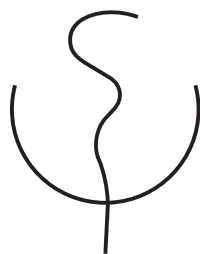


---

**Qualitative und quantitative  
MR-Bildgebung und klinische Ergebnisse  
nach isolierten und kombinierten  
Verfahren der retropatellaren  
Matrixassoziierten  
Knorpelzelltransplantation (MACT) und  
medialer patellofemoraler  
Ligament-Rekonstruktion (MPFL)**

---



München 2022



Technische Universität München

Fakultät für Medizin



**Qualitative und quantitative MR-Bildgebung und klinische  
Ergebnisse nach isolierten und kombinierten Verfahren der  
retropatellaren Matrixassoziierten  
Knorpelzelltransplantation (MACT) und medialer  
patellofemoraler Ligament-Rekonstruktion (MPFL)**

**Julia Barbara Schneider**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der  
Technischen Universität München zur Erlangung einer Doktorin  
der Medizin (Dr. med.) genehmigten Dissertation.

Vorsitz: apl. Prof. Dr. Bernhard Haslinger

Prüfer der Dissertation:

1. apl. Prof. Dr. Sebastian Siebenlist
2. apl. Prof. Dr. Klaus Wörtler

Die Dissertation wurde am 25.08.2022 bei der Technischen  
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für  
Medizin am 03.01.2023 angenommen.



In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>xix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Das Patellofemoralgelenk . . . . .	1
1.2 Pathomechanismen . . . . .	2
1.2.1 Patellofemorale Instabilität . . . . .	2
1.2.2 Patellaluxation mit Ruptur des MPFL . . . . .	4
1.2.3 Knorpelphysiologie und Knorpelschäden . . . . .	7
1.3 Therapieoptionen . . . . .	10
1.3.1 Allgemeine Therapie nach Patellaluxation . . . . .	10
1.3.2 Rekonstruktion des MPFL . . . . .	11
1.3.3 Allgemeine Therapieoptionen bei fokalen Knorpelschäden . . . . .	15
1.3.4 Matrixassoziierte autologe Chondrozyten Transplantation . . . . .	17
1.4 Kombinationsoperation MPFL mit MACT . . . . .	18
1.5 Magnetresonanztomographie zur Knorpelbildgebung . . . . .	19
1.5.1 MR-Tomographie . . . . .	19
1.5.2 Knorpelbildgebung . . . . .	20
1.5.3 Quantitatives T2 Mapping . . . . .	22
1.5.4 Quantitatives T1rho Mapping . . . . .	22
<b>2 Fragestellung</b>	<b>25</b>
<b>3 Material</b>	<b>27</b>
3.1 Studienaufbau . . . . .	27
3.2 Ein- und Ausschlusskriterien . . . . .	27
3.3 Patientenkollektiv und Gruppeneinteilung . . . . .	28
3.4 Nachuntersuchungszeitraum . . . . .	29
3.5 Indikation der jeweiligen Operationstechniken . . . . .	30
<b>4 Methoden</b>	<b>31</b>
4.1 Subjektive Fragebögen . . . . .	31
4.1.1 Anamnesebogen mit Aktivitäts- und Funktionslevel . . . . .	31
4.1.2 Numerische Rankingskala zur Funktionsbestimmung . . . . .	32

4.1.3	Cincinnati Knee Rating Scale . . . . .	32
4.1.4	Kujala Score . . . . .	33
4.1.5	KOOS Score . . . . .	33
4.1.6	IKDC subjektiver Fragebogen . . . . .	33
4.1.7	Lysholm(-Gillquist) Fragebogen und Tegner(-Lysholm) Aktivitätsindex	34
4.2	Klinische Untersuchung . . . . .	35
4.2.1	Objektiver IKDC 2000 . . . . .	35
4.2.2	Einbein-Sprung-Test . . . . .	36
4.3	Bildgebung . . . . .	36
4.3.1	Protokoll der MR Sequenzen . . . . .	36
4.3.2	Qualitative MR Evaluation . . . . .	40
4.3.3	Quantitative MR Evaluation mittels Segmentierung . . . . .	46
4.4	Reproduzierbarkeitsmessungen . . . . .	48
4.5	Statistik . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>51</b>
5.1	Charakterisierung Patientenkollektiv . . . . .	51
5.2	Ergebnisse der Fragebögen . . . . .	53
5.2.1	Aktivitäts- und Funktionslevel nach IKDC 2000 . . . . .	53
5.2.2	Numerische Rankingskala . . . . .	55
5.2.3	Cincinnati Knee Rating Scale . . . . .	56
5.2.4	Kujala Score . . . . .	58
5.2.5	KOOS Score . . . . .	59
5.2.6	IKDC subjektiver Fragebogen . . . . .	60
5.2.7	Lysholm(-Gillquist) Fragebogen und Tegner(Lysholm) Aktivitätsindex	61
5.3	Ergebnisse der klinischen Untersuchung . . . . .	62
5.4	Evaluation Stabilität . . . . .	66
5.5	Ergebnisse Bildgebung . . . . .	66
5.5.1	Qualitative Ergebnisse . . . . .	66
5.5.2	Quantitative Ergebnisse . . . . .	71
5.6	Korrelationsanalysen . . . . .	75
5.7	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>79</b>
6.1	Diskussion Material . . . . .	80
6.2	Diskussion OP-Methoden . . . . .	81
6.3	Diskussion klinischer und radiologischer Evaluationsmethoden . . . . .	84
6.4	Diskussion klinischer Ergebnisse . . . . .	87
6.5	Diskussion radiologischer Ergebnisse . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>99</b>
<b>A</b>	<b>Fragebogen Mappe</b>	<b>101</b>







# Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der drei Säulen der Stabilisation des Patellofemoralgelenks . . . . .	3
1.2	Die Abbildung aus (Jagodzinski and Müller, 2016) zeigt eine mediale Seitenansicht des Kniegelenks mit dem Ligamentum patellofemorale mediale, welches vom medialen Patellarand bis zum medialen superoposterioren Teil des Femurepikondylus verläuft. . . . .	7
1.3	Schematische Darstellung der Knorpelstruktur in verschiedenen Stadien. (A) bildet gesunden, hyalinen Knorpel mit geordneten, strukturierten Kollagenfasern und vielen PG ab. Bei (B) ist die veränderte Struktur bei früher OA mit verringerter Anzahl an PG und zunehmend geringerer Ordnung der Kollagenfasern dargestellt. Im Stadium der fortgeschrittenen OA (C) sind kaum mehr PG zu finden und es ist keine Ordnung der Kollagenfasern mehr zu erkennen. Oberflächlich zeigen sich Änderungen im Relief. (Matzat et al., 2013) . . . . .	9
1.4	Von proximal nach distal verläuft die Verlängerungslinie zur posterioren Femurkortikalis. Linie 2 entspricht einem Lot darauf durch den Ursprung des posterioren medialen Femurkondylus (Punkt 1), Linie 3 ist ebenfalls ein Lot darauf, welches durch den posterioren Punkt (Punkt 2) der Blumen-saat´schen Linie verläuft. (Schöttle et al., 2007) . . . . .	13
1.5	Schematische Darstellung der MPFL-Rekonstruktion in Doppelbündel-Technik mit Aperturefixation mit SwiveLock/Bio-Interferenz-Schrauben aus (Schöttle et al., 2010) . . . . .	15
1.6	Schematische Darstellung des Kernspins und der Magnetfeld-bedingten Ausrichtung parallel oder antiparallel während einer MRT-Untersuchung aus (Schild, 1997) . . . . .	20
3.1	Flowchart Patientenauswahl . . . . .	29
3.2	Gruppenbildung . . . . .	29
4.1	Zeitstrahl . . . . .	31

4.2	Das Apprehension-Zeichen wird durch die vorsichtige Lateralisation der Patella durch den Untersucher in verschiedenen Beugegraden durchgeführt. Bei vorliegender Luxationsneigung führt diese Provokation zu einer Abwehr- bzw. Angstreaktion des Patienten. Dies wird als positives Apprehension-Zeichen gewertet. . . . .	36
4.3	ICRS Klassifikationssystem für Knorpelschäden nach (Brittberg and Winalski, 2003) . . . . .	41
4.4	MRT ROI (Region of Interest) beispielhaft an 4 Regionen (grün = PAT; blau = TRO; orange = LFC; gelb = LT) Fotodokumentation der Sportorthopädie und Radiologie Klinikum rechts der Isar München . . . . .	48
5.1	Aktivitätslevel . . . . .	54
5.2	Funktionslevel . . . . .	55
5.3	Numerische Rankingskala Funktionsbestimmung . . . . .	56
5.4	Numerische Rankingskala Progress . . . . .	56
5.5	Cincinnati Score . . . . .	57
5.6	Kujala Score . . . . .	58
5.7	KOOS Score . . . . .	59
5.8	IKDC Score subjektiv . . . . .	60
5.9	Lysholm Score . . . . .	61
5.10	Tegner Score . . . . .	62
5.11	IKDC objektiv gesamt . . . . .	63
5.12	IKDC objektiv Kategorie Ligamentbefunde . . . . .	64
5.13	Einbein Sprung Test . . . . .	65
5.14	MOCART gesamt . . . . .	67
5.15	Defect Filling: Eine unzureichende Defektfüllung zeigte sich gehäuft bei der MIXED Gruppe, oftmals auch begleitet von einem retropatellaren Knochenmarködem (A). Demgegenüber präsentierte sich bei der MACT Gruppe bei 2/3 der Patienten eine adäquate, vollständige Defektfüllung (B). In der MPFL Gruppe ergab sich keine signifikante morphologische Progression der degenerativen Veränderungen zum Zeitpunkt t2 . . . . .	68
5.16	WORMS Gesamtscore . . . . .	69
5.17	WORMS Knorpelsignal Patella . . . . .	70
5.18	Globaler T2 Wert . . . . .	71
5.19	Globaler T1rho Wert . . . . .	72

---

5.20	Farbskalierte quantitative Messungen an Patella- und Trochleaknorpel. Rot signalisiert hohe Werte mit potenziell degenerierter Knorpelzellmatrix. Niedrige Werte sind blau dargestellt und indizieren eine intakte Knorpelzellmatrix. Obere Reihe: Farbkodierte T2 Mapping Relaxationswerte. Die globalen T2 Werte lagen in der MIXED und MACT Gruppe signifikant höher gegenüber der MPFL Gruppe, was an einem höheren Anteil an roter und gelber Färbung zu erkennen ist. Untere Reihe: Farbkodierte T1rho Mapping Relaxationswerte. Die globalen T1rho Werte unterschieden sich zwischen den Gruppen nicht signifikant. . .	74
5.21	Korrelation KOOS . . . . .	75
5.22	Korrelation Tegner . . . . .	76
5.23	Korrelation Cincinnati . . . . .	76



# Tabellenverzeichnis

4.1	Aktivitätslevel und Funktionslevel . . . . .	32
4.2	MR Sequenzprotokolle . . . . .	38
4.3	MOCART Score modifiziert nach (Domayer, Welsch et al. 2008) . . . . .	42
4.4	Modifiziert nach (Peterfy, Guermazi et al. 2004): WORMS Score . . . . .	44
5.1	Demographische Daten . . . . .	51
5.2	Klinische Daten . . . . .	52
5.3	Quantitative MR Bildgebung aller Gruppen, Dickgedruckte Werte zeigen Signifikanz ( $p < 0.05$ ), mit Stern markierte Werte zeigen Hochsignifikanz ( $p < 0.01$ ) und kursive Werte zeigen statistische Trends ( $p < 0.10$ ) . . . . .	73
6.1	Literaturvergleich Diskussion . . . . .	87





# Abkürzungsverzeichnis

<b>ACT</b>	Autologe Chondrozytentransplantation
<b>BMI</b>	Body-Mass-Index
<b>FOV</b>	Field of view
<b>ICRS</b>	International Cartilage Repair Society
<b>IKDC</b>	International Knee Documentation Committee
<b>GAG</b>	Glykosaminoglykane
<b>KOOS</b>	Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score
<b>MACT</b>	Matrixassoziierte autologe Chondrozyten Transplantation
<b>MPFL</b>	Mediales patellofemorales Ligament
<b>MOCART</b>	Magnetic resonance observation of cartilage repair tissue Score
<b>MRT</b>	Magnetresonanztomographie
<b>MSME</b>	Multi Slice Multi Echo
<b>PD</b>	Protonendichte
<b>PG</b>	Proteoglykane
<b>OA</b>	Osteoarthritis
<b>OATS</b>	Autologe osteochondrale Transplantation
<b>PACS</b>	Picture Archiving Communication System
<b>PFI</b>	Patellofemorale Instabilität
<b>SE</b>	Spinecho
<b>SD</b>	Standardabweichung

<b>TE</b>	Echozeit
<b>TR</b>	Repetitionszeit
<b>TSE</b>	turbo Spinecho
<b>TTTG</b>	Tuberositas-Tibiae-Trochlea-Groove
<b>VMO</b>	Musculus vastus medialis obliquus
<b>WORMS</b>	Whole-Organ Magnetic Resonance Imaging Score

# Vorwort

Ein häufig in sportorthopädischen Kliniken vorstelliges Patientengut klagt über Knie-Probleme, die auf eine akute oder chronische patellofemorale Instabilität (PFI) und daraus kausal entstandenen Knorpelschaden zurückzuführen sind.

PFI, die sich in Luxationen der Kniescheibe mit Ruptur des medialen patellofemorale Ligaments (MPFL) bemerkbar machen können, sind ein belastendes Thema für Betroffene. Häufig fühlen sich die Patienten verunsichert, sodass sie ihre bisherigen sportlichen Aktivitäten einschränken oder, aus Angst vor einer erneuten Luxation, gar ganz einstellen. Teilweise sind die Patienten schon bei normalen Alltagsaktivitäten derart ängstlich, dass sie Schonhaltungen einnehmen und gewisse Bewegungen, wie zum Beispiel eine tiefe Hocke oder das Treppensteigen, schlichtweg vermeiden. Da diese „Krankheitskarriere“ typischerweise schon in jungen Jahren beginnt, ist der Leidensdruck besonders hoch und Patienten nehmen lange Wege auf sich, um sich mehrere Meinungen von verschiedenen Orthopäden einzuholen. (Baier et al., 2011) Die Verletzung kann zu starken Einschränkungen der gesundheitsbezogenen Lebensqualität der Betroffenen führen, und auch das Arbeitsverhältnis der Patienten stark belasten. Allgemein sind Luxationen ein wesentlicher Grund für hochgradige Knorpelschäden und die Entwicklung einer frühen Retropatellararthrose. (Hohne et al., 2017; Nomura et al., 2003; Salonen et al., 2017) Schon nach einmalig stattgehabter Luxation, entweder als Folge der Instabilität (habituell) oder nach Unfällen (traumatisch), kann sich langfristig ein Knorpelschaden manifestieren. (Salonen et al., 2017)

Oft kommt beim Arztbesuch daher zusätzlich zu einer Ruptur des MPFL noch die niederschmetternde Diagnose eines begleitenden, behandlungsbedürftigen retropatellaren Knorpelschadens hinzu. Auch der alleinige Knorpelschaden hinter der Kniescheibe, ohne dass dabei ein Trauma mit Luxation stattgefunden hat, kann ähnliche Auswirkungen auf den Patienten haben. Dies ist nicht nur mit Schmerzen, sondern auch mit der Gefahr einer langfristigen Retropatellararthrose mit erheblichen Einschränkungen verbunden. (Spahn et al., 2016)

Nachhaltige Therapieansätze der Instabilität zielen auf knöcherne Stabilisation, Re-Alignment oder Stabilisierung der passiven Weichteilstrukturen ab. (Arendt and Dejour, 2013; Irger et al., 2020; Previtali et al., 2020; Rhee et al., 2012; Sanchis-Alfonso, 2016; Schmeling, 2010; Zimmerer et al., 2018) Eine mögliche Therapie ist die Rekonstruktion des MPFL, wofür verschiedene Techniken zur Verfügung stehen. Die Rekonstruktion via Gracilis-Sehne mittels Doppelbündel-Technik mit Aperturfixation ist etabliert und war die Methode der Wahl bei Patienten unserer Studie.

Bei relevanten Knorpeldefekten an der Patella kann das Knorpelersatzverfahren der Matrixassoziierten Autologen Chondrozyten Transplantation (MACT) durchgeführt werden. Die Ergebnisse zeigen sich in Studien bisher allerdings nicht mit denen an den Femurkondylen des Knies vergleichbar, da die MACT retropatellar tendenziell schlechter ist. (Niemeyer et al., 2007; Noyes and Barber-Westin, 2013; Rath et al., 2017) Gelenkerhaltende Alternativen sind jedoch rar. Die Tatsache, dass sowohl für die Bandruptur als auch für Knorpelschäden einige verschiedene Therapien angeboten werden, erschwert die Entscheidungsfindung für Patient und Arzt enorm.

Einen besonderen Stellenwert nimmt der kombinierte Fall aus einer PFI mit retropatellarem Knorpelschaden ein. Die Instabilität muss adressiert werden, ohne dabei den Druck im Patellofemoral-Gelenk zu erhöhen. Hierbei muss die Indikation sehr individuell gestellt werden. (Arendt et al., 2016; Mehl et al., 2015; Schmeling, 2010) Die Möglichkeit und Effektivität eines kombinierten Verfahrens aus MPFL-Rekonstruktion und Knorpelersatzverfahren haben allerdings bisher nur wenige Studien, gerade hinsichtlich des meist deutlich betroffenen retropatellaren Knorpels, beleuchtet. (Siebold et al., 2014) Selbst die im klinischen Alltag verwendete Standard-MRT-Bildgebung kann das Ausmaß des Knorpelschadens, beziehungsweise den postoperativen Behandlungserfolg, oft nur mit gewisser Ungenauigkeit angeben, sodass Grenzfälle bleiben und einer ausführlicheren Reflektion bedürfen. Dies wird zunehmend über neuere, quantitative Bildgebung realisiert, welche gerade die biochemische Knorpelzusammensetzung bei frühen und klinisch stummen Knorpelschädigungen abbilden kann.

Ziel dieser Studie ist es, die Auswirkung einer Rekonstruktion des MPFL auf die Heilung einer MACT im kombinierten Fall klinisch sowie qualitativ und quantitativ radiologisch zu untersuchen und den jeweils isolierten Methoden, isolierte MACT und isolierte MPFL-Rekonstruktion, gegenüber zu stellen.

# Kapitel 1

## Einleitung

Für das Verständnis der in dieser Arbeit untersuchten Pathologien sind die Physiologie des Patellofemoralgelenks und der Knorpelheilung von essentieller Bedeutung. Es werden Risikofaktoren und daraus resultierende Pathomechanismen präsentiert, durch die es zu Patellaluxationen und Knorpelschäden kommen kann. Des Weiteren wird auf entsprechende Therapien und Möglichkeiten der Evaluation eingegangen.

### 1.1 Das Patellofemoralgelenk

Das Patellofemoralgelenk setzt sich aus der Facies patellaris des Femurs und der Facies articularis der Patella zusammen, welche mit hyalinem Gelenkknorpel überzogen sind. Als größtes Sesambein des menschlichen Körpers beschreitet die Patella bei Kniebeugung und Eingleiten in die Trochlearrinne einen komplexen Ablauf von Rotations- und Translationsbewegungen in verschiedenen Achsen um ihr Gleitlager. Die gesamte Wegstrecke von vollständiger Beugung bis zur Streckung beträgt im Mittel 5 - 7 cm, dabei steht die Patella nie mit ihrer gesamten Gelenkfläche in Kontakt mit dem Femurkondylus, was eine Schonung und gleichzeitig optimale Druckverteilung des Knorpels bewirken soll. (Lanz and Wachsmuth, 1972) Ein abnormales Gleiten der Patella wird als Malalignment bezeichnet. Während in voller Streckung die stabilisierende knöcherne Komponente der Trochlea noch nicht greift und dadurch allein ein Weichteilkomplex aus Bändern und Muskeln das Gelenk vor Verrenkungen sichert, kommt es bei fortschreitender Beugung ab ca. 6° Knieflexion zum ersten Kontakt zwischen distalem Pol des Patella-Firsts und proximalem Trochlea-Anteil. So gewinnt die knöcherne Trochleamorphologie bei zunehmender Beugung und Eingleiten der Patella in den Sulcus trochleae an Bedeutung.

Im weiteren Verlauf artikulieren ab ca. 20° Flexion Patella und Trochlea vollständig knöchern geführt miteinander. Bei 90° Beugung befindet sich die retropatellare Kontaktfläche ungefähr in der Mitte der Führungsflächen, wohingegen die Patella bei noch tiefer Beugung über 90° zunehmend lateralisiert und nur noch die beiden äußeren Facettenanteile die femoralen Kondylen berühren. (Amis et al., 2006; Irger et al., 2020; Schmelting, 2010)

Auf Ihrem Weg erfährt die Patella medio-laterale Translationsbewegungen, den sog. Patella-Shift. Hierbei gleitet sie während der initialen Beugebewegung von lateral nach medial mit einem Maximum bei 15 - 40° Beugung. Im Fortgang der Kniebeugung folgt dieser Medialisierung eine erneuten Lateralisation bis zur kompletten Flexion. Des Weiteren kann der sog. Patella-Tilt beobachtet werden, wobei die Kniescheibe in der proximo-distalen Achse lateral verkippt. Hier gibt es zwei Phasen: Initial bis ca. 75° Beugung verkippt die Patella im Mittel um 6° und rotiert im Mittel um 8° nach lateral, bei zunehmender Beugung kippt sie wieder medial. (Katchburian et al., 2003; Nha et al., 2008)

Aufgrund dieser dreidimensionalen Komplexität erscheint es einleuchtend, dass das Patellofemoralgelenk allgemein hohen Kräften ausgesetzt ist. Wie Schindler et al. zusammenfassen, wird das Gelenk bei Alltagsaktivitäten Kräften von 0,5- bis zum 9,7-fachen des Körpergewichts ausgesetzt; bei sportlichen Aktivitäten kann diese Kraft sogar bis auf das 20-fache des Eigengewichts ansteigen. (Schindler and Scott, 2011) Die Druckverhältnisse verändern sich von wenigen Newton (N) in Neutral-Null-Stellung auf über vierstellige Werte in maximaler Beugung. Absolut gesehen herrschen somit Anpressdrücke von 385 N beim Gehen, über ca. 2500 N beim Treppensteigen und bis hin zu fast 6000 N bei extremen Sportlichen Belastungen wie dem Abfangen von Sprüngen. (Feller et al., 2007)

## 1.2 Pathomechanismen

### 1.2.1 Patellofemorale Instabilität

Der Begriff „Patellofemorale Instabilität“ (PFI) umfasst die Bereiche Patellasubluxation, rezidivierende Patellaluxation und die generelle PFI mit chronischer Luxation. Nach Sanchis-Alfonso et al. können laterale Instabilitäten in der frühen Phase bis 30° Beugung, laterale Instabilitäten ab 30° Beugung und solche in tiefer Flexion von medialen Instabilitäten mit meist iatrogener Ursache unterschieden werden. (Sanchis-Alfonso, 2016) Die Prävalenz der PFI liegt zwischen 7 und 49 Betroffenen in 100 000. (Redziniak et al., 2010) In der akuten Situation ist die PFI in Form einer Patellaluxation eine Blickdiagnose, worüber weiter unten genauer berichtet wird. Die Symptome bei rezidivierender PFI sind neben Schmerzen vor allem repetitive giving-way Phänomene oder Blockaden, welche einen hohen Leidensdruck verursachen. (Baier et al., 2011)

Die Balance aus statisch weichteiligen, statisch knöchernen und dynamischen Faktoren sichert die Stabilität des patellofemorales Gelenks. Diese werden zum genauen Verständnis der Ursachen einer PFI, resultierenden Luxationen und einer adäquaten Therapie im Folgenden beschrieben.

Als wichtigster statischer weichteiliger Stabilisator in strecknaher Position bis ca. 20° Beugung hat sich in vielen Studien schon seit mehreren Jahren das MPFL als Teil des medialen Retinaculum-Komplexes herauskristallisiert. (Conlan et al., 1993; Desio et al., 1998; Hautamaa et al., 1998; Irger et al., 2020) Es spielt vor allem für das exakte Eintauchen der Patella in den Sulcus trochleae eine zentrale Rolle und bedingt so maßgeblich die Stabilität

bis ca. 20° Beugung. (Redziniak et al., 2010) Bei Ruptur des Bandes ist die Haltefunktion nicht mehr gegeben. Dahingegen spielen die lateralen Ligamentstrukturen, welche lediglich bei einem insuffizienten medialen Halteapparat eine relevante letzte Barriere gegen die Luxation der Patella nach lateral darstellen, eine untergeordnete Rolle. (Conlan et al., 1993; Desio et al., 1998)

Die statischen knöchernen Stabilisatoren beziehen sich vor allem auf die Form von Trochlearinne und Patella und auf die Gesamtstatik des Beins. Sie spielen beim gesunden Knie insbesondere ab 20° Beugung eine wichtige Rolle; die laterale Trochleafacette ist hierbei das größte Lateralisationshindernis. (Senavongse and Amis, 2005) Bei der Statik sind folgende Faktoren von Bedeutung: Die frontale Beinachse führt bei Valgusfehlstellung im Knie zu einer lateralisierten Patella. Eine erhöhte femorale Antetorsion bewirkt eine funktionelle Innenrotation des Knies, welche genauso wie ein vergrößerter Abstand der Tuberositas tibiae zur trochleären Grube (sog. TTTG-Abstand) mit somit verstärktem lateralen Muskelzug eine Lateralisierung der Patella zur Folge hat. (Irgler et al., 2020)

Der aktive Muskelzug der schrägen distalen Anteile des M.vastus medialis (auch als funktionell eigenständige Einheit M. vastus medialis obliquus, „VMO“ genannt) verhindert als einziger dynamischer Stabilisator eine laterale Dislokation ab ca. 60° Beugung. (Irgler et al., 2020) Demgegenüber wird diesem Muskel extensionsnah sogar eine eher lateralisierende Wirkung zugeschrieben. (Powers et al., 1998)

Abbildung 1.1 stellt übersichtlich die in drei Kategorien eingeteilten stabilisierenden Faktoren des patellofemorale Gelenks dar.

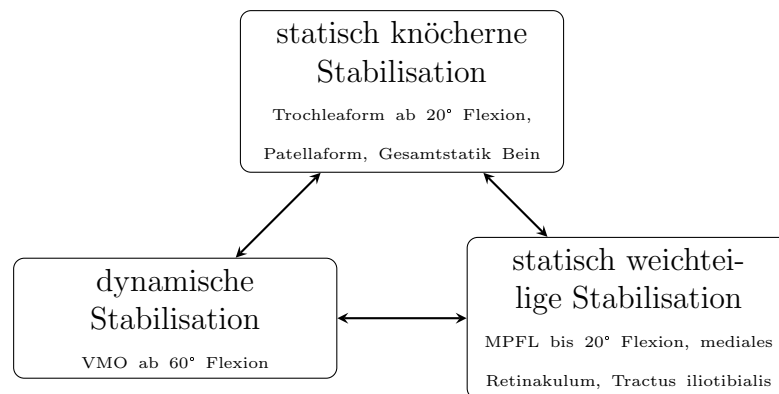


Abb. 1.1: Schematische Darstellung der drei Säulen der Stabilisation des Patellofemorale Gelenks

Analog lassen sich die im Folgenden kurz genannten Ätiologien der PFI den Kategorien dieser Abbildung zuordnen, welche bei der Diagnostik und Behandlung zu beachten sind: Den knöchernen anatomischen Faktoren können hier vor allem Veränderungen der Trochlea bzw. Patella in Form von Hypoplasien und Dysplasien zugeordnet werden. Des Weiteren können eine veränderte Stellung der Gelenkpartner im Sinne eines genu recurvatum, ei-

nes genu valgum, einer Patella alta, einer pathologischen TTTG  $> 20$  mm oder allgemein Torsionsfehler von Femur und Tibia Ursachen einer PFI sein. Dynamisch sind vor allem muskuläre Insuffizienzen durch Hypotrophie, Dysplasie oder Lähmungen, insbesondere des VMO, zu nennen. (Baier et al., 2011; Schmeling, 2010) Weichteilig spielt hauptsächlich eine allgemeine Bandlaxizität, im speziellen eine Elongation des MPFLs, eine wichtige Rolle. (Conlan et al., 1993; Desio et al., 1998; Dewan et al., 2020; Hautamaa et al., 1998)

Es kann daraus folgend proximales von distalem Patella-Maltracking unterschieden werden: Ersteres kann vor allem durch Weichteilatrophie, Schwäche und hochproximale Insertion des VMO, verkürzte laterale Retinacula, allgemeine Hyperlaxität, Patella alta, vermehrter Tilt oder muskuläre Dysbalancen verursacht werden. Ursachen des distalen Maltrackings sind eher ein erhöhter Quadrizeps-Winkel, ein dadurch erhöhter TTTG-Abstand oder eine Überpronation des Fußes. (Imhoff et al., 2014; Irger et al., 2020)

Die Ursachen präsentieren sich somit vielfältig und sind oft multifaktorieller Genese, was eine individuelle Diagnostik erfordert.

### 1.2.2 Patellaluxation mit Ruptur des MPFL

Patellaluxationen zählen zu den häufigsten Verrenkungen und Krankheitsbildern am Knie des jungen Menschen; eine frühe Studie von Casteleyn et al. bezifferte die Häufigkeit für akute Patellaluxationen auf 2.44% aller Knieverletzungen. (Casteleyn and Handelberg, 1989). Das Durchschnittsalter einer akuten Patella Erstluxation liegt im Adoleszentenalter bei ungefähr 16 bis 21 Jahren. (Fithian et al., 2004; Sanders et al., 2018) Für Erstluxationen werden Inzidenzen von 7 pro 100 000 bei Erwachsenen bis 43 pro 100 000 bei Jugendlichen beschrieben, eine neuere Studie von Sanders et al. setzte die Inzidenz bei Jugendlichen bei akuten Luxationen sogar noch höher an: zwischen 14 und 18 Jahren sogar bei 147.7 pro 100 000. (Sanders et al., 2018) Über 70% der Luxationen ereignen sich während allgemeiner körperlicher Belastung bzw. beim Sport. (Atkin et al., 2000; Colvin and West, 2008; Fithian et al., 2004; Frosch et al., 2011)

Klinisch orientiert wird zwischen akut traumatischer Luxation, habitueller Luxation, Subluxation und permanenter Luxation unterschieden. (Imhoff et al., 2014)

Das Kräfteverhältnis lateral zu medial liegt bei ca. 60:40; daraus resultiert eine in den meisten Fällen nach lateral stattfindende Patellaluxation, welche beispielsweise durch ein direktes Trauma im Sinne eines Anpralls mit hoher Krafteinwirkung verursacht werden kann. Bei den häufiger ursächlichen Distorsionen ereignet sich die Luxation nachgewiesen während der frühen Beugung bei gleichzeitiger Außenrotation der Tibia und Kontraktion der Quadrizepsmuskulatur. (Dewan et al., 2020) Typischerweise, in bis zu 2/3 der Fälle, betrifft diese Form junge, aktive, männliche Patienten. (Atkin et al., 2000; Fithian et al., 2004; Stefancin and Parker, 2007)

Im Gegensatz dazu ist die chronisch habituelle Patellaluxation meistens ein atraumatisches Ereignis, wobei die Patella häufig schon im Rahmen einer Alltagsbewegung bzw. eines Bagatelltraumas erstluxiert. Größtenteils ist diese Form multifaktorieller, zumeist angeborener Genese. (Irger et al., 2020; Rhee et al., 2012; Schmeling, 2010)



Die prädisponierenden Faktoren sind hierbei vor allem für habituelle Luxationen überschneidend mit den o.g. Risikofaktoren der PFI. Auch Alter und Geschlecht spielen hierbei eine Rolle, da ein gehäuftes Auftreten eher bei jungen, gelenklaxen und zu Übergewicht neigenden Frauen beobachtet wurde. (Atkin et al., 2000; Fithian et al., 2004)

Eine akute, traumatische Luxation zeigt sich blickdiagnostisch. Druckschmerzen im MPFL-Bereich und Lateralisierungsschmerz sind wegweisende Untersuchungszeichen. (Imhoff et al., 2014) Durch starke Schmerzen, Funktionseinschränkung und Schwellung bedarf es oft einer lindernden Fremdreposition. (Irgler et al., 2020). Als spezifische Instabilitätstestungen sollten zur Beurteilung des MPFL-Anschlags der unten erläuterte Apprehension-Test und das J-sign durchgeführt werden. (Irgler et al., 2020) Es ist zu beachten, dass die Einschränkungen der aktiven und passiven Beweglichkeit meist nur kurzzeitig sind und direkt nach einem Luxationsereignis vorliegen. (Salonen et al., 2017). Bei Erstluxationen mit konservativer Behandlung traten laut Atkin et al. etwa 6 Monate nach Verletzung bei über 58% der Patienten Einschränkungen bei intensiveren Belastungen auf. Sportliche Aktivität auf niedrigerem Niveau als vor der Verletzung wurde nur von 69% der Patienten wieder aufgenommen. (Atkin et al., 2000)

Bei habituellen Luxationen sind vor allem Folgeluxationen meist weniger schmerzhaft und angeschwollen, sie reponieren sich häufiger spontan. (Colvin and West, 2008) In der Untersuchung zeigen sich unter anderem ein Unsicherheitsgefühl, giving-way Phänomene oder Krepitationsgeräusche im Knie. Auch hier kann das MPFL druckschmerzhaft sein. (Imhoff et al., 2014)

Während in der klinischen Untersuchung hauptsächlich geprüft werden kann, bei welchen Flexionsgraden eine Patellainstabilität auftritt, wird eine Bildgebung zur weiteren Evaluation standardmäßig eingesetzt. Primär bildgebend wird eine Röntgenaufnahme in drei Ebenen zum Ausschluss knöcherner Verletzungen und zur Ursachenanalyse angefertigt. Weitere Begleitverletzungen von Weichteilen und Knorpel und die Trochleamorphologie können mittels MRT Untersuchung evaluiert werden, gegebenenfalls wird hier auch eine Torsionsaufnahme nötig. (Imhoff et al., 2014; Irgler et al., 2020)

Relaxationsraten bei konservativer Therapie werden mit 15 - 49% angegeben, diese steigt je nach Prädispositionen und Therapieform auf bis zu 86%. (Arendt and Dejour, 2013; Imhoff et al., 2014; Maenpaa et al., 1997) Allgemein gilt, dass schwere Strukturverletzungen eher für eine intakte patellofemorale Gelenkanatomie sprechen, wohingegen weniger Kollateralverletzungen auftreten, wenn die Luxation ohne größeren Kraftaufwand abläuft. Dies ist bei multifaktorieller Genese der Luxation der Fall und dementsprechend mit einer schlechteren Prognose in Bezug auf Relaxationen verbunden. (Fithian et al., 2004; Frosch et al., 2011) Je häufiger die Patella luxiert, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit für erneute Luxationen. (Fithian et al., 2004; Frosch et al., 2011; Hohne et al., 2017; Salonen et al., 2017)

Als Begleitverletzung tritt bei Luxationen in bis zu 95% der Fälle ein Knorpelschaden auf. Nahezu immer ist die retropatellare Fläche – hierbei vor allem die mediale Facette und der Patellafirst - und zu 31% auch der femorale Knorpel betroffen. (Hohne et al.,

2017; Nomura et al., 2003; Salonen et al., 2017) Stefancin et al. beschrieben in ihrer Studie 24.3% osteochondrale Läsionen insbesondere bei Erstluxationen der Patella, weshalb bei der Bildgebung Wert auf die Suche eines Flakes gelegt werden sollte. (Stefancin and Parker, 2007) Des Weiteren können Schäden am VMO, Knochenmarködeme an Patella und Femur, Verletzungen des medialen kollateralen Ligaments und Meniskusschäden auftreten. (Elias et al., 2002)

Nahezu pathognomonisch kommt es als weitaus häufigste Begleiterscheinung der Luxation in über 90% aller lateralen Patellaluxationen zu einer Zerreißung des MPFL. (Burks et al., 1998; Hohne et al., 2017) Der mediale patellofemorale Ligamentkomplex besteht aus dem MPFL und dem medialen Retinaculum. Letzteres wirkt nur zu 5 - 10% stabilisierend nach lateral, es wird eher als medialer Reservestreckapparat angesehen und spielt somit eine untergeordnete Rolle. (Imhoff et al., 2014) Zusätzlich strahlen in über 80% der Fälle Fasern des MPFL in tiefer liegende Anteile des VMO ein und überlagern sich am proximalen Patellarand. (Placella et al., 2015) Das MPFL verläuft in der mittleren von insgesamt 3 Schichten der medialen Weichteilstrukturen vom medialen superoposterioren Teil des Femurepikondylus zur medialen Patellakante. Es können ein distales und ein proximales Bündel unterschieden werden. (Desio et al., 1998)

Ein Review von Placella et al. mit über 17 MPFL Studien an Kadaver-Knien ergab eine durchschnittliche Länge des Ligaments von 56.9 mm. Patellar inseriert das Band zum Großteil in den proximalen 2/3 des Patellarandes, wo es im Mittel 26.0 mm breit ist, wohingegen die femorale Insertionsstelle mit 12.7 mm schmaler ist. (Placella et al., 2015) Dies könnte ein relevanter Grund sein, warum die Rupturstelle in 70% der Fälle am femoralen Ansatz lokalisiert ist. (Burks et al., 1998) In Abbildung 1.2 sind wichtige Strukturen des Kniegelenks dargestellt.

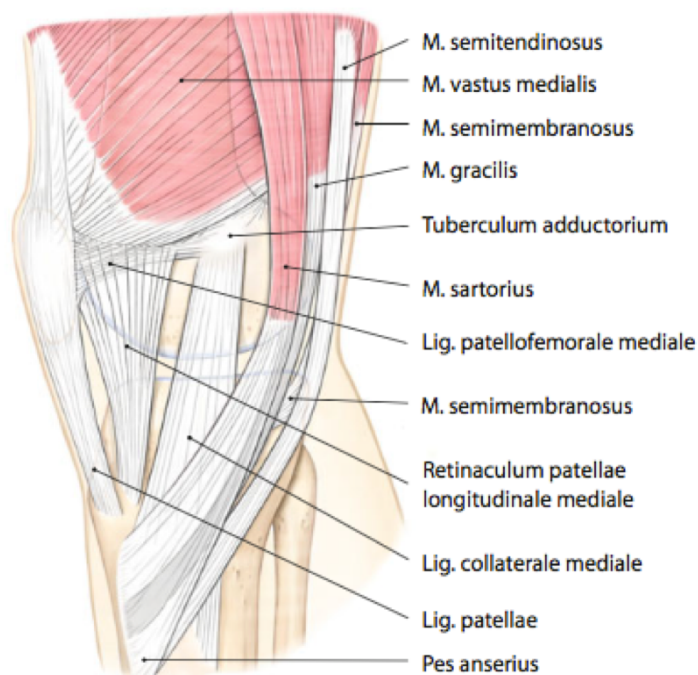


Abb. 1.2: Die Abbildung aus (Jagodzinski and Müller, 2016) zeigt eine mediale Seitenansicht des Kniegelenks mit dem Ligamentum patellofemorale mediale, welches vom medialen Patellarand bis zum medialen superoposterioren Teil des Femurepikondylus verläuft.

Die Wichtigkeit des MPFL mit seinen bedeutenden biomechanischen Eigenschaften wird bei der Studie von Hautamaa et al. mit dessen Durchtrennung deutlich: Es zeigen sich deutliche Alterationen der Patellaexkursionen mit Zunahme der Patellalateralisierung bei 30° Kniebeugung von 9 auf 14 mm. Die Untersuchung von Desio et al. zeigte, dass das MPFL 60% der medialisierenden passiven Kräfte gegenüber einer Patellalateralisierung während einer Knieflexion von 20° ausmachte. (Desio et al., 1998)

Patellaluxationen bzw. -instabilitäten sind somit häufig mit Pathologien des MPFLs verbunden, wobei hierbei insbesondere die MPFL-Ruptur eine äußerst bedeutende Läsion ist.

### 1.2.3 Knorpelphysiologie und Knorpelschäden

Der ausdifferenzierte Gelenkknorpel im Knie ist bradytroph und enthält weder Blutgefäße noch eine nervale Versorgung, weswegen die Ernährung über Diffusion aus der Synovia und zum geringen Teil aus dem subchondralen Knochen erfolgt. Dieser sog. hyaline Knorpel besteht nur zu rund 1 - 10% aus Knorpelzellen (Chondrozyten), welche die Extrazellulärmatrix produzieren. (Rudert and Wirth, 1998) Diese wiederum setzt sich mit bis zu 80% zum Großteil aus Wasser, zu 15 - 20% aus überwiegend Typ 2 Kollagenfasern und zu 3 - 5% aus Proteoglykanen (PG) zusammen. Letztgenannte sind Proteine mit sulfatierten

und carboxylierten Polysaccharideinheiten, sogenannte Glykosaminoglykan-Seitenketten (GAG). (Venn and Maroudas, 1977) Die Kollagene sorgen für Zugfestigkeit und Scherfestigkeit, während die Druck- bzw. Kompressionskräfte durch die PG aufgrund ihres hohen Wasserverbindungsvermögens gemindert werden. (Athanasίου et al., 1991; Fitzgerald et al., 2006)

Der Gelenkknorpel lässt sich in vier Zonen I-IV einteilen, welche sich maßgeblich durch unterschiedliche Anordnung der Kollagenfasern differenzieren lassen:

- Die superfizielle **Tangentialfaserzone I** (lamina splendens) beinhaltet flache Chondrozyten und einen hohen Kollagenfaseranteil mit parallel zur Gelenkfläche angeordneten Fibrillen, wohingegen nur wenige PG zu finden sind.
- In der **Übergangszone II** (Transitionalzone) steigt der PG-Gehalt an, sodass in der darunterliegenden
- **radiären Schicht III** die höchste PG-Konzentration bei gleichzeitig niedriger Wasserkonzentration vorzufinden ist. (Rudert and Wirth, 1998) Die Kollagenfibrillen besitzen in diesen beiden Schichten Ihren größten Durchmesser und liegen zur optimalen Druckverteilung ungeordnet bzw. zunehmend geordnet vor. (Matzat et al., 2013; Rudert and Wirth, 1998)
- Die unterste **Mineralsierungszone IV** stellt den Übergang zum Knochen dar, weswegen sich die Kollagenfasern dort rechtwinklig zur Knorpeloberfläche in Bündeln anordnen und somit den Knorpel im darunterliegenden Knochen verankern. (Rudert and Wirth, 1998)

Besonders die frühen Stadien der Knorpeldegeneration sind durch initial nur mäßigen Verlust der geordneten Kollagenstruktur, aber starker Verminderung der GAG-Seitenketten gekennzeichnet, wodurch sich nachweislich und messbar der Wassergehalt im Knorpelgewebe erhöht. (Arendt et al., 2016; Matzat et al., 2013) Schematisch sind die verschiedenen Stadien der OA in Abbildung 1.3 abgebildet.

Im Zusammenhang mit Knorpeldegeneration ist das Krankheitsbild der Arthrose zwingend zu nennen. Die Arthrose ist eine der häufigsten Gelenkerkrankungen weltweit und die Prävalenz der Knie-OA ist stetig zunehmend. (Lespasio et al., 2017) Prinzipiell kann jede Art von patellarem Trauma (Luxationen, stumpfe Traumata, Patellafrakturen) oder Fehlbelastung Ursache von Knorpelschäden an der Patellarrückfläche sein. (Arendt et al., 2016) Egal ob durch einmalige Verletzung oder wiederholte Mikrotraumen bei Fehlbelastungen entstanden, bedingen Knorpelverletzungen insbesondere unter hoher artikulärer Belastung eine schnelle Degeneration und sind ein Prädispositionsfaktor für eine langfristige Arthroseentwicklung. (Salonen et al., 2017; Spahn et al., 2016) Sobald der Prozess einmal begonnen hat, tendiert er zur Progression. (Chen et al., 1999; Spahn et al., 2016)

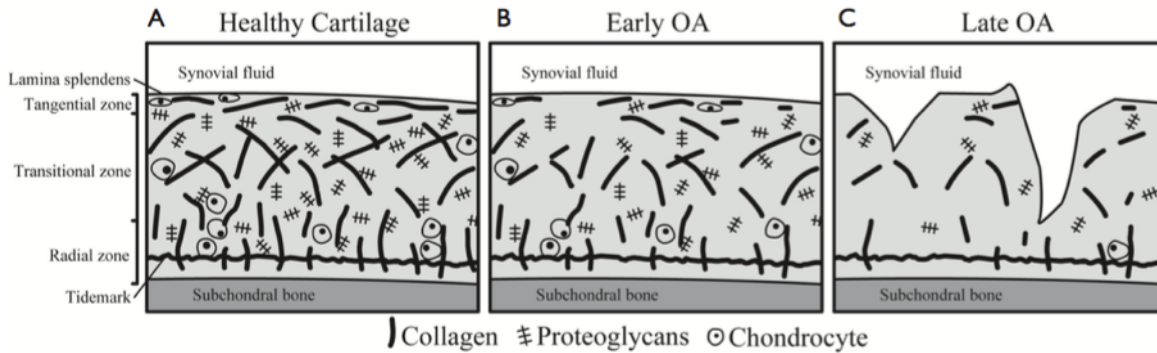


Abb. 1.3: Schematische Darstellung der Knorpelstruktur in verschiedenen Stadien. (A) bildet gesunden, hyalinen Knorpel mit geordneten, strukturierten Kollagenfasern und vielen PG ab. Bei (B) ist die veränderte Struktur bei früher OA mit verringerter Anzahl an PG und zunehmend geringerer Ordnung der Kollagenfasern dargestellt. Im Stadium der fortgeschrittenen OA (C) sind kaum mehr PG zu finden und es ist keine Ordnung der Kollagenfasern mehr zu erkennen. Oberflächlich zeigen sich Änderungen im Relief. (Matzatz et al., 2013)

Knorpelheilung ist mit der Heilung anderer Gewebe nicht vergleichbar. Aus seiner Avascularität, den unbeweglichen Knorpelzellen und deren äußerst limitierter Proliferationsneigung resultiert bei Schädigung eine nur sehr geringe Heilungstendenz. Unbehandelt regeneriert hyaliner Knorpel in fokalen Schäden mit faserknorpelartigem Gewebe aus Typ-1 Kollagen, häufig aber auch nur mit Bindegewebe als Ersatzgewebe. Diese Gewebetypen neigen wegen mechanischer Minderwertigkeit insbesondere unter der hohen Belastung im Patellofemoralgelenk zur schnellen Degeneration. (O'Driscoll, 1998) Knorpelschäden im Bereich der Patella sind zwar häufig, aber aufgrund der schwierigen Erreichbarkeit, der biologischen bradytrophischen Komposition des Knorpels und der vielschichtigen Biomechanik des patellofemorales Gelenks sehr komplex in der Therapie. Auf Therapiemöglichkeiten, auch in Kombination mit einer stabilisierenden Operation, welche bei Kombinationsverletzungen oder PFI empfohlen wird (Vasiliadis et al., 2011), soll im folgenden Abschnitt eingegangen werden.

