

Aus der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik
Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie an der
Universität Tübingen

**Entwicklung eines universalen Patellahöhenindex für
Kniegelenke mit und ohne einliegende Implantate**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Grosse, Lucia Constanze
2024

Dekan: Prof. Dr. B. Pichler
1. Berichterstatter: Prof. Dr. C. Konrads
2. Berichterstatter: Prof. Dr. M. Küper

Tag der Disputation: 20.09.2024

postum Hildegard gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Einleitung	13
1.1 Anatomie des Kniegelenkes.....	13
1.2 Gonarthrose	15
1.3 Totale Knie Arthroplastik (TKA).....	16
1.3.1 Indikationen für eine TKA	16
1.3.2 Ablauf einer TKA	19
1.3.3 Postoperatives Outcome nach TKA	20
1.4 Bedeutung der Patellahöhe.....	21
1.4.1 Patella alta.....	21
1.4.2 Patella infera	22
1.4.2.1 Echte Patella infera (TPI)	23
1.4.2.2 Pseudo Patella infera (PPI)	23
1.4.3 Klinische Bedeutung eines Patella-Tiefstandes nach TKA	23
1.5 Patellahöhen-Indices.....	24
1.5.1 Caton-Deschamps-Index.....	25
1.5.2 Modifikation des Caton-Deschamps-Index bei TKA	26
1.5.3 Derived Caton-Deschamps-Index bei TKA	27
1.5.4 Blackburne-Peel-Index	28
1.5.5 Insall-Salvati-Index	28
1.5.6 Modifizierter Insall-Salvati-Index	29
1.5.7 Chareancholvanich & Narkbunnam-Index.....	30
1.5.8 Methode nach Han et al.	30

1.6	Fragestellung	31
2	Material und Methoden	34
2.1	Darstellung des Patientenkollektivs	34
2.2	Untersuchungsmaterial	34
2.3	Entwicklung des femoral-referenzierten Patellahöhenindex	34
2.4	Versuchsdurchführung	35
2.5	Statistische Auswertung	37
2.5.1	Bestimmung der Reliabilität der Indices im Rahmen dieser Studie....	37
2.5.2	Bestimmung der Validität und des Agreements der Indices im Rahmen dieser Studie	38
2.5.3	Vergleich von digitaler und analoger Vermessung	39
2.5.4	Einfluss einer TKA auf die Patellahöhe im Rahmen dieser Studie im Hinblick auf eine PPI und TPI	39
3	Ergebnisse	41
3.1	Beschreibung des Patientenkollektivs.....	41
3.2	Intra-Rater-Reliabilität	41
3.3	Inter-Rater-Reliabilität	42
3.4	Agreement und Validität der Indices	44
3.5	Methodenvergleich	49
3.6	Veränderung der Patellahöhe nach Prothesen-Einlage.....	51
4	Diskussion	57
4.1.	Bewertung der Reliabilität der Indices im Rahmen der Studie.....	57
4.2	Bewertung der Validität der Indices im Rahmen der Studie.....	58
4.3	Erstmalige Validierung des derived Caton-Deschamps-Index.....	60
4.4	Nachweis ob digitale und analoge Vermessungen der Indices im Rahmen dieser Studie vergleichbar sind	62

4.5	Bewertung des femoral-referenzierten Patellahöhenindex	63
4.6	Workflow zur Erhebung der Patella-Höhe	67
4.7	Veränderung der Patellahöhe nach Prothesen-Implantation	69
4.7.1	Pseudo Patella infera (PPI)	71
4.7.2	Echte Patella infera (TPI)	72
4.7.3	Outcome nach TKA	73
4.8	Limitierende Faktoren der Dissertation	74
5	Zusammenfassung	76
6	Literaturverzeichnis	78
7	Erklärung zum Eigenanteil	86
8	Veröffentlichungen	87
9	Danksagung.....	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Stadien der Arthrose nach Kellgren et al. 1957.....	16
Tabelle 2:	Übersicht über verschiedene Patellahöhenindices, modifiziert nach Igoumenou, et al. (2019)	24
Tabelle 3:	Übersicht über die geplanten Messungen.....	36
Tabelle 4:	Rater 1 Intra-Rater-Reliabilität.....	41
Tabelle 5:	Rater 2 Intra-Rater-Reliabilität.....	41
Tabelle 6:	Inter-Rater-Reliabilität Rater 1 und Rater 2.....	42
Tabelle 7:	Inter-Rater-Reliabilität Rater 1 und Rater 3.....	43
Tabelle 8:	Inter-Rater-Reliabilität Rater 2 und Rater 3.....	43
Tabelle 9:	ICC der verschiedenen Indices	45
Tabelle 10:	Spearman-Korrelationskoeffizienten der verschiedenen Indices	45
Tabelle 11:	Validität über Surrogatparameter- ICC.....	47
Tabelle 12:	Validität über Surrogatparameter - Spearman-Korrelationskoeffizient	48
Tabelle 13:	Methodenvergleich – ICC-Rater 1 analog/digital.....	49
Tabelle 14:	Methodenvergleich - digital: Intra-Rater-Reliabilität	51
Tabelle 15:	Mittelwerte der Patellahöhe nach Indices.....	53
Tabelle 16:	Median der Patellahöhe nach Indices	53
Tabelle 17:	paired t-Test: Änderung der Patellahöhe	53
Tabelle 18:	Patellahöhe Absolute Ergebnisse 1	54
Tabelle 19:	Patellahöhe Absolute Ergebnisse 2	54
Tabelle 20:	Cohen's d für CDI und ISI vor und nach TKA.....	54
Tabelle 21:	Kreuztabelle für verschiedene Konstellationen hinsichtlich der Veränderung der Patellahöhe	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rechtes Kniegelenk Bildquelle: MedicalGraphics.de-Lizenz: CC BY-ND 4.0 DE	13
Abbildung 2: TKA Columbus® BBraun – Melsungen AG.....	17
Abbildung 3: Caton-Deschamps-Index (CDI), eigene Darstellung	26
Abbildung 4: modifizierter Caton-Deschamps-Index (mCDI) vor und nach TKA, eigene Darstellung	27
Abbildung 5: derived Caton-Deschamps-Index (dCDI) nach TKA, eigene Darstellung	27
Abbildung 6: Blackburne-Peel-Index (BPI) vor und nach TKA, eigene Darstellung	28
Abbildung 7: Insall-Salvati-Index (ISI) vor und nach TKA, eigene Darstellung	29
Abbildung 8: modifizierter Insall-Salvati-Index (mISI) vor und nach TKA, eigene Darstellung	30
Abbildung 9: Chareanchlovanich & Narkbunnam-Index vor und nach TKA, eigene Darstellung	30
Abbildung 10: Methode nach Han et al. vor und nach TKA, eigene Darstellung	31
Abbildung 11: Femoral-referenzierter Index (FRI) vor und nach TKA, eigene Darstellung	35
Abbildung 12: Bland-Altman-Plot für CDI Intra-Rater-Reliabilität vor TKA für Rater 1	42
Abbildung 13: Bland-Altman-Plot für dCDI Intra-Rater-Reliabilität nach TKA für Rater 1	42
Abbildung 14: Bland-Altman-Plot für ISI Intra-Rater-Reliabilität vor TKA für Rater 1	42
Abbildung 15: Bland-Altman-Plot für ISI Intra-Rater-Reliabilität nach TKA für Rater 1	42

Abbildung 16: Streudiagramm für Inter-Rater-Reliabilität für CDI vor TKA	44
Abbildung 17: Streudiagramm für Inter-Rater Reliabilität für FRI vor TKA	44
Abbildung 18: Streudiagramm für Inter-Rater-Reliabilität für CDI nach TKA	44
Abbildung 19: Streudiagramm für Inter-Rater-Reliabilität FRI nach TKA	44
Abbildung 20: Bland-Altman-Plot für CDI/BPI vor TKA für Rater 1	46
Abbildung 21: Bland-Altman-Plot für dCDI/BPI nach TKA für Rater 1	46
Abbildung 22: Bland-Altman-Plot für CDI/ISI vor TKA für Rater 1	46
Abbildung 23: Bland-Altman-Plot für dCDI/ISI nach TKA für Rater 1	46
Abbildung 24: Bland-Altman-Plot für CDI/FRI vor TKA für Rater 1	46
Abbildung 25: Bland-Altman-Plot für dCDI/FRI nach TKA für Rater 1	46
Abbildung 26: Bland-Altman-Plot für ISI/BPI vor TKA für Rater 1	47
Abbildung 27: Bland-Altman-Plot für ISI/BPI nach TKA für Rater 1	47
Abbildung 28: Bland-Altman-Plot für ISI/FRI vor TKA für Rater 1	47
Abbildung 29: Bland-Altman-Plot für ISI/FRI nach TKA für Rater 1	47
Abbildung 30: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für (d)CDI/BPI.....	48
Abbildung 31: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für (d)CDI/ISI	48
Abbildung 32: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für (d)CDI/FRI.....	48
Abbildung 33: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für (d)ISI/BPI	48
Abbildung 34: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für ISI/FRI.....	49
Abbildung 35: Bland-Altman-Plot für CDI präoperativ analoge vs. digitale Messung	50

