

Aus dem
Akademischen Lehrkrankenhaus der Universität Tübingen
Klinikum Stuttgart
Zentrum für Kinder-, Jugend- und Frauenmedizin (ZKJFM)
Radiologisches Institut - Olgahospital

**Patellofemorale Instabilität im Kindes- und Jugendalter:
Eine MRT-basierte morphologische Analyse der
Trochleaform und Patellaposition**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Humanwissenschaften

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Ang'ani, Lena

2026

Dekan: Professorin Dr. S. Y. Brucker

1. Berichterstatter: Privatdozentin Dr. T. von Kalle
2. Berichterstatter: Professor Dr. R. Hoffmann

Tag der Disputation: 11.02.2026

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	
1.1 Patellofemorale Instabilität	6
1.2 Trochleaform	8
1.3 Patellaposition	9
1.4 Diagnostik und Behandlung	10
1.5 Studienziel	12
2 Material und Methoden	
2.1 Studiendesign und Probanden	14
2.2 MRT-Untersuchungen	15
2.3 Untersuchende	16
2.4 Bildanalyse	17
2.5 Messungen der Trochleaform	18
2.5.1 Dejour-Klassifikation	18
2.5.2 Sulkuswinkel	19
2.6 Messungen der Patellaposition	21
2.6.1 Patellahöhe	21
2.6.2 Patella Tilt und Shift	24
2.7 Altersgruppen	27
2.8 Statistik	27
3 Ergebnisse	
3.1 Allgemeine Ergebnisse	30
3.2 Trochleaform	31
3.2.1 Dejour-Klassifikation	31
3.2.2 Sulkuswinkel	34
3.2.3 Interrater-Reliabilität für die Trochleaform	36
3.3 Patellaposition	37
3.3.1 Patellahöhe	37
3.3.2 Patella Tilt und Shift	40
3.3.3 Interrater-Reliabilität für die Patellaposition	43
4 Diskussion	
4.1 Patellaluxationen	44
4.2 Trochleaform	44
4.3 Patellaposition	48
4.4 Therapien der patellofemorale Instabilität	50
4.5 Limitationen	53
4.6 Schlussfolgerungen	54
5 Zusammenfassung	56
Literaturverzeichnis	58
Erklärung zum Eigenanteil	63
Liste der Veröffentlichungen	64
Danksagung	65

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Patientenkollektiv	30
Tab. 2:	Ergebnisse Einteilungen der Trochleaform	31
Tab. 3:	Ergebnisse der Sulkuswinkelmessungen	34
Tab. 4:	Ergebnisse für den Insall-Salvati-Index	37
Tab. 5:	Ergebnisse für den Koshino-Sugimoto-index	38
Tab. 6:	Ergebnisse der Messungen vom Patella Tilt	40
Tab. 7:	Ergebnisse der Messungen der Patellaverschiebung	41
Tab. 8:	Interrater-Reliabilität	43

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Flussdiagramm zur Auswahl der MRTs	15
Abb. 2:	Einteilung nach Dejour/Liebensteiner (2017)	19
Abb. 3:	Messung Sulkuswinkel.	20
Abb. 4:	Messungen des Insall-Salvati-Index	22
Abb. 5:	Messung des Koshino-Sugimoto-Index	23
Abb. 6:	Messung des Patella Tilt	24
Abb. 7:	Messung des Patella Shift	25
Abb. 8:	Darstellung eines intraartikulären Ergusses	26
Abb. 9:	Patellae ohne und mit Erker	26
Abb. 10:	Verteilung der Trochleae in der Einteilung nach Dejour	32
Abb. 11:	Boxplot der Sulkuswinkelmessungen	35
Abb. 12:	Bland-Altman-Plot Sulkuswinkel	36
Abb. 13:	Boxplots des ISI und KSI	39
Abb. 14:	Boxplot der Werte für den Patella Tilt	41
Abb. 15:	Boxplot der Werte für den Patella Shift	42

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
CT	Computertomographie
E	Distanz zwischen dem Zentrum der distalen Femurepiphyse und dem Zentrum der proximalen Tibiaepiphyse
et al.	et alia („und andere“)
evtl.	eventuell
F	Distanz zwischen dem Zentrum der Patella und dem Zentrum der proximalen Tibiaepiphyse
IBM	International Business Machines
ICC	Intraklassen-Korrelationskoeffizient
ISI	Insall-Salvati-Index
IRR	Interrater-Reliabilität
KSI	Koshino-Sugimoto-Index
mm	Millimeter
MPFL	mediales patellofemorales Ligament
MRT	Magnetresonanztomographie
n	Anzahl
p	p-Wert, Maß der Statistik
PACS	Picture Archiving and Communication System
PL	Patellalänge
PML	Patientenknie mit Luxationen in der Vorgeschichte
POL	Probandenknie ohne Luxationen in der Vorgeschichte
SD	Standardabweichung
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
STIR	Short Tau Inversion Recovery
Tab.	Tabelle
TL	Sehnenlänge („tendon length“)
TT-TG	Tuberositas-tibiae-trochleare-Grube
T2-TSE	T2-gewichtete Turbo-Spin-Echo-Sequenz

1 Einleitung

1.1 Patellofemorale Instabilität

Die patellofemorale Instabilität stellt ein komplexes und multifaktoriell bedingtes Krankheitsbild des Kniegelenks dar, das durch eine gestörte biomechanische Führung der Patella innerhalb der femoralen Gleitrinne (Trochlea femoris) gekennzeichnet ist. In der physiologischen Bewegung verläuft die Patella entlang des trochlearen Sulkus und wird durch ein Zusammenspiel statischer und dynamischer Strukturen in ihrer zentralen Position geführt. Eine Instabilität entsteht dann, wenn es zu einem Versagen dieses Führungsmechanismus kommt – sei es durch anatomische Fehlbildungen, strukturelle Schwächen oder externe Krafteinwirkungen.

Begrifflich wird die patellofemorale Instabilität als Oberbegriff verwendet, unter dem verschiedene klinische Erscheinungsformen zusammengefasst werden. Hierzu zählen sowohl einmalige (erstmalige) als auch wiederkehrende (rezidivierende) Luxationen der Patella sowie eine Subluxationen ohne vollständigen Kontaktverlust der artikulierenden Gelenkflächen. Während eine vollständige Luxation durch das vollständige Verlassen der Patella aus der Trochlea mit Verlust der artikulären Kontaktfläche definiert ist (Oestern et al. 2011), beschreibt die Subluxation eine partielle Verschiebung der Kniescheibe, bei der sie nicht mehr zentral in der Rinne liegt, sondern vermehrt nach lateral abweicht. Letzteres kann insbesondere in frühen Stadien der Instabilität beobachtet werden und ist mitunter schwieriger klinisch zu erfassen. (Wirth 2011)

Die rezidivierende patellofemorale Instabilität stellt ein klinisch relevantes Beschwerdebild dar, das nicht nur mit mechanischen Symptomen wie Instabilitätsgefühl, Parapatellarschmerzen und Blockadephänomenen einhergehen kann, sondern auch erhebliche psychische Belastungen hervorruft. Bereits einfache alltagsnahe Bewegungsabläufe oder funktionelle Tests, wie das Treppensteigen oder einbeinige Belastung, können bei betroffenen Patienten Ängste auslösen, die in einem Vermeidungsverhalten münden und die Lebensqualität erheblich einschränken. In vielen Fällen stellt

die rezidivierende Instabilität den Ausgangspunkt für eine chronisch persistierende Symptomatik dar, die im weiteren Verlauf mit sekundären Schäden am Knorpel oder den Bändern einhergehen kann. (Clark et al. 2017) Epidemiologisch tritt die patellofemorale Instabilität bevorzugt im Jugend- und jungen Erwachsenenalter auf. Rund 69 % der Patienten mit einer erstmaligen Patellaluxation sind zwischen 10 und 19 Jahre alt, wobei ein deutliches Überwiegen weiblicher Patienten beschrieben wird. (Fithian et al. 2004; Atkin et al. 2000)

Die Inzidenz akuter Patellaluxationen bei Kindern und Jugendlichen unter 16 Jahren liegt bei etwa 43 pro 100.000 pro Jahr (Hasler et al. 2013; Nietosvaara et al. 1994). Dabei wird unter anderem zwischen zwei pathophysiologisch unterschiedlichen Entitäten unterschieden. Die konstitutionelle oder habituelle Luxation basiert in der Regel auf angeborenen oder entwicklungsbedingten anatomischen Veränderungen, wie z. B. einer flachen Trochlea, einer hochstehenden Patella (Patella alta) oder einer lateralen Fehlstellung der Tuberositas tibiae. In diesen Fällen kann bereits ein geringfügiges Trauma, wie ein Stolpern oder ein Richtungswechsel beim Laufen, eine Luxation auslösen. Im Gegensatz dazu steht die traumatische Luxation, die typischerweise eine signifikante äußere Krafteinwirkung erfordert – etwa beim Sport oder bei Stürzen – und auch bei anatomisch unauffälligen Kniegelenken auftreten kann. (Diederichs & Scheffler 2013) Die klinische Relevanz liegt hierbei nicht nur in der Akutversorgung, sondern vor allem in der Erkennung potenzieller Risikofaktoren für eine spätere chronische Instabilität.

Anatomisch betrachtet befindet sich die Patella in nahezu vollständiger Streckung oberhalb des trochlearen Sulkus des distalen Femurs. In dieser Position wird die Stabilität primär durch passive Strukturen gewährleistet, wobei das mediale patellofemorale Ligament (MPFL) als zentraler passiver Stabilisator fungiert. Mit zunehmender Kniebeugung – ab etwa 20° bis 30° – gleitet die Patella in die Trochlea ein. In diesem Winkelbereich übernehmen zunehmend statische (z. B. knöcherne Führungsstrukturen) und dynamische

Stabilisatoren (z. B. Muskelzug des M. vastus medialis) die Kontrolle über die Patellaführung. (Schützenberger 2019)

Die Identifikation und Klassifikation von Risikofaktoren für eine patellofemorale Instabilität sind entscheidend für die Diagnostik, Prävention und Therapie. Nach der Einteilung von Dejour et al. (1994) lassen sich diese Risikofaktoren in primäre (Hauptfaktoren) und sekundäre (untergeordnete Faktoren) unterteilen.

Hauptfaktoren:

- Trochleadysplasie (häufigster Einzelrisikofaktor)
- Patella alta (hochstehende Kniescheibe)
- Lateralisierte Tuberositas tibiae (erhöhte TT–TG-Distanz)
- Erhöhter Patella Tilt (vermehrte laterale Neigung der Patella)

Untergeordnete Faktoren:

- Vermehrte femorale Antetorsion
- Vermehrte tibiale Außenrotation
- Kniegelenkshyperextension (Genu recurvatum)
- Valgusfehlstellung (Genu valgum)

Das Zusammenspiel mehrerer dieser Risikofaktoren erhöht das Risiko für eine Instabilität exponentiell, was die Notwendigkeit einer umfassenden morphologischen und funktionellen Analyse unterstreicht. Nur durch eine differenzierte Diagnostik kann eine individuell angepasste Therapieentscheidung – konservativ oder operativ – getroffen werden, um Rezidive zu vermeiden und langfristige Folgeschäden zu minimieren.

1.2 Trochleaform

Eine Trochleadysplasie gilt für die patellofemorale Instabilität als häufigster Einzelrisikofaktor. (Askenberger et al. 2017, Stepanovich et al. 2016)

Die normal konfigurierte Trochlea mit einer konkaven Oberfläche stabilisiert die Patella in Kniebeugung über 20°. Bei einer Trochleadysplasie ist die

Oberfläche, also das patellare Gleitlager, zu flach oder sogar konvex.

(Liebensteiner et al. 2017)

Lewallen et al. (2013) fanden in einer Studie zum Risiko einer Reluxation bei Patienten unter 18 Jahren, dass das Vorhandensein einer Trochleadysplasie im Röntgenbild und eine noch offene Wachstumsfuge zu einer Reluxationsrate von 69 % bedeutete.

Im MRT werden zur Beurteilung der Trochleageometrie häufig der Sulkuswinkel und die Dejour-Kriterien verwendet, um zwischen normaler und dysplastischer Trochlea zu differenzieren – diese Parameter sind jedoch bislang nicht für größere pädiatrische Kollektive im MRT validiert. (Askenberger et al. 2017, Mundy et al. 2016)

1.3 Patellaposition

Die Patellaposition wird beschrieben durch ihre Höhe und die Lage im Bezug zum Tibiakopf und damit indirekt zur Trochlea. Patella alta, auch als „hochstehende Patella“ bezeichnet, stellt eine anatomische Variante der Patellahöhe dar. In Kombination mit weiteren Risikofaktoren kann sie zur patellofemorale Instabilität beitragen. (Kim und Parikh 2022) Sie ist bei 50-60 % der Patienten mit einer Erstluxation über alle Altersklassen zu finden. (Steensen et al. 2015, Atkin et al. 2000)

Ursächlich für eine Instabilität ist dabei, dass eine hochstehende Patella möglicherweise nicht rechtzeitig in die trochleare Rinne eintritt, insbesondere bei zunehmender Kniebeugung – was zu einem Mangel an mechanischer Stabilität führen kann. (Seeley et al. 2012, Dejour et al. 2013)

Zur Bestimmung der Patellahöhe haben sich der Insall–Salvati-Index (ISI) für alle Altersgruppen sowie der nativradiologisch speziell für Kinder entwickelte Koshino–Sugimoto-Index (KSI) etabliert. (Lee et al. 2011, Akcaalan et al. 2025, Jones et al. 2025)

Für die Patellahöhe untersuchten Kurowecki et al. (2021) an 49 pädiatrischen MRTs und lateralen Röntgenbildern (Patientenalter zwischen 7,5 und 17

Jahren) die Übertragung der Messung auf das MRT und konnten eine hohe Übereinstimmung der Werte für den Insall-Salvati-Index nachweisen, während beim Koshino-Sugimoto-Index der Grad der Kniebeugung bei der Untersuchung zu einer Veränderungen der Werte führen konnte, sowohl im MRT als auch im Nativbild.

Der Patella Shift beschreibt die laterale Verschiebung der Patella in Relation zur Trochlea, während der Patella Tilt die axiale Rotation der Patella bezeichnet – meist mit Anhebung der lateralen Facette. Beide Veränderungen deuten auf eine gestörte patellofemorale Ausrichtung hin und können zu einer erhöhten Instabilität führen. (Yamada et al. 2017, Kim und Parikh 2022) Dabei wird für den Patella Tilt eine Verkippung von mehr als 20° (übernommen von Untersuchungen adulter Patienten) als pathologisch angesehen. (Askenberger 2017) Für den Patella Shift als untergeordneten Risikofaktor konnte keine Studie mit einer Nennung eines klaren Grenzwertes für Kinder und/oder Erwachsene gefunden werden, aber Yamada et al. (2017) zeigten, dass für die Beurteilung des patellaren Alignment nach stattgehabter Luxation die Beschreibung sinnvoll ist.

1.4 Diagnostik und Behandlung

Zur Diagnostik im Rahmen einer patellofemorale Instabilität kommt auch im Kindes- und Jugendalter der Magnetresonanztomographie (MRT) seit vielen Jahren eine zunehmend zentrale Rolle bei der Behandlungsplanung und vor allem der präoperativen Entscheidungsfindung zu. (Trinh et al. 2016, Schützenberger 2019)

Mit Ausnahme des Koshino–Sugimoto-Index, der zumindest nativradiologisch nur für Kinder entwickelt und untersucht wurde, mangelt es bei den benannten Risikofaktoren bislang an evidenzbasierten MRT-Studien mit hohen Fallzahlen, die spezifische Grenzwerte für Kinder und Jugendliche definieren.