## 1.3 Therapieoptionen

### 1.3.1 Allgemeine Therapie nach Patellaluxation

So vielfältig die Kombinationen und Auswirkungen der oben genannten Ätiologien der PFI mit resultierenden Luxationen sind, so vielfältig sind auch die Therapieverfahren. Grundsätzlich richtet sich die Wahl des geeigneten Operationsverfahrens nach der zugrundeliegenden Pathologie der PFI und kann aufgrund der multifaktoriellen Genese in bestimmten Fällen eine Kombination verschiedener Verfahren nach sich ziehen. Noch offene Wachstumsfugen und mögliche Knorpelschäden müssen ebenfalls berücksichtigt werden, Ziel ist die schmerzfreie Kniegelenksstabilisierung für optimale Funktionalität und langfristig auch eine Arthroseprävention. (Frosch et al., 2011; Sanchis-Alfonso, 2016)

Bis vor wenigen Jahren wurde ein konservatives therapeutisches Vorgehen vor allem nach traumatischen Erstluxationen und bei Patienten mit noch offenen Wachstumsfugen teilweise auch bei chronischer Instabilität empfohlen. Im Verlauf wurden hier Ausnahmen vor allem beim Vorliegen osteochondraler Verletzungen, bei substantiellen und palpablen Verletzungen der medialen Weichteilstrukturen, bei Reluxationen oder bei gescheiterter konservativer Therapie mit persistierender subjektiver Instabilität gemacht. (Stefancin and Parker, 2007)

Da nach konservativem Vorgehen oft nicht mehr das Ausgangsniveau der Sportfähigkeit erreicht werden konnte und langfristig das Risiko für eine Retropatellararthrose steigt (Salonen et al., 2017), sprechen Zimmerer et al. in ihrem Review von einem Paradigmenwechsel: Die Tendenz geht bei Vorliegen entsprechender Risikofaktoren hin zu frühen operativen Therapien, aber auch bei entsprechendem sportlichen Anspruch wird zunehmend schon bei Erstluxation operativ therapiert, da das Outcome hier den konservativen Therapien in vielen Belangen überlegen scheint. Nichtsdestotrotz wird eine individuelle, klinische Entscheidungsfindung unter Beachtung von Risikofaktoren und ursächlichen Instabilitätsfaktoren empfohlen. (Arendt and Dejour, 2013; Irger et al., 2020; Rhee et al., 2012; Sanchis-Alfonso, 2016; Xing et al., 2020)

Die Arbeiten von Irger et al. und Arendt et al. geben einen Überblick über die Operationsmöglichkeiten abhängig von bestimmten Voraussetzungen: Patienten mit bloßer Ruptur des medialen Bandapparates im Rahmen einer traumatischen Luxation, die sich noch im Wachstum befinden, können demnach von einer Naht oder Refixation profitieren. (Arendt and Dejour, 2013; Irger et al., 2020) Demgegenüber zeigt die anatomische MPFL-Rekonstruktion mit femoraler Bohrung sowohl beim jungen Patientengut als auch nach Schluss der Wachstumsfugen gute Ergebnisse mit geringerer Reluxationsrate. (Xing et al., 2020; Zimmerer et al., 2018). Auf diese aktuell weit verbreitete, als Goldstandard gewertete MPFL-Rekonstruktion, welche auch beim Patientengut unserer Studie mit größtenteils bereits geschlossenen Wachstumsfugen, verwendet wird, soll im nachfolgenden Kapitel genauer eingegangen werden.

Könnte durch entsprechende Bildgebung (MRT mit gegebenenfalls Torsionsaufnahme) zusätzlich ein Verdacht auf weitere Pathologien wie Achsabweichung, Malrotation oder höhergradige Dysplasie erhärtet werden, können beispielsweise folgende Operationen durchgeführt oder mit einer MPFL-Rekonstruktion kombiniert werden: Achskorrigierende Osteotomie, z.B. im Sinne einer hohen Tibiaosteotomie medial „closed wedge“ oder einer distalen Femurosteotomie lateral „open wedge“ in Kombination mit einer MPFL-Plastik, kommen bei deutlich valgischen Knien über  $5^\circ$  zur Anwendung. (Frings et al., 2018; Irger et al., 2020; Lee et al., 2018) Bei trochleärer Innentorsion durch eine vermehrte femorale Antetorsion zeigt beispielsweise eine derotierende distale Femurosteotomie gute Ergebnisse. (Imhoff et al., 2019)

Zu den operativen Therapiemethoden, um ein distales Malalignment zu adressieren, zählen Tuberositasversatz und Trochleoplastik, welche insbesondere bei anatomischen Abnormalitäten ab  $30^\circ$  Knieflexion in Kombination zu weichteiligen Stabilisierungen angewandt werden, da hier die knöcherne Anatomie Patella-führend ist. Bei Patella alta besteht zudem die Möglichkeit einer Tuberositasdistalisierung. (Arendt and Dejour, 2013)

### 1.3.2 Rekonstruktion des MPFL

Der Wiederherstellung des MPFL als zentrale Struktur, um einer Luxation in Streckstellung bis etwa  $20^\circ$  Beugung entgegen zu wirken, kommt eine große Bedeutung zu. (Amis et al., 2003; Desio et al., 1998) Neben den oben kurz genannten Methoden hat sich deshalb vor allem die Rekonstruktion als aktuell beste Technik bei Patellaluxation mit nachfolgender Instabilität bei niedriggradiger Trochleadysplasie erwiesen. Je höher der Grad einer gegebenenfalls zusätzlich zugrundeliegenden Trochleadysplasie ist, desto mehr stabilisierende Wirkung kann dem MPFL auch bei tieferen Beugegraden bis zu  $45^\circ$  zugeschrieben werden. (Amis et al., 2003) Seit der Entdeckung der Relevanz dieser Struktur hat sich die Rekonstruktion in den letzten 20 Jahren zum Goldstandard etabliert und bildet die Basis der modernen Instabilitätstherapie. (Frosch et al., 2011; Irger et al., 2020; Previtali et al., 2020; Sanchis-Alfonso, 2016; Schmeling, 2010; Zimmerer et al., 2018)

Allgemeine Ziele der MPFL Rekonstruktion sind gute Funktionalität und geringe Relaxationsraten bei gleichzeitig optimalen Spannungs- und Druckverhältnissen zur Arthroseprävention. Das Transplantat sollte höheren Zugkräften standhalten als das natürliche Band und trotzdem nur adäquat gespannt sein. (Sanchis-Alfonso, 2014)

Es sind verschiedene OP-Techniken bekannt, die in unterschiedlicher Ausführung angewandt werden. (Frosch et al., 2011; Nomura and Inoue, 2003) Für die Transplantatgewinnung wurden anfänglich eher künstliche Ligamente aus Polyester verwendet (Nomura and Inoue, 2003), im Verlauf kamen zunehmend die Semitendinosus-Sehne, die Quadrizeps-Sehne, der Adductor magnus oder die Gracilis-Sehne zur Anwendung, wie einige Reviews aufzählen. (Frosch et al., 2011; Migliorini et al., 2020; Rhee et al., 2012) Verfahren mit verlagerten oder gestielten Sehnen, aber auch Techniken mit freien Sehnentransplantaten, welche in nur einem Bündel (single-bundle) das Band rekonstruieren, können die Anatomie nicht exakt abbilden und können so zu vermehrtem Tilt, vermehrter Rotation oder unphy-

siologischen Belastungen im Patellofemoralgelenk führen, wie Schmelting in seinem Paper zusammenfasst. (Schmelting, 2010) So hat sich eine Rekonstruktion mit freien Grafts in Zweibündel-Technik (double-bundle) gegenüber der single-bundle-Technik als vorteilhafter erwiesen. (Migliorini et al., 2020; Schöttle et al., 2008a, 2010)

Die Fixierung des Transplantats sollte aus biomechanischen Gründen sowohl patellar als auch femoral an optimaler, anatomischer Stelle erfolgen, da beispielsweise eine nur 5mm zu proximal oder zu anterior gesetzte femorale Fixierung zu erhöhtem Druck im patellofemorale Gelenk führen kann. (Amis et al., 2003; Steensen et al., 2004) Inzwischen konzentriert sich die Auswahl angewandter Verfahren deshalb fast ausschließlich auf anatomische Rekonstruktionen, da nicht-anatomische Rekonstruktionen oder erhöhte Spannung mit einem höherem medialen patellofemorale Druck korrelieren. (Elias and Cosgarea, 2006) Dies stellt einen der schwierigsten, aber wichtigsten Aspekte der Rekonstruktionsoperation dar. (Amis et al., 2003; Servien et al., 2011) Verschiedene Studien haben sich mit dem Auffinden des korrekten radiologischen Insertionspunktes beschäftigt. LaPrade et al. orientiert sich am Tuberculum adductorium und lokalisiert den Punkt im Mittel 3.8 mm distal und 1.9 mm ventral dieser anatomischen Struktur. (LaPrade et al., 2007) Schöttle et al. haben den Punkt in einer Kadaverstudie auf einen Bereich 1.3 mm anterior der Verlängerungslinie der posterioren Femurkortikalis festgelegt, von welcher zwei Lote auf dieser Verlängerungslinie gebildet wurden: Das erste schnitt den Ursprung des posterioren medialen Femurkondylus, das zweite Lot orientierte sich am posterioren Punkt der Blumensaat'schen Linie. Der Insertionspunkt befand sich 2.5 mm distal zum ersten Lot und 3 mm proximal zum zweiten Lot, siehe Abbildung 1.4. (Schöttle et al., 2007)

Mountney et al. berichten in ihrer Studie von verschiedenen Zugfestigkeiten je nach Fixationstechnik: Sukzessive wurde zuerst eine Kesselnahrt am rupturierten MPFL durchgeführt, welche bei 37 N an der Nahtstelle selbst einriss. Die Zugfestigkeit eines Rinder-Strecksehentransplantates unter Verwendung einer antegraden Interferenzschraube in einem blinden Tunnel lag bei 126 N. Bei Verwendung einer von lateral eingebrachten Interferenzschraube, die das durch einen Tunnel gezogene Transplantat fixiert, lag sie sogar bei 195 N, und war damit nicht signifikant schwächer als das physiologische Band, welches als sehr dünne Struktur mit 209 N eine beachtenswert hohe Versagenskraft aufweist. (Burks et al., 1998; Mountney et al., 2005)

In der Weiterentwicklung der Rekonstruktionstechniken hat sich mit der beidseitigen Aperture-Technik eine Transplantat-Fixationsmethode etabliert, welche durch anatomische Transplantatfixierung mit einer Schraube direkt im Bohrloch sowohl an patellarer als auch an femoraler Seite gekennzeichnet ist. So wird gegenüber anderen anatomischen Rekonstruktionen erfolgreich versucht, die Anatomie noch genauer abzubilden und die Komplikationsrate möglichst gering zu halten, weswegen ein double-bundle Verfahren mit Aperture-Fixation auch bei Patienten dieser Studie zur Wiederherstellung der patellofemorale Stabilität verwendet wurde.



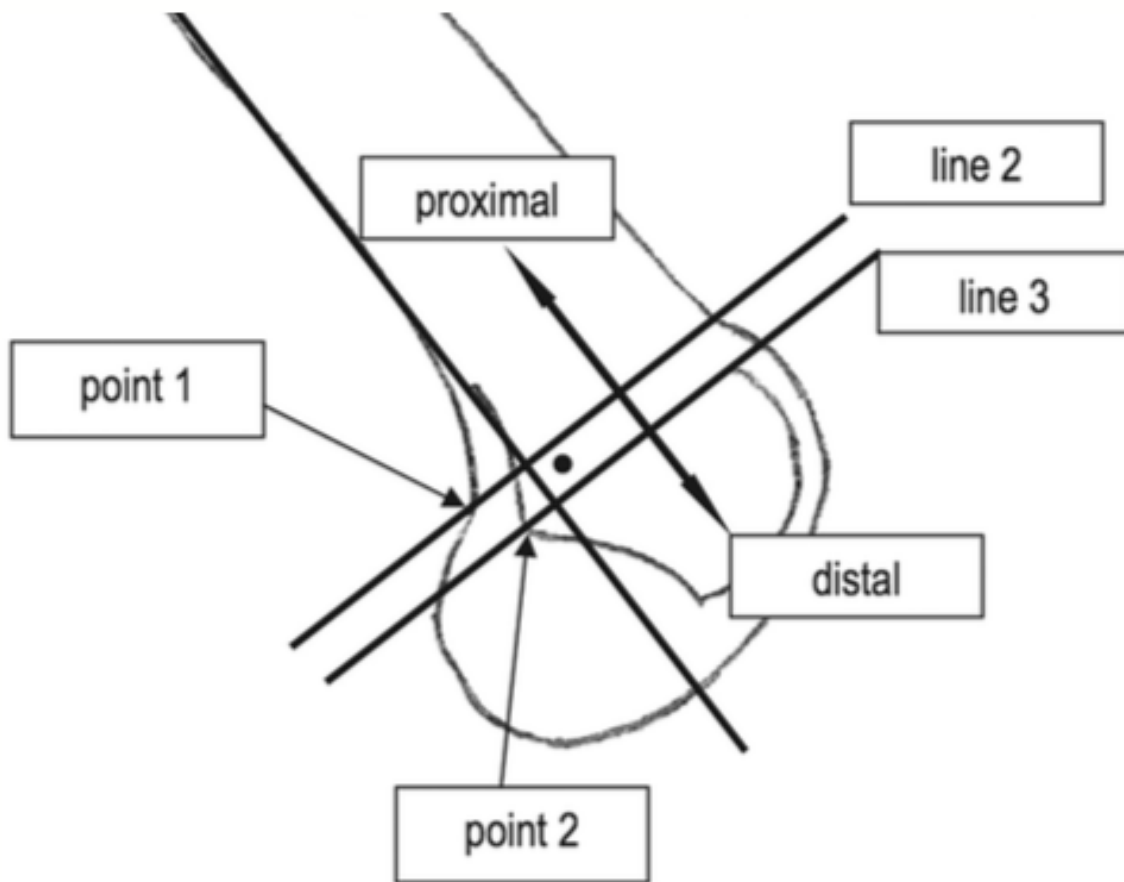


Abb. 1.4: Von proximal nach distal verläuft die Verlängerungslinie zur posterioren Femurkortikalis. Linie 2 entspricht einem Lot darauf durch den Ursprung des posterioren medialen Femurkondylus (Punkt 1), Linie 3 ist ebenfalls ein Lot darauf, welches durch den posterioren Punkt (Punkt 2) der Blumensaat'schen Linie verläuft. (Schöttle et al., 2007)

Zu Beginn der Operation wird über einen ca. 2 cm langen vertikalen Hautschnitt über dem Pes anserinus die Transplantatentnahme durchgeführt. Die Sartoriusfaszie wird entlang des Faserverlaufs gespalten und ermöglicht dadurch Sicht auf die Gracilis-Sehne. (Schöttle et al., 2008b) Diese wird angeschlungen, mit dem Sehnenstripper entnommen und am Nebentisch zu einem ca. 20 cm langem Transplantat mit mit resorbierbarem Faden armierten Sehnenenden präpariert. (Schöttle et al., 2008a, 2010)

Im Anschluss erfolgt eine diagnostische Arthroskopie, welche zur Evaluation von Knorpelschäden, Trochleadysplasiegrad, Band- und Meniskusverhältnissen und gegebenenfalls auch zur therapeutischen Entfernung von etwaigen Fragmenten genutzt werden kann.

Nun wird die MPFL-Plastik mit einer scharfen Inzision über der medialen Patellakante und Präparation auf die Synovia und medial Richtung femoralem MPFL-Ansatz zwischen zweiter und dritter Schicht fortgesetzt. Nach Setzen von zwei patellaren Bohrdrähten (der erste

proximal und der zweite ca. 15 - 20 mm distal davon) werden diese mit einem 4mm Kronenbohrer auf ca. 20 mm Tiefe überbohrt. (Schöttle et al., 2008a) Nun können die bereits armierten Transplantatenden eingezogen und mit 4.75 x 19 mm BioKomposit Swive-Lock-Ankern (Fa. Arthrex) etwas unter das Knochenniveau im überbohrten proximalen und distalen Loch fixiert werden. (Schöttle et al., 2010)

Es erfolgt das Aufsuchen des oben beschriebenen radiologischen femoralen Insertionspunktes zwischen Tuberculum adductorium und medialem Epicondylus mit Hilfe des Overholds, wobei ein streng seitlicher Strahlengang verwendet wird. (Schöttle et al., 2007, 2010) Nach vorheriger Inzision wird nun, unter Schutz des Nervus saphenus, stumpf gespreizt und ein K-Draht gesetzt, dessen Sitz nochmals mit dem Bildwandler im streng seitlichen Strahlengang überprüft wird. Dieser wird mit dem 6 mm Bohrer bis zur lateralen Kortikalis überbohrt und ein Shuttlefaden durchgezogen. Das Gracilis-Transplantat wird zuerst nach posterior und anschließend mittels Ösendraht über den Shuttlefaden nach lateral in den femoralen Kanal gezogen. Unter Ausrichten der Patella auf den lateralen Kondylus in 30° Flexion wird das Transplantat mit einer BioKomposit Interferenz Schraube fixiert, siehe Abbildung 1.5. Nach Überprüfung einer freien Beweglichkeit und Abwesenheit einer Luxationsmöglichkeit in Streckstellung können die Nähte von Retinaculum und Haut durchgeführt und die Operation beendet werden.

In der Nachbehandlung wird eine 4-Punkt Hartrahmenorthese für 6 Wochen mit erlaubtem Bewegungsausmaß 90°/0°/0° getragen, ab der 7. Woche gilt freie aktive Beweglichkeit. Das Knie wird in den ersten beiden Wochen mit 20kg teilbelastet, danach folgt eine schrittweise und schmerzadaptierte Aufbelastung.

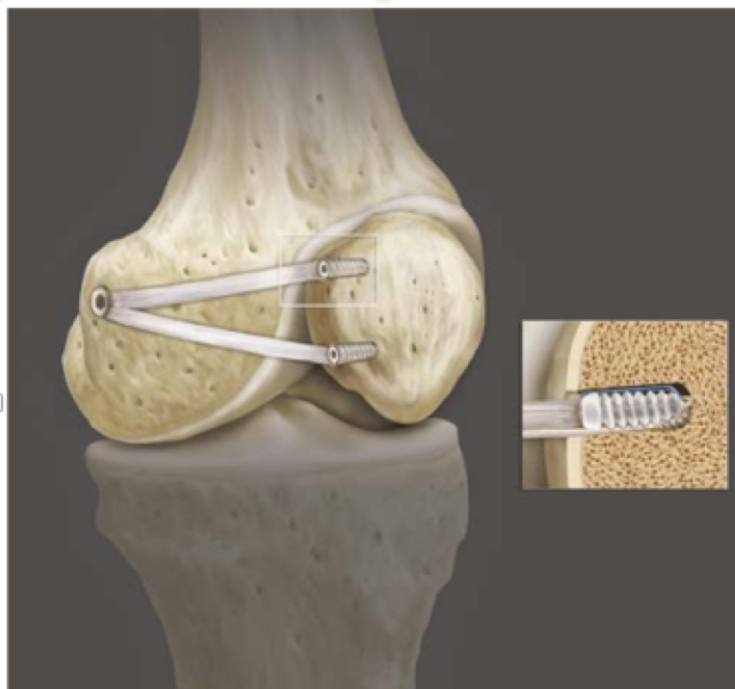


Abb. 1.5: Schematische Darstellung der MPFL-Rekonstruktion in Doppelbündel-Technik mit Aperturefixation mit SwiveLock/Bio-Interferenz-Schrauben aus (Schöttle et al., 2010)

### 1.3.3 Allgemeine Therapieoptionen bei fokalen Knorpelschäden

In der frühen Phase eines symptomatischen Knorpeldefektes können konservative Maßnahmen wie Schmerztherapie, Ultraschall, Ionophorese, Akupunktur oder Magnet- und Thermaltherapie hilfreich sein. (Nehrer and Minas, 2000) Während bei generalisierter Kniegelenksarthrose des älteren Menschen die Endoprothetik die bedeutendste Rolle spielt, liegen bei jungen Patienten hingegen meist fokale Defekte vor. Deswegen kommen hier, nicht zuletzt aufgrund der limitierten Haltbarkeit von Prothesen, vor allem Knorpelersatztherapien im Sinne von knorpelchirurgische Verfahren zur Anwendung. Bis heute wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt, deren Indikationen sich an verschiedenen Parametern orientieren.

Als derzeit zur Verfügung stehenden operativen Behandlungsoptionen sollten neben symptomatisch orientierten Therapien die einzeitigen, knochenmarkstimulierenden Techniken von den zweizeitigen Transplantationsverfahren unterschieden werden.

So können in einem ersten Schritt symptomatisch im Rahmen einer diagnostischen Arthroskopie durch Debridement (Glättung) und Lavage (Spülung) gleichzeitig therapeutisch den Heilungsprozess hemmende Entzündungsmediatoren und freie Extrazellulärmatrix symptomorientiert herausgespült werden. (Baumgaertner et al., 1990)

Darauf aufbauend lassen sich arthroskopisch auch knochenmarkstimulierende Verfahren

durchführen, welche die - wenn auch limitierte - Regenerationsfähigkeit des hyalinen Knorpels durch blutungsbedingt mobilisierte mesenchymale Stammzellen induzieren sollen. Die Eröffnung der subchondralen Markhöhle des Knochens erfolgt vor allem bei Knorpelschäden unter 4 cm<sup>2</sup> Durchmesser und kann durch verschiedene Techniken erfolgen. Zu nennen sind hier die 1959 entwickelte Pridie-Bohrung mit orthogradem Anbohren bis in den spongiosen Knochen oder die von Johnson 1986 entwickelte Abrasionarthroplastik, bei der die Knorpelschicht nur oberflächlich mit einem Shaver entfernt wird. (Johnson, 1986; Pridie, 1959) Ebenfalls dazugehörend und als Weiterentwicklung zu sehen ist die Mikrofrakturierung. (Steadman et al., 2003) Grundsätzlich entspricht das bei diesen Methoden gebildete Ersatzgewebe aber nicht den mechanischen und biochemischen Eigenschaften des Ursprungsgewebes und ist deshalb von minderwertiger Qualität. (O'Driscoll, 1998)

Zur Gruppe der Transplantationsverfahren werden mit der autologen Chondrozytentransplantation (ACT) und den osteochondralen Transplantationen Strategien mit Verwendung körpereigenen Gewebe- und Zellmaterials gezählt.

Bei den 1992 von Hangody eingeführten osteochondralen arthroskopischen Transplantationen, auch osteochondrales autologes Transfer System (OATS) genannt, wird ein Knorpel-Knochen-Zylinder aus einer gering belasteten Region im Kniegelenk entnommen. In Press-Fit Technik eingebracht, kann die Defektstelle so wieder mit hyalinem Knorpel aufgefüllt werden. Bis etwa 2-3 cm<sup>2</sup> Defektfläche kann auch eine Technik mit Implantation mehrerer kleiner Zylinder angewandt werden (Mosaikplastik), die in Summe einen größeren osteochondralen Defekt subtotal (bis zu 90% des Defekts) mit hyalinem Knorpel auffüllen können. (Hangody et al., 2001) Bei Defekten ab 3 cm<sup>2</sup> kann beispielsweise das seltener angewandte Mega-OATS Verfahren verwendet werden. (Imhoff et al., 1999) Zu beachten ist jedoch grundsätzlich die donor-site morobidity (Entnahmemorbidität) aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit bei großer Defektfläche und die Gefahr des HerauslöSENS aus dem Defektbett. (Hangody et al., 2001)

Die ACT wurde 1994 von Brittberg et al. eingeführt und seither konsequent weiterentwickelt. Sie verfolgt das Prinzip der autologen Transplantation mit in vitro kultivierten, durch enzymatische Freisetzung gewonnenen, körpereigenen Chondrozyten. (Brittberg et al., 1994) Diese Form der Knorpeltherapie kommt vor allem bei intaktem subchondralem Knochen an allen Lokalisationen im Knie bei Defekten ICRS Grad 3 und 4 mit Größen ab 3 - 4 cm<sup>2</sup> zum Einsatz, bei hohem sportlichen Anspruch wird die Methode schon ab einer Defektgröße von ca. 2.5 cm<sup>2</sup> empfohlen; eine obere Altersgrenze wurde bei etwa 50-55 Jahren definiert. (Niemeyer et al., 2016; Niethammer et al., 2014) Das zweizeitige Verfahren umfasst die Entnahme in einer ersten OP, anschließend für wenige Wochen die Kultivierung und Expansion auf einem Monolayer im Labor und die darauffolgende Replantation. Initial nach dem Erstbeschreiber wurden periostlappengedeckte Formen verwendet, bei denen die Suspension in der zweiten OP injiziert und von einem Periostlappen, meist aus der medialen Tibia, durch Naht und Fibrinkleber wasserdicht abgedeckt wurden. (Brittberg et al., 1994) Marlovits et al. betiteln dies als erste Generation der ACT, wohingegen mit einer doppelten Kollagenschicht gedeckelte Verfahren als zweite Generation der ACT bezeichnet

werden. (Marlovits et al., 2006) Je ähnlicher das Transplantat dem natürlichen hyalinen Knorpel ist, desto besser sind die biomechanischen Eigenschaften gegenüber faserknorpelartigem Reparaturgewebe. (Henderson et al., 2007)

Probleme bei ACT-Verfahren können unter anderem die progrediente Dedifferenzierung der Zellen, eine Delamination des Periostlappens mit frei flotierenden Chondrozyten, intraartikuläre Adhäsionen und hypertrophiebedingte Schmerzen sein. Weitere Ursachen für ein Versagen des Transplantats sollten zum einen bei den Prädispositionsfaktoren Alter, Geschlecht, Dauer der Symptome und Anzahl an Voroperationen und zum anderen bei Schäden nach Implantation wie Trauma, zu frühe Rückkehr zum Hochleistungssport oder Nichteinhaltung der Rehabilitationsempfehlungen gesucht werden. (Marlovits et al., 2006; Niemeyer et al., 2012; Vasiliadis et al., 2011; Zeifang et al., 2010)

### 1.3.4 Matrixassoziierte autologe Chondrozyten Transplantation

Zunehmend werden die Zellen bei den autologen Knorpeltransplantationsverfahren auf einem dreidimensionalen, resorbierbaren Trägermaterial (Matrix) kultiviert. Diese Technik beschreibt die Gruppe der matrixgekoppelten bzw. matrixassoziierten Chondrozytentransplantationen (MACT) und hat im deutschsprachigen Raum als dritte Generation der ACT die klassischen ACTs der ersten beiden Generationen weitgehend abgelöst. Zu unterscheiden sind hier kollagene Materialien tierischen Ursprungs von Hyaluronan und bestimmten Polymeren. (Marlovits et al., 2009)

Durch die Dreidimensionalität der Matrices soll eine gleichmäßige Verteilung der Chondrozyten mit besserer Zelladhäsion garantiert werden, außerdem wird durch die Kultivierung *in vitro* die frühzeitige Synthese der extrazellulären Matrix gefördert und eine frühe Dedifferenzierung verhindert. (Erggelet et al., 2003) Da die Gewinnung von Periostlappen nicht mehr nötig ist und die meisten Techniken hinsichtlich der Fixierung die bei ACT übliche Naht durch eine reine Fibrinkleber-Fixierung ersetzen, ergibt sich eine vereinfachte intraoperative Handhabung. Dies resultiert in einer Verkürzung der Operationszeit und der Möglichkeit einer arthroskopischen Anwendung. (Erggelet et al., 2003; Gaissmaier et al., 2006; Marlovits et al., 2006) Auch die Inzidenz an Gewebhypertrophien scheint signifikant geringer zu sein als bei vorherigen ACT-Generationen (Pietschmann et al., 2012), wohingegen als Nachteil die hohen Kosten zu nennen sind. (Niemeyer et al., 2007) Ist der subchondrale Knochen ebenfalls beschädigt, kann vor Implantation der Matrix eine ergänzenden Spongiosaplastik kombiniert werden. Dies sollte laut Herstellerangaben ab einer Defekttiefe von 7 mm erfolgen.

Nach gestellter Indikation werden via Arthroskopie im ersten Schritt der zweizeitigen Operation körpereigenen Knorpelzellen in 2 Knorpel-Knochen-Zylinder aus einem wenig belasteten, nicht tragenden Bereich des Gelenks, meist der interkondylären Notch, mit einer speziellen Hohlstanze entnommen. Die Biopsate werden in einer sterilen Nährlösung asserviert und zum Transport freigegeben. Die Zellen werden anschließend bei einem Hersteller (beim Patientengut dieser Studie war dies die Firma TETEC Tissue Engineering Technologies® AG Reutlingen, Deutschland) *ex vivo* zunächst für ca. 8 h enzymatisch freigesetzt.

Nach Erreichen einer ausreichenden Anzahl an Chondrozyten werden sie für 3 - 4 Wochen in ein Kollagen-I-Chondroitinsulfat basiertes, biphasisches Trägermaterial (NOVOCART 3D Membran <sup>®</sup>) eingesät und vermehrt. (Gaissmaier et al., 2005)

In der zweiten Operation wird der Knorpelschaden nach Eröffnung des Kniegelenks ausgemessen und der Defekt mit einer Stanze umschnitten, sodass an allen Rändern vitales Gewebe vorhanden ist. Nach Ausstanzen derselben Größe wird das Implantat mit Fibrinkleber passgenau eingebracht und mit einem 6.0 Monocryl-Faden in Einzelknopftechnik eingenäht. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass keine Höhendifferenz zwischen gesundem Knorpel und dem Patch besteht.

Der Rehabilitationsprozess nach der chirurgischen Versorgung der Knorpeldefekte ist ein entscheidender Teil der Behandlung. Es wird versucht, eine optimale Umgebung für den biologischen Heilungsprozess der Zellen zu schaffen. So wird in den ersten beiden Wochen nach Implantation eine Teilbelastung mit 20kg bei passiver Flexion/Extension von 60°/0°/0° erlaubt, bis zur 6. Postoperativen Woche kann die Flexion auf 90° gesteigert werden. Die Beübung erfolgt während dieser 6 Wochen auch für bis zu 8h täglich mit einer Kniegelenksstretkschiene (CPM). Ab der 7. Woche wird bei freier Beweglichkeit mit 20kg/Woche aufbelastet.

## 1.4 Kombinationsoperation MPFL mit MACT

Die Möglichkeit des kombinierten Verfahrens verschiedener Patella-Stabilisierungen mit Knorpeltherapie wurde bereits beschrieben und seit einiger Zeit mit guten Erfolgen durchgeführt. (Gigante et al., 2009; Trinh et al., 2013; Vasiliadis et al., 2011) Siebold et al. beschrieben gute Ergebnisse nach Spheroid-ACT in Kombination mit double-bundle Gracilis-Transplantat MPFL-Rekonstruktion. (Siebold et al., 2014)

Bei unserem Patientengut wurden in einer ersten OP die Knorpelzellen analog zur isolierten MACT entnommen und entsprechend im Labor vermehrt. In der zweiten OP 3 - 4 Wochen später wurde zunächst die Sehnen-Entnahme für die MPFL-Rekonstruktion durchgeführt, dann die Knorpelzellen reimplantiert und erst danach das MPFL fixiert, um einen optimalen Sitz kontrollieren zu können. Das Nachbehandlungsschema bestand aus sechswöchigem Tragen einer X-Lock-Schiene mit passiver Flexion/Extension von 90°/0°/0°. Während der ersten beiden postoperativen Woche war eine Teilbelastung mit 20 kg erlaubt, ab der dritten postoperativen Woche wurde mit 20 kg/Woche aufbelastet, wobei ab der siebten Woche nach ärztlicher Kontrolle eine freie aktive Beweglichkeit möglich war.

## 1.5 Magnetresonanztomographie zur Knorpelbildung

### 1.5.1 MR-Tomographie

Bei der MR-Bildgebung befindet sich der Patient im Hauptmagnetfeld des Tomographen. Die Schnittbilder werden in beliebiger Raumebene durch temporäre Applikation eines Hochfrequenzimpulses erzeugt. Die daraufhin emittierten Impulse des menschlichen Körpers werden mit körpfernahen, millisekundengenauen Spulen detektiert und zu einem 3D Bild rekonstruiert. Physiologischerweise besteht Gewebe unter anderem aus ungeordneten Wasserstoffatomen, die im Kern ein Proton mit positiver Ladung besitzen. Sie haben einen Eigendrehimpuls, den sogenannten Kernspin, welcher ein magnetisches, messbares Dipolmoment erzeugt. Da er weder gebremst noch beschleunigt werden kann, ist er immer gleich stark. Beim Anlegen des äußeren Magnetfeldes auf das Knie richten sich Protonen in einem Längsvektor in paralleler oder antiparalleler Richtung zum Magnetfeld unter Beibehaltung des Eigenspins aus. Die meisten Protonen nehmen die energetisch etwas günstigere Parallelposition ein, was sich in einer Längsmagnetisierung messen lässt.

Außerdem haben die Protonen im Körper die sogenannte Präzessionsbewegung, bei der ähnlich eines Kreisels Ausweichbewegungen durchgeführt werden. Diese Bewegungen haben im Magnetfeld eine charakteristische Larmorfrequenz, welche proportional zur Magnetfeldstärke ist. (Weishaupt et al., 2014) Wird nun ein kurzzeitiger Hochfrequenzimpuls in entsprechender Frequenz und Stärke senkrecht zum Längsvektor gesendet, überträgt sich seine Energie auf die Protonen (Resonanz), die sich daraufhin vermehrt antiparallel ausrichten und aus ihrer Längsmagnetisierung kippen. Durch gegenseitige Aufhebung wird der Längsvektor gleich null. Außerdem wird die kreiselförmige Präzessionsbewegung der Protonen synchronisiert (Phasenkohärenz) und die magnetischen Kräfte addiert, wodurch eine messbare Quermagnetisierung entsteht. (Reiser et al., 2017) Diese Aspekte können in Abbildung 1.6 gesehen werden.

Bei anschließenden Abstellen des Impulses kehren die Atome wieder in ihre Ausgangsposition zurück, was als Relaxation bezeichnet wird. Dabei sind die Längsrelaxation (Spin-Gitter-Wechselwirkung) und die Querrelaxation (Spin-Spin-Wechselwirkung) von Bedeutung, die gleichzeitig ablaufen und voneinander unabhängig sind: Der Längsvektor nimmt wieder zu und richtet sich dem äußeren Magnetfeld parallel, die longitudinale Relaxation von 63% der Protonen wird hierbei als T1 Zeit definiert. Diese gewebespezifische Zeitkonstante beträgt typischerweise zwischen 300 - 2000 ms. Ein weiterer messbarer Parameter betrifft den Rückgang der Quermagnetisierung durch Verlust der phasensynchronen Kreisbewegung: Als T2 Zeit bezeichnet man den Zeitpunkt, an dem 63% der Protonen in Querrichtung relaxiert sind (Schild, 1997). Sie beträgt typischerweise zwischen 30-150 ms. Neben unterschiedlichen Relaxationszeiten stellt somit auch der Gehalt an Wasserstoffatomen in den verschiedenen Gewebearten eine wesentliche Grundlage für den Bildkontrast dar.

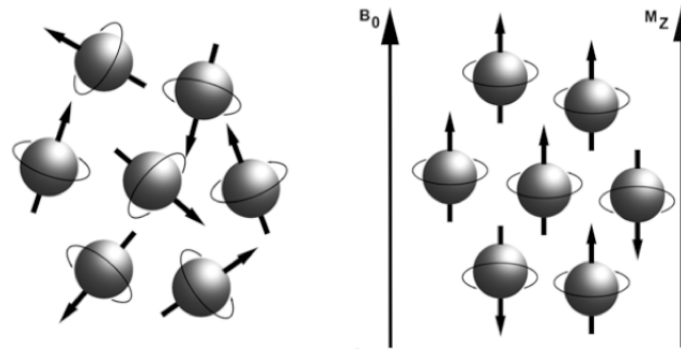


Abb. 1.6: Schematische Darstellung des Kernspins und der Magnetfeld-bedingten Ausrichtung parallel oder antiparallel während einer MRT-Untersuchung aus (Schild, 1997)

Eine Sequenz bezeichnet die Abfolge mehrerer Hochfrequenzimpulse, Repetitionszeit (TR) die Zeit zwischen zwei Stimulationen und Echozeit (TE) die Zeit zwischen Stimulation und Aufnahme des Signals. Diese Parameter bestimmen die jeweilige Wichtung des Bildes. Aufgrund der unterschiedlichen Relaxationszeiten verschiedener Gewebe lässt sich bei H<sub>2</sub>O-reichem Gewebe eine lange T<sub>1</sub>- und T<sub>2</sub>-Zeit messen, bei fettreichem Gewebe wiederum eine kurze T<sub>1</sub>-Zeit und eine lange T<sub>2</sub>-Zeit. Bei T<sub>1</sub>-gewichteten Bildern werden kurze TR-Zeiten <500ms und kurze TE-Zeiten angewandt, bei T<sub>2</sub>-gewichteten Bildern lange TR-Zeiten >1500 ms und lange TE-Zeiten. Bei sehr langen TR-Zeiten und TE-Zeiten, welche gleich null sind, wird der Einfluss von T<sub>1</sub> und T<sub>2</sub> minimal und es ergibt sich ein Protonendichte PD-gewichtetes Bild. Dies ist vor allem bei Gewebe mit hohem Wasseranteil relevant. (Reiser et al., 2017)

## 1.5.2 Knorpelbildung

Die MRT ist nicht nur ein exzellentes Diagnostikum bei ligamentären Knieverletzungen, sondern auch das bildgebende Verfahren der Wahl, um Gewebestrukturen wie den Knorpel des Kniegelenks sowohl in der Verletzungsdiagnostik als auch in der postoperativen Evaluation darzustellen. Ermöglicht wird dies durch einen relativ großen Kontrast zwischen Knorpel und den umgebenden Strukturen im Knie. Sie vereint nicht nur den Vorteil der besten Weichteildarstellung, sondern auch das Fehlen ionisierender Strahlung, Vorteile der Dreidimensionalität und die Möglichkeit, auch den subchondralen Knochen zu beurteilen, weswegen sie sich als überlegene Methode für die allgemeine Knorpelbildung gegenüber anderen bildgebenden Verfahren wie dem Röntgen oder der Computertomographie erwiesen hat. (Koster et al., 2011)

MRT-Bildgebung kann somit als die beste, nicht-invasive Alternative zum theoretischen Goldstandard in der Knorpeldarstellung, der Arthroskopie mit Biopsie, gesehen werden. Sowohl in der Früherkennung der OA, als auch der Evaluation des Knorpelschadens, insbesondere bei der therapielevanten Unterscheidung zwischen ICRS Grad 2 und 3, und



nach Knorpelersatztherapien bietet sie die beste Art der Bildgebung. Die Darstellung der tiefen Knorpelschichten und des darunterliegenden Knochens bietet die Erkennung von auf Knorpelschäden ICRS Grad 3 und 4 hinweisenden „bone bruises“, also Knochenödemen, als indirektes subchondrales Zeichen für einen darüberliegenden Defekt. (Guermazi et al., 2015; Liu et al., 2019; Matzat et al., 2013) Die Auflösungsqualität der Knorpeldarstellung ist hierbei mit der eines makrohistologischen Schnittpräparates vergleichbar. (Saadat et al., 2008)

Gerade in der Anfangsphase äußert sich eine Knorpelschädigung nicht unbedingt in Schmerzen oder anderen Symptomen und bleibt somit zunächst klinisch stumm. Um schon minimale, subtile Änderungen bereits im Frühstadium der Knorpelveränderungen zu erkennen, wurde die MRT-Technik auf neuere, quantitative Techniken erweitert. So bietet sich eine Möglichkeit, die biochemische Knorpelzusammensetzung direkt und indirekt als Biomarker noch besser zu evaluieren. (Eckstein and Wirth, 2011; Jungmann et al., 2014; Matzat et al., 2013; Trattinig et al., 2019)

In der muskuloskelettalen Radiologie werden vor allem turbo Spinecho (SE) Sequenzen in unterschiedlichen Wichtungen angewandt, sie haben den Vorteil schneller Acquisitionszeiten. Eine weitere Form ist die Multi Slice Multi Echo Sequenz (MSME), die zur Bildacquisition zu unterschiedlichen TE dient. Der erwünschte Effekt ist hier, selbst kleine transversale Magnetisierungen in PD- und T2-Wichtung als Kontrast sichtbar machen zu können. Um eine Reduktion des Fettsignals (fettgesättigt) und einen besseren Kontrast zwischen Knorpel und fetthaltigem Knochenmark zu erhalten, werden die Quermagnetisierungen des Fettsignals mittels Spoiler-Gradienten zerstört. Dieses Funktionsprinzip beruht auf den Frequenzunterschieden zwischen Wasser und Fett. (Weishaupt et al., 2014)

Über die Jahre haben sich diese Arten der Bildgebung in mehreren Studien als Standardmethode für die postoperative Evaluation des morphologischen Knorpelstatus nach Knorpelschäden und -therapien etabliert. (Baum et al., 2013; Domayer et al., 2008; Eckstein and Wirth, 2011; Gersing et al., 2020; Guermazi et al., 2015; Jungmann et al., 2014, 2019; Matzat et al., 2013; Rehnitz and Weber, 2015; Trattinig et al., 2019)

Einerseits soll hierbei eine morphologische, qualitative Evaluation der chondralen und ossären Integration erfolgen, welche bestenfalls vollständig und ohne hypertrophe Defektfüllung ist. Dabei ist die Ausbildung einer Grenzlamelle im Vergleich zu den benachbarten Knorpelregionen von besonderem Interesse, da sie als Anhalt für eine Wiederherstellung der biologisch ursprünglichen Schichten gilt. Während initial dort noch oft flüssigkeitsäquivalente Hyperintensitäten zu finden sind, sollten diese nach 12 - 24 Monaten verschwunden sein, da dies andernfalls ein Zeichen für Therapieversagen der Transplantation ist. T1-gewichtete Sequenzen ermöglichen hierbei die Darstellung der subchondralen Grenzlamelle und des Knochenmarks, wohingegen PD- oder T2-gewichtete Sequenzen Flüssigkeit bei intermediärem Knorpelsignal hell darstellen. (Raudner et al., 2017)

Andererseits können mittels quantitativen kernspintomografischen Sequenzen Dicke, Volumen und Fläche des Gelenkknorpels sowie die Komponenten Kollagenstruktur, Wasser-

gehalt und PG-Gehalt vermessen werden. So lassen sich auch bereits geringe pathologische Veränderungen des Knorpels frühzeitig erkennen, was bei morphologischen Standardsequenzen allein nicht möglich wäre. (Matzat et al., 2013; Zhang et al., 2013) Bei der Vergleichsstudie von Kijowski et al. stellte sich heraus, dass eine zusätzliche T2 Mapping Sequenz in einem Routine- Knie- MR- Protokoll die Sensitivität im Nachweis von Knorpelläsionen signifikant erhöht. (Kijowski et al., 2014) Die Addition mehrerer verschiedener quantitativer MRT Techniken, morphologischer und klinischer Auswertungen scheint sehr vielversprechend (Jungmann et al., 2014, 2019; Link and Li, 2018; Trattnig et al., 2019), was in dieser Studie verifiziert werden soll.

### 1.5.3 Quantitatives T2 Mapping

Als nicht-invasiver quantitativer Biomarker zur Identifizierung und Stratifizierung sowohl früher degenerativer Veränderungen des Gelenkknorpels als auch als Kontrolle nach Knorpelzelltherapien eignet sich die Anwendung des sogenannten T2 Mapping, zumeist mit SE oder MSME Sequenzen. (Baum et al., 2013; Dunn et al., 2004; Gersing et al., 2020; Kijowski et al., 2014; Trattnig et al., 2019)

Die Methode hilft, biochemische Veränderungen gerade in frühen Stadien zu erkennen und zu quantifizieren. Dies ermöglicht auch die Unterscheidung zwischen normalem hyalinen Gelenkknorpel und faserknorpelartigem Ersatzgewebe und macht Grenzen zwischen gesunden und geschädigtem Knorpel erkennbar. (Baum et al., 2012)

Grund hierfür sind vor allem zwei Tatsachen: Die T2-Zeit korreliert mit der Hydratation des Knorpels, also sowohl des freien als auch gebundenen Wassers. Außerdem hängen höhere T2 Werte mit dem Verlust an Kollagen und der Orientierung der Fibrillen zusammen, die bei destruiertem Knorpel unstrukturiert vorliegen. Bei geschädigtem oder degenerativem Knorpel steigt insbesondere die Mobilität der Wassermoleküle und somit die Signalintensität in den T2-Maps an. Zudem sind sie besonders für Veränderungen im Kollagengehalt sensitiv, schon bevor diese makroskopisch sichtbar werden. (Oei et al., 2018)

So ist die T2 Zeit zum einen im frühen OA Stadium und auch bei fokalen Läsionen erhöht. Bei Niethammer et al. wurde postuliert, dass das T2 Mapping die Transplantatreifung bei MACT nach 12-24 Monaten nachweisen kann (Niethammer et al., 2014) und bei Welsch et al., dass die T2-Werte im Ersatzgewebe etwa ein Jahr postoperativ denen im gesunden Knorpel ähnlich sind. (Welsch et al., 2008)

### 1.5.4 Quantitatives T1rho Mapping

Ein weiteres, schon seit über 20 Jahren angewandtes bildgebendes Knorpel evaluationsverfahren ist das T1rho Mapping mit Spin-Lock-Radiofrequenzimpulsen mit verschiedenen langen Pulszeiten (analog zu den verschiedenen Echozeiten beim T2 Mapping). Nach Vorbereitung der Magnetisierung mit Spin-Lock-Technik für optimalen T1-Kontrast wird unmittelbar danach eine elliptisch zentrierte, segmentierte, dreidimensionale spoiled gradient echo-Erfassung unter Verwendung transienter Signale durchgeführt (sensitivity encoding

for fast MRI (SENSE) spoiled gradient recalled (SPGR)). (Jungmann et al., 2012; Li et al., 2007; Rauscher et al., 2008)

Es ist im Gegensatz zum T2 Mapping aufwendiger und nicht an jedem Gerät verfügbar. Der Kontrast in einer T1rho Map spiegelt über die Relaxation der Magnetisierung im rotierenden Frame die Veränderung der extrazellulären Matrix im Knorpelgewebe wieder. Hierbei soll die Assoziation von Protonen mit PG und GAG im direkten Zusammenhang mit der T1rho Relaxationszeit stehen, sodass deren Verlust im geschädigten Knorpel zu erhöhten T1rho Werten vor allem am Rand der geschädigten Zone führt. (Duvvuri et al., 1997) Diese hat sich vor allem als guter Indikator für den Nachweis einer frühen OA erwiesen und ist dem T2 Mapping bei der Detektion hyalinen Knorpels dabei sogar überlegen. (Li et al., 2007; Rauscher et al., 2008) Die Schwere der OA korreliert in der Arbeit von Rauscher et al. mit der Höhe der T1rho Werte, hier gemessen an den Menisken. (Rauscher et al., 2008) Die beste Reproduzierbarkeit der Messmethode zeigte sich in der Arbeit von Mosher et al. für den in unserer Studie im Fokus stehenden retropatellaren Knorpel. (Mosher et al., 2011)

Zur Evaluation nach Knorpelersatztherapien am Knie wurden bisher Studien mit Mikrofrakturierung und Mosaikplastiken durchgeführt, welche von erhöhten T1rho Werten ein Jahr postoperativ berichten. (Holtzman et al., 2010; Theologis et al., 2012) In dieser Studie wird diese Bildgebungsmethode erstmals auch beim MACT Verfahren angewandt und evaluiert.



# Kapitel 2

## Fragestellung

Ziel der Studie war, das klinische und MR-bildgebende 2-Jahres Outcome dreier Patientengruppen, unterteilt nach OP-Methoden, darzustellen. Aus Recherchen der aktuellen Datenlage ergaben sich folgende Fragestellungen:

- Gibt es 2 Jahre postoperativ nach MPFL-Rekonstruktion mit retropatellarer MACT Anzeichen einer frühen Arthrose? Zeigen außerdem Patienten mit isolierter MPFL-Rekonstruktion oder isolierter retropatellarer MACT Anzeichen einer frühen Arthrose? Ist eine frühe Arthrose in den drei Patientengruppen 2 Jahre postoperativ mittels qualitativer und quantitativer MR-Bildgebung nachweisbar?
- Wie ist die klinische patellofemorale Stabilität in den verschiedenen Gruppen?
- Ist das Outcome nach kombinierter retropatellarer MACT und MPFL-Rekonstruktion vergleichbar zu den jeweiligen isolierten Verfahren?