Abbildung 36: Bland-Altman-Plot für dCDI postoperativ analoge vs. digitale Messung	50
Abbildung 37: Bland-Altman-Plot für ISI präoperativ analoge vs. digitale Messung	50
Abbildung 38: Bland-Altman-Plot für ISI postoperativ analoge vs. digitale Messung	50
Abbildung 39: Bland-Altman-Plot für FRI präoperativ analoge vs. digitale Messung	50
Abbildung 40: Bland-Altman-Plot für FRI postoperativ analoge vs. digitale Messung	50
Abbildung 41: Normalverteilung CDI präoperativ	51
Abbildung 42: Normalverteilung CDI postoperativ	51
Abbildung 43: Normalverteilung ISI präoperativ	52
Abbildung 44: Normalverteilung ISI postoperativ	52
Abbildung 45: Normalverteilung FRI präoperativ	52
Abbildung 46: Normalverteilung FRI postoperativ	52
Abbildung 47: Normalverteilung BPI präoperativ	52
Abbildung 48: Normalverteilung BPI postoperativ	52
Abbildung 49: Übersicht über die Messergebnisse CDI/dCDI für Rater 1 vor und nach TKA.....	56
Abbildung 50: Übersicht für die Messergebnisse ISI für Rater 1 vor und nach TKA.....	56
Abbildung 51: Einfluss der Veränderung der Patellahöhe auf FRI (ohne Änderung des Winkels zum Femur), eigene Darstellung	65
Abbildung 52: Einfluss der Veränderung des Patellahöhe auf den FRI (Abhängigkeit vom Winkel zum Femur), eigene Darstellung	65

Abbildung 53: Einfluss der Patellahöhe auf den FRI (Einfluss der Beugung), eigene Darstellung	66
Abbildung 54: Einfluss der femoralen Verkippung auf den FRI, eigene Darstellung	67
Abbildung 55: Workflow zur Erhebung der Patellahöhe.....	67
Abbildung 56: Interpretationshilfe zur Erhebung der Patellahöhe prä- und postoperativ, modifiziert nach Konrads et al. 2021	68

Abkürzungsverzeichnis

AKP	Anterior knee pain (engl. für vorderer Knieschmerz)
BPI	Blackburne-Peel-Index
CDI	Caton-Deschamps-Index
dCDI	Derived Caton-Deschamps-Index
DGOU	Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie
ebd.	Ebenda
FRI	Femoral-referenzierter Index
ICC	Intraklassen-Korrelationskoeffizient
ISI	Insall-Salvati-Index
KSS	Knee Society Score
Lig.	Ligamentum (lat. für Band)
M.	Musculus (lat. für Muskel)
mCDI	Modified Caton-Deschamps-Index
mISI	Modified Insall-Salvati-Index
PA	Patella alta
PI	Patella infera = Patella baja
PN	Patella norm
PPI	Pseudo Patella infera = Pseudo Patella baja
ROM	Range of motion (engl. für Bewegungsumfang)
SF 12	Short-Form 12-Items
TKA	Total knee arthroplasty (engl. für totale Kniearthroplastik)
TPI	True Patella infera
UKA	Unicompartmental knee arthroplasty (engl. für unikondyläre Kniearthroplastik)
vs.	Versus
WOMAC	Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index

1 Einleitung

1.1 Anatomie des Kniegelenkes

Das Kniegelenk (siehe Abbildung 1) ist das größte Gelenk des Menschen (Prescher 2011) und kann formal in zwei Gelenke aufgeteilt werden, ein tibiofemorales (Articulatio femorotibialis) und ein patellofemorales Gelenk (Articulatio femoropatellaris) (Flandry et al. 2011). Erstgenanntes wird zusätzlich noch in ein mediales und ein laterales Kompartiment unterteilt.

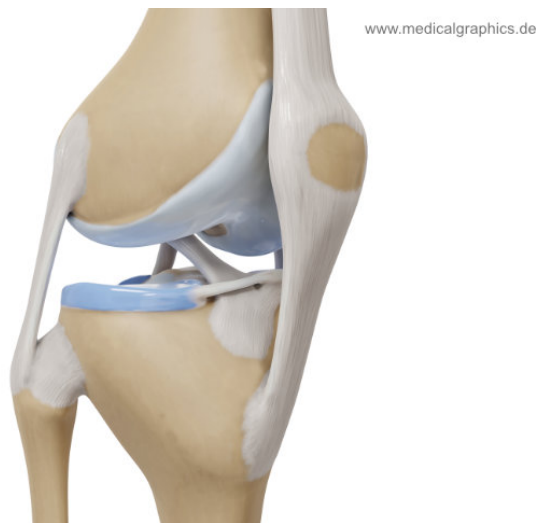


Abbildung 1: Rechtes Kniegelenk Bildquelle: MedicalGraphics.de-Lizenz: CC BY-ND 4.0 DE

Biomechanisch gesehen ist das Kniegelenk ein Drehscharniergelenk (Trochoginglymus), das neben der Extension/Flexion (Scharnierbewegung) eine leichte Rotationsbewegung des Unterschenkels (Innen- und Außenrotation) ermöglicht (Duale Reihe Anatomie, 2020).

Die Articulatio femoropatellaris ist durch die Patella, das größte Sesambein im menschlichen Körper, und die Femurkondylen gekennzeichnet (Flandry et al. 2011). Die Patella artikuliert mit der Trochlea femoris, der vorderen Gelenkfläche des distalen Oberschenkels, die durch die Verschmelzung der medialen und lateralen Femurkondylen gebildet wird. Die Patellasehne entspringt am unteren Pol der Patella und setzt an der Tuberositas tibiae an. Sie besteht aus mehreren Schichten, die miteinander verbunden sind und die Patella ist somit in die Sehne des M. quadriceps femoris (Duale Reihe Anatomie 2020) eingebaut.

Infrapatellar befindet sich ein Fettkörper, auch Hoffa-Fettkörper genannt, der neben Fettgewebe auch einen vaskulären Bogen enthält, der die vaskuläre Versorgung des vorderen Kreuzbandes übernimmt (Flandry et al. 2011).

Die Menisken erfüllen verschiedene biomechanische Funktionen wie das Ausgleichen der Gelenkflächen von Femur und Tibia, um eine Kontaktfläche zu bilden, für die Lenkung von Rotation und die Stabilisierung von Translation (ebd.). Anatomisch betrachtet ist der mediale Meniskus etwas breiter und dünner als der laterale Meniskus, der eine schalenförmige Form aufweist. Im Rahmen der Knieflexion kommt es zu einem dorsalen Ausweichen der Menisken, teils passiv durch Verdrängung sowie aktiv durch Muskelzug z.B. durch den M. semimembranosus (Duale Reihe Anatomie 2020).

Zudem weist das Kniegelenk von allen Gelenken mit die höchsten Dicken des Gelenkknorpels auf (2-3 mm bis zum Teil 7 mm), wodurch ebenfalls die Inkongruenz der Gelenkflächen etwas abgemildert werden kann (Duale Reihe Anatomie 2020).

Neben der muskulären Stabilisierung erfolgt die Stabilisierung des Kniegelenks auch über verschiedene Bänder. Es wird hierbei zwischen Binnenbändern, wozu die Kreuzbänder (Lig. cruciatum anterius und Lig. cruciatum posterius), das Lig. transversum genus und das Lig. meniscofemorale posterius zählen, und den Kollateralbändern (Lig. collaterale fibulare und Lig. collaterale tibiale), die anteriore lokalisierte Patellasehne und die Retinacula patellae sowie die posterioren Bänder (Lig. popliteum obliquum und Lig. popliteum arcuatum) zählen, unterschieden (Duale Reihe Anatomie 2020).

Die Funktion der Kreuzbänder liegt vor allem in der Stabilisierung des Kniegelenks, wobei das Lig. cruciatum anterius eine Translation der Tibia nach anterior und das Lig. cruciatum posterius eine Verlagerung der Tibia nach posterior vermeidet. Zudem schränken die Kreuzbänder die Innenrotation ein. Die Außenrotation wird mehr durch das Lig. collaterale fibulare und das Lig. collaterale tibiale eingeschränkt. Das Lig. collaterale fibulare schränkt zudem die Varisierung (Adduktion) ein, während das Lig. collaterale tibiale die Valgisierung (Abduktion) einschränkt. Das Lig. popliteum obliquum verhindert eine Überstreckung des Kniegelenks.

Die Gelenkhöhle des Kniegelenks ist kompliziert aufgebaut und besitzt Verbindungen zu verschiedenen Bursae, so findet sich beispielsweise unterhalb des M. quadriceps

femoris und dessen Sehne die Bursa suprapatellaris, die durch die Kommunikation mit der Gelenkhöhle des Kniegelenks den Recessus suprapatellaris bildet (Duale Reihe Anatomie 2020).

An der Bewegung des Kniegelenks sind verschiedene Muskelgruppen beteiligt. Die Flexion erfolgt durch den M. semitendinosus, M. semimembranosus und den M. biceps femoris. Die Extension erfolgt durch den M. quadriceps femoris. Die Außenrotation erfolgt vor allem durch den M. biceps femoris und zusätzlich durch den M. tensor fasciae latae, während hingegen die Innenrotation durch den M. semimembranosus, den M. semitendinosus, den M. popliteus und den M. sartorius erfolgt (ebd.).

1.2 Gonarthrose

Gonarthrose, auch bezeichnet als Kniegelenksarthrose, meint eine degenerative Erkrankung, die durch den Abbau des Gelenkknorpels und der Menisken im Kniegelenk gekennzeichnet ist. Die klinische Relevanz besteht vor allem darin, dass dieser Prozess zu Schmerzen, Steifheit, Schwellungen und eingeschränkter Beweglichkeit führen kann (McAlindon et al. 2014). Die Ursachen für eine Gonarthrose sind vielfältig und sie kann die Lebensqualität von Patienten stark beeinflussen (Cross et al. 2014). Prinzipiell kann an verschiedenen Stellen am Kniegelenk eine Arthrose auftreten, wie z.B. eine mediale oder laterale Gonarthrose sowie eine Retropatellaarthrose.