Diese Lücke erschwert die Entwicklung individueller, altersangepasster Therapieansätze. Die aktuell verfügbaren Referenzwerte sind größtenteils aus

der Erwachsenenmedizin abgeleitet oder basieren auf konventionellen Röntgenaufnahmen.

Auch wenn die Prognose nach einer primären akuten patellofemorale Luxation schwer abschätzbar ist, gilt die konservative Therapie nach aktuellem Stand der meisten Studien als bevorzugter Behandlungsansatz. (Hasler und Studer, 2013) Dabei beinhalten die konservative Behandlung eine Ruhigstellung in einer Orthese, Physiotherapie, eine Belastungsanpassung und ein Krafttraining zum Wiederaufbau für die sportliche Belastung. (Villios et al. 2020)

Aber auch bei Kindern und Jugendlichen wird zunehmend, analog zu Erwachsenen, eine operative Versorgung empfohlen, vor allem, wenn begleitende Verletzungen wie osteochondrale Frakturen vorliegen oder es zu rezidivierenden Luxationen kommt. (Petri et al. 2015)

Operativ wird im Falle eines osteochondralen Flakes oder einer osteochondralen Fraktur der Flake geborgen, bei sehr großen Flakes refixiert und/oder die Fraktur nach unfallchirurgischen Maßgaben stabilisiert. (Liebensteiner et al. 2017)

Reluxationen nach einem erstmaligen Ereignis treten in 15–44 % der Fälle auf. Unter diesen zeigen Patienten mit einer dysplastischen Trochlea signifikant geringere Erfolgsraten bei konservativer Therapie als Patienten mit normal geformter Trochlea. (Lewallen et al. 2013, Hasler und Studer 2016)

Als Korrektur-Operationen bei nachgewiesenen Risikofaktoren stehen weichteilige und/oder knöcherne Versorgungen zur Verfügung. Zu den Weichteiloperationen gehören unter anderen eine mediale Raffung mit oder ohne einem lateralem Release, Naht evtl. mit Raffung vom MPFL (medialen patellofemorales Ligament), Versetzungen an der Patellasehne (Rough-Goldwaith-Prozedur und Grammont-Prozedur zur Reduktion der lateralen Zugrichtung) und Versetzung der medialen Quadrizepssehne. (Oliva et al. 2009, Vacariu et al. 2020)

Knöcherne Operationstechniken beinhalten unter anderen eine Wachstumslenkung mittels Hemiepiphyseodese (einseitige temporäre oder permanente Hemmung des Wachstums an der Epiphysenfuge), Osteotomien

mit Trochleoplastik und/oder Patellaplastik sowie einer Versetzung der Tuberositas tibiae. (Vellios et al. 2020, Liebensteiner et al. 2017) Bei der Trochleoplastik wird die Trochlea vertieft, bei der Patellaplastik wird die Patellaform anatomisch verbessert. (Vellios et al. 2020, Camathias et al. 2016, Chotel et al. 2014) Dabei sind die Osteotomien eher bei Jugendlichen mit zunehmend abgeschlossenem Skelettwachstum indiziert. (Vellios et al. 2020)

MRT-Befunde zur Diagnostik sind somit zunehmend entscheidend für die Therapieplanung und präoperative Entscheidungsfindung und haben bei positiven Befunden erhebliche Auswirkungen auf das weitere Vorgehen. (Lewallen et al. 2013, Hoehne et al. 2017)

Obwohl die zunehmende Anwendung der MRT im Kindesalter das Verständnis der Skelettentwicklung verbessert hat, war lange Zeit wenig darüber bekannt, wie sich das patellofemorale Gelenk während des Wachstums verändert. (Kim et al. 2014)

Bisherige Studienergebnisse zeigen sich widersprüchlich: Während einige Autoren berichten, dass das Alter keinen Einfluss auf die ossäre Morphologie und Kongruenz des patellofemorale Gelenks habe, identifizieren andere die Trochlea-Unreife als signifikanten Risikofaktor für rezidivierende Patellaluxationen. (Kim et al. 2014, Jaquith und Parikh 2017)

1.5 Studienziel

Ziel dieser Studie war es, die Trochleaform und Patellaposition bei Kindern und Jugendlichen mit und ohne dokumentierte akute laterale Patellaluxation (konstitutionell und traumatisch) zu analysieren und die Ergebnisse zwischen den Gruppen zu vergleichen, um bessere Voraussetzungen für die individuelle Behandlungsplanungen zu schaffen.

Dabei wurden die Klassifikation nach Dejour verwendet und der Sulkuswinkel, die Patellahöhe, die Patellaneigung (Patella Tilt) und die Patellaverschiebung (Patella Shift) mittels MRT gemessen.

Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Trochleaform und die Patellaposition altersabhängig sind und von den Normwerten Erwachsener abweichen.

Ebenso wurde erwartet, dass sich die Ergebnisse signifikant zwischen den Gruppen mit und ohne Luxationsvorgeschichte unterscheiden.

Zudem wurde die Interrater-Reliabilität aller Messverfahren überprüft.

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign und Probanden

Diese retrospektive Studie wurde durch die Ethikkommission der Eberhard Karl Universität zu Tübingen genehmigt (Projekt-Nummer 046/2018B02).

Alle MRT-Untersuchungen der Kniegelenke wurden im Zeitraum von 2002 bis 2017 aus klinischer Indikation im Olgahospital, Klinikum Stuttgart, durchgeführt.

Es wurden keine Bilddaten ausschließlich zu Studienzwecken erhoben.

Die Bilddatensätze der benannten Jahre wurden von zwei orthopädischen Chirurgen (L. A. und M. N.) aus dem Bildarchiv des Radiologischen Instituts des Olgahospitals am Klinikum Stuttgart recherchiert. Dabei wurden als Suchbegriffe „MRT, Knie, Ganzbein“ benutzt. Es erfolgte anschließend die Überprüfung der gefundenen 899 MRT-Untersuchungen auf die Ein- und Ausschlusskriterien überprüft:

Einschlusskriterien:

- Alter der Kinder und Jugendlichen zwischen 2 und 16 Jahren zum Zeitpunkt der MRT
- Freie Gehfähigkeit
- Vollständige Darstellung des Kniegelenks in mindestens einer axialen und einer sagittalen Sequenz

Ausschlusskriterien:

- Angeborene Patellaluxationen
- Angeborene Fehlbildungen im Bereich des Kniegelenkes
- Tumoren im Bereich des Kniegelenkes
- Technische bzw. qualitative Einschränkungen der Bildgebung

Die insgesamt 877 eingeschlossenen Untersuchungen wurden anonymisiert, fortlaufend nummeriert und in zwei Gruppen eingeteilt:

- PML (Patientenknie mit Luxation): mit mindestens einer dokumentierten Patellaluxation in der Anamnese
- POL (Probandenknie ohne Luxation): ohne dokumentierte Patellaluxationen in der Anamnese

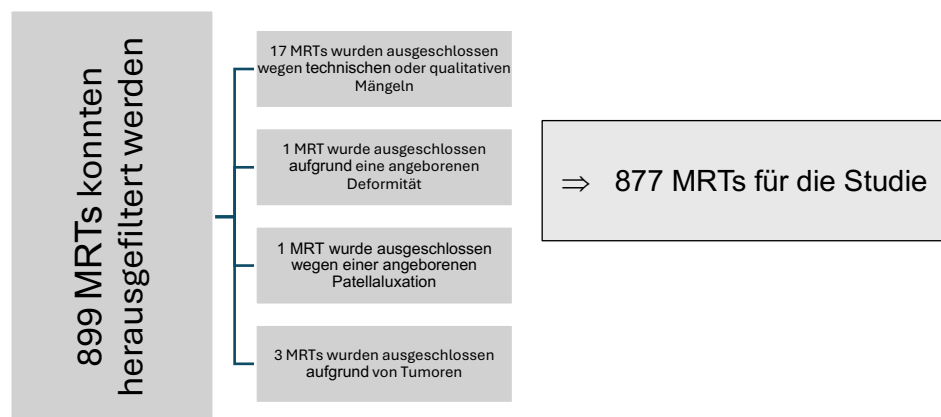


Abb. 1: Flussdiagramm zur Auswahl der MRTs für diese Studie aus dem Bildarchiv des Radiologischen Instituts des Olgahospitals am Klinikum Stuttgart

2.2 MRT-Untersuchungen

Die MRT-Untersuchungen wurden mit 1,5-Tesla- oder 3-Tesla-Geräten (MAGNETOM Avanto bzw. Skyra, Siemens Healthcare Sector, Erlangen, Deutschland) durchgeführt.

Je nach klinischer Indikation für die MRT-Untersuchungen standen eine oder mehrere der folgenden Sequenztypen zur Verfügung:

- T2-TSE mit oder ohne Fettsättigung
- STIR (Short Tau Inversion Recovery)
- Protonendichtegewichtete Sequenzen mit oder ohne Fettsättigung

Die Schichtdicke der sagittalen und axialen Bilder lag zwischen 0,8 mm und 5 mm, die Pixelgröße variierte zwischen 0,30 × 0,36 mm und 0,56 × 0,7 mm.

Die Kinder und Jugendlichen wurden in Rückenlage untersucht, bevorzugt mit gestrecktem Knie. Falls dies nicht möglich war, erfolgte die Untersuchung in Kniebeugung bis maximal 54°.

Für Jugendliche kam eine spezielle Kniespule zum Einsatz, während bei kleineren Kindern flexible, individuell angepasste Oberflächenspulen verwendet wurden.

2.3 Untersuchende

Vier erfahrene Ärztinnen und Ärzten – zwei aus der Radiologie, zwei aus der Kinderorthopädie im Olgahospital, Klinikum Stuttgart – mit jeweils mehr als vier Jahren Erfahrung in der muskuloskelettalen MRT-Bildgebung, führten die Bildauswertungen durch.

Vor Beginn der Studie wurde ein einheitliches Messprotokoll entwickelt und festgelegt.

Zur methodischen Schulung und Sicherstellung eines einheitlichen Beurteilungsmaßstabs analysierten alle vier beteiligten Untersuchende zunächst gemeinsam fünf MRT-Aufnahmen im Rahmen eines Konsensverfahrens. Diese MRTs stammten bewusst nicht aus der eigentlichen Studienkohorte, um eine unvoreingenommene Herangehensweise an das eigentliche Untersuchungsmaterial zu gewährleisten. Ziel dieser initialen Sitzung war die gemeinsame Anwendung und Diskussion der

Beurteilungskriterien, um eine standardisierte Bewertungspraxis im weiteren Studienverlauf zu etablieren.

Im Anschluss daran erfolgte eine individuelle Auswertung von zehn identischen MRT-Fällen durch jeden der vier Beurteilenden – ebenfalls außerhalb der Studienkohorte. Diese Phase diente der Überprüfung der intra- und interindividuellen Anwendbarkeit der definierten Kriterien unter realistischen Bedingungen. Die Ergebnisse wurden anschließend im Rahmen einer gemeinsamen Besprechung verglichen und diskutiert, um verbleibende Unklarheiten zu klären und die Vorgehensweise final zu harmonisieren. Dieses strukturierte Vorgehen sollte eine möglichst hohe Bewertungszuverlässigkeit und Vergleichbarkeit innerhalb der Studie gewährleisten.

2.4 Bildanalyse

Die Auswertung der MRT-Daten erfolgte an standardisierten Arbeitsplätzen unter Verwendung der PACS-Software (Picture Archiving and Communication System) der Firma Dedalus (Deep Unity, Bonn, Deutschland). Jede MRT-Untersuchung wurde von mindestens einer qualifizierten Fachperson analysiert. Zur Beurteilung der Interrater-Reliabilität wurden 272 MRTs unabhängig von zwei Untersuchenden ausgewertet.

Bei Uneinigkeit in der Dejour-Klassifikation wurde eine Konsensuskonferenz mit allen vier Beurteilenden einberufen und die betroffenen Trochleae eingeteilt.

Bei abweichenden Messwerten des Sulkuswinkels wurde der arithmetische Mittelwert der beiden Einzelwerte für die weitere Analyse verwendet.

2.5 Messungen der Trochleaform

Die Klassifikation nach Dejour sowie die Messung des Sulkuswinkels erfolgten in der gleichen axialen MRT-Schicht.

Um eine Beeinflussung der visuellen Beurteilung durch die numerische Messung des Sulkuswinkels zu vermeiden, wurde zuerst die Dejour-Klassifikation vorgenommen, anschließend die Winkelmessung.

Bestimmung der korrekten axialen Schicht:

1. Zunächst wurde eine axiale Schicht oberhalb der Patella ausgewählt.
2. Anschließend wurde schrittweise nach distal gescrollt.
3. Die erste bzw. proximalste Ebene, in der beide Femurkondylen vollständig mit Knorpel bedeckt waren, wurde für die Analyse verwendet.
4. Eine sagittale Ansicht wurde zusätzlich genutzt, um sicherzustellen, dass diese Ebene direkt distal der Epiphysenfuge lag.

2.5.1 Dejour-Klassifikation (modifiziert nach Liebensteiner et al. 2017)

Die Trochleamorphologie wurde in folgende Typen eingeteilt:

- Normal: physiologisch geformte Trochlea
- Typ A: flacher als normal
- Typ B: komplett flach
- Typ C: konvex, mit hypoplastischer medialer Facette
- Typ D: konvex, evtl. mit buckelartiger Vorwölbung der Trochlea

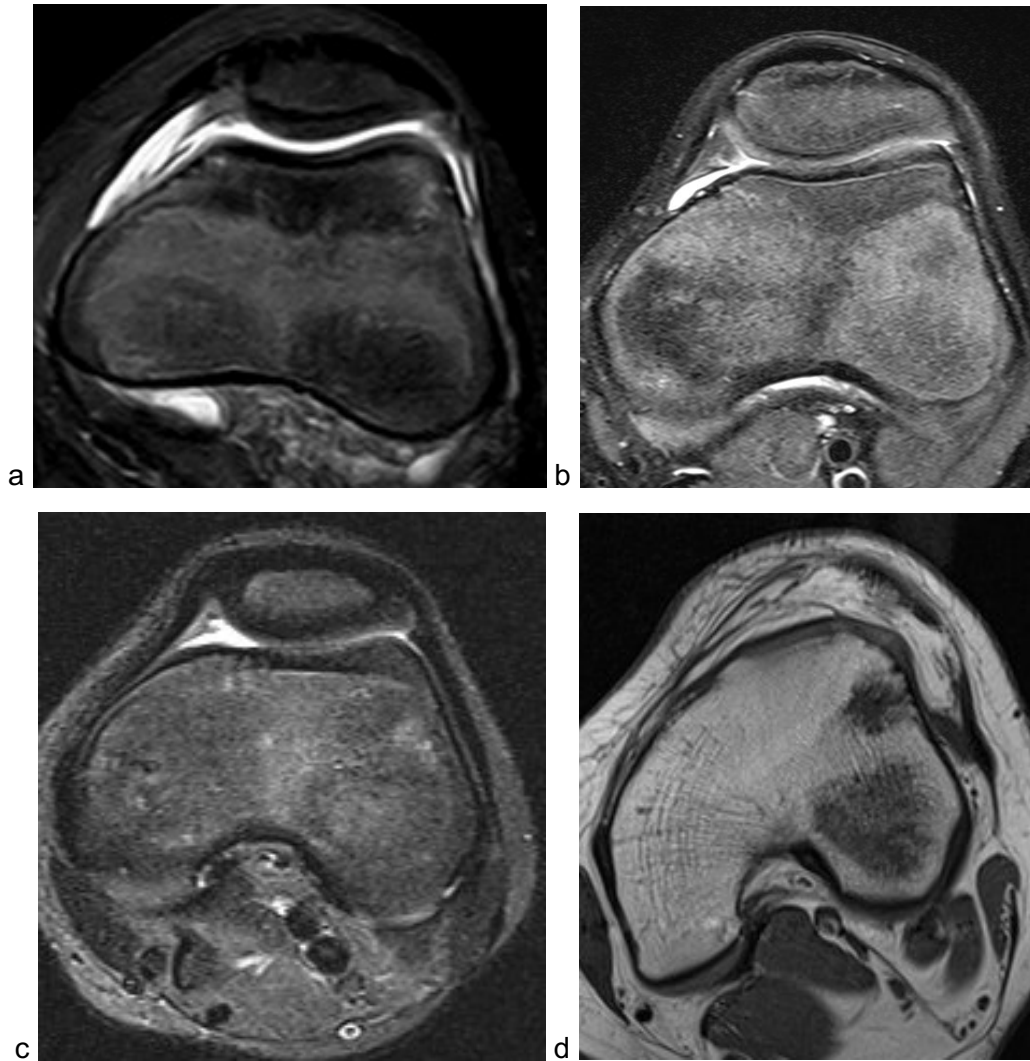


Abb. 2: Einteilungen nach Dejour/Liebensteiner (2017)

