

Aus dem
CharitéCentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie, Klinik für Unfall- und
Wiederherstellungschirurgie einschließlich Orthopädie

Prof. Dr. med. Michael Schütz
Geschäftsführender Direktor

Prof. Dr. med. Carsten Perka
Ärztlicher Direktor

Habilitationsschrift

Die BohrkanaIpositionierung bei der anatomischen Plastik des Ligamentum cruciatum anterius

zur Erlangung der Lehrbefähigung für das Fach

Orthopädie und Unfallchirurgie

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. Sebastian Kopf

geboren in Deutschland

Eingereicht: April 2016

Dekan: Prof. Dr. med. Axel R. Pries

1. Gutachter: Prof. Dr. Norbert P. Südkamp, Freiburg

2. Gutachter: Prof. Dr. Holger Schmitt, Heidelberg

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	lxxi
1 Einleitung	1
2 Ergebnisse	13
2.1 Größenvariation der Insertionen des humanen Ligamentum cruciatum anterius	13
2.2 Der Effekt der tibialen Bohrwinkel auf die intraartikuläre Öffnung des Bohrkanals bei der Plastik des Ligamentum cruciatum anterius	20
2.3 Der Einfluss der Tibiarotation auf die Messung der tibialen Tunnelposition nach LCA Plastik im seitlichen Röntgenbild	32
2.4 Die Lage des femoralen und tibialen Bohrkanals bei der anatomischen Doppelbündelplastik des Ligamentum cruciatum anterius analysiert mittels dreidimensionalem computertomographischen Modell	39
2.5 Die nicht-anatomische Tunnelposition bei der traditionellen transtibialen Einzelbündelplastik des Ligamentum cruciatum anterius untersucht mit der dreidimensionalen Computertomographie	49
2.6 Die Möglichkeit, über drei Zugangswege den femoralen Ursprung des anteromedialen Bündels während der anatomischen Plastik des Ligamentum cruciatum anterius zu erreichen	55
2.7 Die Untersuchung der <i>in vivo</i> Kinematik bei der anatomischer Doppelbündelplastik des Ligamentum cruciatum anterius	63
2.8 Eine neue quantitative Methode zur Graduierung des Pivot Shift Tests	70
3 Diskussion	77
4 Zusammenfassung und Ausblick	95
5 Literaturverzeichnis	99
6 Danksagung	121
7 Erklärung	122

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
AM	anteromedial
ap	anteroposterior
BTB	bone-tendon-bone
BPTB	bone-patellar tendon-bone
CT	Computertomographie
DB	Doppelbündel
d. h.	das heißt
EB	Einzelbündel
engl.	englisch
IKDC	International Knee Documentation Committee
IM	intermediär
i.a.	intraartikulär
inkl.	inklusive
LCA	Ligamentum cruciatum anterius
LCP	Ligamentum cruciatum posterius
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
M.	Musculus
Mm.	Musculi
MRT	Magnetresonanztomographie
OP	Operation
PL	posterolateral
TB	Tripelbündel
TEP	Totalendoprothese
z.B.	zum Beispiel

1. Einleitung

Das Ligamentum cruciatum anterius (LCA) spielt eine wichtige Rolle für die Stabilität des Kniegelenks. Es kontrolliert die anteriore Translation der proximalen Tibia gegenüber dem distalen Femur und es begrenzt die Rotation, vor allem die Innen- und Varusrotation [1, 2, 3]. Es ist eines der am häufigsten verletzten Bänder des Menschen und das am häufigsten operierte Band des Kniegelenks. In Deutschland liegt die Anzahl der LCA Rupturen pro Jahr bei ca. 100.000 [4]. In den U.S.A. wurden 2006 ca. 130.000 LCA Plastiken durchgeführt, was eine Zunahme um 43.000 Operationen im Vergleich zu 1994 bedeutet. Die Inzidenz lag 2006 bei 43,5 LCA Rupturen pro 100.000 Einwohner pro Jahr [5]. Allein in den U.S.A. werden die Kosten für das Gesundheitssystem auf bis zu 2 Milliarden Dollar pro Jahr geschätzt [6]. Die meisten Rupturen ereignen sich während des Sports bei Patienten im Alter zwischen 15 und 45 Jahren. Mehr als zwei Drittel der Unfälle geschehen ohne Gegnerkontakt. Die Ruptur des LCA kann für die meist körperlich aktiven Patienten eine deutliche Einschränkung ihrer Lebensqualität mit Instabilität, Schmerzen und einer reduzierten Belastbarkeit des Knies bedeuten. In der klinischen Untersuchung findet sich eine vermehrte anteriore Translation der Tibia gegenüber dem Femur und das Fehlen des festen Anschlags beim Lachman Test sowie häufig eine vermehrte Rotationslaxität im Pivot Shift Test im Vergleich zum kontralateralen Knie. Bei diesem Test wird das Bein aus der Streckung unter axialem Stress, bei leichter Valgusstellung gebeugt. Bei einem positiven Test kommt es bei ca. 30° Knieflexion zu einem „Überspringen“ im Knie (= Pivot Shift Phänomen). Dies ist bedingt durch die Reposition der initial in Extension subluxierten Tibia. Die Tibia steht in Extension durch das rupturierte oder insuffiziente LCA leicht subluxiert. Der Pivot Shift Test wird in vier Grade eingeteilt, wobei der Schweregrad aufsteigend zunimmt [7]. Er ist prädiktiv für die Entwicklung einer Gonarthrose und die Rückkehr zum Sport, aber er ist auch sehr untersucherabhängig [8, 9, 10]. Des Weiteren bietet die Magnetresonanztomographie (MRT) eine gute Ergänzung für die Diagnostik vor allem auch hinsichtlich der Einschätzung von Begleitpathologien. Zur Einschätzung der Transplantatqualität im postoperativen Verlauf konnte es sich bisher nur eingeschränkt durchsetzen [11]. Die konservative Therapie spielt heutzutage nur noch eine untergeordnete Rolle. Bei der Mehrzahl dieser jungen, aktiven Patienten wird eine LCA Plastik durchgeführt, wobei das rupturierte LCA durch eine Sehne ersetzt und in einem femoralen und tibialen

Bohrkanal fixiert wird.

Wie für jede Operation, so ist auch für die Operation des LCA ein profundes Wissen um die Anatomie und Funktion essentiell. Die *Ligamenta cruciata genus* wurden erstmalig durch Galenos aus Pergamon im 2. Jahrhundert nach Christus erwähnt [12]. Eine erste detailliertere anatomische Beschreibung mit Zeichnung findet man in dem 1779 erschienenen Buch „Synodesmologie oder Beschreibung der Bänder des menschlichen Körpers“ von Josias Weitbrecht aus Göttingen, seinerzeit als Anatomieprofessor in St. Petersburg tätig [13]. Er beschrieb die beiden sich kreuzenden *Ligamenta cruciata anterius et posterius* mit Ansatz und Ursprung: das LCA von der medialen Fläche des *Condylus lateralis femoris* entspringend und an der *Area* sowie *Eminentia intercondylaris tibiae* ansetzend. Die Funktion des LCA sah er vornehmlich in der Begrenzung der Streckung. Diese anatomischen Beschreibungen wurden deutlich konkretisiert durch die anatomischen und biomechanischen Untersuchungen der Weber Brüder, Wilhelm und Eduard, in ihrem 1836 erschienen Werk „Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge: eine anatomisch-physiologische Untersuchung“ [14]. Sie konkretisierten den Ursprungsort an der medialen Fläche des *Condylus lateralis femoris* (= der lateralen Wand der *Fossa intercondylaris*) als dorsal gelegen und das LCA als flaches Band femoral entspringend. Des Weiteren beschrieben sie das LCA erstmalig als ein Band, bestehend aus zwei Bündel, die in voller Knieextension parallel zueinander liegen und sich mit zunehmender Flexion umeinander verwringen (Abb. 1 und 2). Weiterhin zeigten sie, dass sich die beiden Bündel bei Belastung unterschiedlich anspannen. Sie führten erste biomechanische Untersuchungen mit sequentieller Durchtrennung der Kniebänder durch und zeigten, dass das LCA eine führende Rolle für die anteriore und rotatorische Stabilität des Kniegelenkes hat.

Die beiden Bündel wurden später nach der Lage ihres tibialen Ansatzes zueinander benannt: anteromedial (AM) und posterolateral (PL) [15]. Das Konzept der Bündel ist umstritten. Auch wenn die Mehrzahl der anatomischen Studien zwei Bündel beschrieb, so gab es auch Autoren wie z.B. Odensten & Gillquist, die nur ein Band, ohne die Unterteilung in verschiedene Bündel, in ihrer anatomischen Beschreibung erwähnten [16]. Beide Bündel wurden auch im Foetus nachgewiesen, wo sie durch ein feines Septum getrennt waren [17]. Weiterhin gibt es auch Beschreibungen eines dritten Bündels des LCA - des intermediären Bündels. Dieses entspringt femoral anterior der beiden anderen Bündel und setzt tibial medial zwischen dem PL und dem AM Bündel an.

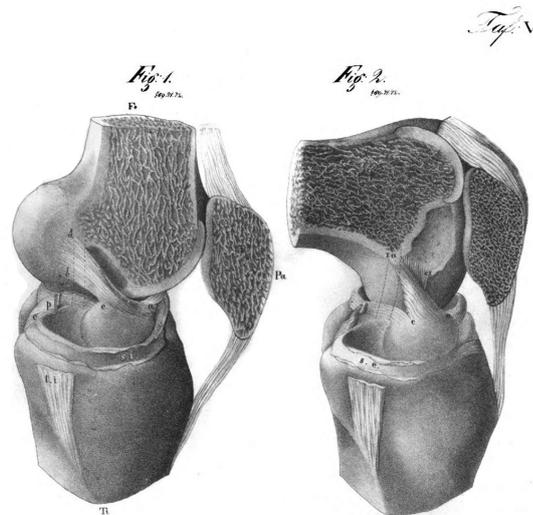


Abbildung 1: Darstellung des LCA mit seinen beiden funktionellen Anteilen, die in Knieextension parallel verlaufen (Fig. 1) und sich in 90° Knieflexion umeinander verwirren (aus Weber et al. 1836 [14]).

Es wurde erstmalig 1979 von Norwood & Cross beschrieben [18]. Der Berliner Anatom Anton J. Waldeyer beschrieb es ebenfalls in seinem anatomischen Lehrbuch [19]. Spätere Publikationen bestätigten dies, wobei sich diese Observation in der Literatur nicht durchsetzen konnte [20, 18, 21, 22, 23]. Interessanterweise sind die drei Bündel bei vielen Säugetieren klar abgrenzbar [20, 24], und grundlegende anatomische Konzepte folgen oft auch zwischen verschiedenen Spezies dem selben Ansatz [25]. Andere Studien identifizierten anstatt von zwei oder drei Hauptbündeln eine Ansammlung von Faszikeln, die sich in unterschiedlichen Flexionsgraden des Kniegelenks unterschiedlich anspannten [26, 27]. Die Länge des humanen LCA wurde mit ca. 32 mm angegeben [23]. Femoral entspringt das LCA dorsal von der medialen Wand des *Condylus lateralis femoris* (Abb. 2). Nach anterior wird der Ursprung durch eine kleine ossäre Erhebung begrenzt: die *lateral intercondylar ridge*. Nach posterior und distal wird es durch den Knorpel-Knochen-Übergang begrenzt und nach proximal läuft es am Ende des *Condylus lateralis* aus. Die beiden Bündel, AM und PL, werden ebenfalls durch eine kleine ossäre Erhebung getrennt: die *lateral bifurcate ridge* [17]. Tibial liegt der Ansatz des LCA in der *Area intercondylaris anterior*, zwischen den *Tubercula intercondylaria mediale et laterale tibiae*. Diese Strukturen sind auch gut intraoperativ darstellbar und können

die anatomische Positionierung der Bohrkanäle erleichtern. In Leichenstudien konnten die Funktionen der beiden Bündel konkretisiert werden. Das AM Bündel ist über den gesamten Bewegungsumfang gespannt und ist ein wichtiger Stabilisator der anterioren Tibiatranslation. Das PL Bündel ist vor allem strecknah gespannt und stabilisiert die Rotation sowie die anteriore Tibiatranslation [28, 29].

Die Funktion des LCA, die bei der Ruptur verloren geht, erklärt, warum die konservative Therapie heutzutage nur noch eine untergeordnete Rolle spielt. Sie geht oft mit chronischer Instabilität des Kniegelenks, Gonalgie und im Verlauf mit Sekundärschäden wie z.B. Meniskusläsionen einher [31, 32]. Das fehlende LCA kann nur bedingt muskulär kompensiert werden. Die Naht des LCA war lange Zeit die Standardtherapie der LCA Ruptur. Die erste Naht wurde 1895 mit Fäden aus Darm durchgeführt [33]. Sie war bis in die 80er Jahre des letzten Jahrhunderts eine häufig praktizierte operative Versorgung des rupturierten LCA. In den meisten Fällen wurde das LCA als eine Struktur genäht. Jedoch gab es auch Beschreibungen, die empfahlen, beide Bündel separat zu nähen [34]. Die Naht des LCA wurde aber auf Grund hoher Re-Instabilitäten im Langzeitverlauf wieder verlassen [35, 36, 37, 38]. Sie erlebt aber gerade wieder eine kleine Renaissance - durch ein neues Implantat, das das genähte LCA über eine intraossäre, tibial gelegene Feder elastisch über einen Faden am Femur aufhängt. Bisher liegen 2-Jahres Ergebnisse von 10 Patienten mit vielversprechenden Ergebnissen vor [39]. Die heutige Standardtherapie der LCA Ruptur ist die Plastik (auch Rekonstruktion genannt), die ein signifikant geringeres Risiko für weitere Kniebinnenschäden und konsekutive Operationen im Vergleich zur konservativen Therapie hat [6]. Bei der LCA Plastik wird ein Knochenkanal durch den *Condylus lateralis femoris* und ein Knochenkanal durch den Tibiakopf von der anteromedialen Tibiakortikalis in das Kniegelenk gebohrt. Durch diese Kanäle und die dazwischenliegende Gelenkhöhle wird eine autologe oder allogene Sehne als Transplantat für das LCA eingezogen und ossär fixiert. Dieses Transplantat soll die Funktion des LCA erfüllen. Die erste LCA Plastik wurde Anfang des 20. Jahrhunderts von Max zur Verth mit autologer *Fascia lata* durchgeführt [40]. Eine der ersten genauen Beschreibungen der Operationstechnik berichtet über einen großen Zugang im Sinne eines Hufeisenschnitts über dem Kniegelenk mit Absetzen der *Tuberositas tibiae*. Diese wurde zusammen mit der Patella nach kranial geklappt, um das Gelenk mit den *Ligg. cruciata* freizulegen. Bei der Bohrung des intraartikulären (i.a.) femoralen und tibialen Kanals wurde besonderer Wert auf die anatomische Posi-

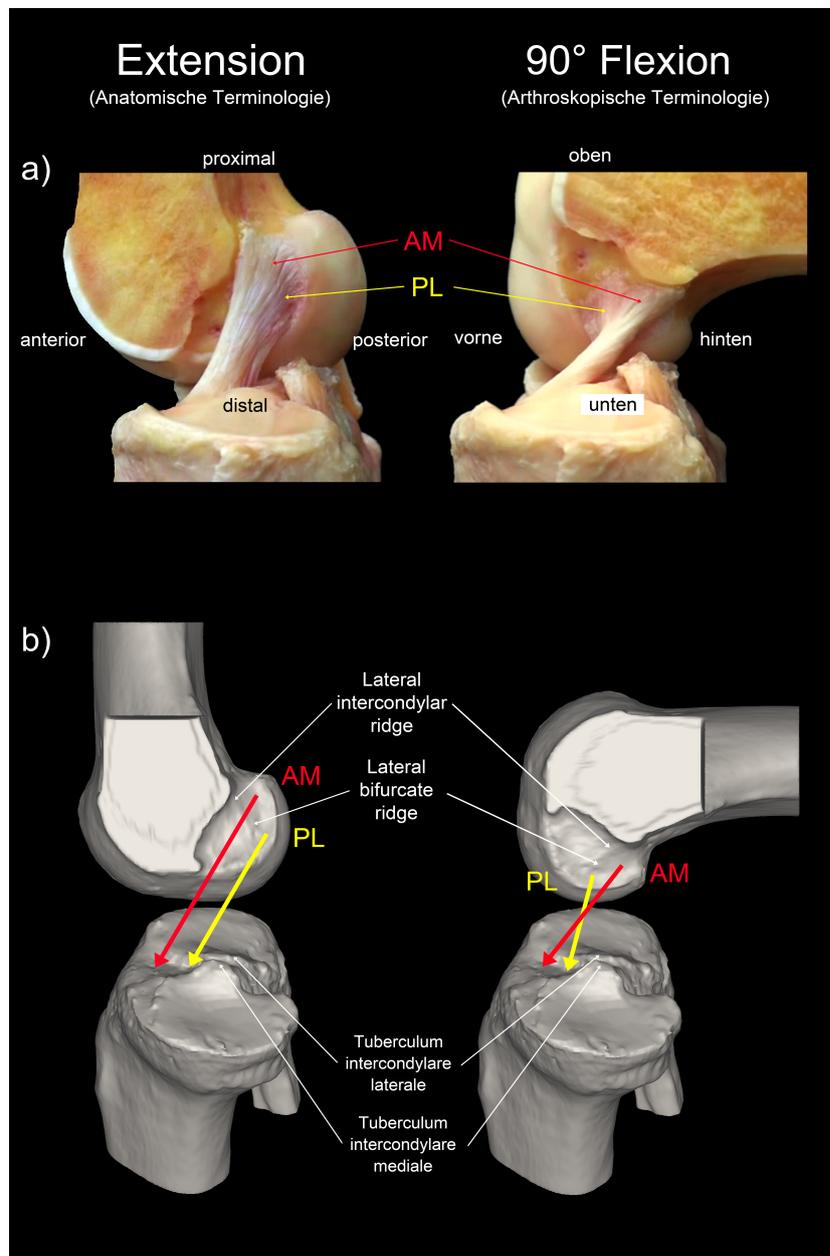


Abbildung 2: Diese Abbildungen zeigen die Anatomie des Ligamentum cruciatum anterius und seiner Insertionen in 0° und 90° Flexion. In Extension verlaufen die beiden Bündel parallel und in 90° überkreuzen sie sich, was auf dem anatomischen Bild (a) und schematisch in den 3D CT Modellen (b) zu sehen ist. Des Weiteren zeigen die 3D CT Modelle die knöchernen Landmarken des Ursprungs und Ansatzes (aus [30] und mit freundlicher Genehmigung von Springer).

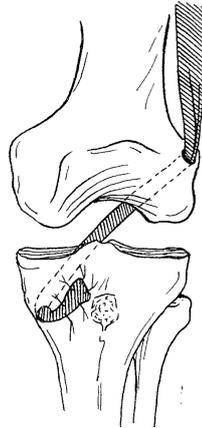


Abbildung 3: Zeichnung einer LCA Plastik mit autologer Sehne von 1917. In diesem Fall wurde der Tractus iliotibialis distal abgesetzt, gestielt und durch den femoralen und tibialen Bohrkanal gezogen und distal an der Tibia fixiert (aus [41]).

tion gelegt, also femoral vom LCA Ursprung zur lateralen Femurkortikalis austretend und tibial vom anteromedialen Tibiakopf (distal und medial der Tuberositas tibiae) in den Ansatz des LCA führend (Abb. 3) [41].

Da die Entnahme eines *Fascia lata* Transplantats sehr invasiv und mit einem großen Weichteiltrauma verbunden sein kann, sowie die Gefahr von Hernien mit belastungsabhängigen Schmerzen besteht, kam es in den folgenden Jahrzehnten zur Suche nach alternativen Transplantaten [42, 43, 44]. Diese reichten von Menisken, Sehnen der ischio-kruralen Muskulatur und des Kniestreckapparates bis hin zu allogenen, xenogenen und synthetischen Transplantaten. Xenogene und synthetische Materialien spielen heute auf Grund ihrer eingeschränkten biomechanischen Fähigkeiten und ausgeprägten Nebenwirkungen keine Rolle mehr [45, 46]. Allogene Transplantate werden hauptsächlich in den U.S.A. verwendet, da sie dort gut verfügbar sind. In Deutschland werden sie fast nur für Patienten mit Revisionen nach multiplen LCA Voroperationen bzw. Multiligamentverletzungen verwendet. Dies liegt zum einen an ihren hohen Kosten, zum anderen auch an der schwierigen rechtlichen Situation und dem hohen Beschaffungsaufwand. Andererseits haben allogene Transplantate eine deutlich höhere Re-Rupturrate vor allem bei jungen Patienten im Vergleich zu autologen Transplantaten [47, 48].

Die bereits oben erwähnten Menisken gehörten mit zu den ersten beschriebenen Transplantaten, die zur Augmentation oder zum kompletten Ersatz des LCA verwendet wurden [40, 49, 50, 51]. Sie fanden bis zur Mitte der 70er Jahre des vorherigen

Jahrhunderts eine häufige Anwendung; bis sich das Wissen um die große Bedeutung der Menisken für die Funktion des Kniegelenks endgültig durchsetzte, und sie nicht mehr für die LCA Plastik „geopfert“ wurden [52, 53]. Die Verwendung von Anteilen des distalen Streckapparates des Knies mit Teilen des *Retinaculum extensorum* und der Patellarsehne wurde 1928 von Ernst Gold aus Wien beschrieben [54]. Er führte das distal am Ansatz verbliebene Transplantat durch einen zuvor angelegten tibialen Bohrkanal nach i.a. und fixierte es dort nicht-anatomisch am *Ligamentum cruciatum posterius* (LCP). Weitere Entwicklungen waren die Erweiterung der Transplantatgewinnung auf den medialen Anteil der Sehne des *Musculus* (M.) *quadriceps femoris* [55]. Im Folgenden wurden weitere Modifikationen der Sehnenentnahmen wie z.B. die Entnahme des mittleren Drittels der Sehne des M. *quadriceps femoris* mit oder ohne patellärem Knochenblock, die Entnahme des medialen oder zentralen Drittels der Patellarsehne mit anhängenden Knochenblöcken von der Patellaspitze und der *Tuberositas tibiae* oder des distal belassenen Ansatzes beschrieben [56, 57, 58]. Die Verwendung des mittleren Drittels der Patellarsehne sollte über Jahrzehnte die dominierende Technik sein. Erstmals beschrieben wurde sie 1966 von Helmut Brückner aus Rostock, der die Bohrkanäle für das Transplantat annähernd anatomisch in Ansatz und Ursprung des nativen LCA positionierte [58]. Diese Technik wurde allgemein wegen der partiellen Entnahme der Patellarsehne mit den anhängenden Knochenblöcken aus der Patellaspitze und der *Tuberositas tibiae* als *bone-tendon-bone* (BTB) oder *bone-patellar tendon-bone* (BPTB) bezeichnet. Sie wird auch heute noch wegen ihrer guten klinischen Ergebnisse erfolgreich eingesetzt [59, 60, 61]. LCA Plastiken mit BTB Transplantat bieten eine gute Stabilität des Kniegelenks, können jedoch mit einer deutlichen Entnahmemorbidität wie zum Beispiel dem vorderen Knieschmerz, Patellafrakturen, Patellarsehnenrupturen und Tendinitiden einhergehen [62, 63]. Auf der Suche nach Alternativen veröffentlichte Walter Blauth aus Kiel 1984 die Verwendung der Sehne des M. *quadriceps femoris* mit patellärem Knochenblock in Doppelbündel(DB)technik, also mit Rekonstruktion des AM und PL Bündels. Den Knochenblock fixierte er in einem tibialen Bohrkanal und den Sehnenanteil teilte er in zwei Stränge. Den einen zog er durch den femoralen Bohrkanal und den zweiten zog er nach kranial und fixierte ihn proximal der lateralen Femurkondyle (= *over-the-top* Position), was einer nicht-anatomischen Doppelbündeltechnik entsprach. Trotz guter biomechanischer und klinischer Ergebnisse fand die Verwendung der Quadrizepssehne keine weite Verbreitung. Sie wird heute vornehmlich als

Transplantat für Revisionen verwendet [64, 45].