Die Prävalenz ist mit dem Alter steigend und tritt klassischerweise im Alter von über 50 Jahren auf (Johnson et al. 2014). So findet man eine symptomatische Kniegelenksarthrose bei 10% der Männer und 13% der Frauen im Alter > 60 Jahre (Zhang et al. 2010). Risikofaktoren für eine Gonarthrose sind u.a. Übergewicht, übermäßige Belastungen des Kniegelenks durch körperliche Aktivität oder bestimmte Berufe, traumatische Verletzungen des Kniegelenks, genetische Faktoren sowie angeborene oder erworbene Fehlstellungen der Beinachse (Felson et al. 1998). Prinzipiell kann zwischen primärer/idiopathischer Arthrose aufgrund unklarer Ätiologie – gegebenenfalls bedingt durch Veränderung im chondrozytären Stoffwechsel (Pullig et al. 2001) – und sekundären Ursachen, z.B. Adipositas oder früheren Knieverletzungen (Blagojevic et al. 2010) unterschieden werden. Die Diagnose der Gonarthrose erfolgt in der Regel durch eine Anamnese, eine klinische Untersuchung sowie bildgebende Verfahren wie beispielsweise Röntgenaufnahmen oder eine MRT (Conaghan et al. 2014). Klassische bildgebende Veränderungen bei Arthrose sind je

nach Stadium eine subchondrale Sklerosierung, ein schmalerer Gelenkspalt, Osteophyten, bis hin zu Geröllzysten und Gelenkdeformierung, im Endstadium mit Versteifung (Talic-Tanovic et al. 2017). Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Stadien der Arthrose des Kniegelenks nach Kellgren et al. 1957.

Tabelle 1: Stadien der Arthrose nach Kellgren et al. 1957

Studium	Radiologische Kennzeichen
0 = keine Arthrose	<ul style="list-style-type: none"> • keine Anzeichen auf Arthrose im Röntgenbild • Normalbefund
1 = beginnende Degeneration	<ul style="list-style-type: none"> • „osteophytic lipping“/minimale Osteophyten
2 = leichte Arthrose	<ul style="list-style-type: none"> • geringe bis mäßige Osteophytenbildung • mögliche leichte Gelenkspaltverschmälerung
3 = moderate Arthrose	<ul style="list-style-type: none"> • mäßige Osteophytenbildung • deutliche Gelenkspaltverschmälerung • mögliche Subchondralsklerose (Verdichtung des Knochens unterhalb der Knorpelschicht)
4 = schwere Arthrose	<ul style="list-style-type: none"> • große Osteophyten • ausgeprägte Gelenkspaltverschmälerung • schwere subchondrale Sklerose • Deformität des gelenkbildenden Knochenanteiles

Behandlungsziele hierbei sind vor allem eine Schmerzreduktion und eine Verbesserung der Gelenkfunktion sowie das Fortschreiten der Gonarthrose zu verlangsamen. Zu den konservativen Verfahren zählen z.B. Physiotherapie, Analgesie, Gewichtsabnahme, Verwendung von Orthesen, zudem können intraartikuläre Injektionen von Kortikosteroiden oder Hyaluronsäure erfolgen (Hochberg et al. 2012). In fortgeschrittenen Fällen kann zum Teil auch eine Knie totalendoprothese (engl. Total knee arthroplasty /TKA) notwendig sein (Bannuru et al 2019).

1.3 Totale Knie Arthroplastik (TKA)

1.3.1 Indikationen für eine TKA

Prinzipiell wird in der Knieendoprothetik zwischen einer unikondylären (UKA) und einer totalen Kniearthroplastik (TKA) unterschieden. Bei der unikondylären Kniearthroplastik handelt es sich um eine Teilprothese bzw. einen Teilersatz des Kniegelenks, z.B. entweder des medialen (inneren) oder des lateralen (äußeren) Kompartiments. Eine UKA findet so klassischerweise Anwendung bei Patienten mit isolierter Arthrose in

einem Kompartiment, während hingegen eine TKA die Entfernung und den Ersatz von geschädigtem Knochen/Knorpel aus beiden Kompartimenten beinhaltet. Zusätzlich gibt es noch die Möglichkeit eines Retropatella-Ersatzes, falls in diesem Kompartiment ebenfalls Arthrose vorliegt. Es gibt zudem bei der TKA achsgeführte, auch bezeichnet als gekoppelte Systeme, und ungekoppelte Systeme. Eine gekoppelte Prothese kommt zum Beispiel bei fehlender Weichteilstabilisierung oder insuffizienter Weichteilführung in Betracht (Jerosch et al. 1998). Abbildung 2 zeigt eine bikondyläre Prothese, bestehend aus einem tibialen und femoralen Anteil (Metalllegierung) sowie einer Polyethylen-Einlage.



Abbildung 2: TKA Columbus © B.Braun – Melsungen AG

Insgesamt kann die Implantation einer TKA zu einer Reduktion von Schmerzen und zu einer Verbesserung der körperlichen Funktion führen (Waimann et al. 2014) und zählt zu den häufigsten durchgeführten Operationen (Carr et al. 2012).

Seit 2018 gibt es eine S2K-Leitlinie der deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie e.V. (DGOU) zur Indikation der Knieendoprothese, die 2023 überarbeitet wurde und Empfehlungen zur Indikationsstellung einer Knieendoprothese (gültig sowohl für UKAs als auch TKAs) gibt. Hierbei gibt es Hauptkriterien, die als Mindestvoraussetzung für die Indikationsstellung angesehen werden und im Regelfall erfüllt sein sollten, sowie Nebenkriterien, die die Empfehlung für eine Knieprothese verstärken können und Risikofaktoren, die die Empfehlung abschwächen können (DGOU 2023).

Als Hauptkriterien sollen neben Knieschmerzen, dem Nachweis eines Strukturschadens (Arthrose, Osteonekrose) sowie dem Versagen konservativer

Therapiemaßnahmen eine auf die Kniegelenkerkrankung bezogene Einschränkung der Lebensqualität mit subjektivem Leidensdruck vorliegen (ebd.). Im Rahmen der Leitlinie erfolgt eine Spezifikation der Hauptkriterien. Für den Nachweis eines Strukturschadens ist zur Indikationsstellung daher eine Röntgenaufnahme unter Belastung mit einem Kellgren & Lawrence Grad 3 oder 4 (Kellgren et al. 1957) notwendig.

Bei Osteonekrose sollte zudem eine Deformierung und ein Defekt der Gelenkfläche dargestellt werden (Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie, 2023). Zudem sollte vor Indikationsstellung eine adäquate konservative Therapie über mindestens 3 Monate erfolglos durchgeführt worden sein und die Knieschmerzen sollten für mindestens 3 Monate vorhanden sein sowie die Lebensqualität über mindestens 3 Monate einschränken (ebd.). Zur Beurteilung des subjektiven Leidensdrucks von Patienten sollten validierte Instrumente patientenberichteter Outcomes angewandt werden (ebd.). Ein klinisches Bewertungsinstrument zur Beurteilung der Funktion des Kniegelenks ist der Knee Society Score (KSS), der sowohl die Funktionalität als auch den Zustand des Knies berücksichtigt (Insall et al. 1989). Die Beurteilung der Funktionalität erfolgt anhand verschiedener Kriterien wie beispielsweise Schmerzen, Stabilität, Bewegungsumfang und Gehfähigkeit, die Beurteilung des Zustands erfolgt anhand radiologischer Parameter. Erhoben werden die Daten hierbei anhand standardisierter Fragebögen und klinischer Untersuchungen. Ein weiteres Messinstrument ist der Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC), ein Fragebogen hinsichtlich Schmerzes, Steifheit und körperlicher Funktion bezüglich Knie- oder Hüftarthrose (Bellamy et al. 2005). Ein weiteres häufig angewandtes Messinstrument ist der Short-Form 12-Items (SF12) – Fragebogen, der die gesundheitsbezogene Lebensqualität des Befragten erfasst unter Berücksichtigung verschiedener Teilbereiche wie, körperliche Funktionsfähigkeit, Schmerzen, allgemeine Gesundheit, Vitalität, soziale Funktionsfähigkeit und psychisches Wohlbefinden im Hinblick auf die Bewertung der Lebensqualität (Bullinger 1995). Ein weiteres Messinstrument ist zudem der Oxford-Knie-Score, der Fragen zu Aktivitäten des täglichen Lebens wie Gehen, Treppensteigen und das Tragen von Lasten sowie Fragen zum Schmerzniveau und zur Zufriedenheit des Patienten mit dem Zustand seines Knies beinhaltet (Dawson et al. 1998). Ein weiteres Bewertungsinstrument zur Beurteilung der Funktion und Symptome bei Patienten mit Knieverletzungen oder Knieerkrankungen ist der Kujala-Score. Der Kujala-Score

entspricht einem Fragebogen, der verschiedene Aspekte der Kniegesundheit und -funktion enthält, wie zum Beispiel Schmerzen, Schwellungen, Bewegungsumfang und die Fähigkeit, bestimmte Aktivitäten wie Gehen, Laufen, Springen und Treppensteigen auszuführen (Dammerer et al. 2018).

1.3.2 Ablauf einer TKA

Im Folgenden wird das Standardvorgehen bei Implantation einer bikondylären Knieendoprothese an der BG Unfallklinik Tübingen dargestellt.

Die präoperative Phase umfasst die Planung mittels Röntgenaufnahmen des Kniegelenks in verschiedenen Positionen, sowie einer Gesamtaufnahme zur Beurteilung der Beinachsenvermessung. Dabei wird auch die Patellahöhe anhand seitlicher Röntgenbilder beurteilt. Die Operation wird von einem erfahrenen Chirurgen durchgeführt und kennzeichnet sich durch die Implantation einer zementierten bikondylären Oberflächenersatzprothese unter Einsatz eines Navigationssystems.

Die Operation erfolgt unter sterilen Bedingungen nach Desinfektion und Abdeckung des operativen Gebiets. Der Patient erhält prophylaktisch Antibiotika und Tranexamsäure zur Blutungsreduktion. Ein Hautschnitt wird gesetzt, gefolgt von der Eröffnung der Gelenkkapsel mittels einer Arthrotomie. Nach Mobilisierung der Kapsel und partieller Entfernung des Hoffa'schen Fettkörpers werden gegebenenfalls Verwachsungen gelöst. Anschließend werden die Patella denerviert und Knochenwucherungen abgetragen. Nach Ausrichtung des Kniegelenks werden Menisken und das vordere Kreuzband reseziert.

