. C., Y. Fukuda, E. Tsuda, R. J. Steadman, F. H. Fu und S. L. Woo (2003). "Knee stability and graft function following anterior cruciate ligament reconstruction: Comparison between 11 o'clock and 10 o'clock femoral tunnel placement. 2002 Richard O'Connor Award paper." Arthroscopy **19**(3): 297-304.
- Lorenz, S., H. Anetzberger, J. T. Spang und A. B. Imhoff (2007). "[Double-bundle technique - anatomic reconstruction of the anterior cruciate ligament]." Oper Orthop Traumatol **19**(5-6): 473-88.
- Lorenz, S., F. Elser, M. Mitterer, T. Obst und A. B. Imhoff (2009). "Radiologic evaluation of the insertion sites of the 2 functional bundles of the anterior cruciate ligament using 3-dimensional computed tomography." Am J Sports Med **37**(12): 2368-76.
- Mariani, P. P., F. Margheritini, P. Christel und A. Bellelli (2005). "Evaluation of posterior cruciate ligament healing: a study using magnetic resonance imaging and stress radiography." Arthroscopy **21**(11): 1354-61.
- Mauch, F., G. Apic, U. Becker und G. Bauer (2007). "Differences in the placement of the tibial tunnel during reconstruction of the anterior cruciate ligament with and without computer-assisted navigation." Am J Sports Med **35**(11): 1824-32.
- Mayr, H., M. Buchner, O. Milter, M. Krüger-Franke, A. Ellermann und T. Zantop (2010). "Tunnelposition bei VKB-Rekonstruktion." GOTS-Expertenmeeting:Vorderes Kreuzband: 67-80.
- Mayr, H. O., T. G. Weig und W. Plitz (2004). "Arthrofibrosis following ACL reconstruction--reasons and outcome." Arch Orthop Trauma Surg **124**(8): 518-22.
- Meuffels, D. E. und J. A. Verhaar (2008). "Anterior cruciate ligament injury in professional dancers." Acta Orthop **79**(4): 515-8.
- Meyers, M. H. und F. M. McKeever (1970). "Fracture of the intercondylar eminence of the tibia." J Bone Joint Surg Am **52**(8): 1677-84.
- Mochizuki, T., T. Muneta, T. Nagase, S. Shirasawa, K. I. Akita und I. Sekiya (2006). "Cadaveric knee observation study for describing anatomic femoral tunnel placement for two-bundle anterior cruciate ligament reconstruction." Arthroscopy **22**(4): 356-61.
- Moll, K. J. M. K. (2002). Kurzlehrbuch Anatomie. Jena, Urban & Fischer.
- Moore, T. M., M. J. Patzakis und J. P. Harvey (1987). "Tibial plateau fractures: definition, demographics, treatment rationale, and long-term results of closed traction management or operative reduction." J Orthop Trauma **1**(2): 97-119.
- Müller, W. (1982). Das Knie. Berlin, Springer.
- Muneta, T., H. Yamamoto, H. Sakai, T. Ishibashi und K. Furuya (1993). "Relationship between changes in length and force in in vitro reconstructed anterior cruciate ligament." Am J Sports Med **21**(2): 299-304.
- Nitz, W. R. (1999). "MR imaging: acronyms and clinical applications." Eur Radiol **9**(5): 979-97.
- Noulis, G. C. (1997). "Sprains of the knee. 1875." Clin Orthop Relat Res(341): 5-6.
- Odensten, M. und J. Gillquist (1985). "Functional anatomy of the anterior cruciate ligament and a rationale for reconstruction." J Bone Joint Surg Am **67**(2): 257-62.
- Olsen, O. E., G. Myklebust, L. Engebretsen und R. Bahr (2004). "Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis." Am J Sports Med **32**(4): 1002-12.
- Ostrowski, J. A. (2006). "Accuracy of 3 diagnostic tests for anterior cruciate ligament tears." J Athl Train **41**(1): 120-1.