Die Sehnen der ischiokruralen Gruppe (im Besonderen die Sehnen der *Mm. semitendinosus et gracilis*) sind im Gegensatz zur Quadrizepssehne, die heutzutage am häufigsten verwendeten Transplantate für die LCA Plastik [65]. Die erste Operationstechnik am Kadaver unter Verwendung beider Sehnen beschrieb 1927 Alexander Edwards aus Glasgow [66]. Die ersten klinischen Ergebnisse wurden von Riccardo Galeazzi aus Mailand 1934 präsentiert [67]. Im Folgenden wurden diverse Techniken mit beiden Sehnen oder einzeln, proximal oder distal am Muskel bzw. am ossären Sehnenansatz belassen (= dynamische Plastik, da der Muskel stabilisiert), beschrieben [68, 69, 70]. Die Verwendung der komplett abgesetzten zweifach gelegten Sehnen der *Mm. semitendinosus et gracilis* wurde 1982 erstmalig in der offenen Technik für die LCA Plastik beschrieben und 1988 folgte die arthroskopische Erstbeschreibung [71, 72]. Diese arthroskopische Technik setze den femoralen Bohrkanal anterior des nativen femoralen Ursprungs des LCA, also 'nicht-anatomisch'. Des Weiteren wurde zur Verbesserung der i.a. Sicht eine ausgeprägte Notchplastik (*Fossa intercondylaris* = englisch *notch*) durchgeführt, also ein Abtragen der oberflächlichen Knochenschicht der medialen Fläche des *Condylus lateralis femoris* und auch des medialen Daches der *Fossa intercondylaris*. Dies verändert die Anatomie während der Operation, aber auch im Verlauf durch Narben- und Osteophytenbildung [73]. Im Weiteren folgte die Beschreibung der isolierten Verwendung der Sehne des *M. semitendinosus*, die 4-fach gelegt wurde [74]. In den Metaanalysen zum Vergleich beider Transplantate, BTB und ischiokrurale Sehnen, zeigte sich, dass beide Transplantate hinsichtlich der klinischen Ergebnisse annähernd gleichwertig sind [75, 76, 63]. Das BTB zeigte leichte Vorteile in der Kniestabilität, wobei es auch hier kontroverse Studien gab [77]. Jedoch ist die Entnahme der Sehnen der *Mm. semitendinosus et gracilis* mit einer geringeren Entnahmemorbidität verbunden. Am Anfang dieses Jahrtausends lösten die Sehnen der ischiokruralen Muskeln das BTB als das am häufigsten verwendete Transplantat folglich ab.

Die zunehmende Verbreitung der Kniearthroskopie und die Zunahme der arthroskopisch assistierten LCA Plastiken führten Anfang der 90er Jahre zu weiteren Modifikationen der Technik [78, 79]. Diese Modifikationen dienten vornehmlich der Vereinfachung der Operationstechnik und der Verkürzung der Operationszeit. Hierzu gehörte unter anderem die transtibiale (= durch den tibialen Bohrkanal) Bohrung des femoralen Kanals. Dabei wird die Ziellehre zur Bohrung des femoralen Bohrkanals durch

den bereits angelegten tibialen Bohrkanal geschoben und dorsal am Femur in der *Fossa intercondylaris* verhakt (Abb. 4). Über diese Ziellehre wird erst der Kirschnerdraht vorgebohrt, über den dann der femorale Bohrkanal mit dem gewünschten Durchmesser gebohrt wird. Dies macht die Operation deutlich einfacher und schneller. Die klinischen Ergebnisse dieser transtibialen Technik waren gut und sie fanden weltweit schnell Verbreitung. Das Risiko von weiteren i.a. Verletzungen wie z.B. Meniskusläsionen wurde reduziert und die Lebensqualität der Patienten deutlich verbessert [80]. Die anteriore Stabilität konnte bei einem Großteil der Patienten wiederhergestellt werden. Die Laxität wurde hauptsächlich mit dem Lachman Test (Knieflexion von 30° und Messung der anterioren tibialen Translation) im Seitenvergleich überprüft, entweder manuell oder unter Zuhilfenahme eines Gerätes z.B. KT-1000 oder Rolimeter. Diese Geräte erlauben die Quantifizierung der anterioren Translation in Millimetern. Als „normal“ wurde eine anteriore tibiale Translation bis zu 2 mm im Vergleich zur gesunden Gegenseite und ein fester Anschlag angesehen. Nach 10 Jahren findet man in den Fragebögen zur Evaluation der subjektiven Zufriedenheit im Mittel gute bis sehr gute Ergebnisse, d. h. im Lysholm Fragebogen [81] und im subjektiven Evaluationsbogen des International Knee Documentation Committee (IKDC) [82] wurden mehr als 80 von 100 Punkte [83, 84, 85, 86] erreicht. Trotz dieser guten Ergebnisse zeigte sich, dass die Technik der LCA Plastik noch Verbesserungspotential hat. In einer Metaanalyse zur klinischen Untersuchung von Patienten nach LCA Plastik wurden nur 37 % der Patienten als 'normal' eingeschätzt [87]. Die Einschätzung beruhte auf dem Nachuntersuchungsbogen des IKDC [7]. Die Rate an revisionsbedürftigen Knien wird mit 3 bis 15 % angegeben [88]. Des Weiteren treiben zwar 82 % der Patienten nach einer LCA Plastik wieder Sport, aber nur 63 % mit derselben Intensität und Häufigkeit wie vor der LCA Ruptur und nur 44 % kehren wieder zum Wettkampfsport zurück [89]. Dies gilt nicht nur für Wettkampfsportler, sondern auch für Freizeitsportler. Studien berichten von bis zu < 50 % der Patienten, die zum selben sportlichen Aktivitätslevel wie vor der Ruptur zurückkehren [90]. Weiterhin konnte im Vergleich zur konservativen Therapie durch die LCA Plastik eine verfrühte Gonarthrose bei Patienten mit rupturiertem LCA nicht verzögert oder aufgehalten werden [9]. Die Rate von Patienten mit radiologischen Zeichen einer Gonarthrose liegt bei bis zu 90 % nach 7 Jahren [91, 92] und das Risiko für die Implantation einer Knieendoprothese (Knie-TEP) ist um das 7-fache erhöht im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung [93, 94]. Im Rahmen der Ursachenforschung fand man be-

reits Mitte der 90er Jahre in einer Leichenstudie heraus, dass bei der Verwendung der transtibialen Technik der femorale Bohrkanal nicht-anatomisch (also außerhalb des nativen LCA Ursprungs) positioniert ist [95]. Im Gegensatz dazu erreichte man in dieser Leichenstudie beim Bohren des femoralen Bohrkanals mit Techniken, die unabhängig vom tibialen Bohrkanal waren - also nicht transtibial -, den anatomischen Ursprung des LCA und konnte damit die i.a. Bohrkanalöffnung anatomisch platzieren. Zu den Techniken, über die man unabhängig vom tibialen Bohrkanal den femoralen Kanal bohren kann, gehören z.B. die outside-in Technik und die Bohrung über den anteromedialen Arthroskopiezugang (= Portal) (Abb. 4). Bei der outside-in Technik wird der femorale Bohrkanal über eine Bohrlehre, deren Spitze i.a. z.B. im Zentrum des LCA Ursprungs liegt, von außen nach i.a. gebohrt. Bei der anteromedialen Technik wird der femorale Bohrkanal über den anteromedialen Arthroskopiezugang (= Portal) gebohrt, daher die Bezeichnung anteromediale Technik. Dieser Zugang bietet viel Freiheit hinsichtlich der Positionierung des Bohrkanals an der lateralen Wand der *Fossa intercondylaris*. In einer klinischen Studie zur transtibialen femoralen Bohrkanalpositionierung wurden eine klassische Positionierung mit einem steilen i.a. Transplantatverlauf und einem weit anterior gelegenen femoralen Bohrkanal mit einer eher anatomischen Positionierung in Richtung des nativen femoralen Ursprungs (mehr posterior an der medialen Wand des *Condylus lateralis femoris*) verglichen. Auch wenn diese eher anatomische Positionierung nicht im nativen femoralen LCA Ursprungsgebiet lag, so führte sie bereits zu einer erhöhten rotatorischen Stabilität und einer geringeren Gonarthrose rate im Vergleich zur klassischen anterioren Positionierung [96]. Die Ergebnisse dieser Studie sind kritisch zu sehen, da die postoperative Analyse der Bohrkanalposition im Röntgenbild nicht genau ist. Klassische Methoden zur Analyse der Position der i.a. Bohrkanalöffnung wie tibial die Amis & Jakob Linie und femoral die Quadrantenmethode setzen ein streng seitliches Röntgenbild voraus (Abb. 6). Die Röntgenbilder sind jedoch oft nicht genau seitlich aufgenommen. Weiterhin werden auf Röntgenbildern die Bohrkanäle oft nicht genau abgebildet wie CT Studien gezeigt haben und es kommt zu Ungenauigkeiten auf Grund der Überlagerung von anatomischen Strukturen [97, 98]. Ganganalysen demonstrierten, dass transtibial operierte LCA Plastiken zwar die anteroposteriore Kniestabilität wiederherstellen konnten, aber nicht die Stabilität in der Innen- und Außenrotation und der Varus- und Valgusrotation [1]. Dies ist aber essentiell um ein einen verfrühten Beginn der Gonarthrose und eine Rückkehr zum selben Aktivitätslevel, wie vor der Ruptur,

Techniken der femoralen Tunnelbohrung



Abbildung 4: Die transtibiale Technik war bis Ende des letzten Jahrzehnt die vorherrschende Technik zur Bohrung des femoralen Bohrkanals. Die Bohrung über den anteromedialen Zugang mit der freien Wahl der Bohrposition hat die transtibiale Technik heutzutage abgelöst. Die outside-in Technik erlaubt auch eine vom tibialen Kanal unabhängige Wahl der Positionierung des femoralen Kanals, ist aber mit einer höheren Weichteilmorbidität am lateralen Knie vor allem des *Tractus iliotibialis* vergesellschaftet (Abbildung mit freundlicher Genehmigung von Arthrex, Naples, Fl, USA).

zu schaffen. Dies führte zu einer kritischen Auseinandersetzung mit der transtibialen Technik und zu einer Rückbesinnung auf die Anatomie des LCA und seiner möglichst genauen chirurgischen Rekonstruktion. Für die Nachuntersuchungen bedeutete dies, dass der Rotationsstabilität vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt wurde, wofür vor allem der Pivot Shift Test verwendet wird. Es wurde postuliert, dass eine LCA Plastik, die möglichst genau der natürlichen Anatomie nachempfunden ist, zu besseren klinischen Ergebnissen führen würde vor allem hinsichtlich Kniestabilität, Patientenzufriedenheit, Rückkehr zum Aktivitätslevel vor der LCA Ruptur und Senkung der Gonarthrose rate. In diesem Rahmen fand auch die Idee der Doppelbündeltechnik, mit separater Rekonstruktion des AM und PL Bündels, initial von Mott 1983 mit Verwendung der Sehne des *M. semitendinosus* beschrieben, wieder eine zunehmende Beachtung [99]. Ziel war es, die LCA Plastik möglichst individualisiert auf die anatomischen Gegebenheiten des Patienten auszurichten, insbesondere hinsichtlich der i.a. Bohrkanalpositionierung, der Ausrichtung der Öffnungen und der Wiederherstellung der Größe der Insertionen (also Ursprung und Ansatz des LCA) mit den Bohrkanalöffnungen [100].

Zielstellungen

Im Rahmen der oben genannten Entwicklungen entstanden die vorliegenden Arbeiten mit dem Ziel der Verbesserung der anatomischen LCA Plastik. Das anatomische und chirurgische Wissen um die Insertionen des LCA sollte vertieft werden und die damals präferierte transtibiale Technik diesbezüglich untersucht werden. In diesem Rahmen sollten herkömmliche Methoden wie die Amis & Jakob Linie und neue Methoden wie 3D CT Modelle zur Messung der Bohrkanalposition untersucht werden. Ebenso sollte die Rolle der beiden Bündel des LCA für die *in vivo* Gelenkkinematik untersucht werden. Des Weiteren sollte der für die Nachuntersuchung wichtige, aber subjektive, Pivot Shift Test mit einem Messgerät objektiviert werden.

Hierzu wurden die folgenden Fragestellungen formuliert:

1. Wie groß sind die *in vivo* gemessenen Insertionen des LCA, welche Spanne haben sie, und inwieweit korrelieren die Insertionsgrößen mit der Körpergröße, dem Gewicht und dem BMI?
2. Inwieweit beeinflussen die Winkel bei der tibialen Bohrkanalanlage die Größe und die Ausrichtung der intraartikulären Bohrkanalöffnung?
3. Inwieweit beeinflusst die Knierotation die Genauigkeit der tibialen Bohrkanalposition bei der Messung mit der Amis & Jakob Linie im Röntgenbild?
4. Wo liegen die anatomisch positionierten i.a. Bohrkanalöffnungen bei der anatomischen Doppelbündelrekonstruktion im 3D CT Modell?
5. Werden mit der transtibialen OP Technik die Bohrkanäle bei der LCA Plastik anatomisch angelegt?
6. Welcher von drei chirurgischen Zugangswegen zum femoralen Ursprung des antero-medialen Bündels eignet sich am besten für eine anatomische Positionierung?
7. Welche Rolle spielen die beiden rekonstruierten Bündel des LCA für die *in vivo* Stabilität bei der anatomischen DB LCA Plastik?
8. Kann man mit einem Messgerät das Pivot Shift Phänomen detektieren und den Pivot Shift Test objektivieren?

2. Ergebnisse

2.1. Größenvariation der Insertionen des humanen Ligamentum cruciatum anterius

Size variability of the human anterior cruciate ligament insertion sites

Kopf S, Pombo MW, Szczodry M, Irrgang JJ & Fu FH

Am J Sports Med. 2011;39:108-113

Grundlage für eine anatomischen LCA Plastik sind profunde Kenntnisse der Anatomie, wozu auch das Wissen über die Größe des Ansatzes und Ursprungs des LCA sowie seiner zwei Bündel seines Patientenkollektivs gehört. Die bisher bekannten Studien konnten bereits zeigen, dass die Größe der LCA Insertionen variabel ist. Diese Studien waren jedoch an Kadavern mit teilweise erheblicher Gonarthrose, mit einer geringen Fallzahl oder an alten Leichen (bis 100 Jahre; im Mittel 68 Jahre) durchgeführt worden. Ziel dieser Arbeit war es, *in vivo* die Variabilität der Größe der Insertionen in einem größeren Patientenkollektiv, mit einer intraoperativ praktikablen Methode zu untersuchen und diese Ergebnisse mit der Körpergröße, dem Gewicht und dem BMI zu korrelieren. Hierzu wurden 137 Patienten mit einer primären LCA Ruptur, die nicht älter als sechs Monate war, untersucht. Während der arthroskopischen LCA Plastik wurden Breite und Länge des Ursprungs und Ansatzes des LCA und seiner zwei Bündel, des AM und PL, mit einem biegsamen Lineal ausgemessen. Die Körpergröße und das Gewicht wurden präoperativ aufgenommen und der *body mass index* (BMI) berechnet. Die Ergebnisse zeigten eine große Spanne der Länge des tibialen Ansatzes (12 bis 22 mm mit einem Mittelwert von 17 ± 2 mm) und femoralen Ursprungs (12 bis 20 mm mit einem Mittelwert von 17 ± 2 mm). Dies traf auch auf die Länge und Breite der beiden Bündel, AM und PL, zu. Die Körpergröße und das Körpergewicht korrelierten signifikant mit der Länge des femoralen Ursprungs und tibialen Ansatzes des LCA, der Länge des tibialen PL Bündel Ansatzes und der Länge des femoral AM Bündel Ursprungs. Jedoch war der prädiktive Wert, um von der Körpergröße und dem -gewicht auf die Insertionsgröße zu schließen, sehr klein (1 % bis 19 %). Diese Daten zeigen, dass die Größen der LCA Insertionen und seiner beiden Bündel stark variieren und dass die physischen Charakteristika nur eingeschränkt dazu geeignet sind um auf die genaue Größe der LCA Insertionen zu schließen. Dies hat zur Folge, dass, für eine möglichst anatomische LCA Plastik, die Insertionen intraoperativ ausgemessen werden sollten.

<http://dx.doi.org/10.1177/0363546510377399>

2.2. *Der Effekt der tibialen Bohrwinkel auf die intraartikuläre Öffnung des Bohrkanals bei der Plastik des Ligamentum cruciatum anterius*

Effect of tibial drill angles on bone tunnel aperture during anterior cruciate ligament reconstruction

Kopf S, Martin DE, Tashman S & Fu FH

J Bone Joint Surg Am. 2010;92:871-881

Für eine anatomische LCA Plastik sollten die intraartikuläre (i.a.) Bohrkanalöffnungen die LCA Insertionen hinsichtlich Größe und Ausrichtung möglichst genau rekonstruieren. Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss an der tibialen Bohrlehre einstellbare Winkel in der Sagittalebene und der Position der Bohrlehre am Tibiakopf in der Transversalebene sowie den Einfluss des Bohrerdurchmessers auf die Größe und die Ausrichtung der i.a. tibialen Bohrkanalöffnung zu untersuchen. Des Weiteren sollte evaluiert werden, wieviel der nativen Fläche des LCA Ansatzes mit der Bohrkanalöffnung abgedeckt wird und um wieviel die Bohrkanalöffnung bei bestimmten Bohrwinkeln außerhalb des nativen LCA Ansatzes liegt. Dies wurde mit Hilfe eines mathematischen dreidimensionalen Modells und der in der Vorarbeit gewonnenen Dimensionen des tibialen LCA Ansatzes berechnet. Die Ergebnisse zeigten einen ausgeprägten Effekt des sagittalen Bohrwinkels auf die i.a. Bohrkanalöffnung. Verkleinert man zum Beispiel den sagittalen Bohrwinkel von 65° auf 30° vergrößert sich die Fläche der i.a. Bohrkanalöffnung um 81 %. Die Größe der i.a. Bohrkanalöffnung in Abhängigkeit vom Bohrerdurchmesser und sagittalen Bohrwinkel wurden in einer Tabelle dargestellt, um dem Operateur nach Ausmessen des LCA Ansatzes eine Hilfe für die korrekte Kombination von Winkel und Bohrer zu geben. In der Transversalebene führt eine um zum Beispiel 45° zur anatomischen Ausrichtung fehlrotierte Bohrkanalöffnung zu einer zu kleinen Bohrkanalöffnung (2,3 mm) in der anteroposteriorer Richtung und einer zu großen (1,4 mm) in der mediolateralen Richtung. Dies entspricht jeweils einer Fläche $13,7 \text{ mm}^2$ bzw. 15 %. Ein überschreiten der anatomischen Grenzen des tibialen LCA Ansatzes, ob durch einen zu große oder eine fehlpositionierte Bohrung, setzt die in der direkten Nachbarschaft liegenden anatomischen Strukturen, wie z.B. die Meniskuswurzeln oder den Knorpel, dem Risiko einer iatrogenen Schädigung aus. Eine zu kleine Bohrkanalöffnung birgt potentiell eine erhöhte Gefahr für eine Re-Ruptur.

<http://dx.doi.org/10.2106/JBJS.H.01680>

2.3. *Der Einfluss der Tibiarotation auf die Messung der tibialen Tunnelposition nach LCA Plastik im seitlichen Röntgenbild*

Influence of tibial rotation on tibial tunnel position measurements using lateral fluoroscopy in anterior cruciate ligament reconstruction.

Haasper C*, **Kopf S***, Lorenz S, Middleton KK, Tashman S & Fu FH

Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2015 Mar;23(3):649-54

*geteilte Erstautorenschaft

Die Position der Bohrkanäle spielt eine wichtige Rolle für den Erfolg der LCA Plastik. Die Bestimmung der Position der Bohrkanäle auf Röntgenbildern ist eine häufig angewandte Methode. Tibial wird häufig die Amis & Jakob Linie, benannt nach ihren Erstbeschreibern, verwendet (Abb. 6) [101, 102]. Hierfür wird ein streng laterales (= seitliches) Röntgenbild vorausgesetzt. Dieses liegt *per definitionem* vor, wenn die laterale und die mediale Femurkondyle dorsal bündig übereinanderliegen. Dies ist in der Praxis jedoch häufig nicht der Fall und die Röntgenbilder werden mit verdrehten Knien aufgenommen. Ziel dieser Studie war es, den Einfluss der Knierotation auf die Messung der tibialen Bohrkanalpositionen mit der Amis & Jakob Linie bei der anatomischen LCA Plastik zu untersuchen. An sieben Leichenknien mit Bohrkanälen für eine DB LCA Plastik wurden die Positionen der i.a. tibialen Bohrkanäleingänge mit Hilfe der Amis & Jakob Linie am streng lateralen Röntgenbild sowie in 5°, 10° und 20° Innen- als auch Außenrotation untersucht. Die Rotation hatte keinen signifikanten Effekt auf die gemessene Position des posterolateralen Bündels. Ab einer Außenrotation von 10° und einer Innenrotation von 20° veränderte sich die gemessene Position des tibialen Bohrkanals für das anteromediale Bündel signifikant gegenüber der Position im streng lateralen Röntgenbild. Die Abweichungen bei der maximalen Außenrotation von 20° betrug 3,3%. Aus diesem Grund ist die klinische Relevanz kritisch zu sehen. Es stellt aber auch die Sinnhaftigkeit mit der Amis & Jakob Linie die tibiale Bohrkanalposition zumessen in Frage, wenn selbst ausgeprägte Fehlrotationen des Knies nur einen solch geringen Einfluss auf die Messung haben. Dies wird unterstrichen durch die Ergebnisse einer Studie, die hohe Spanne an anatomischen Bohrkanalpositionen fand (z.B. für den AM Bohrkanal 23 und 42%). Dies erschwert die Empfehlung eines festen Zielwerts für die Bohrkanalposition auf der Amis & Jakob Linie [103].