Nach Anlage der Navigationssonden erfolgt eine kinematische Analyse zur Unterstützung bei der Wahl der Prothesengrößen und Resektionsschnitte. Das Tibiaplateau wird vorbereitet, und die Größe der Tibiakomponente wird bestimmt. Die Bandspannung wird überprüft, und die Größe der Femurkomponente sowie des Inlays werden festgelegt. Entsprechend den Messungen wird das distale Femur reseziert, und gegebenenfalls werden Osteophyten femoral entfernt. Nach Platzierung der Probekomponenten und Überprüfung der Stabilität werden die Verankerungslöcher femoral gebohrt und das Tibiaplateau vorbereitet.

Eine Oberschenkelblutsperre wird angelegt und die spongiösen Flächen werden gereinigt und mit Knochenzement für die Tibiakomponente bestrichen. Das Polyethylen-Inlay wird eingelegt, gefolgt von der Vorbereitung und Platzierung der

Femurkomponente. Nach Aushärtung des Zements erfolgt eine erneute kinematische Analyse. Die Stabilität wird überprüft, die Wunde wird gespült, und die Blutsperre wird entfernt. Eine Drainage wird eingelegt, und die Wunde wird verschlossen. Die Haut wird mit Hautklammern verschlossen, und ein steriler Verband wird angelegt.

Die postoperative Nachbehandlung umfasst Verbandswechsel und Mobilisation unter physiotherapeutischer Anleitung. Eine schrittweise Belastung und Entlassung erfolgt abhängig vom Heilungsverlauf und dem Allgemeinzustand des Patienten. Die Nachuntersuchungen und Röntgenkontrollen werden entsprechend dem Behandlungsplan durchgeführt.

1.3.3 Postoperatives Outcome nach TKA

Das postoperative Ergebnis nach TKA hängt von verschiedenen Faktoren ab, insgesamt zeigen aber die meisten Patienten nach einer TKA-Implantation eine signifikante Reduktion von Schmerzen und eine verbesserte Beweglichkeit des Kniegelenks, so dass es zu einer Zunahme der Lebensqualität kommt (Waimann et al 2014). In einem systematischen Review beschreiben Harmelink et al. (2017) eine geringe Evidenz für präoperative Faktoren, wie stärkere Schmerzen, Vorhandensein von sozialer Unterstützung, Abwesenheit von Angst und stärkere radiographische Schäden als prognostisch günstige Faktoren für niedrigere Schmerzniveaus nach TKA. Nach Harmelink et al. gibt es ebenfalls eine geringe Evidenz, dass eine geringere präoperative körperliche Funktion, weniger Vorerkrankungen, höheres Einkommen oder das Vorhandensein von sozialer Unterstützung ein günstiger prognostischer Faktor für die körperliche Funktion sind.

Eine TKA kann jedoch auch mit Komplikationen einhergehen, die z.T. eine Revisions-Operation notwendig machen (Postler et al. 2018), wie beispielsweise Infektionen, periprothetische Frakturen, Schmerz, mechanische Defekte, Instabilität, Polyethylen-Schwäche oder Bewegungseinschränkung. Als häufigster Grund für eine Revision gelten Infektionen, mechanische Komplikationen und Luxationen (Nham et al. 2023).

In einem narrativen Review unterscheiden Petersen et al. (2014) zwischen natürlichen, neurophysiologischen, funktionalen und mechanischen Gründen für anterioren Knieschmerz (engl. Anterior knee pain/AKP) nach TKA. So können unbefriedigte präoperative Erwartungen bezüglich der Schmerzlinderung in den ersten postoperativen Monaten einen Faktor für Ängste und Unsicherheit darstellen, was

wiederum die folgende Schmerzverarbeitung negativ beeinflussen kann (Brander et al. 2003). Als Ursprung für die Schmerzempfindung ist die Insertion des Streckapparates anzusehen (Dajani et al. 2010). Zudem können eine lokale peripatellare Synovitis oder entzündliche Veränderungen im Hoffa-Fettkörper oder ein begleitendes ossäres Ödem einen vorderen Knieschmerz (AKP) bedingen (Petersen et al. 2014). Als funktionale Ursachen führen Petersen et al. beispielsweise eine bereits präoperativ bestehende Schwäche der Quadriceps-Muskulatur (Lin et al. 2010) oder begleitende Erkrankungen des Patienten, wie. z.B. eine zusätzlich bestehende Coxarthrose an. Zu den mechanischen Ursachen zählen neben einer patellofemorale Instabilität (Malo et al. 2003), einem Offset-Fehler (Kawahara et al. 2012) und Rotationsfehlstellungen der Prothesenkomponenten (Kessler et al. 2008) auch ein Tiefstand der Patella (Vandeputte et al. 2017), wobei zwischen einer echten Patella infera (TPI) und Pseudo Patella infera (PPI) unterschieden wird (Chonko et al. 2004).

1.4 Bedeutung der Patellahöhe

1.4.1 Patella alta

Patella alta meint den Hochstand der Patella in Relation zu den Femurkondylen (Biedert et al. 2017) und ist ein bekannter anatomischer Risikofaktor für Patella-Instabilität (Kakazu et al. 2022).

Die Patella alta tritt beispielsweise nach Dislokation der Patella, Erkrankungen des Streckapparates am Knie, Chondromalazie, Morbus Osgood-Schlatter, Patellasehnen-Tendinopathie und Gonarthrose auf (Biedert et al. 2017). Sie kann aber auch eine Normvariante bei gesunden Personen darstellen, die ohne eine Beeinträchtigung einhergeht (ebd.). Symptome einer Patella alta sind neben rezidivierenden Luxationen der Patella (Kannus 1992) auch Retropatellarschmerzen und Gelenksergüsse (Ali et al. 2009). Ein therapeutischer Ansatz bei durch Patellahochstand bedingte rezidivierende Patellaluxationen ist eine distalisierende Tuberositas-Tibiae-Osteotomie (Magnussen et al. 2014).

Biedert et al. (2017) zeigten in einem systematischen Review, dass das Vorliegen einer Patella alta von der jeweilig angewendeten Messmethode abhängt und dass diesbezüglich keine Standardmessmethode existiert. Zudem werden auch bei Anwendung des selbigen Index durch unterschiedliche Anwender verschiedene Cut-Offs für die Höhenbestimmung der Patella verwendet z.B. Caton Deschamps Index Cut-Off 1.2 bzw. 1.3 oder Insall-Salvati-Index Cut-off-Wert 1.2, 1.3 oder 1.5.

1.4.2 Patella infera

Ein Patellatiefstand kann angeboren sein oder erworben (Romero et al. 1999). Die Gründe für eine erworbene Patella infera sind vielfältig (Flören et al. 2007). Neben dem Auftreten nach einer TKA-Implantation (Cameron et al. 1988) führen z.B. Verletzungen der Patella oder der Patellasehne (Hockings et al. 2004) oder eine hohe Tibiakorrekturosteotomie (Kesmezacar et al. 2005) zur einer Patella infera.

Aufgrund der Tatsache, dass die Patella bei einem Patella-Tiefstand immer im Kontakt mit der Trochlea des Femurs ist, kann es zu Einklemmungszuständen kommen, die zu Schmerzen an der Vorderseite des Knies bis hin zu Bewegungseinschränkung und Steifheit im Kniegelenk führen können (Lum et al. 2020). Da eine Patella infera zudem auch mit einer Verkürzung des Hebelarms für den M. quadriceps femoris einhergeht, kann es zu einem verzögerten Strecken kommen, was wiederum zu einer Einschränkung des Bewegungsumfangs führen kann (ebd.). Prinzipiell tragen verschiedene Gegebenheiten zu einer Patella infera bei: Verkürzung der Patellasehne, distale Positionierung der Patella relativ zur femoralen Trochlea und Verengung des Abstands zwischen der Patella und der oberen Tibia (Grelsamer 2002). Nach einer TKA müssen nicht zwingend alle Gegebenheiten vorliegen (ebd.), daher ist eine Unterscheidung zwischen Patella infera und Pseudo Patella infera notwendig (siehe unten).

Prinzipiell gibt es verschiedene operative Behandlungsmöglichkeiten zur Therapie einer Patella infera. Eine Wiederherstellung der Gelenklinie kann beispielsweise durch die Verwendung von distalen femoralen Augmenten, einer Tibiakopffosteotomie mit proximaler Verschiebung, einer operativen Verlängerung der Patellasehne oder Reduktion des tibialen Polyethylens und Platzierung eines patellaren Implantates in einer weiter kranialen Position erreicht werden (Chonko et al. 2004).

Han et al. (2019) zeigten ebenfalls in einer retrospektiven Analyse, dass die Wiederherstellung der femoralen Gelenklinie der signifikante Faktor war, um den postoperativen ROM („range of motion“, maximale Bewegungsfähigkeit, gemessen in Grad) des Knies nach erneuter TKA zu erhöhen, insbesondere indem die Wiederherstellung der distalen femoralen Gelenklinie erfolgt.

1.4.2.1 *Echte Patella infera (TPI)*

Eine Verkürzung der Patellasehne, beispielsweise durch Vernarbung, führt dazu, dass die Patella distal zur Trochlea positioniert wird und der Abstand zwischen Patella und Tibia vermindert ist, entsprechend dem klassischen Verständnis von einer Patella infera (Grelsamer 2002).

1.4.2.2 *Pseudo Patella infera (PPI)*

Eine Verminderung des Abstandes zwischen der Patella und der Tibia kann jedoch bei einer TKA auch ohne Verkürzung der Patellasehne entstehen, indem die femoro-tibiale Gelenklinie angehoben wird, z.B. wenn die tibiale Prothesenkomponente bzw. das Inlay dicker ist als der resezierte Abschnitt der proximalen Tibia (Grelsamer 2002).