- Palmer, I. (1957). "Injuries to the crucial ligaments of the knee joint as a surgical problem." Wiederherstellungschir Traumatol **4**: 181-96.
- Papageorgiou, C. D., C. B. Ma, S. D. Abramowitch, T. D. Clineff und S. L. Woo (2001). "A multidisciplinary study of the healing of an intraarticular anterior cruciate ligament graft in a goat model." Am J Sports Med **29**(5): 620-6.
- Park, M. J., M. C. Lee und S. C. Seong (2001). "A comparative study of the healing of tendon autograft and tendon-bone autograft using patellar tendon in rabbits." Int Orthop **25**(1): 35-9.
- Pate, R. R., M. Pratt, S. N. Blair, W. L. Haskell, C. A. Macera, C. Bouchard, D. Buchner, W. Ettinger, G. W. Heath, A. C. King und et al. (1995). "Physical activity and public health. A recommendation from the Centers for Disease Control and Prevention and the American College of Sports Medicine." Jama **273**(5): 402-7.
- Petersen, W., C. Braun, W. Bock, K. Schmidt, A. Weimann, W. Drescher, E. Eiling, R. Stange, T. Fuchs, J. Hedderich und T. Zantop (2005). "A controlled prospective case control study of a prevention training program in female team handball players: the German experience." Arch Orthop Trauma Surg **125**(9): 614-21.
- Petersen, W. und B. Tillmann (2002). "[Anatomy and function of the anterior cruciate ligament]." Orthopade **31**(8): 710-8.
- Petersen, W. und T. Zantop (2007). "Anatomy of the anterior cruciate ligament with regard to its two bundles." Clin Orthop Relat Res **454**: 35-47.
- Petersen, W. und T. Zantop (2009). "Das vordere Kreuzband."
- Peterson, R. K., W. R. Shelton und A. L. Bomboy (2001). "Allograft versus autograft patellar tendon anterior cruciate ligament reconstruction: A 5-year follow-up." Arthroscopy **17**(1): 9-13.
- Piasecki, D. P., B. R. Bach, Jr., A. A. Espinoza Orias und N. N. Verma (2011). "Anterior cruciate ligament reconstruction: can anatomic femoral placement be achieved with a transtibial technique?" Am J Sports Med **39**(6): 1306-15.
- Prodromos, C. C., Y. Han, J. Rogowski, B. Joyce und K. Shi (2007). "A meta-analysis of the incidence of anterior cruciate ligament tears as a function of gender, sport, and a knee injury-reduction regimen." Arthroscopy **23**(12): 1320-1325 e6.
- Rangger, C., D. M. Daniel, M. L. Stone und K. Kaufman (1993). "Diagnosis of an ACL disruption with KT-1000 arthrometer measurements." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **1**(1): 60-6.
- Redpath, T. W. und R. A. Jones (1988). "FADE--a new fast imaging sequence." Magn Reson Med **6**(2): 224-34.
- Renstrom, P., A. Ljungqvist, E. Arendt, B. Beynon, T. Fukubayashi, W. Garrett, T. Georgoulis, T. E. Hewett, R. Johnson, T. Krosshaug, B. Mandelbaum, L. Micheli, G. Myklebust, E. Roos, H. Roos, P. Schamasch, S. Shultz, S. Werner, E. Wojtys und L. Engebretsen (2008). "Non-contact ACL injuries in female athletes: an International Olympic Committee current concepts statement." Br J Sports Med **42**(6): 394-412.
- Resnick und Kang (1997). "Internal derangements of joints. Emphasis on MR Imaging." Philadelphia: WB Saunders: 563.
- Ristanis, S., G. Giakas, C. D. Papageorgiou, T. Moraiti, N. Stergiou und A. D. Georgoulis (2003). "The effects of anterior cruciate ligament reconstruction on tibial rotation during pivoting after descending stairs." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **11**(6): 360-5.
- Rudy, T. W., G. A. Livesay, S. L. Woo und F. H. Fu (1996). "A combined robotic/universal force sensor approach to determine in situ forces of knee ligaments." J Biomech **29**(10): 1357-60.
- Sanders, T. G. und M. D. Miller (2005). "A systematic approach to magnetic resonance imaging interpretation of sports medicine injuries of the shoulder." Am J Sports Med **33**(7): 1088-105.
- Schulz, M. S., K. Russe, A. Weiler, H. J. Eichhorn und M. J. Strobel (2003). "Epidemiology of posterior cruciate ligament injuries." Arch Orthop Trauma Surg **123**(4): 186-91.