<https://dx.doi.org/10.1007/s00167-013-2770-y>

2.4. *Die Lage des femoralen und tibialen Bohrkanals bei der anatomischen Doppelbündelplastik des Ligamentum cruciatum anterius analysiert mittels dreidimensionalem computertomographischen Modell*

The location of femoral and tibial tunnels in anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction analyzed by three-dimensional computed tomography models

Forsythe B, **Kopf S**, Wong AK, Martins C, Anderst W, Tashman S & Fu FH

J Bone Joint Surg Am. 2010;92:1418-1426

Neben der Größe und der Ausrichtung der Bohrkanalöffnung ist auch die Position wichtig für eine möglichst anatomische LCA Plastik. Intraoperativ wird die Position über anatomische Landmarken oder Röntgenbilder bestimmt und postoperativ klassischerweise über Röntgenbilder. Diese haben deutliche Nachteile wie z.B. die Zweidimensionalität, die Abhängigkeit von der Lage des Knies im Röntgenbild, die Projektion von anderen anatomischen Strukturen auf die relevante Region, wodurch kleinere Strukturen wie z.B. die *lateral intercondylar ridge* nicht beurteilt werden können. Als Alternative ohne die erwähnten Nachteile bieten sich dreidimensionale (3D) computertomographische (CT) Modelle zur Beurteilung der Position der Bohrkanalöffnungen an. Ziel dieser Studie war die genaue Beschreibung der Position der anatomischen AM und PL Bohrkanäle im 3D CT Modell und die Visualisierung des Ursprungs und des Ansatzes des LCA anhand anatomischer Landmarken im Knie. In Leichenknien wurde das anatomische Zentrum des Ursprungs und Ansatzes des LCA markiert und CTs der Knie angefertigt aus denen 3D Modelle kreiert wurden. Tibial wurden die Positionen der Bohrkanalöffnungen in anteroposteriorer und mediolateraler Richtung auf dem Tibiaplateau gemessen und in Prozent der gesamten Ausdehnung des Tibiaplateaus angegeben. Femoral wurde der *Condylus medialis femoris* im 3D CT Modell entfernt und das Modell so gedreht, dass man direkt auf die mediale Wand der lateralen Femurkondyle (= laterale Wand der *Fossa intercondylaris*) schaute. Dann wurden die Positionen der Bohrkanalöffnungen (1) in posteroanteriorer und kraniokaudaler Richtung sowie (2) mit der klassischen Quadrantenmethode [101], bei der die Blumensaatlinie (Dach der *Fossa intercondylaris*) als Basislinie genommen wird, gemessen. Diese Daten zeigen die Zentren des AM und PL Ursprungs und Ansatzes und dienen so als Referenz für klinische Studien und für Chirurgen zur Einschätzung der Kanalpositionierung im klinischen Alltag [104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111].

<https://dx.doi.org/10.2106/JBJS.I.00654>

2.5. *Die nicht-anatomische Tunnelposition bei der traditionellen transtibialen Einzelbündelplastik des Ligamentum cruciatum anterius untersucht mit der dreidimensionalen Computertomographie*

Nonanatomic tunnel position in traditional transtibial single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction evaluated by three-dimensional computed tomography

Kopf S, Forsythe B, Wong AK, Tashman S, Anderst W, Irrgang JJ & Fu FH

J Bone Joint Surg Am. 2010;92:1427-1431

Eine der bis dahin am häufigsten verwendeten Techniken zur Bohrung des femoralen Kanals bei der arthroskopischen LCA Plastik war die sogenannte *transtibiale* Technik. Hierbei wird der femorale Kanal durch den zuvor gebohrten tibialen Kanal bei starker Knieflexion gebohrt. Diese Technik ermöglicht eine schnelle, unkomplizierte Bohrung des femoralen Kanals mit geringen Komplikationen, aber Leichenversuche hatten gezeigt, dass die transtibiale Technik den tibialen und femoralen Bohrkanal außerhalb der anatomischen Insertion platziert. Nicht-anatomische Bohrkanalpositionierungen sollten vermieden werden, da sie anormale Kniekinematiken verursachen und im Verdacht stehen, eine verfrühte Gonarthrose auszulösen. Ziel dieser Studie war es, bei Patienten mit transtibialer LCA Plastik die Position der i.a. Bohrkanalöffnung in 3D CT Modellen zu bestimmen und mit den, in der vorherigen Studien gewonnenen, anatomischen Positionsdaten zu vergleichen. Bei allen Patienten waren die transtibial angelegten intraartikulären Bohrkanalöffnungen nicht-anatomisch positioniert und zwar sowohl tibial als auch femoral. Femoral lagen die Zentren der Bohrkanalöffnungen zu weit anterior und tibial zu weit medial und dorsal - auf Höhe der Zentrums des PL Bündels, anstatt in der Mitte zwischen AM und PL Bündel. Die nicht-anatomische Position der femoralen Bohrkanalöffnung ist durch den steilen tibialen Bohrkanalwinkel vorgegeben. Eine Abflachung des tibialen Bohrwinkels würde die Öffnung des Bohrkanals deutlich vergrößern (s. Kapitel 2.2) und umliegende Strukturen gefährden. Weiterhin würde dieser flache Bohrkanal direkt unter dem Tibiaplateau verlaufen, was eine Frakturgefahr bedeutet. Die nicht-anatomische Position der tibialen Bohrkanalöffnung ist notwendig, um die femorale Bohrkanalöffnung nicht noch weiter vom anatomischen Ursprung zu positionieren. Dies wäre der Fall, wenn die tibiale Bohrkanalöffnung anatomisch positioniert wäre.

<https://dx.doi.org/10.2106/JBJS.I.00655>

2.6. *Die Möglichkeit, über drei Zugangswege den femoralen Ursprung des anteromedialen Bündels während der anatomischen Plastik des Ligamentum cruciatum anterior zu erreichen*

The ability of 3 different approaches to restore the anatomic anteromedial bundle femoral insertion site during anatomic anterior cruciate ligament reconstruction

Kopf S, Pombo MW, Shen W, Irrgang JJ & Fu FH

Arthroscopy. 2011;27:200-206

Die publizierten Leichen- und Patientenstudien hatten demonstriert, dass die Verwendung der transtibialen LCA Plastik zu nicht-anatomisch positionierten i.a. Bohrkanaalöffnungen führt. Trotzdem argumentierten viele Kollegen, dass mit der von ihnen verwendeten transtibialen Technik mit nur leichten Modifikationen die Bohrkanaäle anatomisch positioniert werden, ohne dies jedoch wissenschaftlich zu belegen. Aus diesem Grund war es das Ziel dieser Studie *in vivo* zu untersuchen, ob es möglich ist, über anatomisch positionierte tibiale Bohrkanaäle (AM und PL) sowie über den anteromedialen Arthroskopiezugang, das anatomische Zentrum des femoralen AM Bündels zu erreichen. Dies wurde nur für den femoralen AM Kanal untersucht, da dieser vornehmlich von Chirurgen, die die transtibiale Technik verwenden, rekonstruiert werden soll. Bei 113 Patienten wurde intraoperativ, nach Bohrung der anatomisch positionierten tibialen Kanäle für das AM und PL Bündel, mit einem Kirschnerdraht durch die tibialen Kanäle und den anteromedialen Zugang überprüft, inwieweit sich das Zentrum des femoralen AM Bündels erreichen ließ. Es wurden drei Lokalisationen unterschieden: (i) zentral im AM Ursprung, (ii) dezentral im AM Ursprung und (iii) komplett nicht-anatomisch. Über den anteromedialen Arthroskopiezugang war es bei allen Patienten möglich das Zentrum des femoralen AM Bündels zu erreichen, aber nur in 60 % der Patienten über den tibialen PL Bohrkanaal und nur in 4 % über den tibialen AM Zugang. Hierbei muss noch beachtet werden, dass zum Austesten der Erreichbarkeit ein dünner Kirschnerdraht verwendet wurde, der noch Freiraum im tibialen Kanal hatte und für das Erreichen der femoralen Insertion oft schräg im tibialen Bohrkanaal verlief. Würde man in diesem Winkel den femoralen Bohrkanaal durch den tibialen Bohrkanaal bohren - wie üblich bei der transtibialen Technik - dann würde man den tibialen Bohrkanaal erweitern und damit auch die initial anatomische Position der tibialen Bohrkanaalöffnung verschieben.

<https://dx.doi.org/10.1016/j.arthro.2010.07.010>

2.7. *Die Untersuchung der in vivo Kinematik bei der anatomischer Doppelbündelplastik des Ligamentum cruciatum anterius*

In Vivo Kinematic Evaluation of Anatomic Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

Kopf S, Musahl V, Bignozzi S, Irrgang JJ, Zaffagnini S & Fu FH

Am J Sports Med. 2014;42:2172-2177

Mit dem zunehmenden Fokus auf eine möglichst anatomische LCA Plastik und der Abkehr von der transibialen EB Technik wurde die DB Technik mit der anatomischen Rekonstruktion des PL und AM Bündels populär. Es gab jedoch eine Diskussion über das Vorhandensein und die Rolle des PL Bündels [112]. Dies wurde oft negiert und nur das AM Bündel rekonstruiert (Einzelbündeltechnik). Biomechanische Studien hatten jedoch schon die Wichtigkeit des PL Bündels vor allem für die Rotationsstabilität beschrieben. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Funktion des AM und PL Bündels bei der anatomischen Doppelbündeltechnik *in vivo* mit einem Navigationsgerät zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Studie demonstrierten, dass die Fixierung des PL Bündels zu einer signifikanten Verbesserung der Stabilität der Kniegelenke sowohl beim Lachman und vorderen Schubladen Test als auch bei der Innen- und Außenrotation bei 30° Knieflexion führte. Die zusätzliche Fixierung des AM Bündels führte zu einer weiteren Stabilisierung sowohl beim Lachman und vorderen Schubladen Test als auch beim Varus- und Valgusstresstest bei 30° Knieflexion. Dies zeigt die wichtige Rolle der Rekonstruktion des PL Bündels - zusätzlich zur Rekonstruktion des AM Bündels - für die Kniestabilität. Diese Ergebnisse wurden später dann auch in klinischen Studien bestätigt, die eine besser anteroposteriore und Rotationsstabilität bei der DB im Vergleich zur EB LCA Plastik fanden [113, 92, 114, 115, 116, 117, 118].

<https://dx.doi.org/10.1177/0363546514538958>

2.8. Eine neue quantitative Methode zur Graduierung des Pivot Shift Tests

A new quantitative method for pivot shift grading

Kopf S, Kauert R, Halfpaap J, Jung T & Becker R

Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2012 Apr;20(4):718-23

Die Rotationsstabilität des Knies ist ein wichtiges Kriterium der klinischen Untersuchung und wird am häufigsten mit dem dem Pivot Shift Test überprüft. Ein präoperativ ausgeprägter Pivot Shift Test kann wertvolle Hinweise auf, zusätzlich zur LCA Plastik, notwendige Operationsmaßnahmen geben wie z.B. eine extraartikuläre Augmentation der anterolateralen Kapsel. Postoperativ gibt der Test wertvolle Hinweise über den Erfolg der LCA Plastik. Der Grad des Pivot Shift Tests korreliert positiv mit der Rückkehr zum Sport und der Entwicklung einer Gonarthrose [119, 8, 113, 120, 121]. Einer der Kritikpunkte der transtibialen LCA Plastik ist die häufig nicht gegebene Rotationsstabilität. Die anatomische LCA Plastik und vor allem die DB LCA Plastik erzielen deutlich rotationsstabilere Knie. Aus diesen Gründen hat der Pivot Shift Test in den letzten Jahren stark an Bedeutung zugenommen. Jedoch ist der Test sehr untersucherabhängig, was u.a. an der sehr subjektiven Graduierung liegt. Dies schränkt die Vergleichbarkeit der Ergebnisse des Pivot Shift Tests zwischen den Studien und in der täglichen Praxis deutlich ein. Ziel der vorliegenden Studie war es, ein praxistaugliches Gerät zur Erfassung des Pivot Shift Phänomens an Patienten mit LCA Ruptur zu testen, das Pivot Shift Phänomen, über die in das Gerät integrierte Sensoren der Winkelgeschwindigkeit, zu quantifizieren und mit der klinischen Graduierung zu korrelieren. Es zeigte sich, dass das Pivot Shift Phänomen mit dem Gerät gut detektierbar und quantifizierbar war. Jedoch gab es keine Korrelation zwischen den Messwerten des Geräts und der subjektiven Graduierung. Daraus wird klar, dass für eine objektive Einschätzung der Rotationsstabilität des Kniegelenks mit dem Pivot Shift Test ein Gerät zur Erfassung des Pivot Shift Phänomens verwendet werden sollte. Dies gilt im Besonderen für die Durchführung von Studien, um ihre Vergleichbarkeit zu erhöhen. Des Weiteren sollten zukünftige Daten einen Anhalt dafür bieten, wann zum Beispiel die LCA Plastik um Maßnahmen wie die extraartikuläre Augmentation erweitert werden sollten oder postoperativ ab welcher Rotationslaxität eine LCA Revision empfohlen werden sollte.

<https://dx.doi.org/10.1007/s00167-012-1903-z>

3. Diskussion

Anatomische Kenntnisse sind essentiell für Chirurgen. Der Anatom Friedrich Tiedemann (1781 bis 1861) formulierte dies sehr treffend: „Ärzte ohne Anatomie sind Maulwürfen gleich: sie arbeiten im Dunkeln, und ihrer Hände Tagewerk sind Erdhügel.“. Genaue Kenntnisse der Anatomie sind dementsprechend auch wichtig für eine erfolgreiche LCA Plastik. Auch wenn eine Nichtbeachtung im Allgemeinen für den Patienten nicht das Ende unter einem Erdhügel bedeutet, so kann eine erfolgreiche LCA Plastik zu einem stabilen, schmerzfreien und voll belastbaren Knie im Langzeitverlauf führen. Die Anatomie fand allerdings nicht bei jeder Entwicklung der LCA Plastik Beachtung. Die arthroskopische Technik hielt Anfang der 1980er Jahre schnell Einzug in die Kniechirurgie und wurde zunehmend auch der Goldstandard für die Operation der LCA Plastik. Zur Vereinfachung der OP und der Verkürzung der OP Zeit wurde die transtibiale Technik entwickelt, die auf Grund dieser Vorzüge schnell sehr populär wurde. Die klinischen Ergebnisse waren insgesamt gut, aber es bestand noch deutlicher Verbesserungsbedarf vor allem hinsichtlich der Rotationsstabilität, der Gonarthroseentwicklung und der Rückkehr zum selben Aktivitätslevel wie vor der Ruptur [122, 123, 124, 63, 1, 87, 90]. Bei der Ursachenforschung drängte sich der Verdacht auf, dass die transtibiale Technik die i.a. Bohrkanalöffnungen außerhalb der anatomischen Insertionen positioniert (= nicht-anatomisch) [95] und somit mitverantwortlich für oben genannten Kritikpunkte sein könnte. Zwei klinische Studien zur transtibialen Technik verglichen eine klassische, sehr weit anteriore, mit einer weiter dorsal, näher am anatomischen LCA Ursprung, positionierten i.a. femoralen Bohrkanalöffnung. Knie mit der weiter dorsal gelegenen Position hatten eine bessere Rotationsstabilität, eine geringere Gonarthroserate bzw. eine geringere Rate an Patienten mit subjektiver Instabilität [96, 125]. Damit rückte die Anatomie des LCA inkl. der Position der Insertionen in den Vordergrund des Interesses und es wurden zahlreiche Studien zur Anatomie des LCA publiziert [126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 17, 136, 137, 138, 139, 140, 141].

Die Qualität, die Methodik und die Ergebnisse der anatomischen Studien zu den LCA Insertionen sind sehr heterogen, weshalb ihre Ergebnisse schlecht vergleichbar und nur eingeschränkt auf die klinische Situation übertragbar sind. Die angegebenen Längen lagen im Mittel zwischen 14 und 29 mm [142]. Die kürzeste Insertion war 9 mm und die längste 38 mm. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Die Qualität der untersuch-

ten Knie variierte stark von arthrotischen über frisch eingefrorene bis hin zu einbalsamierten Knien. Die Art der Konservierung und vor allem der Arthrosegrad beeinflussen direkt die Morphologie des LCA und damit die Messungen [143, 144]. Einige Studien gaben keine Hinweise auf den Gonarthrosegrad. Andere schrieben nur, dass die verwendeten Knie keine offensichtlichen arthrotischen Veränderungen gehabt hätten oder schlossen Knie mit arthrotischen Veränderungen größer als Outerbridge III° aus (Grad 0 = normal; Grad 1 = Erweichung; Grad 2 = Auffaserung und Fibrillationen; Grad 3 = Fissuren bzw. Ulcus bei gedecktem Knochen; Grad IV = vollschichtiger Knorpelverlust mit freiliegendem Knochen). Zwei Studien vermaßen die LCA Insertionen in Knien mit manifester Gonarthrose (Outerbridge IV°) während der Implantation einer Knie-TEP [145, 127, 138, 142]. Aber nicht nur die Gonarthrose sondern auch das Alter verändert das LCA [146]. Gemessen wurde mit einem Lineal, einem Messschieber, digital auf Photographien mit Maßstab und mit dreidimensional messenden Stiften. Die Anzahl der untersuchten Knie war im Allgemeinen eher gering und lag im Mittel bei 30 Knien mit einer Spanne von 7 bis maximal 60. Die Ethnie spielt eine weitere Rolle als Einflussfaktor auf die LCA Größe. Asiaten sind im Allgemeinen kleiner und leichter als Kaukasier. In einer japanischen Studie wurde die Größe der LCA Insertionen an Leichen untersucht, die im Mittel 38 kg wogen und eine Körpergröße von 1,54 m hatten. Die in diesen Studien untersuchten Knie waren im Durchschnitt 68 Jahre alt (Spanne: 17 bis 100 Jahre) und damit deutlich älter als der klassische Patient mit LCA Ruptur. Auch die Messmethoden der oben erwähnten Studien variierten deutlich. Sie reichten von der Markierung der LCA Insertionen an der Leiche und der folgenden Messung auf Fotografien, Röntgen- oder an Magnetresonanzzarthrographiebildern über Messungen von an Leichenknien nachgebildeten Gummimodellen bis zu Messungen an kryokonservierten Schnitten (5-10 µm Schnitte) [126, 140]. Da nur eine schwache Korrelation zwischen Insertionsgröße und Körpergröße sowie Gewicht besteht, ist es wichtig, eine einfache praktikable Messmethode zu haben um die genaue Insertionsgröße des Patienten prä- oder postoperativ zu ermitteln. Hierzu bietet sich ein steriles, leicht biegsames kleines Lineal an, womit während der Operation die Insertionen gemessen werden können [147]. Eine weitere Möglichkeit wäre es, am MRT zu messen, das die meisten Patienten mit LCA Ruptur in Deutschland präoperativ erhalten. Dies ist jedoch zum einen nicht immer vorhanden und müsste dann angefordert werden, was zusätzlich Zeit und Geld kosten würde. Zum anderen ist die exakte Identifikation sowie die Breiten- und

Längenmessung der Insertionen in ihrer gesamten Dimension schwierig, da die Insertionen häufig nicht genau und komplett von den Sequenzen getroffen werden. Dies trifft im Besonderen auf das häufig benutzte zweidimensionale MRT zu. Die Genauigkeit der Messung wird weiterhin durch Schichtdickenartefakte, mögliche Abstände zwischen den Schichten (engl. = *gaps*), Fett-Wasser-Verschiebungen (engl. = *chemical shift artifacts*) und bei voroperierten Patienten durch eventuelle Suszeptibilitätsartefakte eingeschränkt [148, 149]. Präoperativ wäre es hilfreich die Größe der LCA Insertionen zu wissen. Dies könnte Vorteile bieten z.B. für die Wahl des Transplantats und seine Größe oder für die OP Technik. Zum Beispiel gibt es für die DB LCA Plastik eine empirische Empfehlung, diese Technik nur ab einer Insertionslänge von 14 mm zu operieren und bei kleineren Längen eine EB LCA Plastik zu operieren [150]. Dies wird mit der technischen Komplexität begründet, in kleine Insertionen zwei Kanäle jeweils tibial und femoral zu bohren [151]. Die Messung der Insertionsgrößen kann auch nicht durch die Körpergröße, das Gewicht oder den BMI ersetzt werden, da es nur schwache Korrelationen gibt und diese keine Rückschlüsse von den morphometrischen Daten auf die exakte Insertionsgröße zulassen [147]. Mit dem Ziel der anatomischen LCA Plastik sollte man intraoperativ bei jedem Patienten die Insertion mit einem Lineal vermessen, um die Bohrkanalöffnung individuell passend zur Insertionsgröße wiederherzustellen zu können. Basierend auf diesen und weiteren Studien wurde eine Definition für die Ziele der *anatomischen* LCA Plastik aufgestellt: „die funktionelle Wiederherstellung des LCA in seinen natürlichen Dimensionen, Kollagenorientierung und Insertionen“ mit dem Ziel einer möglichst individuellen, auf die anatomischen Gegebenheiten des Patienten zugeschnitten LCA Plastik [152].