Entsprechend lassen sich wiederum folgende Hypothesen aufstellen:

- Patienten aller Gruppen weisen in der quantitativen MR-Bildgebung mittels T2- und T1rho Relaxationszeit-Messungen eine frühe Knorpeldegeneration auf, zeigen jedoch morphologisch keine signifikante Progredienz gegenüber der präoperativen MR Voruntersuchung
- Patienten aller Gruppen zeigen zufriedenstellende klinische Ergebnisse und eine gute klinische patellofemorale Stabilität ohne signifikante Unterschiede
- Patienten mit isolierter MACT oder MPFL-Rekonstruktion zeigen ein besseres cross-sectionales Outcome als solche mit kombinierter Operation. Es zeigt sich morphologisch kein signifikanter Unterschied des Knorpeltransplantates

Diese Arbeit soll helfen, die Arthrosevorbeugung für Patienten mit Knorpelschäden an der Patella zu optimieren. Sie soll zeigen, dass alle Gruppen ein klinisch zufriedenstellendes

Ergebnis erreichen und Ihre Alltags- und Sportfähigkeiten nicht wesentlich eingeschränkt werden. Darüber hinaus soll dargelegt werden, dass eine Kombinationsoperation tendenziell schlechtere Ergebnisse zeigt als jeweils die isolierten Operationen. Dies soll eine bessere Patientenaufklärung erwirken, um auf das zu erwartende Outcome hinweisen zu können und dabei gegebenenfalls eine strengere Indikationsstellung und bessere Patientenbehandlung erreichen zu können.

# Kapitel 3

## Material

### 3.1 Studienaufbau

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine deskriptive Studie, die monozentrisch am Klinikum rechts der Isar der TU München durchgeführt wurde. Sie wurde crosssektional mit klinisch-morphologischem Follow-Up design. Die Studie wurde durch die Ethikkommission der TUM mit dem Zeichen 174/15 genehmigt.

Es wurden sowohl subjektive, klinisch-objektive als auch magnetresonanztomographische prä- und postoperative Ergebnisse ausgewertet.

Die Patienten wurden telefonisch oder schriftlich eingeladen, an der Studie teilzunehmen. Sie wurden ausführlich über Ablauf und Ziel der Studie informiert. Nach Erteilung der Einverständnis zur Teilnahme an der Studie durch den Patienten erfolgte die Terminierung einer Nachuntersuchung in Abstimmung mit dem Institut für Radiologie am Klinikum rechts der Isar. Den Patienten wurden die Fragebögen zugeschickt, welche sie schon vorab ausfüllen konnten. Des Weiteren wurden die Patienten gebeten, präoperative MR-Aufnahmen für unsere Auswertung zur Verfügung zu stellen. Zum Nachuntersuchungstermin wurden die Fragebögen dann nochmals besprochen, offene Fragen geklärt und auf vollständige Angaben geprüft. Darüber hinaus fand eine klinische Untersuchung gemäß dem Formblatt des ICRS statt. Es erfolgte eine Aufklärung über die MR-Untersuchung mit Ablauf und Risiken und die Patienten unterschrieben den standardisierten MRT-Aufklärungsbogen der TUM. Im Anschluss wurde eine bilaterale MRT-Untersuchung zur Evaluation des retropatellaren Transplantates und des ipsilateralen Gelenkknorpels sowie zur morphologischen Beurteilung der gesamten Knieinnenstrukturen durchgeführt.

### 3.2 Ein- und Ausschlusskriterien

Das Patientenkollektiv wurde gemäß folgender Ein- und Ausschlusskriterien erstellt:

Einschlusskriterien:

- Gruppe 1 und 2: Patienten mit akutem oder chronischem Knorpelschaden retropatellar, welcher mittels MACT therapiert wurde

- Gruppe 1 und 3: Patienten mit akuter oder chronischer PFI, welche mittels Rekonstruktion des MPFL therapiert wurde
- Alter: 14-45 Jahre (zum Zeitpunkt der Operation)
- OP: Zwischen 09/12 und 01/16

Ausschlusskriterien:

- Begleiterkrankungen aus dem rheumatischen Formenkreis, Diabetes mellitus, Polyneuropathie u.ä.
- Voroperationen, Begleit- oder Anschlussoperationen, welche aufgrund Ihrer Komplexität die Bewertung der entsprechenden OP beeinflussen, wie z.B. Osteotomien, Trochlea-Plastiken, Bandrekonstruktionen, Meniskusnähte und -resektionen, weitere Knorpeltherapien im selben Kompartiment
- Kürzliche Durchführung einer stabilisierenden oder knorpelchirurgischen Operation der Gegenseite
- MR Kontraindikationen (z.B. Schwangerschaft, Artefakt bildende Prothesen, ferromagnetische Implantate/Splitter, Herzschrittmacher, Tiefenhirnstimulator, Klaustrophobie)

### 3.3 Patientenkollektiv und Gruppeneinteilung

Im Zeitraum von August 2015 bis einschließlich November 2017 wurden konsekutiv Daten von Patienten gesammelt, die wegen Dysfunktionen des patellofemorales Gelenkes behandelt wurden. Aus diesem Patientengut wurden anhand des Picture Archiving Communication System (PACS, Easy Vision, Philips, Best, Netherlands) und aus den Patientenlisten der Hersteller der Knorpelzellmatrices Männer und Frauen ausgewählt, die zwischen September 2012 und Januar 2016 mit einer Rekonstruktion des MPFL und/oder einer MACT behandelt wurden. Sie wurden auf Erfüllung oben genannter Ein- und Ausschlusskriterien überprüft.

Insgesamt waren im genannten Zeitraum in der Sportorthopädie des Klinikums rechts der Isar ca. 750 entsprechende Patienten vorstellig. Dieses Patientengut war zunächst heterogen mit Erst- und Rezidivluxationen, Revisionsoperationen sowie Begleitverletzungen unterschiedlicher Komplexität. Unter Beachtung der oben genannten Ausschlusskriterien konnten 215 Patienten eingeschlossen werden. Aufgrund von Non-Compliance sowie Unerreichbarkeit (Terminschwierigkeiten, im Ausland lebend oder zu weite Anreise, persönliche Gründe) von Patienten wurden insgesamt 68 Patienten telefonisch erfolgreich kontaktiert, siehe Abbildung 3.1. Diese erklärten sich bereit, an der Studie teilzunehmen und zur Nachuntersuchung zum Klinikum rechts der Isar zu kommen. Daraus wurden entsprechend die in Abbildung 3.2 gezeigten Gruppen gebildet.



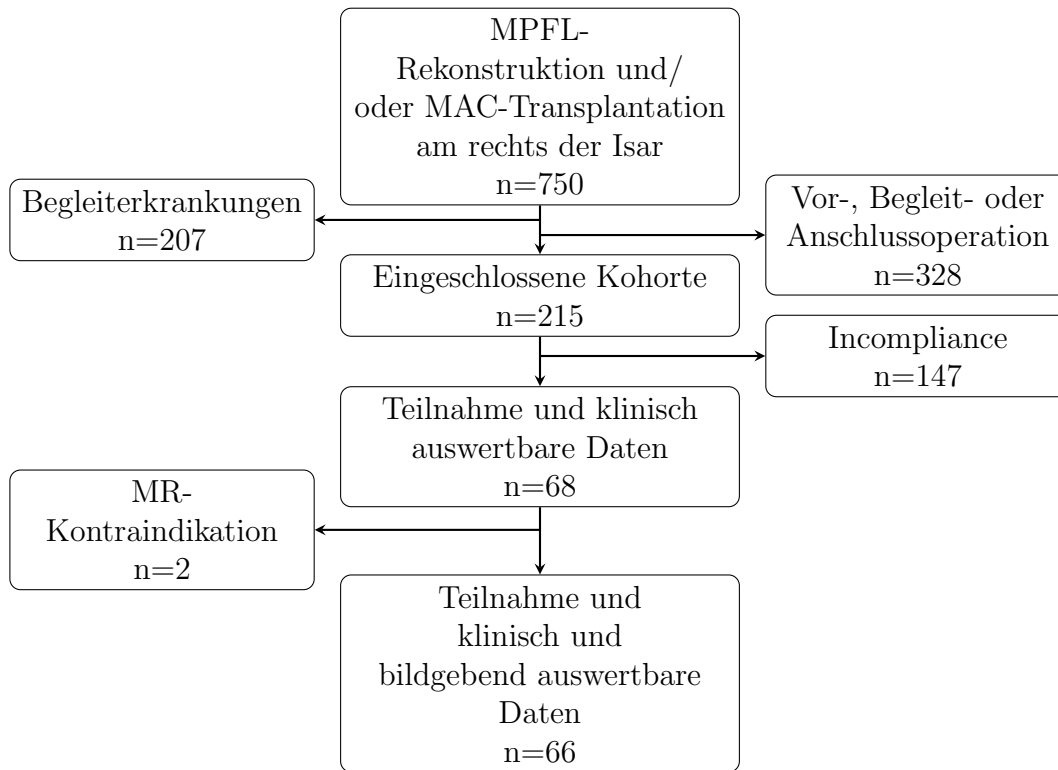


Abb. 3.1: Flowchart Patientenauswahl

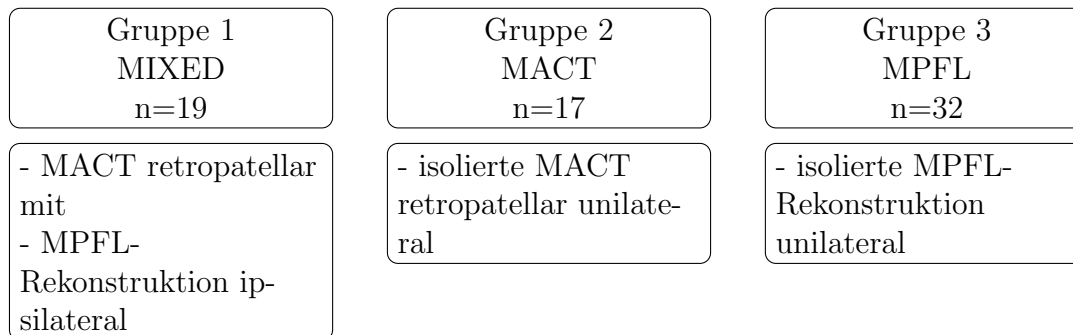


Abb. 3.2: Gruppenbildung

### 3.4 Nachuntersuchungszeitraum

Der Zeitraum zwischen OP und unseren Nachuntersuchungen sollte laut Studienplanung 2 Jahre betragen. Aus organisatorischen Gründen wurden einzelne Patienten erst nach etwas längerer oder teilweise kürzerer Latenz nachuntersucht. Im Gesamtkollektiv lag das Follow-Up bei 27.9 Monaten (range 15 - 63, SD  $\pm$  9.1), bei Gruppe 1 bei 25.2 Monaten (range 16 - 33, SD  $\pm$  4.7), bei Gruppe 2 bei 31.1 Monaten (range 15 - 63, SD  $\pm$  15.4) und

bei Gruppe 3 bei 27.7 Monaten (range 20 - 43, SD  $\pm$  5.8).

### **3.5 Indikation der jeweiligen Operationstechniken**

Die Indikation wurde gemäß der jeweils aktuellen Leitlinie je nach Verletzungsmuster für eine der oben dargestellten OP-Methode gestellt und die Patienten entsprechend aufgeklärt. Nach fristgerechter Unterschrift wurde die Operation in der Abteilung für Sportorthopädie des Klinikums rechts der Isar durchgeführt. Es handelte sich stets um MPFL-Rekonstruktionen; MPFL-Refixationen wurden von unserer Studie ausgeschlossen. Die Indikation zur MACT galt ab einer Defektgröße von 1.5 cm<sup>2</sup> bis 6 cm<sup>2</sup> und ab einem ICRS Grad 3.

Die postoperative Nachbehandlung erfolgte bei allen Methoden entsprechend dem bereits präoperativ festgelegten und oben erläuterten Procedere. Die entnommenen Zellen der MACT Gruppe wurden stets nach Vorgaben der Hersteller und deren Verfahrensweisen kultiviert.

# Kapitel 4

## Methoden

Die gesammelten Daten wurden in Exceltabellen anonymisiert aufbereitet. Der Zeitpunkt  $t_0$  bedeutete eine retrospektive Betrachtung des Zustandes vor Verletzung bzw. bei chronischen Beschwerden (chronische PFI bzw. chronischer Knorpelschaden) entsprach  $t_0$  einem Zeitpunkt vor Symptombeginn. Der Zeitpunkt  $t_1$  bezog sich jeweils auf einen Zeitpunkt nach Verletzung bzw. Symptombeginn, also kurz vor der Operation. Der Zeitpunkt  $t_2$  betrachtete den aktuellen Zustand zum Zeitpunkt unserer Nachuntersuchung.

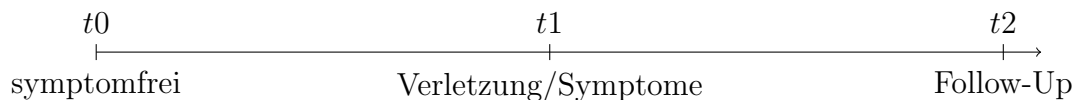


Abb. 4.1: Zeitstrahl

### 4.1 Subjektive Fragebögen

Zur Beurteilung noch bestehender Einschränkungen durch die Knieverletzungen und zur Einschätzung der Zufriedenheit des Outcomes der jeweiligen Operation füllten die Patienten international anerkannte Fragebögen aus. Die Auswertung erfolgt allgemein nach primären (Cincinnati Knee Rating Scale, Kujala-Score, KOOS Fragebogen und quantitative und morphologische MR Evaluation, objektiver IKDC) und sekundären Zielkriterien (subjektiver IKDC, Lysholm- und Tegner-Fragebogen).

Die komplette Mappe aller Fragebögen ist dieser Arbeit angehängt.

#### 4.1.1 Anamnesebogen mit Aktivitäts- und Funktionslevel

Neben allgemeinen Fragen zu demographischen Daten (Alter, Größe, Gewicht, Nikotinaabus) wurde in Anlehnung an die Fragen des Formblattes 1 des IKDC 2000 Fragebogens eine orthopädisch versierte Anamnese durchgeführt. Zusätzlich zu Begleitpathologien und

relevanten Begleit- und Folgeoperationen ipsi- sowie kontralateral wurde die Befragung vor allem auf Anzahl der Luxationen und Reluxationen fokussiert.

Außerdem wurde eine Einstufung zum sportlichen Aktivitätslevel und dem allgemeinen Funktionslevel zum Zeitpunkt t0, t1 und t2 erbeten. Die Stufen wurden gemäß Tabelle 4.1 codiert:

Tab. 4.1: Aktivitätslevel und Funktionslevel

	<b>Aktivitätslevel</b>	<b>Funktionslevel</b>
1	Hochleistungssport	Ich kann mit meinem Knie jede Tätigkeit ausüben, die ich will
2	regelmäßige sportliche Aktivität	Ich kann mit meinem Knie fast jede Tätigkeit ausüben, die ich will
3	gelegentliche sportliche Aktivität	Ich bin eingeschränkt und es gibt viele Dinge, die ich gerne tun würde, aber mein Kniegelenk lässt dies nicht zu
4	keine wesentliche sportliche Aktivität möglich	Ich bin sehr eingeschränkt und kann fast nichts ohne starke Schmerzen und Behinderung tun

#### 4.1.2 Numerische Rankingskala zur Funktionsbestimmung

In Anlehnung an die unter anderem in der Schmerzmedizin häufig verwendete numerische Schmerzskala wurden die Patienten gebeten, den Funktionsstatus Ihres Knies aus dem Gedächtnis vor Symptombeginn (t0) und aktuell (t2) anhand einer numerischen Rankingskala zu beschreiben. In unserer Abstufung entsprachen 0 Punkte einer „Unfähigkeit, alltägliche Aktivitäten auszuüben“ und der Maximalwert von 10 Punkten „Keiner Einschränkung“. Dies ermöglichte einen orientierenden Überblick des funktionalen Erfolgs der einzelnen Eingriffe. Eine Abbildung der Skala ist im Anhang zu finden.

#### 4.1.3 Cincinnati Knee Rating Scale

Der Cincinnati Score geht auf die Arbeit von Noyes et al. zurück und eruiert die Sportfähigkeit nach einer Knie OP. Er misst Sportintensität, fragt bei Änderungen der sportlichen Aktivität nach entsprechenden Gründen und detektiert Einschränkungen in allgemeinen Fragen, ohne sich hierbei auf eine Selektion einzelner Sportarten festzulegen. (Noyes et al., 1989) Wir verwendeten für unsere Patienten den modifizierten Cincinnati Score mit einer Overall Rating Scale nach Barber et al., welcher dort erstmals für ein Patientenkollektiv zum 3-Jahres Follow-Up nach Rupturen des vorderen Kreuzbandes angewandt wurde. Dieser Score nahm zusätzlich eine subjektive Einschätzung von Schmerz, Erguss, Knieschwäche

sowie Instabilität in der Abstufung exzellent, gut, befriedigend und schwach mit auf. Bei der funktionellen Bewertung wurden sowohl Alltagsaktivitäten als auch sportliche Aktivitäten bewertet. Aus der körperlichen Untersuchung gingen Punktwerte für Erguss, Bewegungsumfang, Krepitationen und Instabilitätszeichen in den Gesamtscore ein. Die MRT Bilder lieferten die Werte für die Kategorie Bildgebung. Zuletzt wurden aus dem Single-Leg-Hop Test die relativen Unterschiede zwischen ipsi- und kontralateralem Knie ausgewertet. Für die sechs Bereiche, die in dieser Arbeit bewertet wurden, konnten maximal 100 Punkte vergeben werden. (Barber-Westin et al., 1999)

#### 4.1.4 Kujala Score

Der Kujala Score wurde 1993 von Kujala et al. entwickelt, um speziell Schmerzen im vorderen Kompartiment des Knies unabhängig der Ätiologie zu adressieren. So erfragte der Score u.a. besonders belastende Aktivitäten wie langes Sitzen oder Treppensteigen. Auch in diesem Score konnten bei 13 Fragen maximal 100 Punkte erreicht werden. (Kujala, Jaakkola et al. 1993) Inzwischen wurde auch die hier verwendete deutsche Version validiert. (Dammerer et al., 2018)

#### 4.1.5 KOOS Score

Der Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS), welcher als Erweiterung aus dem Western Onatrio and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC) entstanden ist, wurde speziell für jüngere Patienten mit Bandverletzungen und posttraumatischer Arthrose entwickelt. Seine fünf multidimensionalen Bewertungsgruppen können auch jeweils einzeln betrachtet werden. In der Kategorie Symptome (S) wurden 7, bei Schmerzen (P) 9, bei Alltagsfunktionalität (A) 17, bei Sport- und Freizeit (SP) 20 und bei kniegelechtsassoziierter Lebensqualität (Q) 16 Fragen gestellt. Die insgesamt 168 Punkte wurden prozentual auf 100 gerechnet ausgewertet.

Sowohl die Originalversion von Roos et al. als auch die deutschsprachige Version ist validiert. (Kessler et al., 2003; Roos et al., 1998)

#### 4.1.6 IKDC subjektiver Fragebogen

Hefti et al. veröffentlichten einen Standardevaluationsbogen zur Vergleichbarkeit des Kniestatus verschiedener Patienten. (Hefti and Müller, 1993) Dieser wurde vom 1987 gegründeten „International Knee Documentation Committee“ (IKDC) und in weiterer Entwicklung zum IKDC 2000 Score entwickelt. Dieser besteht aus sechs Formblättern. Der bei unserer Studie verwendete subjektive Teil (Formblatt 3) beinhaltet die Themen Symptome, Schmerz, sportliche Betätigung und Kniefunktion.

Die Fragen, welche auch zum Download auf der Internetseite des ICRS (International Cartilage Repair Society) erhältlich sind, wurden für die Patienten ins Deutsche übersetzt. (ICRS, 2000))

Es wurde nachgewiesen, dass dieser Test eine gute Reliabilität und Validität hat und die

Untergruppen gut in einem Ergebniswert zusammengefasst werden können. Somit war er für den Vergleich verschiedener Knieverletzungen geeignet. (Irrgang et al., 2001)

Die Auswertung wurde entsprechend der Vorgaben des ICRS in numerische Werte übersetzt. So erhielten die Antworten auf die einzelnen Fragen einen Punktwert, wobei 1 die niedrigste Funktionsstufe bzw. höchste Symptomstufe darstellte. Zur Ermittlung des Gesamtergebnisses wurden die Punkte addiert und dann zu einer Skala mit Werten von 0 - 100 Punkten gemäß folgendem Schema umgeformt, was im Wesentlichen einer prozentualen Umrechnung entsprach:

$$\frac{\text{Absoluter Wert} - \text{Minimal mögliche Punktzahl}}{\text{Maximale Punktzahl} - \text{Minimal mögliche Punktzahl}} * 100 \quad (4.1)$$

Dadurch konnten die Ergebnisse verschiedener Patienten auch verglichen werden, wenn einzelne Fragen nicht beantwortet wurden.

#### 4.1.7 Lysholm(-Gillquist) Fragebogen und Tegner(-Lysholm) Aktivitätsindex

Beim Lysholm-Gillquist Score handelte es sich um einen Fragebogen zur Bewertung der Alltagsfunktionalität nach Bandverletzungen im Knie. Der Tegner-Lysholm Score ergänzte diesen als Aktivitätsindex. Um eine adäquate Beurteilung der Kniefunktion nach Bandverletzung mit guter Reliabilität erreichen zu können, wurde empfohlen, beide Scores zusammen zu verwenden. (Lysholm and Tegner, 2007)

Die in dieser Arbeit verwendete, übersetzte und validierte Form basiert auf dem ursprünglichen Lysholm Scores und war vor allem zur Detektion von Knieinstabilitäten geeignet. (Lysholm and Gillquist, 1982) Er besteht aus acht subjektiven Fragen zu den Themen Hinken, Gehhilfe, Treppensteigen, Hockstellung, Knieunsicherheit, Schmerzen, Schwellung und Muskelschwäche. Die Punkte wurden innerhalb der verschiedenen Kategorien je nach Leistungsstufe mit unterschiedlichen Maximalwerten vergeben, wobei sich die höchste Punktzahl jeweils der Kniefunktion des Normalkollektivs annäherte. In Summe aller Gruppen ergab sich ein Gesamtscore zwischen null und 100 Punkten. (Wirth et al., 2011)

Um das Aktivitätslevel nach der jeweiligen Operation zu vergleichen, wurde der Tegner-Aktivitätsindex zur postoperativen Sportfähigkeit erhoben. (Tegner and Lysholm, 1985) In der hier verwendeten deutschen, modifizierten und validierten Version ordneten sich die Patienten in eine Aktivitätsstufe zwischen 0 (Arbeitsunfähigkeit/Gehen eingeschränkt möglich) und 10 (Wettkampfsport auf nationaler/internationaler Ebene möglich) ein. (Wirth et al., 2013)

## 4.2 Klinische Untersuchung

### 4.2.1 Objektiver IKDC 2000

Während der klinischen Untersuchung wurden die Patienten nach Vorlage des „Formblatt 6 des ICRS Clinical Cartilage Injury Evaluation Package“, dem objektiven Teil des IKDC 2000, beurteilt (siehe Anhang). Zu Beginn wurden allgemeine Laxizität, Patellastellung, inspektorische Beinachse und das Bewegungsausmaß („range of motion“ ROM) notiert.

Die Untersuchungen wurden dabei in sechs Kategorien unterteilt um am Ende mit einem Gruppengrad A (normal = 3 Punkte), B (fast normal = 2 Punkte), C (abnormal = 1 Punkt) und D (deutlich abnormal = 0 Punkte) versehen.

Die weitere Kategorie „Röntgenbefund“ wurde in unserer Studie nicht verwendet. Neben den Kategorien „Erguss“, „Passives Bewegungsdefizit“ und „Transplantatentnahmemorbidity“ werden im Folgenden drei weiteren Kategorien genauer erläutert:

Am ausführlichsten gestaltete sich die Kategorie „Ligamentuntersuchung“ mit Kreuz-, Kollateral- und weiteren Banduntersuchungen. Ein besonderes Augenmerk sollte auf die für unser Kollektiv relevanten patellaspezifischen Untersuchungen gelegt werden. So wurde ein positives Apprehension-Zeichen, also eine Luxationsangst bei manueller Lateralisierung der Patella, in verschiedenen Beugegraden bewertet. Für Luxationsangst bis zu einer Beugung von 30° wurde 1 Punkt vergeben, bis 60° Beugung 2 Punkte und bei noch deutlicher ausgeprägter Angst über 60° Flexion 3 Punkte. Der Test ist in Abbildung 4.2 gezeigt.

Das J-sign beschreibt ein Patella-Maltracking, bei dem die Patella sowohl bei aktiver als auch passiver Beugung den Weg eines umgekehrten „J“ nachzeichnet, sich also bei zunehmender Knieflexion beim Eintauchen in die Trochlea ruckartig von lateral nach medial bewegt. Dieses Zeichen kann auf eine ausgeprägte Trochleadysplasie oder insuffiziente mediale passive Stabilisation hinweisen und wird als sehr spezifisch für eine PFI bezeichnet. (Sheehan et al., 2010) Hier wurde von „kein“ vorhandenes J-sign, über „leicht“ und „mäßig“ bis hin zu „deutlich“ abgestuft.

In der Kategorie „Kompartimentbefunde“ wurde das anteriore, mediale und laterale Kompartiment auf Krepitationen untersucht. Die Abstufung erfolgte in A-D: „leicht“, „mäßig“, mit „leichtem“ und mit „deutlichem“ Schmerz.

Der Funktionstest wurde als Einbein-Sprung-Test durchgeführt und wird im nächsten Absatz 4.2.2 genau beschrieben.



Abb. 4.2: Das Apprehension-Zeichen wird durch die vorsichtige Lateralisation der Patella durch den Untersucher in verschiedenen Beugegraden durchgeführt. Bei vorliegender Luxationsneigung führt diese Provokation zu einer Abwehr- bzw. Angstreaktion des Patienten. Dies wird als positives Apprehension-Zeichen gewertet.

#### 4.2.2 Einbein-Sprung-Test

Der Einbein-Sprung-Test hat sich besonders zur Beurteilung der Stabilität, aber auch der allgemeinen Kniefunktion bewährt. Für den Untersucher bot er den Vorteil, sich ein direktes Bild der Funktionsfähigkeit machen zu können. Der Test wurde unter anderem an gesunden Männern als gute Beurteilungsmethode eingestuft. (Ross et al., 2002)

Es wurde jeweils die Distanz, die der Patient in einem einbeinigen Weitsprung springt, in Zentimetern von Absprunglinie bis zur gelandeten Ferse ausgemessen. Gültig war nur, wenn der Patient mit einem Bein absprang und auch auf diesem Absprungbein wieder sicher landete, ohne sich abzustützen oder nachjustieren zu müssen. Pro Bein wurde der Mittelwert aus drei Versuchen mit der Gegenseite verglichen. Eine Sprungleistung des operierten Beins gegenüber der gesunden Seite von über 90% wurde auch im IKDC 2000 als normale Funktion gewertet. (Reinke et al., 2011)

### 4.3 Bildgebung

Die radiologische Nachuntersuchung implizierte eine bilaterale native MR Bildgebung des Kniegelenks zur qualitativ morphologischen und (semi-)quantitativen Evaluation des retro-patellaren Transplantates und des Gelenkknorpels sowie zur morphologischen Beurteilung der gesamten Kniebinnenstrukturen.

#### 4.3.1 Protokoll der MR Sequenzen

Die Bildgebung erfolgte mit einem 3 Telsa MRT Geät in der Radiologie des Klinikums rechts der Isar (Ingenia, Philips Healthcare, Best, Netherlands). Hierbei wurde die entsprechende 16-Kanal-Standard-Kniespule (Medical Advances, Milwaukee, WI, USA) verwen-



det.

In der Bildgebung dieser Studie wurden sechs verschiedene MRT-Sequenzen mit unterschiedlichen Parametern gefahren. Durch Anfertigung von Übersichtslocalizern konnten die gewünschten Strukturen genau eingestellt und abgebildet werden.

Zur morphologischen Auswertung wurden drei intermediär gewichtete (IM-w) Sequenzacquisitionen im turbo Spinecho (TSE) Modus mit Fettsättigung aufgenommen und stellten das Kniegelenk triplanar dar (axial, sagittal, koronar), zusätzlich erfasste eine T1-gewichtete TSE Sequenz das Knie sagittal.

Zur quantitativen wurden folgende beiden Sequenzen verwendet: Eine MSME SE T2 Sequenz mit sechs Echozeiten wurde für das T2 Mapping angewandt. (Gersing et al., 2020) Für die T1rho Relaxationszeitmessungen kam eine dreidimensionale MSME SE T1rho Sequenz mit fünf Echozeiten zum Einsatz. (Jungmann et al., 2012; Rauscher et al., 2008) Die Zeiten des Spin-locks waren 0, 10 und 40 ms. Die Frequenz des Spin-locks lag bei 500 Hz. Dies erfolgte in Anlehnung an das MRI Protokoll der Osteoarthritis initiative (OAI) (Jungmann et al., 2014; Peterfy et al., 2008). Das Protokoll ist in Tabelle 4.2 einsehbar.

Tab. 4.2: MR Sequenzprotokolle

Sequenz	Dim.	Ebene	Einstellungen	Aquisitionsdauer
<b>IM-w TSE</b> fettgesättigt	2D	axial	TE: 40 ms; TR: 5456 ms FOV: 150 mm Schichten : 36 Schichtdicke: 3 mm Schichtabstand: 3.3 mm Auflösung (Ebene): 0.4 x 0.4 mm <sup>3</sup> Kippwinkel 90°	5:42 min
<b>IM-w TSE</b> fettgesättigt	2D	sagittal	TE: 44 ms; TR: 4202 ms FOV: 140 mm Schichten : 30 Schichtdicke: 3 mm Schichtabstand: 3.6 mm Auflösung (Ebene): 0.4 x 0.4 mm <sup>3</sup> Kippwinkel 90°	4:50 min
<b>IM-w TSE</b> fettgesättigt	2D	koronar	TE: 44 ms; TR: 3363 ms FOV: 140 mm Schichten : 24 Schichtdicke: 3 mm Schichtabstand: 3.6 mm Auflösung (Ebene): 0.4 x 0.4 mm <sup>3</sup> Kippwinkel 90°	4:50 min
<b>T1-w TSE</b>	2D	sagittal	TE: 13 ms; TR: 785 ms FOV: 140 mm Schichten : 28 Schichtdicke: 3 mm Schichtabstand: 3.6 mm Auflösung (Ebene): 0.4 x 0.4 mm <sup>3</sup> Kippwinkel 90°	3:06 min
<b>MSME SE T2-w</b>	2D	sagittal	TE: 60, 50, 40, 30, 20, 10 ms TR: 2200 ms FOV: 140 mm Schichten : 30 pro Echo Schichtdicke: 2.5 mm Schichtabstand: 2.5 mm Auflösung (Ebene): 0.4 x 0.4 mm <sup>3</sup> Kippwinkel 90°	5:33 min

*Fortsetzung auf nächster Seite*

Tab. 4.2 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

Sequenz	Dim.	Ebene	Einstellungen	Aquisitionsdauer
<b>SPGR</b> <b>T1rho</b> fettgesättigt	3D	sagittal	TE: 80, 60, 40, 20, 10 ms TR: 9.6 ms FOV: 140 mm Schichten : 45 pro Echo Schichtdicke: 1.8 mm Schichtabstand: 2 mm Auflösung (Ebene): 0.5 x 0.5 mm <sup>3</sup> Kippwinkel 10° frequency of spin-lock: 500 Hz	11:00 min

### 4.3.2 Qualitative MR Evaluation

Morphologisch wurden der ICRS, MOCART und WORMS Score bestimmt. Die Auswertung der MRTs wurde mit dem PACS durch zwei auf muskuloskelettale Bildgebung spezialisierten Radiologinnen durchgeführt (P.M. Jungmann, 12 Jahre Erfahrung und A.S. Gersing, 8 Jahre Erfahrung).

#### ICRS Grading

Zur Bestimmung der präoperativen Knorpelqualität wurde die 2003 von Brittberg et al. veröffentlichte Klassifikation der „International Cartilage Repair Society“ (ICRS), welche 1997 in der Schweiz ins Leben gerufen wurde, verwendet. (Brittberg and Winanski, 2003) Diese Beurteilung von Größe, Tiefe, Lokalisation und Zustand des Defekts wurde oft als internationale Standardklassifikation angesehen und findet breite Verwendung im klinischen Alltag. (Roos et al., 2011)

Abbildung 4.3 gibt eine Übersicht, nach welchen Kriterien das Grading durchgeführt wurde.

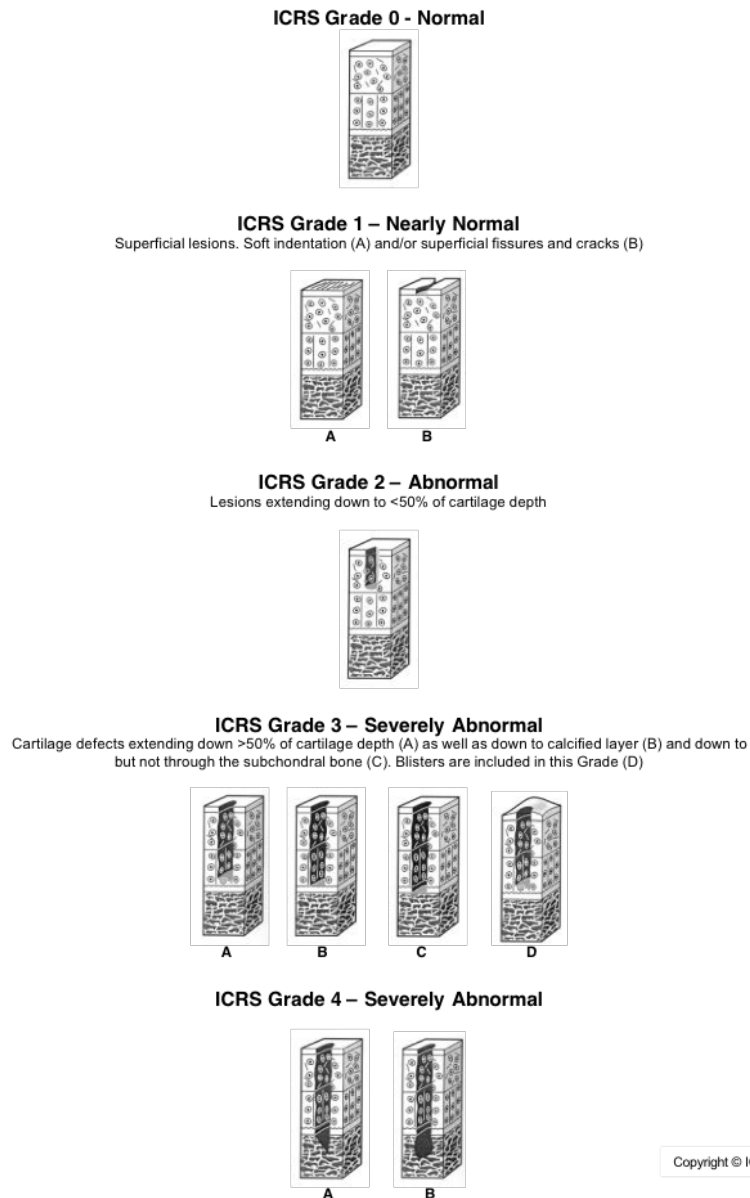


Abb. 4.3: ICRS Klassifikationssystem für Knorpelschäden nach (Brittberg and Winalski, 2003)

### MOCART Score

Als morphologischer Score für die Bewertung des Knorpeltransplantats und des perifokalen Gewebes wurde der Magnetic resonance observation of cartilage repair tissue Score

(MOCART) verwendet, welcher besonders für die Bewertung bioregenerativer Knorpelersatztherapien ausgearbeitet wurde und in der Forschung häufige Anwendung findet.

Nach seiner Entwicklung mit neun Parametern für die Evaluation verschiedener Knorpeltherapien am Femurkondylus (Marlovits et al., 2004) wurde der Score später nochmals anhand mehrerer Studien mit ACT Patienten allgemein und MACT Patienten im Speziellen validiert. (Domayer et al., 2008; Jungmann et al., 2019; Marlovits et al., 2006; Trattinig et al., 2015) Es wurden die Parameter Grad der Defektfüllung, Integrität am Rand des Ersatzgewebes, Oberflächenstruktur, Signalintensität in zwei verschiedenen MR-Sequenzen, subchondrale Grenzlamelle, subchondraler Knochen, Adhäsionen und das Auftreten einer begleitenden Synovitis beurteilt.

Tabelle 4.3 wurde modifiziert nach dem Review von Domayer et al. und zeigt die einzelnen Beurteilungskriterien mit Punktverteilung. (Welsch et al., 2008) Dabei ist hinsichtlich der Integrität die Ausbildung einer Grenzlamelle im Vergleich zu den benachbarten Knorpelregionen von besonderem Interesse, da sie als Anhalt für eine Wiederherstellung der biologisch ursprünglichen Schichten gilt. (Ebert et al., 2011)

Tab. 4.3: MOCART Score modifiziert nach (Domayer, Welsch et al. 2008)

Variable	Classes	Score
Degree of defect repair and defect filling "Defect filling"	Complete (on a level with adjacent cartilage)	20
	Hypertrophy (over the level of the adjacent cartilage)	15
	Incomplete (under the level of the adjacent cartilage; underfilling)	
	>50% of the adjacent cartilage	10
	<50% of the adjacent cartilage	5
	Subchondral bone exposed	0
Integration to border zone "Integrity"	Complete (complete integration with adjacent cartilage)	15
	Incomplete (incomplete integration with adjacent cartilage)	10
	Defect visible	
	<50% of the length of the repair tissue	5
	>50% of the length of the repair tissue	0
Surface of the repair tissue "Surface"	Surface intact (lamina splendens intact)	10
	Surface damaged (fibrillations, fissures, and ulcerations)	
	<50% of repair tissue depth	5
	>50% of repair tissue depth of total degeneration	0

*Fortsetzung auf nächster Seite*

Tab. 4.3 – Fortsetzung von vorheriger Seite

Variable	Classes	Score
Structure of the repair tissue "Structure"	Homogeneous	5
	Inhomogeneous or cleft formation	0
Signal intensity of the repair tissue "Signal"	<b>Dual T2-FSE</b>	
	Isointense	15
	Moderately hyperintense	5
	Markedly hyperintense	0
	<b>3D-GE-FS</b>	
	Isointense	15
Moderately hypointense	5	
Markedly hypointense	0	
Subchondral lamina "Lamina"	Intact	5
	Not intact	0
Subchondral bone "Subchondral bone"	Intact	5
	Edema, granulation tissue, cysts, sclerosis	0
Adhesion "Adhesion"	No	5
	Yes	0
Effusion "Effusion"	No effusion	5
	Effusion	0
	<b>Maximum score</b>	<b>100</b>

### WORMS Score

Der Whole-Organ Magnetic Resonance Imaging Score (WORMS) ist ein semiquantitativer Score zur kernspintomographischen OA-Evaluation des Kniegelenkes.

In der Originalversion nach Peterfy et al. wurden mehrere Kategorien in bis zu 15 Regionen am Knie bewertet, wobei die Autoren den Score in seiner Breite als Grundlage für die Weiterentwicklung von weiteren Knorpelscores sahen. (Peterfy et al., 2004) So wurde die Auswertung in dieser Arbeit für die Knorpelkategorie des WORMS nach Vorlage mehrerer Arbeiten und analog zu den segmentierten Regionen der quantitativen Messungen auf folgende sechs anatomische Regionen beschränkt: Patellafläche (PAT), Trochleafläche (TRO), mediale Femurkondylusfläche (MFC), laterale Femurkondylusfläche (LFC), mediale Tibiafläche (MT) und laterale Tibiafläche (LT). (Jungmann et al., 2019; Rauscher et al., 2008; Stehling et al., 2010)

Bei den Menisken wurden das Vorderhorn, der Mittelteil und das Hinterhorn jeweils für medialen und lateralen Meniskus betrachtet, was einen Total-Score von max. 12 Punkten pro Meniskus ergab. Der Ligamentstatus wurde für vorderes und hinteres Kreuzband, mediales und laterales Kollateralband, die Popliteussehne und die Patellasehne erhoben. (Jungmann et al., 2016)

Zu den beschriebenen Kategorien fügten wir noch weitere aus der Originalversion hinzu, sodass letztendlich folgende Parameter bewertet wurden: Integrität der Menisken, Ligamentstatus, Knorpelsignal und Morphologie, subartikuläres Knochenmarksignal/Knochenmarködem, Veränderungen/Abrieb Knorpelflächen, Auftreten subartikulärer Zysten, Auftreten von Osteophyten, Gelenkerguss, freie Gelenkkörper und periartikuläre Zysten.

Tabelle 4.4 veranschaulicht die Punktevergabe, die auf einen Gesamtscore von max. 165 Punkten abzielte, wobei eine Punktzahl von 0 ein gesundes Knie bedeutete. (Gersing et al., 2020; Peterfy et al., 2008)

Tab. 4.4: Modifiziert nach (Peterfy, Guermazi et al. 2004): WORMS Score

Kategorie	Anzahl Regionen	Skala	Gesamt (maximal)
Integrität der Menisken "WORMS Meniskus"	6	0 intakt 1 Intrastubstantieller Riss 2 Nicht dislozierter Riss 3 Dislozierter Riss oder komplizierter Riss ohne Deformitäten 4 Komplette Mazeration/Destruktion	24

*Fortsetzung auf nächster Seite*



Tab. 4.4 – Fortsetzung von vorheriger Seite

Kategorie	Anzahl Regionen	Skala	Gesamt (maximal)
Ligamentstatus "WORMS Ligament"	6	0 intakt 1 Signalveränderung um das Band 2 Signalveränderung innerhalb des Bandes 3 Teilruptur 4 komplette Ruptur	24
Knorpelsignal und Morphologie "WORMS Knorpelsignal"	6	0 intakt 1 Dicke normal, Signalerhöhung T2 2 Fokaler Defekt nicht über ganze Dicke, <1 cm Länge 2.5 Fokaler Defekt über ganze Dicke, <1 cm Länge 3 Mehrere fokale Defekte über ganze Dicke, <1 cm Länge ODER fokaler Defekt nicht über ganze Dicke, <1 cm Länge aber <75% der Region betroffen 4 Mehrere fokale Defekte nicht über ganze Dicke, >75% der Region betroffen 5 Mehrere fokale Defekte über ganze Dicke, < 75% der Region betroffen 6 Mehrere fokale Defekte über ganze Dicke, > 75% der Region betroffen	36
subartikuläres Knochenmarksignal/Knochenmarködem "WORMS Knochenmarködem"	6	0 keines 1 minimal <5 mm Durchmesser 2 moderat <20 mm Durchmesser 3 deutlich >20 mm Durchmesser	18
Veränderungen/Abrieb Knorpelflächen "WORMS Abrieb"	6	0 keine 1 minimal 2 moderat 3 deutlich	18

Fortsetzung auf nächster Seite

Tab. 4.4 – Fortsetzung von vorheriger Seite

Kategorie	Anzahl Regionen	Skala	Gesamt (maximal)
Auftreten subartikulärer Zysten "WORMS subartikuläre Zysten"	6	0 keine 1 minimal < 3 mm 2 moderat < 5 mm 3 deutlich > 5 mm	18
Auftreten von Osteophyten "WORMS Osteophyten"	6	0 keine 1 klein 2 moderat 3 deutlich	18
Gelenkerguss "WORMS Erguss"		0 kein 1 minimal < 33% der max. Ausdehnung 2 moderat 33-66% der max. Ausdehnung 3 deutlich > 66% der max. Ausdehnung	3
Freie Gelenkkörper "WORMS FGK"		0 keine 1 ein FGK 2 zwei FGK 3 > 2 FGK	3
Periartikuläre Zysten "WORMS periartikuläre Zysten"		0 keine 1 minimal 2 moderat 3 deutlich	3
			GESAMT max. 165

### 4.3.3 Quantitative MR Evaluation mittels Segmentierung

Im Rahmen der MR-Untersuchung erfolgte auch das in der Einleitung erläuterte T2 Mapping und das T1rho Mapping des Gelenkknorpels.

Die Auswertung der quantitativen MR Bilder erfolgte nach Abschluss der MR Acquisition und nach dem Postprocessing mittels pixel-basiertem Levenberg Marquart mono-exponential non-negative least squares fit Algorithmus durch manuelle Segmentierung des Gelenkknorpels aller Kompartimente. (Kumar et al., 2013) Die Echo-Sequenzen ermöglichen die Auswahl von verschiedenen Echozeiten. Das erste Echo wurden bei den MSME SE T2

Messungen ausgeschlossen, um die Auswirkungen dieses stimulierten Echos zu eliminieren. (Baum et al., 2013)

Die T2 Maps wurden über ein internes Tool des Ingenia MRT Gerätes (Inline calculation software) generiert und direkt ins PACS überspielt. Die T1rho Maps wurden mittels eines von einem auf muskuloskelettale Radiologie spezialisierten Physiker mit 3 Jahren Erfahrung erstellten Skripts in MATLAB (The MathWorks, Natick, MA, USA, Release 2016a) generiert und anschließend ins PACS System zur Segmentation überspielt.

Der Knorpel wurde direkt in den erstellten sagittalen T1rho und T2 Maps manuell sequenziert, d.h. interessierende Bereiche wurde von einer trainierten Beobachterin unter Supervision einer erfahrenen Radiologin als Region of Interest (ROIs) markiert. (Eckstein and Wirth, 2011) Diese Bearbeitung wurde mit dem Programm OsiriX Lite 11.0.2 (Pixmeo, Bernex, Switzerland) durchgeführt. Die ROIs wurden in 5-12 aufeinanderfolgenden Schichten im artefaktfreien, durchgängigen Knorpel gezeichnet. Das Knie wurde ähnlich der Arbeit von Baum et al. in die sechs Regionen Patella (PAT), Trochlea (TRO), lateraler und medialer Femurkondylus (LFC und MFC) und in laterale und mediale Tibia (LT und MT) aufgeteilt. (Baum et al., 2013) Die Grenze zwischen dem Trochlea-Kompartiment (TRO) und den femoralen Kompartimenten (LFC und MFC) wurde als senkrechte Tangente zur vorderen Tibiakante gezogen. Im Anschluss wurden mittlere Relaxationswerte der entsprechenden Schichten pro anatomisches Kompartiment gebildet und damit statistische Analysen durchgeführt.

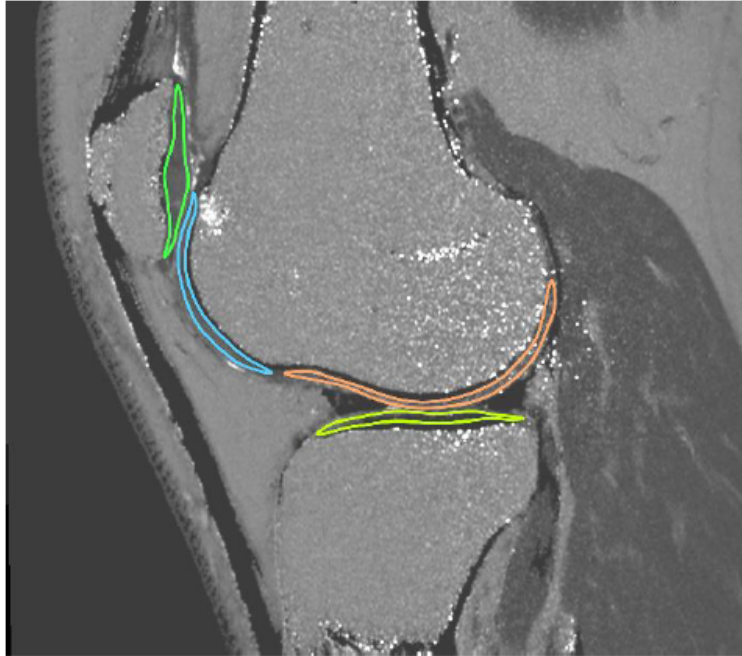


Abb. 4.4: MRT ROI (Region of Interest) beispielhaft an 4 Regionen (grün = PAT; blau = TRO; orange = LFC; gelb = LT) Fotodokumentation der Sportorthopädie und Radiologie Klinikum rechts der Isar München

## 4.4 Reproduzierbarkeitsmessungen

Um die Reproduzierbarkeit der quantitativen Knorpelbewertung zu beurteilen, wurde 10 Patienten zufällig aus allen drei Gruppen ausgewählt. Die quantitativen MR-Sequenzen und radiologischen Scores wurden zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten mit einem Abstand von einem Jahr von zwei Beobachtern je ein zweites Mal segmentiert und gemessen. Die Intra- und Interreader-Übereinstimmungen für Messungen der Knorpelrelaxationszeiten waren hoch. Der Variationskoeffizient CV der mittleren quadratischen Abweichung vom Mittelwert (Standard Abweichung) für die T2 Messungen lag zwischen 0.98% und 1.72% für die Intra- und Interreader Reproduzierbarkeit und zwischen 1.12% und 2.51% für die Interreader Reproduzierbarkeit.