- Schuster, A. J., M. J. McNicholas, S. W. Wachtl, D. W. McGurty und R. P. Jakob (2004). "A new mechanical testing device for measuring anteroposterior knee laxity." Am J Sports Med **32**(7): 1731-5.
- Scopp, J. M., L. E. Jasper, S. M. Belkoff und C. T. Moorman, 3rd (2004). "The effect of oblique femoral tunnel placement on rotational constraint of the knee reconstructed using patellar tendon autografts." Arthroscopy **20**(3): 294-9.
- Scuderi (1993). "The femoral intercondylar roof angle: Radiographic and MRI measurement." Am J Knee Surg **6**: 10-14.
- Segawa, H., G. Omori, Y. Koga, T. Kameo, S. Iida und M. Tanaka (2002). "Rotational muscle strength of the limb after anterior cruciate ligament reconstruction using semitendinosus and gracilis tendon." Arthroscopy **18**(2): 177-82.
- Stäubli, H. U., O. Adam, W. Becker und R. Burgkart (1999). "Anterior cruciate ligament and intercondylar notch in the coronal oblique plane: anatomy complemented by magnetic resonance imaging in cruciate ligament-intact knees." Arthroscopy **15**(4): 349-59.
- Starman, J. S., C. Vanbeek, D. R. Armfield, A. Sahasrabudhe, C. L. Baker, 3rd, J. J. Irrgang und F. H. Fu (2007). "Assessment of normal ACL double bundle anatomy in standard viewing planes by magnetic resonance imaging." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **15**(5): 493-9.
- Stäubli, H. U. und W. Rauschnig (1994). "Tibial attachment area of the anterior cruciate ligament in the extended knee position. Anatomy and cryosections in vitro complemented by magnetic resonance arthrography in vivo." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **2**(3): 138-46.
- Steckel, H., G. Vadala, D. Davis, V. Musahl und F. H. Fu (2007). "3-T MR imaging of partial ACL tears: a cadaver study." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **15**(9): 1066-71.
- Steinbrück, K. und J. C. Wiehmann (1988). "[Examination of the knee joint. The value of clinical findings in arthroscopic control]." Z Orthop Ihre Grenzgeb **126**(3): 289-95.
- Steiner, M. E., T. C. Battaglia, J. F. Heming, J. D. Rand, A. Festa und M. Baria (2009). "Independent drilling outperforms conventional transtibial drilling in anterior cruciate ligament reconstruction." Am J Sports Med **37**(10): 1912-9.
- Strobel, M. und T. Zantop (2010). "Vorderes Kreuzband." Endopress.
- Strobel, M. J. und Stedtfeld (1991). "Diagnostics of the knee."
- Strobel, M. J., A. Weiler, M. S. Schulz, K. Russe und H. J. Eichhorn (2002). "Fixed posterior subluxation in posterior cruciate ligament-deficient knees: diagnosis and treatment of a new clinical sign." Am J Sports Med **30**(1): 32-8.
- Tashiro, T., H. Kurosawa, A. Kawakami, A. Hikita und N. Fukui (2003). "Influence of medial hamstring tendon harvest on knee flexor strength after anterior cruciate ligament reconstruction. A detailed evaluation with comparison of single- and double-tendon harvest." Am J Sports Med **31**(4): 522-9.
- Tashman, S., D. Collon, K. Anderson, P. Kolowich und W. Anderst (2004). "Abnormal rotational knee motion during running after anterior cruciate ligament reconstruction." Am J Sports Med **32**(4): 975-83.
- Thomasson, D., D. Purdy und J. P. Finn (1996). "Phase-modulated binomial RF pulses for fast spectrally-selective musculoskeletal imaging." Magn Reson Med **35**(4): 563-8.
- Torg, J. S., W. Conrad und V. Kalen (1976). "Clinical diagnosis of anterior cruciate ligament instability in the athlete." Am J Sports Med **4**(2): 84-93.
- Tsukada, H., Y. Ishibashi, E. Tsuda, A. Fukuda und S. Toh (2008). "Anatomical analysis of the anterior cruciate ligament femoral and tibial footprints." J Orthop Sci **13**(2): 122-9.
- van Eck, C. F., V. M. Schreiber, H. A. Mejia, K. Samuelsson, C. N. van Dijk, J. Karlsson und F. H. Fu (2010). ""Anatomic" anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review of surgical techniques and reporting of surgical data." Arthroscopy **26**(9 Suppl): S2-12.
- Weber (1836). Mechanik der menschlichen  
Gehwerkzeuge. Göttingen.