- a) Als normal klassifizierte Trochlea, 10,3-jähriger Junge, POL-Gruppe, linkes Knie, transversale Schicht, Schichtdicke 3 mm, STIR-Sequenz
- b) Als Dejour A klassifizierte Trochlea, 12-jähriger Jugendlicher, POL-Gruppe, linkes Knie, transversale Schicht, Schichtdicke 3 mm, STIR-Sequenz
- c) Als Dejour B klassifizierte Trochlea, 6,1-jähriges Mädchen, POL-Gruppe, transversale Schicht, Schichtdicke 2 mm, STIR-Sequenz
- d) Als Dejour C klassifizierte Trochlea, 12,5-jährige Jugendliche, PML-Gruppe, transversale Schicht, Schichtdicke 3 mm, T1-TSE-Sequenz

2.5.2 Sulkuswinkel

Der Sulkuswinkel wurde als der Winkel zwischen den beiden Tangenten entlang der beiden Kondylenrändern mit dem Scheitelpunkt am tiefsten Punkt der

Trochlea bestimmt.

Diese Messung erfolgte ebenfalls auf der proximalsten axialen Ebene mit vollständig knorpelbedeckten Femurkondylen.

Sonderregel:

Trochleae, die zunächst als „Typ A“ klassifiziert wurden, aber einen Sulkuswinkel $< 145^\circ$ aufwiesen, wurden nach der Winkelmessung als „normal“ eingestuft – auf Grundlage eines Konsensus.

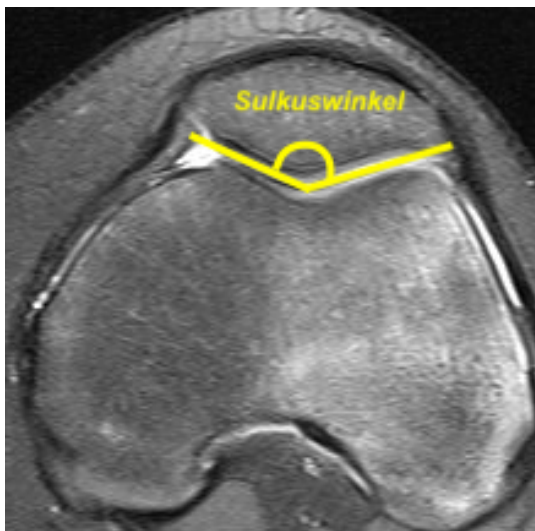


Abb. 3: Messung des Sulkuswinkels
MRT eines 13,3-jährigen Jungen ohne Luxation in der Vorgeschichte (POL-Gruppe), linkes Knie, transversale Schicht, Schichtdicke 3mm, STIR-Sequenz, Sulkuswinkel

Für die Trochleaform konnten 4 MRTs nicht gemessen werden, da die Transversalschichten nicht ausreichend weit nach proximal reichten, um die Trochlea zu beurteilen.

2.6 Messungen der Patellaposition

2.6.1 Patellahöhe

Die Bestimmung der Patellahöhe erfolgte mittels zweier etablierter Indizes:

- Insall-Salvati-Index (ISI)
- Koshino-Sugimoto-Index (KSI)

Für beide Messungen wurde die sagittale MRT-Schicht mit der längsten Ausdehnung der Patella (proximal bis distal) ausgewählt. Alle Messungen für beide Indizes wurden in dieser Schicht durchgeführt.

Insall-Salvati-Index (ISI)

1. Die Patellalänge (PL) wurde von Pol zu Pol gemessen (d. h. von der oberen zur unteren Spitze).
2. Die Sehnenlänge (TL) wurde von der unteren Patellaspitze bis zur Ansatzstelle an der Tuberositas tibiae gemessen.

Berechnung: $ISI = TL / PL$
Klassifikation: Normal: 0,8–1,3
Patella alta: $> 1,3$
Patella baja: $< 0,8$



Abb. 4: Messung des Insall-Salvati-Index
MRT eines 11,2-jährigen Jungen ohne Luxation in der Vorgeschichte (POL-Gruppe), rechtes Knie, sagittale Schicht, Schichtdicke 3mm, T2-TSE-Sequenz, PL 38 mm, TL 39 mm, Insall-Salvati-Index 1,0

Die Verknöcherung der primär knorpeligen Patella beginnt typischerweise zwischen dem 3. und 6. Lebensjahr und ist in der Regel im Alter von etwa 10 bis 12 Jahren abgeschlossen. (Hefti 2015) In einer Literaturrecherche wurde nach etablierten Methoden für MRT-Messungen vor allem bei jüngeren Kindern mit noch vor allem knorpeliger Patella gesucht – ohne eindeutige Angaben. Es war insbesondere unklar, ob das patellare Knorpelgewebe über alle Altersklassen hinweg einbezogen werden sollte. Da nicht allein der Knochenkern zur Patellafunktion beiträgt, haben wir entschieden, die Knorpelanteile in allen Messung bei allen Kindern einzubeziehen und somit jeweils die Gesamtlänge der Patella zu messen.

Koshino-Sugimoto-Index (KSI)

Dieser Index wurde speziell für Kinder und Jugendliche mit offenen Wachstumsfugen entwickelt, ursprünglich an nativen Röntgenbildern (Koshino und Sugimoto, 1989).

1. Messen der Distanz zwischen dem Zentrum der Patella und dem Zentrum der proximalen Tibiaepiphyse (F).
2. Messung der Distanz zwischen dem Zentrum der distalen Femurepiphyse und dem Zentrum der proximalen Tibiaepiphyse (E).

Berechnung: $KSI = F / E$
Klassifikation: Normal: 0,9–1,3
Patella alta: $> 1,3$
Patella baja: $< 0,9$



Abb. 5: Messung des Koshino-Sugimoto-Index
MRT eines 11,7-jährigen Mädchen ohne Luxation in der Vorgeschichte (POL-Gruppe), rechtes Knie, sagittale Schicht, Schichtdicke 3mm, T2-TSE-Sequenz, F = 65 mm, E = 56 mm, Koshino-Sugimoto-Index 1,4

2.6.2 Patella Tilt und Shift

Patellaneigung (Patella Tilt) und Patellaverschiebung (Patella Shift)

Beide Parameter wurden in der axialen MRT-Ebene bestimmt – und zwar an der Schicht mit der größten lateralen Ausdehnung der Patella. Auch hier wurde bei jüngeren Kindern das Wachstumsknorpelgewebe in die Analyse mit einbezogen.

Patella Tilt beschreibt die anguläre Ausrichtung der Patella im Vergleich zu den Femurkondylen.

1. Zuerst wurde für die Messung eine dorsale Tangente an die Kondylen gezogen als Winkelschenkel, die auf die gesamte MRT-Bilderserie übertragen wurde.
2. Der Winkel zwischen dieser Tangente und der Transversalachse der Patella wurde dann als Patella Tilt bestimmt.



Abb. 6: Messung des Patella Tilt
MRT eines 5,4-jährigen Mädchen ohne Luxation in der Vorgeschichte (POL-Gruppe),
linkes Knie, sagittale Schicht, Schichtdicke 3mm, STIR-Sequenz, Patella Tilt 6°

Ein Tilt von $> 20^\circ$ gilt gemäß Erwachsenenreferenzen als pathologisch.

Patella Shift beschreibt die laterale Verschiebung der Patella zur Trochlea. Dafür wurden zwei Senkrechte zur Tangente der Kondylen gezogen – einerseits durch den retropatellaren Erker, andererseits durch die tiefste Stelle der Trochlea.

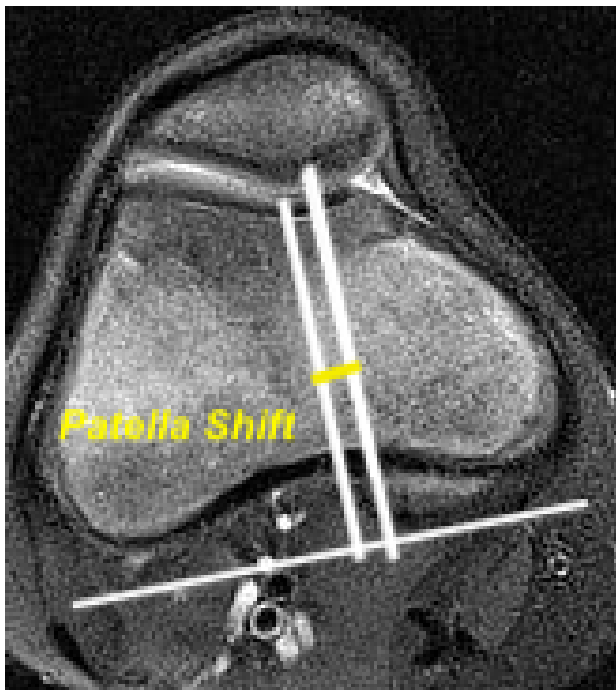


Abb. 7: Messung des Patella Shift
MRT eines 10,3-jährigen Mädchen ohne Luxation in der Vorgeschichte (POL-Gruppe), rechtes Knie, transversale Schicht, Schichtdicke 3 mm, STIR-Sequenz, Patella Shift 9 mm

Beide Messungen konnten nicht durchgeführt, wenn ein Gelenkerguss vorlag, da dieser die Patella verdrängt und damit die Lage verändert (Abb. 8).

Der Shift konnte nicht bestimmt werden, wenn der retropatellare Erker nicht abgrenzbar war (Abb. 9).

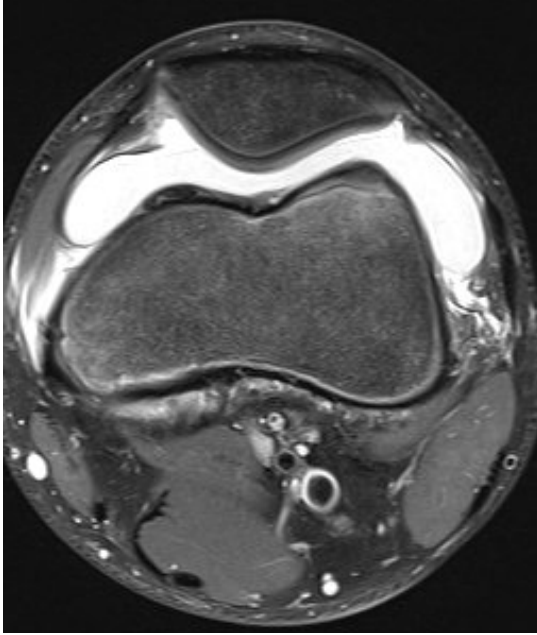


Abb. 8: Darstellung eines intraartikulären Ergusses
 MRT eines 15,1-jährigen Jugendlichen ohne Luxation in der Vorgeschichte (POL-Gruppe), linkes Knie, transversale Schicht, Schichtdicke 3 mm, STIR-Sequenz, Patella Shift und Patella Tilt bei großem Erguss nicht messbar, da dieser die Lagebeziehungen ändert

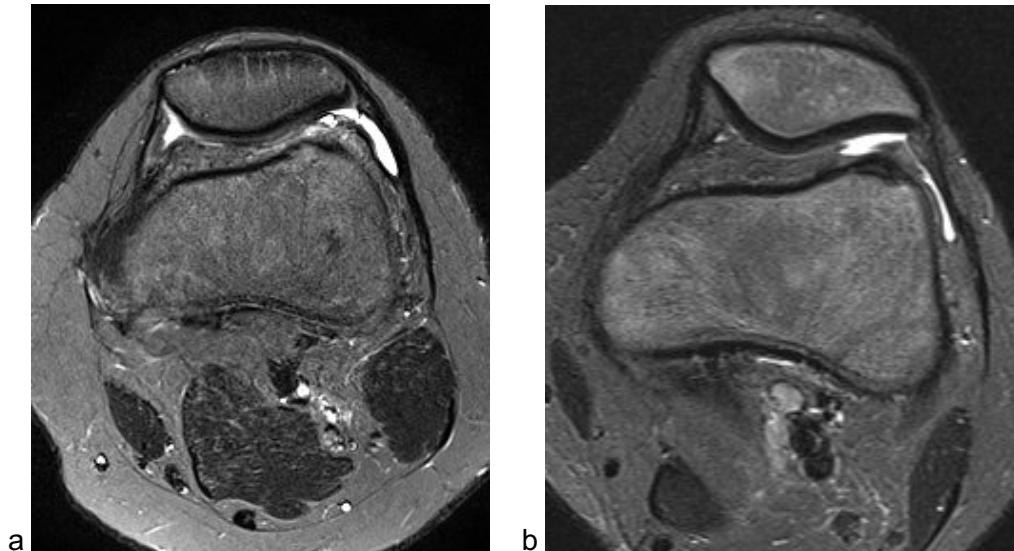


Abb. 9: Patellae ohne und mit Erker
 a) Patella ohne eindeutigen Erker; 14,9-jähriger Jugendlicher, keine Luxation in der Vorgeschichte (POL-Gruppe), transversale Schicht, Schichtdicke 3 mm, STIR-Sequenz
 b) Patella mit gut ausgebildetem Erker; 11,2-jähriges Mädchen, keine Luxation in der Vorgeschichte (POL-Gruppe), transversale Schicht, Schichtdicke 3 mm, STIR-Sequenz

2.7 Altersgruppen

Für die vorliegende Analyse wurden die untersuchten Patienten entsprechend ihres Alters in vier Gruppen eingeteilt:

- 2 bis 5 Jahre
- 6 bis 9 Jahre
- 10 bis 12 Jahre
- 13 bis 16 Jahre

Diese altersbasierte Kategorisierung orientiert sich an den bekannten physiologischen Phasen des kindlichen Längenwachstums. So wird zwischen dem dritten und fünften Lebensjahr ein erster signifikanter Wachstumsschub beobachtet, der in der Literatur als frühkindliche Wachstumsphase beschrieben ist. Ein zweiter, deutlich ausgeprägterer Wachstumsschub betrifft vor allem die untere Extremität und tritt etwa ein Jahr vor Beginn der Pubertät auf – typischerweise im Alter zwischen 10 und 12 Jahren. Diese Phase gilt als der Zeitraum mit dem intensivsten longitudinalen Knochenwachstum des Femurs und der Tibia (Hefti 2015). Die hier gewählte Altersaufteilung ermöglicht eine wachstumsphasenbezogene Auswertung der kniegelenksbezogenen anatomischen Parameter und trägt zur differenzierten Interpretation der erfassten Bildgebungsdaten bei.