Für eine möglichst genaue Rekonstruktion der Größe und Ausrichtung der LCA Insertionen sind die Bohrergröße und die Bohrwinkel entscheidend. Tibial wird über den sagittalen Bohrwinkel, der an der tibialen Bohrlehre eingestellt wird, die Länge der Bohrkanalöffnung beeinflusst [153]. Die Breite der Bohrkanalöffnung wird durch den Bohrerdurchmesser vorgegeben. Über die Rotation der Bohrlehre in der Transversalebene, also der Positionierung nach lateral in Richtung *Tuberositas tibiae* oder nach medial zum *Ligamentum collaterale tibiale superficiale*, wird die Ausrichtung der i.a. Bohrkanalöffnung beeinflusst. Bei der Bohrung des femoralen Bohrkanales über das anteromediale Portal bestimmt der Bohrwinkel in der Transversalebene die Größe der i.a. Bohrkanalöffnung. Damit ist der Winkel maßgeblich von der Position des anteromedia-

len Portals abhängig. Die Bohrkanalöffnung vergrößert sich mit einem weiter lateral, also in Richtung des *Lig. patellae*, gelegenen Portal und verkleinert sich mit einem weiter nach medial, also in Richtung des *Condylus medialis femoris*, gelegenen Portal [154]. Über die Knieflexion wird die Ausrichtung der i.a. Bohrkanalöffnung beeinflusst. Bei diesen Betrachtungen ist zu beachten, dass es sich um Berechnungen handelt, die bisher nicht *in vivo* überprüft wurden. Bei der Anwendung in der Operation ist zu beachten, dass die Insertionen dreidimensionale Strukturen mit einem Relief sind und nicht flach. Tibial ist bei der Ausrichtung der Bohrlehre zu beachten, dass der Biegel parallel zum Slope (=Winkel des Tibiaplateaus von anterior nach posterior zur Tibiaschaftachse) der Insertion ist, damit die Größenberechnungen korrekt sind. Der Slope wurde bisher für das laterale und mediale Tibiaplateau eingehend untersucht [155, 156, 157, 158]. Der Slope der beiden Plateaus unterscheidet sich und variiert interindividuell deutlich. Der Slope der *Area intercondylaris anterior*, der für den tibialen sagittalen Bohrwinkel relevant ist, wurde bisher nicht untersucht. Es ist jedoch nahelegend, dass es auch hier interindividuelle Unterschiede gibt, so dass dieser bei jedem Patienten bei der Anlage der tibialen Bohrlehre beachtet und die Bohrlehre in ihrer Ausrichtung dementsprechend angepasst werden sollte. Die genaue Rekonstruktion der Größe und der Ausrichtung spielt auch wegen der sich in der direkten Nachbarschaft befindenden anatomischen Strukturen eine wichtige Rolle [112]. Diese Strukturen dürfen nicht beschädigt werden (*primum non nocere*). Hierzu zählen unter anderem die Meniskuswurzeln, der Knorpel und das LCP. Die anatomischen Dimensionen können vor allem bei EB LCA Plastiken bei der Verwendung sehr großer Bohrer Durchmesser in der Breite überschritten werden. Die Breite des Bohrkanals wird z.B. beim heute am häufigsten verwendeten autologen Transplantat, den Sehnen der ischiokruralen Muskulatur, durch die Dicke des Transplantats bestimmt. Es wird ein möglichst dickes Transplantat angestrebt, da bekannt ist, dass es eine geringere Re-Rupturrate des LCA bei Verwendung von Sehnen mit einem Durchmesser über 8 mm gibt [159]. Aus diesem Grund wird ein dickeres Transplantat angestrebt, zum Beispiel durch 4-fache Faltung der Sehne oder Entnahme der Sehne des M. gracilis zusätzlich zur Sehne des M. semitendinosus. Dies bedeutet jedoch, dass die Breite der i.a. Bohrkanalöffnung mindestens der Breite des Transplantats entspricht. Dies bedeutet, dass eine hohe Chance besteht, die Breite des AM Bündels bzgl. der Größe korrekt zu rekonstruieren. Jedoch wird bei diesen angestrebten Bohrkandurchmesser von > 8 mm die anatomische Insertion des

PL Bündels, bei dem 93 % der Patienten eine Breite von 6 bis 8 mm hatten, überschritten. Bei der Anwendung dieser hier vorgestellten Prinzipien für die anatomische LCA Plastik konnten bisher tibial ca. 70 % und femoral ca. 79 % der anatomischen Insertionen durch die i.a. Bohrkana löfnungen rekonstruiert werden [160]. In dieser Studie wurden die anatomischen Insertionen mit einem Lineal gemessen. Die i.a. Bohrkana löfnungen wurden unter der Annahme einer Ellipse mit dem intraoperativ verwendeten Bohrerdurchmesser und dem verwendeten Winkel berechnet, so dass die Werte nur als Annäherungswerte angesehen werden können. Auch werden mit dieser Methode mögliche, außerhalb der anatomischen Insertion liegende Anteile der Bohrkana löfnungen nicht berücksichtigt. Die häufig als Grundlage für Berechnungen verwendete Form der Ellipse, also einer ovalen Bohrkana löfnung, ist zwar die häufigste Form des tibialen LCA Ansatzes mit 51 %, allerdings gibt es auch verschiedene andere Formen wie eine dreieckige (33 %) oder c-förmige (16 %) Form [161, 134, 133]. Biomechanisch konnte gezeigt werden, dass eine exzentrisch in der anatomischen LCA Insertion positionierte i.a. Bohrkana löfnung einer zentral positionierten Öffnung hinsichtlich der Kniestabilität unterlegen ist [162]. Weiterhin wurde die Bedeutung des tibialen Bohrkanals für die Transplantatspannung, die Kanalerweiterung und -länge beschrieben [163, 164, 135]. Bisher gibt es jedoch keine klinischen Studien, die eine Aussage darüber erlauben, wieviel der Fläche des anatomischen Ursprungs und Ansatzes des LCA rekonstruiert werden sollten. Die bisher vorliegenden Ergebnisse von Kohortenstudien nach anatomischer EB oder DB LCA Plastik, die nach oben erwähnten anatomischen Prinzipien implantiert wurden, zeigten sehr gute klinische Ergebnisse mit 94 von 100 Punkten im Lysholm Fragebogen, 93 von 100 Punkten im IKDC Fragebogen, einer anterioren Translation der Tibia von im Mittel 1,5 mm und bei 90 % der Patienten einen negativen Pivot Shift Test [165].

Neben der Größe der i.a. Bohrkana löfnung spielt die korrekte anatomische Position eine wichtige Rolle für die anatomische LCA Plastik. Im Zuge der Einführung und Verbreitung der arthroskopischen LCA Plastik, die die Morbidität des Eingriffes deutlich verringerte und eine deutlich bessere operative Therapie der oft mit der LCA Ruptur einhergehenden Begleitpathologien wie Meniskusrisse und Knorpelläsionen erlaubte, kam es zu einer Abkehr von anatomischen Prinzipien. Dies lag zum einen an der schnellen Verbreitung der transtibialen Technik, bei der der femorale Kanal durch den tibialen Kanal über spezielle Bohrlehren (= Zielgeräte) hindurch gebohrt wird, und zum

anderen an der damals populären Theorie der Isometrie der beiden Kreuzbänder [166]. Grundlage dieser Theorie war der Gedanke, dass ein gut funktionierendes Transplantat den vollen Bewegungsumfang über gleichmäßig gespannt sein müsste. Lagen Ansatz und Ursprung des LCA zu weit auseinander, wäre das Transplantat zu locker bei bestimmten Kniewinkeln und würde dort die Stabilität nicht gewährleisten. Auf der anderen Seite, lägen Ansatz und Ursprung zu dicht beieinander, wäre das Transplantat zu fest und würde damit das Bewegungsausmaß reduzieren oder das Transplantat auslockern. Diese Theorie wurde an sechs Knien von drei Leichen entwickelt. Um diese Isometrie zu erreichen, sollte bei einer zentral im tibialen LCA Ansatz gelegenen Bohrkanalöffnung die femorale Bohrkanalöffnung nahe am Dach der *Fossa intercondylaris* liegen: also anterior des anatomischen femoralen LCA Ursprungs. Spätere Studien zeigten, dass Knie mit derartig positionierten LCA Plastiken laxer sind als Knie mit anatomisch positionierten LCA Plastiken [165, 167]. Für die Bohrung dieser hoch in der *Fossa intercondylaris* liegenden Bohrkanäle wurde die sogenannte *over-the-top* Bohrlehre entwickelt, die durch den tibialen Kanal geschoben wird und sich an der proximalen lateralen Wand der *Fossa intercondylaris* (engl. = *over-the-top* Position) femoral über eine kleine Ausziehung an der Spitze verankert. Diese Region ist die bereits oben beschriebene *over-the-top* Region, woher sich auch der Name der Bohrlehren ableitet. Diese Bohrlehren werden jedoch gerne auch für die Bohrung des femoralen Kanals über den anteromedialen Arthroskopiezugang benutzt, da sie einen sicheren Halt für die initiale Bohrung bieten. Sie bergen jedoch auch bei der anteromedialen Technik die Gefahr der zu weit anterioren, also nicht-anatomischen, Positionierung des femoralen Bohrkanals. Dies bedeutet, dass die Verwendung des anteromedialen Arthroskopiezugangs die Möglichkeit der anatomischen Positionierung des femoralen Bohrkanals eröffnet, aber kein Garant dafür ist [168]. Es muss stets die individuelle anatomische Insertion des LCA durch den Chirurgen identifiziert werden.

Für die Beschreibung der Position des femoralen i.a. Bohrkanaleingangs war die Verwendung der *o'clock* Methode sehr populär. Hierbei wurde ein Zifferblatt in die *Fossa intercondylaris* bei ca. 90° Knieflexion - also der typischen Knieflexion bei der arthroskopischen LCA Plastik - virtuell projiziert und die Kanalposition in einer Uhrzeit angegeben (Abb. 5). Eine klassische Empfehlung lautete: femoral am rechten Knie den Bohrkanal zwischen 1:00 und 2:00 Uhr und am linken Knie zwischen 10:00 und 11:00 Uhr zu positionieren [169]. Diese Methode hat jedoch zahlreiche Nachteile. Zum einen

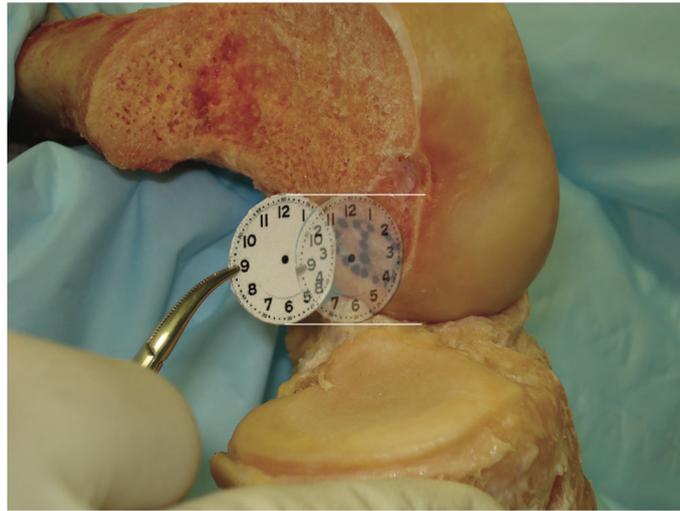


Abbildung 5: Darstellung der o'clock Methode zur Bestimmung und Beschreibung der femoralen Bohrkanalposition (aus [170] und mit freundlicher Genehmigung von J Bone Joint Surg - American Volume [Rockwater, Inc.]).

ist sie zweidimensional, d.h. sie kann nicht unterscheiden, ob der femorale Bohrkanal weiter distal oder proximal liegt [170]. Zum anderen variiert die Position und Größe der projizierten Uhr von Chirurg zu Chirurg, und der genaue Flexionswinkel beeinflusst die Uhrzeit und damit die Position [171, 170]. Dies erklärt die großen Varianzen zwischen Chirurgen bei der Einschätzung der Kanalposition mit der *o'clock* Methode [171]. Ein weiteres Problem für die korrekte Kanalpositionierung war die Einführung neuer Termini zur Beschreibung der femoralen Kanalposition mit der Verbreitung der Arthroskopie zum Beispiel *vorne* und *hinten* anstatt *distal* (oder *kaudal*) und *proximal* (oder *kranial*); als auch *unten* (oder *flach*) und *oben* (oder *hoch*) anstatt *posterior* (oder *dorsal*) und *anterior* (oder *ventral*) (Abb. 2). Diese Termini entstanden durch die Sicht in ein 90° flektiertes Knie während der arthroskopischen LCA Plastik. Neben diesen meist *in situ* genutzten Orientierungspunkten gab es auch die Empfehlung, die Insertionen per Bildverstärker über Röntgenbilder intraoperativ zu identifizieren. Eine der am häufigsten verwendeten Methoden für die femorale Insertion ist die sogenannte Quadrantenmethode [101]. Hierbei wird auf einem streng seitlichen Röntgenbild das Zentrum des femoralen LCA Ursprungs - basierend auf der Untersuchung an zehn Leichenknien, die als Referenz dienten - aufgesucht. Als Grundlinie dient die sogenannte *Blumensaatlinie*, die eine Projektion des Daches der *Fossa intercondylaris* ist (Abb. 6).

Auf dieser Linie basierend wird ein Quadrantensystem bestehend aus 16 Kästchen distal der Blumensaatlinie aufgelegt. Nach der Originalpublikation sollte das anatomische Zentrum des femoralen LCA Ursprungs im 2. Quadranten der am weitesten proximal gelegenen Reihe sein (Abb. 6). Dies entspricht nach heutigen Erkenntnissen aber eher dem Zentrum des anteromedialen Bündels des LCA [172, 173]. Für die Position der tibialen Bohrkanalöffnung lautete eine klassische Empfehlung: Das Zentrum des tibialen Bohrkanals sollte 10 mm ventral der anterioren Begrenzung des LCP Ansatzes liegen [127, 174]. Diese initiale Empfehlung basierte auf intraoperativen Messungen an Knien mit Gonarthrose während der Implantation einer Knie-TEP [127]. Diese Daten führten zur Entwicklung eines sich am LCP-orientierenden Zielgerätes zum Bohren des tibialen Kanals (Arthrex, Naples, FL, U.S.A.). Die Empfehlungen dieser Studien und das aus diesen Daten entwickelte Zielgerät ignorierten aber die große interindividuelle Spanne des Abstands von LCP zu LCA von 6 bis 13 mm [174] und wählten den arithmetischen Mittelwert für alle mit diesem Zielgerät operierten Patienten nach dem Motto: „Eine Größe passt allen.“. Eine weitere populäre Methode zum Identifizieren der Position der tibialen Insertion war die Methode nach Amis & Jakob [102]. Auf einem streng seitlichen Röntgenbild wird eine Linie parallel zur Gelenklinie des medialen Tibiaplateaus auf Höhe der dorsalen Ecke (in der Originalarbeit als „posterior corner“ bezeichnet) des Tibiaplateaus gelegt. Auf dieser Linie wird das Bohrkanalzentrum in Prozent von anterior nach posterior von der maximalen Länge berechnet (Abb. 6). Die dorsale Ecke ist jedoch nicht immer auszumachen, so dass sich hier bereits Ungenauigkeiten ergeben. Ein weiteres Problem ist die große Spanne der gefundenen Positionen der LCA Insertionen. Zum Beispiel lag das Zentrum des tibialen AM Bündels auf der Amis & Jakob Linie zwischen 23 und 42 % (Mittelwert: 35 %) und das PL Bündel zwischen 39 bis 58 % (Mittelwert: 48 %) [103]. Hinzu kommt die Anfälligkeit der Messungen für fehlrotierte, nicht korrekt aufgenommene Röntgenbilder, welche die Messergebnisse verfälschen. Dieser Effekt ist gering für zentral in der Tibia liegende Bohrkanalöffnungen wie z.B. den Bohrkanal für das posterolaterale Bündel. Mit zunehmendem Abstand vom Zentrum der Tibia nimmt dieser Effekt jedoch zu [97]. Interessanterweise haben sich intraoperative Messungen der tibialen i.a. Bohrkanalposition auf a.p. Röntgenbildern in der klinischen Praxis nicht durchgesetzt; obwohl es auch hierzu Referenzdaten gibt [129]. Neben generellen Nachteilen von intraoperativen Röntgenbildern wie Strahlenexposition und Verlängerung der Operationszeit, haben Röntgenbilder spezielle Nachteile bei der Identifikation ana-

tomischer Landmarken. Hierzu gehören zum Beispiel ihre zweidimensionale Projektion von dreidimensionalen Strukturen, ihre Abhängigkeit von der Rotation des Kniegelenks und die Nichtdarstellung wichtiger anatomischer Orientierungspunkte für die Positionierung der LCA Bohrkanäle wie die *lateral bifurcate ridge* und *lateral intercondylar ridge* [97, 175]. Aus diesem Grund sollte sich der Chirurg intraoperativ möglichst an den intraartikulären anatomischen Strukturen orientieren, wie zum Beispiel den Stumpf des LCA. Dieser ist vor allem bei frischeren Rupturen innerhalb der ersten Monate tibial meistens noch gut erhalten. Femoral kann man sich gut an ossären Landmarken orientieren. Das LCA entspringt posterior der *lateral intercondylar ridge* und wird in AM und PL Bündel durch die *lateral bifurcate ridge* getrennt, wobei letzteres weiter distal liegt (Abb. 2) [17, 176]. Tibial bieten neben dem oft erhaltene LCA Stumpf, die Wurzel des anterioren Meniskushorns und die *Tubercula intercondylares medialis et lateralis* eine gute Orientierung zur anatomischen Bohrkanalpositionierung [177, 178]. Auch für die exakte, postoperative Analyse der Bohrkanalpositionen sollte man auf Grund der vorgenannten Schwächen von Röntgenbildern eher ein CT in Erwägung ziehen. Weiterhin sind in Röntgenbildern die genauen Grenzen der Bohrkanäle und ihrer intraoperativen Öffnungen oft nur schlecht auszumachen. Auch hier bietet das CT Vorteile mit seiner ausgezeichneten, feinauflösenden Darstellung von ossären anatomischen Strukturen inkl. der Bohrkanäle [98, 175]. Aus einem CT Datensatz lässt sich leicht ein 3D CT Modell erstellen, das viele weitere Möglichkeiten bietet wie die Einstellung der aus der Operation bekannten Perspektive, der Darstellung selbst kleiner ossärer anatomischer Strukturen und der temporären Entfernung von anatomischen Strukturen wie zum Beispiel den *Condylus medialis*, um eine bessere Sicht auf die mediale Wand des *Condylus lateralis* femoris mit den LCA Bohrkanälen zu haben (Abb. 2 und 7) [173, 179, 30]. Aus diesem Grund benutzten viele aktuelle Studien diese Technik zur Bestimmung der Bohrkanalposition [104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111]. Ein weiterer Vorteil des 3D Modells ist die freie Rotation im Raum. Dies ermöglicht die Einstellung der Sicht auf den Knochen, wie man es aus der Operation gewohnt ist. Die Messung der Bohrkanalposition ist stark abhängig von der Lage des 3D Modells im Raum [180]; aus diesem Grund sollten die 3D CT Modelle in ein anatomisches Koordinatensystem transferiert werden, um die Messungen in vergleichbarer Position vorzunehmen. Neben diesen Vorzügen hat das Knie-CT zur Bestimmung der Kanalposition aber auch Nachteile: (i) eine intraoperative Anwendung ist nur in den seltensten Fällen möglich,

Methoden zur Bestimmung der Bohrkanalposition
mittels Röntgenaufnahmen

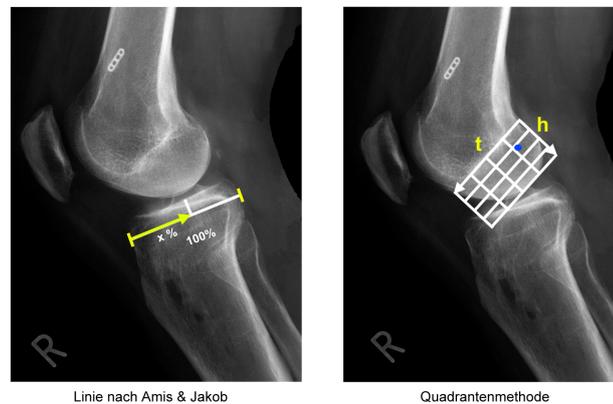


Abbildung 6: Die Abbildung zeigt klassische Methoden zur Bestimmung der Bohrkanalposition mit Hilfe von Röntgenbildern. *Links* - Die Amis & Jakob Methode, bei der an einem streng lateralen Röntgenbild die tibiale Bohrkanalposition in anteroposteriorer Richtung in Prozent angegeben wird [102]. *Rechts* - Die Quadrantenmethode, bei der an einem streng lateralen Röntgenbild die femorale Bohrkanalposition in einem Quadrantensystem, das distal der Blumensaatlinie liegt, die Bohrkanalposition entweder in einem der 16 Quadranten angegeben werden kann oder in Prozent auf der 't' und 'h' Linie, in der durch die Pfeile angegebenen Richtung [101].

(ii) es hat eine höhere Strahlenbelastung als zwei Röntgenbilder, auch wenn die Knie nicht in der Nähe stark strahlensensibler Organe liegen, (iii) die Kosten liegen über den von zwei Röntgenbildern, und (iv) die Erstellung von 3D Modellen erfordert einen gewissen Aufwand, auch wenn 3D CT Modelle heutzutage mit frei verfügbarer, kostenloser Software (z.B. OSIRIX, Genf, Schweiz) schnell zu erstellen sind. Die Einbettung des 3D CT Modells in ein anatomisches Koordinatensystem und die Verwendung der exakten Zahlenwerte ist primär für wissenschaftliche Studien gedacht. Für den klinisch tätigen Chirurgen stellt ein 3D CT Modell auch ohne diese wissenschaftlichen Faktoren ein ausgezeichnetes Werkzeug zur Überprüfung seiner Bohrkanalpositionen dar - sicher nicht für die tägliche Routine, aber zum Beispiel bei einem Wechsel der OP Technik, um sicherzustellen, dass seine Bohrkänäle wirklich so positioniert sind wie intraoperativ gedacht. Diese Studien zeigen, dass sich der Chirurg intraoperativ an den anatomischen Landmarken orientieren und für eine exakte postoperative Analyse ein CT mit einem 3D Modell verwenden sollte.