## 4.5 Statistik

Die Auswertung wurde mit dem Statistik Programm IBM SPSS Statistics Subscription for Mac Version 26 von 2019 (IBM, Armonk, NY, USA) vorgenommen, Diagramme und Graphiken wurden mit LaTeX (Version 3) erstellt.

Die demographischen und weiteren erhobenen Daten wurden zunächst deskriptiv analysiert und mittels absoluter und relativer Häufigkeit (prozentual und absolute Anzahl

Patienten/Gesamtkollektiv) bzw. mittels Mittelwert, Spannweite (range) sowie Standardabweichung in den jeweiligen Gruppen dargestellt (MW, Min - Max,  $\pm$  SD). Darüber hinaus wurden die primären und sekundären Zielparameter der Gruppen verglichen. Für die meisten Daten aus dieser Studie konnte mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test und mittels graphischer Analyse in Histogrammen keine Normalverteilung ermittelt werden. Die Mittelwertvergleiche wurden somit beim Vergleich von drei Gruppen mit dem Kruskal-Wallis-Test für unverbundene Stichproben und beim Vergleich von zwei Gruppen mit dem Wilcoxon-Test durchgeführt. Als post hoc Test wurde der Dunn-Bonferroni-Test verwendet. Außerdem wurde die Effektgröße  $r$  berechnet, bei der Werte über 0.5 als stark, Werte zwischen 0.1 und 0.3 als mittel und Werte unter 0.1 als schwach relevant eingestuft werden. Die longitudinale Analyse (NRS, Aktivitäts- und Funktionslevel, WOMBS) erfolgte mittels Friedmantest je für drei Zeitpunkte  $t_0$  -  $t_1$  -  $t_2$  und dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben für  $t_0$  -  $t_1$ ,  $t_1$  -  $t_2$  bzw.  $t_0$  -  $t_2$ .

Die Korrelationen wurden für metrische Daten mit dem Pearson- und für ordinalskalierte Daten mit dem Spearman-Rank-Korrelationskoeffizienten berechnet.

Bei allen Tests gilt das Signifikanzniveau  $p < 0.05$  als „signifikant“ und wurde mit einem hochgestellten Stern markiert;  $p < 0.001$  gilt als „hochsignifikant“ und erhielt eine Markierung mit zwei hochgestellten Sternen.

Bei den zur Darstellung verwendeten Boxplots werden außerdem Ausreißer mit einem Kreuzsymbol abgebildet.

Zwar wurde zu Studienbeginn eine Poweranalyse zur Kalkulation einer geeigneten Probandenzahl durchgeführt, wobei unter Verwendung von Daten vorheriger, vergleichbarer Studien jeweils zu den entsprechenden Scores verschiedene Probandenanzahlen errechnet wurden. Jedoch gestaltet sich eine pauschale Aussage zur geforderten Patientenzahl pro Gruppe schwierig, da beispielsweise bei Patienten der Gruppe 3 keine vergleichbaren Studien hinsichtlich Scores zur Bildgebung und bei Gruppe 2 keine vergleichbaren Studien mit einigen, hier verwendeten klinischen Fragebögen vorlagen.



# Kapitel 5

## Ergebnisse

### 5.1 Charakterisierung Patientenkollektiv

Die anamnestisch und demographisch von 68 Patienten erhobenen Daten wurden zunächst deskriptiv analysiert. Bei 68 zur Studie erschienenen Patienten (19 aus Gruppe 1, 17 aus Gruppe 2, 32 aus Gruppe 3) lagen nach Abschluss der Erhebungen alle Fragebögen vor, bei 66 Patienten davon konnte zusätzlich die Bildgebung durchgeführt werden. Von allen 66 bildgebend nachuntersuchten Patienten lagen bei insgesamt 46 Patienten sowohl Fragebögen als auch prä- und postoperative Bilder zur Auswertung vor.

Tabelle 5.1 zeigt neben der Anzahl an Patienten die demographischen Daten mit durchschnittlichem Alter zum OP-Zeitpunkt, mittlerer Follow-Up Zeit in Monaten, zusätzlich den Body-Mass-Index (BMI) in  $\text{kg/m}^2$ , die Geschlechtsverteilung, die Verteilung der OP-Seite und den Anteil der Raucher, je im Gesamtkollektiv und in der jeweiligen Gruppe. Die Gruppen unterschieden sich dabei nicht signifikant.

Tab. 5.1: Demographische Daten

<b>Parameter</b> \ <b>Gruppe</b>	<b>Total</b>	<b>MIXED</b>	<b>MACT</b>	<b>MPFL</b>
Anzahl Patienten	68	19	17	32
Alter bei OP (in Jahren)	22.7	21.8	24.4	22.4
FU (in Monaten)	27.9	25.2	31.1	27.7
BMI (in $\text{kg/m}^2$ )	23.9	24.7	23.9	23.4
Geschlecht (% Männer)	47.1	31.6	70.6	43.8
Seite (% rechtes Knie)	47.1	42.1	41.2	53.1
Raucher (prozentual)	19.1	21.1	17.6	18.8

Tabelle 5.2 bildet weiterhin den Grad der Trochleadysplasie nach Dejour ab, ebenso welche welche Art der Patellainstabilität vorlag und zudem den ICRS Grad. Statistisch ergab sich

ein signifikant höherer ICRS Grad und somit schlechterer Knorpelstatus präoperativ bei der MIXED Gruppe, siehe Abschnitt 5.5.1.

Tab. 5.2: Klinische Daten

Parameter	Gruppe	Abstufung	Total	MIXED	MACT	MPFL
	Patellainstabilität (%)	keine		25.0	0.0	100.0
	traumatisch		20.6	31.6	0.0	25.0
	chronisch		54.4	68.4	0.0	75.0
Trochleadysplasie nach Dejour (%)	keine		33.8	15.8	94.1	12.5
	Grad A		29.4	47.4	5.9	31.3
	Grad B		32.4	31.6	0.0	50.0
	Grad C		4.4	5.3	0.0	6.3
	Grad D		0.0	0.0	0.0	0.0
ICRS Grad (%)	0		21.1	0.0	0.0	54.5
	1		7.0	0.0	6.3	13.6
	2		12.3	0.0	25.0	13.6
	3		29.8	47.4	43.8	4.5
	4		29.8	52.6	25.0	13.6

Die Gruppenverteilung war hinsichtlich Seite, Raucher, Alter bei OP, FU und BMI nach statistischer Analyse (Pearson Chi Quadrat) homogen, da keine signifikanten Unterschiede zwischen beobachteter und erwarteter Häufigkeit auftraten.

Bei 12 Patienten lag eine nicht suffiziente patellastabilisierende Voroperation im Sinne eines Lateral Release bzw. einer medialen Raffung vor, ein Patient erhielt eine Stabilisierung nach Ali-Krogius, ein weiterer Patient hatte zuvor bereits eine erste insuffiziente MPFL-Rekonstruktion (nicht Aperture-Technik) erhalten. Bei drei Patienten wurde im Rahmen der MPFL-Rekonstruktion simultan ein Verschluss der lateralen Kulissee durchgeführt.

An ebenfalls nicht zum Studienausschluss führenden Voroperationen bezüglich des Knorpelstatus lagen zwei Knorpelglättungen vor, ein weiterer Patient aus der MIXED Gruppe erhielt bereits eine ACT im Operationsgebiet, welche aber im Rahmen der anschließend durchgeführten MACT vollständig revidiert wurde. Zwei Patienten der MACT Gruppe erhielten aufgrund der Größe und Tiefe des Defekts zusätzlich zur MACT eine augmentierende Spongiosaplastik. Weiteren zwei Patienten aus dieser Gruppe wurde eine ältere Generation der Matrix (METREON) implantiert.

Der Mittelwert der intraoperativ gemessenen Knorpeldefektgröße betrug in der MIXED Gruppe  $3.6 \text{ cm}^2$  (range  $0.25 - 7 \text{ cm}^2$ ,  $SD \pm 2 \text{ cm}^2$ ), bei der MACT Gruppe  $2.8 \text{ cm}^2$  (range  $1 - 7 \text{ cm}^2$ ,  $SD \pm 1.8 \text{ cm}^2$ ).



Ein Patient der MPFL Gruppe hatte ein Ganglion am ipsilateralen vorderen Kreuzband, welches stabil war und keine Probleme bereitete. 41 Patienten gaben an, auch am kontralateralen Knie Probleme unterschiedlicher Art zu haben. Bei sechs Patienten wurde das kontralaterale Knie im weiteren Verlauf ebenfalls mit einer der Pathologie entsprechenden Operation versorgt, was aber nicht zum Studienausschluss führte. Ein Patient dieser Gruppe litt an einem retropatellaren Knorpelschaden ICRS Grad 3, aufgrund des Alters von 37 Jahren zum potentiellen Operationszeitpunkt war die Indikation hierfür allerdings nicht gegeben. Drei weitere Patienten mit Knorpelschäden ICRS Grad 4 entschieden sich aktiv gegen einen zusätzlichen knorpelchirurgischen Eingriff.

Die Befragung zu Reluxationsereignissen ergab, dass sich bei keinem der in unserer Studie eingeschlossenen Patienten bis zum Untersuchungszeitpunkt eine Reluxation der Patella ereignet hatte.

## 5.2 Ergebnisse der Fragebögen

### 5.2.1 Aktivitäts- und Funktionslevel nach IKDC 2000

Die Einstufung des Aktivitätslevels der Patienten im Anamneseteil des IKDC 2000 ergab, dass insgesamt 58.8% (40/68) der Patienten zu ihrem Ausgangslevel oder höher zurückkehrten. Der Median des Aktivitätslevels vor Verletzung (t0) lag bei Stufe 2 (regelmäßige sportliche Aktivität), präoperativ (t1) und zum Zeitpunkt unserer Nachuntersuchung (t2) lag er eine Stufe schlechter bei 3 (gelegentliche sportliche Aktivität). Es ergab sich kein signifikanter Unterschied von t0 - t2 im Friedman Test, sodass sich die Rückkehr der meisten Patienten zum Ausgangslevel im Endeffekt bestätigte.

Im Detail konnten in der MIXED Gruppe 57.9% (11/19) zum Ausgangslevel zurückkehren, bei der MACT Gruppe 58.8% (10/17) und bei der MPFL Gruppe 59.4% (19/32). Insbesondere bei der MACT Gruppe konnte bei 5 Patienten eine Verschlechterung der Aktivität um 2 Stufen eruiert werden, in der MIXED Gruppe bei einem und in der MPFL Gruppe bei 2 Patienten. Die longitudinale Änderung des Aktivitätslevels im Friedman Test zeigte analog zum Gesamtkollektiv keine signifikanten Unterschiede zwischen t0 - t2. Die Effektstärke nach Cohen war bei allen Unterschieden schwach. Graphisch ist dies in Abbildung 5.1 dargestellt.

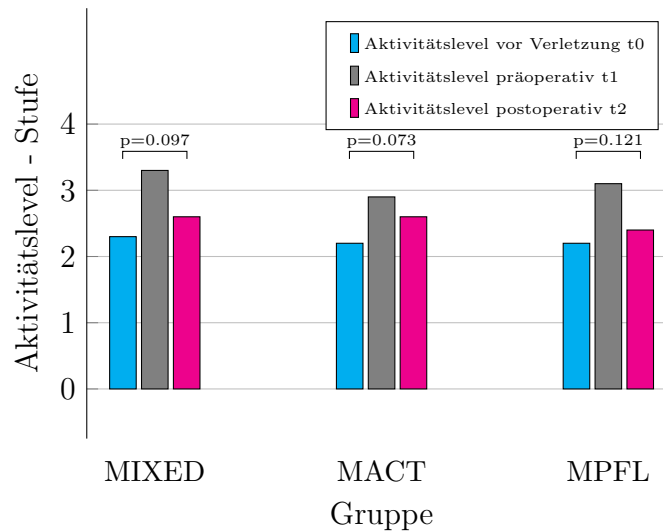


Abb. 5.1: Aktivitätslevel

Beim Funktionslevel verteilten sich die Zahlen wie folgt: Alle Patienten als ein Kollektiv betrachtet, konnten nur 40.6% (28/68) zum Ausgangsstatus oder besser zurückkehren. Der Median sank von Stufe 1 (Zeitpunkt t0) auf Stufe 2 (Zeitpunkt t2), vor der OP (Zeitpunkt t1) lag er sogar tiefer bei Stufe 3. Im Friedman Test war ein hochsignifikanter Unterschied erkennbar ( $p < 0.01$ ). Der posthoc Test zeigte diesen Unterschied zwischen allen Zeitpunkten, wobei insbesondere zwischen t0 und t2 das Signifikanzniveau mit  $p = 0.002$  zu nennen ist. Die Effektstärke war schwach. ( $d = 0.1$ ) Auch hier lohnte eine detaillierte Betrachtung: Bei der MIXED Gruppe kehrten 47.4% (9/19) zum Funktionslevel von vor der Verletzung zurück, bei der MACT Gruppe 47.1% (8/17) und bei der MPFL Gruppe nur 34.4% (11/32). Bei allen drei Gruppen sank der Medianwert je von Stufe 1 (t0) auf Stufe 2 (t2). Zwischen t0 und t2 konnte nur bei der MPFL Gruppe eine signifikante Verschlechterung des Funktionslevels errechnet werden ( $p = 0.012$ , Effektstärke nach Cohen  $d = 0.1$ , schwacher Effekt). Graphisch ist dies in Abbildung 5.2 dargestellt.

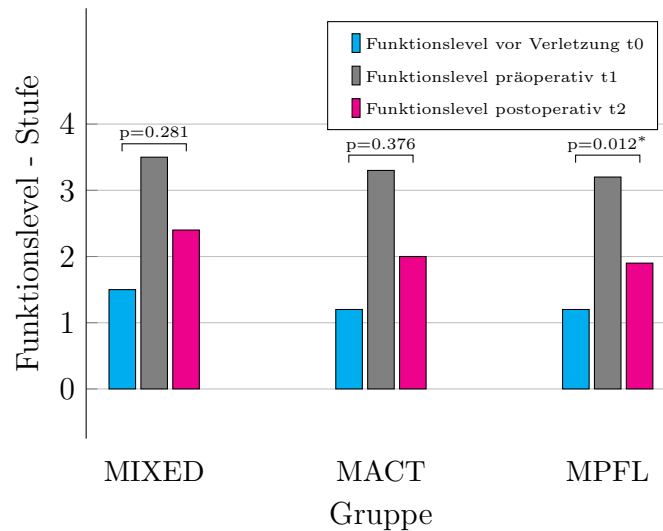


Abb. 5.2: Funktionslevel

### 5.2.2 Numerische Rankingskala

In allen Gruppen zeigte sich jeweils eine signifikante Verschlechterung der Funktion im retrospektiv betrachteten, longitudinalen Zeitverlauf von vor der Verletzung/vor Symptombeginn (t0) verglichen mit dem Zeitpunkt unserer Nachuntersuchung t2 ( $p < 0.05$ ). Der Median zum Zeitpunkt t0 lag bei allen Gruppen jeweils bei vollen 10 Punkten (SD MIXED  $\pm 2.6$ , MACT  $\pm 2.4$ , MPFL  $\pm 0.9$ ). Für den Zeitpunkt t2 lag der Median je bei 7 Punkten für die MIXED (SD  $\pm 1.5$ ) und MACT (SD  $\pm 1.7$ ) Gruppe, bei der MPFL Gruppe sogar bei 8 Punkten (SD  $\pm 1.7$ ). Graphisch ist dies in Abbildung 5.3 dargestellt.

Die Veränderung über die Zeit („Progress“) wird als Subtraktion des Rankings vor Verletzung vom postoperativen Ranking dargestellt. Ein positiver Wert bedeutet somit insgesamt eine Verbesserung der Funktion, wohingegen ein negativer Wert als Verschlechterung des Knies über die Zeit zu werten ist. Alle Gruppen gaben im Mittel postoperativ eine niedrigere Zahl an, die größten Funktionseinbußen hatte auch hier die MPFL Gruppe zu verzeichnen. Im Kruskal-Wallis-Test waren diese Veränderungen nicht signifikant unterschiedlich im Vergleich der Gruppen (siehe Abbildung 5.4).

Zum Ausgangswert zurückkehren oder sich sogar verbessern konnten insgesamt zehn Patienten (4/19 bei MIXED, 3/17 bei MACT und 3/32 bei MPFL).

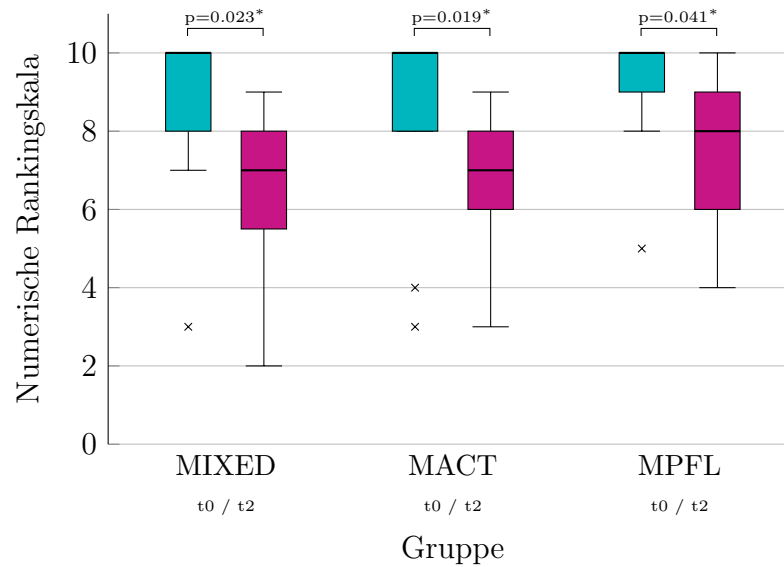


Abb. 5.3: Numerische Rankingskala Funktionsbestimmung

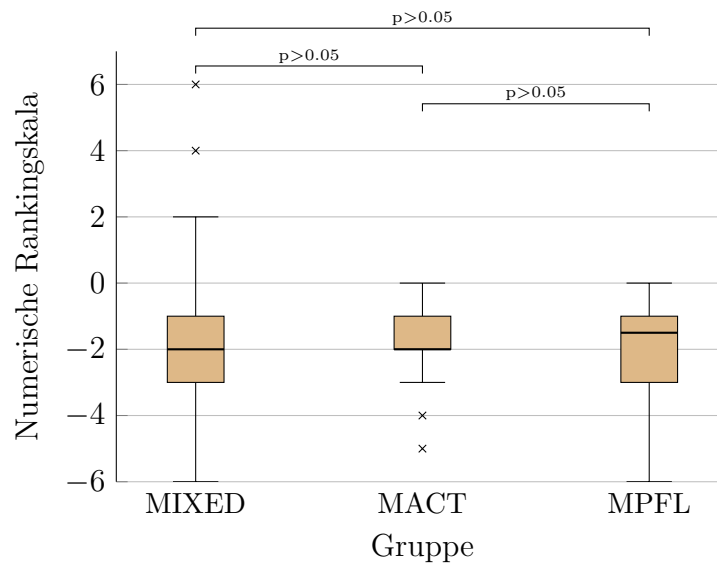


Abb. 5.4: Numerische Rankingskala Progress

### 5.2.3 Cincinnati Knee Rating Scale

Im Durchschnitt aller Gruppen wurde beim Cincinnati-Score ein Punktwert von 73.1 (range 52 - 94, SD  $\pm$  10.7) erreicht. In der MIXED Gruppe lag der Mittelwert bei 67.1 Punkten (range 53 - 80, SD  $\pm$  7.6), in der MACT Gruppe bei 74.8 Punkten (range 55 - 92, SD

$\pm 10.3$ ) und in der MPFL Gruppe bei 75.7 Punkten (range 52 - 94, SD  $\pm 11.4$ ). Der Unterschied zwischen den Gruppen war signifikant ( $p = 0.012$ ). Der post-hoc Test zeigte die Signifikanz zwischen der MIXED und der MPFL Gruppe, siehe Abbildung 5.5. Die Effektstärke des Dunn-Bonferroni Test ergab einen mittleren Effekt ( $r = 0.402$ ).

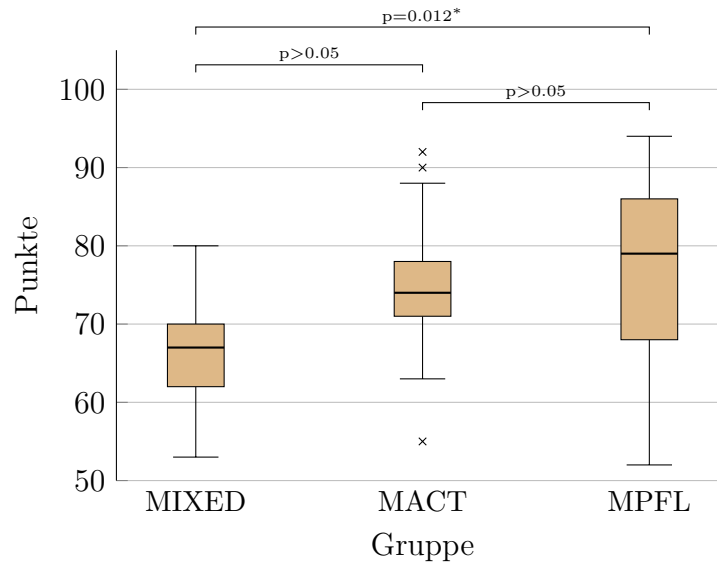


Abb. 5.5: Cincinnati Score

### 5.2.4 Kujala Score

Der durchschnittliche Kujala-Punktwert aller Patienten betrug 78.8 Punkte (range 38 - 100,  $SD \pm 14.8$ ). In der MIXED Gruppe lag der Durchschnittswert bei 76.4 Punkten (range 44 - 98,  $SD \pm 13.8$ ), in der MACT Gruppe bei 75.2 Punkten (range 38 - 100,  $SD \pm 17.3$ ) und in der MPFL Gruppe bei 82.2 Punkten (range 56 - 100,  $SD \pm 13.6$ ). Der Unterschied zwischen den Gruppen war nicht signifikant ( $p = 0.210$ ), siehe Abbildung 5.6 .

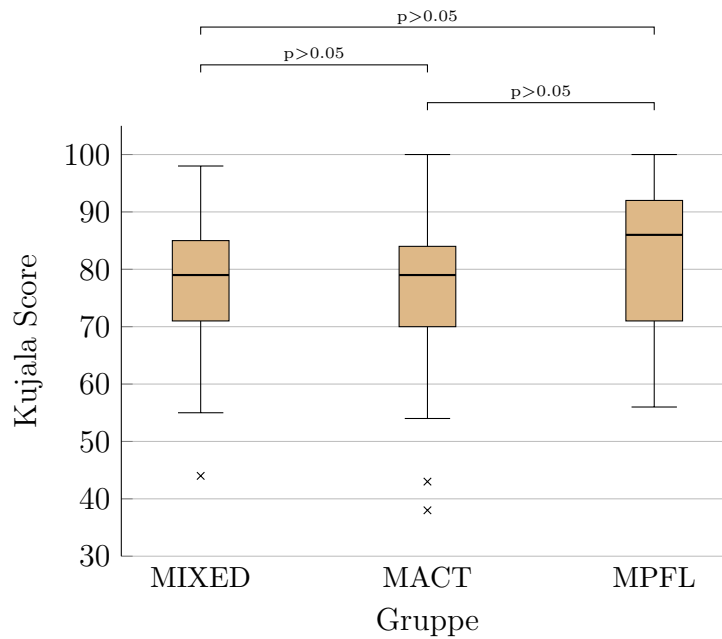


Abb. 5.6: Kujala Score

### 5.2.5 KOOS Score

Im Durchschnitt aller Gruppen wurde beim KOOS-Score ein prozentualer Wert von 81.9 Prozent (range 33.9 - 100, SD  $\pm$  15.8) ermittelt. In der MIXED Gruppe lag der Mittelwert bei 78.4 Prozent (range 58.3 - 95.8, SD  $\pm$  19.8), in der MACT Gruppe bei 77.8 Prozent (range 33.9 - 96.4, SD  $\pm$  16.9) und in der MPFL Gruppe bei 86.1 Prozent (range 53.6 - 100, SD  $\pm$  11.3). Der Unterschied zwischen den Gruppen war nicht signifikant ( $p = 0.114$ ), siehe Abbildung 5.7.

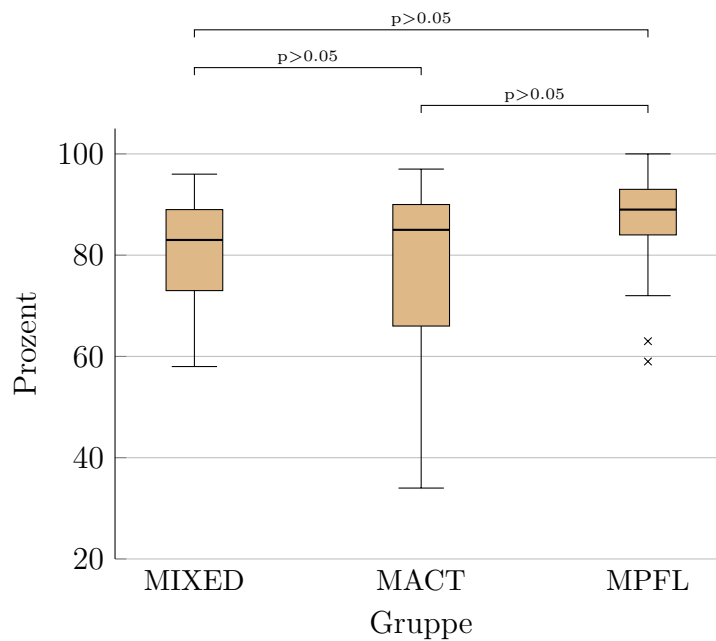


Abb. 5.7: KOOS Score

### 5.2.6 IKDC subjektiver Fragebogen

Im Durchschnitt aller Gruppen wurde im subjektiven IKDC ein prozentualer Wert von 73.9 Punkten (range 20.7 - 100, SD  $\pm$  17.1) erreicht. In der MIXED Gruppe lag der Mittelwert bei 69.6 Punkten (range 28.7 - 90.8, SD  $\pm$  16.2), in der MACT Gruppe bei 70.7 Punkten (range 20.7 - 92.0, SD  $\pm$  18.4) und in der MPFL Gruppe bei 78.1 Punkten (range 34.5 - 99, SD  $\pm$  16.4). Der Unterschied zwischen den Gruppen war nicht signifikant ( $p = 0.159$ ), siehe Abbildung 5.8.

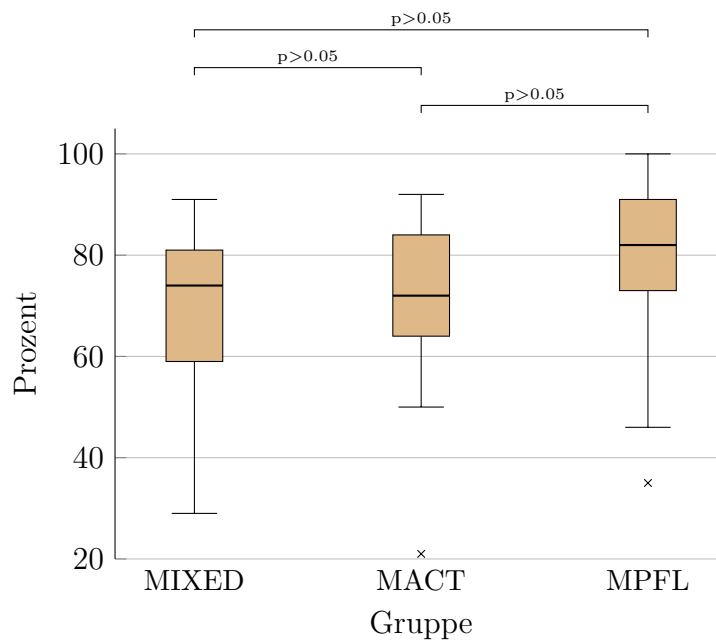


Abb. 5.8: IKDC Score subjektiv



### 5.2.7 Lysholm(-Gillquist) Fragebogen und Tegner(Lysholm) Aktivitätsindex

Im Durchschnitt aller Gruppen wurde beim Lysholm-Score ein Wert von 75.9 Punkten (range 22 - 100, SD  $\pm$  17.5) erreicht. In der MIXED Gruppe lag der Mittelwert 71.4 Punkten (range 32 - 88, SD  $\pm$  17.0), in der MACT Gruppe bei 74.0 Prozent (range 22 - 93, SD  $\pm$  22.3) und in der MPFL Gruppe bei 79.6 Punkten (range 44 - 100, SD  $\pm$  14.4). Der Unterschied zwischen den Gruppen war nicht signifikant ( $p = 0.233$ ), siehe Abbildung 5.9.

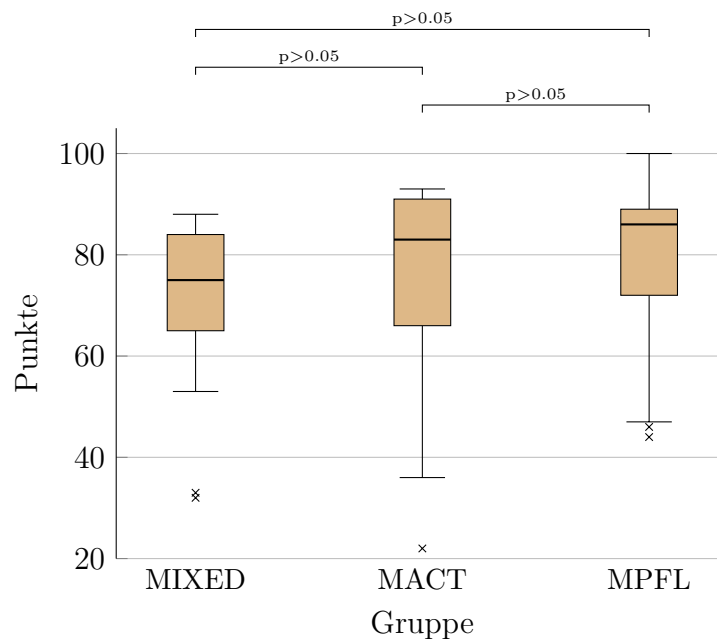


Abb. 5.9: Lysholm Score

Im Durchschnitt aller Gruppen wurde beim Tegner-Score ein Wert von 4.6 Punkten (range 2 - 9, SD  $\pm$  1.8) erreicht. In der MIXED Gruppe lag der Mittelwert bei 4.4 Punkten (range 2 - 9, SD  $\pm$  1.7), in der MACT Gruppe ebenfalls bei 4.4 Punkten (range 2 - 9, SD  $\pm$  1.9) und in der MPFL Gruppe bei 4.8 Punkten (range 2 - 9, SD  $\pm$  1.8). Der Unterschied zwischen den Gruppen war nicht signifikant ( $p = 0.595$ ), siehe Abbildung 5.10.

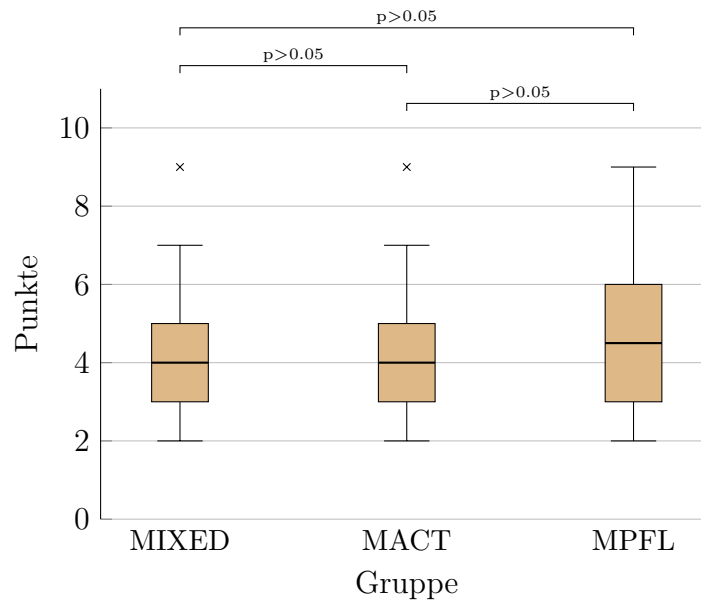


Abb. 5.10: Tegner Score

### 5.3 Ergebnisse der klinischen Untersuchung

Beim Gesamtergebnis wurden die Kategorien von A mit 3 bis D mit 0 Punkten bewertet. Laut Vorgabe des ICRS wurde der Abschlussgrad nur durch den schlechtesten und somit niedrigsten Wert der drei Kategorien Erguss, Bewegungsdefizit und Bandstabilität bestimmt.

38.2% aller Patienten erreichten Kategorie A, 41.2% Kategorie B, 16.1% Kategorie C und 4.4% Kategorie D. Abbildung 5.11 stellt jeweils die Anzahl der Patienten pro Gruppe und Kategorie des Gesamtergebnisses prozentual des gesamten Patientenguts dar. Insgesamt konnte die MACT Gruppe im Schnitt den besten Abschlussgrad erzielen, die MIXED Gruppe folgte danach, und den schlechtesten Abschlussgrad erzielte im Mittel die MPFL Gruppe. Dieser Unterschied war nicht signifikant ( $p = 0.611$ ).

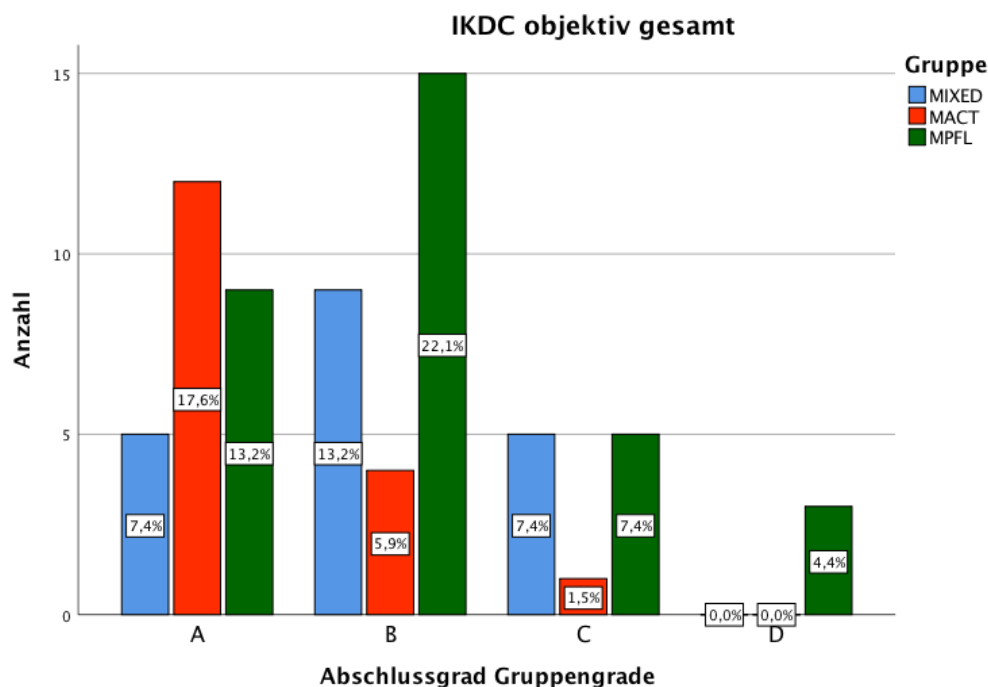


Abb. 5.11: IKDC objektiv gesamt

In der Kategorie Bewegungsdefizit hatte die MIXED Gruppe das schlechteste Ergebnis, da bei nur 63,2% (12/19) der Patienten freie Beweglichkeit eruiert werden konnte. Am besten schnitt die MACT Gruppe ab, bei der 88,2% (15/17) die beste Bewertung (A) erreichten und bei keinem Patienten die Abstufung C oder D festgestellt wurde. Die MPFL Gruppe hatte 81,3% (26/32) der Patienten in der besten Stufe, allerdings auch zwei Patienten mit mehr als 25° Bewegungseinschränkung (D).

In der Kategorie Erguss traten bei je drei Patienten in der MIXED sowie MACT Gruppe und bei fünf Patienten der MPFL Gruppe ein leichter bis mäßiger Erguss auf.

Die Kategorie Kompartimentbefunde zeigte einige nennenswerte Auffälligkeiten: In der Gruppe MIXED erzielte kein Patient ein normales Ergebnis, so waren bei 63,2% (12/19) der Patienten mäßige Krepitationen patellofemoral vorhanden (B), bei 31,6% (6/19) der Patienten zusätzlich leichte Schmerzen (C) und ein Patient gab stärkere Schmerzen an (D). In der MACT Gruppe waren bei 11,8% (2/17) der Patienten gar keine Krepitationen vorhanden (A). 88,2% (15/17) der Patienten hatten Krepitationen vorzuweisen, bei zwei davon traten dabei zusätzlich Schmerzen auf. Auch in der MPFL Gruppe traten mit 84,4% der Patienten (27/32) größtenteils Krepitationen auf; wiederum vier Patienten davon hatten zusätzlich Schmerzen. Immerhin 15,6% (5/32) aller MPFL Patienten blieben ohne Krepitationen. Außer bei einem Patienten mit Krepitationen im medialen tibiofemorale Kompartiment, waren die Krepitationen stets patellofemoral lokalisiert.

In der Kategorie Transplantatentnahmemorbidity hatte ein Patient der MIXED Gruppe

von einer deutlichen Dysästhesie an der lateralen Tibiakante des proximalen Unterschenkels mit hypertropher Narbenbildung zu berichten (D).

Bei den genannten Kategorien Bewegungsdefizit, Erguss, Kompartimentbefunde und Transplantatentnahmemorbidität waren die Unterschiede nicht signifikant.

Einzig die Kategorie Ligamentbefunde zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen. So schnitt die MACT Gruppe sowohl gegenüber der MIXED (starker Effekt  $r = 0.57$ ) als auch der MPFL Gruppe (mittlerer Effekt  $r = 0.48$ ) signifikant besser ab. In unserem Patientenkollektiv wurde die Ligamentkategorie maßgeblich durch das Vorhandensein eines Apprehension-Zeichens und des J-sign gezeichnet. Hier wurde bei keinem der MACT Patienten ein Apprehension-Zeichen vermerkt, zwei Patienten (2.9%) hatten eine erhöhte anteroposteriore Translation von maximal 5mm. Demgegenüber konnten in den beiden anderen Gruppen bei jeweils zehn Patienten ein Apprehension-Zeichen untersucht werden (entspricht 52.6% der MIXED Gruppe und 31.3% der MPFL Gruppe). Auch beim J-sign verhielt es sich analog sehr ähnlich: Während kein Patient der MACT Gruppe dieses vorzuweisen hatte, waren es bei der MIXED Gruppe 3/19 (15.8%) und bei der MPFL Gruppe 6/32 (18.6%) Patienten. Eine graphische Darstellung ist in Abbildung 5.12 ersichtlich, wo jeweils die Anzahl der Patienten pro Gruppe und Kategorie der Ligamentbefunde prozentual des gesamten Patientenguts dargestellt sind.

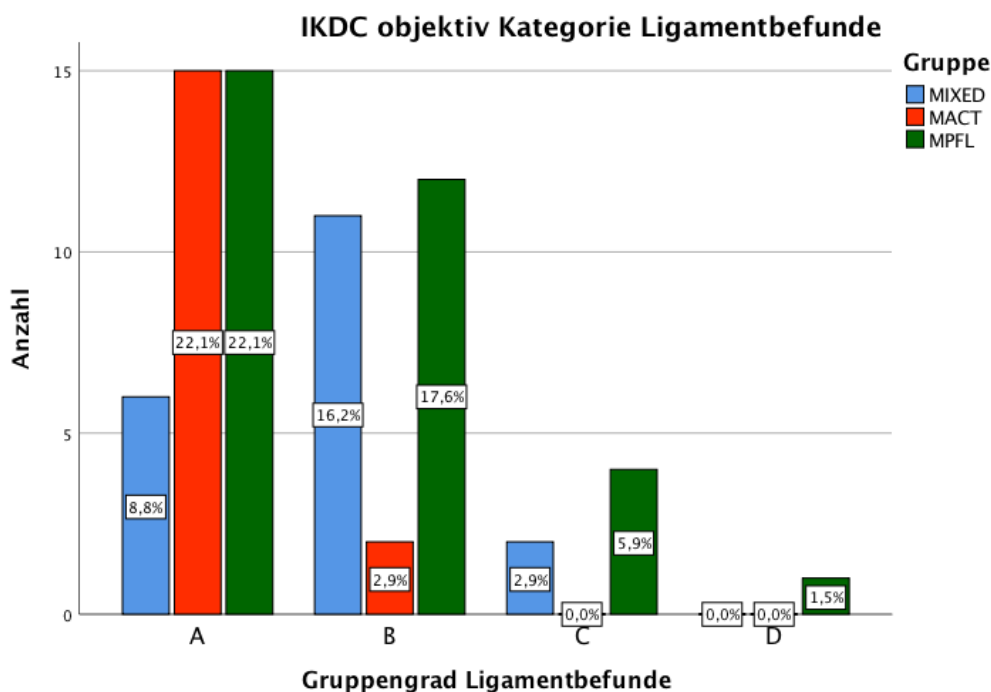


Abb. 5.12: IKDC objektiv Kategorie Ligamentbefunde

Der Funktionstest wurde als Einbein-Sprung-Test durchgeführt. Hier konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen festgestellt werden, die Mittelwerte lagen bei der MIXED Gruppe bei 81% (range 0 - 182%, SD  $\pm$  44) bei der MACT Gruppe bei 88% (range 45 - 181%, SD  $\pm$  29) und bei der MPFL Gruppe bei 86% (range 0 - 121%, SD  $\pm$  27), siehe Abbildung 5.13.

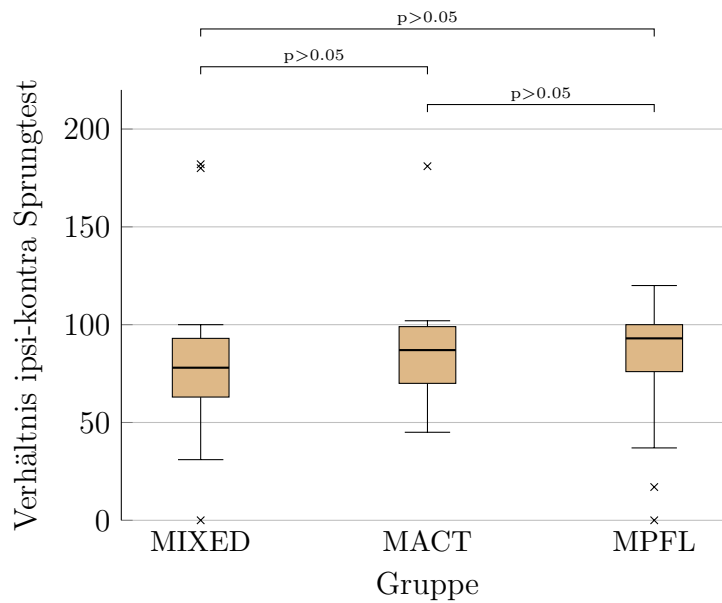


Abb. 5.13: Einbein Sprung Test

## 5.4 Evaluation Stabilität

Wie oben beschrieben, ergab sich aus der Anamnese eine Reluxationsrate von 0%. Ein detaillierter Blick auf die Untersuchungsergebnisse des Apprehension-Zeichens zeigte, dass unter den mit einer MPFL-Rekonstruktion versorgten Patienten bei 29/51 (56.9%) keinerlei Instabilitätszeichen mehr zu untersuchen waren. 14/51 Patienten gaben bis 30° Beugung eine Luxationsangst an, 6/51 verspürten diese Angst bis zu einer Beugung von 60°. Beim J-sign lagen bei 7/51 Patienten leichte Ausprägungen, zusätzlich eine mäßige und eine deutliche Pathologie vor. Diese beiden Instabilitätsuntersuchungen korrelieren je hochsignifikant mit dem Grad der Tochleadysplasie. (Apprehension-Zeichen  $R = 0.9$ , J-sign  $R = 0.36$ ; jeweils  $p < 0.01$ )

## 5.5 Ergebnisse Bildgebung

### 5.5.1 Qualitative Ergebnisse

#### ICRS

Die folgenden Berechnungen wurden bei allen Patienten einheitlich mit den ICRS Graden aus den OP-Berichten durchgeführt.

In der MIXED Gruppe hatten mit 10/19 Patienten (52.6%) über die Hälfte präoperativ einen Defekt, welcher bis in den subchondralen Knochen reichte (Grad 4), bei der MACT Gruppe waren dies nur 6/17 Patienten (35%). Die restlichen Patienten (bis auf einen Patienten der MACT Gruppe mit lediglich Grad 1) wurden jeweils mit Grad 3 eingestuft. Auch in der MPFL Gruppe lagen teilweise Knorpelschäden vor: Bei 4 Patienten lag sogar Grad 3 oder 4 vor, was als zusätzliche Operationsindikation für eine MACT zu diskutieren gewesen wäre. Der Vergleich der ICRS Grade zwischen Gruppe 1 und 2 mittels Wilcoxon-Test für ordinalskalierte unverbundene Daten ergab eine Signifikanz. Eine mittlere Effektstärke ( $r = 0.402$ ) untermauerte auch hier die größere Schwere der Verletzung bei der MIXED Gruppe. Eine Darstellung der einzelnen Grade pro Gruppe kann in Tabelle 5.2 gesehen werden.