2.8 Statistik

Zur Bewertung der Interrater-Reliabilität (IRR) wurde der Cohen's Kappa-Koeffizient verwendet. Die Interpretation der Kappa-Werte erfolgte nach etablierten Schwellenwerten:

- 1,00 = vollständige Übereinstimmung
- 0,81–0,99 = nahezu perfekte Übereinstimmung
- 0,61–0,80 = substanzielle Übereinstimmung
- 0,41–0,60 = moderate Übereinstimmung
- 0,21–0,40 = geringe Übereinstimmung
- 0,01–0,20 = minimale Übereinstimmung

Die untersuchten Parameter – Sulkuswinkel, Insall-Salvati-Index, Koshino-Sugimoto-Index, Patella Tilt und Patella Shift – wurden als metrische Variablen definiert und entsprechend statistisch ausgewertet. Zur deskriptiven Darstellung der Daten wurden jeweils der Median, die Spannweite (Minimum und Maximum) sowie die einfache Standardabweichung berechnet. Aufgrund der kleinen Stichprobengrößen und der bekannten Robustheit gegenüber Ausreißern wurde bewusst der Median anstelle des arithmetischen Mittelwerts gewählt, um eine repräsentativere Abbildung der zentralen Tendenz zu gewährleisten.

Die Prüfung auf Normalverteilung erfolgte mithilfe des Shapiro–Wilk-Tests, welcher für alle fünf metrischen Variablen ein nicht-normalverteiltes Datenverhalten bestätigte. Vor diesem Hintergrund wurde für den Gruppenvergleich der nichtparametrische Mann–Whitney-U-Test angewandt, der keine Verteilungsannahmen voraussetzt und sich für kleinere Stichproben sowie asymmetrisch verteilte Daten eignet.

Die Beurteilung der Trochleadysplasie anhand der Dejour-Klassifikation erfolgte als qualitative, kategoriale Variable. Die Ergebnisse wurden in Form absoluter Häufigkeiten sowie prozentualer Verteilungen dargestellt. Zur statistischen Analyse von Gruppenunterschieden innerhalb dieser kategorialen Variable kam der Chi²-Test zur Anwendung.

Für alle durchgeführten Tests – sowohl im Rahmen der metrischen als auch der kategorialen Datenanalyse – wurde ein zweiseitiges Signifikanzniveau von $p < 0,05$ als Schwelle für statistische Signifikanz definiert.

Für die statistische Auswertung wurden die Programme IBM SPSS Statistics und Microsoft Excel genutzt.

3 Ergebnisse

3.1 Allgemeine Ergebnisse

Patientenkollektiv

Insgesamt konnten 877 MRT-Untersuchungen ausgewertet werden.

	n	männlich	weiblich	linkes Knie	rechtes Knie	Alter Minimum	Alter Maximum	Alter Median
POL	713	338	375	345	368	2,2	16,4	11,3
PML	164	50	114	87	77	6,0	16,7	13,5
gesamt	877	388	489	432	445	2,2	16,7	11,9

Tab. 1: Patientenkollektiv

Anzahl der Untersuchungen und Alter der Kinder und Jugendlichen zum Zeitpunkt der MRT-Untersuchungen; n = Anzahl der MRT-Untersuchungen; POL = Gruppe ohne dokumentierte Patellaluxation in der Anamnese; PML = Gruppe mit mindestens einer Patellaluxation in der Vorgeschichte; Alter in Jahren.

In der Gruppe POL wurden 713 Knie-MRTs untersucht, dabei waren etwas mehr Untersuchungen bei Mädchen erfolgt, mit 53 % der Gesamtgruppe.

In der Gruppe PML wurden 163 MRTs untersucht, davon 70 % bei weiblichen Patienten (Tab. 1).

Die Anzahl der linken und rechten Knie war in beiden Gruppen ähnlich.

Das Medianalter lag in der PML-Gruppe mit 13,5 Jahren deutlich über dem der POL-Gruppe mit 11,3 Jahren. Grund dafür war, dass im Alter zwischen 2 und 6 Jahren entsprechend unseren Einschlusskriterien keine MRTs von Kindern mit dokumentierten Patellaluxationen vorlagen (Tab. 1).

In der POL-Gruppe lagen bei 26 Kindern und Jugendlichen MRTs beider Knie vor, in der PML-Gruppe bei 9 Kindern und Jugendlichen.

Für die Trochleaform (Einteilung nach Dejour/Liebensteiner und Sulkuswinkel) konnten insgesamt 5 MRTs nicht ausgewertet werden, 4 MRTs aus der POL-Gruppe und 1 MRT aus der PML-Gruppe.

Für den Patella Tilt konnten insgesamt 76 MRTs aus der POL-Gruppe und 45 aus der PML-Gruppe nicht ausgewertet werden.

Für den Patella Shift konnten 165 MRTs aus der POL-Gruppe und 45 aus der PML-Gruppe nicht ausgewertet werden.

3.2 Trochleaform

3.2.1 Dejour-Klassifikation

	n		normal		Dejour A		Dejour B		Dejour C		Dejour D	
	gesamt	PML	POL	PML	POL	PML	POL	POL	PML	POL	PML	POL
gesamt	709	163	37%	3%	9%	2%	46%	40%	8%	54%	0	<1%
2-5 Jahre	76	-	13%	-	9%	-	63%	-	14%	-	0	-
6-9 Jahre	190	16	37%	13%	12%	0	44%	38%	7%	50%	0	0
10-12 Jahre	232	48	45%	2%	10%	2%	40%	35%	5%	58%	0	2%
13-16 Jahre	211	99	37%	2%	5%	2%	48%	42%	10%	53%	0	1%

Tab. 2: Ergebnisse Einteilungen der Trochleaform, klassifiziert als normal oder dysplastisch gemäß Dejour/Liebensteiner (2017).
Anzahl der Knie (n), insgesamt sowie aufgeteilt nach Altersgruppen. Linke, weiße Spalte: Gruppe ohne bekannte Patellaluxation (POL).
Rechte, schattierte Spalte: Gruppe mit mindestens einer dokumentierten Patellaluxation (PML).

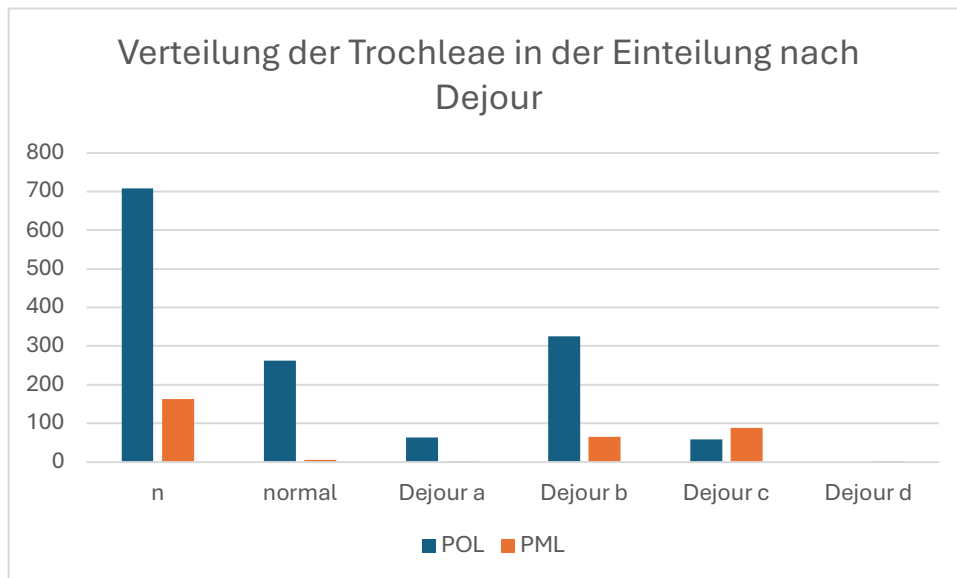


Abb. 10: Verteilung der Trochleae nach der Einteilung nach Dejour/Liebenstein (2017) in absoluten Zahlen, jeweils in den Gesamtgruppen PML (blau) und POL (orange)

Die Ergebnisse für Einteilung der Trochleae gemäß der Klassifikation nach Dejour/Liebensteiner (2017) unterschieden sich signifikant zwischen den beiden Gruppen POL und PML ($p < 0,001$).

In der POL-Gruppe wurden viele Trochleae als normal oder Dejour A eingestuft, während in der PML-Gruppe überwiegend Dejour-C-Trochleae vorlagen.

Die prozentuale Häufigkeit von Dejour-B-Formen war in beiden Gruppen in der Gesamtzahl ähnlich mit 40 % in der PML- und 46 % in der POL-Gruppe (Tab. 2).

Bezogen auf die Bedeutung der Trochleadysplasie als ein Hauptrisikofaktor war auffällig, dass in der POL-Gruppe nur 37 % der Trochleae als normal klassifiziert und somit insgesamt 63 % als dysplastisch eingestuft wurden – vorwiegend Dejour A oder B. 8 % wurden sogar als Dejour C klassifiziert.

Es zeigte sich keine Dejour-D-Trochlea in der POL-Gruppe (Tab. 2).

Dejour B war sowohl in den einzelnen Altersklassen als auch über alle Altersgruppen betrachtet die am häufigsten beobachtete Form in der POL-Gruppe (46 %).

Auffällig war, dass in unserer Kohorte in der jüngsten Altersgruppe von 2-5 Jahren nur 13 % der Trochleae als normal eingestuft wurden, es aber in auch in unserem Bildarchiv keine MRT-Untersuchungen von Kindern in dem Alter mit stattgehabter Luxation gab.

Die größte Anzahl an normal klassifizierten Trochleae fand sich in der Altersgruppe der 10- bis 12-Jährigen.

Ein klarer Zusammenhang einer Entwicklung der Trochleae in Richtung des Normbereiches mit dem Alter ließ sich nicht erkennen (Tab. 2).

In der PML-Gruppe war Dejour C mit 54 % die häufigste Trochleaform. Nur 3 % der Patienten zeigten eine normal geformte Trochlea (Tab. 2).

Bei zwei Jugendlichen wurde die Trochlea als Dejour D eingeteilt.

Weitere 42 % der Trochleae in der PML-Gruppe wurden ebenfalls als dysplastisch mit Dejour A oder B eingestuft (Tab. 2).

Die Untersuchenden gaben an, dass die Abgrenzung zwischen einer normalen Trochlea und Dejour A besonders schwierig gewesen sei – insbesondere ohne ergänzende Winkelmessungen.

3.2.2 Sulkuswinkel

	n		Minimum		Maximum		Median		1 SD	
gesamt	709 100%	163 100%	123	121	168	180	145	156	7,04	9,11
2-5 Jahre	76 11%	0 0%	137	-	162	-	148	-	5,85	-
6-9 Jahre	190 27%	16 10%	130	143	163	177	145	157	6,08	9,78
10-12 Jahre	232 33%	48 29%	126	137	168	174	143	158	7,17	9,07
13-16 Jahre	211 30%	99 61%	123	121	166	180	144	156	7,67	9,02

Tab. 3: Ergebnisse Sulkuswinkelmessungen in Grad, insgesamt, sowie aufgeteilt nach Altersgruppen.

Angabe von Minimum, Maximum, Median (jeweils in Grad) sowie der einfachen Standardabweichung (1 SD).

Linke, weiße Spalte: Gruppe ohne dokumentierte Patellaluxation (POL).

Rechte, schattierte Spalte: Gruppe mit mindestens einer Patellaluxation in der Anamnese (PML).

Der Median des Sulkuswinkels in der gesamten POL-Gruppe lag bei 145° (Tab. 3), was laut Liebensteiner et al. (2017) dem adulten Grenzwert zwischen einer normalen Trochlea und einer Dejour-A-Dysplasie entspricht.

In der Altersgruppe 2–5 Jahre lag der Median etwas höher mit 148° (Tab. 3).

In der PML-Gruppe war der Median in allen Altersgruppen mehr als 10° höher als in der entsprechenden POL-Altersgruppe.

Die Höchstwerte waren in beiden Gruppen, auch über die Altersgruppen hinweg, deutlich über dem angenommenen Normalwert.

Die Minimum-Werte zeigten hingegen in beiden Gruppen eine Tendenz zur Abnahme mit dem Alter (Tab. 3).

Bezüglich der Sulkuswinkel zeigte der Mann–Whitney-U-Test signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen ($p < 0,001$) – mit deutlich höheren Werten in der Gruppe PML im Vergleich zur Gruppe POL (Abb. 11).

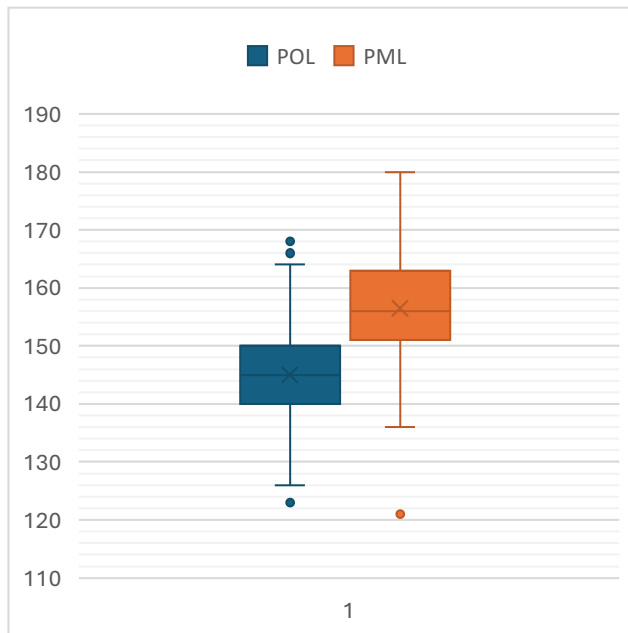


Abb. 11: Boxplot der Sulkuswinkel-Messungen in den Gruppen PML (orange) und POL (blau) mit dem Mittelwert als schwarze Linie (über alle Altersgruppen hinweg) und dem Median als x in der Box. Die Boxen stellen die mittleren 50 % der Werte dar – mit dem 25. Perzentil unten und dem 75. Perzentil oben. Die „Whisker“ (Antennen) zeigen unten Seite das 3. Perzentil und auf der oben das 97. Perzentil.

Beim Vergleich beider Parameter wurden in der Gruppe POL 52 Knie und in der Gruppe PML 8 Knie als Dejour B klassifiziert, zeigten jedoch Sulkuswinkel $\leq 145^\circ$. Auch diese Fälle wurden in der Konsensuskonferenz diskutiert. Hierbei zeigte sich als Ursache für die Einschätzung sehr häufig eine dysplastische laterale Facette (lateraler Kondylus), die ohne Kenntnis der Winkelmessung zu einer Klassifizierung als dysplastische Trochlea führte. Es wurde entschieden, diese Klassifizierungen im Nachhinein nicht zu ändern, da wir hier eine Ursache für die Schwierigkeiten in der Einschätzung der Trochleaform sahen.

3.2.3 Interrater-Reliabilität für die Trochleaform

Die Interrater-Reliabilität für den Sulkuswinkel ergab einen Intraklassen-Korrelationskoeffizienten (ICC) von 0,63, was einer substantziellen Übereinstimmung entspricht.