Die transtibiale Technik der LCA Plastik erfreute sich trotz der genauen Kenntnisse

um die Anatomie des LCA, des Wissens um ihre nicht-anatomische Bohrkanalpositionierung sowie geeigneter Methoden zur Evaluierung der Bohrkanalposition noch lange Zeit großer Beliebtheit. Sie wird auch heute noch verwendet, wenn auch deutlich seltener [95, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189]. Von Leichenstudien war bekannt, dass es mit der transtibialen Technik nur schwer möglich ist, in die Zentren des Ursprungs und Ansatzes des LCA zu bohren. Dies wurde aber auf den Kongressen immer wieder abgestritten. Bis heute behaupten viele Verfechter der transtibialen Technik, dass sie ihre Bohrkanäle anatomisch positionieren. Die nicht-anatomische Tunnelpositionierung wurde dann auch durch *in vivo* Studien bestätigt [179, 30]. In einer Studie wurden zum Beispiel LCA Plastiken, die zwischen 1989 und 2007 von mehreren Operateuren operiert worden waren hinsichtlich der Bohrkanalpositionen nachuntersucht [179]. Das Ergebnis war eindeutig und zeigte, dass keiner der transtibial gebohrten Bohrkanäle anatomisch positioniert war. Die femoralen Bohrkanalöffnungen lagen zu weit anterior. Die tibialen Bohrkanalöffnungen lagen weit posterior auf dem Tibiaplateau, medial des posterolateralen Bündels. Diese nicht-anatomischen Bohrkanalöffnungen führten zu sehr steil verlaufenden i.a. Transplantaten. Die femorale Fehlpositionierung ist Folge der transtibial verwendeten Bohrlehren. Die tibiale, sehr posteriore Fehlpositionierung ist eine Folge der sehr anterioren (hohen) Position der femoralen Bohrkanäle. Wären die tibialen Bohrkanalöffnungen weiter anterior auf dem Tibiaplateau positioniert, z.B. im Zentrum des LCA oder sogar noch weiter anterior, wie das AM Bündel bei der anatomischen DB Technik, so käme es zu einem Anschlagen (= Impingement) des Transplantats an das Dach der *Fossa intercondylaris* während der Knieextension. Dieses Anschlagen wird als pathologisches Impingement bezeichnet. Hiervon wird das physiologische Impingement unterschieden, bei dem Teile der Sehne oder des Bandes im Rahmen des physiologischen Bewegungsablaufes gegen eine ossäre Struktur drücken. In dieser Zone der Berührung kommt es dann zu einer natürlichen Adaptation. Das sonst auf Zug beanspruchte Gewebe passt sich der lokalen Druckbelastung mit lokaler Bildung von Faserknorpel sowie Chondrozyten an [190]. Das bei Fehlpositionierung auftretende pathologische Impingement an der anterioren und lateralen Wand der *Fossa intercondylaris* (engl. *notch*) führte bei der transtibialen LCA Plastik zu einer routinemäßig durchgeführten Notchplastik, um Extensionsdefizite zu vermeiden. Bei der Notchplastik wird die ossäre Wand um einige Millimeter entfernt, um damit Platz für das LCA Transplantat zu schaffen. Häufig kommt es allerdings zum erneuten Wachstums des

Knochens auf dasselbe oder sogar auf ein überschießendes Niveau [73, 191, 192]. Des Weiteren verändert man die Anatomie durch die Lateralisation der bearbeiteten Wand der *Fossa intercondylaris* und durch die Zerstörung der anatomischen Landmarken zur Kanalplatzierung wie z.B. der *lateral intercondylar ridge* (Abb. 2). Das pathologische Impingement stellt für die anatomische LCA Plastik im Allgemeinen kein Problem dar, da der femorale Bohrkanal deutlich weiter posterior liegt und damit das Transplantat bei Extension nur in einem unerheblichen Maße an das anteriore Dach der *Fossa intercondylaris* anschlägt (physiologisches Impingement). Im Verlauf versuchte man dann zu beweisen, dass es doch möglich sei, mit der transtibialen Technik die Bohrkanäle anatomisch zu positionieren. Eine Laborstudie an Leichenknien zeigte, dass ein Erreichen des anatomischen femoralen LCA Ursprungs über einen sehr flachen, direkt unter dem medialen Tibiaplateau verlaufenden, und kurzen Kanal möglich sei. Dies würde jedoch die Fixation z.B. mit einer Schraube erschweren und ein hohes Frakturrisiko bedeuten [135]. Auch eine kürzlich veröffentlichte prospektive randomisierte Studie meinte zu zeigen, dass man mit einer modifizierten transtibialen Technik die Bohrkanäle anatomisch positionieren könne [193]. Jedoch wurde nur der femorale und nicht der tibiale Kanal hinsichtlich Position und Ausrichtung analysiert - obwohl die CT Daten vorlagen. Interessanterweise beschreiben die Autoren in der Studienmethodik bereits, dass die Positionen der tibialen Kanalöffnungen nicht-anatomisch positioniert waren d.h. weit posterior auf dem Tibiaplateau mit den oben beschriebenen Konsequenzen. Des Weiteren werden leider nur Mittelwerte der Position angegeben und man kann nicht einschätzen, ob es Ausreißer gab. Die Schwierigkeit den tibialen und femoralen Bohrkanal mit der transtibialen Technik anatomisch zu positionieren wird durch eine weitere *in vivo* Studie bestätigt. Nach tibialer Bohrung des anatomischen AM und PL Bohrkanals wurde untersucht, ob man das anatomische Zentrum des femoralen AM Bündels über die beiden tibialen Bohrkanäle bzw. das anteromediale Portal erreichen kann. Es wurde nicht untersucht, ob das PL Bündel zu erreichen sei, weil das nicht über die beiden tibialen Kanäle möglich ist. Des Weiteren stellt die femorale Position des AM Bündels für viele EB Operateure das klassische Ziel dar. Dies wurde mit einem dünnen Kirschnerdraht (Durchmesser: 2,5 mm) durch die bereits auf die volle Größe gebohrten tibialen Kanäle versucht. Es zeigte sich, dass dies durch den tibialen AM Kanal nur in 4% und durch den tibialen PL Kanal nur bei 60% der Patienten möglich war. Im Gegensatz dazu konnte man über das anteromediale Portal bei allen Patienten

das Zentrum des femoralen AM Bündels erreichen. Bei diesen Ergebnissen ist noch zu beachten, dass der Kirschnerdraht, beim Versuch transtibial das femorale AM Zentrum zu erreichen, oft schräg im tibialen Kanal lag. Würde man in dieser Position den Bohrer zum Bohren des femoralen Kanals vorschieben, würde man direkt intraoperativ bereits den tibialen Bohrkanal erweitern. Dies verschlechtert die Transplantatfixation mit der Schraube und erschwert die Situation bei einer eventuellen Revision [194]. Nachdem die anatomische Technik der LCA Plastik zunehmend Verbreitung fand, behaupteten viele, vor allem klinische, Studien die femoralen und tibialen Bohrkanalöffnungen anatomisch positioniert zu haben. Die meisten Autoren blieben dafür aber den Beweis schuldig, weder aussagekräftige arthroskopische noch Bilder von 3D CT Modellen sind dargestellt [195]. Die Bohrkanalposition ist jedoch essentiell um die klinischen Ergebnisse richtig zu interpretieren. Die anteromediale Technik der LCA Plastik wird im Allgemeinen als technisch etwas schwieriger im Vergleich zur transtibialen Technik angesehen. Dies liegt unter anderem daran, dass man bei der Verwendung des anteromedialen Arthroskopiezugangs zum Bohren des femoralen Kanals am *Condylus medialis femoris* mit dem Bohrer vorbei muss. Hier wurde von iatrogenen Verletzungen des Knorpels des *Condylus medialis femoris* berichtet. Dies lässt sich durch eine gute Platzierung des anteromedialen Portals und ggf. eine Schutzhülle für den Bohrer umgehen. Diese technischen Veränderungen hin zu anatomisch positionierten Bohrkanälen dienten dazu die klinischen Ergebnisse zu verbessern. Patienten mit einer klassischen transtibialen LCA Plastik waren meist zufrieden [196]. Die Verlagerung der i.a. femoralen Bohrkanalöffnung bei der transtibialen Technik nach dorsal in die Richtung der anatomischen Insertionen des LCA führte zu einer Verbesserung der Kniekinematiken und der klinischen Ergebnissen vor allem zu vermehrter Stabilität und geringeren degenerativen Veränderungen [96, 197]. Eine weitere Verlagerung der Bohrkanalöffnung in den anatomischen Ursprung mit der anteromedialen Technik führte zu einer weiteren Verbesserung der Kniekinematik und zu stabileren Knien im Lachman und Pivot Shift Test [198, 199, 1, 200, 201, 202, 203]. Patienten mit anatomischer LCA Plastik kehrten auch häufiger zum selben Sport- bzw. Aktivitätslevel wie vor der LCA Ruptur zurück [201]. Des Weiteren zeigten Knie mit anatomischer Bohrkanalposition keine Knorpelausdünnung im Vergleich zu Knien mit transtibialer Bohrkanalposition 1,5 Jahren postoperativ [204]. Dies spricht für eine langfristig geringere Gonarthroseentwicklung mit anatomisch positionierten Bohrkanälen. Dies hatte zur Folge, dass die anteromediale

Technik zunehmend Verbreitung fand. Zum Beispiel zeigte das Dänische LCA Registers eine Zunahme von 13 % im Jahre 2007 auf 40 % im Jahre 2010. Interessanterweise zeigten diese Registerdaten auch eine erhöhte Revisionsrate für die anteromediale Technik im Vergleich zur transtibialen, aber nur bei der Verwendung von Sehnen der ischio-kruralen Muskeln (x2,2) und nicht bei Verwendung von BTB Transplantaten [187]. Inwieweit die anteromedial gebohrten Kanäle anatomischer positioniert waren als die transtibialen bleibt unklar, da die Bohrkanalposition nicht im Register erhoben wurde. Dies ist ein bekanntes Problem, weshalb bereits eine Checkliste erarbeitet wurde, um zu zeigen, dass eine anatomische LCA Plastik durchgeführt wurde [195]. Für die höhere Revisionsrate bei anteromedial gebohrten Kanälen gibt es verschiedene Erklärungen: (i) im untersuchten Zeitraum und kurz zuvor kam es zu einem Umschwung von der transtibialen zur anteromedialen Technik, weshalb dieser Zeitraum auch die Lernkurve der Chirurgen mit abbildet und (ii) über das anteromediale Portal eher anatomisch positionierte Transplantat übernimmt mehr Kräfte während der Belastung als das transtibiale positionierte, was auch ihre höhere Stabilität und natürlichere Kinematik erklärt, und von daher kann es auch eher reißen oder auslockern [205]. In diesem Zusammenhang wird postuliert, dass die vermehrte Kraftübernahme des LCA Transplantats einen besseren Schutz für den Knorpel und die Menisken darstellt und damit mit einer geringeren Gonarthroserate im Langzeitverlauf einhergeht.

Historisch erfolgte die Ablösung der transtibialen LCA Plastik durch die anatomische EB-Plastik interessanterweise über die DB LCA Plastik, bei der das AM und PL Bündel separat rekonstruiert werden. Die DB LCA Plastik verfolgt das Ziel, die Anatomie des LCA möglichst genau nachzuempfinden und die meisten anatomischen Studien stellen das LCA aus diesen zwei Bündeln bestehend dar [129, 130, 133, 134, 136, 137, 139, 141]. Die DB LCA Plastik wurde zwar 1982 erstmalig durch einen US Amerikaner beschrieben [99], aber populär wurde sie zuerst in Japan in den 90er Jahren [90, 206, 207]. Sie fand dann auch zunehmend Verbreitung in den U.S.A., Europa und anderen Teilen Asiens. Die separate Rekonstruktion beider Bündel wird u.a. durch ihre unterschiedlichen Funktionen begründet. Biomechanische Studien zeigten, dass das AM Bündel über den gesamten Bewegungsumfang (von der Extension bis zur maximalen Flexion) des Knies gespannt ist und vor allem die anteriore Translation der Tibia stabilisiert. Das PL Bündel ist vor allem in Streckung und strecknah angespannt ist und stabilisiert vor allem die Rotation [28]. Trotz dieser biomechani-

schen Studien wurde die Existenz bzw. der Nutzen des PL Bündels *in vivo* angezweifelt [112]. Der Nutzen der zusätzlichen Rekonstruktion des PL Bündels für die anteriore und die Rotationsstabilität konnte jedoch u.a. in einer Navigationsstudie an Patienten mit anatomischer DB LCA Plastik auch *in vivo* gezeigt werden [208]. Weiterhin ist es auch aus evolutionsbiologischer Sicht fraglich einer existierenden anatomischen Struktur den Nutzen abzusprechen [25]. Sollte diese Struktur keine Funktion haben, ist davon auszugehen, dass sie sich zurückentwickelt hätte. So fanden biomechanische Studien in Knien mit DB LCA Plastik eine natürlichere Kinematik, einer erniedrigten Gelenkkontaktdruck als auch eine vergrößerte Kontaktfläche im Vergleich zu Knien mit SB LCA Plastik [209, 210]. Dies ist wichtig hinsichtlich der Gonarthroseentwicklung und wurde später auch in klinischen Studien bestätigt [211, 212]. Des Weiteren zeigten mehrere Metaanalysen über klinische Studien die signifikant bessere anteriore und rotatorische Kniestabilität der DB LCA Plastik im Vergleich zur EB LCA Plastik [113, 92, 114, 115, 116, 117, 118]. Dies traf aber nur auf anatomisch positionierte DB LCA Plastiken zu; in Knien mit nicht-anatomisch positionierten DB LCA Plastiken wurde keine Überlegenheit gegenüber EB LCA Plastiken gefunden. Dies bestätigt zum einen Studien, die zeigten, dass je anatomischer die Bohrkanäle positioniert sind, desto natürlicher ist auch die Kniekinematik [197]. Andererseits zeigt es, dass es nicht nur auf die Anzahl der Bündel, sondern auch - wie bei der EB LCA Plastik - auf die anatomische Positionierung der Bohrkanäle ankommt. Hierbei ist zu beachten, dass die DB LCA Plastiken initial transtibialer operiert wurde und erst im Verlauf auf die antero-mediale Technik mit anatomisch positionierten Bohrkanälen umgestellt wurde (Abb. 4). Des Weiteren zeigte eine Cochrane Metaanalyse, dass die Patienten mit DB Plastik zu einem signifikant höheren Sport- und Aktivitätslevel postoperativ bei der letzten Nachuntersuchung zurück gekehrt waren als die Patienten mit EB Plastik [118].

Die Rotationsstabilität in diesen klinischen Studien wurde meistens mit dem Pivot Shift Test untersucht. Ein positiver Pivot Shift Test postoperativ erhöht das Gonarthrosrisiko und wirkt sich schlecht auf das Ergebnis von Fragebögen aus, da Patienten mit einem positiven Pivot Shift Test oft über ein instabiles Gefühl im Knie klagen [119, 8, 113, 120, 121]. Jedoch berichtete trotz dieses Zusammenhanges nur eine Metaanalyse über bessere Ergebnisse der DB Technik in einem Fragebogen (IKDC) im Vergleich zur EB Technik [117]. Dies mag an der subjektiven Beurteilung des Pivot Shift Tests liegen. Es wird sich zeigen, ob die Einführung bereits vorgestellter neuer

Testgeräte zu Objektivierung der Beurteilung des Pivot Shift Tests zu anderen Ergebnissen kommen [213, 214, 215, 216, 217].

Trotz der Überlegenheit oder Gleichwertigkeit der DB Technik gegenüber der SB Technik konnte sich diese klinisch nicht durchsetzen. Dies mag zum Einen an einigen biomechanischen und klinischen Studien liegen, die keinen Unterschied zwischen der EB und DB LCA Plastik fanden [218]. Die Fallzahl ist hier im Allgemeinen begrenzt und es wurden keine Fallzahlberechnungen vor Beginn der Studie durchgeführt (*prehoc power analysis*). Von daher bleibt es unklar, ob es wirklich keinen Unterschied zwischen beiden Techniken gab oder nur ein Fehler 2. Art vorlag - also die Fallzahl zu klein war um statistisch einen Unterschied zu finden [219]. Zum Zweiten erfordert die DB LCA Plastik einen erhöhten Materialaufwand und sie ist technisch anspruchsvoller. Hiermit steigen auch die Kosten für die DB LCA Plastik im Vergleich zur EB LCA Plastik, bedingt durch mehr Implantate zur Transplantatfixation und durch eine längere OP Zeit. Die vermehrten Implantatkosten fallen jedoch nur bei stationär operierten ins Gewicht, da es hier eine Fallpauschale für EB und DB LCA Plastik gibt. Bei den meisten ambulant operierten LCA Plastiken können die Transplantate separat mit den Krankenkassen abgerechnet werden und schlagen sich damit nicht auf den Erlös des Operateurs nieder [220]. Aus den genannten Gründen war im Jahr 2008 in Deutschland der Erlös bei einer DB LCA Plastik 277,74 € geringer als bei einer SB-LCA Plastik [220]. Eine vorläufige Analyse zur Kosteneffektivität zeigte, dass die DB LCA Plastik auf Grund der besseren klinischen Ergebnisse kosteneffektiv ist trotz höherer initialer Kosten [221]. Diese Berechnung ging von der Verwendung von allogenen Transplantaten aus, so dass die initialen Kosten noch höher waren als die in Deutschland üblicherweise verwendeten autologen Transplantate. Neben den Kosten hat auch die Komplexität der Operation einen Einfluss auf ihre Akzeptanz. In den U.S.A. gehen Schätzungen davon aus, dass ca. 90 % der LCA Plastiken von Chirurgen operiert werden, die < 10 LCA Plastiken pro Jahr operieren. In Schweden operieren ca. 48 % Chirurgen < 10 LCA Plastiken pro Jahr [222, 223]. Chirurgen, die so selten einen bestimmten Eingriff durchführen, fällt es schwerer eine neue komplexere Technik anzunehmen und eine gewisse Routine zu entwickeln als Chirurgen, die diesen Eingriff häufiger durchführen. Man weiß auch, dass bei Chirurgen, die selten LCA Plastiken operieren, die Komplikationsrate deutlich höher ist. Diese Fakten warfen Fragen auf, die bis heute nicht geklärt sind. Sollen diese Chirurgen mit < 10 LCA Plastiken pro Jahr und bekannt höherer Komplikationsrate

auch noch eine komplexere Technik durchführen? Oder sollten diese Chirurgen diese OP nicht mehr durchführen und Patienten mit LCA Plastiken an Zentren überwiesen werden? Diese Fragen sind nicht geklärt. Man weiß jedoch, dass ein erfahrener Kniechirurg für den Wechsel von der EB zur DB Technik nur eine kurze Lernkurve braucht - inklusive Wechsel von der transtibialen auf die anteromediale Technik [224]. Die oft geäußerte Befürchtung, dass sich die vermehrte Anzahl von Bohrkanälen bei der DB LCA Plastik negativ auf die umliegende Knochenqualität auswirken könnte mit der Gefahr von Osteonekrosen, konnte bisher nicht bestätigt werden. Auch kann man mit nur einem Bohrkanal auf der tibialen oder femoralen Seite eine DB LCA Plastik operieren, indem man eine Quadrizepssehne mit Knochenblock benutzt und den tendinösen Anteil in zwei Bündel spaltet. Dies spart auf der Seite, wo der Knochenblock verwendet wird, einen Bohrkanal. Das Doppelbündelkonzept kann auch mit dem BTB Transplantat umgesetzt werden mit nur jeweils einem Bohrkanal in der Tibia und einem im Femur. Hierfür werden flache, ovale Knochenblöcke verwendet und diese genau in der Ausrichtung der Insertionen unter Beachtung der oben beschriebenen nativen Verwringung des LCA bei 90° Knieflexion eingesetzt (Abb. 2) [56]. Jedoch kann es mit dieser Technik schwierig sein die anatomische Größe der Insertionen wiederherzustellen, da das BTB Transplantat in seiner Größe limitierter ist als die Sehnentransplantate aus der ischiokruralen Muskulatur. Wenn zu große Defekte bei der Entnahme des BTB Transplantats entstehen, riskiert man eine Patellafraktur bzw. einen Abriss der Tuberositas tibiae. Nichtsdestotrotz zeigen die zuvor aufgeführten Vorteile der anatomischen DB Technik, dass diese Technik für Chirurgen, die häufig LCA Plastiken operieren, die Methode der Wahl sein sollte. Dies ist auch das Fazit einer der oben erwähnten Metaanalysen [117]. Die Frage ist, ob jeder Patient eine DB LCA Plastik erhalten sollte, und bei wem evtl. eine EB Bündel Plastik ausreichend ist? Einige Chirurgen gehen noch einen Schritt weiter und operieren eine Tripelbündel (TB) LCA Plastik, mit zusätzlicher Rekonstruktion des intermediären Bündels. Diese Technik wird aber nur von wenigen Chirurgen weltweit favorisiert [225, 226, 227]. Dementsprechend wenige Studien gibt es zu dieser Technik. In einer prospektiv randomisierten Studie waren die Knie mit TB LCA Plastik rotationsstabiler als die Knie mit EB LCA Plastik. Bezüglich der anterioren Stabilität, den Patientenfragebögen, des Bewegungsumfanges und der Beinkraft gab es keine Unterschiede zwischen beiden Gruppen [227]. Es bleibt unklar, ob dies an der geringen Fallzahl lag, da die notwendigen Fallzahlen nicht vor Studienbeginn kalku-

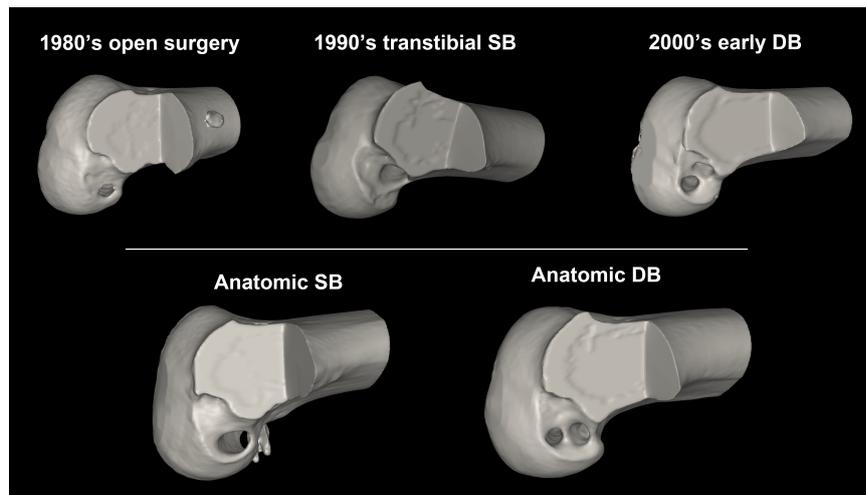


Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung der Geschichte der Positionierung der intraartikulären Bohrkanaalöffnungen bei der LCA Plastik, wobei nur die populärsten dargestellt sind (aus [30] und mit freundlicher Genehmigung von Springer).

liert wurden oder weil wirklich kein Unterschied bestand. Vergleiche zwischen DB und TB LCA Plastiken gibt es bisher nicht. Als wesentliche Erkenntnis bleibt festzuhalten, dass die TB und DB LCA Plastiken zu einer besseren Stabilität führen, sich dies jedoch nur sehr eingeschränkt in einer verbesserten Einschätzung der Patienten über ihr operiertes Knie niederschlägt. Dem gegenüber hat sich gezeigt, dass eine anatomische Positionierung der i.a. Bohrkanaalöffnungen zu einer besseren Kniestabilität, besseren subjektiven Einschätzungen der Patienten und geringeren Gonarthroseraten führt. Dies ist das Ergebnis einer langen Entwicklung der LCA Plastik, die mit der offenen, meist anatomischen Technik begann und über die transtibiale EB und DB Technik verlief bis zur heute am häufigsten verwendeten anatomischen LCA Plastik (Abb. 7) [90, 228].

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die arthroskopische LCA Plastik operiert in der transtibialen Technik zeigte langfristig eine Gonarthrose rate vergleichbar mit der konservativen Therapie. Die Rückkehr zum Sport- bzw. Aktivitätslevel wie vor der Ruptur wurde teilweise mit $< 50\%$ angegeben, was unter anderem an der oft nicht ausreichenden Rotationsstabilität lag.