- Woo, S. L., J. M. Hollis, D. J. Adams, R. M. Lyon und S. Takai (1991). "Tensile properties of the human femur-anterior cruciate ligament-tibia complex. The effects of specimen age and orientation." Am J Sports Med **19**(3): 217-25.
- Woo, S. L., A. Kanamori, J. Zeminski, M. Yagi, C. Papageorgiou und F. H. Fu (2002). "The effectiveness of reconstruction of the anterior cruciate ligament with hamstrings and patellar tendon. A cadaveric study comparing anterior tibial and rotational loads." J Bone Joint Surg Am **84-A**(6): 907-14.
- Yagi, M., E. K. Wong, A. Kanamori, R. E. Debski, F. H. Fu und S. L. Woo (2002). "Biomechanical analysis of an anatomic anterior cruciate ligament reconstruction." Am J Sports Med **30**(5): 660-6.
- Yamamoto, H., T. Ishibashi, T. Muneta, K. Furuya und T. Mizuta (1992). "Effusions after anterior cruciate ligament reconstruction using the ligament augmentation device." Arthroscopy **8**(3): 305-10.
- Yamamoto, Y., W. H. Hsu, S. L. Woo, A. H. Van Scyoc, Y. Takakura und R. E. Debski (2004). "Knee stability and graft function after anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison of a lateral and an anatomical femoral tunnel placement." Am J Sports Med **32**(8): 1825-32.
- Zantop, T., G. Bauer, M. Buchner, A. Ellemann, R. Seil und K. T. Bennedetto (2010). "Diagnostik von VKB-Läsionen." GOTS-Expertenmeeting:Vorderes Kreuzband: 33-52.
- Zantop, T., N. Diermann, T. Schumacher, S. Schanz, F. H. Fu und W. Petersen (2008). "Anatomical and nonanatomical double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: importance of femoral tunnel location on knee kinematics." Am J Sports Med **36**(4): 678-85.
- Zantop, T., M. Wellmann, F. H. Fu und W. Petersen (2008). "Tunnel positioning of anteromedial and posterolateral bundles in anatomic anterior cruciate ligament reconstruction: anatomic and radiographic findings." Am J Sports Med **36**(1): 65-72.
- Zavras, T. D., Amis AA (1995). "Isometricity and graft placement during ACL reconstruction." Knee **2**: 5-17.
- Zavras, T. D., A. Race und A. A. Amis (2005). "The effect of femoral attachment location on anterior cruciate ligament reconstruction: graft tension patterns and restoration of normal anterior-posterior laxity patterns." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **13**(2): 92-100.
- Zavras, T. D., A. Race, A. M. Bull und A. A. Amis (2001). "A comparative study of 'isometric' points for anterior cruciate ligament graft attachment." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **9**(1): 28-33.

## **Abbildungsverzeichnis**

- Abbildung 1 Darstellung des anteromedialen und posterolateralen Bündels des VKBs (linkes Knie von vorne ohne Patella) ..... 7
- Abbildung 2 Tibialer Ansatzpunkt des VKBs (Mitte unten) begrenzt durch die Ansätze der Menisken und die Gelenkoberflächen (Amis und Jakob 1998)..... 8
- Abbildung 3 Das VKB verläuft in Streckstellung annähernd parallel zum femoralen Dach der interkondylären Notch. Bemerkenswert ist wie die anterioren Fasern des VKBs einem gewölbten Pfad folgen und sich über der anterioren Tibia ausspreizen (Amis und Jakob 1998; Zavras 1995) 8
- Abbildung 4 Ansicht von posterior auf die interkondyläre Notch an einem linken Kniegelenk. Das VKB scheint an einer gewölbten Fläche seitlich und am Dach der Notch befestigt zu sein, wobei ein Teil der Fasern bis in die 11Uhr Position ausstrahlt (Amis und Jakob 1998). ..... 9