Der Bland–Altman-Plot (Abb. 12) zeigt die Abweichungen zwischen den Untersuchenden in Abhängigkeit vom jeweils gemessenen Wert.

Für die Dejour-Klassifikation ergab sich eine Interrater-Reliabilität (Cohen's Kappa) von 0,26, was lediglich einer mäßigen Übereinstimmung entspricht.

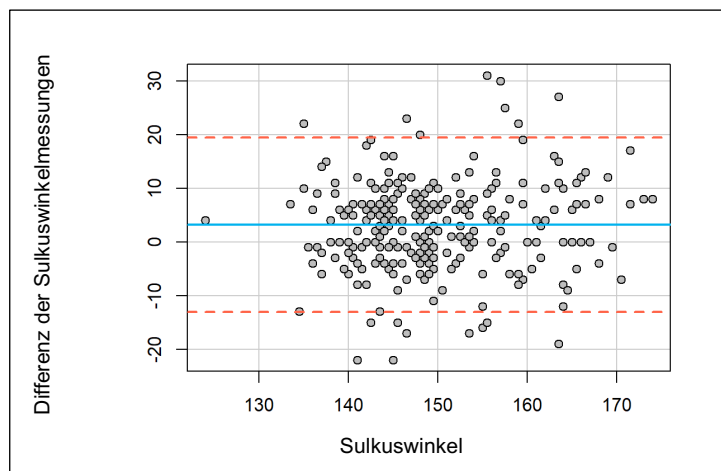


Abb. 12: Bland–Altman-Plot zur Darstellung der Übereinstimmung bzw. Abweichung in Messungen der Sulkuswinkel.

Im Mittel zeigen sich nur geringe Abweichungen (blaue Linie).

Die größten Differenzen treten bei mittleren Sulkuswinkelwerten von etwa 140° bis 165° auf.

(Rote Linien = durchschnittliche Abweichung $\pm 1,96$ Standardabweichung)

3.3 Patellaposition

3.3.1 Patellahöhe

Insall-Salvati-Index (ISI)

	n		Minimum		Maximum		Median		1 SD	
	gesamt	PML	POL	PML	POL	PML	POL	POL	PML	
gesamt	713 100%	164 100%	0,6	0,6	1,9	2,2	1,1	1,5	0,2	0,3
2-5 Jahre	77 11%	0 0%	0,6	-	1,5	-	1,0	-	0,2	-
6-9 Jahre	192 27%	16 10%	0,8	1,1	1,8	1,9	1,1	1,4	0,2	0,2
10-12 Jahre	233 33%	48 29%	0,8	1,9	1,9	1,9	1,1	1,5	0,2	0,3
13-16 Jahre	211 30%	100 61%	0,8	2,2	1,8	2,2	1,2	1,4	0,2	0,3

Tab. 4: Ergebnisse für den Insall–Salvati-Index, insgesamt sowie aufgeteilt nach Altersgruppen.

Linke, weiße Spalte: Gruppe ohne dokumentierte Patellaluxation (POL).

Rechte, schattierte Spalte: Gruppe mit mindestens einer Patellaluxation in der Anamnese (PML).

Die Medianwerte des Insall–Salvati-Index (ISI) waren in der PML-Gruppe signifikant höher als in der POL-Gruppe ($p < 0,001$).

Die Minimalwerte in den Altersgruppen 10 - 12 Jahre und 13 - 16 Jahre der PML-Gruppe lagen jeweils über dem angenommenen Normwert von 1,3, was eine Patella alta bei allen Patienten dieser Altersgruppen bedeuten würde (Tab. 4).

Der Median in der gesamten PML-Gruppe lag oberhalb des Normalwertes:

124 von 164 Patienten (76 %) wiesen einen ISI über 1,3 auf (Tab. 4).

In der POL-Gruppe zeigten immerhin noch 149 von 713 Probanden (21 %) einen ISI über 1,3 (Tab. 4).

Koshino-Sugimoto-Index (KSI)

	n		Minimum		Maximum		Median		1 SD	
	713 100%	164 100%	0,9	1,0	3,1	1,7	1,2	1,3	0,1	0,1
gesamt	713 100%	164 100%	0,9	1,0	3,1	1,7	1,2	1,3	0,1	0,1
2-5 Jahre	77 11%	0 0%	0,9	-	1,4	-	1,1	-	0,1	-
6-9 Jahre	192 27%	16 10%	0,9	1,0	1,5	1,5	1,2	1,3	0,1	0,1
10-12 Jahre	233 33%	48 29%	0,9	1,1	1,6	1,6	1,2	1,4	0,1	0,1
13-16 Jahre	211 30%	100 61%	1,0	1,1	3,1	1,7	1,3	1,3	0,2	0,1

Tab. 5: Ergebnisse für den Koshino–Sugimoto-Index, insgesamt sowie aufgeteilt nach Altersgruppen.

Linke, weiße Spalte: Gruppe ohne dokumentierte Patellaluxation (POL).

Rechte, schattierte Spalte: Gruppe mit mindestens einer Patellaluxation in der Anamnese (PML).

Beim Koshino–Sugimoto-Index (KSI) lagen die Maximalwerte in beiden Gruppen über dem aktuell als normal geltenden Grenzwert von 1,3 (Tab. 5). Die Medianwerte in der POL-Gruppe lagen im Normbereich, während sie in der PML-Gruppe auf Patellae altae bei mehr als der Hälfte der Gesamtgruppe sowie in den Altersgruppen der 10- bis 12-Jährigen und 13- bis 16-Jährigen hinwiesen (Tab. 5).

Insgesamt zeigten 135 Knie (23 %) der POL-Gruppe und 92 Knie (56 %) der PML-Gruppe einen KSI über 1,3.

Die Standardabweichungen beider Gruppen waren vergleichbar und wiesen auf gleichmäßig enge Verteilungen über alle Altersgruppen hinweg hin (Tab. 5).

Vergleich der Ergebnisse für ISI und KSI

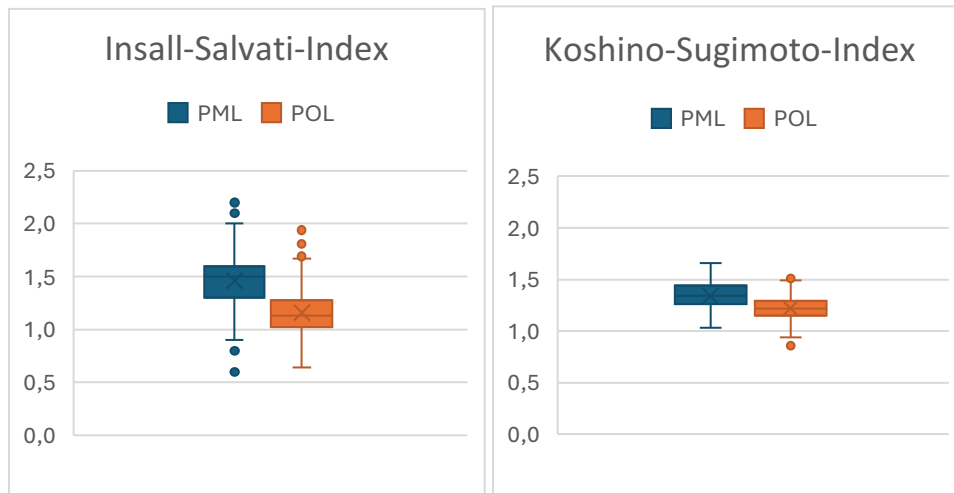


Abb. 13: Boxplots des Insall–Salvati-Index und des Koshino–Sugimoto-Index in den Gruppen POL (orange) und PML (blau) – mit dem Median gesamt als grauem „x“ und dem Mittelwert als grauem Balken.

Die Boxen stellen die mittleren 50 % der Werte dar – mit dem 25. Perzentil unten und dem 75. Perzentil oben.

Die „Whisker“ (Antennen) zeigen am unteren Ende die 3. Perzentile, am oberen Ende die 97. Perzentile.

Die Boxplots beider Indizes zeigen keine Überlappung der Wertebereiche der Gruppen PML und POL zwischen dem 25. und 75. Perzentil für Insall-Salvati-Index, während beim Koshino-Sugimoto-Index eine Überlappung in diesem Bereich besteht (Abb. 13).

3.3.2 Patella Tilt und Shift

Patellaneigung (Patella Tilt)

	n		Minimum		Maximum		Median		1 SD	
	637 100%	119 100%	0	0	31	44	6	24	4,8	9,8
gesamt	637 100%	119 100%	0	0	31	44	6	24	4,8	9,8
2-5 Jahre	68 11%	0 0%	0	-	15	-	4	-	3,1	-
6-9 Jahre	170 27%	15 13%	0	3	19	43	5	22	3,5	11,1
10-12 Jahre	208 33%	36 30%	0	0	28	42	6	24	5,0	10,6
13-16 Jahre	191 30%	68 57%	0	4	31	44	7	25	5,6	9,0

Tab. 6: Ergebnisse der Messungen vom Patella Tilt, insgesamt sowie aufgeteilt nach Altersgruppen.

Linke, weiße Spalte: Gruppe ohne dokumentierte Patellaluxation (POL).

Rechte, schattierte Spalte: Gruppe mit mindestens einer Patellaluxation in der Anamnese (PML).

Knie mit Patellaluxationen (PML-Gruppe) zeigten einen signifikant höhere Patellaneigung ($p < 0,001$).

Besonders auffällig waren die deutlich höheren Medianwerte, sowohl gesamt als auch in den einzelnen Altersgruppen (Tab. 6).

Die höheren Standardabweichungen in der PML-Gruppe zeigten zudem eine breitere Streuung der Werte (Tab. 6).

121 MRTs (76 aus der POL-Gruppe, 45 aus der PML-Gruppe) konnten nicht für die Patellaneigung ausgewertet werden, da ein ausgeprägter intraartikulärer Erguss vorlag.

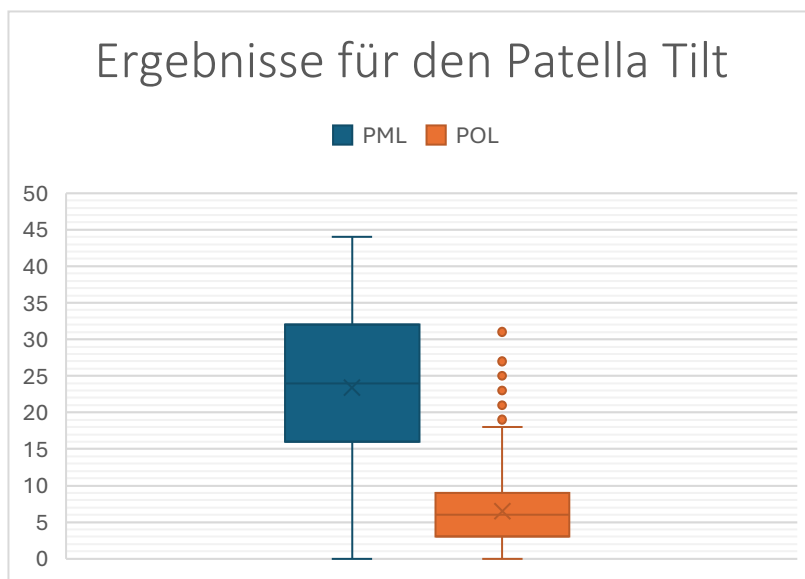


Abb. 14: Boxplots der Werte für den Patella Tilt in den Gruppen POL (orange) und PML (blau) – mit dem Median gesamt als grauem „x“ und dem Mittelwert als grauem Balken. Die Boxen stellen die mittleren 50 % der Werte dar – mit dem 25. Perzentil unten und dem 75. Perzentil oben. Die „Whisker“ (Antennen) zeigen am unteren Ende die 3. Perzentile, am oberen Ende die 97. Perzentile.

Patellaverschiebung (Patella Shift)

	n		Minimum		Maximum		Median		1 SD	
	gesamt	schattiert	gesamt	schattiert	gesamt	schattiert	gesamt	schattiert	gesamt	schattiert
gesamt	548 100%	119 100%	0	0	20	19	0	4	1.6	4.2
2-5 Jahre	54 10%	0 0%	0	-	6	-	1	-	1.3	-
6-9 Jahre	130 24%	14 12%	0	0	9	12	0	5	1.6	4.1
10-12 Jahre	188 34%	37 31%	0	0	20	19	0	4	2.0	4.7
13-16 Jahre	182 33%	68 57%	0	0	11	15	0	4	1.2	3.9

Tab. 7: Ergebnisse der Messung der Patellaverschiebung (Patella Shift), insgesamt sowie aufgeteilt nach Altersgruppen. Linke, weiße Spalte: Gruppe ohne dokumentierte Patellaluxation (POL). Rechte, schattierte Spalte: Gruppe mit mindestens einer Patellaluxation in der Anamnese (PML).

Ein lateraler Patella Shift trat in der PML-Gruppe signifikant häufiger auf als in der POL-Gruppe auf ($p < 0,001$).

Die Maximalwerte waren in den Gesamtgruppen gleich, in den einzelnen Altersklassen ähnlich hoch für die POL- und PML-Gruppen. Allerdings war die Varianz – erkennbar an der Standardabweichung – in der PML-Gruppe deutlich größer (Tab. 7).

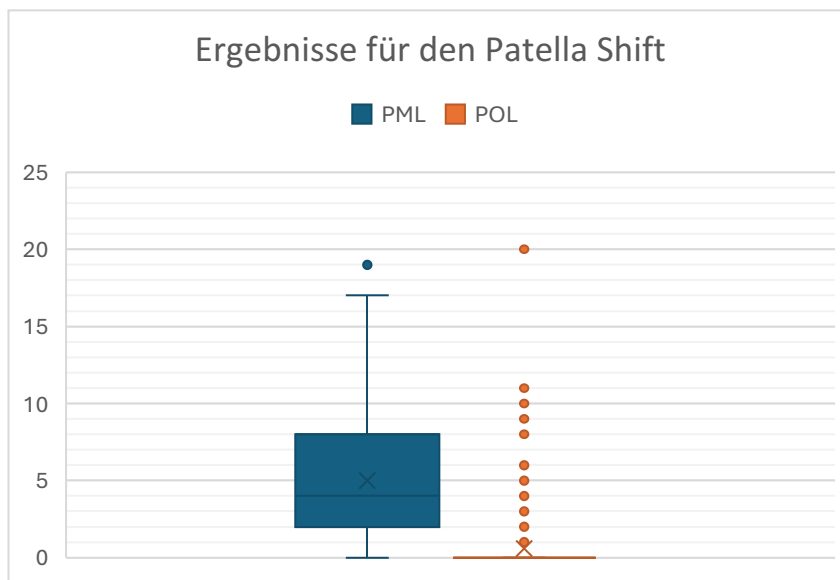


Abb. 15: Boxplots der Werte für den Patella Shift in den Gruppen POL (orange) und PML (blau) – mit dem Median gesamt als grauem „x“ und dem Mittelwert als grauem Balken. Die Boxen stellen die mittleren 50 % der Werte dar – mit dem 25. Perzentil unten und dem 75. Perzentil oben. Die „Whisker“ (Antennen) zeigen am unteren Ende die 3. Perzentile, am oberen Ende die 97. Perzentile.

210 MRT-Aufnahmen (165 aus der POL-Gruppe, 45 aus der PML-Gruppe) konnten nicht für den Patella Tilt und/oder Patella Shift ausgewertet werden, da entweder ein ausgeprägter intraartikulärer Erguss vorlag oder der retropatellare Erker fehlte.