Zusammenfassend konnten wir in den vorliegenden Arbeiten grundlegende Daten für eine individuelle anatomische LCA Plastik erarbeiten. In unserer *in vivo* Studie an 137 Patienten fanden wir eine große interindividuelle Variabilität des LCA Ursprungs und Ansatzes sowie seiner zwei Bündel. Des Weiteren bestand eine signifikante, aber schwache, Korrelation zwischen den Insertionsgrößen des LCA und morphometrischen Patientendaten wie Gewicht, Größe und BMI. Diese Ergebnisse demonstrieren, dass man sich nicht auf die morphometrischen Daten der Patienten verlassen kann und die Insertionsgrößen ausmessen muss, wenn man die Insertionen möglichst exakt in der Größe rekonstruieren möchte. Weiterhin zeigten wir für die Größe und die Ausrichtung der tibialen Bohrkanalöffnungen, dass neben der Bohrergröße auch die Bohrwinkel einen erheblichen Einfluss haben und für eine individuelle anatomische Rekonstruktion mit in Betracht gezogen werden sollten. Überdies analysierten wir, wieviel Fläche fälschlicherweise i.a. gebohrt wird, wenn die Ausrichtung der Bohrkanalöffnung von der Ausrichtung der anatomischen Insertion abweicht. Dies spielt eine wichtige Rolle, um bei der Bohrung des tibialen Bohrkanals möglichst viel vom nativen Ansatz des LCA zu treffen und um möglichst nicht außerhalb des nativen Ansatzes zu bohren, da in direkter Nachbarschaft wichtige anatomische Strukturen wie die Meniskuswurzel, der Knorpel und das LCP liegen. Zur Bestimmung der genauen Position der intraartikulären Bohrkanalöffnung werden häufig Röntgenbilder verwendet. Tibial wird hierfür z.B. die Amis & Jakob Linie benutzt. Dafür sollen die Röntgenbilder streng seitlich aufgenommen werden. Fehlrotierte Röntgenaufnahmen wirken sich vor allem beim AM Bündel auf die Messungen der Bohrkanalposition aus. Aus diesem Grund war der nächste Schritt die genaue Feststellung der Position der Zentren des Ursprungs und Ansatzes der beiden Bündel des LCA mittels 3D CT Modellen. Diese Daten dienen zum einen als Referenz für weitere wissenschaftliche Studien; zum anderen bieten diese 3D CT Modelle mit den Bohrkanälen auch für nicht wissenschaftlich tätige Chirurgen eine ausgezeichnete Möglichkeit, ihre i.a. Position der Bohrkanalöffnungen zu analy-

sieren. Dies liegt an der sehr genauen Nachbildung der ossären Anatomie durch die 3D CT Modellen und an der Möglichkeit, sich seine gewohnte intraoperative Sicht auf die anatomischen Strukturen schnell und unkompliziert durch Rotation des Modells und ggf. temporäre Entfernung von anatomischen Strukturen einstellen zu können. 3D CT Modelle benutzten wir auch, um die transtibiale Bohrkanalposition bei Patienten, die von verschiedenen Chirurgen in der transtibialen Technik operiert worden waren, zu analysieren und mit unseren bekannten anatomischen Positionen zu vergleichen. Hier zeigte sich, dass alle untersuchten transtibial gebohrten Bohrkanäle mit ihrer i.a. Öffnung außerhalb der anatomischen LCA Insertionen lagen. Femoral waren die Bohrkanalöffnungen zu weit anterior und tibial medial des PL Bündels positioniert. Trotz dieser Studie wurde argumentiert, dass es möglich sei, wenn man sich bemühe, auch mit der transtibialen Technik anatomisch die Bohrkanäle zu positionieren. Wir konnten jedoch zeigen, dass dies bei anatomisch positionierten tibialen Bohrkanälen mit der transtibialen Technik seltener möglich ist als mit der Bohrung über den anteromedialen Arthroskopiezugang. Neben der Diskussion um die Positionierung der Bohrkanäle gab und gibt es eine Diskussion über die Notwendigkeit einer DB LCA Plastik mit Rekonstruktion des AM und PL Bündels oder ob es eventuell ausreichend ist, nur eine EB Plastik zu operieren. Im Rahmen der Diskussion wurde die Funktion des PL Bündels *in vivo* oft angezweifelt. Wie wir zeigen konnten - und damit vorherige biomechanische Ergebnisse an Leichenknien bestätigten - spielt das PL Bündel jedoch eine essentielle Rolle für die anteriore und rotatorische Stabilität des Kniegelenks. Für den langfristigen klinischen Erfolg von LCA Plastiken spielt die Rotationsstabilität des Knies eine wichtige Rolle und zur Testung wird häufig der Pivot Shift Test verwendet. Dieser hat jedoch den Nachteil, dass seine Graduierung sehr subjektiv ist. Wir konnten zeigen, dass mittels eines Testgerätes mit Winkelbeschleunigungssensoren an Unter- und Oberschenkel der Pivot Shift zu detektieren und zu quantifizieren ist.

Ausblickend sollte es zur Vergleichbarkeit kommender Studien Standard werden, die Bohrkanalposition nachvollziehbar zu dokumentieren. Dies muss nicht zwingend über CTs erfolgen, jedoch sollte mindestens eine aussagekräftige arthroskopische Fotodokumentation vorliegen. Ein weiterer verbesserungswürdiger Punkt für kommende klinische Studien ist die Fallzahlberechnung für die verwendeten Fragebögen vor Studienbeginn. Die bisherigen Studien, inkl. der prospektiv randomisierten, konnten zwar in der Mehrzahl die Überlegenheit der DB LCA Plastik hinsichtlich der Kniestabilität

in der klinischen Untersuchung gegenüber der EB LCA Plastik zeigen, jedoch nur selten auch einen Vorteil in der Patienteneinschätzung mit den verwendeten Fragebögen aufzeigen. Auf Grund der fehlenden Fallzahlberechnung hinsichtlich dieser Patientenfragebögen, ist weiterhin unklar, ob es keinen Unterschied zwischen beiden Techniken in den Fragebögen gab oder ob er nur wegen der geringen Fallzahlen nicht detektiert war. Dies ist insbesondere wichtig, weil bekannt ist, dass viele weitere Faktoren - neben den chirurgischen - das Ergebnis einer LCA Plastik beeinflussen. Um nur einige zu nennen: Rauchen, Alter, Bildungsstand, Versicherungsstatus (Stichwort: berufsgenossenschaftlich versichert), Patientenerwartung, Transplantatdurchmesser, biologische Faktoren, postoperative Rehabilitation, Begleitverletzungen wie z.B. Meniskusläsionen [229, 230, 80, 231]. Aus diesen Gründen ist eine prospektive, randomisierte Studie mit vorheriger Fallzahlberechnung hinsichtlich der Patientenfragebögen dringend angezeigt. In diesem Rahmen sollte auch die Rückkehr zur Aktivität vor der LCA Ruptur und die Gonarthroserate dringend mit untersucht werden. Diese Daten würden eine Einschätzung darüber erlauben, ob sich der Mehraufwand der DB LCA Plastik auch langfristig für den Patienten lohnt. In diesem Rahmen sollte auch die Frage geklärt werden, ob nur bestimmte Patienten von der DB Versorgung profitieren und wenn ja, welche dies sind. Auch wird die Frage zu beantworten sein, wie anatomisch die Bohrkanaalöffnungen sein sollten z.B. wieviel der anatomischen Insertionen mit der Bohrkanaalöffnung ausgefüllt sein sollte oder wieviel Prozent der Kanaalöffnung in der anatomischen Insertion liegen sollte. Des Weiteren werden auch zwei in den letzten Jahren wieder *en vogue* gekommene Techniken ihren Stellenwert unter Beweis stellen müssen: die LCA Naht beim akut rupturierten LCA und die extra-artikuläre Augmentation der LCA Plastik. Bei dieser Technik wird anterolateral am Knie eine Sehnenstreifen zur Verstärkung implantiert, der vor allem die rotatorische Stabilität verbessern soll. Auch diese Technik ist auf der Suche nach einer Verbesserung der LCA Plastik entstanden. Beide Techniken konnten sich bisher nicht durchsetzen und für beide Techniken fehlen bisher gute klinische, kontrollierte Studien. Dies können, wie oben erwähnt, randomisierte Studien mit großen Patientenkollektiven sein oder aber auch Registerdaten. Die Entwicklung der Register in der westlichen Welt hat über die letzten Jahre eine erfreuliche Entwicklung genommen. Auch in Deutschland wird gerade ein Arthroskopieregister aufgebaut, woran wir aktiv mitwirken und was uns hoffentlich der Beantwortung einiger dieser Fragen näher bringen wird.

Die initial sehr vielversprechenden Möglichkeiten der biologischen Augmentation zur Verbesserung der Heilung von genähten LCA bzw. zur Verbesserung der Einheilung und dem schnelleren Umbau von Transplantaten (= *Ligamentisation*) spielen durch die enttäuschenden Ergebnisse der lokalen Applikation von Wachstumsfaktoren bzw. thrombozytenangereichertem Plasma (PRP = platelet-rich plasma) an anderen Geweben des muskuloskeletalen Systems in prospektiv, randomisierten Studien als auch durch die strengen Limitationen durch den Gesetzgeber bei der Zelltherapie momentan nur eine untergeordnete Rolle. Die meisten aktuellen Studien sind *in vitro* oder Tierstudien, die sich mit Applikation von Progenitorzellen bzw. der Entwicklung von Gerüsten zur Verbesserung der Heilung beschäftigen. Die Translation dieser Ergebnisse auf dem Gebiet der LCA Naht aber auch der LCA Plastik in die Klinik wären sehr interessant.

Eine der spannendsten Entwicklungen in der orthopädischen Forschung des Stütz- und Bewegungsapparats stellt die dynamische *radiostereometric analysis* (RSA) dar. Diese Technik bietet die Möglichkeit Knochen- und damit auch Gelenkbewegungen, mit einer Genauigkeit von ca. 1° und 1 mm dreidimensional während alltäglicher Aktivitäten *in vivo* zu analysieren. Die Aufnahmefrequenzen liegen > 150 Hz, was auch die Analyse von Hochgeschwindigkeitsaktivitäten wie z.B. schnelles Bergabrennen oder das Werfen eines Balles erlaubt. Die Einsatzgebiete für diese Technik sind sehr groß und reichen von der kinematischen Analyse der Wirbelsäule und den verschiedenen operativen Verfahren über die Analyse der Knochenbewegungen nach Frakturversorgung bis hin zu nativen Gelenken und natürlich dem Vergleich verschiedener rekonstruktiver Operationsverfahren wie z.B. Tunnelpositionierungen oder EB vs. DB LCA Plastiken. Diese kinematischen Ergebnisse haben eine hohe klinische Relevanz, da pathologische Kinematiken des Knies u.a. mit einer erhöhten Gonarthrosewahrscheinlichkeit assoziiert sind. Diese Einblicke in die Gelenkinematik während alltäglicher Tätigkeiten würde uns ganz neue Möglichkeiten der Einschätzung unserer Operationen am Bewegungsapparat ermöglichen.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Tashman, S., Collon, D., Anderson, K., Kolowich, P., and Anderst, W.: Abnormal rotational knee motion during running after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 32, 975–83 (2004)
- [2] Tashman, S., Kolowich, P., Collon, D., Anderson, K., and Anderst, W.: Dynamic function of the ACL-reconstructed knee during running. *Clin Orthop Relat Res* 454, 66–73 (2007)
- [3] Tashman, S., Kopf, S., and Fu, F. H.: The Kinematic Basis of ACL Reconstruction. *Oper Tech Sports Med* 16, 116–118 (2008)
- [4] Müller, A., Seide, K., Fuchs, S., Wurm, M., and Jürgens, C.: Vordere Kreuzbandersatzplastik. *Trauma und Berufskrankheit* 9, 122–127 (2007)
- [5] Mall, N. A., Chalmers, P. N., Moric, M., Tanaka, M. J., Cole, B. J., Bach, B. R., and Paletta, G. A.: Incidence and trends of anterior cruciate ligament reconstruction in the United States. *Am J Sports Med* 42, 2363–70 (2014)
- [6] Spindler, K. P. and Wright, R. W.: Clinical practice. Anterior cruciate ligament tear. *N Engl J Med* 359, 2135–42 (2008)
- [7] Irrgang, J. J., Anderson, A. F., and Staeubli, H. U.: The new IKDC. *The new IKDC Proceeding of the ninth conference of the European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery and Arthroscopy* (2000)
- [8] Jonsson, H., Riklund-Ahlström, K., and Lind, J.: Positive pivot shift after ACL reconstruction predicts later osteoarthritis: 63 patients followed 5-9 years after surgery. *Acta Orthop Scand* 75, 594–9 (2004)
- [9] Streich, N. A., Zimmermann, D., Bode, G., and Schmitt, H.: Reconstructive versus non-reconstructive treatment of anterior cruciate ligament insufficiency. A retrospective matched-pair long-term follow-up. *Int Orthop* 35, 607–13 (2011)
- [10] Hoshino, Y., Araujo, P., Ahlden, M., Moore, C. G., Kuroda, R., Zaffagnini, S., Karlsson, J., Fu, F. H., and Musahl, V.: Standardized pivot shift test improves measurement accuracy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20, 732–6 (2012)
- [11] Stöckle, U., Hoffmann, R., Schwedke, J., Lubrich, J., Vogl, T., Südkamp, N. P., and Haas, N.: Anterior cruciate ligament reconstruction: the diagnostic value of MRI. *Int Orthop* 22, 288–92 (1998)
- [12] Galen, C. G.: *Galen on the usefulness of the parts of the body. Peri chreias morion*. Cornell University Press, New York, U.S.A. (1968). ISBN 978-0801402944

- [13] Weitbrecht, J.: *Syndesmologie oder Beschreibung der Bänder des menschlichen Körpers*. Amand König, Strassburg (1779)
- [14] Weber, W. E. and Weber, E. F. W.: *Dietrische Buchhandlung, Göttingen*. Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Göttingen (1836)
- [15] Girgis, F. G., Marshall, J. L., and Monajem, A.: The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis. *Clin Orthop Relat Res* 106, 216–31 (1975)
- [16] Odensten, M. and Gillquist, J.: Functional anatomy of the anterior cruciate ligament and a rationale for reconstruction. *J Bone Joint Surg Am* 67, 257–62 (1985)
- [17] Ferretti, M., Ekdahl, M., Shen, W., and Fu, F. H.: Osseous landmarks of the femoral attachment of the anterior cruciate ligament: an anatomic study. *Arthroscopy* 23, 1218–25 (2007)
- [18] Norwood, L. A. and Cross, M. J.: Anterior cruciate ligament: functional anatomy of its bundles in rotatory instabilities. *Am J Sports Med* 7, 23–6 (1979)
- [19] Waldeyer, A. J., Fanghänel, J., Pera, F., Anderhuber, F., and Nitsch, R.: *Waldeyer - Anatomie des Menschen*. de Gruyter, 17 edn. (2009)
- [20] Tantisricharoenkul, G., Linde-Rosen, M., Araujo, P., Zhou, J., Smolinski, P., and Fu, F. H.: Anterior cruciate ligament: an anatomical exploration in humans and in a selection of animal species. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22, 961–71 (2014)
- [21] Otsubo, H., Shino, K., Suzuki, D., Kamiya, T., Suzuki, T., Watanabe, K., Fujimiya, M., Iwahashi, T., and Yamashita, T.: The arrangement and the attachment areas of three ACL bundles. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20, 127–34 (2012)
- [22] Mackay, J. W., Whitehead, H., and Toms, A. P.: Radiological evidence for the triple bundle anterior cruciate ligament. *Clin Anat* 27, 1097–102 (2014)
- [23] Amis, A. A. and Dawkins, G. P.: Functional anatomy of the anterior cruciate ligament. Fibre bundle actions related to ligament replacements and injuries. *J Bone Joint Surg Br* 73, 260–7 (1991)
- [24] Kato, Y., Ingham, S. J. M., Linde-Rosen, M., Smolinski, P., Horaguchi, T., and Fu, F. H.: Biomechanics of the porcine triple bundle anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 18, 20–5 (2010)

- [25] Conway Morris, S.: *Life's solution: inevitable humans in a lonely universe*. Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York (2003). ISBN 9780521603256
- [26] Welsh, P. R. P.: Knee joint structure and function. *Clin Orthop Relat Res* 147, 7–14 (1980)
- [27] Arnoczky, S. P.: Anatomy of the anterior cruciate ligament. *Clin Orthop Relat Res* 172, 19–25 (1983)
- [28] Sakane, M., Fox, R. J., Woo, S. L., Livesay, G. A., Li, G., and Fu, F. H.: In situ forces in the anterior cruciate ligament and its bundles in response to anterior tibial loads. *J Orthop Res* 15, 285–93 (1997)
- [29] Gabriel, M. T., Wong, E. K., Woo, S. L.-Y., Yagi, M., and Debski, R. E.: Distribution of in situ forces in the anterior cruciate ligament in response to rotatory loads. *J Orthop Res* 22, 85–9 (2004)
- [30] Kopf, S., Forsythe, B., Wong, A. K., Tashman, S., Irrgang, J. J., and Fu, F. H.: Transtibial ACL reconstruction technique fails to position drill tunnels anatomically in vivo 3D CT study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20, 2200–7 (2012)
- [31] Fu, F. H., Bennett, C. H., Lattermann, C., and Ma, C. B.: Current trends in anterior cruciate ligament reconstruction. Part 1: Biology and biomechanics of reconstruction. *Am J Sports Med* 27, 821–30 (1999)
- [32] Lohmander, L. S., Ostenberg, A., Englund, M., and Roos, H.: High prevalence of knee osteoarthritis, pain, and functional limitations in female soccer players twelve years after anterior cruciate ligament injury. *Arthritis Rheum* 50, 3145–3152 (2004)
- [33] Robson, A. W.: Ruptured Crucial Ligaments and their Repair by Operation. *Ann Surg* 37, 716–8 (1903)
- [34] Palmer, I.: On the injuries to the ligaments of the knee joint. *Acta Chir Scand* 81, 1–282 (1938)
- [35] Kaplan, N., Wickiewicz, T. L., and Warren, R. F.: Primary surgical treatment of anterior cruciate ligament ruptures. A long-term follow-up study. *Am J Sports Med* 18, 354–8 (1990)
- [36] Sommerlath, K., Lysholm, J., and Gillquist, J.: The long-term course after treatment of acute anterior cruciate ligament ruptures. A 9 to 16 year followup. *Am J Sports Med* 19, 156–62 (1991)

- [37] Taylor, D. C., Posner, M., Curl, W. W., and Feagin, J. A.: Isolated tears of the anterior cruciate ligament: over 30-year follow-up of patients treated with arthrotomy and primary repair. *Am J Sports Med* 37, 65–71 (2009)
- [38] Feagin, J. A. and Curl, W. W.: Isolated tear of the anterior cruciate ligament: 5-year follow-up study. *Am J Sports Med* 4, 95–100 (1976)
- [39] Eggli, S., Kohlhof, H., Zumstein, M., Henle, P., Hartel, M., Evangelopoulos, D. S., Bonel, H., and Kohl, S.: Dynamic intraligamentary stabilization: novel technique for preserving the ruptured ACL. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 23, 1215–21 (2015)
- [40] Hölzel, W.: Fall von Zerreiung beider Kreuzbänder des linken Kniegelenks, geheilt durch Ersatz aus dem luxierten äusseren Meniskus. *Munch Med Wschr* 64, 928–929 (1917)
- [41] Groves, E. W. H.: Operation for the repair of the crucial ligaments. *The Lancet* 190, 674–676 (1917)
- [42] Lange, M.: *Orthopädisch-Chirurgische Operationslehre Ergänzungsband: Neueste Operationsverfahren*. J. F. Bergmann Verlag GmbH & Co Kg, München, 1 edn. (1968). ISBN 978-3-642-87750-6
- [43] Joergensen, U., Bak, K., Ekstrand, J., and Scavenius, M.: Reconstruction of the anterior cruciate ligament with the iliotibial band autograft in patients with chronic knee instability. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 9, 137–45 (2001)
- [44] Stensbirk, F., Thorborg, K., Konradsen, L., Jorgensen, U., and Hoelmich, P.: Iliotibial band autograft versus bone-patella-tendon-bone autograft, a possible alternative for ACL reconstruction: a 15-year prospective randomized controlled trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22, 2094–101 (2014)
- [45] Sänger, R., Gwinner, C., and Kopf, S.: Transplantatwahl für die primäre vordere Kreuzbandplastik. *Orthopädie & Rheuma* 18, 30–38 (2015)
- [46] Lange, F.: Künstliche Gelenkbänder aus Seide. *Munch Med Wochenschr* 12, 834–6 (1907)
- [47] Group, M.: Effect of graft choice on the outcome of revision anterior cruciate ligament reconstruction in the Multicenter ACL Revision Study (MARS) Cohort. *Am J Sports Med* 42, 2301–10 (2014)
- [48] Musahl, V., Scheffler, S., and Becker, R.: Klinischer Einsatz von Allografts in der Bandchirurgie am Kniegelenk. *Arthroskopie* 25, 7–12 (2012)

- [49] Pfab, B.: Zur Blutgefäßversorgung der Menisci und Kreuzbänder. *LANGENBECK ARCH CHIR* 205, 258–264 (1927)
- [50] Collins, H. R., Hughston, J. C., Dehaven, K. E., Bergfeld, J. A., and Evarts, C. M.: The meniscus as a cruciate ligament substitute. *J Sports Med* 2, 11–21 (1974)
- [51] Ivey, F. M., Blazina, M. E., Fox, J. M., and Del Pizzo, W.: Intraarticular substitution for anterior cruciate insufficiency. A clinical comparison between patellar tendon and meniscus. *Am J Sports Med* 8, 405–10 (1980)
- [52] Katzenstein, M.: Beitrag zur Entstehung und Erkennung der Meniscusverletzungen im Kniegelenk. *Berl Klin Wochenschr* 44, 228–234 (1908)
- [53] Fairbank, T. J.: Knee joint changes after meniscectomy. *J Bone Joint Surg Am* 30B, 664–70 (1948)
- [54] Gold, E.: Vollstaendiger plastischer Ersatz des vorderen Kreuzbandes und funktionell-anatomische Wiederherstellung desselben. *Deutsche Zeitschrift für Chirurgie* 213, 120–127 (1928)
- [55] Marshall, J. L., Warren, R. F., Wickiewicz, T. L., and Reider, B.: The anterior cruciate ligament: a technique of repair and reconstruction. *Clin Orthop Relat Res* 97–106 (1979)
- [56] Hertel, P., Behrend, H., Cierpinski, T., Musahl, V., and Widjaja, G.: ACL reconstruction using bone-patellar tendon-bone press-fit fixation: 10-year clinical results. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 13, 248–55 (2005)
- [57] Jones, K. G.: Reconstruction of the Anterior Cruciate Ligament. A technique using the central one-third of the patellar ligament. *J Bone Joint Surg Am* 45, 925–32 (1963)
- [58] Brückner, H.: Eine neue Methode der Kreuzbandplastik. *Chirurg* 37, 413–414 (1966)
- [59] Clancy, W. G., Nelson, D. A., Reider, B., and Narechania, R. G.: Anterior cruciate ligament reconstruction using one-third of the patellar ligament, augmented by extra-articular tendon transfers. *J Bone Joint Surg Am* 64, 352–9 (1982)
- [60] Eriksson, E.: Reconstruction of the anterior cruciate ligament. *Orthop Clin North Am* 7, 167–79 (1976)
- [61] Franke, K.: Clinical experience in 130 cruciate ligament reconstructions. *Orthop Clin North Am* 7, 191–3 (1976)