Abbildung 5 Chirurgische Navigationsterminologie für die interkondyläre Notch um Verwechslungen mit der anatomischen Terminologie zu verhindern (Amis und Jakob 1998) .....	9
Abbildung 6 Typisches Sulcus Zeichen im seitlichen Strahlengang (Zantop 2010) .....	14
Abbildung 7 Segond Fraktur knöcherner Kapselausriss am anterolateralen Tibiaplateau(Zantop 2010) .....	14
Abbildung 8 MRT-Beispiel der direkten Zeichen einer VKB-Ruptur. a.) Kontinuitätsunterbrechung, b.) fehlende Abgrenzbarkeit, c.) reduzierter Anstiegswinkel (Zantop 2010) .....	16
Abbildung 9 Burmester-Kurve (Csizy und Friederich 2002) .....	19
Abbildung 10 Zielgeräte zur Platzierung des femoralen Tunnels nutzen häufig die hintere Begrenzung der Fossa intercondylaris als Widerlager (a). Eine zusätzlich Landmarke ist der Übergang der Knochen-Knorpel-Grenze (durchgehende Linie) zur Linea intercondylaris (gestrichelte Linie) (Mayr 2010).....	22
Abbildung 11 Femoraler Ursprungs des VKBs in 90° Flexion (punktierte Linie) Das Zentrum der beiden Bündel AM und PL ist mit K-Drähten markiert (AM high deep, PL low shallow) (Mayr 2010; Petersen und Zantop 2007).....	23
Abbildung 12 K-Draht Platzierung nach der Probebohrung in der Mitte der alten Insertion des VKB in 120° Flexion. Das Arthroskop liegt dabei im antero-lateralen Zugang. ....	26
Abbildung 13 Die Bohrung des Tunnels liegt mittig in der alten Insertion des VKB und der Durchzugsfaden zeigt den „shallow“ Rand des Bohrkanals. Die Bohrung erfolgte mit einem speziellen Portalzielgerät mit einem offset von 7mm (Fa. Arthrex, Karlsfeld) Sicht ins Kniegelenk über das anteromediale Portal in 80° Flexion.....	26
Abbildung 14 Darstellung des femoralen Bohrkanals mit Durchzugsfaden, der für die Implantation des Transplantates benutzt wird .....	27
Abbildung 15 Anatomische Lage des K-Drahtes (2), welcher jetzt mit einem Bohrkopf entsprechend dem Durchmesser des Transplantates, überbohrt werden kann. Die Knie befindet sich in 70-80°Flexion und das Arthroskop liegt im anterolateralen Zugang. (1) Tibialer Ansatzpunkt des VKB, (2) K-Draht, (3) medialer Femurkondylus, (4) lateraler Femurkondylus, (5) z.T alte Fasern des originalen VKB.....	27
Abbildung 16 Darstellung der femoralen Tunnels mit Durchzugsfäden nach Überbohrung mit 7mm (AM Bündel, rechts im Bild) und 6mm (PL Bündel links im Bild) mit Hilfe des anteromedialen Portals.....	28
Abbildung 17 Positionierung der beiden K-Drähte bei der Doppelbündelrekonstruktion des VKB. Lage der beiden K-Drähte in den alten anatomischen Ansätzen des nativen VKB. Die Sicht erfolgt über das anterolaterale Portal und das Knie befindet sich in 70-80° Flexion. (1) K-Draht für AM-Bündel, (2) K-Draht für PL-Bündel, (3) laterales Tibiaplateau, (4) lateraler Femurkondylus, (5) mediales Tibiaplateau, (6) medialer Femurkondylus. ....	30
Abbildung 18 Nach Überbohrung der beiden tibialen Bohrdrähte werden die beiden Fadenschlaufen in ihren respektiven Tunnels für das AM- und PL-Bündel durchgezogen. Blick vom anterolateralen Portal in 80° Flexion. ....	30
Abbildung 19 Darstellung der Doppelbündel-Rekonstruktion nach Fixation über das anterolaterale Portal in 80° Flexion. ....	31
Abbildung 20 MRT-Datensatz vor der Korrektur in der frontalen Schnittfläche .....	36
Abbildung 21 Tibia in frontaler Schnittfläche vor und nach der Korrektur des MRT-Datensatzes.....	36