3.3.3 Interrater-Reliabilität für die Patellaposition

Die Interrater-Reliabilität für den Patella Tilt zeigte einen Intraklassen-Korrelationskoeffizienten von 0,87, was einer nahezu perfekten Übereinstimmung in den Messungen entspricht (Tab. 8).

Für den Koshino–Sugimoto-Index (KSI) wurde eine substantielle Übereinstimmung, für den Insall–Salvati-Index (ISI) eine moderate Übereinstimmung festgestellt (Tab. 8).

Der Intraklassen-Korrelationskoeffizient für den Patella Shift lag hingegen nur im Bereich einer mäßigen Übereinstimmung (Tab. 8).

	IRR	p
ISI	0.56	<0.001
KSI	0.70	<0.001
Patella Tilt	0.87	<0.001
Patella Shift	0.30	<0.001

Tab. 8: Die Tabelle zeigt die Interrater-Reliabilität für alle vier Variablen sowie den p-Wert, der für jede IRR unter 0,05 liegt. Das bedeutet, dass die Übereinstimmung zwischen den beiden Beurteilenden für jede der Variablen größer als null ist.

4 Diskussion

4.1 Patellaluxationen

Bei Kindern, die mindestens eine Patellaluxation (PML) erlitten haben, stimmten sowohl die weibliche Überrepräsentanz als auch das Patientenalter mit früheren Veröffentlichungen überein. Wir fanden in unserem Bildarchiv keine Kinder mit Patellaluxationen, die jünger als 6 Jahre waren. (Fithian et al. 2004, Atkin et al. 2000)

4.2 Trochleaform

In unserer Studienkohorte wurden insgesamt 709 MRT-Aufnahmen von Kniegelenken bei Kindern und Jugendlichen ohne bekannte Vorgeschichte einer Patellaluxation (POL-Gruppe) für die Trochleaform analysiert, die als Referenzpopulation für eine normale Entwicklung des patellofemorales Gelenks diente. Bei Anwendung der etablierten Dejour-Klassifikation zur Beurteilung der Trochleamorphologie zeigte sich, dass lediglich 29 % dieser Referenzknie als morphologisch unauffällig, d. h. als „normal“ eingestuft wurden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass über 70 % der untersuchten Knie Anzeichen einer Trochleadysplasie aufwiesen, sofern man die für erwachsene Patienten entwickelten Einteilungen heranzieht

Bemerkenswert ist insbesondere der hohe Anteil von 46 % der POL-Knie, die als Dejour-Typ B klassifiziert wurden. Da dieser Typ in einer vereinfachten Klassifikation – bei der zwischen niedriggradigen (Dejour A) und hochgradigen Dysplasien (Dejour B–D) unterschieden wird – als hochgradig dysplastisch gilt, sprechen diese Ergebnisse für eine erhebliche Prävalenz potenziell pathologischer Trochleastrukturen bereits in der nicht-luxierten Referenzgruppe (Nelitz et al. 2014). Selbst wenn man die 52 Knie (entsprechend 7 %) ausschließt, bei denen trotz Dejour-B-Einstufung ein unauffälliger Sulkuswinkel

vorlag, verbleiben immer noch 39 % der Referenzknie mit einem dysplastischen Erscheinungsbild nach Dejour-Typ B.

Auch die Analyse des Sulkuswinkels unterstreicht diesen Befund. Der Mittelwert in der POL-Gruppe lag bei $145^\circ (\pm 7,04)$, was gemäß Liebensteiner et al. (2017) exakt dem Grenzwert zwischen einer normalen Trochlea und einer Typ-A-Dysplasie entspricht. Dies legt nahe, dass etwa die Hälfte der als anatomisch „normal“ eingestuften Knie in unserer Referenzgruppe bereits einen pathologischen Sulkuswinkel aufweisen könnte.

In der Vergleichsgruppe der Patienten mit dokumentierter Patellaluxation (PML) zeigte sich erwartungsgemäß ein noch deutlicheres Ausmaß morphologischer Auffälligkeiten. Über 90 % dieser Kinder und Jugendlichen wiesen eine Trochleadysplasie des Dejour-Typs B oder C auf. Die durchschnittlichen Sulkuswinkel in dieser Gruppe waren signifikant höher als in der POL-Gruppe ($p < 0,001$), wobei sich jedoch überlappende Standardabweichungen ergaben (Abb. 11).

Eine kombinierte Betrachtung beider Parameter – also der Dejour-Klassifikation und des Sulkuswinkels – offenbarte, dass mehr als die Hälfte der Knie in der POL-Gruppe sowohl eine Dejour-B-Dysplasie als auch einen Sulkuswinkel $> 145^\circ$ aufwiesen. Würde diese Konstellation allein als ausreichend starker Risikofaktor für eine Patellaluxation gelten, müsste es bei Kindern und Jugendlichen eine wesentlich höhere Inzidenz von Patellaluxationen geben. Dies deutet darauf hin, dass das morphologische Risikomerkmale der Trochleadysplasie zwar relevant, jedoch nicht allein für das Auftreten einer Instabilität verantwortlich sind. Vielmehr ist von einem multifaktoriellen Geschehen auszugehen, bei dem mehrere anatomische und funktionelle Variablen im Zusammenspiel das individuelle Risiko bestimmen.

Ein zentrales methodisches Problem besteht darin, dass bislang keine altersabhängigen Grenzwerte für kindliche Sulkuswinkel oder Trochleabewertungen etabliert wurden. In der klinischen und radiologischen Praxis werden in der Regel die Referenzwerte für Erwachsene (z. B. 145° als Grenzwert für den Sulkuswinkel) auch bei Kindern verwendet, obwohl deren

Trochleamorphologie sich noch im Wachstum befinden. Unsere Ergebnisse legen nahe, dass ein höherer Grenzwert für den Sulkuswinkel – beispielsweise 150° – bei pädiatrischen Populationen mit wachsendem Skelett besser geeignet sein könnte, um zwischen physiologischer Variante und Dysplasie zu unterscheiden (siehe Abb. 11).

Diese Überlegungen sind insbesondere im Hinblick auf die sich wandelnde therapeutische Strategie relevant. In den letzten Jahren hat sich der Ansatz zur Behandlung der patellofemorale Instabilität bei Kindern und Jugendlichen zunehmend individualisiert und operativen Verfahren wird eine größere Rolle eingeräumt, sofern anatomische Risikofaktoren deutlich ausgeprägt sind. (Nelitz et al. 2012) Als häufigster einzelner Risikofaktor gilt nach wie vor die Trochleadysplasie. (Askenberger et al. 2017; Stepanovich et al. 2016) Parikh und Rajdev (2023) analysierten MRT-Daten von 32 Jugendlichen mit bilateraler patellofemorale Instabilität und stellten fest, dass bei allen Patienten mehrere Risikofaktoren gleichzeitig vorlagen – wobei die Trochleadysplasie am häufigsten identifiziert wurde. Trotz ihrer diagnostischen Bedeutung bleibt die Dejour-Klassifikation, die ursprünglich für erwachsene Patienten entwickelt und validiert wurde, eine zentrale Grundlage zur Differenzierung pathologischer Trochleamorphologien. (Nelitz et al. 2014; Kim et al. 2019)

Ob das Wachstum einen Einfluss auf die Entwicklung der Trochlea hat, wird kontrovers diskutiert. Während Ferlic et al. (2018) und Frings et al. (2020) mögliche wachstumsbedingte Veränderungen als ursächlich für strukturelle Reifung betrachten, fanden Parikh et al. (2018) in einer umfangreichen MRT-Studie mit 235 Jugendlichen keine altersabhängigen Veränderungen der Trochleamorphologie hinsichtlich Sulkuswinkel oder Dejour-Klassifikation. Sie vermuten vielmehr eine genetische Disposition als primären Einflussfaktor. Diese Unsicherheiten verdeutlichen den dringenden Bedarf an langfristig angelegten Längsschnittstudien, die den Einfluss von Wachstum und Reifung auf das Entstehen patellofemorale Risikoprofile systematisch untersuchen.

Die Bewertung der Interrater-Reliabilität unserer Studie ergab für die Dejour-Klassifikation ein nur mäßiges Maß an Übereinstimmung mit einem Cohen's Kappa von 0,26. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Beobachtungen von Nelitz et al. (2014), die ebenfalls eine geringe interindividuelle Konsistenz in der Anwendung der 4-Stufen-Dejour-Klassifikation feststellten. Bei Anwendung einer vereinfachten 2-Stufen-Kategorisierung in niedriggradige (Dejour A) und hochgradige Dysplasien (Dejour B–D) verbesserte sich die Übereinstimmung jedoch erheblich. Auch Saccomanno et al. (2023) kommen in ihrer systematischen Übersichtsarbeit über 33 Studien mit über 3000 Patienten zu dem Schluss, dass die Reliabilität der Dejour-Klassifikation stark variiert – von schwach bis sehr gut – je nach Untersuchungsdesign und Bildgebungstechnik. Kazley und Banerjee (2019) kritisierten insbesondere die mangelnde Objektivierbarkeit der Dejour-Einteilung und forderten, weitere Parameter zur quantitativen Beschreibung der Trochlea zu identifizieren, um diese künftig als verlässlichere Entscheidungsgrundlage in der Therapieplanung zu nutzen. Unsere eigenen Messungen des Sulkuswinkels zeigten dagegen eine substantielle Interrater-Übereinstimmung. Dennoch wurde von den Untersuchern betont, dass die Auswahl der geeigneten axialen Schnittbildsequenz zur Messung des Sulkuswinkels sehr subjektiv sei. Variationen in der Schichtdicke sowie im gewählten anatomischen Niveau führten mitunter zu deutlich unterschiedlichen Messergebnissen. Wie auch Pennock et al. (2020) zeigen konnten, verändert sich der Sulkuswinkel entlang des proximal-distalen Verlaufs der Trochlea – insbesondere in proximaler Lage ist die Trochlea tendenziell flacher. Die Untersucher unserer Studie berichteten zudem, dass insbesondere bei flachen oder dysplastischen Trochleae der Scheitelpunkt des Sulkuswinkels nur schwer eindeutig zu identifizieren war, was sich negativ auf die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit auswirken kann.

Auf Grundlage unserer Daten erscheint es daher sinnvoll, bei der Beurteilung der Trochleamorphologie zunächst eine quantitative Messung des Sulkuswinkels durchzuführen. Nur bei pathologischen Werten sollte ergänzend eine qualitative Einteilung nach Dejour zum Einsatz kommen, um den

Schweregrad der Dysplasie zu klassifizieren. Dieses sequenzielle Vorgehen könnte die diagnostische Genauigkeit erhöhen und die interindividuelle Vergleichbarkeit verbessern.

4.3 Patellaposition

Sowohl die Auswertung des Koshino-Sugimoto-Index (KSI) als auch des Insall-Salvati-Index (ISI) ergab in der PML-Gruppe (Patientenknie mit dokumentierter Patellaluxation) Medianwerte oberhalb des allgemein anerkannten Grenzwertes von 1,3. Diese Befunde lassen sich zeigen, dass bei über der Hälfte der untersuchten Kinder und Jugendlichen eine Patella alta vorlag – ein Faktor, der in der Literatur wiederholt mit einem erhöhten Risiko für patellofemorale Instabilität in Verbindung gebracht wurde.

Jedoch ist bemerkenswert, dass auch in der Vergleichsgruppe ohne dokumentierte Luxationen (POL-Gruppe) erhöhte Werte für die Patellahöhe nachgewiesen wurden. Konkret zeigten 21 % der Probanden anhand des ISI und 23 % anhand des KSI Hinweise auf eine hochstehende Patella, obwohl bei diesen Kindern und Jugendlichen bis zum Zeitpunkt der MRT-Untersuchung keine Patellaluxation aufgetreten bzw. dokumentiert war. Diese Beobachtung unterstreicht, dass eine Patella alta allein offenbar nicht zwangsläufig zu einer Luxation führt, sondern vielmehr als ein Teil eines multifaktoriellen Ursachenkomplexes zu betrachten ist. Sie bestätigt somit die These, dass die Entwicklung einer Patellainstabilität das Ergebnis eines Zusammenspiels mehrerer anatomischer und funktioneller Risikofaktoren ist, wobei kein einzelner Parameter allein ausschlaggebend zu sein scheint.

Die statistische Auswertung ergab signifikant erhöhte Werte der Patellahöhe in der PML-Gruppe, sowohl im ISI als auch im KSI ($p < 0,001$). Diese Daten stimmen mit den Ergebnissen früherer Studien überein, u. a. von Ferlic (2018) und Frings (2020), die ebenfalls eine Korrelation zwischen Patella alta und

patellofemorale Instabilität beschrieben. Ergänzt wird dieser Zusammenhang durch die Beobachtung, dass in unserer PML-Kohorte auch die morphologischen Parameter Patellaneigung (Tilt) und Patellaverschiebung (Shift) deutlich ausgeprägter waren als in der POL-Gruppe – sowohl in den Medianwerten als auch hinsichtlich der Streuung. Diese Ergebnisse deuten auf eine stärkere strukturelle Instabilität in der betroffenen Gruppe hin und decken sich mit den Ergebnissen, die von Askenberger et al. (2017) für den Patella Tilt (> 20 %) im Rahmen der Risikobewertung postuliert wurden.

Die deutlich größere Streuung der Tilt- und Shift-Werte in der PML-Gruppe könnte auf eine größere interindividuelle Bandbreite prädisponierender biomechanischer Faktoren hinweisen, was wiederum auf die komplexe und multifaktorielle Genese der patellofemorale Instabilität schließen lässt. Diese interindividuelle Varianz legt nahe, dass die alleinige Betrachtung einzelner Messparameter – etwa der Patellahöhe – nicht ausreicht, um das Luxationsrisiko zuverlässig vorherzusagen.

Zur Veränderung der Parameter im Wachstum gibt es unterschiedliche Ergebnisse. So zeigten Pruneski et al. (2022) in einer MRT-basierten Untersuchung an 240 asymptomatischen Kniegelenken, dass sich zentrale Parameter wie Patellahöhe, lateraler Tilt, Sulkuswinkel und TT–TG-Distanz im Verlauf des Wachstums verändern. Dabei konnte ein Zusammenhang zwischen diesen Reifungsveränderungen und einem rückläufigen Risiko für Patellainstabilität festgestellt werden. Auch Choi et al. (2021) beobachteten in einer Untersuchung von 852 Patienten im Alter zwischen 4 und 18 Jahren alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede in der patellofemorale Morphologie, was auf eine mögliche Erklärung für die geschlechtsbezogene Häufung und das Alter des Erstauftretens von Patellaluxationen hindeutet. Patel et al. (2023) fanden hingegen, dass sich das Verhältnis einer hochstehenden Patella (Patella alta) nach dem 8. Lebensjahr bei Patienten mit Patellaluxation nicht mehr wesentlich verändert. Diese Erkenntnis wirft die Frage auf, inwiefern frühkindliche operative Interventionen – insbesondere in Bezug auf die Patellahöhe – langfristige Auswirkungen auf die Trochleamorphologie und das Instabilitätsrisiko haben könnten.

Die Interrater-Reliabilität unserer Messungen war für die Parameter ISI, KSI und Patellaneigung als gut bis sehr gut zu bewerten. Dies unterstreicht die Reproduzierbarkeit dieser Messgrößen im klinischen Kontext. Demgegenüber zeigte sich für die Beurteilung des Patella Shifts nur eine mäßige Übereinstimmung zwischen den Untersuchern. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die Schwierigkeit in der exakten Identifikation des patellaren Erkers sein, insbesondere bei ausgeprägten morphologischen Veränderungen. Zudem wurde von den Untersuchern wiederholt berichtet, dass das Zentrum der Trochlea – insbesondere bei bestehender Dysplasie – nicht immer eindeutig zu bestimmen war. Dies erschwert nicht nur die Bestimmung des Patella Shifts, sondern beeinflusst auch die Messung des Sulkuswinkels sowie die Klassifikation nach Dejour bzw. deren Modifikation nach Liebensteiner (2017).