Vandeputte et al. (2017) verglichen im Rahmen einer retrospektiven Analyse das Ergebnis einer Revisions-TKA bei Patienten mit einer fehlgeschlagenen primären TKA mit einer Pseudo Patella infera. Es erfolgte der Vergleich einer Interventionsgruppe mit Proximalisation des Tibiatuberkels, die mit einer Kontrollgruppe verglichen wurde und das postoperative Ergebnis wurde mit dem KSS bewertet (ebd.). In der Osteotomiegruppe war die Zunahme des KSS signifikant höher als in der Kontrollgruppe (ebd.), so dass eine Verlagerung des Tibiatuberkels bei der Revisions-TKA bei Patienten mit Pseudo Patella infera zu guten Ergebnissen ohne größere Komplikationen führen kann (ebd.).

1.4.3 Klinische Bedeutung eines Patella-Tiefstandes nach TKA

Aguirre-Pastor et al. (2020) publizierten eine prospektive klinische Studie zum Auftreten und der klinischen Konsequenz von Pseudo Patella infera nach einer TKA. Es erfolgte die Nachbeobachtung von insgesamt 354 Patienten mit einer durchschnittlichen Nachbeobachtungszeit von 3.6 Jahren (ebd.). Nach der Operation hatten 80,7% der Patienten eine normale Patellahöhe, 4,8% hatten eine echte Patella infera und 14,4% hatten eine Pseudo Patella infera (ebd.). Die klinische Bewertung erfolgte anhand der Knee Society Scores (KSS), des Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC), des Short-Form 12-Items (SF12) und des Bewegungsumfangs (ebd.). PPI war ein häufiges Phänomen, aber es wurden keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich klinischer Ergebnisse im Vergleich zu Patienten mit postoperativer normaler Patellahöhe gefunden (ebd.). TPI war selten, aber diese Patienten hatten signifikant schlechtere klinische Ergebnisse als diejenigen mit PPI

oder normaler Patellahöhe im Rahmen der Beurteilung mit dem KSS, dem WOMAC und dem SF12. (ebd.).

Bugelli et al. (2018) zeigten in einer retrospektiven Analyse eine Häufigkeit von 26,4% für das Vorliegen einer PPI nach einer TKA. Allerdings war eine PPI im Vergleich zu Patienten ohne postoperativer PPI nicht mit einer erhöhten Inzidenz von vorderen Knieschmerzen assoziiert, auch die aktive und passive Beweglichkeit war nicht eingeschränkt, es kam zu keiner signifikanten Differenz der Ergebnisse im KSS, WOMAC-Score oder ROM.

Zu einem anderen Ergebnis kamen Dos-Santos et al. (2021) in einer retrospektiven Analyse. Dabei wurde die Patellahöhe prä- und postoperativ anhand des ISI und des BPI bestimmt. Zusätzlich zu dem Oxford-Knee-Scores und dem Kujala-Score wurden Untersuchungen zum Bewegungsumfang durchgeführt, und Knieschmerzen wurden mittels einer numerischen Analogskala sowie anhand des Analgetika-Verbrauches bewertet. Die PPI-Gruppe zeigte einen signifikant niedrigeren medianen Kujala-Score ($P = 0,011$) sowie eine höhere Häufigkeit von Beugekontrakturen und vorderem Knieschmerz ($P = 0,039$). Dies deutet auf eine signifikante Verschlechterung des Outcomes bei PPI hin (ebd.).

1.5 Patellahöhen-Indices

Zwischenzeitlich wurden über 20 Indices publiziert, die die Patellahöhe anhand eines Röntgenbildes bestimmen können. Prinzipiell gibt es Patellahöhen-Indices, die femoralreferenziert sind und Indices, die die Patellaposition auf die Tibia beziehen. Igoumenou et. al. (2019) definierten dies als direkte und indirekte Patellahöhenindices.

Tabelle 2: Übersicht über verschiedene Patellahöhenindices, modifiziert nach Igoumenou et al. (2019)

Femoral-referenzierte/direkte Patellahöhenbestimmung	(Femoro-)Tibial-referenzierte/indirekte Patellahöhenbestimmung
<ul style="list-style-type: none"> • Blumensaat-Index • Hepp-Index • Norman-Index • Seyahi-Index • Labelle-Index • Miller-Index • Chareanchlovanich-Narkbunnam-Index • Nizic-Index • Bernageau-Index 	<ul style="list-style-type: none"> • Insall-Salvati-Index • Modified Insall-Salvati-Index • Blackburne-Peel-Index • Caton-Deschamps-Index • De-Carvalho-Index • Egund-Index • Koshino and Sugimoto-Index • Miura-Kawaramura Index • Micheli-Index

Femoral-referenzierte/direkte Patellahöhenbestimmung	(Femoro-)Tibial-referenzierte/indirekte Patellahöhenbestimmung
<ul style="list-style-type: none"> Burgess-Index 	<ul style="list-style-type: none"> Leung-Index Portner and Pakzad-Index Methode nach Han Derived Caton-Deschamps-Index

an

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über verschiedene Patellahöhenindices, die eine Bestimmung der Patellahöhe anhand Röntgenbilder ermöglichen, orientiert an einer Übersichtsarbeit von Igoumenou et al. (2019) mit Ergänzung weiterer Indices. Im Folgenden werden verschiedene Patellahöhen-Indices genauer erläutert, die zum Teil Anwendung im Rahmen der Dissertationsschrift fanden und im Rahmen von klinischen Studien zur Patellahöhenbestimmung regelmäßig herangezogen werden. Zwischenzeitlich wurden jedoch auch MRT-basierte Methoden zur Bestimmung der Patellahöhe publiziert, wie z.B. die Methoden nach Biedert et al. (2006) und Munch et al. (2016).

1.5.1 Caton-Deschamps-Index

Der Caton-Deschamps-Index (Caton et al. 1982) ist ein Patellahöhenindex, der an Röntgenbildern in Seitenaufnahme in einer Flexionsstellung von 20-80° bestimmt wird und wurde erstmals 1982 von Caton et al. publiziert. Der Index ist der Quotient aus der Distanz vom distalen Ende der patellofemorale Gelenkfläche zum oberen anterioren Punkt der Tibia (A), geteilt durch die Länge der Patellagelenkfläche (B) (ebd.). Als Referenzwerte gelten für eine Patella norma $>0,6$ und $<1,2$, eine Patella alta liegt bei $\geq 1,2$ vor, bei $\leq 0,6$ liegt eine Patella infera vor (Dejour 1996). In neueren Studien wird zum Teil auch ein Referenzbereich von $>0,8$ und $<1,2$ für eine Patella norma angegeben, eine Patella alta liegt bei $\geq 1,2$ vor, bei $\leq 0,8$ eine Patella infera.

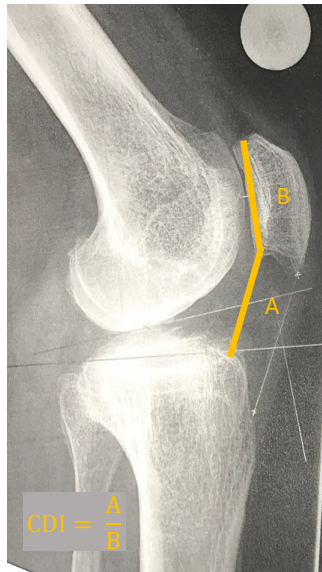


Abbildung 3: Caton-Deschamps-Index (CDI), eigene Darstellung

1.5.2 Modifikation des Caton-Deschamps-Index bei TKA

Aufgrund der operativen Vorgehensweise und der teilweisen Resektion der Tibia entfällt der ursprüngliche Referenzpunkt des Caton-Deschamps-Index bei der totalen Knieendoprothetik (TKA) (Caton et al. 2016). Deshalb haben Caton et al. im Jahr 2016 eine Modifikation des ursprünglichen Caton-Deschamps-Index veröffentlicht, um die Patellahöhe vor und nach der TKA zu bestimmen. Anstelle der Distanz vom distalen Ende der patellofemorales Gelenkfläche zum oberen anterioren Punkt der Tibia wird ein neuer Punkt verwendet, der sich an der Schnittstelle der Hilfslinie mit der anterioren Tibia bildet (ebd.). Diese Hilfslinie ist eine Orthogonale den Fibulakopf tangierend zur Verlängerung entlang der posterioren Tibiarinde. Die Referenzpunkte bleiben auch nach der TKA erhalten (ebd.). Der Index wird analog zum Caton-Deschamps-Index aus dem Quotienten der Distanz vom distalen Punkt der Gelenkfläche zum Schnittpunkt (A) und der Patellagelenkfläche (B) gebildet (ebd.).

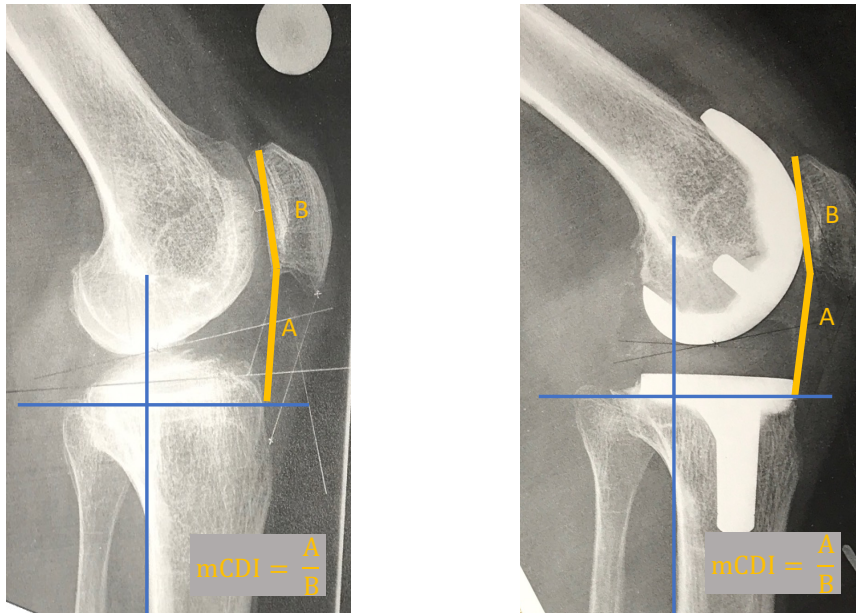


Abbildung 4: modifizierter Caton-Deschamps-Index (mCDI) vor und nach TKA, eigene Darstellung

1.5.3 Derived Caton-Deschamps-Index bei TKA

Im Rahmen einer Studie zur Evaluation der Patellahöhe vor und nach TKA entwickelten Xu et al. (2017) eine Modifikation des Caton-Deschamps-Index, die im weiteren Verlauf als derived Caton-Deschamps-Index (dCDI) bezeichnet wird. Da nach einer TKA-Implantation der obere anteriore Punkt der Tibia, eine Landmarke des CDI, reseziert worden ist, muss dieser Punkt mit einer Hilfslinie, einer Orthogonalen zum neuen Tibia-Plateau, die zudem eine Tangente zu den Femurkondylen darstellt, neu gebildet werden (siehe Abbildung 5).