- [62] Blauth, W.: Die zweizügelige Ersatzplastik des vorderen Kreuzbandes aus der Quadricepssehne. *Unfallheilkunde* 87, 45–51 (1984)
- [63] Freedman, K. B., D’Amato, M. J., Nedeff, D. D., Kaz, A., and Bach, B. R.: Arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction: a metaanalysis comparing patellar tendon and hamstring tendon autografts. *Am J Sports Med* 31, 2–11 (2003)
- [64] Mulford, J. S., Hutchinson, S. E., and Hang, J. R.: Outcomes for primary anterior cruciate reconstruction with the quadriceps autograft: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21, 1882–8 (2013)
- [65] Andernord, D., Björnsson, H., Petzold, M., Eriksson, B. I., Forssblad, M., Karlsson, J., and Samuelsson, K.: Surgical Predictors of Early Revision Surgery After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Results From the Swedish National Knee Ligament Register on 13,102 Patients. *Am J Sports Med* 42, 1574–82 (2014)
- [66] Edwards, A. H.: Operative repair of cruciate ligaments in severe trauma of knee. *Brit J Surg* 13, 432–438 (1926)
- [67] Galeazzi, R.: La ricostituzione dei ligamenti crociati del ginocchio. *Atti e Memorie della Societa’ Lombarda di Chirurgica* 13, 302–317 (1934)
- [68] Wachsmuth, W.: *Die Operationen an den Extremitäten: Die Operationen an der Unteren Extremität*, vol. 10 of *Allgemeine und spezielle chirurgische Operationslehre*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2 edn. (1956). ISBN 978-3-662-42853-5
- [69] Macey, H. B.: A new operative procedure for the repair of ruptured cruciate ligaments of the knee joint. *Surg Gynecol Obstet* 69, 108–109 (1939)
- [70] Lindemann, K.: Plastischer Ersatz der Kreuzbänder durch gestielte Sehnenverpflanzung. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 79, 316–34 (1950)
- [71] Lipscomb, A. B., Johnston, R. K., Snyder, R. B., Warburton, M. J., and Gilbert, P. P.: Evaluation of hamstring strength following use of semitendinosus and gracilis tendons to reconstruct the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 10, 340–2 (1982)
- [72] Friedman, M. J.: Arthroscopic semitendinosus (gracilis) reconstruction for anterior cruciate ligament deficiency. *Techniques in Orthopaedics* 2, 74–80 (1988)
- [73] Ahn, J. H., Yoo, J. C., Yang, H. S., Kim, J. H., and Wang, J. H.: Second-look arthroscopic findings of 208 patients after ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 15, 242–8 (2007)

- [74] Maeda, A., Shino, K., Horibe, S., Nakata, K., and Buccafusca, G.: Anterior cruciate ligament reconstruction with multistranded autogenous semitendinosus tendon. *Am J Sports Med* 24, 504–9 (1996)
- [75] Mohtadi, N. G., Chan, D. S., Dainty, K. N., and Whelan, D. B.: Patellar tendon versus hamstring tendon autograft for anterior cruciate ligament rupture in adults. *Cochrane Database Syst Rev* 9, CD005960 (2011)
- [76] Goldblatt, J. P., Fitzsimmons, S. E., Balk, E., and Richmond, J. C.: Reconstruction of the anterior cruciate ligament: meta-analysis of patellar tendon versus hamstring tendon autograft. *Arthroscopy* 21, 791–803 (2005)
- [77] Wagner, M., Kääh, M. J., Schallock, J., Haas, N. P., and Weiler, A.: Hamstring tendon versus patellar tendon anterior cruciate ligament reconstruction using biodegradable interference fit fixation: a prospective matched-group analysis. *Am J Sports Med* 33, 1327–36 (2005)
- [78] Haas, N. P.: [Surgery of the cruciate ligament—an ever current topic]. *Chirurg* 71, 1023 (2000)
- [79] Südkamp, N. P. and Haas, N. P.: [New methods of cruciate ligament surgery]. *Chirurg* 71, 1024–33 (2000)
- [80] Dunn, W. R., Wolf, B. R., Harrell, F. E., Reinke, E. K., Huston, L. J., and Spindler, K. P.: Baseline predictors of health-related quality of life after anterior cruciate ligament reconstruction: a longitudinal analysis of a multicenter cohort at two and six years. *J Bone Joint Surg Am* 97, 551–7 (2015)
- [81] Tegner, Y. and Lysholm, J.: Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res* 198, 43–49 (1985)
- [82] Anderson, A. F., Irrgang, J. J., Kocher, M. S., Mann, B. J., Harrast, J. J., and Committee, I. K. D.: The International Knee Documentation Committee Subjective Knee Evaluation Form: normative data. *Am J Sports Med* 34, 128–35 (2006)
- [83] Inderhaug, E., Strand, T., Fischer-Bredenbeck, C., and Solheim, E.: Long-term results after reconstruction of the ACL with hamstrings autograft and transtibial femoral drilling. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21, 2004–10 (2013)
- [84] Nebelung, S., Deitmer, G., Gebing, R., Reichwein, F., and Nebelung, W.: Anterior cruciate ligament reconstruction using biodegradable transfemoral fixation at 5-year follow-up: clinical and magnetic resonance imaging evaluation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20, 2279–86 (2012)

- [85] Ma, C. B., Francis, K., Towers, J., Irrgang, J., Fu, F. H., and Harner, C. H.: Hamstring anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison of bioabsorbable interference screw and endobutton-post fixation. *Arthroscopy* 20, 122–8 (2004)
- [86] Hefti, F., Mueller, W., Jakob, R. P., and Staeubli, H. U.: Evaluation of knee ligament injuries with the IKDC form. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1, 226–34 (1993)
- [87] Biau, D. J., Tournoux, C., Katsahian, S., Schranz, P., and Nizard, R.: ACL reconstruction: a meta-analysis of functional scores. *Clin Orthop Relat Res* 458, 180–7 (2007)
- [88] Wagner, M., Scheffler, S. U., and Weiler, A.: Revisionsersatz des vorderen Kreuzbandes. *Arthroskopie* 20, 139–149 (2007)
- [89] Ardern, C. L., Webster, K. E., Taylor, N. F., and Feller, J. A.: Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a systematic review and meta-analysis of the state of play. *Br J Sports Med* 45, 596–606 (2011)
- [90] Fu, F. H., van Eck, C. F., Tashman, S., Irrgang, J. J., and Moreland, M. S.: Anatomic anterior cruciate ligament reconstruction: a changing paradigm. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 23, 640–8 (2015)
- [91] Fithian, D. C., Paxton, E. W., Stone, M. L., Luetzow, W. F., Csintalan, R. P., Phelan, D., and Daniel, D. M.: Prospective trial of a treatment algorithm for the management of the anterior cruciate ligament-injured knee. *Am J Sports Med* 33, 335–46 (2005)
- [92] Irrgang, J. J., Bost, J. E., and Fu, F. H.: Re: Outcome of single-bundle versus double-bundle reconstruction of the anterior cruciate ligament: a meta-analysis. *Am J Sports Med* 37, 421–2; author reply 422 (2009)
- [93] Barenius, B., Ponzer, S., Shalabi, A., Bujak, R., Norlen, L., and Eriksson, K.: Increased Risk of Osteoarthritis After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A 14-Year Follow-up Study of a Randomized Controlled Trial. *Am J Sports Med* 42, 1049–57 (2014)
- [94] Leroux, T., Ogilvie-Harris, D., Dwyer, T., Chahal, J., Gandhi, R., Mahomed, N., and Wasserstein, D.: The risk of knee arthroplasty following cruciate ligament reconstruction: a population-based matched cohort study. *J Bone Joint Surg Am* 96, 2–10 (2014)
- [95] Grontvedt, T., Pena, F., and Engebretsen, L.: Accuracy of femoral tunnel placement and resulting graft force using one- or two-incision drill guides. A cadaver study on ten paired knees. *Arthroscopy* 12, 187–92 (1996)

- [96] Pinczewski, L. A., Salmon, L. J., Jackson, W. F. M., von Bormann, R. B. P., Haslam, P. G., and Tashiro, S.: Radiological landmarks for placement of the tunnels in single-bundle reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br* 90, 172–9 (2008)
- [97] Haasper, C., Kopf, S., Lorenz, S., Middleton, K. K., Tashman, S., and Fu, F. H.: Influence of tibial rotation on tibial tunnel position measurements using lateral fluoroscopy in anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 23, 649–54 (2015)
- [98] Hoser, C., Tecklenburg, K., Kuenzel, K. H., and Fink, C.: Postoperative evaluation of femoral tunnel position in ACL reconstruction: plain radiography versus computed tomography. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 13, 256–62 (2005)
- [99] Mott, H. W.: Semitendinosus anatomic reconstruction for cruciate ligament insufficiency. *Clin Orthop Relat Res* 1, 90–2 (1983)
- [100] Hofbauer, M., Muller, B., Murawski, C. D., van Eck, C. F., and Fu, F. H.: The concept of individualized anatomic anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22, 979–86 (2014)
- [101] Bernard, M., Hertel, P., Hornung, H., and Cierpinski, T.: Femoral insertion of the ACL. Radiographic quadrant method. *Am J Knee Surg* 10, 14–21; discussion 21–2 (1997)
- [102] Amis, A. A. and Jakob, R. P.: Anterior cruciate ligament graft positioning, tensioning and twisting. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 6 Suppl 1, S2–12 (1998)
- [103] Kasten, P., Szczodry, M., Irrgang, J., Kropf, E., Costello, J., and Fu, F. H.: What is the role of intra-operative fluoroscopic measurements to determine tibial tunnel placement in anatomical anterior cruciate ligament reconstruction? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 18, 1169–1175 (2010)
- [104] Seo, S. S., Kim, C. W., Kim, J. G., and Jin, S. Y.: Clinical results comparing transtibial technique and outside in technique in single bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Relat Res* 25, 133–40 (2013)
- [105] Ahn, J. H., Jeong, H. J., Ko, C.-S. S., Ko, T. S., and Kim, J. H.: Three-dimensional reconstruction computed tomography evaluation of tunnel location during single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison of transtibial and 2-incision tibial tunnel-independent techniques. *Clin Orthop Surg* 5, 26–35 (2013)

- [106] Hosseini, A., Lodhia, P., Van de Velde, S. K., Asnis, P. D., Zarins, B., Gill, T. J., and Li, G.: Tunnel position and graft orientation in failed anterior cruciate ligament reconstruction: a clinical and imaging analysis. *Int Orthop* 36, 845–52 (2012)
- [107] Yang, J.-H. H., Chang, M., Kwak, D.-S. S., Jang, K.-M. M., and Wang, J. H.: In vivo three-dimensional imaging analysis of femoral and tibial tunnel locations in single and double bundle anterior cruciate ligament reconstructions. *Clin Orthop Surg* 6, 32–42 (2014)
- [108] Taketomi, S., Inui, H., Sanada, T., Nakamura, K., Yamagami, R., Masuda, H., Tanaka, S., and Nakagawa, T.: Remnant-preserving anterior cruciate ligament reconstruction using a three-dimensional fluoroscopic navigation system. *Knee Surg Relat Res* 26, 168–76 (2014)
- [109] Kawaguchi, Y., Kondo, E., Takeda, R., Akita, K., Yasuda, K., and Amis, A. A.: The role of fibers in the femoral attachment of the anterior cruciate ligament in resisting tibial displacement. *Arthroscopy* 31, 435–44 (2015)
- [110] Nha, K.-W. W., Han, J.-H. H., Kwon, J.-H. H., Kang, K.-W. W., Park, H.-J. J., and Song, J.-G. G.: Anatomical Single-bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Using a Freehand Transtibial Technique. *Knee Surg Relat Res* 27, 117–22 (2015)
- [111] Ko, Y. W., Rhee, S. J., Kim, I. W., and Yoo, J.-D. D.: The Correlation of Tunnel Position, Orientation and Tunnel Enlargement in Outside-in Single-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Knee Surg Relat Res* 27, 247–54 (2015)
- [112] Purnell, M. L., Larson, A. I., and Clancy, W.: Anterior Cruciate Ligament Insertions on the Tibia and Femur and Their Relationships to Critical Bony Landmarks Using High-Resolution Volume-Rendering Computed Tomography. *Am J Sports Med* 36, 2083–90 (2008)
- [113] Desai, N., Björnsson, H., Musahl, V., Bhandari, M., Petzold, M., Fu, F. H., and Samuelsson, K.: Anatomic single- versus double-bundle ACL reconstruction: a meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22, 1009–23 (2014)
- [114] Meredith, R. B., Vance, K. J., Appleby, D., and Lubowitz, J. H.: Outcome of Single-Bundle Versus Double-Bundle Reconstruction of the Anterior Cruciate Ligament: A Meta-Analysis. *Am J Sports Med* 36, 1414–21 (2008)

- [115] Xu, M., Gao, S., Zeng, C., Han, R., Sun, J., Li, H., Xiong, Y., and Lei, G.: Outcomes of anterior cruciate ligament reconstruction using single-bundle versus double-bundle technique: meta-analysis of 19 randomized controlled trials. *Arthroscopy* 29, 357–65 (2013)
- [116] van Eck, C. F., Kopf, S., Irrgang, J. J., Blankevoort, L., Bhandari, M., Fu, F. H., and Poolman, R. W.: Single-bundle versus double-bundle reconstruction for anterior cruciate ligament rupture: a meta-analysis—does anatomy matter? *Arthroscopy* 28, 405–24 (2012)
- [117] Li, X., Xu, C.-p. P., Song, J.-q. Q., Jiang, N., and Yu, B.: Single-bundle versus double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: an up-to-date meta-analysis. *Int Orthop* 37, 213–26 (2013)
- [118] Tiamklang, T., Sumanont, S., Foocharoen, T., and Laopaiboon, M.: Double-bundle versus single-bundle reconstruction for anterior cruciate ligament rupture in adults. *Cochrane Database Syst Rev* 11, CD008413 (2012)
- [119] Lohmander, L. S., Englund, P. M., Dahl, L. L., and Roos, E. M.: The Long-term Consequence of Anterior Cruciate Ligament and Meniscus Injuries: Osteoarthritis. *Am J Sports Med* 35, 1756–69 (2007)
- [120] Kocher, M. S., Steadman, J. R., Briggs, K. K., Sterett, W. I., and Hawkins, R. J.: Relationships between objective assessment of ligament stability and subjective assessment of symptoms and function after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 32, 629–34 (2004)
- [121] Kocher, M. S., Tucker, R., and Briggs, K. K.: Relationship between subjective and objective assessment of outcomes after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Knee Surg* 18, 73–81 (2005)
- [122] Ferretti, A., Conteduca, F., De Carli, A., Fontana, M., and Mariani, P. P.: Osteoarthritis of the knee after ACL reconstruction. *Int Orthop* 15, 367–71 (1991)
- [123] Fink, C., Hoser, C., and Benedetto, K. P.: Arthroeseentwicklung nach Ruptur des vorderen Kreuzbands - Ein Vergleich operativer und konservativer Therapie. *Unfallchirurg* 97, 357–61 (1994)
- [124] Seitz, H., Chrysopoulos, A., Egkher, E., and Mousavi, M.: [Long-term results of replacement of the anterior cruciate ligament in comparison with conservative therapy]. *Chirurg* 65, 992–8 (1994)
- [125] Jepsen, C. F., Lundberg-Jensen, A. K., and Faunoe, P.: Does the position of the femoral tunnel affect the laxity or clinical outcome of the anterior cruciate

- ligament-reconstructed knee? A clinical, prospective, randomized, double-blind study. *Arthroscopy* 23, 1326–33 (2007)
- [126] Stäubli, H. U. and Rauschnig, W.: 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, 138–46 (1994)
- [127] Morgan, C. D., Kalman, V. R., and Grawl, D. M.: Definitive landmarks for reproducible tibial tunnel placement in anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 11, 275–88 (1995)
- [128] Muneta, T., Takakuda, K., and Yamamoto, H.: Intercondylar notch width and its relation to the configuration and cross-sectional area of the anterior cruciate ligament. A cadaveric knee study. *Am J Sports Med* 25, 69–72 (1997)
- [129] Takahashi, M., Doi, M., Abe, M., Suzuki, D., and Nagano, A.: Anatomical study of the femoral and tibial insertions of the anteromedial and posterolateral bundles of human anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 34, 787–92 (2006)
- [130] Mochizuki, T., Muneta, T., Nagase, T., Shirasawa, S.-I., Akita, K.-I. I., and Sekiya, I.: Cadaveric knee observation study for describing anatomic femoral tunnel placement for two-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 22, 356–61 (2006)
- [131] Cuomo, P., Edwards, A., Giron, F., Bull, A. M. J., Amis, A. A., and Aglietti, P.: Validation of the 65 degrees Howell guide for anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 22, 70–5 (2006)
- [132] Colombet, P., Robinson, J., Christel, P., Franceschi, J.-P. P., Djian, P., Bellier, G., and Sbihi, A.: Morphology of anterior cruciate ligament attachments for anatomic reconstruction: a cadaveric dissection and radiographic study. *Arthroscopy* 22, 984–92 (2006)
- [133] Edwards, A., Bull, A. M. J., and Amis, A. A.: The attachments of the anteromedial and posterolateral fibre bundles of the anterior cruciate ligament: Part 1: Tibial attachment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 15, 1414–21 (2007)
- [134] Edwards, A., Bull, A. M. J., and Amis, A. A.: The attachments of the anteromedial and posterolateral fibre bundles of the anterior cruciate ligament: Part 2: Femoral attachment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 16, 29–36 (2008)
- [135] Heming, J. F., Rand, J., and Steiner, M. E.: Anatomical limitations of transtibial drilling in anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 35, 1708–15 (2007)

- [136] Siebold, R., Ellert, T., Metz, S., and Metz, J.: Tibial insertions of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament: morphometry, arthroscopic landmarks, and orientation model for bone tunnel placement. *Arthroscopy* 24, 154–61 (2008)
- [137] Siebold, R., Ellert, T., Metz, S., and Metz, J.: Femoral insertions of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament: morphometry and arthroscopic orientation models for double-bundle bone tunnel placement—a cadaver study. *Arthroscopy* 24, 585–92 (2008)
- [138] Tállay, A., Lim, M.-H. H., and Bartlett, J.: Anatomical study of the human anterior cruciate ligament stump’s tibial insertion footprint. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 16, 741–746 (2008)
- [139] Harner, C. D., Baek, G. H., Vogrin, T. M., Carlin, G. J., Kashiwaguchi, S., and Woo, S. L.: Quantitative analysis of human cruciate ligament insertions. *Arthroscopy* 15, 741–9 (1999)
- [140] Dargel, J., Pohl, P., Tzikaras, P., and Koebke, J.: Morphometric side-to-side differences in human cruciate ligament insertions. *Surg Radiol Anat* 28, 398–402 (2006)
- [141] Luites, J. W. H., Wymenga, A. B., Blankevoort, L., and Kooloos, J. G. M.: Description of the attachment geometry of the anteromedial and posterolateral bundles of the ACL from arthroscopic perspective for anatomical tunnel placement. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 15, 1422–31 (2007)
- [142] Kopf, S., Musahl, V., Tashman, S., Szczodry, M., Shen, W., and Fu, F. H.: A systematic review of the femoral origin and tibial insertion morphology of the ACL. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 17, 213–9 (2009)
- [143] Mullaji, A. B., Marawar, S. V., Simha, M., and Jindal, G.: Cruciate ligaments in arthritic knees a histologic study with radiologic correlation. *J Arthroplasty* 23, 567–72 (2008)
- [144] Lee, G.-C. C., Cushner, F. D., Vigoritta, V., Scuderi, G. R., Insall, J. N., and Scott, W. N.: Evaluation of the anterior cruciate ligament integrity and degenerative arthritic patterns in patients undergoing total knee arthroplasty. *J Arthroplasty* 20, 59–65 (2005)
- [145] Outerbridge, R. E.: The etiology of chondromalacia patellae. *J Bone Joint Surg Br* 43-B, 752–7 (1961)

- [146] McCarthy, M. M. and Hannafin, J. A.: The mature athlete: aging tendon and ligament. *Sports Health* 6, 41–8 (2014)
- [147] Kopf, S., Pombo, M. W., Szczodry, M., Irrgang, J. J., and Fu, F. H.: Size variability of the human anterior cruciate ligament insertion sites. *Am J Sports Med* 39, 108–13 (2011)
- [148] Quick, H. H.: Hochfeld-MRT: Was ist anders? *Radiologie up2date* 10, 255–271 (2010)
- [149] Beyer, H.-K. . K.: *MRT der Gelenke und der Wirbelsäule Radiologisch-orthopädische Diagnostik*, vol. 1. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany (2003). ISBN 9783642628344
- [150] Murawski, C. D., Wolf, M. R., Araki, D., Muller, B., Tashman, S., and Fu, F. H.: Anatomic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Current Concepts and Future Perspective. *Cartilage* 4, 27S–37S (2013)
- [151] Pombo, M. W., Shen, W., and Fu, F. H.: Anatomic Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Where Are We Today? *Arthroscopy* 24, 1168–77 (2008)
- [152] van Eck, C. F., Lesniak, B. P., Schreiber, V. M., and Fu, F. H.: Anatomic single- and double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction flowchart. *Arthroscopy* 26, 258–68 (2010)
- [153] Kopf, S., Martin, D. E., Tashman, S., and Fu, F. H.: Effect of tibial drill angles on bone tunnel aperture during anterior cruciate ligament reconstruction. *J Bone Joint Surg Am* 92, 871–81 (2010)
- [154] Hensler, D., Working, Z. M., Illingworth, K. D., Thorhauer, E. D., Tashman, S., and Fu, F. H.: Medial portal drilling: effects on the femoral tunnel aperture morphology during anterior cruciate ligament reconstruction. *J Bone Joint Surg Am* 93, 2063–71 (2011)
- [155] Hashemi, J., Chandrashekar, N., Mansouri, H., Gill, B., Slauterbeck, J. R., Schutt, R. C., Dabezies, E., and Beynnon, B. D.: Shallow Medial Tibial Plateau and Steep Medial and Lateral Tibial Slopes: New Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Am J Sports Med* (2009)
- [156] Hashemi, J., Chandrashekar, N., Gill, B., Beynnon, B. D., Slauterbeck, J. R., Schutt, R. C., Mansouri, H., and Dabezies, E.: The geometry of the tibial plateau and its influence on the biomechanics of the tibiofemoral joint. *J Bone Joint Surg Am* 90, 2724–34 (2008)