4.4 Therapien der patellofemorale Instabilität

Für die therapeutische Entscheidungsfindung und präoperative Planung ist auch bei Kindern und Jugendlichen eine verlässliche Kategorisierung der Trochlea sowie die Bestimmung der Patellaposition entscheidend.

Nur wenige Autoren haben Behandlungsoptionen für Kinder verglichen. Eine vergleichbare Studie mit einer ähnlich hohen Anzahl vermutlich gesunder kindlicher Kniegelenke konnten wir nicht finden. (Nelitz et al. 2014, Sinikumpu und Nicolaou 2023)

Dennoch beschäftigen sich viele Studien mit den Behandlungsoptionen.

Lee et al. (2023) fanden keinen signifikanten Unterschied im Ergebnis zwischen konservativer und operativer Behandlung bei Patienten mit einer akuten Patellaluxation und raten daher von einer routinemäßigen Operation als erste Behandlungsoption ab.

Parikh et al. (2024) versuchten durch eine Umfrage Leitlinien zur Behandlung einer erstmaligen Patellaluxation zu etablieren, stellten jedoch fest, dass trotz

einer Beteiligung von etwa 50 % der Befragten keine einheitliche Therapieempfehlung vorliegt.

Sinikumpu und Nicolaou (2023) favorisieren eine konservative Behandlung, außer bei Verletzungen wie beispielsweise osteochondralen Absprengungen. Insgesamt sehen sie jedoch einen Trend zu operativen Verfahren, den sie bei Kindern und Jugendlichen als kritisch erachten.

Für die operative Behandlung der patellofemorale Instabilität stehen eine Vielzahl weichteilchirurgischer Verfahren zur Verfügung, insbesondere im Kindes- und Jugendalter, in dem knöcherne Eingriffe aufgrund der offenen Epiphysenfugen möglichst vermieden werden sollten. Diese weichteilbasierten Verfahren zielen auf eine Verbesserung der Patellaführung ab, ohne das Risiko einer Wachstumsstörung einzugehen.

Eine Metaanalyse von Nwachukwu et al. (2016) spricht sich für eine frühzeitige operative Intervention bereits nach einer erstmaligen Patellaluxation bei Kindern und Jugendlichen aus – vor allem dann, wenn Risikofaktoren wie eine skelettale Unreife oder eine ausgeprägte Trochleadysplasie vorliegen. Diese Faktoren gelten als Prädiktoren für ein erhöhtes Rezidivrisiko, welches durch eine rein konservative Therapie möglicherweise nicht ausreichend adressiert werden kann.

Als etablierte Weichteiloperationen gelten insbesondere die Medialisierung der Patellasehne nach Goldthwait, die Rekonstruktion des medialen patellofemorale Ligaments (MPFL) sowie das laterale Release. Diese Techniken wurden von Megremis & Megremis (2022) bei skelettal unreifen Patienten als geeignete Verfahren zur Rezentrierung der Patella beschrieben. Dennoch ist die Evidenzlage nicht einheitlich. So berichten Vacariu et al. (2020) über eine hohe Versagensrate der Quadrizepsplastik im Langzeitverlauf, was die Relevanz einer sorgfältigen Patientenselektion sowie einer strukturierten postoperativen Nachsorge unterstreicht.

Li et al. (2020) empfehlen weichteilchirurgische Maßnahmen wie das laterale Release und die MPFL-Rekonstruktion lediglich bei Patienten mit einer milden Form der Trochleadysplasie. Bei ausgeprägteren morphologischen

Veränderungen, insbesondere Dejour Typ C oder D, erscheinen solche Maßnahmen allein möglicherweise unzureichend, was die Notwendigkeit einer individualisierten, auf die anatomischen Gegebenheiten abgestimmten Therapieplanung verdeutlicht.

In der pädiatrischen Orthopädie gelten weichteilbasierte Eingriffe weiterhin als bevorzugtes Vorgehen zur Korrektur der Patellaführung, um Wachstumsfugenverletzungen zu vermeiden. (Nelitz et al. 2012; Antinolfi et al. 2016) Rajdev und Parikh (2019) schlugen auf Basis von Beobachtungen bei Erwachsenen und unter Berücksichtigung eines möglichen Trochlea-Remodellings im Kindesalter eine operative Stabilisierung der Patella bei Kindern unter 10 Jahren mit vorliegender Trochleadysplasie vor. Diese Maßnahme soll potenziell das Wachstum der Gelenkanteile positiv beeinflussen und die Trochleamorphologie langfristig verbessern.

Nelitz et al. (2012) sprachen sich darüber hinaus für eine Trochleoplastik in Kombination mit einer MPFL-Rekonstruktion bei Kindern mit offener Wachstumsfuge aus – allerdings nur im Fall mehrfacher Luxationen und bei Versagen rein weichteilbasierter Eingriffe.

Im Gegensatz dazu diskutierten Kim und Parikh (2022) die Trochleoplastik eher zurückhaltend, da sie mit potenziellen Risiken wie einer avaskulären Nekrose oder der Entstehung einer postoperativen Arthrose verbunden sein kann. In der Praxis ist diese Methode daher bei sehr jungen Patienten bisher nur selektiv indiziert.

Unsere eigenen Daten sprechen gegen eine generelle Empfehlung zur frühzeitigen operativen Intervention, da in unserer Kohorte bereits bei 40 bis 44 % der Kinder ohne dokumentierte Patellaluxation vor dem 10. Lebensjahr eine Trochleaform vom Typ Dejour B vorlag. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass selbst morphologisch auffällige Trochleastrukturen nicht zwangsläufig mit einer klinischen Instabilität einhergehen und betont die Bedeutung einer differenzierten Betrachtung.

Insgesamt unterstreichen unsere Ergebnisse die Notwendigkeit einer präzisen morphologischen Diagnostik zur individuellen Risikoabschätzung

patellofemoraler Instabilität. Die genaue Analyse der Patellaposition, der Trochleamorphologie sowie weiterer anatomischer Parameter sollte daher Grundlage jeder therapeutischen Entscheidung sein – insbesondere bei pädiatrischen Patienten mit noch nicht abgeschlossener Skelettreifung.

4.5 Limitationen

Diese Studie unterliegt mehreren Einschränkungen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

Zum einen handelt es sich um ein retrospektives Studiendesign, das Limitationen hinsichtlich Datenvollständigkeit, Standardisierung der Bildgebung und möglicher Selektionseffekte bei der Bildung der Studienkohorte mit sich bringt. Zum anderen wurden in der POL-Gruppe (Knie von Probanden ohne dokumentierte Patellaluxation) keine vollständig gesunden Kinder und Jugendlichen eingeschlossen. Vielmehr erfolgten die MRT-Untersuchungen dieser Gruppe aus klinischen Gründen, die nicht im Zusammenhang mit einer patellofemorale Instabilität standen. In Ermangelung entsprechender Anamnesen und ohne Hinweise auf eine Luxation im Befundprotokoll wurden diese Kniegelenke als anatomisch unauffällig klassifiziert. Eine systematische Erfassung später aufgetretener oder anamnestisch nicht dokumentierter Patellaluxationen war aufgrund fehlender Nachbeobachtungsdaten sowie eingeschränkter Kontaktmöglichkeiten zu den Patienten nicht möglich.

Trotz dieser Limitationen stellt die hohe Fallzahl eine wesentliche Stärke der vorliegenden Untersuchung dar. Während viele frühere Studien zur patellofemorale Instabilität auf deutlich kleinere Kohorten basierten – typischerweise mit 106 bis 266 MRT-Datensätzen (Mundy et al. 2016; Parikh et al. 2024; Dueppe et al. 2016; Jaquith und Parikh 2017) –, umfasst unsere Studie eine erheblich größere Zahl an Fällen, was die Aussagekraft insbesondere im Hinblick auf gruppenspezifische Unterschiede erhöht. Nichtsdestotrotz wäre zur zuverlässigen Definition altersabhängiger Normwerte eine noch umfangreichere Erhebung unter Einbeziehung größerer Fallzahlen in sämtlichen Altersgruppen wünschenswert. Besonders in den jüngeren

Altersgruppen war die Zahl der untersuchten Patienten in unserer Stichprobe begrenzt. Um dennoch wachstumsbezogene Vergleiche zu ermöglichen, wurden die Probanden altersabhängig in Gruppen eingeteilt, die sich an typischen kindlichen Wachstumsschüben orientieren. Diese pragmatische Vorgehensweise kann jedoch zu einer gewissen Verzerrung bei der Interpretation der Ergebnisse bezogen auf Wachstumsdynamiken führen.

4.6 Schlussfolgerungen

Den vorliegenden Ergebnissen zufolge sind die derzeit verfügbaren Referenzwerte und diagnostischen Kriterien für die Einteilung nach Dejour und den Sulkuswinkel im Einzelnen nicht ausreichend geeignet, um zwischen einer physiologischen und einer dysplastischen Form der Trochlea im Kindes- und Jugendalter zu differenzieren. In unserer Studienkohorte zeigten sich Sulkuswinkel bis zu 150° als normvariabel, vor allem im frühen Lebensalter. Zur Etablierung valider und wachstumsadaptierter Diagnosekriterien für eine Trochleadysplasie im heranwachsenden Kniegelenk sind jedoch weiterführende prospektive Studien erforderlich.

Unseren Erfahrungen aus den Auswertungen der MRTs und Ergebnissen nach scheint es sinnvoll zu sein, bevor eine Einteilung der Trochlea nach Dejour/Liebensteiner (2017) erfolgt, als erstes den Sulkuswinkel zu messen. Erst wenn dieser als pathologisch gewertet werden kann, sollte eine deskriptive Beschreibung der Trochleaform erfolgen.

Zudem sollte diskutiert werden, eine chirurgische Intervention ausschließlich bei Vorliegen einer Trochleadysplasie Typ Dejour C (bzw. D) in Kombination mit rezidivierenden Patellaluxationen in Erwägung zu ziehen.

Für die Bestimmung der Patellahöhe können die beschriebenen Ergebnisse keine Altersabhängigkeit nachweisen. Für die Patellahöhe scheint der Insall-Salvati-Index mit dem von Erwachsenen übernommen Grenzwert von 1,3 eine bessere Identifizierung einer pathologischen Patellahöhe zu erreichen als der

Koshino-Sugimoto-Index (Abb. 12). Dennoch werden mit beiden Indizes etwa 1/3 der Knie in der Gruppe POL als pathologisch bewertet mit einer Patella alta. Beim Koshino-Sugimoto-Index, der ursprünglich in nativradiologischen Bildern entwickelt wurde, wurde der Grenzwert daraus übernommen und sollte in großen Studien für das MRT reevaluiert werden.

Für den Patella Tilt kann ein niedriger Wert als 20° als pathologisch angenommen werden (Abb. 14). Aus unseren Ergebnissen scheint ein Patella Tilt von 15° als Grenzwert sinnvoll.

Der Patella Shift ist bekannterweise kein Hauptfaktor und eher in der Entscheidungsfindung für Weichteiloperation, bspw. einer medialen Raffung oder einem lateralen Release mit zur Beurteilung heranzuziehen.

5 Zusammenfassung

Hintergrund

Die patellofemorale Instabilität im Kindes- und Jugendalter ist multifaktoriell bedingt. Zu den Hauptfaktoren zählen Trochleadysplasie, Patella alta und lateralisierte Tuberositas tibiae. In der vorliegenden MRT-basierten Studie wurde die morphologische Trochleaform und Patellaposition bei 877 Knien von Kindern und Jugendlichen mit (PML) und ohne (POL) dokumentierte Patellaluxationen analysiert.

Ergebnisse

Trochleaform

Die Dejour-Klassifikation offenbarte erhebliche Unterschiede: Nur 29 % der POL-Knie wurden als normal eingestuft, während 46 % Dejour-B-Dysplasien zeigten – ein Wert, der üblicherweise als schwerwiegend gilt. In der PML-Gruppe fanden sich 54 % Dejour-C-Dysplasien, nur 3 % galten als normal. Der mittlere Sulkuswinkel lag in der POL-Gruppe bei 145°, in der PML-Gruppe bei 156°. Dies deutet darauf hin, dass Sulkuswinkel bis zu 150° im wachsenden Knie als normvariabel gelten sollten. Die Interrater-Reliabilität für den Sulkuswinkel war substantiell (ICC = 0,63), während sie für die Dejour-Klassifikation nur mäßig ausfiel (Kappa = 0,26).

Patellaposition

Beide Messmethoden zur Patellahöhe – der Insall-Salvati-Index (ISI) und der Koshino-Sugimoto-Index (KSI) – zeigten signifikant erhöhte Werte in der PML-Gruppe. 76 % der PML-Patienten hatten einen ISI > 1,3 gegenüber 21 % der POL-Gruppe.

Auch der Patella Tilt (axiale Rotation) und der Patella Shift (laterale Verschiebung) waren bei PML signifikant ausgeprägter. Ein Tilt > 20° erwies sich als pathologisch. Der Patella Shift ist eher deskriptiv in der Gesamtschau der Pathologie zu sehen und bewerten. Die Interrater-Reliabilität war für den Tilt exzellent (ICC = 0,87), für den Shift jedoch nur moderat (ICC = 0,30).

Diskussion

Die Dejour-Kriterien und Sulkuswinkelgrenzwerte, die aus der Erwachsenenmedizin stammen, scheinen für die Beurteilung kindlicher Kniegelenke unzureichend. Viele POL-Kinder zeigten morphologisch auffällige Trochleae. Daher ist die Anwendung der Erwachsenen-Grenzwerte auf pädiatrische Kollektive kritisch zu hinterfragen.

Patella alta war auch in der POL-Gruppe nachweisbar, ohne dass es zu Luxationen kam. Dies stützt die Hypothese, dass Patella alta als alleiniger Risikofaktor nicht ausreicht, sondern im Kontext weiterer pathomorphologischer Veränderungen betrachtet werden muss.

Bei Kindern und Jugendlichen sollte ein chirurgisches Vorgehen insbesondere bei Dejour-C- oder -D-Dysplasien mit nachgewiesener Instabilität in Betracht gezogen werden. Isolierte Trochleadysplasien vom Typ A oder B ohne klinische Luxation scheinen keine alleinige OP-Indikation zu begründen.

Limitationen

Die retrospektive Studie basiert auf klinisch indizierten MRTs, ohne sichere Kenntnis des späteren klinischen Verlaufs. Dennoch stellt die große Fallzahl eine wesentliche Stärke der Studie dar.

Schlussfolgerung

Die derzeit gängigen Referenzwerte und Klassifikationssysteme zur Beurteilung der Trochleamorphologie und Patellaposition bei Kindern und Jugendlichen sind unzureichend validiert. Nach unseren Daten scheinen z. B. ein Sulkuswinkel bis 150° im Wachstumsalter physiologisch. Eine chirurgische Therapie sollte nur bei hochgradiger Dysplasie (Dejour C/D) und klinischer Instabilität erwogen werden. Zukünftige Studien müssen wachstumsadaptierte Normwerte etablieren und die Langzeiteffekte konservativer versus operativer Strategien untersuchen.