#### MOCART Score

Der Durchschnittswert des MOCART Scores aller knorpeltransplantierten Patienten der Studie lag bei 68.4 Punkten (range 5 - 100,  $SD \pm 29.5$ ), bei der MIXED Gruppe bei 56.6 Punkten (range 5 - 95,  $SD \pm 27.5$  Punkte) und bei der MACT Gruppe deutlich besser bei 87.8 Punkten (range 70 - 100,  $SD \pm 8.9$  Punkte). Der Wilcoxon-Test für unverbundene Stichproben ergab einen hochsignifikanten Unterschied der Mittelwerte, siehe Abbildung 5.14. Die entsprechende Effektstärke war stark ( $r = 0.705$ ). Ein perfektes Ergebnis mit voller Punktzahl von 100 konnten bei der MACT Gruppe 3/17 (18.8%) Patienten erreichen, in der MIXED Gruppe hingegen kein Patient. Bei 6/19 (31.6%) Patienten der MIXED Gruppe lag der MOCART Gesamtwert unter 50, wohingegen der niedrigste Wert

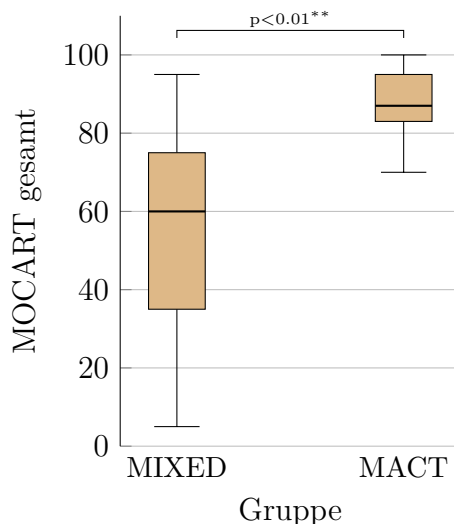


Abb. 5.14: MOCART gesamt

der MACT Gruppe bei 70 Punkten lag, analog dazu erreichten bei der MACT Gruppe 87.5% einen Wert über 80 Punkte, bei der MIXED Gruppe waren dies nur 21.1% der Patienten. In der MIXED Gruppe hatten 10/19 (52.6%) Patienten einen fortbestehenden Defekt über die ganze Knorpeldicke mit kompletter Delamination in  $> 50\%$  des Transplantats („Defect filling“). Bei den MACT-Patienten hatte lediglich je ein Patient einen bestehenden Defekt über die ganze Knorpeldicke in  $< 50\%$  des Transplantats und ein weiterer Patient eine Delamination in  $> 50\%$  des Defekts (jeweils 6.3%), womit der Parameter „Defect filling“ signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen präsentierte. Analog dazu zeigten die Parameter „Integrity“, „Surface“ und „Signal“ signifikant schlechtere Ergebnisse für die MIXED Gruppe an ( $p < 0.05$ ). Die Effektstärke lag für den letztgenannten Parameter bei  $r = 0.46$  (mittlere Effektstärke), für die anderen Parameter ließen sich sogar starke Effekte berechnen (jeweils  $r > 0.5$ ). Ein Ergebnis mit kompletter Defektfüllung („Defect Filling“, 20 Punkte) und gleichzeitig kompletter Transplantatintegration („Integrity“, 15 Punkte) erreichten in der MIXED Gruppe mit 5/19 (26,3%) gegenüber 10/16 (62,5%) in der MACT Gruppe weniger als die Hälfte der Patienten. Dies war statistisch signifikant. Bei der MIXED Gruppe war kein Transplantat hypertrophiert, bei der MACT Gruppe war dies bei 3 Patienten der Fall. Beispielhaft sind in Abbildung 5.15 sagittale intermediär gewichtete fettgesättigte Aufnahmen je eines Patienten pro Gruppe abgebildet.

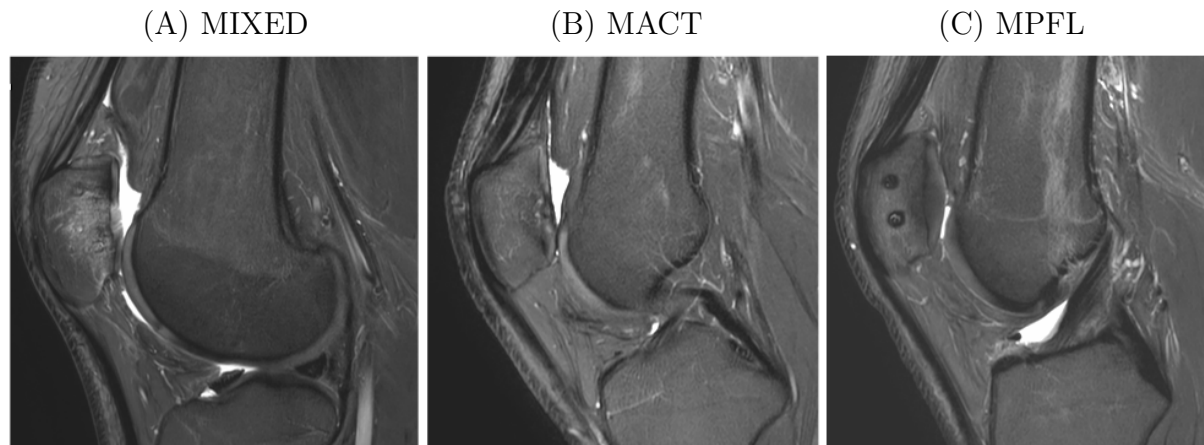


Abb. 5.15: Defect Filling: Eine unzureichende Defektfüllung zeigte sich gehäuft bei der MIXED Gruppe, oftmals auch begleitet von einem retropatellaren Knochenmarködem (A). Demgegenüber präsentierte sich bei der MACT Gruppe bei 2/3 der Patienten eine adäquate, vollständige Defektfüllung (B). In der MPFL Gruppe ergab sich keine signifikante morphologische Progression der degenerativen Veränderungen zum Zeitpunkt t2

### WORMS Score

Alle Regionen zusammen ausgewertet wurden beispielsweise bei der Kategorie „WORMS Knorpelsignal“ als „WORMS Knorpelsignal gesamt“ bezeichnet, entsprechend erhielt die Auswertung der retropatellaren Region die Bezeichnung „WORMS Knorpelsignal PAT“. Diese Benennung erfolgte in gleicher Systematik in allen weiteren Kategorien und Knieregionen.

Im Durchschnitt aller Gruppen wurde beim präoperativ gemessenen WORMS Gesamtscore (Zeitpunkt t1) ein Punktwert von 9.2 (range 1 - 33.5, SD  $\pm$  6.4) erzielt. In der MIXED Gruppe lag der Mittelwert bei 10.3 Punkten (range 2.5- 18, SD  $\pm$  4.9), in der MACT Gruppe bei 6.2 Punkten (range 2.5 - 9, SD  $\pm$  2.1) und in der MPFL Gruppe bei 9.9 Punkten (range 1 - 33.5, SD  $\pm$  8.0). Die Gruppen unterschieden sich nicht signifikant.

Beim postoperativ gemessenen WORMS Gesamtscore (Zeitpunkt t2) wurde im Durchschnitt aller Gruppen eine Verbesserung auf 6.0 Punkte (range 0 - 22, SD  $\pm$  4.7) erreicht. In der MIXED Gruppe lag der Mittelwert bei 8.7 Punkten (range 0 - 18, SD  $\pm$  4.9), in der MACT Gruppe bei 4.3 Punkten (range 0 - 8.5, SD  $\pm$  3.6) und in der MPFL Gruppe bei 5.3 Punkten (range 0 - 22, SD  $\pm$  5.7). Dies bedeutete einen signifikant höheren und somit schlechteren Wert in der MIXED Gruppe sowohl gegenüber der MACT ( $p = 0.007$ ) als auch der MPFL Gruppe. ( $p = 0.003$ )

Es wurde zudem jeweils mittels Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben berechnet, ob der postoperative gegenüber dem präoperativen Wert longitudinal signifikant verändert war (t1 gegenüber t2), wobei sich nur bei der MPFL Gruppe eine signifikante Verbesse-



rung errechnete ( $p = 0.02$ ). Abbildung 5.16 bildet im Boxplot-Diagramm jeweils Mediane und p-Werte mit Markierung der Signifikanz sowohl von prä- nach postoperativ als auch zwischen den Gruppen ab.

Zusätzlich wurde der Progress-Punktwert berechnet. Dieser zeigte auch hier die Veränderung über die Zeit als Differenz des prä- vom postoperativen Wert als Zahl ( $t_2$  minus  $t_1$ ) an, ein negativer Punktwert entsprach demnach einer Verbesserung des Kniegelenks.

Der Progress-Punktwert aller Gruppen zusammen ( $n = 46$ ) lag beim WORMS Gesamtscore bei -2.3, was insgesamt eine signifikante longitudinale Verbesserung bedeutete ( $p = 0.019$ ). Einzeln ergaben sich Progress-Punktwerte von -1.4, -0.9 bzw. -3.6 Punkten (MIXED, MACT bzw. MPFL Gruppe). In Patientenzahlen angegeben konnten 9/14, 5/10 bzw. 16/22 Patienten (MIXED, MACT bzw. MPFL Gruppe) ihren Score über die Zeit verbessern bzw. blieben zumindest ohne Verschlechterung.

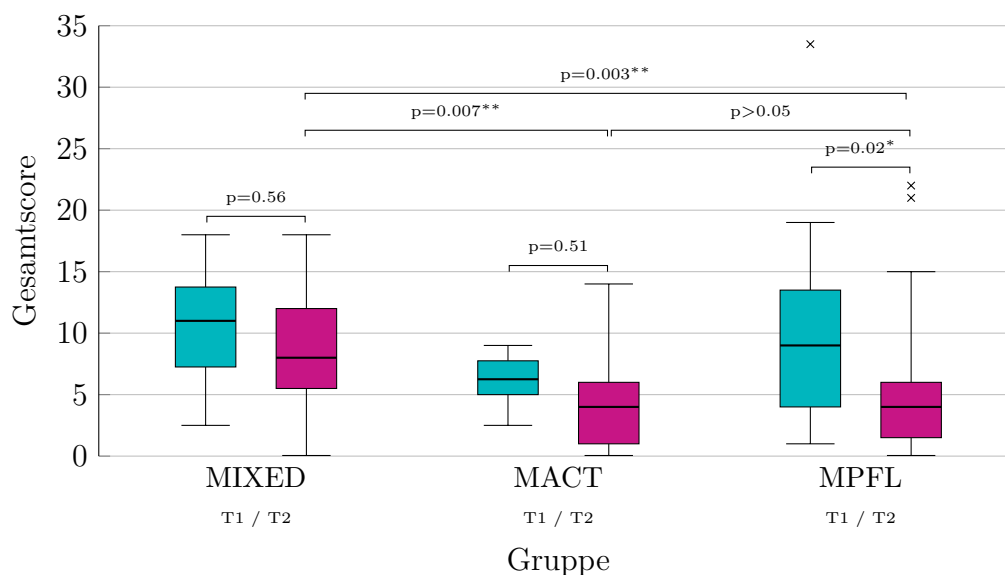


Abb. 5.16: WORMS Gesamtscore

Beim Vergleich des postoperativen Parameters „WORMS Knorpelsignal gesamt“ (Zeitpunkt t2) zwischen den Gruppen zeigte sich, dass die MIXED Gruppe hochsignifikant höhere und somit schlechtere Werte sowohl gegenüber der MACT als auch der MPFL Gruppe hatte. ( $p < 0.01$ )

Genauer betrachtet ergeben sich in den einzelnen Gruppen beim Subscore „WORMS Knorpelsignal PAT“ Unterschiede: Die beiden Knorpeltransplantatgruppen MIXED und MACT hatten eine Verbesserung im Sinne von Progress-Punktwerten von -1.00 bzw. -1.95 aufzuweisen. Bei der MPFL Gruppe hingegen ergab sich eine minimale Verschlechterung des Progress-Punktwerts „WORMS Knorpelsignal PAT“ um 0.16 Punkte. Diese longitudinalen Veränderungen der Patellaknorpelwerte waren im Wilcoxon-Test nur bei der MACT Gruppe signifikant ( $p = 0.018$ ), bei der MIXED bzw. MPFL Gruppe galten p-Wert von 0.156 bzw. 0.610 als nicht signifikant zu werten.

Die Mittelwerte zum postoperativen Zeitpunkt des Subscores „WORMS Knorpelsignal PAT“ waren zwischen der MACT und MPFL Gruppe nicht signifikant unterschiedlich, wohl aber hochsignifikant zwischen der MIXED Gruppe einerseits gegenüber der MACT und andererseits auch gegenüber der MPFL Gruppe. In absoluten Patientenzahlen, konnten sich 15/24 bildgebend nachuntersuchte, knorpeltransplantierte Patienten im Subscore „WORMS Knorpelsignal PAT“ verbessern, 4/24 verschlechterten sich und bei 5 Patienten änderte sich der Score nicht, siehe Abbildung 5.17.

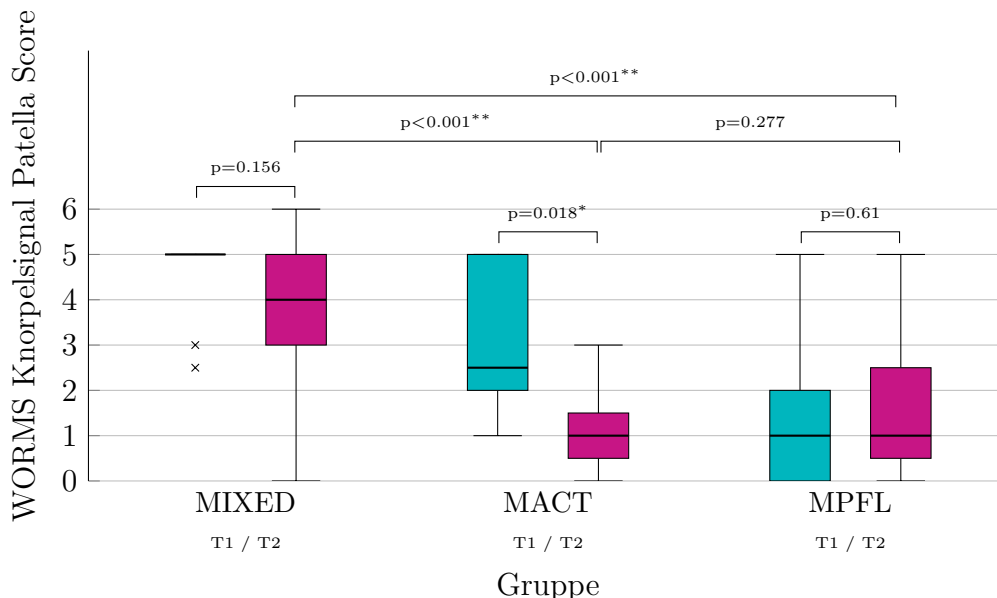


Abb. 5.17: WORMS Knorpelsignal Patella

Interessant stellt sich auch der Subscore „WORMS Knochenmarködem PAT“ dar: Bei 50%

der Patienten der MIXED Gruppe, bei 90% der Patienten der MACT Gruppe und bei 45.5% der Patienten der MPFL Gruppe war ein retropatellares Knochenmarködem präoperativ vorhanden. Postoperativ waren die Knochenmarködeme bei der Gruppe MACT und MPFL reduziert (Progress-Punktwert -0.59 bzw. -0.40), wohingegen in der MIXED Gruppe eine deutliche, nicht signifikante Zunahme an Knochenmarködemen über die Zeit zu verzeichnen war (Progress-Punktwert +0.50). Dies führte dazu, dass bei diesen Patienten der „WORMS Knochenmarködem PAT“ postoperativ letztendlich hochsignifikant höher war gegenüber den anderen beiden Gruppen ( $p < 0.01$ ).

### 5.5.2 Quantitative Ergebnisse

Die global gemessenen T2-Relaxationszeiten ergaben in der MIXED Gruppe einen Wert von 33.97 (range 29.63 - 40.44, SD  $\pm$  2.79), in der MACT Gruppe 35.47 (range 30.45 - 41.50, SD  $\pm$  3.11) und in der MPFL Gruppe einen Wert von 31.13 (range 25.26 - 37.73, SD  $\pm$  3.14). Die Werte der MIXED bzw. der MACT Gruppe waren dabei hochsignifikant höher verglichen mit der MPFL Gruppe, siehe Abbildung 5.18.

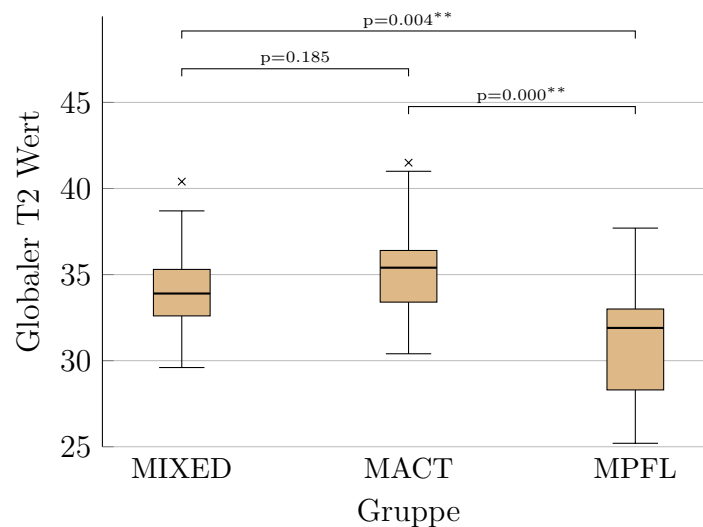


Abb. 5.18: Globaler T2 Wert

Die globalen T1rho Werte lagen bei der MIXED Gruppe bei 41.08 (range 35.41 - 45.75, SD  $\pm$  3.35), bei der MACT Gruppe bei 40.73 (range 38.05 - 45.44, SD  $\pm$  2.28) und bei der MPFL Gruppe bei 39.33 (range 33.30 - 43.06, SD  $\pm$  2.62). Diese Werte unterschieden sich zwischen den Gruppen nicht signifikant, zwischen der MIXED und der MPFL Gruppe zeigte sich mit  $p = 0.097$  zumindest ein statistischer Trend, siehe Abbildung 5.19.

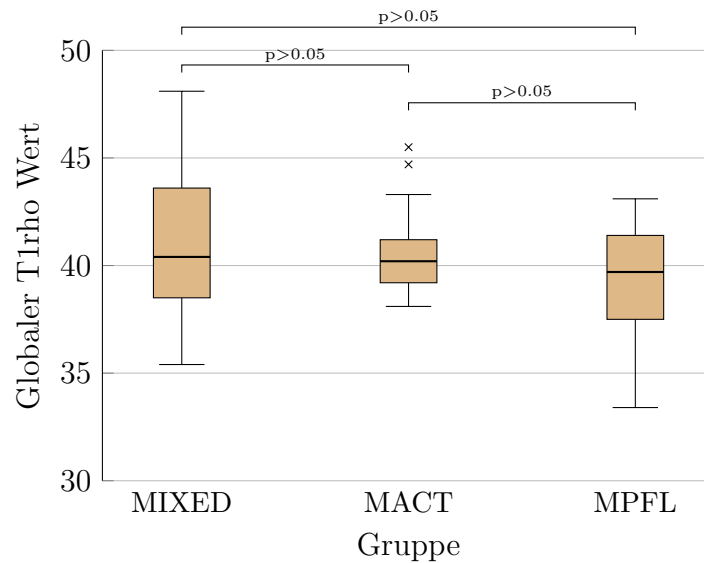


Abb. 5.19: Globaler T1rho Wert

In den einzelnen Knieregionen zeigten sich hinsichtlich der T2 Werte ebenso wie im Globalscore signifikante Unterschiede bzw. ein statistischer Trend der MIXED und MACT Gruppen gegenüber der MPFL Gruppe. Bei den T1rho Werten ergaben sich nur vereinzelt Signifikanzen bzw. Trends.

Tabelle 5.3 zeigt die Total-Werte und die Werte der einzelnen Regionen aller Gruppen mit den jeweiligen Signifikanzwerten zwischen den Gruppen im Mann-Whitney-Test.

Tab. 5.3: Quantitative MR Bildgebung aller Gruppen, Dickgedruckte Werte zeigen Signifikanz ( $p < 0.05$ ), mit Stern markierte Werte zeigen Hochsignifikanz ( $p < 0.01$ ) und kursive Werte zeigen statistische Trends ( $p < 0.10$ )

Par.	Gr.	Global	MIXED	MACT	MPFL	p-Werte		
						MIXED vgl. MACT	MIXED vgl. MPFL	MACT vgl. MPFL
<b>T2</b>								
Global		33.0±3.5	34.0±2.8	35.5±3.1	31.1±3.2	0.185	<b>0.004*</b>	<b>&lt;0.001*</b>
Patella		34.9±3.9	36.7±5.2	35.7±2.4	33.5±3.1	0.974	<b>0.016</b>	<b>0.015</b>
Trochlea		34.7±4.8	35.9±4.4	37.5±4.6	32.5±4.1	0.233	<b>0.010</b>	<b>0.002*</b>
MFC		35.8±4.2	36.2±3.2	38.7±4.3	34.1±4.0	0.136	<i>0.064</i>	<b>0.001*</b>
LFC		36.2±4.1	36.7±2.4	38.8±4.3	34.5±4.2	0.128	<i>0.077</i>	<b>0.006*</b>
MT		28.6±4.2	29.7±4.2	31.3±3.3	26.5±3.5	0.164	<b>0.018</b>	<b>&lt;0.001*</b>
LT		27.8±4.1	28.7±3.5	30.9±3.2	25.6±3.6	0.197	<b>0.006*</b>	<b>&lt;0.001*</b>
<b>T1rho</b>								
Global		40.1±2.9	41.1±3.4	40.7±2.3	39.3±2.6	0.970	<i>0.097</i>	0.202
Patella		46.6±4.3	47.8±4.2	45.6±4.3	46.4±4.3	0.119	0.199	0.590
Trochlea		46.9±7.6	46.9±9.0	49.0±4.7	45.9±7.7	0.621	0.619	0.249
MFC		42.8±5.0	43.2±6.1	44.7±5.1	41.8±4.2	0.425	0.199	<i>0.086</i>
LFC		43.6±4.1	44.1±4.4	45.9±4.0	42.2±3.6	0.447	0.130	<b>0.013</b>
MT		31.0±5.0	33.1±4.6	30.0±3.8	30.1±5.4	<b>0.044</b>	<b>0.049</b>	0.883
LT		30.0±4.5	31.3±4.8	29.2±3.3	29.5±4.8	0.138	0.171	0.731

Abbildung 5.20 illustriert beispielhaft anhand der drei bereits oben abgebildeten Patienten unserer Studie segmentierte Knie mit T2 und T1rho Werten, wobei diese farbskaliert wurden.

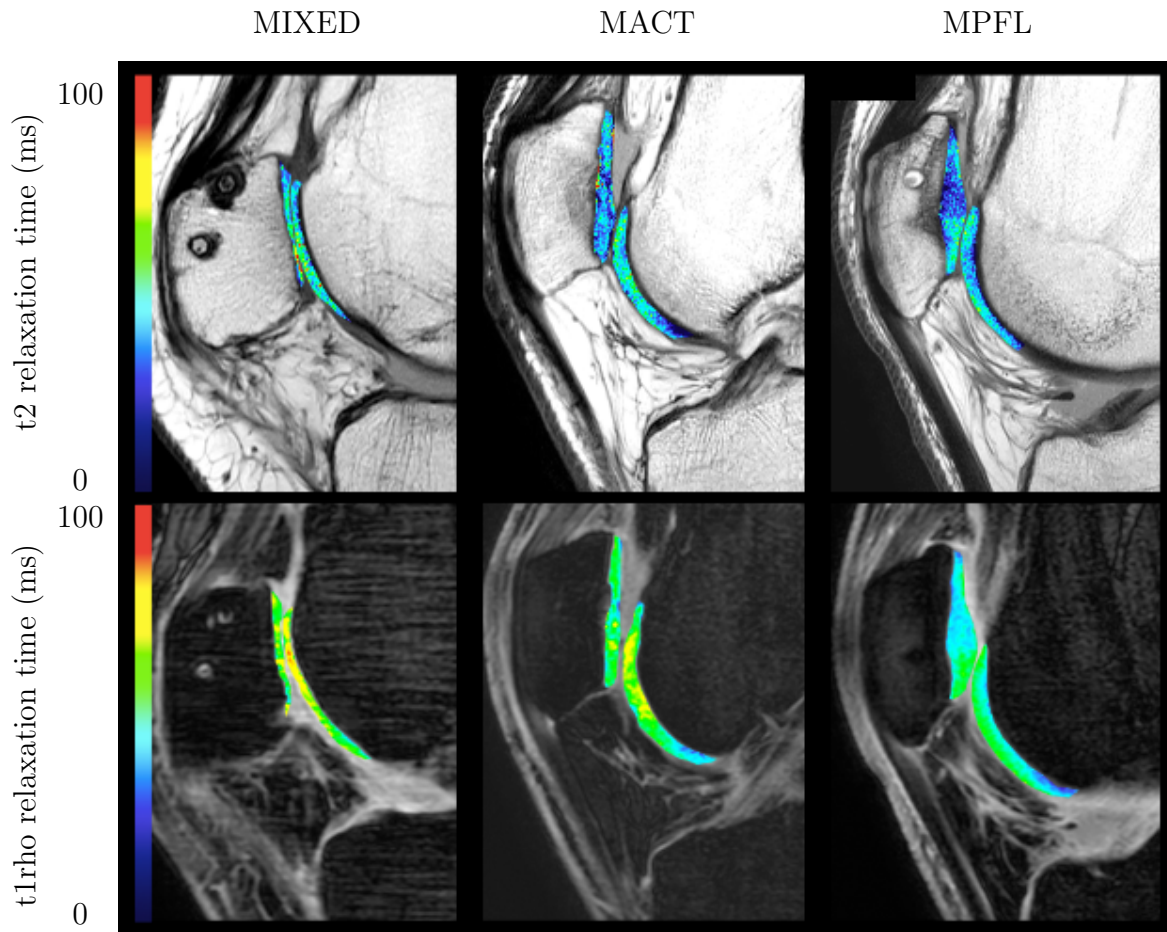


Abb. 5.20: Farbskalierte quantitative Messungen an Patella- und Trochleaknorpel. Rot signalisiert hohe Werte mit potenziell degenerierter Knorpelzellmatrix. Niedrige Werte sind blau dargestellt und indizieren eine intakte Knorpelzellmatrix.

Obere Reihe: Farbkodierte T2 Mapping Relaxationswerte. Die globalen T2 Werte lagen in der MIXED und MACT Gruppe signifikant höher gegenüber der MPFL Gruppe, was an einem höheren Anteil an roter und gelber Färbung zu erkennen ist.

Untere Reihe: Farbkodierte T1rho Mapping Relaxationswerte. Die globalen T1rho Werte unterschieden sich zwischen den Gruppen nicht signifikant.

## 5.6 Korrelationsanalysen

Die Stärke der Zusammenhänge in den Pearsons-Korrelationen wurde nach Fowler eingeteilt, in unseren Analysen lagen mit R-Werten zwischen 0.20 und 0.39 jeweils schwache, signifikante Zusammenhänge vor. (Fowler, Cohen et al. 2013)

Bei der Untersuchung korrelierten das Ausmaß des Ergusses und die Kompartimentbefunde schwach negativ mit allen klinischen Scores. ( $R = -0.37$ ,  $p = 0.023$ ) Krepitationen retropatellar korrelierten signifikant mit dem postoperativen Subscore „WORMS Knorpelsignal PAT“. ( $R = 0.25$ ,  $p = 0.04$ ) Ein eingeschränkter passiver Bewegungsumfang korrelierte bei allen Patienten und auch einzeln bei nur den MPFL Patienten betrachtet hochsignifikant mit dem postoperativen WORMS Gesamtscore. ( $R = 0.42$ ,  $p < 0.01$ ) Die klinischen Scores des KOOS, Lysholm, Tegner und Cincinnati-Scores konnten außerdem mit dem WORMS Gesamtscore zum Zeitpunkt t2 jeweils signifikant korrelieren. ( $p < 0.05$ ) Eine Korrelation zwischen einer veränderten Patellastellung postoperativ und bildgebenden oder klinischen Scores konnte nicht errechnet werden. Bei den quantitativen Werte konnten nur die T2-Globalwerte jeweils mit den klinischen Scores KOOS, Tegner und Cincinnati signifikant korrelieren, bei den T1rho Werten ergaben sich keine Korrelationen, siehe dazu Abbildung 5.21, Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23.

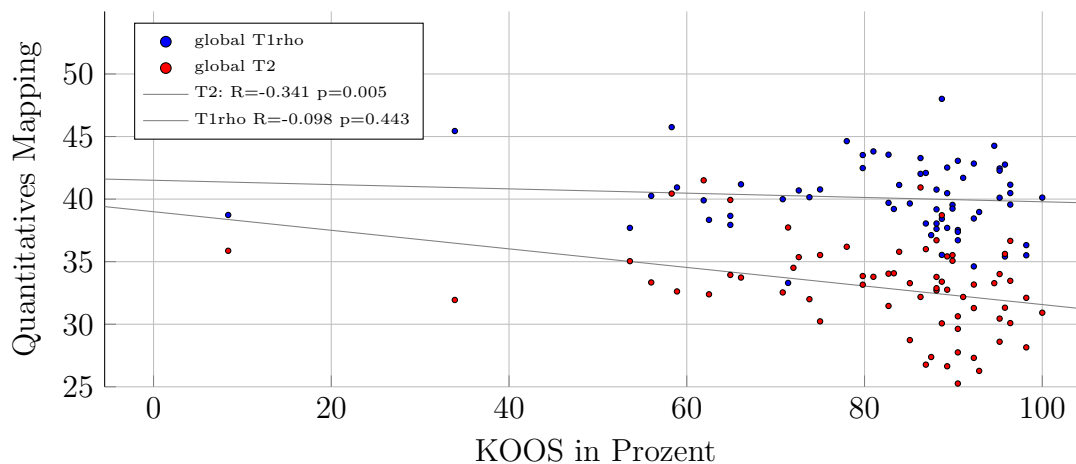


Abb. 5.21: Korrelation KOOS

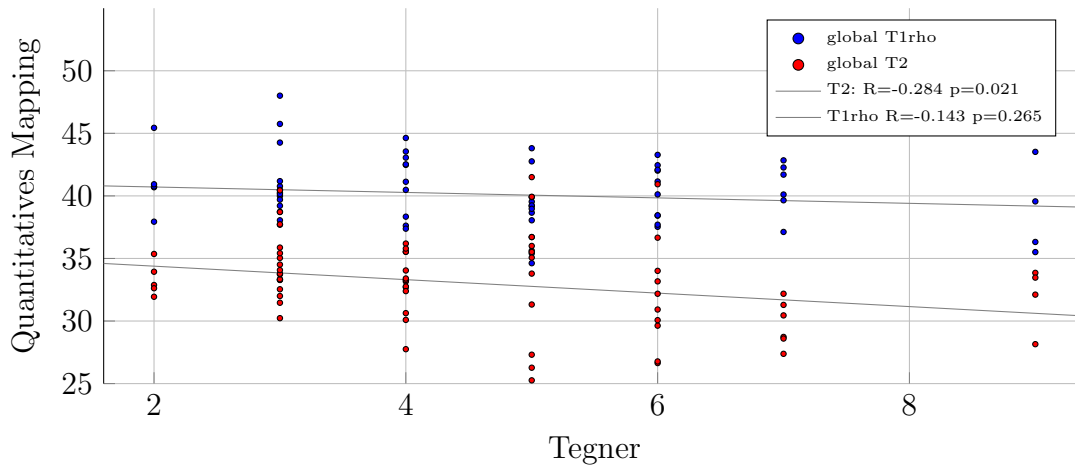


Abb. 5.22: Korrelation Tegner

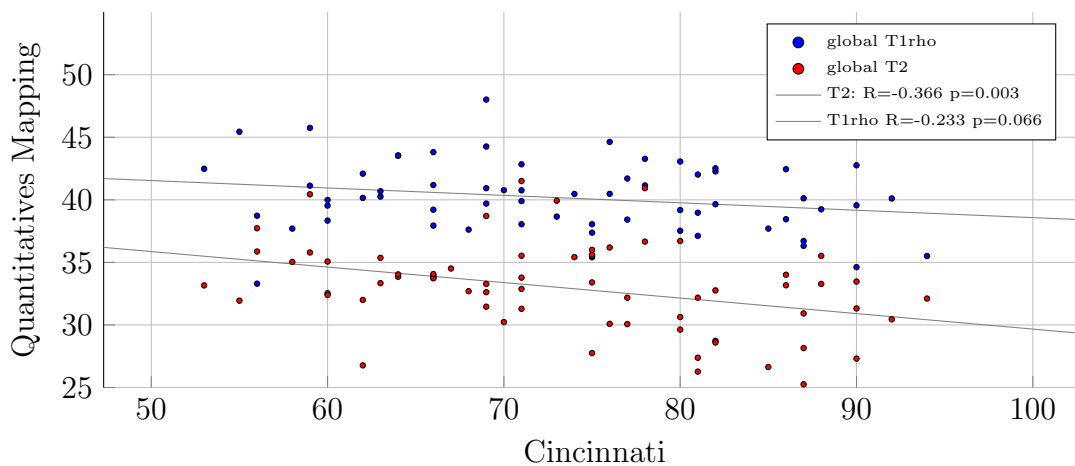


Abb. 5.23: Korrelation Cincinnati

Außerdem wurde die Korrelation der radiologischen Evaluation untereinander getestet. Der postoperative WOMRS Gesamtscore korrelierte signifikant mit den T2 Werten der Patella ( $R = 0.260$ ,  $p = 0.035$ ) und den T1rho Werten der Patella ( $R = 0.318$ ,  $p = 0.011$ ). Beim postoperativen „WOMRS Knorpelsignal PAT“ Subscore zeigte sich ein ähnliches Bild: Dieser korrelierte hochsignifikant mit den T1rho Werten der Patella ( $R = 0.373$ ,  $p = 0.003$ ), bei den T2 Werten der Patella ergab sich mit  $R = 0.238$  und  $p = 0.054$  ein statistischer Trend.

Sowohl der postoperative „WOMRS Knochenmarködem gesamt“ als auch der „WOMRS Knochenmarködem PAT“ korrelierten je signifikant mit den Patellawerten, sowohl im T2 Mapping ( $R = 0.365$ ,  $p = 0.003$  bzw.  $R = 0.453$ ,  $p = 0.000$ ) als auch bei den T1rho Messungen ( $R = 0.252$ ,  $p = 0.046$  bzw.  $R = 0.397$ ,  $p = 0.001$ )



Beim MOCART Score konnte weder im Gesamt- noch in den Subscores eine Korrelation mit den quantitativen Werten ermittelt werden.

## 5.7 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Folgende Punkte waren die bedeutendsten Ergebnisse dieser Arbeit:

- Über die Hälfte aller Patienten konnten zum Ausgang-Aktivitätslevel zurückkehren, wohingegen im Schnitt weniger als die Hälfte aller Patienten zum Ausgangs-Funktionslevel zurück kehren konnten. Hinsichtlich der postoperativen Aktivitätsrückkehr war kein Unterschied zwischen den Gruppen, bei der Funktionalität standen je ca. 47% der Patienten aus der MIXED und MACT Gruppe mit Rückkehr zum Ausgangs-Funktionslevel nur 34.4% Funktionsrückgewinnern bei der MPFL Gruppe gegenüber. Gemessen anhand der Numerischen Rankingskala, war in allen Gruppen im Mittel eine signifikante subjektive Funktionsverschlechterung im Zeitverlauf zu verzeichnen.
- Es ergab sich ein signifikant schlechteres Ergebnis im Cincinnati Score bei der MIXED Gruppe gegenüber der MPFL Gruppe. Bei allen weiteren subjektiven Scores (Kujala, KOOS, IKDC subjektiv, Lysholm, Tegner) waren die Unterschiede zwischen den Gruppen nicht signifikant, jedoch zeigte sich ein ähnlicher Trend: Die MPFL Gruppe erreichte jeweils im Schnitt den besten Wert, die MIXED und MACT Gruppe erzielten einander ähnliche, schlechtere Werte mit dabei tendenziell etwas besserem Abschneiden der MACT Gruppe.
- Bei der klinischen Untersuchung im Rahmen des objektiven IKDC 2000 erreichte die MACT Gruppe den besten Abschlussgrad, gefolgt von der MIXED und der MPFL Gruppe. Dies war maßgeblich durch das schlechtere Abschneiden der bandrekonstruktiven Gruppen bei der Ligament- und Beweglichkeitsuntersuchung geprägt. Die weiteren Untersuchungskategorien einzeln betrachtet, präsentierten die Patienten der MIXED Gruppe jeweils die gravierendsten Einschränkungen und somit schlechtesten Untersuchungsergebnisse.
- Kein Patient erlitt eine Relaxation. Bei mehr als der Hälfte (56.9%) aller mit MPFL-Rekonstruktion versorgten Patienten konnte keine subjektive Luxationsangst, gemessen anhand des Apprehension-Zeichens, mehr nachgewiesen werden. Sowohl ein persistierendes Apprehension-Zeichen als auch das J-sign korrelierten hochsignifikant mit dem Grad der Trochleadysplasie.
- Das Outcome des MOCART Score war mit durchschnittlich 68.4 Punkten insgesamt zufriedenstellend. Die MIXED Gruppe zeigte sowohl präoperativ im ICRS Score den schwersten Knorpelschaden, als auch postoperativ im MOCART Score das signifikant schlechtere Knorpeltransplantat-Outcome verglichen mit der MACT Gruppe.

- Beim semiquantitativen WORMS Score konnten alle Gruppen den WORMS Gesamtscore zum Zeitpunkt t2 verbessern und ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielen. Dennoch waren zum Zeitpunkt t2 sowohl der WORMS Gesamtscore, der „WORMS Knorpelsignal gesamt“ als auch die Subscores „WORMS Knorpelsignal PAT“ und „WORMS Knochenmarködem PAT“ bei der MIXED Gruppe signifikant schlechter gegenüber der MACT und MPFL Gruppe.
- Die Werte aus dem quantitativen T2 Mapping lagen sowohl global als auch in den meisten einzelnen Knieregionen je bei der MIXED und der MACT Gruppe signifikant höher verglichen mit der MPFL Gruppe bzw. präsentierten zumindest einen statistischen Trend in gleicher Richtung. Bei den T1rho Werten zeigten sich nur vereinzelt Signifikanzen bzw. Trends.
- Es besteht eine schwache, signifikante Korrelation zwischen den klinischen Scores und den Untersuchungsergebnissen des objektiven IKDC, dem postoperativen WORMS Gesamtscore und den globalen T2-Werten. Bei den radiologischen Evaluationen untereinander wiederum korrelierte der WORMS Gesamtscore mit beiden an der Patella gemessenen quantitativen Werten, die Parameter „WORMS Knorpelsignal PAT“ und „WORMS Knochenmarködem PAT“ zeigen ebenfalls positive, signifikante Korrelationen mit den quantitativen Werten.

# Kapitel 6

## Diskussion

Bei den vielfältigen aktuell verwendeten Möglichkeiten zur operativen Versorgung einer Instabilität mit MPFL-Ruptur und/oder eines retropatellaren Knorpelschadens lag es nahe, die OP-Techniken der MPFL-Rekonstruktion und der MACT und insbesondere deren Kombination im Outcome anhand klinischer und radiologischer Parameter zu evaluieren. Weiterhin kontrovers diskutiert wird, ob retropatellare Knorpelschäden eine Prädisposition für die Entwicklung einer generalisierten patellofemorale OA sind und, ob eine knorpelchirurgische Operation dem vorbeugen kann. (Arendt et al., 2016; Spahn et al., 2016) Einerseits schrieben Salonen et al., dass auch eine einmalige traumatische Luxation mit konservativer Behandlung schon zu langfristiger Arthrose führen kann, andererseits berichteten Vollnberg et al. von einer starken Korrelation zwischen MRT-bildgebend darstellbarer Prävalenz von patellofemorale OA und der Anzahl der Patellaluxationen. (Salonen et al., 2017; Vollnberg et al., 2012) Eine veränderte, medialisierte Lage mit geringerer Auflagefläche der Patella, wie in Arbeiten von Elias et al. durch Tuberositasmedialisierung oder technische Fehler bei der MPFL-Rekonstruktion, führten sogar zu unphysiologisch hohen patellofemorale Druckverhältnissen und verfrühter OA. (Elias and Cosgarea, 2006; Elias et al., 2004)

Schon in einer der ersten Studien zum Langzeit Follow-Up nach MPFL-Rekonstruktion postulierten Nomura et al. jedoch, dass diese Therapie Reluxationen vermeiden und die Progression einer OA verlangsamen oder sogar verhindern kann, da nach 12 Jahren bei nur 12% der Patienten eine moderate patellofemorale OA vorzuweisen war. (Nomura et al., 2007) Auch den Knorpelersatztherapien wurde zugeschrieben, den Beginn einer OA verlangsamen zu können. (Jungmann et al., 2019) Die Behandlung speziell retropatellar lokalisierter Knorpeldefekte jedoch stellte sich nach wie vor als Schwierigkeit dar. (Burger et al., 2021; Mehl et al., 2015; Niemeyer et al., 2007; Noyes and Barber-Westin, 2013; Rath et al., 2017) Eine patellare Instabilität bzw. ein Malalignment sollte demnach adressiert werden, ohne dabei den Druck und somit die Gefahr einer Arthrose im Patellofemoralgelenk zu erhöhen. Dies ist für die Einheilung des Knorpeltransplantats unabdingbar. (Niemeyer et al., 2016a)

Bei Mehl et al. ergab die Auswertung verschiedener Studien hinsichtlich klinischer Er-

gebnisse sogar teilweise eine Überlegenheit kombinatorischer Eingriffe gegenüber isolierter retropatellarer Knorpeltherapie. (Mehl et al., 2015) Eine aktuelle Veröffentlichung von Burger et al. untersuchte 35 Studien zu retropatellarer Knorpelchirurgie. Es konnte demonstriert werden, dass auch komplexe Kombinationsoperationen mit Relignment gegenüber isolierter retropatellarer Knorpelchirurgie gute klinische und subjektive Ergebnisse hervorbrachten. (Burger et al., 2021) Unsere Studie lieferte ebenfalls ansprechende Outcomes, konnte jedoch die Eingangshypothesen der Unterlegenheit der kombinierten Operation in einigen Fragestellungen bestätigen. Die verschiedenen Ergebnisse werden im Folgenden ausführlich diskutiert.

## 6.1 Diskussion Material

Um mögliche Einflussfaktoren auf das Outcome der einzelnen Gruppen minimieren zu können, wurden strenge Ein- und Ausschlusskriterien gewählt. Dadurch ist die Patientenzahl besonders in Gruppe 1 und 2 zwar relativ gering, dies deckte sich aber mit anderen, vielfach zum Vergleich herangezogenen und in Tabelle 6.1 genauer beschriebenen Studien. Diese geringe Patientenzahl lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass es sich bei Gruppe 1 um eine sehr komplexe, schwere Kombinationsverletzung handelte und die Therapie der MACT mit Novocard 3D nur an spezialisierten Kliniken durchgeführt wurde.

Wie relevant eine sorgfältige und kritische Auswahl der Ein- und Ausschlusskriterien sein kann, begründen vielfältige und verschiedene Einflussfaktoren das postoperative Outcome nach Knorpeltransplantation oder MPFL-Rekonstruktion. (Niemeyer et al., 2012; Noyes and Barber-Westin, 2013) Die Studie von Mehl et al. erläuterte die Wichtigkeit einiger Parameter der patellofemorale Geometrie bezüglich der retropatellaren Knorpelheilung. Eine flache oder dysplastische Trochlea oder eine patella alta waren bei Patienten mit isolierten Knorpelschäden gegenüber der Kontrollgruppe signifikant häufiger zu finden und waren somit relevant für die präoperative Planung. (Mehl et al., 2016) 15 unserer Patienten waren bereits voroperiert, es konnte aber sowohl bei den vier obengenannten operativen Arten der Stabilisierung, als auch den knorpelchirurgischen Voroperationen davon ausgegangen werden, dass diese keinen wesentlichen Einfluss auf das Outcome unserer Operationen nahmen. Um eine Verzerrung der Ergebnisse durch degenerativ bedingte, generalisierte Gelenkarthrose und altersbedingt schlechteren Knorpeltransplantat-Einheilungsmetabolismus zu verhindern, wurde die Altersgrenze auf 45 Jahre gesetzt; die Firma TETEC empfahl ein Maximalalter bei der Transplantation von ca. 50 Jahren. Der Altersschnitt von  $21.8 \pm 5.6$  Jahren bei der MIXED Gruppe und von  $22.4 \pm 6.2$  Jahren der MPFL Gruppe war in Übereinstimmung mit der Arbeit von Siebold et al. bzw. von Schneider et al. mit 23.0 - 24.4 Jahren. (Schneider et al., 2016; Siebold et al., 2014) Gegenüber beispielsweise der Arbeit von Niethammer et al. mit einem Altersschnitt von  $32.9 \pm 9.4$  Jahren oder der Arbeit von Pietschmann et al. mit durchschnittlich  $35.8 \pm 11.3$  Jahren (Niethammer et al., 2014; Pietschmann et al., 2012) war unser Altersschnitt von  $24.4 \pm 7.4$  Jahren der MACT Gruppe deutlich niedriger. Somit konnte davon ausgegangen werden, dass sich auch hier keine altersbedingten Verzerrungen ergaben.

Im Rahmen des durchschnittlich jungen Alters war ein aktiver Lebenswandel anzunehmen, was mit einer höheren Rate an postoperativen Knieverletzungen oder weiteren Begleitverletzungen einhergehen könnte und somit die Zahl der eingeschlossenen Patienten weiter verringert haben könnte. Die zum Nachuntersuchungszeitpunkt wegen Begleit- und Anschlussoperationen von der Studie exkludierten 535 Patienten hatten zum Teil schwerwiegende Verläufe im Rahmen von Polytraumata oder zeigten zu Re-OPs führende, nicht regelhafte Rehabilitationsverläufe. Diese Patienten hätten mutmaßlich schlechtere klinische Ergebnisse, maßgeblich aufgrund ihrer Begleitverletzungen und weniger aufgrund der für unsere Studie relevanten, gruppenbezogenen Verletzung erzielt.

Auch aufgrund der eher niedrigen Patientenzahlen war bei der Analyse der Ergebnisse für die einzelnen Gruppen keine Normalverteilung zu beobachten. Unsere Nachuntersuchungen sollten 24 Monate postoperativ erfolgen, das Follow-Up hatte tatsächlich aber eine große Streuung von 15-44 Monaten. Besonders bei Gruppe 2 wich der Nachuntersuchungszeitraum vereinzelt deutlich von den angestrebten 2 Jahren ab, da die Fallzahlen an operierten Patienten überhaupt niedrig waren. Bei einem Follow-Up Intervall von deutlich weniger als 24 Monaten, das bei einigen wenigen unserer Patienten vorlag, gilt zu beachten, dass die endgültige Gewebequalität des Knorpeltransplantats laut der Studie von Roberts et al. aufgrund eines längeren Umbauvorganges nicht vor 24 Monaten postoperativ vorlag. (Roberts et al., 2001) Unser zumeist über 24 monatiges postoperatives Intervall mit somit großer Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen der endgültigen Gewebequalität kann daher durchaus als Stärke dieser Studie gesehen werden.

Nicht bei allen Patienten konnte eine vollständige Erhebung des radiologischen Status erfolgen: 22/68 Patienten konnten keine präoperativen Aufnahmen zur longitudinalen Auswertung im WOMS Score vorlegen. Die MR-Untersuchung konnte bei zwei Patientinnen aufgrund von zum Zeitpunkt der Terminplanung unvorhersehbaren Kontraindikationen (Adipositas permagna, Kupferspirale) nicht durchgeführt werden. Da der MOCART Score zur Evaluation von Knorpelersatztherapien diente, standen für diese Auswertung grundsätzlich nur 35 Patienten zur Auswahl. Durch die fehlenden Werte muss ein Bias angenommen und beim Vergleich zwischen den Gruppen bedacht werden.

## 6.2 Diskussion OP-Methoden

Die bei unseren Gruppen 1 und 2 verwendeten MACT der Firma TETEC auf Kollagen-Typ I Matrices ist eine Weiterentwicklung der 1994 eingeführten ACT und stellt eine der modernsten Therapien dar. In der Einleitung wurden bereits Vorteile der dritten gegenüber der ersten Generation genannt. Zwar konnte eine generelle Überlegenheit der dritten Generation der ACT als matrixgestütztes Verfahren in Studien wie der von Zeifang et al. oder Niemeyer et al. nicht direkt nachgewiesen werden. (Niemeyer et al., 2008; Zeifang et al., 2010) Jedoch erkannten beispielsweise Basad et al. einen deutlichen Fortschritt in

der dritten Generation der ACT sowohl für Patient als auch Arzt. (Basad et al., 2010) Die Anwendung sei einfacher, schneller und weniger invasiv, was auch durch unsere Operateure bestätigt wurde.