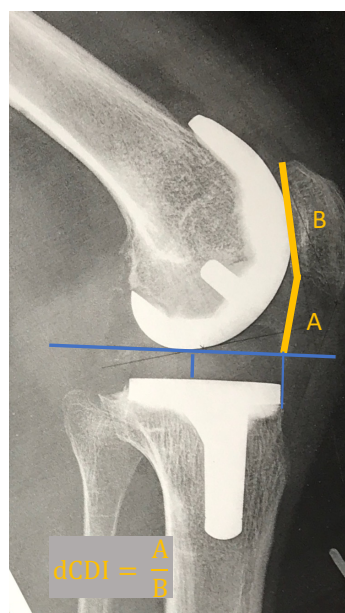


Abbildung 5: derived Caton-Deschamps-Index (dCDI) nach TKA, eigene Darstellung

1.5.4 Blackburne-Peel-Index

Der Blackburne-Peel-Index ist ein Patellahöhenindex (Blackburne et al. 1997), der mithilfe eines seitlichen Röntgenbilds in gebeugter Position bestimmt werden kann. Dieser Index wird durch das Verhältnis gebildet zwischen der Distanz vom unteren Pol der Patellagelenkfläche zu einem Punkt, der definiert ist als die Senkrechte vom unteren Pol der Patellagelenkfläche zum Tibiaplateau (A) und der Länge der Patellagelenkfläche (B) (ebd.). Eine Patella norma liegt bei einem Index von 0.8-1.0 vor, während hingegen eine Patella alta bei einem Index von >1 vorliegt und eine Patella infera bei einem Index von <0.8 (ebd.).

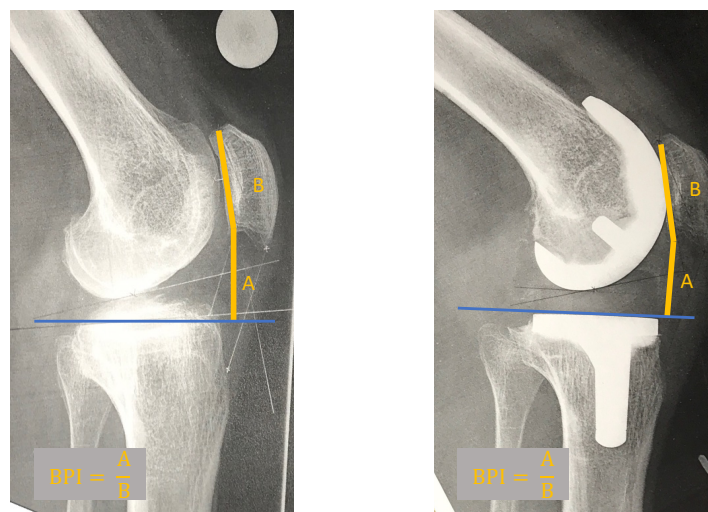


Abbildung 6: Blackburne-Peel-Index (BPI) vor und nach TKA, eigene Darstellung

1.5.5 Insall-Salvati-Index

Die Bestimmung des Insall-Salvati-Index (Insall et al. 1971) erfolgt anhand eines seitlichen Röntgenbilds in einer Flexionsstellung von 20-70°. Der Index wird berechnet, indem man die Länge der Patellasehne (A) (gemessen vom distalen Pol der Patella bis zum Ansatz an der Tuberositas tibiae) durch die Diagonale der Patella (B) (entsprechend ihrem Durchmesser vom distalen Pol der Patella aus) teilt (ebd.). Eine normale Patella liegt vor, wenn der Quotient zwischen > 0,8 und < 1,2 liegt. Werte ≤0,8 deuten auf eine Patella infera hin, während Werte ≥1,2 auf eine Patella alta hinweisen (ebd.). Verhulst et al. (2020) zeigten, dass der Insall-Salvati-Index in Bezug auf die

intra- und Inter-Observer-Reliabilität im Vergleich zu anderen Patellahöhenindices die zuverlässigste Methode zur Messung der Patellahöhe ist.

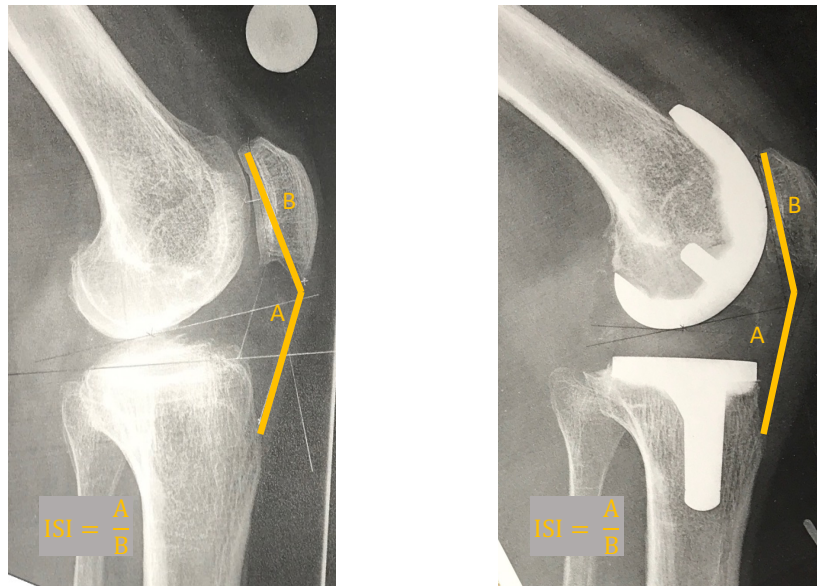


Abbildung 7: Insall-Salvati-Index (ISI) vor und nach TKA, eigene Darstellung

1.5.6 Modifizierter Insall-Salvati-Index

Der modifizierte Insall-Salvati-Index wurde erstmals 1992 von Grelsamer et al. publiziert. Dies geschah aufgrund der mangelnden Sensitivität des ursprünglich veröffentlichten Insall-Salvati-Index bei auffälliger Patellamorphologie (Grelsamer et al. 1992), z.B. osteophytäre Anbauten, wodurch ungewöhnliche Patellaformen zu irreführenden Ergebnissen des Index führen können. Dieser modifizierte Index wird gebildet durch den Quotienten aus der Distanz vom unteren Rand der patellaren Gelenkfläche – im Gegensatz zum unteren Pol der Patella selbst, wie es beim ursprünglichen Insall-Salvati-Index der Fall ist – bis zur Insertion der Patellasehne (A, Zähler) und der Länge der patellaren Gelenkfläche (B, Nenner). Der Nenner entspricht somit dem Nenner des Caton-Deschamps-Index und des Blackburne-Peel-Index.

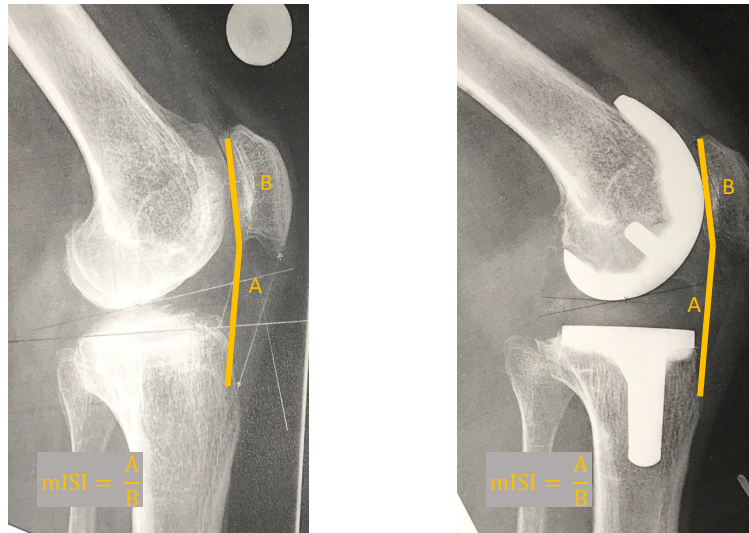


Abbildung 8: modifizierter Insall-Salvati-Index (mISI) vor und nach TKA, eigene Darstellung

1.5.7 Chareancholvanich & Narkbunnam-Index

2012 publizierten Chareancholvanich und Narkbunnam eine Methode zur Bestimmung der Patellahöhe, die nahezu unabhängig von der Knieflexion ist und sich u.a. durch einen distalen femoralen Bezugspunkt kennzeichnet (Chareancholvanich et al. 2012). Der Index wird gebildet durch den Quotienten A/B von der Entfernung vom Mittelpunkt der patellaren Gelenkfläche zum Tibiakopf (A) und der Distanz vom hinteren Winkel des interkondylären Daches zum Tibiakopf (B).