6 Literaturverzeichnis

- Akcaalan S, Duran I, Kavaklilar A, Beser F, Caglar C, Ugurlu M (2025) Low lateral inclination angle, high sulcus angle, high trochlear height and patellar alta are risk factors for first lateral patellar dislocation and complete MPFL rupture, comparative study. *Exp Orthop*.12(1): e70213
- Antinolfi P, Bartoli M, Placella G, Speziali A, Pace V, Delcogliano M, Mazzola C (2016) Acute patellofemoral instability in children and adolescents. *Joints* 13; 4(1): 47-51
- Askenberger M, Janarv PM, Finnbogason T, Arendt EA (2017) Morphology and Anatomic Patellar Instability Risk Factors in First-Time Traumatic Lateral Patellar Dislocations: A Prospective Magnetic Resonance Imaging Study in Skeletally Immature Children. *Am J Sports Med* 45(1): 50-58
- Atkin DM, Fithian DC, Marangi KS, Stone ML, Dobson BE, Mendelsohn C (2000) Characteristics of patients with primary acute lateral patellar dislocation and their recovery within the first 6 months of injury. *Am J Sports Med*. 28(4):472-9.
- Camathias C, Studer K, Kiapour A, Rutz E, Vavken P (2016) Trochleoplasty as a Solitary Treatment for Recurrent Patellar Dislocation Results in Good Clinical Outcome in Adolescents. *Am J Sports Med* 44(11):2855-2863
- Choi W, Lee SJ, Oh J, Baek H, Yang J, Shin J, Jung B, Lee S (2021) Magnetic Resonance Imaging of Patellofemoral Morphometry Reveals Age and Gender Variations in the Knees of Children and Adolescents. *Diagnostics (Basel)* 11(11):1985
- Chotel F, Bérard J, Raux S (2014) Patellar instability in children and adolescents. *Orthop Traumatol Surg Res* 100(1 Suppl): S125-37
- Clark D, Metcalfe A, Wogan C, Mandalia V, Eldridge J (2017) Adolescent patellar instability. *Bone Joint J*. 99-B (2):159-170
- Diederichs G, Scheffler S (2013) MRI after patellar dislocation: assessment of risk factors and injury to the joint. *Rofo*. 185(7):611-20
- Dejour D, Ferrua P, Ntagiopoulos PG, Radier C, Hulet C, Rémy F, Chouteau J, Chotel F, Boisrenoult P, Sebilo A, Guilbert S, Bertin D, Ehkirch FP, Chassaing V (2013) The introduction of a new MRI index to evaluate sagittal patellofemoral engagement. *Orthop Traumatol Surg Res*. 99(8 Suppl): S391-8
- Dejour J, Walch G, Nove-Josserand L, Guier C (1994) Factors of patellar instability: an anatomic radiographic study. *knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2(1):19-26.
- Dueppe K, Gustavsson N, Edmonds EW (2016) Developmental Morphology in Childhood Patellar Instability: Age-dependent Differences on Magnetic Resonance Imaging. *J Pediatr Orthop* 36(8): 870-876
- Ferlic PW, Runer A, Dammerer D, Wansch J, Hackl W, Liebensteiner MC (2018) Patella Height Correlates With Trochlear Dysplasia: A Computed Tomography Image Analysis. *Arthroscopy* 34(6):1921-1928

- Fithian DC, Paxton EW, Stone ML, Silva P, Davis DK, Elias DA, White LM (2004) Epidemiology and natural history of acute patellar dislocation. *Am J Sports Med.* 32(5):1114-21
- Frings J, Balcarek P, Tscholl P, Liebensteiner M, Dirisamer F, Koenen P (2020) Conservative Versus Surgical Treatment for Primary Patellar Dislocation. *Dtsch Arztebl Int* 117(16):279-286
- Hasler CC, Studer D (2016) Patella instability in children and adolescents. *EFFORT Open Rev.* 1(5):160-166
- Hefti F, Brunner R, Freuler F, Hasler C, Jundt G, Krieg A (2015) *Kinderorthopaedie in der Praxis.* S. 57 und 397, Hefti F, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Hoehne S, Gerlach K, Irlenbusch L, Schulz M, Kunze C, Finke R (2017) Patella Dislocation in Children and Adolescents. *Z Orthop Unfall* 155(2):169-176
- Jaquith BP, Parikh SN (2017) Predictors of Recurrent Patellar Instability in Children and Adolescents After First-time Dislocation. *J Pediatr Orthop* 37(7): 484-490
- Jones RH, Lijesen E, Green DW (2025) What's up with patella alta? *Curr Opin Pediatr.* 37(1):82-87
- Kazley JM, Banerjee S (2019) Classification in Brief: The Dejour Classification of Trochlear Dysplasia. *Clin Orthop Relat Res.* 477(10):2380-2386
- Kim HK, Greenstein R, Plemmons A, Rajdev N, Parikh S, Kim DH (2019) Patellofemoral Instability in Children: Correlation Between Patellofemoral Incongruence, Mechanism of Injury, and Cartilage Damage. *AJR Am J Roentgenol* 213(1): 182-190
- Kim HK, Parikh S (2022) Patellofemoral Instability in Children: Imaging Findings and Therapeutic Approaches. *Korean J Radiol.* 23(6):674-687
- Kim HK, Shiraj S, Anton C, Horn PS (2014) The patellofemoral joint: do age and gender affect skeletal maturation of the osseous morphology in children? *Pediatr Radiol.* 44(2): 141-8
- Koshino T, Sugimoto K (1989) New measurement of patellar height in the knees of children using the epiphyseal line midpoint. *J Pediatr Orthop* 9(2):216-8
- Kurowecki D, Shergill R, Cunningham KM, Peterson DC, Takrouri HSR, Habib NO, Ainsworth KE (2022) A comparison of sagittal MRI and lateral radiography in determining the Insall-Salvati ratio and diagnosing patella alta in the pediatric knee. *Pediatr Radiol.* 52(3):527-532
- Lee DY, Kang DG, Jo HS, Heo SJ, Bae JH, Hwang SC (2023) A systematic review and meta-analysis comparing conservative and surgical treatments for acute patellar dislocation in children and adolescents. *Knee Surg Relat Res* 35(1):18
- Lee PP, Chalian M, Carrino JA, Eng J, Chhabra A (2012) Multimodality correlations of patellar height measurement on X-ray, CT, and MRI. *Skeletal Radiol.* 41(10):1309-14

Lewallen LW, McIntosh AL, Dahm DL (2013) Predictors of recurrent instability after acute patellofemoral dislocation in pediatric and adolescent patients. *Am J Sports Med* 41(3): 575-81

Li M, Wang F, Ji G, Liu F, Fan C, Yang G, Lu J (2020) Combined medial and lateral patellar retinaculum plasty for skeletally immature patients with patellar dislocation and low-grade trochlear dysplasia. *Knee*. 27(1):9-17

Liebensteiner MC, Dirisamer F, Balcarek P, Schoettle P (2017) Guidelines for Treatment of Lateral Patella Dislocations in Skeletally Mature Patients. *Am J Orthop* 46(2): E86-E96

Megremis P, Megremis O (2022) Evaluation of recurrent dislocation of the patella in children with MRI: Goldthwait technique combined with lateral release, and VMO advancement – a retrospective study of 85 knees. *Musculoskelet Surg*. 106(4):397-406

Mundy A, Ravindra A, Yang J, Adler BH, Klingele KE (2016) Standardization of patellofemoral morphology in the pediatric knee. *Pediatr Radiol* 46(2): 255-62

Nelitz M, Lippacher S, Reichel H, Dornacher D (2014) Evaluation of trochlear dysplasia using MRI: correlation between the classification system of Dejour and objective parameters of trochlear dysplasia. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22(1): 120-7

Nelitz M, Theile M, Dornacher D, Wölfle J, Reichel H, Lippacher S (2012) Analysis of failed surgery for patellar instability in children with open growth plates. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20(5): 822-8

Nietosvaara Y, Aalto K, Kallio PE (1994) Acute patellar dislocation in children: incidence and associated osteochondral fractures. *J Pediatr Orthop* 14(4): 513-5

Nwachukwu BU, So C, Schairer WW, Green DW, Dodwell ER (2016) Surgical versus conservative management of acute patellar dislocation in children and adolescents: a systemic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 24(3):760-7

Oestern S, Varoga D, Lippross S, Kaschwich M, Finn J, Buddrus B, Seekamp A (2011) Patellaluxation. *Unfallchirurg*. 114(4):345-58

Oliva F, Ronga M, Longo UG, Testa V, Capasso G, Maffulli N (2009) The 3-in-1 procedure for recurrent dislocation of the patella in skeletally immature children and adolescents. *Am J Sports Med*. 37(9):1814-20

Parikh SN, Rajdev N (2023) Patients with bilateral patellar instability have multiple and symmetric risk factors in each knee. *nee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 31(12):5299-5305

Parikh SN, Rajdev N, Sun Q (2018) The Growth of Trochlear Dysplasia During Adolescence. *J Pediatr Orthop*. 38(6):e318-e324

Parikh SN, Schlechter JA, Veerkamp MW, Stacey JD, Gupta R, Pendleton AM, Shea KG, Friel NA, Molony Jr JT, Yaniv M, Rhodes J, Finlayson CJ, Williams BA, Ellington M (2024) Consensus-Based Guidelines for Management of First-Time Patellar Dislocation in Adolescents. *J Pediatr Orthop* 44(4): e369-e374

- Patel NB, Oak AR, Roges K, Crawford EA (2023) The Onset and Development of Patella Alta in Children With Patella Instability. *Pediatr Orthop.* 43(7):447-452
- Pennock AT, Chang A, Doan J, Bomar JD, Edmond EW (2020) 3D Knee Trochlear Morphology Assessment by Magnetic Resonance Imaging in Patients With Normal and Dysplastic Trochleae. *J Pediatr Orthop* 40(3): 114-119
- Petri M, Ettinger M, Stuebig T, Brand S, Krettek C, Jagodzinski M, Omar M (2015) Current Concepts for Patellar Dislocation. *Arch Trauma Res* 4(3): e29301
- Pruneski J, O'Mara L, Perrone GS, Kiapour AM (2022) Changes in Anatomic Risk Factors for Patellar Instability During Skeletal Growth and Maturation. *m J Sports Med.* 50(9):2424-2432
- Rajdev NR, Parikh SN (2019) Femoral trochlea does not remodel after patellar stabilization in children older than 10 years of age. *J Pediatr Orthop B* 28(2): 139-143
- Saccomanno MF, Maggini E, Vaisitti N, Pianelli A, Grava G, Cattaneo S, Milano G (2023) Sulcus Angle, Trochlear Depth, and Dejour's Classification Can Be Reliably Applied To Evaluate Trochlear Dysplasia: A Systemic Review of Radiological Measurements. *Arthroscopy* 39(2): 549-568
- Schützenberger S (2019) Patellofemoral instability in children and adolescents. *Unfallchirurg.* 122(1):22-32
- Seeley M, Bowman KF, Walsh C, Sabb BJ, Vanderhave KL (2012) Magnetic resonance imaging of acute patellar dislocation in children: patterns of injury and risk factors for recurrence. *J Pediatr Orthop.* 32(2):145-55
- Sinikumpu J, Nicolaou N (2023) Current concepts in the treatment of first-time patella dislocation in children and adolescents. *J Child Orthop* 17(1):28-33
- Steensen RN, Bentley JC, Trinh TQ, Backes JR, Wiltfong RE (2015) The prevalence and combined prevalences of anatomic factors associated with recurrent patellar dislocation: a magnetic resonance imaging study. *Am J Sports Med* 43(4):921-7.
- Stepanovich M, Bomar JD, Pennock AT (2016) Are the Current Classifications and Radiographic Measurements for Trochlear Dysplasia Appropriate in the Skeletally Immature Patient? *Orthop J Sports Med* 4(10):2325967116669490
- Trinh T, Mundy A, Beran M, Klingele K (2016) Radiographic Assessment of Anatomic Risk Factors Associated with Acute, Lateral Patellar Dislocation in the Immature Knee. *Sports (Basel).* 4(2):24
- Vacariu A, Studer K, Rutz E, Camathias C (2020) High failure rate 10.8 years after vastus medialis transfer and lateral release (Green's quadricepsplasty) for recurrent dislocation of the patella. *Arch Orthop Trauma Surg* 140(10):1349-1357
- Vellios EE, Trivellas M, Arshi A, Beck JJ (2020) *Curr Rev Musculoskelet Med* 13(1):58-68
- Wirth T (2011) Patellarluxation. *Unfallchirurg.* 114(5):388-95.

Yamada Y, Toritsuka Y, Nakamura N, Horibe S, Sugamoto K, Yoshikawa H, Sino K (2017) Correlation of 3D Shift and 3D Tilt of the Patella in Patients With Recurrent Dislocation of the Patella and Healthy Volunteers: An In Vivo Analysis Based on 3-Dimensional Computer Models. *Am J Sports Med* 45(13):3111-3118

Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde im Klinikum Stuttgart Olgahospital, Radiologisches Institut (Kinderradiologie) unter der Betreuung von PD Dr. Thekla von Kalle (Ärztliche Direktorin).

Die Konzeption der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Francisco Fernandez (Kommissarischer Ärztlicher Direktor der Kinderorthopädie) und Mathias Neuscheler (Facharzt Kinderorthopädie).

Sämtliche MRT-Auswertungen wurden nach Schulungen mit Probemessungen von mir und Herrn Neuscheler, sowie Herrn Peter Ainslie (Facharzt in der Kinderradiologie vom Olgahospital) und Frau El Sakka-Kuhn (Fachärztin in der Kinderradiologie im Olgahospital) durchgeführt. Die Auswertung meiner im Manuskript verfassten Untersuchungsergebnisse erfolgte durch mich im Diskussionsaustausch mit Frau PD DR. T. v. Kalle.

Die statistische Auswertung erfolgte nach Beratung durch das Institut für Biometrie durch mich, mit Hilfe von Excel und SPSS.

Für Formulierungen und Übersetzungen wurde vereinzelt ChatGPT genutzt. Ich versichere, dass ich den Output des KI-Tools sorgfältig geprüft und angepasst habe, bevor Teile in das Manuskript aufgenommen wurden.

Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 30.07.2025

Lena Ang'ani

Liste der Veröffentlichungen

Poster beim Kongress der ESPR (European Society for Pediatric Research) 2018 in Berlin:

Measuring pediatric knees: do we know what is normal?

Angani L1, Neuscheler M2, Fernandez FF2, Ainslie P1, El Sakka-Kuhn S1, Schäfer JF3, Kalle TV1

Aus den Daten der Dissertation sind aktuell zwei Veröffentlichungen geplant, die aber noch nicht fertig gestellt bzw. eingereicht sind.

Die geplanten Titel lauten:

- 1) Patellofemoral instability in children and adolescents: Is the MRI classification of the trochlear shape appropriate?
- 2) Patellar position and patellofemoral instability in youth: do we know enough for a treatment decision?

Beide Artikel werden komplett aus den Daten der Dissertation erstellt. Eine Kennzeichnung der Zitate wird erfolgen, sollte die Annahme der Artikel zur Veröffentlichung vorliegen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen danken, die mich bei der Anfertigung meiner Doktorarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank geht an Frau PD Dr. Thekla von Kalle für die ausgezeichnete Betreuung und enorme Unterstützung bei der Durchführung und Umsetzung der gesamten Arbeit.

Außerdem möchte ich mich bei Mathias Neuscheler und Prof. Dr. F. Fernandez bedanken für den regelmäßigen Austausch zum Thema.

Meinem Mann Carsten, meinen Eltern und Geschwistern sowie meinen Freunden danke ich für ihre Geduld und Zusprüche während der Arbeit an dieser Doktorarbeit.