Im Vergleich mit anderen knorpeltherapeutischen Verfahren ist die Literatur nicht ganz einheitlich: So scheint eine ACT bei Peterson et al. nur teilweise effektiver als beispielsweise die Methode der Mikrofrakturierung (Peterson et al., 2002), bei Basad et al. war die MACT Technik 2 Jahre postoperativ bei isolierten posttraumatischen Knorpeldefekten einer Mikrofrakturierung eindeutig überlegen, genauso wie bei Crawford et al. (Basad et al., 2010; Crawford et al., 2012) Auch gegenüber der Mosaikplastik war die ACT Methode überlegen. (Bentley et al., 2003)

Hinckel et al. und Solheim et al. kamen zu dem Schluss, dass insbesondere patientenspezifische Faktoren relevant sind bei der Auswahl der Technik. (Hinckel et al., 2020; Solheim et al., 2018)

Das grundsätzliche Abschneiden der ACT ist in den verschiedenen Studien unterschiedlich. Dies scheint auch der jeweiligen Lokalisation geschuldet zu sein, da die Ergebnisse einer ACT je nach Region unterschiedlich ausfallen: Während an den Femurkondylen vorwiegend gute Ergebnisse dokumentiert sind, fallen die Ergebnisse am retropatellaren Knorpel unterschiedlich aus (Gomoll et al., 2014; Niemeyer et al., 2007, 2008; Noyes and Barber-Westin, 2013; Rath et al., 2017; Solheim et al., 2018) : Die erste Pilotstudie von Brittberg et al. hatte eine grundsätzliche Erfolgsquote von nur 28.6%. (Brittberg et al., 1994) Einige Jahre später konnten Peterson et al. bei 17 retropatellar mit ACT behandelten Patienten immerhin schon 65% Erfolgsquote verzeichnen. (Peterson et al., 2002) Bei Bentley et al. erlitten alle 5 retropatellar behandelten Patienten ein Transplantatversagen. (Bentley et al., 2003)

Autoren wie Niemeyer et al., die Patienten mit patellofemoralem Malalignment exkludierten oder Minas et al., welche Patienten mit retropatellaren, trochlearen und kombinierten Läsionen untersuchten, zeichneten in ihren Veröffentlichungen ein besseres Bild mit 67.1% bzw. 71% normalen oder fast normalen klinischen Ergebnissen. (Minas and Bryant, 2005; Niemeyer et al., 2008) Vanlauwe et al., ebenfalls mit einem Patientengut aus retropatellaren, trochlearen und kombinierten Läsionen, konnten sogar 84% Erfolgsquote nachweisen. (Vanlauwe et al., 2012). Eine aktuelle Studie aus 2019 von Niemeyer et al. führte eine klinische Subgruppenanalyse aus einer randomisiert kontrollierten Studie durch und verglich femorale und patellare ACT. Es resümierte letztendlich eine sehr hohe Erfolgsrate von über 80 Punkten im KOOS Score an beiden Lokalisationen, wobei die patellare ACT sogar etwas besser abschnitt. (Niemeyer et al., 2019) Hinckel et al. kamen zu einem ähnlichen Ergebnis. (Hinckel et al., 2020) Diesen Aufwärtstrend bestätigten auch die Ergebnisse unserer Studie.

Der Ersatz eines rupturierten MPFLs mittels double-bundle Gracilis-Sehne in Aperture-Fixation stellte zum Zeitpunkt des Follow-Ups ein in der Sportorthopädie des Klinikums rechts der Isar etabliertes und modernes Verfahren dar. Auch generell kann die Rekonstruktion als aktueller Goldstandard gesehen werden (Frosch et al., 2011; Irger et al., 2020; Previtali et al., 2020; Sanchis-Alfonso, 2016; Schmeling, 2010; Zimmerer et al., 2018), welche nicht nur die geringsten Relaxationsraten vorwies, sondern auch wenig Progression einer

OA am Knie provozierte. (Nomura et al., 2007) Es existiert eine Vielzahl an verschiedenen Rekonstruktionstechniken, die sich in oft nur kleinen Details bezüglich Transplantatwahl und -verarbeitung, Zugangsart zum Operationsgebiet, Transplantatfixationsmethode sowie -lokalisation und weiteren Entitäten unterscheiden und in der Literatur bereits ausgiebig diskutiert wurden. Als Ausblick zur in dieser Studie verwendeten Technik wurde beispielsweise in einer sehr aktuellen Studie von Mehl et al. eine neue Weiterentwicklung der MPFL Aperture-Technik vorgestellt, oder aber im Review von Migliorini et al. eine Überlegenheit des Semitendinosus-Sehentransplantates gegenüber dem Gracilis-Transplantat nachgewiesen. Dies verdeutlicht das schnelle Voranschreiten der Wissenschaft auf diesem Themengebiet, wodurch die Methoden unserer Studie schon wieder überholt sein könnten. (Mehl et al., 2020; Migliorini et al., 2020)

Speziell die in unserer Studie verwendete beidseitige Aperture-Fixation in double-bundle Technik mit Gracilis-Transplantat hat den Vorteil, dass sofort der volle Bewegungsumfang wiederhergestellt ist. (Schöttle et al., 2010) Eine Studie mit in vitro Messungen nach MPFL-Rekonstruktion konnte aber auch beweisen, dass die retropatellaren Drücke bei statischem MPFL höher waren als bei gesunden bzw. dynamischen Varianten. (Rood et al., 2015) Nicht nur aufgrund dieser Ergebnisse und den Ergebnissen unserer Studie bleibt weiterhin zu diskutieren, in welchem Maße eine MPFL-Rekonstruktion somit schädigende Auswirkungen auf den Knorpel hat.

Unter anderem eben diese Druckerhöhung kann laut unserer Hypothese besonders bei der Kombinationsoperation aus MPFL-Rekonstruktion und einer retropatellaren MACT das Outcome verschlechtern. In der Literatur finden sich einige Arbeiten, die eine patellastabilisierende Operation mit einer knorpelregenerativen Therapie kombinierten, wobei meist distale Realignment-Therapien angewandt werden: Bei Gigante et al. und Gillogly et al. wurden Patienten mit patellofemoralem Malalignment eingeschlossen und einer Antero-medialisierung der Tibia in Kombination mit einer MACT unterzogen. Die Zufriedenheits-erhebungen im 3-Jahres-Follow-Up ergaben 93% bzw. 83% Erfolgsquote. (Gigante et al., 2009; Gillogly and Arnold, 2014) Bei Henderson et al. wurde beim Vergleich von isolierter retropatellarer ACT gegenüber ACT mit distalen oder proximalen Realignment Therapien festgestellt, dass die kombinierte Gruppe mit 86% Erfolgsquote im Cincinnati-Score besser abschnitt als die isoliert behandelten Patienten mit 55% Erfolg. Die Arbeitsgruppe folger- te daraus, dass die Durchführung einer Realignment-Therapie sogar bei Patienten, welche eigentlich kein interventionsbedürftiges Malalignment hatten, zu einer besseren Trans- plantateinheilung verhelfen könnte. (Henderson and Lavigne, 2006) Im Gegensatz dazu konnte die Veröffentlichung von Vanlauwe et al. nicht bestätigen, dass eine Entlastung der Knorpelregion mittels Realignment zum besseren Knorpeloutcome führte, wenn auch gesamt ein gutes Ergebnis erzielt wurde. (Vanlauwe et al., 2012) Bei der Arbeit von Peterson et al. wurde eine retropatellare ACT selektiv nur bei entsprechender Indikation mit einer Realignment-Therapie kombiniert, die Gesamterfolgsquote von isolierten und kombinier- ten Operationen lag bei 76%. (Peterson et al., 2002) Ebenso eine bedarfsgerechte Addition einer patellastabilisierenden Operation zu einer isolierten retropatellaren Periost-ACT er- hielten einige Patienten in der Studie von Vasiliadis et al. Die durchgeführte Untersuchung

im Langzeit Follow-Up nach 12.3 Jahren führten zu mit knorpeladressierenden Eingriffen vergleichbaren Ergebnissen. (Vasiliadis et al., 2011)

Beim systematischen Review von Burger et al. wurde ein Fokus auf vorliegende Pathologien der patellofemorale Stabilität gelegt. Es wurde versucht, den Einfluss eines additiven patellastabilisierenden Eingriffs zur retropatellaren Knorpelchirurgie zu messen. Aufgrund der heterogenen Patientenkohorten war eine eindeutige statistische Auswertung nicht möglich. (Burger et al., 2021)

Die Ergebnisse und Tendenzen vorhandener Studien sind unterschiedlich, eine wissenschaftliche Fokussierung auf die patellofemorale Anatomie scheint zunehmend essentiell. Zwar sind die genannten Studien im Design teilweise heterogen, aber weisen dennoch ein unserer Studie vergleichbares Patientengut mit ähnlichen Verletzungsmustern auf, weswegen diese Studien in Teilaspekten zum Literaturvergleich herangezogen wurden. Gleichzeitig wurde jedoch klar, dass weitere wissenschaftliche Untersuchungen der Kombinationsverletzung vonnöten und bei der Auswertung unserer MIXED Gruppe eine weite Streuung der Ergebnisse zu erwarten war. Eine wissenschaftliche, klinische, qualitativ und quantitative radiologische Nachuntersuchung an einem Patientengut, welches vergleichbar mit unserer MIXED Gruppe mit Kombinationoperation aus MPFL-Rekonstruktion mit retropatellarer MACT ist, hat bisher nicht stattgefunden, weswegen unsere Studie in dieser Hinsicht einzigartig ist.

### 6.3 Diskussion klinischer und radiologischer Evaluationsmethoden

Die klinische Evaluation zum Nachuntersuchungstermin wurde durch einen einzigen Untersucher durchgeführt. Um einem möglicherweise resultierendem Bias vorzubeugen, wurde mehrere klinische Scores, welche sowohl für die Evaluation von MACT als auch MPFL-Rekonstruktionen etabliert sind und häufig Verwendung in Vergleichsliteratur fanden, verwendet. (Marlovits et al., 2006; Niemeyer et al., 2008; Schneider et al., 2016) Nicht alle Scores wurden speziell für Bandrekonstruktionen, Knorpeltransplantationen oder gar deren Kombination entwickelt, wurden aber trotzdem an je allen drei Gruppen angewandt, sodass die Ergebnisse vor allem in Zusammenschau aller Befunde gesehen werden sollten. Die Evaluation des Aktivitäts- und vor allem des Funktionslevels wurde mit aufgenommen, um neben den maßgeblich auf sportliche Funktion und Aktivität bezogenen Lysholm und Tegner-Scores auch Patienten abzubilden, die aufgrund persönlicher Präferenzen eher weniger oder keinen Sport betreiben. Bei einer reinen Fokussierung auf sportliche Aktivität muss insbesondere bei einem Patientengut mit PFI beachtet werden, dass diese oft langjährig bestand und sich somit eine gewisse auch nach der OP noch vorhandene Inaktivität der Patienten eingestellt haben könnte. Kritisch ist außerdem unsere größtenteils crossektionale klinische Auswertung der etablierten Scores zu sehen, da Roos et al. explizit darauf hinwies, dass die Aktivitätsevaluation im Tegner Score im longitudinalen Design die beste Aussagekraft hatte. (Roos et al., 2011) Eine longitudinale Evaluation wurde des-



halb in dieser Studie für das Aktivitäts- und Funktionslevels und die NRS in immerhin retrospektiver Bestimmung durchgeführt, eine reale longitudinale Messung zu zwei Zeitpunkten t0 und t2 erfolgte im Rahmen der bildgebenden Auswertungen.

Es gilt weiter zu bedenken, dass beispielsweise der IKDC Score ein rein subjektiver Fragebogen ist und es sich auch beim Lysholm Score um 95% subjektive Einschätzungen handelt, weswegen die Patienten zum selbstständigen Ausfüllen der Bögen in Ruhe und ohne Beeinflussung, beispielsweise durch Angehörige oder den Untersucher, animiert wurden. Die klinische Untersuchung wurde unter intermittierender Supervision eines erfahrenen Orthopäden durchgeführt, dennoch hängt die Technik vom Ausbilder und klinischen Erfahrungsstand ab und unterlag somit einer gewissen Subjektivität. Bei Abschlussgrad des objektiven IKDC wurden gemäß Autoren-Instruktion nur die letzten drei Kategorien gezählt, wonach schon ein einziger Wert in einer schlechten Kategorie das Gesamtergebnis eindeutig prägen konnte. (Irrgang et al., 2001)

Daher wurde die klinische Bewertung durch objektivere MRT Bildgebung mit standardisierter, (semi-)quantitativer Auswertung ergänzt. In den Arbeiten von Barr et al. und Van Dyck et al. schnitt ein 3T-Gerät im Vergleich zu einem 1,5T-Gerät bezüglich der Darstellung von Gelenkknorpelopathologien an Fußgelenken bzw. am Knie besser ab. Es lieferte sowohl eine bessere Bildqualität als auch eine deutlich höhere diagnostische Performance in der Darstellung von Knorpelverletzungen mit besserer Sensitivität von 90% gegenüber 87%. (Barr et al., 2007; Van Dyck et al., 2014) Auch unsere Bildgebung wurde mit einem 3T MRT-Gerät erstellt und lieferte ansprechende Bildqualität. Messungen mit potenziell noch stärkeren 7T-Geräten, insbesondere in den quantitativen Messungen, wären denkbar, sind aber aufgrund der aktuell noch seltenen Verfügbarkeit dieser Geräte von geringer klinisch nutzbarer Konsequenz. (Wyatt et al., 2015) Die Reproduzierbarkeit ähnlicher Befunde durch unterschiedliche Auswerter gilt bei der MRT-Bildgebung, beispielsweise gemessen anhand des qualitativen MOCART Scores, grundsätzlich als hoch. (Marlovits et al., 2006) In dieser Studie wurden die MRT-Bilder qualitativ von zwei auf muskuloskelettale Bildgebung spezialisierten Radiologinnen mit langjähriger Erfahrung in der Knorpelbildgebung verblindet ausgewertet. Zudem wurden zufällig ausgewählte Patienten zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten mit einem Abstand von einem Jahr von zwei Beobachtern je ein zweites Mal segmentiert und gemessen. Dies garantierte eine hohe Qualität unserer radiologischen Auswertungen.

Unsere quantitativen Sequenzen wurden bislang häufig zur frühen OA-Evaluation zumeist bei nativem, hyalinem Knorpel (Eckstein and Wirth, 2011; Jungmann et al., 2014; Link and Li, 2018; Matzat et al., 2013; Trattng et al., 2019), zunehmend auch zur Evaluation nach Knorpeltransplantationsverfahren verwendet. (Baum et al., 2013; Domayer et al., 2008; Eckstein and Wirth, 2011; Guermazi et al., 2015; Jungmann et al., 2014, 2019; Matzat et al., 2013; Rehnitz and Weber, 2015; Trattng et al., 2019) Da beide Aspekte postoperativ relevant sind und daher in die präoperative Entscheidungsfindung mit einfließen sollten, kommt gerade den quantitativen Sequenzprotokollen als mögliches Frühdiagnostikum eine bedeutende Rolle zu. Ist einmal ein fortgeschrittener Knorpelschaden aufgetreten, schien die Aussagekraft der Relaxationsmessungen limitiert zu sein. (Jungmann et al., 2013) Eine retrospektive Studie von Wong et al. konnte morphologische Änderungen nach MPFL-

Rekonstruktion nachweisen, eine qualitative und quantitative Nachuntersuchung bezüglich des Einflusses des Transplantats auf die Knorpelstruktur ist in der Literatur bisher nicht zu finden. (Wong et al., 2020) Über die rein morphologische Beurteilung des Knorpelersatzgewebes hinausgehend erlauben sie auch die ultrastrukturelle Darstellung von Knorpel und Ersatzgewebe. Hierbei mag in dieser Studie einerseits die fehlende zonale Segmentierung des Knorpels auffallen, welche in anderen Studien mit Implantation eines zellfreien Hydrogel-Implantats bzw. nach Mikrofrakturierung messbare zonale Unterschiede hervorbrachte. (Theologis et al., 2012; Trattng et al., 2015) Die tieferen, mehr kalzifizierten Schichten im Knorpel bestehen aus dichteren Kollagenfibrillen, was insbesondere für das T2 Mapping limitierend sein kann. (Jungmann et al., 2014) Andererseits wurde beispielsweise in der Untersuchung von Niethammer et al. das transplantierte MACT Gewebe und der umgebende Knorpel je einzeln segmentiert und miteinander verglichen, in unserer Studie jedoch wurde je die komplette retropatellare Gelenkfläche als eine ROI segmentiert. Diese Untersuchung von Niethammer et al. brachte nach 12 Monaten, genauso wie auch die Studie von Albrecht et al. nach 24 Monaten, mit dem umliegenden gesunden Knorpel vergleichbare Werte hervor. Somit schien auch der Aspekt der fehlenden zonalen Segmentierung die Qualität unserer Messungen nicht wesentlich einzuschränken. (Albrecht et al., 2017; Niethammer et al., 2018) Weitere Ursachen für nicht der OP-bedingten Knorpeldegeneration geschuldeten T2-Wert Veränderungen wie entzündlichen Prozesse, metabolischen Faktoren wie Diabetes mellitus, Sport, Übergewicht sowie hoher Fett Konsum beschrieben Baum et al. 2013 in ihrem Review. (Baum et al., 2013) Insbesondere die entzündliche Differentialdiagnostik hätte eine Durchführung der Bildgebung mit für den Patienten teilweise belastender und mit der Gefahr von Nebenwirkungen verbundener Kontrastmittelgabe nach sich gezogen. Dies kann bei den verwendeten speziellen Sequenzprotokollen zur Evaluation von Knorpelersatzgewebe allerdings in den Hintergrund gerückt werden. (Welsch et al., 2009)

Ogleich der Goldstandard der Knorpelbewertung nach wie vor die Arthroskopie ist und die quantitative Bildgebung allein noch einige Limitationen zeigt (Jungmann et al., 2014), wird die MRT Diagnostik mit ihren unterschiedlichen Sequenztypen diese invasive Evaluation in Zukunft zunehmend verdrängen können. (Guermazi et al., 2015; Link and Li, 2018)

## 6.4 Diskussion klinischer Ergebnisse

Tab. 6.1: Literaturvergleich Diskussion

		Return to activity level	Lysholm	Tegner	Cincinnati	Kujala	KOOS	IKDC subj.	Reluxation
<b>MIXED</b>		57.9	71.4	4.4	67.1	76.4	78.4	69.6	0
Vasiliadis et al.2011	Periost-ACT retropatellar/trochlear mit verschiedenen Realignement-Therpien n= 92; FU= 12.6 Jahre		70.0	3.0					
Gilloglyet et al.2014	Periost-ACT re-tropatellar mit Tibianateromedialisierung n= 23; FU= 7.6 Jahre		79.3					75.7	
Gigante et al.2009	MACT retropatellar mit Tibianateromedialisierung n= 12; FU= 3 Jahre		92.5	4		88.5			
Siebold et al.2014	MACT retropatellar mit MPFL-Rekonstruktion mit Gracilissehne n=11; FU=2 Jahre		74.1			73.8	74.4	63.9	

*Fortsetzung auf nächster Seite*

Tab. 6.1 – Fortsetzung von vorheriger Seite

		<b>RTAL</b>	<b>Lys.</b>	<b>Teg.</b>	<b>Cin.</b>	<b>Kuj.</b>	<b>KOOS</b>	<b>IKDC</b>	<b>Rel.</b>
<b>MACT</b>		58.8	74.0	4.4	74.8	75.2	77.8	70.7	0
Marlovits et al.2012	ACT (2. Generation) gesamt n=21, re- trotatellar n=7 FU= 5 Jahre			4.3	79.6		77.7	74.3	9.5
Niethammer et al.2014	MACT (NOVO-CARD) gesamt n=13, re- trotatellar n=4; FU=2 Jahre							57.3	
Siebold et al.2018	Spheroid-MACT gesamt n=30, re- trotatellar n=5; FU= 3 Jahre		77.7	5			71.0-86.3	84.2	
Niemeyer et al.2008	ACT/MACT retrotatellar n=70; FU= 3.2 Jahre	82.9	73.0					61.6	
<b>MPFL</b>		59.4	79.6	4.8	75.7	82.2	86.1	78.1	0
Schneider et al.2016	Isolierte MPFL- Rekonstruktionen (Review mit 14 Studien) FU=36.8 Jahre	84.1		5.7		85.8			
Migliorini et al.2020	double-bundle MPFL- Rekonstruktionen (Review mit 29 Studien) n=1305; FU= 1-8 Jahre		91.8	5.4		89.8		81.6	
Lippacher et al.2014	Isolierte MPFL- Rekonstruktion n=68; FU=2 Jahre	53		4		87.5		79.8	

Insgesamt lieferten unsere klinischen Beobachtungen zufriedenstellende Ergebnisse mit überzeugender allgemeiner Zufriedenheit unserer Patienten zum Nachuntersuchungszeitpunkt.

Es zeigte sich sowohl bei der Aktivitäts- und Funktionsevaluation als auch in allen weiteren klinischen Scores ein deutlicher Trend: Die MPFL Gruppe erreichte jeweils postoperativ im Schnitt die besten Ergebnisse, die MIXED und MACT Gruppe erzielten einander ähnliche, schlechtere Werte mit tendenziell etwas besserem Abschneiden der MACT Gruppe.

Mit Ausnahme des Cincinnati Scores konnten zwar zwischen den drei Gruppen keine signifikanten Unterschiede im klinischen Outcome gemessen werden, jedoch konnte die immerhin schwache Effektstärke ( $r > 0.1$ ) dieses Trends unsere Hypothese des besseren Abschneidens der isolierten Operationen stützen. Die Normalverteilungsprüfung via Schiefe Werte ergab eine Rechtssteilheit bei allen Scores der MPFL Gruppe, welche ebenfalls auf das bessere Abschneiden dieser Gruppe mit mehrheitlich zufriedenen Patienten hindeutete.

Als wichtiges objektives Zielkriterium nach Eingriffen bei Patellaluxation ist die Reluxationsrate zu nennen. In der relevanten Literatur zu MPFL-Rekonstruktionen zeigt sich hinsichtlich erneut auftretender Luxationen eine Überlegenheit der Rekonstruktionstechniken gegenüber konservativen Therapien, Refixationen, medialer Raffung oder lateral Release, welche Reluxationsraten von teilweise über 40% aufwiesen. (Frosch et al., 2011; Nomura and Inoue, 2003; Previtali et al., 2020; Sillanpaa et al., 2008; Xing et al., 2020; Zimmerer et al., 2018) Die auch in unserer Studie verwendete double-bundle-Technik konnte bei Migliorini et al. geringere Reluxationsraten aufweisen als single-bundle-Techniken. (Migliorini et al., 2020) Der Review von Schneider et al. gibt eine postoperative Reluxationsrate von 1.2% an, ein Persistieren der Instabilität im Sinne eines Wiederauftretens des Apprehension-Zeichens trat in 3.6% der Fälle auf. Analog zu unserem Patientengut der MIXED Gruppe hatte auch bei Siebold et al. kein Patient eine Reluxation. (Siebold et al., 2014) Das Ergebnis unserer Patienten lag mit einer postoperativen Apprehension-Zeichen-Rate von über 40% deutlich höher als vergleichbare Studien, einzeln betrachtet schnitt die MPFL Gruppe mit 31.1% gegenüber der MIXED Gruppe mit 52.6% besser ab. Jedoch wurde auch eine leichte Luxationsangst bis 30° Beugung schon als positiv gewertet. Eine Korrelation zwischen Apprehension Zeichen und der bildgebenden Schwere der Knorpelverletzung (postoperativer WORMS Gesamtscore, postoperativer WORMS Patel-lawert oder MOCART Score) bestand nicht. Grund für das Persistieren der Luxationsangst könnte die Tatsache sein, dass insbesondere die Patienten der Gruppen MIXED und MPFL unter langjähriger PFI litten und ein Vertrauens-Rückgewinn in die Stabilität des eigenen Knies daher längere Zeit beanspruchte bzw. nicht mehr vollständig erfolgte. Hier könnte ein längeres Follow-Up eine niedrigere Rate hervorbringen. Die tatsächliche Reluxationsrate lag bei allen Patienten unserer Studie bei exzellenten 0%. In Zusammenschau mit den Ergebnissen der klinischen Untersuchung unterstrichen unsere Resultate unsere Hypothese der guten klinischen patellofemorale Stabilität ohne signifikante Unterschiede der Gruppen.

Da die Wiederaufnahme des präoperativen Aktivitätslevels für die größtenteils jungen Patienten ein weiteres bedeutendes Erfolgskriterium darstellte, konnte bei einem auf unsere Gruppen relativ homogen verteilten Anteil von gesamt 58.8% Wiederaufnahme der Aktivität von einer erfolgreichen Therapie ausgegangen werden. Dennoch waren einzeln betrachtet fünf Patienten der MACT, zwei Patienten der MPFL und ein Patient der MIXED Gruppe mit einem gegenüber präoperativ deutlich schlechteren postoperativen Outcome (2 Aktivitätsstufen) als Therapieversager zu werten, was wiederum verdeutlicht, dass insbesondere nach Knorpeltherapie eine weite Streuung der Resultate in beide Richtungen möglich ist. Die zu unserer MPFL Gruppe vergleichbare Studie von Schneider et al. al. ergab mit 84.1% eine höhere Return-to-sports Quote, wohingegen unser Ergebnis besser mit der Studie von Lippacher et al., welche ein unserer MPFL Gruppe sehr ähnliches Patientengut 2 Jahre postoperativ nachuntersucht hat, mit einer Return-to-sports Quote von 53% übereinstimmte. (Lippacher et al., 2014) Allgemein konnten 23/68 (47.1%) Patienten postoperativ Sport auf Level 1 oder 2 ausüben. Hierbei ist anzumerken, dass nicht jeder Patient Sport im Sinne von Hochleistungssport (Level 1) bzw. in regelmäßiger Tätigkeit (Level 2) anstrebte, obwohl er möglicherweise rein physisch hinsichtlich der Kniefunktion dazu in der Lage wäre.

Die Rückkehr zum vorherigen, besonders für den Alltag relevanten Funktionslevel schafften bei unseren Beobachtungen nur 40.6% mit dem deutlich schlechtesten Ergebnis in der MPFL Gruppe (34.4%). Bei der Interpretation des Resultats ist anzumerken, dass trotzdem 72.1% aller Patienten mit Stufe 2 oder besser fast jede Tätigkeit ausüben konnten, die sie wollten. Die im Zeitverlauf stärkste Verschlechterung der MPFL Gruppe war mit einem grundsätzlich höheren Ausgangslevel vor Verletzung zu erklären, was auch in einem trotzdem besseren absoluten postoperativen Level resultierte. Dieser Trend spiegelte sich auch in unserer retrospektiv zu den Zeitpunkten t0 und t2 erhobenen numerischen Rankingskala wieder. Dies bekräftigte die Erkenntnis, dass die MPFL Gruppe zwar die besten absoluten Ergebnisse liefert, aber trotzdem die stärksten Einbußen in Funktion und Aktivität über die Zeit zu verzeichnen hatte. Das Ergebnis lässt außerdem vermuten, dass eine longitudinale Erhebung auch bei den anderen Scores einen ähnlichen Trend hervorgebracht hätte und dies in einer weiteren Studie bestenfalls prospektiv untersucht werden sollte.

In Anbetracht der Tatsache, dass die Vergleiche und allenfalls Verschlechterungen in Aktivität und Funktion jeweils gegenüber dem Zeitpunkt t0 gesehen wurden, also einem Zeitpunkt völliger Beschwerdefreiheit und mutmaßlich auch Kniegesundheits, kann das Ergebnis als zufriedenstellend interpretiert werden.

Mit dem Tegner-Fragebogen als Aktivitätsindex und dem Lysholm-Fragebogen als Funktionsscore wurden zusätzlich etablierte Scores verwendet, die in unserer Studie ebenfalls keinen signifikanten Unterschied der Gruppen zeigten. Die Meta-Analyse von Schneider et al. ermittelte einen Tegner Wert von 5.7 Punkten. (Schneider et al., 2016) Dass dieser Wert exzellent ist, zeigte eine Testung durch Briggs et al., die am gesunden Normalkollektiv ebenfalls einen Durchschnittswert von 5.7 beobachteten. (Briggs et al., 2009) Weitere Studien von Migliorini et al. und Lippacher et al. ergaben Werte von 5.3 bzw. 4.0, womit sich unser Wert von 4.8 in der MPFL Gruppe gut einordnen lässt. (Lippacher et al., 2014; Migliorini et al., 2020) Auch die Ergebnisse der MACT und MIXED Gruppe mit je 4.4

waren ähnlich zu vergleichbarer Literatur. (Marlovits et al., 2012; Siebold et al., 2018). Eine Übereinstimmung unserer Werte im Lysholm-Score lässt sich ebenfalls in der Literatur finden (Werte von 70 - 91,8, siehe Studien Tabelle 6.1), wobei bei Briggs et al. das Normalkollektiv einen Wert von 94 erreichte. (Briggs et al., 2009) Sillanpaa et al. etablierten eine Einstufung zum Kujala Score, wonach unsere Ergebnisse in allen 3 Gruppen zwar mäßig, aber akzeptabel einzustufen sind. (Sillanpaa et al., 2008)

Auch die weiteren Ergebnisse aus den klinischen Scores stehen weitgehend in Einklang mit selektierten, vergleichbaren aktuellen Studien, welche in Tabelle 6.1 in übersichtlicher Darstellung eingesehen werden können. Limitierend bei unserem Literaturvergleich ist die Heterogenität des Patientenguts insbesondere zwischen unserer MIXED und MACT Gruppen und der ausgewählten Literatur, welche zumeist verschiedene ACT-Techniken vorheriger Generationen und sowohl retropatellare als auch femorale oder tibiale Lokalisationen der Knorpeltherapie beinhalten.

In unserer klinischen Untersuchung konnten 79,4% aller Patienten den zufriedenstellenden Abschlussgrad A oder B erreichen. Interessanterweise schnitt bei der Auswertung nach Vorgabe des ICRS die MACT Gruppe im Gesamtergebnis am besten ab und die MPFL Gruppe am schlechtesten. Passend dazu stellten Mehl et al. in ihrer Arbeit fest, dass traumatische patellofemorale Knorpelschäden (MIXED bzw. MPFL Gruppe), weniger schlimme Symptome hatten als solche chronischer, degenerativer Ursache (MACT). (Mehl et al., 2019) Unter diesem Aspekt erscheint die Unterlegenheit der MPFL Gruppe in unserer klinischen Untersuchung zunächst konträr zu den Ergebnissen aus den klinischen Fragebögen. Eine differenzierte Betrachtung des Auswertungsmodus gab Aufschluss: Da in den Abschlussgrad nur die Kategorien Erguss, Bewegungsdefizit und Ligamentuntersuchung mit einfließen, erzielten die bandrekonstruktiven Gruppen MIXED und MPFL logischerweise schlechtere Ergebnisse. Ein persistierendes Apprehension-Zeichen der bandrekonstruktiven Gruppen wichtete somit auch beim Abschlussgrad merklich, demgegenüber stand diese Problematik bei rein mit Knorpelersatz versorgten Patienten im Hintergrund. Die einzigen beiden Patienten aus der MACT Gruppe mit Grad B in der Ligamentuntersuchung hatten anteroposteriore Translationen, welche nicht der MPFL-Rekonstruktion geschuldet waren.

Ursächlich für schlechtes klinisches Abschneiden und persistierende Instabilität könnte auch eine zugrundeliegende Trochleadysplasie sein. Immerhin korrelierte der Grad der aus dem OP-Bericht entnommenen präoperativen Trochleadysplasie hochsignifikant mit der Ausprägung des postoperativen Apprehension-Zeichens. In einer Versagensanalyse nach MPFL-Rekonstruktion von Feucht et al. konnte eine Trochleadysplasie als häufigster anatomischer Risikofaktor für eine Redislokation detektiert werden, außerdem lag bei 50% der erneut luxierten Kniescheiben eine nicht anatomische Lage der Bohrkanäle vor. (Feucht et al., 2020) Krause et al. beispielsweise beschrieben nach Patellastabilisierung mit zunehmender Schwere der Dysplasie höhergradige Knorpeldefekte und schlechtere klinische Ergebnisse. (Krause et al., 2006) Ebenfalls muss bei der Band-Rekonstruktion eine Balance aus Stabilität und Funktion gefunden werden, die zulasten des Bewegungsumfangs im Knie gehen kann. Eine Studie von Hemmerich et al. postulierte, dass mit einer Flexionsfähigkeit von 100° ein Jahr nach MPFL-Rekonstruktion Alltagsaktivitäten problemlos möglich sind. (Hemmerich et al., 2006) Obwohl der Großteil unserer Patienten mehr als 100° flektieren

konnte, waren nichtsdestotrotz drei unserer MPFL Patienten mit Abschlussgrad D aufgrund eines Bewegungsdefizits von über  $25^\circ$  in zwei Fällen bzw. eines ausgeprägten J-sign bei einer Patientin als Misserfolg zu werten. Als Ursache kann ein anatomisch nicht korrektes Positionieren des MPFL-Transplantats mit der Folge einer zu hohen Spannung vermutet werden. (Amis et al., 2003; Schmeling, 2010; Steensen et al., 2004) Prinzipiell scheint es bei zu kranial positioniertem MPFL zu einer Änderung der Patellakinematik zu kommen. Hierbei kippt der obere Anteil bei zunehmender Kniebeugung nach dorsal, wodurch der Anpressdruck zu hoch wird und dadurch auch die Beugung beeinträchtigt sein kann. Tatsächlich konnten in der Bildgebung bei zwei dieser Patienten tenenziell zu kranial bzw. zu schräg in der Patella gesetzte Bohrdrähte gesehen werden. Es ergab sich jedoch keine signifikante Korrelation zwischen einer unphysiologisch (hohen) Patellastellung und einem schlechteren Wert in den bildgebenden Scores, was an grundsätzlich zumeist korrekt gesetzten Bohrkanälen liegt. Der jeweilige postoperative WORMS Gesamtscore dieser beiden Patienten war verglichen zu den anderen Studienteilnehmern auffallend schlecht, was einen negativen Impact auf den retropatellaren Knorpel vermuten lässt. Allgemein bestätigte die insbesondere in der MPFL Gruppe errechnete signifikante Korrelation zwischen eingeschränktem Bewegungsumfang und schlechterem postoperativen WORMS Gesamtscore unsere Hypothese, dass ein zu straffes MPFL mit erhöhtem Anpressdruck eine frühe Knorpeldegeneration begünstigen kann.

Die Ergebnisse des Sprungtests ergaben zwischen den Gruppen nicht signifikant unterschiedliche Werte von 81-88% der Sprungleistung des gesunden Beines. Vor dem Hintergrund, dass Landemanöver von Sprüngen allgemein retropatellare Drücke von bis zu 5972 N verursachen können, war das Outcome unserer Patienten sehr beachtlich. (Feller et al., 2007)

Teilweise waren unsere Resultate weit gestreut, beispielsweise im MOCART Score erreichten unsere Patienten Ergebnisse zwischen 5 und 100 Punkten, ebenso im Tegner Score lag eine weite Range mit Werten zwischen 2 und 9 vor. Mehl et al. stellten in ihrer Arbeit fest, dass traumatische patellofemorale Knorpelschäden weniger schlimme Folgen hatten als solche chronischer, degenerativer Ursache. (Mehl et al., 2019) Analog dazu besteht auch unser Patientengut gemischt aus Knorpelschäden traumatischer, aber auch degenerativer Genese, was demzufolge eine Ursache für die Streuung sein kann.

## 6.5 Diskussion radiologischer Ergebnisse

Während sich die Gruppen bei den klinischen Scores untereinander nur beim Cincinnati Score signifikant unterschieden und sich ansonsten ein statistischer Trend in gleicher Richtung zeigte, ergab sich bildgebend im Vergleich ein signifikant schlechteres Outcome bei der MIXED Gruppe gegenüber je mindestens einer der beiden anderen Gruppen. Es kann trotzdem von einem bildgebend grundsätzlich zufriedenstellenden Ergebnis fast aller Patienten ausgegangen werden. Nutzen und Erfolg der jeweiligen Intervention wurde durch die longitudinale Verbesserung fast aller Patienten im WORMS Gesamtscore bestätigt, auch alle anderen Parameter verbesserten sich oder blieben über die Zeit stabil. Der einzige sich



deutlich, wenn auch nicht signifikant verschlechternde Parameter war „WORMS Knochenmarködem PAT“ der MIXED Gruppe.

Die Ursachen für die präoperativ schlechteren Knorpelbefunde beider Knorpeltransplantatgruppen gegenüber der MPFL Gruppe liegen bei initial fehlender Indikation zur knorpelregenerativen Therapie auf der Hand. Die präoperativ durchweg schlechteren Werte der MIXED Gruppe gegenüber der MACT Gruppe können durch folgende Befunde erklärt und teilweise auch relativiert werden: Sowohl die präoperativ höheren Verletzungsgrade, gemessen mittels ICRS, der größere Durchmesser der Defektfläche als auch der schlechtere präoperative WORMS Gesamtscore der MIXED Gruppe deuten darauf hin, dass Patienten dieser Gruppe eine schwerwiegendere Verletzung erlitten und somit eine schlechtere präoperative Ausgangssituation hatten.

Einzig in der Kategorie „WORMS Knochenmarködem PAT“ schien die MACT Gruppe mit 90% präoperativen Vorhandenseins eines retropatellaren Knochenmarködems gegenüber nur 50% bei der MIXED Gruppe einen schlechteren Ausgangswert zu haben. Dies könnte daran liegen, dass bei der isolierten Knorpeltransplantation vor allem symptomatische Patienten operiert wurden, und klinische Symptomatik beispielsweise in der Arbeit von Felson et al. im Zusammenhang mit häufigerem Auftreten von Knochenmarködemen stand. (Felson et al., 2007) Demgegenüber bestand bei der MIXED Gruppe schon allein wegen der luxationsbedingten Bandruptur als führende Symptomatik eine Operationsindikation. Im Verlauf zeigte die Rate an retropatellaren Knochenmarködemen einen nicht signifikanten Anstieg vom Ausgangswert bis zum Follow-Up in der MIXED Gruppe, während es in den anderen Gruppen abnahm, sodass diese postoperativ hochsignifikant niedrigere Raten an Knochenmarködemen gegenüber der MIXED Gruppe aufzuweisen hatten. Passend dazu beschrieben beispielsweise Jung et al. 2.5 Jahre nach femoraler MACT mit Spongiosaplastik bei Patienten mit schlechteren MOCART Werten deutlich voluminösere und häufigere Knochenmarködeme. (Jung et al., 2020) Jungmann et al. sahen eine Assoziation zwischen besserer Defektfüllung nach Knorpelreparatur und einem Rückgang der Knochenmarködeme im WORMS Score. (Jungmann et al., 2019) Unsere Korrelation von „WORMS Knochenmarködem PAT“ mit den quantitativen retropatellaren Werten unterstrich die Bedeutung dieses Parameters. Speziell eine Auswirkung bzw. Korrelation mit klinischen Parametern hingegen konnte in unserer Studie ebenso wenig wie bei Nachuntersuchungen zu Knochenmarködemen durch Niethammer et al. gesehen werden. Ein möglicher Zusammenhang, beispielsweise durch eine Korrelation mit dem Auftreten von Schmerzen, könnte nur durch ein längeres Follow-Up detektiert werden. Da länger als die physiologischen 3-6 Monate anhaltende subchondrale Knochenmarködeme grundsätzlich Zeichen eines suboptimalen Outcomes zu sein schienen, könnten sie in unserer Studie trotzdem dem Auftreten klinischer Beschwerden vorausgehen. (Marlovits et al., 2012; Niethammer et al., 2015)

Interessant gestaltete sich hierbei die genauere Betrachtung der spezifischen retropatellaren Knorpelauswertung, da scheinbar gerade diese Lokalisation von der jeweiligen Intervention unterschiedlich beeinflusst wurde: Zwar verschlechterte sich bei der MIXED Gruppe

im Verlauf das „WORMS Knorpelsignal gesamt“ sogar leicht, und auch zum Follow-Up Zeitpunkt hatte die MIXED Gruppe parallel zum WORMS Gesamtscore damit sowohl im „WORMS Knorpelsignal gesamt“ als auch im Subscore „WORMS Knorpelsignal PAT“ signifikant schlechtere Werte gegenüber den beiden anderen Gruppen. Jedoch traten longitudinal gesehen in den Transplantatgruppen MIXED und MACT deutliche Verbesserungen im Subscore „WORMS Knorpelsignal PAT“ ein, in der MACT Gruppe war dies sogar signifikant.

Eine komplette lokale Defektfüllung mit gleichzeitig kompletter Transplantatintegration erreichten passend dazu in der MIXED Gruppe nur 26,3% der Patienten gegenüber erfreulichen 62,5% in der MACT Gruppe. Vergleichsstudien von Marlovits et al. (isolierte MACT) bzw. Jungmann et al. (OATS oder MACT mit Spongiosaplastik) ergaben bei gemischt retropatellaren und femoralen Lokalisationen einen MOCART Wert von 75.8 Punkten und einem Transplantatversagen von 9.5% bzw. ebenfalls einen gebesserten postoperativen WORMS Gesamtscore und einen MOCART Score von 77.5 Punkten. Damit stellten unsere 87.8 Punkte im MOCART und 6.3% Transplantatversagen bei der grundsätzlich eigentlich eher schlechterer abschneidenden rein retropatellar lokalisierten MACT ein hervorragend gutes Ergebnis dar. (Jungmann et al., 2019; Marlovits et al., 2012; Niemeyer et al., 2008) Überhaupt gab es im MOCART Score bei der MIXED Gruppe eine deutlich höhere Streuung (5 bis 95 Punkte) als bei der MACT Gruppe (70 bis 100 Punkte). Somit konnte die Aussage getroffen werden, dass eine lokal erfolgreiche Einheilung bei Kombinationsoperation zwar möglich war, aber bei der Kombinationsoperation seltener auftrat als bei alleiniger MACT.

Des Weiteren fiel bei der Auswertung der postoperativen Ergebnisse auf, dass es bezüglich des „WORMS Knorpelsignal PAT“ keinen signifikanten Unterschied mehr zwischen den Gruppen MACT und MPFL gab. Mutmaßlich war dies auf die adäquate Knorpelreparatur zurückzuführen, sodass der postoperative Knorpel einer isolierten MACT vergleichbare Werte wie ein primär nicht interventionsbedürftiger Knorpel erreichte.

Demgegenüber verschlechterten sich die rein bandrekonstruktiv behandelten Patienten im „WORMS Knorpelsignal PAT“ sogar eher. Diese Feststellungen stützten unsere Eingangshypothese, dass eine Knorpeltherapie einen OA-protectiven Effekt hatte und deshalb die Werte des Subscores positiv beeinflusst wurden. Eine MPFL-Rekonstruktion jedoch schien einen, wenn auch nicht signifikanten, negativen Einfluss auf den die Knorpeltransplantateinheilung zu haben, was durch die, verglichen mit der deutlichen Verbesserung der MACT Gruppe, nur leichten Verbesserung der MIXED Gruppe im „WORMS Knorpelsignal PAT“ angedeutet wurde. Gerade bei der Kombinationsoperation boten sich möglicherweise schlechtere Einheilungsbedingungen für das Knorpeltransplantat als ohne die potentiell durckerhöhende Bandrekonstruktion. Aufgrund der komplexen Anatomie des vorderen Kniekompartiments gibt es dort größere Scherkräfte als in den medialen und lateralen Kompartimenten, die für die Differenzierung transplantierte Knorpelzellen weniger vorteilhaft sein können als die hydrostatischen Kräfte, die im Bereich der Femurkondylen dominieren. (Fitzgerald et al., 2006) Da das „WORMS Knorpelsignal“ nur einen gerin-

gen Anteil des WOMS Gesamtscore ausmacht, konnten keine signifikanten Auswirkungen eines möglichen positiven Impacts der Knorpeltransplantation bzw. eines möglichen negativen Impacts der Bandrekonstruktion im WOMS Gesamtscore gesehen werden. Außerdem konnte durch auch bei den Patienten unserer MPFL Gruppe sorgfältig gesetzte Bohrungen der MPFL Insertionen und durch strenge intraoperative Kontrollen das Risiko für unphysiologisch hohe Drücke minimiert werden. (Amis et al., 2003; Elias and Cosgarea, 2006; Feucht et al., 2020; Niemeyer et al., 2016b) Dies konnte neben den guten klinischen Ergebnissen auch anhand des im Verlauf signifikant verbesserten postoperativen WOMS Gesamtscore und den im Verlauf reduzierten Knochenmarködemen gesehen werden. Da gerade bei einer Patellaluxation ein Knochenmarködem eher die Folge aus dem Verletzungsmechanismus beim Aufprall der Patella am lateralen Femurkondylus mit Kontusion ist und weniger als Reaktion auf chronisch belasteten Knorpel entsteht, war zu erwarten, dass die Ödeme zwei Jahre nach dem Trauma regredient waren. (Elias et al., 2002; Miller et al., 1998) Ähnlich verhielt sich dies in der Studie von Best et al., die ebenfalls ein gutes bildgebendes Outcome nach isolierter MPFL Rekonstruktion beschrieben. Der dort verwendete Score könnte bei zukünftigen Untersuchungen zur genaueren Evaluation des Sehnentransplantats ergänzt werden, genauso wie weitere Einflussfaktoren wie eine Trochleadysplasie, Patella Tilt und - Shift oder der TTTG. (Best et al., 2016)

Somit scheint die Druckbelastung durch das MPFL keine wesentlichen kurzfristigen Auswirkungen auf nativen Knorpel zu haben, was auch in der Studie von Wong et al. mit bildgebender Nachuntersuchung so geäußert wurde. (Wong et al., 2020) Wohl aber konnte ein Einfluss auf eine frische, sich noch in den ersten 24 Monaten der Proliferationsphase befindliche Knorpeltransplantation gesehen werden. (Niethammer et al., 2014; Roberts et al., 2001) Da dieses Gewebe trotz Fortschrittlichkeit gegenüber der vorherigen Transplantatmethoden nicht die identische Qualität eines nativen hyalinen Knorpels erreichte, liegt es nahe, dass diese Zellen empfindlicher gegenüber erhöhtem retropatellarem Druck und anderen unphysiologischen Umgebungen zu sein schienen. (Arendt et al., 2016; Grodzinsky et al., 2000; Henderson et al., 2007; Niemeyer et al., 2016b; Rood et al., 2015) Zudem könnte aufgrund des deutlich invasiveren Eingriffes im Rahmen der Kombinationsoperation, sowie dem damit verbundenen größeren Trauma der umgebenden Strukturen, eine längere Erholungsphase nötig sein. Der signifikant schlechtere WOMS Knorpel Gesamtscore der MIXED als Zeichen der globalen Auswirkungen aufs Knie bestärkte diese Überlegungen.