Abbildung 22 Femur in axialer Schnittfläche nach der Korrektur des MRT-Datensatzes .....	37
Abbildung 23 Standard View- Modus im AMIRA Programm .....	38
Abbildung 24 Projection View-Funktion im AMIRA Programm .....	38
Abbildung 25 Tibia axial mit gesetzten Landmarken. ....	40
Abbildung 26 Tibia axial mit aufgesetztem Dezimalgitter. Als Basis dienen die posterioren Kondylen, die mediale und laterale Begrenzung liegt rechtwinklig zur Basis tangential am Tibiaplateau. Die anteriore Begrenzung liegt parallel zur Basis tangential am Tibiaplateau.....	40
Abbildung 27 Frontaler Projection View mit ausgemessenen Landmarken sowie der Gesamtbreite der Tibia. ....	41
Abbildung 28 Tibia sagittal in Projection View mit gesetzten Landmarken sowie Ausmessung nach Stäubli(Stäubli und Rauschnig 1994).....	42
Abbildung 29 Standard View-Modus: Setzen der Landmarken am sagittal geschichteten Femur unter gleichzeitiger Kontrolle der zwei anderen Schnittebenen. ....	43
Abbildung 30 Femur sagittal im Projection View nach Setzen der Landmarken. Messung der Strecken t und h. ....	44
Abbildung 31 Femur sagittal im Projection View mit Dezimalgitter für die Ausmessung der Austrittspunkte modifiziert nach Bernard et al. (Bernard 1997) .....	44
Abbildung 32 Ausmessung des Inklinationswinkels nach Howell et al. (Howell 1992).....	45
Abbildung 33 Femorale Ansatzpunkte der operierten Patienten des AM-(schwarz) und PL-Bündels (grau) in 90° gebeugtem Kniegelenk mit Mittelwerten (Kreise) im Dezimalgitter .....	48
Abbildung 34 Femorale Ansatzpunkte des AM-(schwarz) und PL-(grau) Bündel als Mittelwerte dieser Studie (Kreis) und den Werten der Kontrollgruppe (Lorenz 2009) (Quadrat) .....	48
Abbildung 35 Zusammengehörende femorale und tibiale Punkte der AM-(schwarze Punkte, durchgezogene Linie) und PL-(graue Punkte; gestrichelte Linie)Bohrkanäle. ....	49
Abbildung 36 Statistische Auswertung der Ansatzpunkte des AM- und PL-Bohrkanäle der Patienten gegenüber der Kontrollgruppe (Lorenz 2007) (Leichenkniegelenke) mit Berücksichtigung der Operateure. Die Punkte werden in einem zwei Achsen-System aufgezeichnet. Die Farbkodierung der Punkte steht für den einzelnen Operateur. Die linke Abbildung zeigt das AM-Bündel und seine Verteilung der Ansatzpunkte im Vergleich mit der Kontrollgruppe. Die rechte Abbildung zeigt die entsprechende Darstellung für das PL-Bündel. ....	49
Abbildung 37 Statistische Auswertung der einzelnen Ansatzpunkte (x-Wert links; y-Wert rechts) des AM-(oben) und PL-(unten) Bündels am Femur sagittal. ....	50
Abbildung 38 Ansatzpunkte des AM- (schwarz) und PL-Bündels (grau)in sagittaler Schnittfläche an der Tibia und dem Femur im Dezimalgitter. Die beiden größeren Kreise markieren die Mittelwerte des tibialen Ansatzes.....	52
Abbildung 39 Statistische Auswertung der tibialen Ansatzpunkte in sagittaler Ansicht operierte Patienten vs. Kontrolle mit Berücksichtigung der Operateure (* Signifikanz).....	52
Abbildung 40 Statistische Auswertung der tibialen axialen Austrittspunkte des AM- und PL-Bündels im zweidimensionalen System mit Berücksichtigung der Operateure .....	54
Abbildung 41 Statistische Auswertung der einzelne tibialen axialen Austrittspunkte des AM- und PL-Bündels mit Berücksichtigung der Operateure (* Signifikanz).....	54
Abbildung 42 Tibia in axialer Schnittfläche mit den Austrittspunkten des AM- und PL- Bündels, wobei jedes AM- Bündel mit seinem korrespondierendem PL- Bündel verbunden ist im Dezimalgitter 55	

Abbildung 43 Tibia in axialer Schnittfläche mit den Mittelwerten der operierten Patienten (Kreis) und der Leichenkniegelenk/Kontrollgruppe (Quadrat) im Dezimalgitter .....	55
Abbildung 44 Statische Auswertung der tibialen frontalen Austrittspunkte in einem eindimensionalen System mit Berücksichtigung der Operateure (* Signifikanz) .....	57
Abbildung 45 Frontale Ansicht der Tibia mit den Mittelwerten der operierten Patienten (Kreis) und der Kontrollgruppe (Quadrat) im Verhältnis zur breitesten Stelle des Tibiakopfes.....	57
Abbildung 46 Die eindimensionale Einteilung der Quadranten nach Harner et al. (Harner 1994) .....	60
Abbildung 47 Darstellung der Messung von Aglietti et al. (Aglietti 1995) .....	60
Abbildung 48 Zweidimensionale Beschreibung der Position des Bohrkanals nach Bernard et al. (Bernard 1997) .....	60