- [157] Zeng, C., Cheng, L., Wei, J., Gao, S.-g. G., Yang, T.-b. B., Luo, W., Li, Y.-s. S., Xu, M., and Lei, G.-h. H.: The influence of the tibial plateau slopes on injury of the anterior cruciate ligament: a meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22, 53–65 (2014)
- [158] Sturnick, D. R., Vacek, P. M., DeSarno, M. J., Gardner-Morse, M. G., Tourville, T. W., Slauterbeck, J. R., Johnson, R. J., Shultz, S. J., and Beynon, B. D.: Combined anatomic factors predicting risk of anterior cruciate ligament injury for males and females. *Am J Sports Med* 43, 839–47 (2015)
- [159] Park, S. Y., Oh, H., Park, S., Lee, J. H., Lee, S. H., and Yoon, K. H.: Factors predicting hamstring tendon autograft diameters and resulting failure rates after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21, 1111–8 (2013)
- [160] Middleton, K. K., Muller, B., Araujo, P. H., Fujimaki, Y., Rabuck, S. J., Irrgang, J. J., Tashman, S., and Fu, F. H.: Is the native ACL insertion site "completely restored" using an individualized approach to single-bundle ACL-R? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 23, 2145–50 (2015)
- [161] Guenther, D., Irarrázaval, S., Nishizawa, Y., Vernacchia, C., Thorhauer, E., Musahl, V., Irrgang, J. J., and Fu, F. H.: Variation in the shape of the tibial insertion site of the anterior cruciate ligament: classification is required. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* epub (2015)
- [162] Herbort, M., Domnick, C., Raschke, M. J., Lenschow, S., Förster, T., Petersen, W., and Zantop, T.: Comparison of Knee Kinematics After Single-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction via the Medial Portal Technique With a Central Femoral Tunnel and an Eccentric Femoral Tunnel and After Anatomic Double-Bundle Reconstruction: A Human Cadaveric Study. *Am J Sports Med* (2015)
- [163] Jagodzinski, M., Foerstemann, T., Mall, G., Krettek, C., Bosch, U., and Paessler, H. H.: Analysis of forces of ACL reconstructions at the tunnel entrance: is tunnel enlargement a biomechanical problem? *J Biomech* 38, 23–31 (2005)
- [164] Howell, S. M.: Principles for placing the tibial tunnel and avoiding roof impingement during reconstruction of a torn anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 6 Suppl 1, 49–55 (1998)
- [165] Hussein, M., van Eck, C. F., Cretnik, A., Dinevski, D., and Fu, F. H.: Individualized anterior cruciate ligament surgery: a prospective study comparing anatomic single- and double-bundle reconstruction. *Am J Sports Med* 40, 1781–8 (2012)

- [166] Sidles, J. A., Larson, R. V., Garbini, J. L., Downey, D. J., and Matsen, F. A.: Ligament length relationships in the moving knee. *J Orthop Res* 6, 593–610 (1988)
- [167] Musahl, V., Voos, J. E., O’Loughlin, P. F., Choi, D., Stueber, V., Kendoff, D., and Pearle, A. D.: Comparing stability of different single- and double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction techniques: a cadaveric study using navigation. *Arthroscopy* 26, S41–8 (2010)
- [168] Rezazadeh, S., Ettehadi, H., and Vosoughi, A. R.: Outcome of arthroscopic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: anteromedial portal technique versus transtibial drilling technique. *Musculoskelet Surg* (2015)
- [169] Fu, F. H., Bennett, C. H., Ma, C. B., Menetrey, J., and Lattermann, C.: Current trends in anterior cruciate ligament reconstruction. Part II. Operative procedures and clinical correlations. *Am J Sports Med* 28, 124–30 (2000)
- [170] Fu, F. H.: The clock-face reference: simple but nonanatomic. *Arthroscopy* 24, 1433; author reply 1434 (2008)
- [171] Azzam, M. G., Lenarz, C. J., Farrow, L. D., Israel, H. A., Kieffer, D. A., and Kaar, S. G.: Inter- and intraobserver reliability of the clock face representation as used to describe the femoral intercondylar notch. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 19, 1265–70 (2011)
- [172] Zantop, T., Wellmann, M., Fu, F. H., and Petersen, W.: Tunnel positioning of anteromedial and posterolateral bundles in anatomic anterior cruciate ligament reconstruction: anatomic and radiographic findings. *Am J Sports Med* 36, 65–72 (2008)
- [173] Forsythe, B., Kopf, S., Wong, A. K., Martins, C. A. Q., Anderst, W., Tashman, S., and Fu, F. H.: The location of femoral and tibial tunnels in anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction analyzed by three-dimensional computed tomography models. *J Bone Joint Surg Am* 92, 1418–26 (2010)
- [174] Hutchinson, M. R. and Bae, T. S.: Reproducibility of anatomic tibial landmarks for anterior cruciate ligament reconstructions. *Am J Sports Med* 29, 777–80 (2001)
- [175] Meuffels, D. E., Potters, J.-W. W., Koning, A. H. J., Brown, C. H., Verhaar, J. A. N., and Reijman, M.: Visualization of postoperative anterior cruciate ligament reconstruction bone tunnels: reliability of standard radiographs, CT scans, and 3D virtual reality images. *Acta Orthop* 82, 699–703 (2011)

- [176] Tsukada, S., Fujishiro, H., Watanabe, K., Nimura, A., Mochizuki, T., Mahakanukrauh, P., Yasuda, K., and Akita, K.: Anatomic variations of the lateral intercondylar ridge: relationship to the anterior margin of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 42, 1110–7 (2014)
- [177] Ziegler, C. G., Pietrini, S. D., Westerhaus, B. D., Anderson, C. J., Wijdicks, C. A., Johansen, S., Engebretsen, L., and LaPrade, R. F.: Arthroscopically pertinent landmarks for tunnel positioning in single-bundle and double-bundle anterior cruciate ligament reconstructions. *Am J Sports Med* 39, 743–52 (2011)
- [178] Ferretti, M., Doca, D., Ingham, S. M., Cohen, M., and Fu, F. H.: Bony and soft tissue landmarks of the ACL tibial insertion site: an anatomical study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20, 62–8 (2012)
- [179] Kopf, S., Forsythe, B., Wong, A. K., Tashman, S., Anderst, W., Irrgang, J. J., and Fu, F. H.: Nonanatomic tunnel position in traditional transtibial single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction evaluated by three-dimensional computed tomography. *J Bone Joint Surg Am* 92, 1427–31 (2010)
- [180] Tang, J., Thorhauer, E., Marsh, C., Fu, F. H., and Tashman, S.: Knee rotation influences the femoral tunnel angle measurement after anterior cruciate ligament reconstruction: a 3-dimensional computed tomography model study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22, 1505–10 (2014)
- [181] Arnold, M. P., Kooloos, J., and van Kampen, A.: Single-incision technique misses the anatomical femoral anterior cruciate ligament insertion: a cadaver study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 9, 194–9 (2001)
- [182] Abebe, E. S., Moorman, C. T., Dziedzic, T. S., Spritzer, C. E., Cothran, R. L., Taylor, D. C., Garrett, W. E., and DeFrate, L. E.: 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, 1904–11 (2009)
- [183] Kasetta, M. K., DeFrate, L. E., Charnock, B. L., Sullivan, R. T., and Garrett, W. E.: Reconstruction technique affects femoral tunnel placement in ACL reconstruction. *Clin Orthop Relat Res* 466, 1467–74 (2008)
- [184] Gavriilidis, I., Mosis, E. K., Pakos, E. E., Georgoulis, A. D., Mitsionis, G., and Xenakis, T. A.: Transtibial versus anteromedial portal of the femoral tunnel in ACL reconstruction: A cadaveric study. *Knee* 15, 364–7 (2008)
- [185] Tompkins, M., Milewski, M. D., Brockmeier, S. F., Gaskin, C. M., Hart, J. M., and Miller, M. D.: Anatomic femoral tunnel drilling in anterior cruciate ligament

- reconstruction: use of an accessory medial portal versus traditional transtibial drilling. *Am J Sports Med* 40, 1313–21 (2012)
- [186] Tompkins, M., Cosgrove, C. T., Milewski, M. D., Brockmeier, S. F., Hart, J. M., and Miller, M. D.: Anterior cruciate ligament reconstruction femoral tunnel characteristics using an accessory medial portal versus traditional transtibial drilling. *Arthroscopy* 29, 550–5 (2013)
- [187] Rahr-Wagner, L., Thillemann, T. M., Pedersen, A. B., and Lind, M. C.: Increased risk of revision after anteromedial compared with transtibial drilling of the femoral tunnel during primary anterior cruciate ligament reconstruction: results from the Danish Knee Ligament Reconstruction Register. *Arthroscopy* 29, 98–105 (2013)
- [188] Williams, R. J., Hyman, J., Petrigliano, F., Rozental, T., and Wickiewicz, T. L.: Anterior cruciate ligament reconstruction with a four-strand hamstring tendon autograft. Surgical technique. *J Bone Joint Surg Am* 87 Suppl 1, 51–66 (2005)
- [189] Busam, M. L., Provencher, M. T., and Bach, B. R.: Complications of anterior cruciate ligament reconstruction with bone-patellar tendon-bone constructs: care and prevention. *Am J Sports Med* 36, 379–94 (2008)
- [190] Petersen, W. and Tillmann, B.: Anatomie und Funktion des vorderen Kreuzbandes. *Orthopde* 31, 710–718 (2002)
- [191] Asahina, S., Muneta, T., and Ezura, Y.: Notchplasty in anterior cruciate ligament reconstruction: an experimental animal study. *Arthroscopy* 16, 165–72 (2000)
- [192] LaPrade, R. F., Terry, G. C., Montgomery, R. D., Curd, D., and Simmons, D. J.: Winner of the Albert Trillat Young Investigator Award. The effects of aggressive notchplasty on the normal knee in dogs. *Am J Sports Med* 26, 193–200 (1998)
- [193] Youm, Y.-S. S., Cho, S.-D. D., Lee, S.-H. H., and Youn, C.-H. H.: Modified transtibial versus anteromedial portal technique in anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: comparison of femoral tunnel position and clinical results. *Am J Sports Med* 42, 2941–7 (2014)
- [194] Chhabra, A., Kline, A. J., Nilles, K. M., and Harner, C. D.: Tunnel expansion after anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous hamstrings: a comparison of the medial portal and transtibial techniques. *Arthroscopy* 22, 1107–12 (2006)
- [195] van Eck, C. F., Gravare-Silbernagel, K., Samuelsson, K., Musahl, V., van Dijk, C. N., Karlsson, J., Irrgang, J. J., and Fu, F. H.: Evidence to support the interpretation and use of the Anatomic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Checklist. *J Bone Joint Surg Am* 95, e153 (2013)

- [196] Harilainen, A., Sandelin, J., and Jansson, K. A.: Cross-pin femoral fixation versus metal interference screw fixation in anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring tendons: results of a controlled prospective randomized study with 2-year follow-up. *Arthroscopy* 21, 25–33 (2005)
- [197] Zantop, T., Diermann, N., Schumacher, T., Schanz, S., Fu, F. H., and Petersen, W.: Anatomical and nonanatomical double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: importance of femoral tunnel location on knee kinematics. *Am J Sports Med* 36, 678–85 (2008)
- [198] Abebe, E. S., Kim, J.-P. P., Utturkar, G. M., Taylor, D. C., Spritzer, C. E., Moorman, C. T., Garrett, W. E., and DeFrate, L. E.: The effect of femoral tunnel placement on ACL graft orientation and length during in vivo knee flexion. *J Biomech* 44, 1914–20 (2011)
- [199] Abebe, E. S., Utturkar, G. M., Taylor, D. C., Spritzer, C. E., Kim, J. P., Moorman, C. T., Garrett, W. E., and DeFrate, L. E.: The effects of femoral graft placement on in vivo knee kinematics after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Biomech* 44, 924–9 (2011)
- [200] Alentorn-Geli, E., Samitier, G., Alvarez, P., Steinbacher, G., and Cugat, R.: Anteromedial portal versus transtibial drilling techniques in ACL reconstruction: a blinded cross-sectional study at two- to five-year follow-up. *Int Orthop* 34, 747–54 (2010)
- [201] Franceschi, F., Papalia, R., Rizzello, G., Del Buono, A., Maffulli, N., and Denaro, V.: Anteromedial portal versus transtibial drilling techniques in anterior cruciate ligament reconstruction: any clinical relevance? A retrospective comparative study. *Arthroscopy* 29, 1330–7 (2013)
- [202] Mardani-Kivi, M., Madadi, F., Keyhani, S., Karimi-Mobarake, M., Hashemi-Motlagh, K., and Saheb-Ekhtiari, K.: Antero-medial portal vs. transtibial techniques for drilling femoral tunnel in ACL reconstruction using 4-strand hamstring tendon: a cross-sectional study with 1-year follow-up. *Med Sci Monit* 18, 674–9 (2012)
- [203] Wang, H., Fleischli, J. E., and Zheng, N. N.: Transtibial versus anteromedial portal technique in single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: outcomes of knee joint kinematics during walking. *Am J Sports Med* 41, 1847–56 (2013)
- [204] Okafor, E. C., Utturkar, G. M., Widmyer, M. R., Abebe, E. S., Collins, A. T., Taylor, D. C., Spritzer, C. E., Moorman, C. T., Garrett, W. E., and DeFrate, L. E.: The effects of femoral graft placement on cartilage thickness after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Biomech* 47, 96–101 (2014)

- [205] Xu, Y., Liu, J., Kramer, S., Martins, C., Kato, Y., Linde-Rosen, M., Smolinski, P., and Fu, F. H.: Comparison of in situ forces and knee kinematics in anteromedial and high anteromedial bundle augmentation for partially ruptured anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 39, 272–8 (2011)
- [206] Muneta, T.: Twenty-Year Experience of a Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Clin Orthop Surg* 7, 143–51 (2015)
- [207] Yasuda, K., Kondo, E., Ichiyama, H., Kitamura, N., Tanabe, Y., Tohyama, H., and Minami, A.: Anatomic reconstruction of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament using hamstring tendon grafts. *Arthroscopy* 20, 1015–25 (2004)
- [208] Kopf, S., Musahl, V., Bignozzi, S., Irrgang, J. J., Zaffagnini, S., and Fu, F. H.: In Vivo Kinematic Evaluation of Anatomic Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med* 42, 2172–7 (2014)
- [209] Yagi, M., Wong, E. K., Kanamori, A., Debski, R. E., Fu, F. H., and Woo, S. L.-Y.: Biomechanical analysis of an anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 30, 660–6 (2002)
- [210] Tajima, G., Iriuchishima, T., Ingham, S. J. M., Shen, W., van Houten, A. H., Aerts, M. M., Shimamura, T., Smolinski, P., and Fu, F. H.: Anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction restores patellofemoral contact areas and pressures more closely than nonanatomic single-bundle reconstruction. *Arthroscopy* 26, 1302–10 (2010)
- [211] Gong, X., Jiang, D., Wang, Y.-J. J., Wang, J., Ao, Y.-F. F., and Yu, J.-K. K.: Second-Look Arthroscopic Evaluation of Chondral Lesions After Isolated Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Single- Versus Double-Bundle Reconstruction. *Am J Sports Med* 41, 2362–7 (2013)
- [212] Wang, H.-J. J., Ao, Y.-F. F., Chen, L.-X. X., Gong, X., Wang, Y.-J. J., Ma, Y., Leung, K. K. M., and Yu, J.-K. K.: Second-look arthroscopic evaluation of the articular cartilage after primary single-bundle and double-bundle anterior cruciate ligament reconstructions. *Chin Med J (Engl)* 124, 3551–5 (2011)
- [213] Kopf, S., Kauert, R., Halfpaap, J., Jung, T., and Becker, R.: A new quantitative method for pivot shift grading. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20, 718–23 (2012)
- [214] Hoshino, Y., Araujo, P., Ahldén, M., Samuelsson, K., Muller, B., Hofbauer, M., Wolf, M. R., Irrgang, J. J., Fu, F. H., and Musahl, V.: Quantitative evaluation

- of the pivot shift by image analysis using the iPad. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21, 975–80 (2013)
- [215] Ahldén, M., Araujo, P., Hoshino, Y., Samuelsson, K., Middleton, K. K., Nagamune, K., Karlsson, J., and Musahl, V.: Clinical grading of the pivot shift test correlates best with tibial acceleration. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20, 708–12 (2012)
- [216] Lopomo, N., Zaffagnini, S., Signorelli, C., Bignozzi, S., Giordano, G., Marchegiani Muccioli, G. M., and Visani, A.: An original clinical methodology for non-invasive assessment of pivot-shift test. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 15, 1323–8 (2012)
- [217] Kubo, S., Muratsu, H., Yoshiya, S., Mizuno, K., and Kurosaka, M.: Reliability and usefulness of a new in vivo measurement system of the pivot shift. *Clin Orthop Relat Res* 454, 54–8 (2007)
- [218] Markolf, K. L., Park, S., Jackson, S. R., and McAllister, D. R.: Simulated pivot-shift testing with single and double-bundle anterior cruciate ligament reconstructions. *J Bone Joint Surg Am* 90, 1681–9 (2008)
- [219] Petrie, A.: Statistics in orthopaedic papers. *J Bone Joint Surg Br* 88, 1121–36 (2006)
- [220] Geiger, E. V., Laurer, H. L., Jakob, H., Frank, J. M., and Marzi, I.: [Treatment costs for anterior cruciate ligament reconstruction: procedure related cost analysis in an university hospital]. *Unfallchirurg* 116, 517–23 (2013)
- [221] Paxton, E. S., Kymes, S. M., and Brophy, R. H.: Cost-effectiveness of anterior cruciate ligament reconstruction: a preliminary comparison of single-bundle and double-bundle techniques. *Am J Sports Med* 38, 2417–25 (2010)
- [222] Fox, J. A., Pierce, M., Bojchuk, J., Hayden, J., Bush-Joseph, C. A., and Bach, B. R.: Revision anterior cruciate ligament reconstruction with nonirradiated fresh-frozen patellar tendon allograft. *Arthroscopy* 20, 787–94 (2004)
- [223] Zantop, T., Kubo, S., Petersen, W., Musahl, V., and Fu, F. H.: Current techniques in anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 23, 938–47 (2007)
- [224] Snow, M. and Stanish, W. D.: Double-bundle ACL reconstruction: how big is the learning curve? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 18, 1195–200 (2010)

- [225] Kinugasa, K., Hamada, M., Yoneda, K., Matsuo, T., Mae, T., and Shino, K.: Cross-sectional area of hamstring tendon autograft after anatomic triple-bundle ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* (2015)
- [226] Tanaka, Y., Shino, K., Horibe, S., Nakamura, N., Nakagawa, S., Mae, T., Otsubo, H., Suzuki, T., and Nakata, K.: Triple-bundle ACL grafts evaluated by second-look arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20, 95–101 (2012)
- [227] Zhang, Z., Gu, B., Zhu, W., Zhu, L., Li, Q., and Du, Y.: Arthroscopic single-bundle versus triple-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Acta Orthop Traumatol Turc* 48, 413–8 (2014)
- [228] Arnold, M. P., Friederich, N. F., Müller, W., and Hirschmann, M. T.: From open to arthroscopic anatomical ACL-reconstructions: the long way round. A statement paper. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21, 1478–81 (2013)
- [229] Weiler, A., Förster, C., Hunt, P., Falk, R., Jung, T., Unterhauser, F. N., Bergmann, V., Schmidmaier, G., and Haas, N. P.: The influence of locally applied platelet-derived growth factor-BB on free tendon graft remodeling after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 32, 881–91 (2004)
- [230] Weiler, A., Unterhauser, F. N., Bail, H. J., Hüning, M., and Haas, N. P.: Alpha-smooth muscle actin is expressed by fibroblastic cells of the ovine anterior cruciate ligament and its free tendon graft during remodeling. *J Orthop Res* 20, 310–7 (2002)
- [231] Duchman, K. R., Westermann, R. W., Spindler, K. P., Reinke, E. K., Huston, L. J., Amendola, A., and Wolf, B. R.: The Fate of Meniscus Tears Left In Situ at the Time of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A 6-Year Follow-up Study From the MOON Cohort. *Am J Sports Med* 43, 2688–95 (2015)

6. Danksagung

Hiermit möchte ich mich herzlich bei Prof. Michael Schütz bedanken, der sich trotz seiner gerade erst begonnenen Tätigkeit in unserem Centrum die Zeit für meine Habilitationsschrift genommen und sie unterstützt hat.

Prof. Norbert P. Haas danke ich für seine Unterstützung sowie die akademische und klinische Ausbildung. Ich danke ihm vor allem auch für das Schaffen der Voraussetzungen für die Einreichung der vorgestellten Arbeit. Er hat maßgeblich für die Schaffung der ausgezeichneten Verzahnung der Klinik und Wissenschaft in unserem Centrum beigetragen.

Mein Dank gilt Prof. Carsten Perka für seine Unterstützung im klinischen wie auch im wissenschaftlichen Bereich. Er war für meine Fragen offen und nahm sich die Zeit, Problemstellungen zu besprechen. Sein pragmatischer Ansatz erwies sich oft als hilfreich.

Prof. Georg Duda möchte ich für die konzeptionellen Gespräche, sein Interesse an meiner wissenschaftlichen Arbeit und für die Unterstützung danken. Mein besonderer Dank gilt auch den vielen Mitarbeitern des JWI und meinen Kollegen, die mich immer unterstützt haben und mit Rat und Tat zur Seite standen. In diesem Zusammenhang möchte ich auch den Mitgliedern meiner Arbeitsgruppe danken, die zu jeder Zeit bereit waren unsere gemeinsamen wissenschaftlichen Projekte voranzubringen.

Prof. Roland Becker bin ich zu besonderen Dank verpflichtet. Er hat in mir das Interesse an der Wissenschaft mit meiner bei ihm absolvierten Dissertation geweckt und mich auf meinem weiteren Weg immer freundschaftlich unterstützt.

Seit meines zweijährigen Forschungsaufenthaltes in Pittsburgh, PA, U.S.A., stand mir Prof. Freddie H. Fu immer hilfreich und unterstützend zur Seite, wofür ich ihm zu tiefen Dank verpflichtet bin.

Meine immerwährende Dankbarkeit gilt meiner Frau Nadine und meinen Kindern Benedict Martin, Luise und Laurin für ihre unendliche Geduld, Rücksichtnahme und Unterstützung.

7. Erklärung

§ 4 Abs. 3 (k) der HabOMed der Charité

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde,
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern/Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden,
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

.....
Datum

.....
Dr. med. Sebastian Kopf