Da bekannt ist, dass sich die aufgrund der Operation geänderte Biomechanik und Belastungsverteilung meist erst nach einer gewissen Latenzzeit klinisch auswirkt, und eine beginnende Retropatellararthrose erst nach einiger Zeit symptomatisch wird, waren unsere klinischen Ergebnisse mit fehlenden signifikanten Unterschieden der Gruppen im 2-Jahres-Follow-Up nicht überraschend. Aus diesem Grunde war unsere quantitative bildgebende Diagnostik zur Früherkennung von großer Bedeutung, um unter anderem Informationen über den Wassergehalt als indirektes Zeichen der Veränderungen des Knorpels zu erhalten. (Eckstein and Wirth, 2011; Jungmann et al., 2014; Matzat et al., 2013; Trattinig et al., 2019)

Da bei unseren quantitativen Erhebungen keine longitudinalen Daten vorlagen, war ein Literaturvergleich zur Einordnung unserer Messergebnisse hilfreich: In der Arbeit von Dunn et al. beträgt die T2-Zeit im gesunden menschlichen Knorpel zwischen 32.1 ms und 35.0 ms; bei Arthrose waren die Werte auf 34.4 – 41.0 ms erhöht. (Dunn et al., 2004) Je eher die gemessenen Werte denen des Normalkollektivs entsprechen, desto eher wurde ein perfektes Ergebnis erreicht. (Niethammer et al., 2014) Im Schnitt lagen unser Patientengut mit 33.0 ms erfreulicherweise im Normalbereich. Alle Kompartimente zusammen betrachtet (Globalwert), überschritt nur die MACT Gruppe mit 35.5 ms den definierten Normbereich. Bei den retropatellaren Messungen lagen außer der MPFL Gruppe alle Werte über dem Normalkollektiv. Auch die Vergleichsstudie von Niethammer et al. mit femoralen und retropatellaren MACT hatte mit 30.9 ms nach 24-36 Monaten postoperativ etwas niedrigere Werte vorzuweisen. (Niethammer et al., 2014)

Somit waren die retropatellaren Kompartimente unserer MIXED und MACT Gruppe laut Dunn et al. als arthrotische Veränderung zu werten. (Dunn et al., 2004) Differentialdiagnostisch kommt auch eine durch Gewebshypertrophie bedingte relative T2-Wert-Erhöhung in Betracht. (Jung et al., 2020) Morphologisch wurden bei unseren Patienten immerhin drei hypertrophierte MACT gesehen. Hypertrophien traten grundsätzlich aber gegenüber den vorherigen Generationen an ACT seltener und zumeist nur temporär auf, waren nicht direkt mit einer verminderten Knorpelqualität einhergehend und somit ohne Interventionsbedürftigkeit. (Niethammer et al., 2018; Pietschmann et al., 2012) Allgemein sollten die Literaturvergleiche aber nur als Orientierung gesehen werden, da unterschiedliche technische Begebenheiten für das T2 Mapping (MR-Gerät, Sequenzen mit unterschiedlichen Schichtdicken, Auswertungsprogramme) in den verschiedenen Studien vorherrschten.

So war in unserer Studie vorrangig dem Vergleich der Gruppen untereinander Bedeutung beizumessen: In fast allen Kniekompartimenten waren die T2-Werte im Mapping in den Gruppen MIXED und MACT signifikant höher gegenüber der MPFL Gruppe. Wären Unterschiede der Gruppen nur aufgrund der lokalen retropatellaren Knorpelreparatur vorhanden, dann dürften nicht alle Kompartimente der MPFL Gruppe einzeln und der Gobalscore gegenüber den Knorpeltransplantatgruppen signifikant niedriger sein. In der Arbeit von Welsch et al. war, ähnlich wie in unserer Studie, der im Reparaturgewebe gemessene T2-Wert nach 24 Monaten nicht signifikant verschieden vom übrigen Knorpel, wohingegen bei Salzmann et al. mit 46.8 ms zwar gegenüber dem gesunden, hyalinen femoralen Knorpel niedrigere, aber gegenüber unseren retropatellaren Werten trotzdem deutlich höhere Werte gemessen und als gut eingestuft wurden. (Salzmann et al., 2009; Welsch et al., 2008) Da dort nur das Reparaturgewebe, bei uns aber das komplette retropatellare Kompartiment segmentiert wurde, stuften wir diese verschiedenen Erhebungen dennoch als im Einklang miteinander ein. Unsere global schlechteren Werte der knorpeltransplantierten Patienten könnten auch ein Hinweis darauf sein, dass diese Patienten eventuell auch schon präoperativ bzw. sogar prätraumatisch an einem generell schlechteren Knorpelstatus im Knie litten, was auch durch den deutlich schlechteren „WORMS Knorpelsignal gesamt“ der Gruppen MIXED und MACT gegenüber der Gruppe MPFL sowohl prä- als auch postoperativ zum Ausdruck kam. Hierfür wäre, auch für die Aussage, ob diese Arthrose stabil, progredient oder regredient ist, eine longitudinale Messung in weiteren Studien aufschlussreich. Eben-

so könnten in zukünftigen Studien ähnlich wie bei Siebold et al. Messungen des gleichen kontralateralen, gesunden Kompartiments zum intraindividuellen Vergleich herangezogen werden, um ein höherwertigeres Outcome zu erhalten. (Siebold et al., 2018)

Die globalen T1rho Messungen zeigten lediglich zwischen der MIXED und MPFL Gruppe einen statistischen Trend, sodass diese MR-Bildgebung nur bedingt unsere morphologischen und klinischen Ergebnisse unterstreichen konnte, auch da keine Korrelation zwischen Klinik und den globalen T1rho Werten festgestellt werden konnte. Im Gegensatz zum sogar besseren Abschneiden bezüglich früher Detektion von OA gegenüber dem T2 Mapping in der Studie von Li et al. oder Rauscher et al. blieb der diagnostische Wert der T1rho Messungen insbesondere zur Evaluation von MACT somit auch in unserer Studie unklar. (Li et al., 2007; Rauscher et al., 2008) Eine Korrelation zwischen den beiden quantitativen Auswertungen konnte nicht errechnet werden, nichtsdestotrotz zeigten die erlangten T1rho Werte den gleichen Trend für die Unterschiede der Gruppen wie das T2 Mapping.

Divergierende quantitative Werte nach Knorpelreparatur gegenüber Studien mit OA-Messungen wurden mit der verschiedenen zugrundeliegenden Histologie begründet. (Jungmann et al., 2014) Grundsätzlich waren die quantitativen Patellawerte gegenüber anderen Lokalisationen im Knie in Vergleichsstudien höher. (Gomoll et al., 2014; Niemeyer et al., 2008) Auch genaue Referenzwerte für T2 Werte bei MACT konnten bislang nicht etabliert werden, da zwar hyalinähnlicher Knorpel produziert wird, aber noch unklar ist, ob diese Hyalin-Ähnlichkeit überwiegt und T2 Werte somit eher erhöht werden, oder ob doch die faserknorpelartigen Komponenten überwiegen, welche die T2 Werte sogar eher verringern würden. (Salzmann et al., 2009; Welsch et al., 2009) Bei der Interpretation der globalen Werte muss bedacht werden, dass die zugrundeliegende Pathologie sich bei Patienten der Gruppen MIXED und MACT unterscheidet, da erstere immer eine Luxation erlitten hatten, wohingegen zweitere neben einer traumatischen Ursache teilweise auch an chronischen Knorpeldefekten leiden und somit gegebenenfalls ein chronischer Reizzustand im Knie vorlag. Bei Guermazi et al. wurden nach Knorpeltransplantationen innerhalb der ersten beiden Jahre nach Intervention bei über 90% der Patienten noch Veränderungen wie Knochenmarködeme, Hypertrophien und unvollständige Defektfüllung beschrieben. Gegebenenfalls könnte gerade retropatellar der Heilungsprozess verzögert sein. (Guermazi et al., 2015) Warum im Gegensatz zu den restlichen Resultaten mit durchgehender Unterlegenheit der MIXED bei den quantitativen Messungen keine signifikanten Unterschiede zwischen der MIXED und MACT Gruppe gesehen werden konnten, lässt sich somit nicht abschließend klären. In Zusammenschau der Befunde gingen wir am ehesten von einer gemischten Genese aus teilweiser Gewebshypertrophie, bedingt durch die retropatellare Lokalisation erschwerte bzw. verlängerte Einheilung und beginnender Arthrose der Knorpeltransplantatgruppen aus.

Die Relevanz des Betrachtens mehrerer Auswertungsmodi wird auch in den Korrelationsanalysen deutlich: Alle klinischen Scores korrelierten positiv mit den globalen T2-Werten und dem WORMS Gesamtscore, jedoch nicht mit den retropatellaren T2-Werten oder dem „WORMS Knorpelsignal PAT“. Eine Korrelation von quantitativen T2 Werten mit klinischen Scores ist in der aktuellen Literatur noch kontrovers diskutiert. Während sich bei

der MACT-Vergleichsstudie von Niethammer et al. zu keinem Zeitpunkt zwischen 6 und 36 Monaten Korrelationen zwischen Klinik und T2 Werten fand, berichteten Blackman et al. oder Marlovits et al. über vorhandene Korrelationen zwischen klinischen Ergebnissen und morphologischen MR-Befunden nach ACT. (Blackman et al., 2013; de Windt et al., 2013; Marlovits et al., 2006; Niethammer et al., 2014) Viele Patienten der beiden Knorpeltransplantat Gruppen hatten bei guten klinisch-morphologischen Outcomes trotzdem Signalveränderungen in den quantitativen Messungen. Die größtenteils fehlende Assoziation zwischen klinischen Befunden und weder den lokal retropatellaren T2 Werten noch den lokalen Werten im „WORMS Knorpelsignal PAT“ deutet an, dass für die klinische Zufriedenheit der Patienten mehr der globale Zustand des ganzen Knies als eine bildgebend lokal gute Knorpelqualität des retropatellaren Transplantats gewichtete. Quantitative Sequenzen schienen mehr den Knorpelzustand des ganzen Knies hinsichtlich OA zuverlässig bewerten zu können als das einzelne, retropatellare MACT Gewebe. (Baum et al., 2012; Jungmann et al., 2019) In der Untersuchung durch merkliche retropatellare Krepitationen detektierte Knorpelpathologien korrelierten mit semiquantitativ schlechteren Ergebnissen im postoperativen „WORMS Knorpelsignal PAT“, sodass der lokal retropatellaren bildgebenden Auswertung doch ein gewisser Stellenwert einzuräumen ist. Krepitationen und auch ein Erguss des Knies wirkten sich wiederum im negativen Sinne auf die Gesamtzufriedenheit in den klinischen Scores aus. Auch waren erhöhte quantitative Messwerte lokal an der Patella mit einem höheren WORMS Gesamtscore und einem erhöhten „WORMS Knorpelsignal PAT“ verbunden. Eine mögliche frühe Knorpeldegeneration retropatellar ist also angedeutet, macht sich aber bei teilweise fehlender Korrelation mit der Klinik offensichtlich noch nicht für den Patienten bemerkbar. Wie auch in anderen Studien, konnten unsere MOCART Auswertungen nicht mit den klinischen und quantitativen Werten korrelieren. (de Windt et al., 2013; Ebert et al., 2011; Jungmann et al., 2014)

Abschließend ist zu sagen, dass die Kombination aus klinischer und bildgebender Evaluation wichtige Erkenntnisse mit durchaus unterschiedlichen Ergebnissen liefern konnte, die sich nur teilweise im Konsens mit der gängigen Fachliteratur befanden.

# Kapitel 7

## Zusammenfassung

Eine PFI mit Luxation und Ruptur des MPFL tritt häufig auf. Auch traumatisch bedingte Luxationen haben ähnliche Folgen. Ein retropatellarer Knorpelschaden, ob isoliert auftretend oder als Folge dieser Patellaluxation, ist eine belastende, teilweise immobilisierende Verletzung, deren vielfältige Therapiemöglichkeiten oft Verunsicherung bei Patienten hervorruft. Die Rekonstruktion des MPFL mittels Gracilis-Sehentransplantat in Doppelbündeltechnik ist bei Patellaluxationen ein modernes, bewährtes Verfahren. In der Knorpelchirurgie konnte sich die MACT in den letzten Jahren weiter etablieren. In einigen Fällen ist eine Kombination dieser beiden Eingriffe indiziert.

Ziel dieser Studie war es, das subjektive, klinische und MR-bildgebende 2-Jahres Outcome nach jeweiliger Intervention zu erheben. Dafür wurden 19 Patienten nach kombiniertem Eingriff, 17 Patienten mit isolierter MACT und 32 Patienten mit isolierter MPFL-Rekonstruktion nachuntersucht.

In allen erhobenen klinischen Fragebögen (Cincinnati, KOOS, IKDC subjektiv, Kujala, Lysholm, Tegner) erzielten unsere Patienten zufriedenstellende, mit der gängigen Literatur vergleichbare, gute Ergebnisse. Außer im Cincinnati Score konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen errechnet werden, jedoch schnitt die MPFL Gruppe tendenziell jeweils am besten ab, während die MIXED und MACT Gruppe einander ähnliche, schlechtere Werte mit meist etwas besseren Resultaten bei der MACT Gruppe erreichten. Die Untersuchung zeichnete ein etwas anderes Bild mit negativem Einfluss der Bandrekonstruktion der Kniefunktion, sodass die Knorpeltransplantatgruppen im objektiven IKDC einen besseren Abschlussgrad erzielten. Letztendlich konnten aber ein fehlendes höhergradiges Apprehension-Zeichen und eine Relaxationsrate von 0% unsere Erwartungen einer postoperativen Stabilität mit klinischer Zufriedenheit voll erfüllen.

Die bildgebenden Nachuntersuchungen dieser wissenschaftlichen Arbeit spiegelten ebenfalls das schlechtere Abschneiden der kombinierten Operation gegenüber den isolierten Eingriffen mit signifikanten postoperativen Unterschieden im WORMS Gesamt- und Knorpelscore wieder. Die differenziert betrachteten retropatellaren Auswertungen unterstrichen durch eine stärkere Progredienz des „WORMS Knorpelsignal PAT“ bei den bandrekonstruktiven Gruppen sowie durch lokal signifikant schlechtere MOCART Werte bei der MIXED Gruppe

die hypothetisierte Belastung für den Knorpel durch die MPFL-Rekonstruktion. Dennoch kann durch stabile Werte auch in der longitudinalen Betrachtung bei den WORMS Gesamt- und Subscores radiologisch von einem guten Outcome der Patienten gesprochen werden. Eine signifikant höhere Rate an patellaren Knochenmarködemen bestätigte die größere Schädigung bei den Knorpeltransplantatgruppen. Dieses radiologische Zeichen wurde auch wegen der Korrelation mit den retropatellaren quantitativen Werten als prognostischer Faktor für ein mögliches schlechteres klinisches Abschneiden im Langzeit-Follow-Up gewertet. Im Gegensatz zu den anderen Auswertungen zeigte sich bei den quantitativen Werten eine Unterlegenheit sowohl der MIXED als auch der MACT Gruppe mit signifikant höheren Werten gegenüber der MPFL Gruppe. Durch die höheren Werte nicht nur retropatellar, sondern global und in allen Kniekompartimenten, kann von einem generell schlechteren Knorpelstatus bei der MIXED und MACT Gruppe ausgegangen werden. Das prädiktive Potential der quantitativen MRT Evaluation, insbesondere der T1rho Messungen, bleibt bei in den retropatellaren Auswertungen fehlenden, aber global sehr wohl vorhandenen Korrelationen mit klinischen Erhebungen weiter nicht ganz klar.

Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass Erkenntnisse über gute Ergebnisse in allen Interventionen, aber auch Erkenntnisse über die Unterlegenheit des kombinierten gegenüber den isolierten Eingriffen gewonnen werden konnten. Kombinationseingriffe aus Knorpeltherapie und MPFL-Rekonstruktion sind prinzipiell mit guten Ergebnissen möglich, erfordern aber eine dementsprechende Aufklärung des Patienten über die Schwere der Verletzung, limitierte Therapiealternativen und ein mögliches Therapieversagen. Die Ergebnisse führen zu der Annahme, dass vor allem die Kombination aus klinischen, quantitativen und qualitativen Auswertungen, wie sie in unserer Studie erfolgte, aktuell von hohem Wert ist. Um definitive Aussagen, insbesondere zur Arthroseprävention machen zu können, müssten noch Langzeitstudien mit longitudinalen Erhebungen im Verlauf erfolgen.



**Anhang A**

**Fragebogen Mappe**



Klinikum rechts der Isar



Technische Universität München

Abteilung für Sportorthopädie · Klinikum rechts der Isar  
Ismaninger Straße 22 · 81675 München

**Qualitative und quantitative MR-Bildgebung und klinische Ergebnisse nach isolierten und kombinierten Verfahren der retropatellaren Matrixassoziierten Knorpelzelltransplantation (MACT) mit medialer patellofemorale Ligament-Rekonstruktion (MPFL)**



**Klinikum rechts der Isar  
Anstalt des öffentlichen Rechts**

**Abteilung für Sportorthopädie  
Univ.-Prof. Dr. Andreas B. Imhoff  
Chefarzt**

Ismaninger Straße 22  
81675 München

Tel: (089) 4140-7821

Fax: (089) 4140-7826

E-Mail: [sportortho@Lrz.tum.de](mailto:sportortho@Lrz.tum.de)

URL: <http://www.sportortho.de>

**NAME:**

**GEBURTSDATUM:**

**ADRESSE:**

**Poliklinik für Sportorthopädie  
im Sporthaus (Haus 524)**

Sprechstunden- u. OP-Termine

Tel: (089) 4140-7840

Fax: (089) 4140-7841

E-Mail: [sportpoliklinik@Lrz.tum.de](mailto:sportpoliklinik@Lrz.tum.de)

**TELEFON:**

**EMAIL:**

**Sprechstunden tgl. 8 – 16 Uhr  
Montag**

Privatsprechstunde

Univ.-Prof. Dr. Andreas B. Imhoff

**GRÖßE:**

**Dienstag – Freitag**

Sprechstunden der Oberärzte

Ltd. OA PD Dr. Stephan Lorenz

OA PD Dr. Sepp Braun

OA PD Dr. Peter Brucker

OA Dr. Stefan Buchmann

OA PD Dr. Andreas Lenich

FOA PD Dr. Knut Beitzel

**GESCHLECHT:**

**GEWICHT:**

**BETROFFENES KNIE:**

**Station 24/1 und 6/1**

Sekretariat Tel: (089) 4140-7844

Sekretariat Fax: (089) 4140-7889

E-Mail: [sportstation@Lrz.tum.de](mailto:sportstation@Lrz.tum.de)

**DATUM:**

**RAUCHER (PY):**

**LUXATION chronisch vs traumatisch:**

Vorstand:

Univ.-Prof. Dr. Reiner Gradinger

(Ärztlicher Direktor, Vorsitzender)

Markus Zendler

(Kaufmännischer Direktor)

Anette Thoke-Colberg

(Pflegedirektorin)

Univ.-Prof. Dr. Peter Henningsen

(Dekan)

**KNORPELSCHADEN chronisch vs traumatisch:**

**RELUXATION:**

# Allgemeine Anamnese

**Betroffenes Knie:**     rechts                     links

**Gegenseitiges Knie:**     normal                     fast normal                     abnormal                     sehr abnormal

**Voroperationen:**

**Grad Trochleadysplasie:**

**Lokalisation Knorpelschaden (medial, zentral, lateral):**

**Beschreiben Sie bitte Ihr Sportniveau über den Verlauf der Zeit. Auf welchem Aktivitätsniveau betrieben Sie jeweils Sport?**

	Vor der Verletzung		Kurz vor der Operation		Aktuell	
I. Hochleistungssport	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
II. regelmäßige sportliche Aktivität	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
III. gelegentliche sportliche Aktivität	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
IV. keine wesentliche sportliche Aktivität	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>

**Beschreiben Sie bitte den Funktionsstatus Ihres Kniegelenkes über den Verlauf der Zeit. Gibt es Einschränkungen in Ihrer Tätigkeit?**

- I. Ich kann mit meinem Kniegelenk jede Tätigkeit ausüben, die ich will.
- II. Ich kann mit meinem Kniegelenk fast jegliche Tätigkeit ausüben, die ich will.
- III. Ich bin eingeschränkt und es gibt viele Dinge, die ich gerne tun würde, aber mein Kniegelenk lässt dies nicht zu.
- IV. Ich bin sehr eingeschränkt und kann fast nichts ohne starke Schmerzen und Behinderung tun.

Vor der Verletzung	Kurz vor der OP	Aktuell
<input type="checkbox"/> I.	<input type="checkbox"/> I.	<input type="checkbox"/> I.
<input type="checkbox"/> II.	<input type="checkbox"/> II.	<input type="checkbox"/> II.
<input type="checkbox"/> III.	<input type="checkbox"/> III.	<input type="checkbox"/> III.
<input type="checkbox"/> IV.	<input type="checkbox"/> IV.	<input type="checkbox"/> IV.



# Cincinnati Fragebogen

Bitte markieren Sie das zutreffende Feld und summieren Sie in der letzten Spalte die Punkte der einzelnen Kategorien auf!

	Exzellent	Gut	Befriedigend	Schwach	
<b>SUBJEKTIV</b>					
Schmerz	Kein; alle anstrengenden Sportarten und Arbeiten möglich 5 Punkte	moderate Sportarten und Arbeiten möglich 3 Punkte	Aktivitäten des alltäglichen Lebens möglich, Einschränkungen bei leichten Sportarten und Arbeiten 1 Punkt	deutliche Einschränkungen schon bei Aktivitäten des alltäglichen Lebens 0 Punkte	
Erguss	Kein; alle anstrengenden Sportarten und Arbeiten möglich 5 Punkte	moderate Sportarten und Arbeiten möglich 3 Punkte	Aktivitäten des alltäglichen Lebens möglich, Einschränkungen bei leichten Sportarten und Arbeiten 1 Punkt	Einschränkungen schon bei Aktivitäten des alltäglichen Lebens 0 Punkte	
Knieschwäche	Kein; alle anstrengenden Sportarten und Arbeiten möglich 5 Punkte	moderate Sportarten und Arbeiten möglich 3 Punkte	Aktivitäten des alltäglichen Lebens möglich, Einschränkungen bei leichten Sportarten und Arbeiten 1 Punkt	Einschränkungen schon bei Aktivitäten des alltäglichen Lebens 0 Punkte	
Instabilität	Kein; alle anstrengenden Sportarten und Arbeiten möglich 5 Punkte	moderate Sportarten und Arbeiten möglich 3 Punkte	Aktivitäten des alltäglichen Lebens möglich, Einschränkungen bei leichten Sportarten und Arbeiten 1 Punkt	Einschränkungen schon bei Aktivitäten des alltäglichen Lebens 0 Punkte	
				Gesamt (max. 20 Punkte)	
<b>AKTIVITÄT</b>					
Gehen	Keine Einschränkungen 3 Punkte	Leichte Einschränkungen 2 Punkte	Nur Strecken bis ca 1km möglich 1 Punkt	Maximal wenige Meter möglich 0 Punkte	
Treppen/Kniebeugen	Keine Einschränkungen 3 Punkte	Leichte Einschränkungen 2 Punkte	Nur ca 10 Stück möglich 1 Punkt	Weniger als 10 Stück möglich 0 Punkte	
Rennen	Keine Einschränkungen 3 Punkte	Leichte Einschränkungen 2 Punkte	Nur in halber Geschwindigkeit 1 Punkt	Nicht möglich 0 Punkte	
Springen	Keine Einschränkungen 3 Punkte	Leichte Einschränkungen 2 Punkte	Deutliche Einschränkungen 1 Punkt	Nicht möglich 0 Punkte	



Drehbewegungen im Knie	Keine Einschränkungen 3 Punkte	Leichte Einschränkungen 2 Punkte	Deutliche Einschränkungen 1 Punkt	Nicht möglich 0 Punkte	
				Gesamt (max 15 Punkte)	
<b>UNTERSUCHUNG</b>					
Erguss	Kein 5 Punkte	<25 cc 4 Punkte	26-60cc 2 Punkte	>60cc 0 Punkte	
Beugedefizit	0-5° 5 Punkte	6-15° 4 Punkte	16-30° 2 Punkte	>30° 0 Punkte	
Streckdefizit	0-3° 5 Punkte	4-5° 5 Punkte	6-10° 2 Punkte	>10° 0 Punkte	
Tibiofemorale Krepitationen	Keine 5 Punkte		Moderat, in 25-50° 2 Punkte	Deutlich, in > 50° 0 Punkte	
Patellofemorale Krepitationen	Keine 5 Punkte		Moderat, in 25-50° 2 Punkte	Deutlich, in > 50° 0 Punkte	
				Gesamt (max 25 Punkte)	
<b>INSTABILITÄT</b>					
Apprehension	Kein 10 Punkte	Bis 30° 7 Punkte	Bis 60° 4 Punkte	>60° 0 Punkte	
Pivot shift	Negativ 10 Punkte	Gleiten 7 Punkte	Deutlich 4 Punkte	Schwerwiegend 0 Punkte	
				Gesamt (max 20 Punkte)	
<b>BILDGEBUNG</b>					
Tibiofemoral lateral	Keine Veränderungen 4 Einheiten	Leichte Veränderungen 3 Einheiten	Gelenkspaltverschmälerung <1/2 2 Einheiten	Gelenkspaltverschmälerung >1/2 0 Einheiten	
Tibiofemoral medial	Keine Veränderungen 4 Einheiten	Leichte Veränderungen 3 Einheiten	Gelenkspaltverschmälerung <1/2 2 Einheiten	Gelenkspaltverschmälerung >1/2 0 Einheiten	
Patellofemoral	Keine Veränderungen 4 Einheiten	Leichte Veränderungen 3 Einheiten	Gelenkspaltverschmälerung <1/2 2 Einheiten	Gelenkspaltverschmälerung >1/2 0 Einheiten	
				Gesamt (max 20 Punkte) 12 Einheiten = 10 Punkte 11-9 Einheiten = 7 Punkte 8-6 Einheiten = 4 Punkte 5-0 Einheiten = 0 Punkte	
<b>FUNKTIONSTEST</b>					
One-Leg-Hop Test Prozentualer Anteil ipsi:kontra	100-85% 10 Punkte	84-75% 7 Punkte	74-65% 4 Punkte	<65% 0 Punkte	
				Gesamt (max 10 Punkte)	
				Abschlusspunkte (max 100)	

## Kujala Knie Score

Wie oft hinken Sie?	
Nie	5
Gelegentlich	3
Ständig	0
Wie halten Sie <b>Belastung</b> stand?	
Volle Belastung ohne Schmerzen	5
Schmerzhaft	3
Nicht möglich	0
Wie weit können Sie ohne Schmerzen <b>gehen</b> ?	
Uneingeschränkt	5
Mehr als 2 km	3
1-2 km	2
Unmöglich	0
Haben Sie beim <b>Treppensteigen</b> Probleme?	
Keine Probleme	10
Schmerzen beim Treppen hinabgehen	8
Schmerzen beim Treppenhinauf- und -abgehen	5
Nur mit Geländer möglich	0
Wie funktioniert die <b>Kniebeugung</b> ?	
Keine Probleme	5
Wiederholte Beugung schmerzhaft	4
Immer schmerzhaft	3
Nur mit Teilbelastung möglich	2
Nicht möglich	0
Wie ist Ihre Schmerzempfindung beim <b>Joggen</b> ?	
Keine Probleme	10
Schmerzen nach >2km	8
Leichte Schmerzen von Beginn	6
Starke Schmerzen	3
Joggen ist unmöglich	0
Wie ist Ihre Schmerzempfindung beim <b>Springen</b> ?	
Keine Probleme	10
Leichte Probleme	7
Ständig Schmerzen	2
Springen ist unmöglich	0

Wie hält Ihr Knie einem **Kinobesuch** stand?

Keine Probleme	10
Konstante Schmerzen	6
Knie immer wieder strecken	4
Unmöglich	0

Wann haben Sie **Schmerzen**?

Keine	10
Leicht und gelegentlich	8
Treten auch in der Nacht auf	6
Gelegentlich invalidisierend	3
Ständig invalidisierend	0

Treten **Schwellungen** auf?

Nein	10
Nach sportlicher Aktivität	8
Nach täglicher Beanspruchung	6
Jeden Morgen	4
Ständig	0

Wann tritt ein **Unsicherheitsgefühl** bei Ihrem Knie auf?

Nie	10
Gelegentlich bei Sport	6
Gelegentlich im Alltag	4
Immer	0

**Atrophie** des VMO? (Wird vom betreuenden Arzt ausgefüllt)

Nein	5
Leicht	3
Deutlich	0

**Flexionsdefizit** (Wird vom betreuenden Arzt ausgefüllt)

> 130	5
100-130	3
< 100	0

**Summe:** \_\_\_\_\_

# KOOS Kniefragebogen

**ANLEITUNG:** Dieser Ankreuzbogen befragt Sie, welchen Eindruck Sie von Ihrem Knie haben. Die dadurch gewonnene Information wird uns helfen zu überwachen, wie es Ihnen mit Ihrem Knie geht und wie gut Sie in der Lage sind, Ihre üblichen Aktivitäten zu verrichten. Bitte pro Frage nur ein Kästchen ankreuzen.

## Symptome

Diese Fragen beziehen sich auf Beschwerden von Seiten Ihres Kniegelenkes **in der vergangenen Woche.**

### S1. Haben Sie Schwellungen an Ihrem Knie?

niemals       selten       manchmal       oft       immer

### S2. Fühlen Sie manchmal ein Mahlen, hören Sie manchmal ein Klicken oder irgendein Geräusch, wenn Sie Ihr Knie bewegen?

niemals       selten       manchmal       oft       immer

### S3. Bleibt Ihr Knie manchmal hängen, oder blockiert es, wenn Sie es bewegen?

niemals       selten       manchmal       oft       immer

### S4. Können Sie Ihr Knie ganz ausstrecken?

niemals       selten       manchmal       oft       immer

### S5. Können Sie Ihr Knie ganz beugen?

niemals       selten       manchmal       oft       immer

## Steifigkeit

Die nachfolgenden Fragen betreffen die Steifigkeit Ihres Kniegelenkes **während der letzten Woche.** Unter Steifigkeit versteht man ein Gefühl der Einschränkung oder Verlangsamung der Fähigkeit Ihr Kniegelenk zu bewegen.

Für jede der nachfolgenden Aktivitäten sollen Sie das Ausmaß der Schwierigkeiten angeben, welche Sie durch Ihr Kniegelenk innerhalb der letzten Woche erfahren haben.

### S6. Wie stark ist Ihre KniestEIFigkeit morgens direkt nach dem Aufstehen?

keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark



**S7. Wie stark ist Ihre KniestEIFigkeit nach dem Sie saßen, lagen, oder sich ausruhten im Verlauf des Tages?**

- keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**Schmerzen**

**P1. Wie oft tut Ihnen Ihr Knie weh?**

- niemals       monatlich       wöchentlich       täglich       immer

Wie ausgeprägt waren Ihre Schmerzen **in der vergangenen Woche** als Sie z.B.:

**P2. sich im Knie drehen?**

- keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**P3. Ihr Knie ganz ausstrecken?**

- keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**P4. Ihr Knie ganz beugen?**

- keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**P5. auf ebenem Boden gehen?**

- keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**P6. Treppen herauf oder heruntergehen?**

- keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**P7. nachts im Bett liegen?**

- keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**P8. saßen oder lagen, z.B. auf der Couch?**

- keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**P9. aufrecht stehen?**

keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

### **Aktivitäten des täglichen Lebens**

Die nachfolgenden Fragen beziehen sich auf Ihre körperliche Leistungsfähigkeit. Hierunter verstehen wir Ihre Fähigkeit sich selbständig zu bewegen bzw. sich selbst zu versorgen.

Für jede der nachfolgenden Aktivitäten sollen Sie das Ausmaß der Schwierigkeiten angeben, welche Sie durch Ihr Kniegelenk **innerhalb der letzten Woche** erfahren haben.

Welche Schwierigkeiten hatten Sie **letzte Woche** als Sie z.B.:

#### **A1. Treppen herunterstiegen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

#### **A2. Treppen hinaufstiegen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

#### **A3. vom Sitzen aufstanden?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

#### **A4. standen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

#### **A5. sich bückten um z.B. etwas vom Boden aufzuheben?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

#### **A6. auf ebenen Boden gingen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

#### **A7. ins Auto ein- oder ausstiegen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

#### **A8. einkaufen gingen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

#### **A9. Strümpfe/Socken anzogen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**A10. vom Bett aufstanden?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**A11. Strümpfe/Socken auszogen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**A12. im Bett lagen und sich drehen, ohne das Knie dabei zu beugen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**A13. in oder aus der Badewanne kamen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**A14. saßen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**A15. sich auf die Toilette setzten oder aufstanden?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**A16. schwere Hausarbeit verrichteten (schrubben, Garten umgraben, ...)?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**A17. leichte Hausarbeit verrichteten (Staub wischen, kochen, ...)?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**Sport und Freizeit**

Die nachfolgenden Fragen beziehen sich auf Ihre körperliche Belastbarkeit im Rahmen eher sportlicher Aktivitäten. Für jede der nachfolgenden Aktivitäten sollen Sie das Ausmaß der Schwierigkeiten angeben, welche Sie durch Ihr Kniegelenk **innerhalb der letzten Woche** erfahren haben.

Hatten Sie Schwierigkeiten **letzte Woche** als Sie z.B.:

**SP1. in die Hocke gingen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**SP2. rannten?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**SP3. hüpfen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**SP4. sich auf Ihrem kranken Knie umdrehen?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**SP5. sich hinknieten?**

keine       wenig       einige       große       sehr große

**Beeinflussung der Lebensqualität durch das betroffene Knie****Q1. Wie oft spüren Sie Ihr erkranktes Knie?**

niemals       monatlich       wöchentlich       täglich       immer

**Q2. Haben Sie Ihre Lebensweise verändert um eventuell Ihrem Knie schadende Tätigkeiten zu vermeiden**

nicht       wenig       etwas       stark       vollständig

**Q3. Wie sehr macht es Ihnen zu schaffen, dass Ihr Knie nicht stabil ist?**

gar nicht       wenig       einiges       schlimm       sehr schlimm

**Q4. Wie würden Sie insgesamt die Schwierigkeiten bewerten die Sie durch das Knie haben?**

keine       wenig       etwas       große       sehr große

# IKDC subjektiver Fragebogen

## IKDC subjektiv - Formblatt zur subjektiven Beurteilung des Kniegelenks

### **SYMPTOME/SCHMERZEN:**

Wählen Sie zur Beurteilung der Symptome die höchste Aktivitätsstufe, die Sie Ihrer Meinung nach ohne erhebliche Symptome ausüben könnten, selbst wenn Sie auf dieser Stufe keine Aktivitäten ausüben.

#### 1. Was ist die höchste Aktivitätsstufe, die Sie ohne erhebliche Schmerzen im Knie ausüben können?

- Sehr anstrengende Aktivitäten wie Springen oder Drehbewegungen bei einseitiger Fußbelastung (Basketball oder Fußball)
- Anstrengende Aktivitäten wie schwere körperliche Arbeit, Skilaufen oder Tennis
- Mäßig anstrengende Aktivitäten wie mäßige körperliche Arbeit, Laufen oder Joggen
- Leichte Aktivitäten wie Gehen, Haus- oder Gartenarbeit
- Ich kann aufgrund meiner Schmerzen im Knie keine der oben genannten Aktivitäten ausführen.

#### 2. Wie oft hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen Schmerzen?

Kreuzen Sie eines der Kästchen in der nachstehenden Skala an. Die Skala beginnt mit 0 (Nie) und geht mit zunehmender Häufigkeit der Schmerzen bis zu 10 (ständig Schmerzen).

<b>Nie</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	<b>Ständig Schmerzen</b>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

#### 3. Wie stark sind Ihre Schmerzen?

Kreuzen Sie eines der Kästchen in der nachstehenden Skala an. Die Skala beginnt mit 0 (keine Schmerzen) und geht mit zunehmender Stärke der Schmerzen bis zu 10 (unerträgliche Schmerzen).

<b>Nie</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	<b>Unerträgliche Schmerzen</b>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

#### 4. Wie steif oder geschwollen war Ihr Knie während der vergangenen 4 Wochen?

- überhaupt nicht
- etwas
- ziemlich
- sehr
- extrem

#### 5. Was ist die höchste Aktivitätsstufe, die Sie ohne erhebliches Anschwellen des Knies ausüben können?

- Sehr anstrengende Aktivitäten wie Springen oder Drehbewegungen bei einseitiger Fußbelastung (Basketball oder Fußball)
- Anstrengende Aktivitäten wie schwere körperliche Arbeit, Skilaufen oder Tennis
- Mäßig anstrengende Aktivitäten wie mäßige körperliche Arbeit, Laufen oder Joggen
- Leichte Aktivitäten wie Gehen, Haus- oder Gartenarbeit
- Ich kann aufgrund meiner Schmerzen im Knie keine der oben genannten Aktivitäten ausführen.

**6. Hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen ein gesperrtes Knie oder ist Ihr Knie aus- und wieder eingeschnappt?**

- Ja  
 Nein

**7. Was ist die höchste Aktivitätsstufe, die Sie ohne erhebliche, durch Knieschwäche verursachte, Gangunsicherheit ausüben können?**

- Sehr anstrengende Aktivitäten wie Springen oder Drehbewegungen bei einseitiger Fußbelastung (Basketball oder Fußball)  
 Anstrengende Aktivitäten wie schwere körperliche Arbeit, Skilaufen oder Tennis  
 Mäßig anstrengende Aktivitäten wie mäßige körperliche Arbeit, Laufen oder Joggen  
 Leichte Aktivitäten wie Gehen, Haus- oder Gartenarbeit  
 Ich kann aufgrund meiner Schmerzen im Knie keine der oben genannten Aktivitäten ausführen.

## **SPORTLICHE BETÄTIGUNG:**

**8. Was ist die höchste Aktivitätsstufe, an der Sie regelmäßig teilnehmen können?**

- Sehr anstrengende Aktivitäten wie Springen oder Drehbewegungen bei einseitiger Fußbelastung (Basketball oder Fußball)  
 Anstrengende Aktivitäten wie schwere körperliche Arbeit, Skilaufen oder Tennis  
 Mäßig anstrengende Aktivitäten wie mäßige körperliche Arbeit, Laufen oder Joggen  
 Leichte Aktivitäten wie Gehen, Haus- oder Gartenarbeit  
 Ich kann aufgrund meiner Schmerzen im Knie keine der oben genannten Aktivitäten ausführen.

**9. Wie schwierig sind aufgrund Ihres Knies die folgenden Aktivitäten für Sie?**

	Gar nicht schwierig	Minimal schwierig	Ziemlich schwierig	Extrem schwierig	Unmöglich
a. Treppensteigen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. Treppen hinunter gehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. auf dem Knie knien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d. Hockstellung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e. normal sitzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f. von einem Stuhl aufstehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g. geradeaus laufen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h. hochspringen und auf dem betroffenen Bein landen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
i. beim Gehen/Laufen schnell starten und stoppen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



# Lysholm(-Gillquist) Kniefragebogen

## Lysholm-Score

Bitte kreuzen Sie den entsprechenden Punktwert zu Ihrer aktuellen Situation an!

---

### 1. Hinken oder humpeln Sie?

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| a) nie                      | 5 |
| b) wenig oder nur zeitweise | 3 |
| c) schwer und ständig       | 0 |

### 2. Benötigen Sie eine Gehilfe?

- |                      |   |
|----------------------|---|
| a) nein              | 5 |
| b) Stock oder Krücke | 3 |
| c) gehunfähig        | 0 |

### 3. Treppensteigen?

- |                            |    |
|----------------------------|----|
| a) problemlos              | 10 |
| b) etwas erschwert         | 6  |
| c) langsam, Stufe um Stufe | 2  |
| d) unmöglich               | 0  |

### 4. In die Hocke gehen?

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| a) problemlos                      | 5 |
| b) etwas erschwert                 | 4 |
| c) schwer möglich (nicht über 90°) | 2 |
| d) unmöglich                       | 0 |



### 5. Unsicherheitsgefühl im Kniegelenk?

a) nie	30
b) selten beim Sport oder schweren Anstrengungen	25
c) häufig beim Sport oder schweren Anstrengungen	20
d) gelegentlich bei Alltagsarbeiten	10
e) oft bei Alltagsarbeiten	5
f) bei jeder Bewegung bzw. jedem Schritt	0

### 6. Schmerzen?

a) keine	30
b) ab und zu ein wenig bei schwerer Anstrengung	25
c) Auftreten bei Knieunsicherheit	20
d) Auftreten bei schweren Anstrengungen	15
e) Auftreten während oder nach einem Spaziergang von mehr als 2 km Länge	10
f) Auftreten während oder nach einem Spaziergang von weniger als 2 km Länge	5
g) ständig und stark	0

### 7. Schwellung des Kniegelenkes ?

a) keine	10
b) bei Knieunsicherheit	7
c) bei schwerer Anstrengung	5
d) bei leichter Anstrengung	2
e) ständig	0

### 8. Muskelschwäche des/ der Beine(s) ?

a) keine	5
b) gering (Oberschenkelumfang 1-2 cm verringert)	3
c) ausgeprägt (Oberschenkelumfang mehr als 2 cm verringert)	0

---

Gesamt:

# Tegner (-Lysholm) Kniefragebogen

Bitte kreuzen Sie in der untenstehenden Liste die höchste Stufe an, in die Sie sich derzeit einordnen können.

10	<input type="checkbox"/>	<b>Wettkampfsport</b>	Fussball, nationale und internationale Elite
9	<input type="checkbox"/>	<b>Wettkampfsport</b>	Fussball, niedrigere Ligen; Eishockey Ringensport, Kampfsport, Gymnastik
8	<input type="checkbox"/>	<b>Wettkampfsport</b>	Squash oder Badminton, Alpin Ski Leichtathletik (Sprungdisziplinen)
7	<input type="checkbox"/>	<b>Wettkampfsport</b>	Tennis, Leichtathletik (Laufdisziplinen) Motorcross, Handball, Basketball
	<input type="checkbox"/>	<b>Freizeitsport</b>	Fussball, Eishockey Squash, Leichtathletik (Sprungdisziplinen)
6	<input type="checkbox"/>	<b>Freizeitsport</b>	Tennis, Badminton, Leichtathletik (Laufdisziplinen), Motorcross, Handball, Basketball
5	<input type="checkbox"/>	<b>Arbeit/Beruf</b>	Schwere körperliche Arbeit (z. B. Bauarbeiten, Waldarbeiten, usw.)
	<input type="checkbox"/>	<b>Wettkampfsport</b>	Velo oder Mountainbike oder Langlauf
	<input type="checkbox"/>	<b>Freizeitsport</b>	Jogging auf unebenem Untergrund (mindestens 2 Mal pro Woche)
4	<input type="checkbox"/>	<b>Arbeit/Beruf</b>	schwere körperliche Arbeit (z. B. Chauffeur, schwere Hausarbeiten, Lagerarbeit, usw.)
	<input type="checkbox"/>	<b>Freizeitsport</b>	Rad oder Mountainbike, Langlauf Jogging auf ebenem Untergrund (mindestens 2 Mal pro Woche)
3	<input type="checkbox"/>	<b>Arbeit/Beruf</b>	Leichte körperliche Arbeit (z. B. Gastronomie, Pflegeberufe, usw.)
	<input type="checkbox"/>	<b>Wettkampf- oder Freizeitsport</b>	Schwimmen
	<input type="checkbox"/>	<b>Waldspaziergänge (auf unebenem Untergrund) möglich</b>	
2	<input type="checkbox"/>	<b>Arbeit/Beruf</b>	Leichte Arbeit (wechselnd Sitzen, Stehen, Laufen und Treppensteigen)
	<input type="checkbox"/>	<b>Gehen auf unebenem Untergrund möglich, aber keine Waldspaziergänge</b>	
1	<input type="checkbox"/>	<b>Arbeit/Beruf</b>	Sitzende Tätigkeit (z. B. Büro, Callcenter, usw.)
	<input type="checkbox"/>	<b>Gehen auf ebenem Untergrund möglich</b>	
0	<input type="checkbox"/>	<b>Arbeitsunfähigkeit wegen Kniebeschwerden</b>	
	<input type="checkbox"/>	<b>Gehen eingeschränkt möglich</b>	







	Δ J-Sign	<input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> leicht	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> deutlich				
<b>4.</b>	<b>Kompartimentbefunde</b>	<b>Krepitation</b>		<b>Krepitation mit</b>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Δ Krepitation anterior (PF)	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> leichtem Schmerz	<input type="checkbox"/> > leichtem Schmerz				
	Δ Krepitation mediales Komp	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> leichtem Schmerz	<input type="checkbox"/> > leichtem Schmerz				
	Δ Krepitation laterales Komp.	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> leichtem Schmerz	<input type="checkbox"/> > leichtem Schmerz				
<b>5.</b>	<b>Transplantatentnahmemorbidity</b>	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> gering	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> deutlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>6.</b>	<b>Röntgenbefund</b>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Medialer Gelenkspalt	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> gering	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> deutlich				
	Lateraler Gelenkspalt	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> gering	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> deutlich				
	Femoropatellar-Gelenk	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> gering	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> deutlich				
	Vorderer Gelenkspalt (sagittal)	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> gering	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> deutlich				
	Hinterer Gelenkspalt (sagittal)	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> gering	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> deutlich				
<b>7.</b>	<b>Funktionstest</b>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Hüpfen auf einem Bein (in % der gegenüberliegenden Seite)	<input type="checkbox"/> ≥90%	<input type="checkbox"/> 89-76%	<input type="checkbox"/> 75-50%	<input type="checkbox"/> ≤50%				
	<b>** Abschlußbeurteilung</b>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

\* Gruppengrad: Der Gruppengrad richtet sich nach dem niedrigsten Grad innerhalb einer Gruppe.

\*\* Abschlußbeurteilung: Nach schlechtestem Grad der ersten drei Gruppen

#### IKDC-AUSSCHUSS:

**AOSSM:** Anderson, A., Bergfeld, J., Boland, A., Dye, S., Feagin, J., Harner, C., Mohtadi, N., Richmond, J., Shelbourne, D., Terry, G.

**ESSKA:** Staubli, H., Hefti, F., Höher, J., Jacob, R., Müller, W., Neyret, P.

**APOSSM:** Chan, K., Kurosaka, M.

## Einbein-Sprung-Test

Aus IKDC objektiv (7.Funktionstest)

Sprungweite ipsilateral	Sprungweite kontralateral
cm	cm
cm	cm
cm	cm
Durchschnittswert	Durchschnittswert
cm	cm



# Literaturverzeichnis

- Albrecht, C., Reuter, C. A., Stelzeneder, D., Zak, L., Tichy, B., Nurnberger, S., Boesmuel-  
ler, S., Marlovits, S., Trattnig, S., Hajdu, S., and Aldrian, S. (2017). Matrix production  
affects mri outcomes after matrix-associated autologous chondrocyte transplantation in  
the knee. *American Journal of Sports Medicine*, 45( 10),2238–2246.
- Amis, A. A., Firer, P., Mountney, J., Senavongse, W., and Thomas, N. P. (2003). Anatomy  
and biomechanics of the medial patellofemoral ligament. *The Knee*, 10( 3),215–220.
- Amis, A. A., Senavongse, W., and Bull, A. M. (2006). Patellofemoral kinematics during  
knee flexion-extension: an in vitro study. *Journal of Orthopaedic Research*, 24( 12),2201–  
2211.
- Arendt, E. A., Berruto, M., Filardo, G., Ronga, M., Zaffagnini, S., Farr, J., Ferrua, P.,  
Grassi, A., and Condello, V. (2016). Early osteoarthritis of the patellofemoral joint.  
*Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 24( 6),1836–1844.
- Arendt, E. A. and Dejour, D. (2013). Patella instability: building bridges across the ocean  
a historic review. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 21( 2),279–293.
- Athanasiou, K., Rosenwasser, M., Buckwalter, J., Malinin, T., and Mow, V. (1991). Inter-  
species comparisons of in situ intrinsic mechanical properties of distal femoral cartilage.  
*Journal of Orthopaedic Research*, 9,330–340.
- Atkin, D., Fithian, D. C., Marangi, K., Stone, M. L., Dobson, B., and Mendelsohn, C.  
(2000). Characteristics of patients with primary acute lateral patellar dislocation and  
their recovery within the first 6 months of injury. *American Journal of Sports Medicine*,  
28( 4),472–479.
- Baier, C., Springorum, H. R., Beckmann, J., Grifka, J., and Matussek, J. (2011). Treatment  
of patellar instability in children and adolescents. *Orthopäde*, 40( 10),868–870.
- Barber-Westin, S., Noyes, F., and McCloskey, J. (1999). Rigorous statistical reliability,  
validity, and responsiveness testing of the cincinnati knee rating system in 350 subjects  
with uninjured, injured, or anterior cruciate ligament-reconstructed knees. *American  
Journal of Sports Medicine*, 27( 4).