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 Ergebnisse des femoralen Ansatzes für das AM- und PL-Bündel .....	47
Tabelle 2 Messergebnisse der tibialen Untersuchung sagittal der operierten Patienten. Die Buchstaben nach der fortlaufenden Nummerierung kennzeichnen den verantwortlichen Operateur .....	51
Tabelle 3 Messergebnisse der tibialen axialen Ausmessung der Austrittspunkte.....	53
Tabelle 4 Messergebnisse der frontal/koronaren Auswertung des Austrittspunkte.....	56
Tabelle 5 Statistische Auswertung der Messergebnisse zur Überprüfung der Signifikanz der Übereinstimmung der zwei Einzelwerte .....	58
Tabelle 6 Statistische Auswertung der Messergebnisse mit Signifikanzniveau für gepaarte Stichproben .....	58
Tabelle 7 Ergebnisse für die sagittale Schnittfläche des Femurs und der Tibia sowie die frontale Schnittfläche der Tibia. AM-x/AM-y/PL-x/PL-y: Ratio zwischen der Höhe und der Distanz von der Blumensaatlinie, sowie der Länge und der Distanz vom tiefen (deep) Rand des lateralen Kondylus für das AM-Bündel bzw. PL-Bündel. Tibia sagittal AM/PL : Ratio der Gesamtbreite des Tibiaplateaus sagittal an der breitesten Stelle und der Distanz von der Vorderkante des Tibiaplateaus zum AM- bzw. PL-Bündel. (Amis und Jakob 1998) Tibia frontal AM/PL: Ratio der Gesamtbreite des Tibiaplateaus frontal an der breitesten Stelle und der Distanz vom lateralen Rand des Tibiaplateaus zum AM- bzw. PL- Bündel .(Lorenz 2009) (-)(-) keine Daten, (*) Messung erfolgte in axialer Orientierung .....	62

## **Danksagung**

Herrn Univ.-Prof. Dr. med Andreas B. Imhoff für die Überlassung des Themas und die ausgezeichnete Arbeitsbedingungen in der Abteilung und Poliklinik für Sportorthopädie.

Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Stephan Lorenz für seine unermüdliche Hilfestellung, die zahlreichen Stunden der Beratung und Unterstützung, die konstruktiven Diskussionen und Anregungen, sowie seine ausdauernde Geduld.

Herrn Dipl.-Ing. Christian König und Herrn Dr. biol. hum. Markus O. Heller aus dem Julius Wolff Institut Berlin für die Entwicklung des Programms welches meine Arbeit erst ermöglicht hat.

Den Doktoranten der Abteilung und Poliklinik für Sportorthopädie Jacky Thill, für die kollegiale Zusammenarbeit.

Den Statistikern aus dem Institut für Medizinische Statistik und Epidemiologie am Klinikum rechts der Isar für die mathematische Unterstützung.

Den Ärzten der radiologischen Klinik für Ihre Hilfe bei der Anfertigung der Datensätze.

Den radiologisch-technischen Assistenten für die Realisierung der Untersuchungen im Kernspintomographen.

Meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben und mich immer unterstützt haben.

## **Lebenslauf**

Michal Aleksander Najfeld

33 cité Morisacker

L-7735 Colmar-Berg

20/01/1984

geboren in Warschau

### **Schulbildung:**

09.1990 – 07.1996

Grundschule in Colmar-Berg

09.1996 – 07.2003

Lycee classique de Diekirch

Abiturdiplom am 07.07.2003

### **Medizinische Ausbildung:**

09.2003 – 07.2004

Universite de Luxembourg, Erstes Vorklinisches Jahr

09.2004 – 08.2005

Ludwig Maximilian Universität, Zweites Vorklinisches Jahr

Ärztliche Vorprüfung im August 2005

10.2005 – 10.2009

Technische Universität München, Klinisches Studium

Medizinisches Staatsexamen (zweite ärztliche Prüfung) im  
Oktober 2009

11.2009

Approbation zum Arzt

Seit 02.2011

Assistenzarzt in der Abteilung für Orthopädie und  
Unfallchirurgie im Centre Hospitalier de Luxembourg