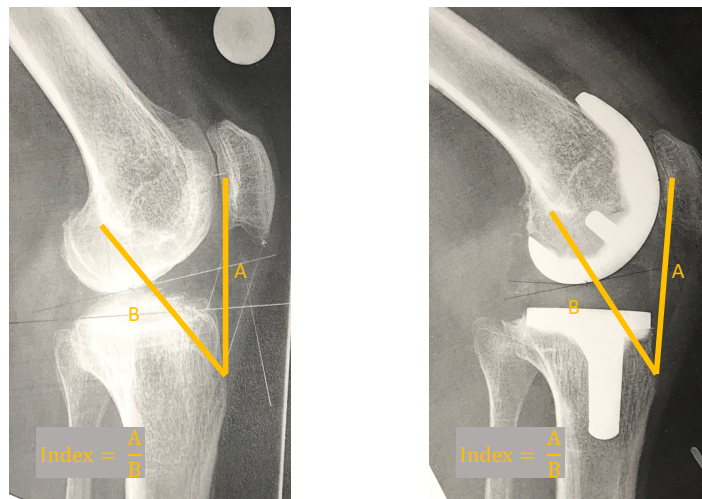


Abbildung 9: Chareancholvanich & Narkbunnam-Index vor und nach TKA, eigene Darstellung

1.5.8 Methode nach Han et al.

Han et al. publizierten 2020 eine weitere Methode zur Bestimmung der Patellahöhe im Hinblick auf eine Patellahöhenbestimmung vor und nach einer TKA. Eine zentrale

Rolle spielt hier die Bestimmung der Achse des Tibiaschafts, die hilft, die verschiedenen Referenzdistanzen des Index zu bilden. Ein Bestandteil ist der AP-Index, der Quotient aus der Distanz vom unteren Pol der patellaren Gelenkfläche zum Schnittpunkt T1 zwischen der Achse des Tibiaschafts und dessen Orthogonale, die die Spitze der Fibula tangiert. Ein weiterer Teilindex ist der Gelenkachsen-Patellaindex (JAP-Index), der sich u.a. aus dem Quotienten von der Distanz vom unteren Pol der patellaren Gelenkfläche zu einem Schnittpunkt (T2) zwischen der Tibiaschaftachse und der Gelenklinie und der patellaren Gelenkflächenlänge bildet. Der dritte Teilindex, die Gelenkhöhenlinie, entspricht dem Abstand zwischen dem Schnittpunkt aus dem ersten Index (T1) und dem Schnittpunkt (T2) aus dem zweiten Index.

Bei einer echten Patella baja nach einer TKA-Operation tritt eine Verminderung sowohl des AP- als auch des JAP-Index ein (Han et al. 2020). Beim Vorliegen einer Pseudo Patella infera bleibt der AP-Index normal, aber der JAP-Index wird entsprechend abnehmen(ebd.). Die Strecke JLH wird zunehmen und kann im Vergleich zum präoperativen JLH-Wert genau die Veränderung der Gelenklinienhöhe widerspiegeln (ebd.).

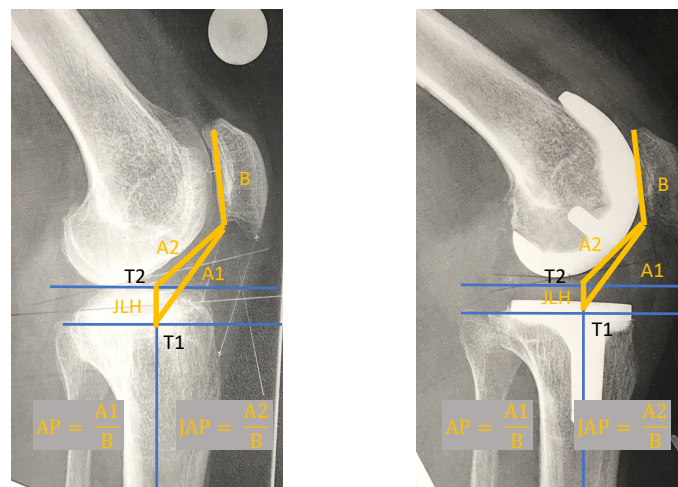


Abbildung 10: Methode nach Han et al. vor und nach TKA, eigene Darstellung

1.6 Fragestellung

Die Tatsache, dass es verschiedene Patellahöhenindices gibt und es keinen allgemeinen Standard für die Evaluation der Patellahöhe prä- und postoperativ nach einer TKA gibt, zeigt sich an der aktuellen Studienlage. Verschiedene Indices werden zur Evaluation der TPI und PPI herangezogen. Insbesondere die Indices, die zur Bestimmung der PPI dienen, werden komplex gebildet und sind auf viele Hilfslinien angewiesen. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass aufgrund der Veränderung

der Anatomie nach Implantation einer Knieendoprothese (TKA) z.B. tibiale Referenzpunkte entfallen. Es erscheint daher sinnvoll, einen rein femoral-referenzierten Index zu entwickeln und diesen zu validieren. In Bezug auf die Frage, ob ein femoral-referenzierter Index eine sogenannte Pseudo Patella infera ausreichend erkennen kann, gibt es unterschiedliche Ansichten. Grelsamer (2002) postulierte, dass eine Pseudopatella infera keine Höhenveränderung im Vergleich zum Femur aufweist. Andererseits zeigten Rogers et al. 2006, dass bei Einsetzen eines zu dicken Inlays die Patella nach distal gezogen werden kann und sich dadurch weiter distal der Femurkondylen befinden könnte. Um dies genauer zu untersuchen, erscheint die Entwicklung und die konsekutive Validierung eines femoral-referenzierten Index anhand bereits existierender Indices sinnvoll, die zwischen einer echten Patella infera (TPI) und einer Pseudopatella infera (PPI) unterscheiden.

Eine häufige Methode zur Bestimmung der Patellahöhe vor Protheseneinlage ist der CDI (Prudhon et al. 2018), jedoch ist dieser Index ohne Modifikation nicht für die postoperative Patellahöhen-Bestimmung geeignet, weswegen verschiedene Modifikationen veröffentlicht wurden. Die Modifikation von Caton et al. (2016) diesbezüglich ist jedoch nicht in der Lage, eine PPI zu detektieren, da der Index eine Veränderung der femoro-tibialen Gelenklinie nicht ausreichend berücksichtigen kann und z.B. die Dicke eines Inlays nicht ausreichend berücksichtigt wird.

Xu et al. (2017) präsentierten eine sinnvolle Modifikation des CDIs (dCDI), die weiterhin die Gelenklinie berücksichtigt, jedoch bisher nicht validiert ist.

Daraus lassen sich folgende Ziele und Fragestellungen für diese Dissertationsschrift ableiten:

- 1) Entwicklung eines universalen femoral-referenzierten Patellahöhenindex:
Es soll ein Index oder eine Messmethodik herausgearbeitet werden, die die Patellahöhe vor und nach einer TKA zuverlässig bestimmen lässt.
- 2) Validierung des neu entwickelten Patellahöhenindex sowie des bislang nicht validierten dCDIs nach Xu et al:
 - a. Prüfung der Reliabilität der Indices und Vergleich dieser mit bereits validierten Indices.
 - b. Prüfung der Validität und des Agreements im Vergleich zu bereits etablierten Indices

- 3) Sind digitale und analoge Vermessungen der angewandten Indices vergleichbar und somit als gleichwertige Methoden für die klinische Anwendung anzusehen?
- 4) Kommt es im Rahmen einer TKA-Implantation zu einer Veränderung der Patellahöhe im Hinblick auf eine PPI und TPI?
- 5) Entwicklung eines Workflows zur Bestimmung der Patellahöhe unter Berücksichtigung einer TPI und PPI.

2 Material und Methoden

2.1 Darstellung des Patientenkollektivs

Vor Beginn der Studie wurde ein Ethik-Antrag (Projekt-Nummer: 849/2017BO2) an die Ethik-Kommission der medizinischen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität am Universitätsklinikum Tübingen gestellt und nach Genehmigung erfolgte die Studienplanung und Studiendurchführung der retrospektiven Studie.

Zunächst wurde eine Tabelle erstellt, um die Patienten zu erfassen, die 2015 eine primäre bikondyläre TKA an der BG Klinik Tübingen erhalten haben. Dabei wurde das Jahr explizit so gewählt, damit gegebenenfalls im Rahmen von weiteren Untersuchungen eine Nachuntersuchung der Patienten erfolgen könnte. Aus dieser Tabelle wurden zufällig 154 Patienten ausgewählt, die für die weitere Vermessung herangezogen wurden und von denen prä- und postoperative Röntgenbilder vorlagen. Hierbei wurde die Knie totalendoprothesen-Implantation von erfahrenen Chirurgen gemäß dem internen Standardbetriebsverfahren durchgeführt, welches in der Einleitung beschrieben ist.

2.2 Untersuchungsmaterial

Sowohl analoge als auch digitale Messungen der Röntgenbilder wurden durchgeführt. Für die analogen Messungen wurden die Röntgenbilder für die Rater pseudonymisiert ausgedruckt, während die digitalen Messungen im Bildprogramm Centricity® GE Medical Systems, 2006 durchgeführt wurden. Neben den präoperativen Röntgenbildern (es wurde das Bild mit dem kürzesten Abstand zur Operation gewählt) erfolgten die Vermessungen an den vorliegenden Röntgenbildern in einer postoperativen Kontrolle zwei bis drei Monate nach Operation.

2.3 Entwicklung des femoral-referenzierten Patellahöhenindex

Prof. Dr. Christian Konrads entwickelte gemeinsam mit mir einen femoral-referenzierten Index (FRI). Der FRI bildet sich aus dem Quotienten von zwei Strecken A und B. Strecke A entspricht hierbei der Strecke von dem Schnittpunkt (T) einer Orthogonalen durch die verlängerte Patellagelenkfläche mit den Femurkondylen und dem Mittelpunkt (M) der Patellagelenkfläche, während hingegen Strecke B der Länge der Patellagelenkfläche entspricht.