- Barr, C., Bauer, J. S., Malfair, D., Ma, B., Henning, T. D., Steinbach, L., and Link, T. M. (2007). Mr imaging of the ankle at 3 tesla and 1.5 tesla: protocol optimization and application to cartilage, ligament and tendon pathology in cadaver specimens. *European Radiology*, 17( 6),1518–1528.
- Basad, E., Ishaque, B., Bachmann, G., Sturz, H., and Steinmeyer, J. (2010). Matrix-induced autologous chondrocyte implantation versus microfracture in the treatment of cartilage defects of the knee: a 2-year randomised study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 18( 4),519–27.
- Baum, T., Joseph, G. B., Arulanandan, A., Nardo, L., Virayavanich, W., Carballido-Gamio, J., Nevitt, M. C., Lynch, J., McCulloch, C. E., and Link, T. M. (2012). Association of magnetic resonance imaging-based knee cartilage t2 measurements and focal knee lesions with knee pain: data from the osteoarthritis initiative. *Arthritis Care and Research (Hoboken)*, 64( 2),248–255.
- Baum, T., Joseph, G. B., Karampinos, D. C., Jungmann, P. M., Link, T. M., and Bauer, J. S. (2013). Cartilage and meniscal t2 relaxation time as non-invasive biomarker for knee osteoarthritis and cartilage repair procedures. *Osteoarthritis Cartilage*, 21( 10),1474–1484.
- Baumgaertner, M. R., Cannon, W. D., J., Vittori, J. M., Schmidt, E. S., and Maurer, R. C. (1990). Arthroscopic debridement of the arthritic knee. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 0( 253),197–202.
- Bentley, G., Biant, L. C., Carrington, R. W., Akmal, M., Goldberg, A., Williams, A. M., Skinner, J. A., and Pringle, J. (2003). A prospective, randomised comparison of autologous chondrocyte implantation versus mosaicplasty for osteochondral defects in the knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 85( 2),223–230.
- Best, R., Hingelbaum, S., Huth, J., and Mauch, F. (2016). Mri-associated classification to evaluate the outcome after autologous reconstruction of the medial patellofemoral ligament: a preliminary study. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 136( 2),249–255.
- Blackman, A. J., Smith, M. V., Flanigan, D. C., Matava, M. J., Wright, R. W., and Brophy, R. H. (2013). Correlation between magnetic resonance imaging and clinical outcomes after cartilage repair surgery in the knee: a systematic review and meta-analysis. *American Journal of Sports Medicine*, 41( 6),1426–1434.
- Briggs, K. K., Steadman, J. R., Hay, C. J., and Hines, S. L. (2009). Lysholm score and tegner activity level in individuals with normal knees. *American Journal of Sports Medicine*, 37( 5),898–901.



- Brittberg, M., Lindahl, A., Nilsson, A., Ohlsson, C., Isaksson, O., and Peterson, L. (1994). Treatment of deep cartilage defects in the knee with autologous chondrocyte transplantation. *The New England Journal of Medicine*, 331( 14),889–895.
- Brittberg, M. and Winalski, C. S. (2003). Evaluation of cartilage injuries and repair. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 85-A Suppl 2,58–69.
- Burger, D., Feucht, M., Muench, L. N., Forkel, P., Imhoff, A. B., and Mehl, J. (2021). Good clinical outcomes after patellar cartilage repair with no evidence for inferior results in complex cases with the need for additional patellofemoral realignment procedures: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, .
- Burks, R. T., Desio, S. M., Bachus, K. N., Tyson, L., and Springer, K. (1998). Biomechanical evaluation of lateral patellar dislocations. *The American Journal of Knee Surgery*, 11( 1),24–31.
- Casteleyn, P. P. and Handelberg, F. (1989). Arthroscopy in the diagnosis of occult dislocation of the patella. *Acta Orthopaedica Belgica*, 55( 3),381–383.
- Chen, F. S., Frenkel, S. R., and Di Cesare, P. E. (1999). Repair of articular cartilage defects: part i. basic science of cartilage healing. *American Journal of Orthopedics*, 28( 1),31–33.
- Colvin, A. C. and West, R. V. (2008). Patellar instability. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 90( 12),2751–2762.
- Conlan, T., Garth, W. P., J., and Lemons, J. E. (1993). Evaluation of the medial soft-tissue restraints of the extensor mechanism of the knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 75( 5),682–693.
- Crawford, D. C., DeBerardino, T. M., and Williams, R. J., r. (2012). Neocart, an autologous cartilage tissue implant, compared with microfracture for treatment of distal femoral cartilage lesions: an fda phase-ii prospective, randomized clinical trial after two years. *J Bone Joint Surg Am*, 94( 11),979–89.
- Dammerer, D., Liebensteiner, M., Kujala, U., Emmanuel, K., Kopf, S., Dirisamer, F., and Giesinger, J. (2018). Validation of the german version of the kujala score in patients with patellofemoral instability: a prospective multi-centre study. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 138,527–535.
- de Windt, T. S., Welsch, G. H., Brittberg, M., Vonk, L. A., Marlovits, S., Trattnig, S., and Saris, D. B. (2013). Is magnetic resonance imaging reliable in predicting clinical outcome after articular cartilage repair of the knee? a systematic review and meta-analysis. *American Journal of Sports Medicine*, 41( 7),1695–1702.
- Desio, S., Burks, R., and Bachus, K. (1998). Soft tissue restraints to lateral patellar translation in the human knee. *American Journal of Sports Medicine*, 26( 1),59–65.

- Dewan, V., Webb, M. S. L., Prakash, D., Malik, A., Gella, S., and Kipps, C. (2020). When does the patella dislocate? a systematic review of biomechanical and kinematic studies. *Journal of Orthopaedics*, 20,70–77.
- Domayer, S., Welsch, G., Dorotka, R., Mamisch, T., Marlovits, S., Szomolanyi, P., and Trattnig, S. (2008). Mri monitoring of cartilage repair in the knee- a review. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 12( 4),302–317.
- Dunn, T. C., Lu, Y., Jin, H., Ries, M. D., and Majumdar, S. (2004). T2 relaxation time of cartilage at mr imaging: Comparison with severity of knee osteoarthritis. *Radiology*, 232( 2),592–598.
- Duvvuri, U., Reddy, R., Patel, S., Kaufman, J., Kneeland, J., and Leigh, J. (1997). T1rho relaxation in articular cartilage: Effect of enzymatic degradation. *Magnetic Resonance in Medicine*, 38( 863),863–867.
- Ebert, J. R., Robertson, W. B., Woodhouse, J., Fallon, M., Zheng, M. H., Ackland, T., and Wood, D. J. (2011). Clinical and magnetic resonance imaging-based outcomes to 5 years after matrix-induced autologous chondrocyte implantation to address articular cartilage defects in the knee. *American Journal of Sports Medicine*, 39( 4),753–763.
- Eckstein, F. and Wirth, W. (2011). Quantitative cartilage imaging in knee osteoarthritis. *Arthritis*, 2011,1–19.
- Elias, D. A., White, L. M., and Fithian, D. C. (2002). Acute lateral patellar dislocation at mr imaging: injury patterns of medial patellar soft-tissue restraints and osteochondral injuries of the inferomedial patella. *Radiology*, 225( 3),736–743.
- Elias, J. J., Cech, J. A., Weinstein, D. M., and Cosgrea, A. J. (2004). Reducing the lateral force acting on the patella does not consistently decrease patellofemoral pressures. *American Journal of Sports Medicine*, 32( 5),1202–1208.
- Elias, J. J. and Cosgrea, A. J. (2006). Technical errors during medial patellofemoral ligament reconstruction could overload medial patellofemoral cartilage: a computational analysis. *American Journal of Sports Medicine*, 34( 9),1478–1485.
- Erggelet, C., Sittinger, M., and Lahm, A. (2003). The arthroscopic implantation of autologous chondrocytes for the treatment of full-thickness cartilage defects of the knee joint. *Arthroscopy*, 19( 1),108–110.
- Feller, J. A., Amis, A. A., Andrish, J. T., Arendt, E. A., Erasmus, P. J., and Powers, C. M. (2007). Surgical biomechanics of the patellofemoral joint. *Arthroscopy*, 23( 5),542–553.
- Felson, D. T., Niu, J., Guerhazi, A., Roemer, F., Aliabadi, P., Clancy, M., Torner, J., Lewis, C. E., and Nevitt, M. C. (2007). Correlation of the development of knee pain with enlarging bone marrow lesions on magnetic resonance imaging. *Arthritis and Rheumatism*, 56( 9),2986–2992.

- Feucht, M. J., Mehl, J., Forkel, P., Achtnich, A., Schmitt, A., Izadpanah, K., Imhoff, A. B., and Berthold, D. P. (2020). Failure analysis in patients with patellar redislocation after primary isolated medial patellofemoral ligament reconstruction. *The Orthopedic Journal of Sports Medicine*, 8( 6),1–10.
- Fithian, D. C., Paxton, E. W., Stone, M. L., Silva, P., Davis, D. K., Elias, D. A., and White, L. M. (2004). Epidemiology and natural history of acute patellar dislocation. *American Journal of Sports Medicine*, 32( 5),1114–1121.
- Fitzgerald, J. B., Jin, M., and Grodzinsky, A. J. (2006). Shear and compression differentially regulate clusters of functionally related temporal transcription patterns in cartilage tissue. *Journal of Biological Chemistry*, 281( 34),24095–24103.
- Frings, J., Krause, M., Akoto, R., Wohlmuth, P., and Frosch, K. H. (2018). Combined distal femoral osteotomy (dfo) in genu valgum leads to reliable patellar stabilization and an improvement in knee function. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 26( 12),3572–3581.
- Frosch, S., Balcarek, P., Walde, T. A., Schuttrumpf, J. P., Wachowski, M. M., Ferleman, K. G., Sturmer, K. M., and Frosch, K. H. (2011). The treatment of patellar dislocation: a systematic review. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 149( 6),630–645.
- Gaissmaier, C., Fritz, J., Schewe, B., Albrecht, D., Weise, K., Stoop, R., Fink, U., Giordano, N., Ashammakhi, N., and Aicher, W. K. (2005). Development of novocart®3d, a novel system for scaffold augmented transplantation of autologous chondrocytes. *Aktuelle Traumatologie*, 35( 5),267–273.
- Gersing, A. S., Holwein, C., Suchowierski, J., Feuerriegel, G., Gassert, F. T., Baum, T., Karampinos, D., Schwaiger, B. J., Makowski, M. R., Burgkart, R., Woertler, K., Imhoff, A. B., and Jungmann, P. (2020). Cartilage t2 relaxation times and subchondral trabecular bone parameters predict morphological outcome after matrix-associated autologous chondrocyte implantation with autologous bone grafting. *The American Journal of Sports Medicine*, 48( 14),3573–3585.
- Gigante, A., Enea, D., Greco, F., Bait, C., Denti, M., Schonhuber, H., and Volpi, P. (2009). Distal realignment and patellar autologous chondrocyte implantation: mid-term results in a selected population. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 17( 1),2–10.
- Gillogly, S. D. and Arnold, R. M. (2014). Autologous chondrocyte implantation and anteromedialization for isolated patellar articular cartilage lesions: 5- to 11-year follow-up. *American Journal of Sports Medicine*, 42( 4),912–920.
- Gomoll, A. H., Gillogly, S. D., Cole, B. J., Farr, J., Arnold, R., Hussey, K., and Minas, T. (2014). Autologous chondrocyte implantation in the patella: a multicenter experience. *American Journal of Sports Medicine*, 42( 5),1074–1081.

- Grodzinsky, A. J., Levenston, M. E., Jin, M., and Frank, E. H. (2000). Cartilage tissue remodeling in response to mechanical forces. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2,691–713.
- Guermazi, A., Roemer, F., Alizai, H., Winalski, C. S., Welsch, G., Brittberg, M., and Trattnig, S. (2015). State of the art- mr imaging after knee cartilage repair surgery. *Radiology*, 277( 1),23–43.
- Hautamaa, P. V., Fithian, D. C., Kaufman, K. R., Daniel, D. M., and Pohlmeier, A. M. (1998). Medial soft tissue restraints in lateral patellar instability and repair. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 0( 349),174–182.
- Hefti, F. and Müller, W. (1993). Current state of evaluation of knee ligament lesions. the new ikdc knee evaluation form. *Orthopäde*, 22( 6),351–362.
- Hemmerich, A., Brown, H., Smith, S., Marthandam, S. S., and Wyss, U. P. (2006). Hip, knee, and ankle kinematics of high range of motion activities of daily living. *Journal of Orthopaedic Research*, 24( 4),770–81.
- Henderson, I., Lavigne, P., Valenzuela, H., and Oakes, B. (2007). Autologous chondrocyte implantation: superior biologic properties of hyaline cartilage repairs. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 455,253–261.
- Henderson, I. J. and Lavigne, P. (2006). Periosteal autologous chondrocyte implantation for patellar chondral defect in patients with normal and abnormal patellar tracking. *Knee*, 13( 4),274–279.
- Hinckel, B. B., Pratte, E. L., Baumann, C. A., Gowd, A. K., Farr, J., Liu, J. N., Yanke, A. B., Chahla, J., and Sherman, S. L. (2020). Patellofemoral cartilage restoration: A systematic review and meta-analysis of clinical outcomes. *Am J Sports Med*, 48( 7),1756–1772.
- Hohne, S., Gerlach, K., Irlenbusch, L., Schulz, M., Kunze, C., and Finke, R. (2017). Patella dislocation in children and adolescents. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 155( 2),169–176.
- Holtzman, D. J., Theologis, A. A., Carballido-Gamio, J., Majumdar, S., Li, X., and Benjamin, C. (2010). T1rho and t2 quantitative magnetic resonance imaging analysis of cartilage regeneration following microfracture and mosaicplasty cartilage resurfacing procedures. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 32( 4),914–923.
- ICRS (2000). Icrs 2000 standards workshop. The ICRS Clinical Cartilage Injury Evaluation system -2000.
- Imhoff, A. B., Burkart, A., and Ottl, G. (1999). Transfer of the posterior femoral condyle. first experience with a salvage operation. *Orthopäde*, 28( 1),45–51.

- Imhoff, A. B., Linke, R., and Baumgartner, R. (2014). *Checkliste Orthopädie*. Thieme, Stuttgart, 3 edition.
- Imhoff, F. B., Cotic, M., Liska, F., Dyrna, F. G. E., Beitzel, K., Imhoff, A. B., and Herbst, E. (2019). Derotational osteotomy at the distal femur is effective to treat patients with patellar instability. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 27( 2),652–658.
- Irger, M., Achtnich, A., Imhoff, A. B., and Schmitt, A. (2020). Diagnosis and therapy of chronic patellofemoral instability. *Orthopäde*, 49( 1),73–84.
- Irrgang, J., Anderson, A., Boland, A., Harner, C., Kurosaka, M., Neyret, P., Richmond, J., and Shelborne, K. (2001). Development and validation of the international knee documentation committee subjective knee form. *The American Journal of Sports Medicine*, 29( 5),600–613.
- Jagodzinski, M. and Müller, W. (2016). *Verletzungen der Bänder und der Kapsel*, volume 2, page 130. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Johnson, L. (1986). Arthroscopic abrasion arthroplasty historical and pathologic perspective: present status. *Arthroscopy*, 2,54–69.
- Jung, M., Ruschke, S., Karampinos, D., Holwein, C., Suchowierski, A., Gersing, A. S., Bamberg, F., and Jungmann, P. (2020). Quantitative 3-t mri outcome evaluation after spongiosa-augmented maci at the knee: The importance of subchondral bone parameters. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 24( 1-8).
- Jungmann, P. M., Baum, T., Bauer, J. S., Karampinos, D. C., Erdle, B., Link, T. M., Li, X., Trattng, S., Rummeny, E. J., Woertler, K., and Welsch, G. H. (2014). Cartilage repair surgery: outcome evaluation by using noninvasive cartilage biomarkers based on quantitative mri techniques? *BioMed Research International*, 2014,1–17.
- Jungmann, P. M., Baum, T., Nevitt, M. C., Nardo, L., Gersing, A. S., Lane, N. E., McCulloch, C. E., Rummeny, E. J., and Link, T. M. (2016). Degeneration in acl injured knees with and without reconstruction in relation to muscle size and fat content-data from the osteoarthritis initiative. *PLoS One*, 11( 12),1–15.
- Jungmann, P. M., Gersing, A. S., Baumann, F., Holwein, C., Braun, S., Neumann, J., Zarnowski, J., Hofmann, F. C., Imhoff, A. B., Rummeny, E. J., and Link, T. M. (2019). Cartilage repair surgery prevents progression of knee degeneration. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 27( 9),3001–3013.
- Jungmann, P. M., Kraus, M. S., Nardo, L., Liebl, H., Alizai, H., Joseph, G. B., Liu, F., Lynch, J., McCulloch, C. E., Nevitt, M. C., and Link, T. M. (2013). T2 relaxation time measurements are limited in monitoring progression, once advanced cartilage defects at the knee occur: Longitudinal data from the osteoarthritis initiative. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 38( 6),1415–1424.

- Jungmann, P. M., Li, X., Nardo, L., Subburaj, K., Lin, W., Ma, C. B., Majumdar, S., and Link, T. M. (2012). Do cartilage repair procedures prevent degenerative meniscus changes?: longitudinal t1rho and morphological evaluation with 3.0-t mri. *American Journal of Sports Medicine*, 40( 12),2700–2708.
- Katchburian, M. V., Bull, A. M., Shih, Y. F., Heatley, F. W., and Amis, A. A. (2003). Measurement of patellar tracking: assessment and analysis of the literature. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 0( 412),241–259.
- Kessler, S., Lang, S., Puhl, W., and Stöve, J. (2003). The knee injury and osteoarthritis outcome score – a multifunctional questionnaire to measure outcome in knee arthroplasty. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 141( 3),277–288.
- Kijowski, R., Blankenbaker, D., Munoz del Rio, A., Baer, G., and Graf, B. (2014). Evaluation of the articular cartilage of the knee joint: Value of adding a t2 mapping sequence to a routine mr imaging protocol. *Radiology*, 267( 2),503–513.
- Koster, I. M., Oei, E. H., Hensen, J. H., Boks, S. S., Koes, B. W., Vroegindeweyj, D., Hunink, M. G., and Bierma-Zeinstra, S. M. (2011). Predictive factors for new onset or progression of knee osteoarthritis one year after trauma: Mri follow-up in general practice. *European Radiology*, 21( 7),1509–1516.
- Krause, F., Kolling, C., Brantschen, R., and Sieber, H. P. (2006). Medium-term results after m. vastus medialis obliquus-plasty for lateral patellar dislocation. *Orthopäde*, 35( 1),94–101.
- Kumar, D., Subburaj, K., Lin, W., Karampinos, D. C., McCulloch, C. E., Li, X., Link, T. M., Souza, R. B., and Majumdar, S. (2013). Quadriceps and hamstrings morphology is related to walking mechanics and knee cartilage mri relaxation times in young adults. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 43( 12),881–890.
- Lanz, T. and Wachsmuth, W. (1972). *Bein und Statik*. Springer.
- LaPrade, R. F., Engebretsen, A. H., Ly, T. V., Johansen, S., Wentorf, F. A., and Engebretsen, L. (2007). The anatomy of the medial part of the knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 89( 9),2000–2010.
- Lee, O. S., Ahn, S., and Lee, Y. S. (2018). Changes of sagittal and axial alignments of patella after open- and closed-wedge high-tibial osteotomy: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Knee Surgery*, 31( 7),625–634.
- Lespasio, M. J., Piuizzi, N. S., Husni, M. E., Muschler, G. F., Guarino, A., and Mont, M. A. (2017). Knee osteoarthritis: A primer. *The Permanente Journal*, 21,16–183.

- Li, X., Benjamin Ma, C., Link, T. M., Castillo, D. D., Blumenkrantz, G., Lozano, J., Carballido-Gamio, J., Ries, M., and Majumdar, S. (2007). In vivo t1rho and t2 mapping of articular cartilage in osteoarthritis of the knee using 3t mri. *Osteoarthritis and Cartilage*, 15( 7),789–797.
- Link, T. M. and Li, X. (2018). Establishing compositional mri of cartilage as a biomarker for clinical practice. *Osteoarthritis and Cartilage*, 26( 9),1137–1139.
- Lippacher, S., Dreyhaupt, J., Williams, S. R., Reichel, H., and Nelitz, M. (2014). Reconstruction of the medial patellofemoral ligament: Clinical outcomes and return to sports. *American Journal of Sports Medicine*, 42( 7),1661–1668.
- Liu, Y. W., Tran, M. D., Skalski, M. R., Patel, D. B., White, E. A., Tomasian, A., Gross, J. S., Vangsness, C. T., and Matcuk, G. R., J. (2019). Mr imaging of cartilage repair surgery of the knee. *Clinical Imaging*, 58,129–139.
- Lysholm, J. and Gillquist, J. (1982). Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale. *The American Journal of Sports Medicine*, 10( 3),150–154.
- Lysholm, J. and Tegner, Y. (2007). Knee injury rating scales. *Acta Orthopædica*, 78( 4),445–453.
- Maenpaa, H., Huhtala, H., and Lehto, M. U. (1997). Recurrence after patellar dislocation. redislocation in 37/75 patients followed for 6-24 years. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 68( 5),424–426.
- Marlovits, S., Aldrian, S., Tichy, B., Albrecht, C., and Nurnberger, S. (2009). Biomaterial for autologous chondrocyte transplantation. *Orthopäde*, 38( 11),1045–1052.
- Marlovits, S., Aldrian, S., Wondrasch, B., Zak, L., Albrecht, C., Welsch, G., and Trattnig, S. (2012). Clinical and radiological outcomes 5 years after matrix-induced autologous chondrocyte implantation in patients with symptomatic, traumatic chondral defects. *American Journal of Sports Medicine*, 40( 10),2273–2280.
- Marlovits, S., Singer, P., Zeller, P., Mandl, I., Hallerc, J., and Trattnig, S. (2006). Magnetic resonance observation of cartilage repair tissue (mocart) for the evaluation of autologous chondrocyte transplantation- determination of interobserver variability and correlation to clinical outcome after 2 years. *European Journal of Radiology*, 35( 57),16–23.
- Marlovits, S., Striessnig, G., Resinger, C. T., Aldrian, S. M., Vecsei, V., Imhof, H., and Trattnig, S. (2004). Definition of pertinent parameters for the evaluation of articular cartilage repair tissue with high-resolution magnetic resonance imaging. *European Journal of Radiology*, 52( 3),310–319.
- Matzat, S. J., van Tiel, J., Gold, G. E., and Oei, E. H. (2013). Quantitative mri techniques of cartilage composition. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 3( 3),162–174.

- Mehl, J., Feucht, M. J., Bode, G., Dovi-Akue, D., Sudkamp, N. P., and Niemeyer, P. (2016). Association between patellar cartilage defects and patellofemoral geometry: a matched-pair mri comparison of patients with and without isolated patellar cartilage defects. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 24( 3),838–846.
- Mehl, J., Otto, A., Comer, B., Kia, C., Liska, F., Obopilwe, E., Beitzel, K., Imhoff, A. B., Fulkerson, J. P., and Imhoff, F. B. (2020). Repair of the medial patellofemoral ligament with suture tape augmentation leads to similar primary contact pressures and joint kinematics like reconstruction with a tendon graft: a biomechanical comparison. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 28( 2),478–488.
- Mehl, J., Otto, A., Willinger, L., Hapfelmeier, A., Imhoff, A. B., Niemeyer, P., Angele, P., Zinser, W., Spahn, G., and Schmitt, A. (2019). Degenerative isolated cartilage defects of the patellofemoral joint are associated with more severe symptoms compared to trauma-related defects: results of the german cartilage registry (knorpelregister dgou). *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 27( 2),580–589.
- Mehl, J., Südkamp, N. P., and Niemeyer, P. (2015). Knorpelschäden des patellofemorale gelenkabschnitts. *Arthroskopie*, 28( 3),213–219.
- Migliorini, F., Trivellas, A., Driessen, A., Quack, V., Tingart, M., and Eschweiler, J. (2020). Graft choice for isolated mpfl reconstruction: gracilis versus semitendinosus. *European Journal of Orthopaedic Surgery and Traumatology*, 30( 5),763–770.
- Miller, M. D., Osborne, J. R., Gordon, W. T., Hinkin, D. T., and Brinker, M. R. (1998). The natural history of bone bruises. a prospective study of magnetic resonance imaging-detected trabecular microfractures in patients with isolated medial collateral ligament injuries. *American Journal of Sports Medicine*, 26( 1),15–19.
- Minas, T. and Bryant, T. (2005). The role of autologous chondrocyte implantation in the patellofemoral joint. *Clin Orthop Relat Res*, 436( 1),30–39.
- Mosher, T. J., Zhang, Z., Reddy, R., Boudhar, S., Milestone, B. N., Morrison, W. B., Kwok, C. K., Eckstein, F., Witschey, W. R., and Borthakur, A. (2011). Knee articular cartilage damage in osteoarthritis: analysis of mr image biomarker reproducibility in acrin-pa 4001 multicenter trial. *Radiology*, 258( 3),832–842.
- Mountney, J., Senavongse, W., Amis, A. A., and Thomas, N. P. (2005). Tensile strength of the medial patellofemoral ligament before and after repair or reconstruction. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 87( 1),36–40.
- Nehrer, S. and Minas, T. (2000). Treatment of articular cartilage defects. *Investigative Radiology*, 35( 10),639–646.
- Nha, K. W., Papannagari, R., Gill, T. J., Van de Velde, S. K., Freiberg, A. A., Rubash, H. E., and Li, G. (2008). In vivo patellar tracking: clinical motions and patellofemoral indices. *Journal of Orthopaedic Research*, 26( 8),1067–1074.



- Niemeyer, P., Albrecht, D., Andereya, S., Angele, P., Ateschrang, A., Aurich, M., Baumann, M., Bosch, U., Erggelet, C., Fickert, S., Gebhard, H., Gelse, K., Gunther, D., Hoburg, A., Kasten, P., Kolombe, T., Madry, H., Marlovits, S., Meenen, N. M., Muller, P. E., Noth, U., Petersen, J. P., Pietschmann, M., Richter, W., Rolauffs, B., Rhunau, K., Schewe, B., Steinert, A., Steinwachs, M. R., Welsch, G. H., Zinser, W., and Fritz, J. (2016a). Autologous chondrocyte implantation (aci) for cartilage defects of the knee: A guideline by the working group "clinical tissue regeneration" of the German Society of Orthopaedics and Trauma (DGOU). *Knee*, 23( 3),426–435.
- Niemeyer, P., Kreuz, P. C., Steinwachs, M., and Sudkamp, N. P. (2007). Operative treatment of cartilage lesions in the knee joint. *Sportverletzung Sportschaden*, 21( 1),41–50.
- Niemeyer, P., Laute, V., John, T., Becher, C., Diehl, P., Kolombe, T., Fay, J., Siebold, R., Niks, M., Fickert, S., and Zinser, W. (2016b). The effect of cell dose on the early magnetic resonance morphological outcomes of autologous cell implantation for articular cartilage defects in the knee: A randomized clinical trial. *American Journal of Sports Medicine*, 44( 8),2005–2014.
- Niemeyer, P., Laute, V., Zinser, W., Becher, C., Diehl, P., Kolombe, T., Fay, J., Siebold, R., and Fickert, S. (2019). Clinical outcome and success rates of aci for cartilage defects of the patella: a subgroup analysis from a controlled randomized clinical phase ii trial (codis study). *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 140( 6),717–725.
- Niemeyer, P., Salzmann, G. M., Hirschmuller, A., and Sudkamp, N. P. (2012). Factors that influence clinical outcome following autologous chondrocyte implantation for cartilage defects of the knee. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 150( 1),83–88.
- Niemeyer, P., Steinwachs, M., Erggelet, C., Kreuz, P. C., Kraft, N., Kostler, W., Mehlhorn, A., and Sudkamp, N. P. (2008). Autologous chondrocyte implantation for the treatment of retropatellar cartilage defects: clinical results referred to defect localisation. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 128( 11),1223–1231.
- Niethammer, T. R., Loitzsch, A., Horng, A., Baur-Melnyk, A., Bendiks, M., Gulecyuz, M. F., Muller, P. E., and Pietschmann, M. F. (2018). Graft hypertrophy after third-generation autologous chondrocyte implantation has no correlation with reduced cartilage quality: Matched-pair analysis using t2-weighted mapping. *Am J Sports Med*, 46( 10),2414–2421.
- Niethammer, T. R., Safi, E., Ficklscherer, A., Horng, A., Feist, M., Feist-Pagenstert, I., Jansson, V., Pietschmann, M. F., and Müller, P. E. (2014). Graft maturation of autologous chondrocyte implantation. *The American Journal of Sports Medicine*, 42( 9),2199–2204.
- Niethammer, T. R., Valentin, S., Gulecyuz, M. F., Rossbach, B. P., Ficklscherer, A., Pietschmann, M. F., and Muller, P. E. (2015). Bone marrow edema in the knee and its

- influence on clinical outcome after matrix-based autologous chondrocyte implantation: Results after 3-year follow-up. *American Journal of Sports Medicine*, 43( 5),1172–1179.
- Nomura, E. and Inoue, M. (2003). Surgical technique and rationale for medial patellofemoral ligament reconstruction for recurrent patellar dislocation. *Arthroscopy*, 19( 5),1–9.
- Nomura, E., Inoue, M., and Kobayashi, S. (2007). Long-term follow-up and knee osteoarthritis change after medial patellofemoral ligament reconstruction for recurrent patellar dislocation. *The American Journal of Sports Medicine*, 35( 11),1851–1858.
- Nomura, E., Inoue, M., and Kurimura, M. (2003). Chondral and osteochondral injuries associated with acute patellar dislocation. *Arthroscopy*, 19( 7),717–721.
- Noyes, F., Barber, S., and Mooar, L. (1989). A rationale for assessing sports activity levels and limitations in knee disorders. *Sports Activity Levels and Knee Disorders*, 246,238–249.
- Noyes, F. R. and Barber-Westin, S. D. (2013). Advanced patellofemoral cartilage lesions in patients younger than 50 years of age: is there an ideal operative option? *Arthroscopy*, 29( 8),1423–1436.
- O’Driscoll, S. W. (1998). The healing and regeneration of articular cartilage. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 80( 12),1795–1812.
- Oei, E. H. G., Wick, M. C., Müller-Lutz, A., Schleich, C., and Miese, F. R. (2018). Cartilage imaging: Techniques and developments. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 22( 2),245–260.
- Peterfy, C. G., Guermazi, A., Zaim, S., Tirman, P. F., Miaux, Y., White, D., Kothari, M., Lu, Y., Fye, K., Zhao, S., and Genant, H. K. (2004). Whole-organ magnetic resonance imaging score (worms) of the knee in osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*, 12( 3),177–190.
- Peterfy, C. G., Schneider, E., and Nevitt, M. (2008). The osteoarthritis initiative: report on the design rationale for the magnetic resonance imaging protocol for the knee. *Osteoarthritis Cartilage*, 16( 12),1433–1441.
- Peterson, L., Brittberg, M., Kiviranta, I., Lundgren Akerlund, E., and Lindahl, A. (2002). Autologous chondrocyte transplantation biomechanics and long-term durability. *The American Journal of Sports Medicine*, 30( 1),2–12.
- Pietschmann, M. F., Niethammer, T. R., Horng, A., Gulecyuz, M. F., Feist-Pagenstert, I., Jansson, V., and Muller, P. E. (2012). The incidence and clinical relevance of graft hypertrophy after matrix-based autologous chondrocyte implantation. *American Journal of Sports Medicine*, 40( 1),68–74.

- Placella, G., Tei, M., Sebastiani, E., Speziali, A., Antinolfi, P., Delcogliano, M., Georgoulis, A., and Cerulli, G. (2015). Anatomy of the medial patello-femoral ligament: a systematic review of the last 20 years literature. *Musculoskeletal Surgery*, 99( 2),93–103.
- Powers, C. M., Lilley, J. C., and Lee, T. Q. (1998). The effects of axial and multi-plane loading of the extensor mechanism on the patellofemoral joint. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 13( 8),616–624.
- Previtali, D., Milev, S. R., Pagliazzi, G., Filardo, G., Zaffagnini, S., and C., C. (2020). Recurrent patellar dislocations without untreated predisposing factors: Medial patellofemoral ligament reconstruction versus other medial soft-tissue surgical techniques-a meta-analysis. *Arthroscopy*, 36( 6),1725–1734.
- Pridie, K. H. (1959). A method of resurfacing osteoarthritic knee joints. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 0( 41),618–619.
- Rath, B., Eschweiler, J., Betsch, M., and Gruber, G. (2017). Cartilage repair of the knee joint. *Orthopäde*, 46( 11),919–927.
- Raudner, M., Schreiner, M. M., Rohrich, S., Zalaudek, M., and Trattnig, S. (2017). When is cartilage repair successful? *Radiologe*, 57( 11),907–914.
- Rauscher, I., Stahl, R., Cheng, J., Li, X., Huber, M., Luke, A., Majumdar, S., and Link, T. M. (2008). Meniscal measurements of t1rho and t2 at mr imaging in healthy subjects and patients with osteoarthritis. *Radiology*, 249( 2),591–600.
- Redziniak, D. E., Diduch, D. R., Mihalko, W. M., Fulkerson, J. P., Novicoff, W. M., Sheibani-Rad, S., and Saleh, K. J. (2010). Patellar instability. *Instructional Course Lectures*, 59,195–206.
- Rehnitz, C. and Weber, M. A. (2015). Morphologische und funktionelle knorpeldiagnostik. *Orthopäde*, 44,317–335.
- Reinke, E., Spindler, K., Lorring, D., Jones, M. H., Schmitz, L., Flanigan, D. C., Qi An, A., Quiram, A. R., Preston, E., and Martin, M. (2011). Hop tests correlate with ikdc and koos at minimum of 2 years after primary acl reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 19( 11),1806–1816.
- Reiser, M., Kuhn, F., and Debus, J. (2017). *Duale Reihe Radiologie*, volume 4. Thieme (Verlag), Stuttgart.
- Rhee, S. J., Pavlou, G., Oakley, J., Barlow, D., and Haddad, F. (2012). Modern management of patellar instability. *International Orthopaedics*, 36( 12),2447–2456.
- Roberts, S., Hollander, A., Caterson, B., Menage, J., and Richardson, J. B. (2001). Matrix turnover in human cartilage repair tissue in autologous chondrocyte implantation. *Arthritis and Rheumatism*, 44( 11).

- Rood, A., Hannink, G., Lenting, A., Groenen, K., Koeter, S., Verdonschot, N., and van Kampen, A. (2015). Patellofemoral pressure changes after static and dynamic medial patellofemoral ligament reconstructions. *American Journal of Sports Medicine*, 43(10),2538–2544.
- Roos, E. M., Engelhart, L., Ranstam, J., Anderson, A. F., Irrgang, J. J., Marx, R. G., Tegner, Y., and Davis, A. M. (2011). Icrs recommendation document: Patient-reported outcome instruments for use in patients with articular cartilage defects. *Cartilage*, 2(2),122–136.
- Roos, E. M., Roos, H. P., Lohmander, L. S., Ekdahl, C., and Beynnon, B. (1998). Knee injury and osteoarthritis outcome score (koos) - development of a self-administered outcome measure. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 28( 2),88–96.
- Ross, M. D., Langford, B., and Whelan, P. J. (2002). Test-retest reliability of 4 single-leg horizontal hop tests. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 16( 4),617–622.
- Rudert, M. and Wirth, C. (1998). Knorpelregeneration und knorpelersatz. *Der Orthopäde*, 5( 27),309–321.
- Saadat, E., Jobke, B., Chu, B., Lu, Y., Cheng, J., Li, X., Ries, M. D., Majumdar, S., and Link, T. M. (2008). Diagnostic performance of in vivo 3-t mri for articular cartilage abnormalities in human osteoarthritic knees using histology as standard of reference. *European Radiology*, 18( 10),2292–2302.
- Salonen, E. E., Magga, T., Sillanpaa, P. J., Kiekara, T., Maenpaa, H., and Mattila, V. M. (2017). Traumatic patellar dislocation and cartilage injury. *American Journal of Sports Medicine*, 45( 6),1376–1382.
- Salzmann, G. M., Paul, J., Bauer, J. S., Woertler, K., Sauerschnig, M., Landwehr, S., Imhoff, A. B., and Schottle, P. B. (2009). T2 assessment and clinical outcome following autologous matrix-assisted chondrocyte and osteochondral autograft transplantation. *Osteoarthritis Cartilage*, 17( 12),1576–1582.
- Sanchis-Alfonso, V. (2014). Guidelines for medial patellofemoral ligament reconstruction in chronic lateral patellar instability. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 22( 3),175–182.
- Sanchis-Alfonso, V. (2016). How to deal with chronic patellar instability: What does the literature tell us? *Sports Health*, 8( 1),86–90.
- Sanders, T. L., Pareek, A., Hewett, T. E., Stuart, M. J., Dahm, D. L., and Krych, A. J. (2018). Incidence of first-time lateral patellar dislocation: A 21-year population-based study. *Sports Health*, 10( 2),146–151.
- Schild, H. (1997). *MRI made easy*. Schering AG, Berlin.

- Schindler, O. and Scott, W. (2011). Basic kinematics and biomechanics of the patellofemoral joint part 1 - the native patella. *Acta Orthopædica Belgica*, 77( 4).
- Schmeling, A. (2010). Aktuelle aspekte der patellofemorale instabilität. *Stiftung zur Förderung der Arthroskopie*, 23,1–27.
- Schneider, D. K., Grawe, B., Magnussen, R. A., Ceasar, A., Parikh, S. N., Wall, E. J., Colosimo, A. J., Kaeding, C. C., and Myer, G. D. (2016). Outcomes after isolated medial patellofemoral ligament reconstruction for the treatment of recurrent lateral patellar dislocations: A systematic review and meta-analysis. *American Journal of Sports Medicine*, 44( 11),2993–3005.
- Schöttle, P. B., Hensler, D., and Imhoff, A. B. (2008a). Die direkte anatomische rekonstruktion des lig. patellofemorale mediale in double-bundle-technik - „aperture fixation“. *Arthroskopie*, 21( 3),192–195.
- Schöttle, P. B., Hensler, D., and Imhoff, A. B. (2010). Anatomical double-bundle mpfl reconstruction with an aperture fixation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 18( 2),147–151.
- Schöttle, P. B., Romero, J., Schmeling, A., and Weiler, A. (2008b). Technical note: anatomical reconstruction of the medial patellofemoral ligament using a free gracilis autograft. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 128( 5),479–484.
- Schöttle, P. B., Schmeling, A., Rosenstiel, N., and Weiler, A. (2007). Radiographic landmarks for femoral tunnel placement in medial patellofemoral ligament reconstruction. *American Journal of Sports Medicine*, 35( 5),801–804.
- Senavongse, W. and Amis, A. A. (2005). The effects of articular, retinacular, or muscular deficiencies of patellofemoral joint stability. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 87( 4),577–582.
- Servien, E., Fritsch, B., Lustig, S., Demey, G., Debarge, R., Lapra, C., and Neyret, P. (2011). In vivo positioning analysis of medial patellofemoral ligament reconstruction. *American Journal of Sports Medicine*, 39( 1),134–139.
- Sheehan, F. T., Derasari, A., Fine, K. M., Brindle, T. J., and Alter, K. E. (2010). Q-angle and j-sign: Indicative of maltracking subgroups in patellofemoral pain. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 468( 1),266–275.
- Siebold, R., Karidakis, G., and Fernandez, F. (2014). Clinical outcome after medial patellofemoral ligament reconstruction and autologous chondrocyte implantation following recurrent patella dislocation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 22( 10),2477–2483.

- Siebold, R., Suezer, F., Schmitt, B., Trattnig, S., and Essig, M. (2018). Good clinical and mri outcome after arthroscopic autologous chondrocyte implantation for cartilage repair in the knee. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 26( 3),831–839.
- Sillanpaa, P., Mattila, V. M., Visuri, T., Maenpaa, H., and Pihlajamaki, H. (2008). Ligament reconstruction versus distal realignment for patellar dislocation. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 466( 6),1475–1484.
- Solheim, E., Hegna, J., and Inderhaug, E. (2018). Early determinants of long-term clinical outcome after cartilage repair surgery in the knee. *Journal of Orthopaedics*, 15( 1),222–225.
- Spahn, G., Fritz, J., Albrecht, D., Hofmann, G. O., and Niemeyer, P. (2016). Characteristics and associated factors of knee cartilage lesions: preliminary baseline-data of more than 1000 patients from the german cartilage registry (knorpel register dgou). *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 136( 6),805–810.
- Steadman, J. R., Briggs, K. K., Rodrigo, J. J., Kocher, M. S., Gill, T. J., and Rodkey, W. G. (2003). Outcomes of microfracture for traumatic chondral defects of the knee: average 11-year follow-up. *Arthroscopy*, 19( 5),477–484.
- Steensen, R. N., Dopirak, R. M., and McDonald, W. G., r. (2004). The anatomy and isometry of the medial patellofemoral ligament: implications for reconstruction. *American Journal of Sports Medicine*, 32( 6),1509–1513.
- Stefancin, J. J. and Parker, R. D. (2007). First-time traumatic patellar dislocation: a systematic review. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 455,93–101.
- Stehling, C., Lane, N. E., Nevitt, M. C., Lynch, J., McCulloch, C. E., and Link, T. M. (2010). Subjects with higher physical activity levels have more severe focal knee lesions diagnosed with 3t mri: analysis of a non-symptomatic cohort of the osteoarthritis initiative. *Osteoarthritis Cartilage*, 18( 6),776–786.
- Tegner, Y. and Lysholm, J. (1985). Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 198,43–49.
- Theologis, A. A., Schairer, W. W., Carballido-Gamio, J., Majumdar, S., Li, X., and Ma, C. B. (2012). Longitudinal analysis of t1rho and t2 quantitative mri of knee cartilage laminar organization following microfracture surgery. *Knee*, 19( 5),652–657.
- Trattnig, S., Ohel, K., Mlynarik, V., Juras, V., Zbyn, S., and Korner, A. (2015). Morphological and compositional monitoring of a new cell-free cartilage repair hydrogel technology - gelrinc by mr using semi-quantitative mocart scoring and quantitative t2 index and new zonal t2 index calculation. *Osteoarthritis Cartilage*, 23( 12),2224–2232.
- Trattnig, S., Raudner, M., Schreiner, M., Roemer, F., and Bohndorf, K. (2019). Biochemical cartilage imaging-update 2019. *Radiologe*, 59( 8),742–749.

- Trinh, T. Q., Harris, J. D., Siston, R. A., and Flanigan, D. C. (2013). Improved outcomes with combined autologous chondrocyte implantation and patellofemoral osteotomy versus isolated autologous chondrocyte implantation. *Arthroscopy*, 29( 3),566–574.
- Van Dyck, P., Kenis, C., Vanhoenacker, F. M., Lambrecht, V., Wouters, K., Gielen, J. L., Dossche, L., and Parizel, P. M. (2014). Comparison of 1.5- and 3-t mr imaging for evaluating the articular cartilage of the knee. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 22( 6),1376–1384.
- Vanlauwe, J. J., Claes, T., Van Assche, D., Bellemans, J., and Luyten, F. P. (2012). Characterized chondrocyte implantation in the patellofemoral joint: an up to 4-year follow-up of a prospective cohort of 38 patients. *American Journal of Sports Medicine*, 40( 8),1799–1807.
- Vasiliadis, H. S., Lindahl, A., Georgoulis, A. D., and Peterson, L. (2011). Malalignment and cartilage lesions in the patellofemoral joint treated with autologous chondrocyte implantation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 19( 3),452–457.
- Venn, M. and Maroudas, A. (1977). Chemical composition and swelling of normal and osteoarthrotic femoral head cartilage. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 36( 2),121–129.
- Vollnberg, B., Koehlit, T., Jung, T., Scheffler, S., Hoburg, A., Khandker, D., Hamm, B., Wiener, E., and Diederichs, G. (2012). Prevalence of cartilage lesions and early osteoarthritis in patients with patellar dislocation. *European Radiology*, 22( 11),2347–2356.
- Weishaupt, D., Köchli, V., and Marincek, B. (2014). *Wie funktioniert MRI?* Springer Berlin, Heidelberg.
- Welsch, G., T., M., S., D., and Trattnig, S. (2008). Cartilage t2 assessment at 3-t mr imaging: in vivo differentiation of normal hyaline cartilage from reparative tissue after two cartilage repair procedures—initial experience. *Radiology, Radiology*( 247).
- Welsch, G. H., Mamisch, T. C., Marlovits, S., Glaser, C., Friedrich, K., Hennig, F. F., Salomonowitz, E., and Trattnig, S. (2009). Quantitative t2 mapping during follow-up after matrix-associated autologous chondrocyte transplantation (mact): full-thickness and zonal evaluation to visualize the maturation of cartilage repair tissue. *Journal of Orthopaedic Research*, 27( 7),957–963.
- Wirth, B., Liffert, F., and de Bruin, E. (2011). Development and evaluation of a german version of the lysholm score for measuring outcome after anterior cruciate ligament injuries. *Sportverletzung Sportschaden*, 25,37–43.
- Wirth, B., Meier, N., Koch, P. P., and Swanenburg, J. (2013). Development and evaluation of a german version of the tegner activity scale for measuring outcome after anterior cruciate ligament injury. *Sportverletzung Sportschaden*, 27( 1),21–27.

- Wong, T. T., Denning, J., Moy, M. P., Rasiej, M. J., Redler, L. H., Ahmad, C. S., and Popkin, C. A. (2020). Mri following medial patellofemoral ligament reconstruction: assessment of imaging features found with post-operative pain, arthritis, and graft failure. *Skeletal Radiology*, 50( 5),981–991.
- Wyatt, C., Guha, A., Venkatachari, A., Li, X., Krug, R., Kelley, D. E., Link, T., and Majumdar, S. (2015). Improved differentiation between knees with cartilage lesions and controls using 7t relaxation time mapping. *Journal of Orthopaedic Translation*, 3( 4),197–204.
- Xing, X., Shi, H., and Feng, S. (2020). Does surgical treatment produce better outcomes than conservative treatment for acute primary patellar dislocations? a meta-analysis of 10 randomized controlled trials. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 15( 1),118.
- Zeifang, F., Oberle, D., Nierhoff, C., Richter, W., Moradi, B., and Schmitt, H. (2010). Autologous chondrocyte implantation using the original periosteum-cover technique versus matrix-associated autologous chondrocyte implantation: a randomized clinical trial. *American Journal of Sports Medicine*, 38( 5),924–933.
- Zhang, M., Min, Z., Rana, N., and Liu, H. (2013). Accuracy of magnetic resonance imaging in grading knee chondral defects. *Arthroscopy*, 29( 2),349–356.
- Zimmerer, A., Sobau, C., and Balcarek, P. (2018). Recent developments in evaluation and treatment of lateral patellar instability. *Journal of Experimental Orthopaedics*, 5( 3),1–8.



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bedanken bei:

- **Prof. Sebastian Siebenlist** für die Leitung dieser Promotionsarbeit und die Möglichkeit zur Durchführung in der Abteilung für Sportorthopädie sowie bei seinem Vorgänger **Univ. - Prof. Dr. A. Imhoff** für die Vergabe des Themas
- **meinen Mentoren Christian und Pia** für die hervorragende Betreuung, welche sowohl fachliche Unterstützung und Hinweise bei der Durchführung als auch allgemeines Engagement, Motivation, Geduld und Hilfsbereitschaft beinhaltet
- **allen Mitarbeitern der Sportorthopädie** für die sehr gute Zusammenarbeit bei den Nachuntersuchungen der Patienten in der Poliklinik
- **Dem ganzen Radiologie-Team des Klinikums rechts der Isar** für die Kooperation sowie die uneingeschränkte Nutzung des MRT-Gerätes im Institut für Röntgendiagnostik am Klinikum „Rechts der Isar“ auch außerhalb der Dienstzeiten
- **allen Patienten**, die in die Teilnahme an dieser Studie eingewilligt und mir ihre Zeit und Daten zur Verfügung gestellt haben
- **meiner Familie und meinen Freunden** für die unermüdliche Unterstützung in jeglicher Hinsicht, mit der sie mir mein Medizinstudium und diese Promotionsarbeit ermöglicht haben