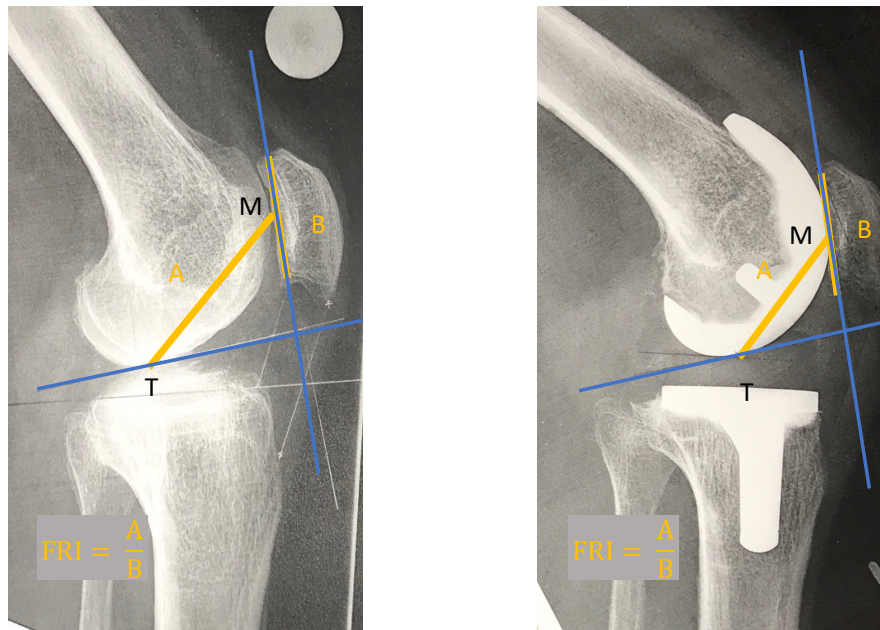


Abbildung 11: Femoral-referenzierter Index (FRI) vor und nach TKA, eigene Darstellung

2.4 Versuchsdurchführung

Die Röntgenbilder wurden von drei unabhängigen Untersuchern vermessen, wobei ein Untersucher eher unerfahren war (die Promovierende = Rater 1), während zwei Untersucher als erfahren galten (ein Facharzt der Orthopädie und Unfallchirurgie = Rater 2 und ein Facharzt der Radiologie = Rater 3).

Aufgrund einer ressourcensparenden Arbeitsweise erfolgten die Vermessungen nach folgendem Schema (siehe Tabelle 3): die Bestimmung des femoral-referenzierten Index erfolgte durch alle drei Rater prä- und postoperativ, ebenso die Bestimmung des Caton-Deschamps-Index prä- und des derived Caton-Deschamps-Index postoperativ sowie des Insall-Salvati-Index prä- und postoperativ. Zusätzlich wurde im Hinblick auf die Intra-Rater-Reliabilität die Bestimmung der beschriebenen Indices zweimalig im Abstand von sechs Wochen durch zwei Rater durchgeführt. Sämtliche Messungen wurden in einer zufälligen Reihenfolge durchgeführt, um eine möglicherweise bestehende Voreingenommenheit durch vorherige Messungen zu reduzieren. Rater 1 bestimmte zudem noch den BPI vor und nach Protheseneinlage im Abstand von sechs Wochen. Da digitale Messungen zwischenzeitlich dem Standard entsprechen erfolgte durch einen Untersucher die Bestimmung der Indices an 20 zufällig ausgewählten Kniegelenken digital.

Folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der durchgeführten Messungen unter Berücksichtigung der daraus zu gewinnenden Informationen:

Tabelle 3: Übersicht über die geplanten Messungen

Gemessener Index	Untersucher	Grund
präoperativ CDI und postoperativ dCDI	R1(n=154), R2 (n=154), R3 (n=50)	Validierung, Inter-Rater-Reliabilität, Intra-Rater-Reliabilität
präoperativ ISI und postoperativ ISI	R1(n=154), R2 (n=154), R3 (n=50)	Inter-Rater- Reliabilität Intra-Rater- Reliabilität
präoperativ FRI und postoperativ FRI	R1(n=154), R2 (n=154), R3 (n=50)	Validierung, Inter-Rater-Reliabilität Intra-Rater-Reliabilität
präoperativ CDI und postoperativ dCDI (erneute Messung nach 6 Wochen)	R1(n=154), R2 (n=154)	Validierung, Intra-Rater-Reliabilität, Inter-Rater-Reliabilität
präoperativ ISI und postoperativ ISI (erneute Messung nach 6 Wochen)	R1(n=154), R2 (n=154)	Intra-Rater- Reliabilität, Inter-Rater-Reliabilität
präoperativ FRI und postoperativ FRI (erneute Messung nach 6 Wochen) (154 Kniegelenke)	R1(n=154), R2 (n=154)	Validierung, Intra-Rater-Reliabilität, Inter-Rater-Reliabilität
präoperativ BPI und postoperativ BPI	R1 (n=154)	Intra-Rater- Reliabilität
präoperativ BPI und postoperativ BPI (erneute Messung nach 6 Wochen) (154 Kniegelenke)	R1 (n=154)	Intra-Rater- Reliabilität
präoperativ CDI und postoperativ dCDI	R1 (n=20)	Vergleich Messmethode digital-analog
präoperativ ISI und postoperativ ISI	R1 (n=20)	Vergleich Messmethode digital-analog
präoperativ FRI und postoperativ FRI (an 20 Gelenken digital)	R1 (n=20)	Vergleich Messmethode digital-analog
präoperativ CDI und postoperativ dCDI (erneute Messung nach 6 Wochen)	R1(n=20)	Vergleich Messmethode digital-analog

Gemessener Index	Untersucher	Grund
präoperativ ISI und postoperativ ISI (erneute Messung nach 6 Wochen)	R1 (n=20)	Vergleich Messmethode digital-analog
präoperativ FRI und postoperativ FRI (erneute Messung nach 6 Wochen)	R1 (n=20)	Vergleich Messmethode digital-analog

Die erhobenen Patientendaten und Messdaten wurden in pseudonymisierter Form erhoben und in ein Tabellenkalkulationsprogramm (Microsoft Excel, 2021) eingetragen, um sie für die weitere statistische Auswertung bereitzuhalten.

Insbesondere zur Erfassung eines möglichen Einflusses der TKA auf die Patellahöhe im Hinblick auf eine PPI und TPI erfolgte im Vorausgang eine Poweranalyse mit nquery (by Dotmatics). Unter Berücksichtigung der vermuteten Effektgröße und Standardabweichung konnte bei einer Studiengröße von 154 eine Power von 80% angestrebt werden, d.h. dass die Studie zu 80% in der Lage ist, einen Unterschied zu erkennen der tatsächlich vorhanden ist, bei Verwendung eines gepaarten t-Tests mit einem beidseitigen Signifikanzniveau von 0.05.

2.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte unter Anwendung von Microsoft Excel (2021) und IBM ® SPSS ® Statistics Version 24 sowie python (Version 3.12.2). Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Fragestellungen erfolgten verschiedene statistische Tests, die unter Berücksichtigung der verschiedenen Aspekte im Folgenden beschrieben sind.

2.5.1 Bestimmung der Reliabilität der Indices im Rahmen dieser Studie

Um die Zuverlässigkeit von Messungen und die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen zu bewerten, ist es entscheidend, sowohl die Intra- als auch die Inter-Observer-Vereinbarung zu berücksichtigen. Die Intra-Observer- oder auch Intra-Rater-Vereinbarung bezieht sich darauf, wie konsistent die Messungen eines einzelnen Beobachters über mehrere Messzeitpunkte hinweg sind. Diese Konsistenz ist von großer Bedeutung für einen Patellahöhenindex. Eine reliabler Patellahöhenindex zeichnet sich dadurch aus, dass ein Rater unabhängig von äußeren Einflüssen oder Veränderungen im Verlauf der Zeit zuverlässige Messergebnisse liefern kann.

Ebenso wichtig ist die Inter-Rater-Vereinbarung, die die Übereinstimmung der Messungen verschiedener Beobachter bei der gleichen Messung betrifft. Eine starke Inter-Observer-Vereinbarung deutet darauf hin, dass die Messungen unabhängig vom Beobachter konsistent sind und dass verschiedene Beobachter zu ähnlichen Ergebnissen gelangen.

Der Intraclass-Korrelationskoeffizient (ICC) wurde dafür verwendet, um zu prüfen, wie konsistent die Messungen zwischen zwei Ratern sind. Ein hoher ICC-Wert, der nahe bei 1 liegt, zeigt eine starke Übereinstimmung und hohe Zuverlässigkeit der Messungen an. Dies bedeutet, dass die Messungen unabhängig davon, wer sie durchführt, konsistent und zuverlässig sind. Für Patellahöhenindices müssen beide Vereinbarungen gelten, damit die Vergleichbarkeit und die Reproduzierbarkeit gegeben sind. Der ICC ist ein häufig angewendetes Maß für die Bestimmung der Reliabilität bei Patellahöhenindices (z.B. Caton et al. 2016, Verhulst et al. 2020, Cabral et al. 2017). Im Hinblick auf die Validierung erfolgte zudem die Darstellung von Bland-Altman-Plots für die Intra-Rater-Reliabilität, wobei eine Bland-Altman-Analyse die Unterschiede zwischen den Messungen im Vergleich zum Mittelwert der Messungen beider Methoden aufzeigt (Gerke 2020). Zur besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Rater wurden zudem dreidimensionale Streudiagramme zur Bewertung der Inter-Rater-Reliabilität erzeugt.

2.5.2 Bestimmung der Validität und des Agreements der Indices im Rahmen dieser Studie

Das Agreement ist die Übereinstimmung oder die Konsistenz zwischen den Ergebnissen von zwei Messmethoden (Kwiecien et al. 2011). Um dieses und die Validität zu prüfen, z.B. für die Analyse, ob der FRI ein geeigneter Index für die Patellahöhenbestimmung ist, erfolgte die Berechnung des ICC sowie des Spearman-Korrelationskoeffizienten (Akoglu 2018).

Der ICC (Koo et al. 2016) wurde in diesem Kontext dafür verwendet, um festzustellen, wie konsistent die verschiedenen Messmethoden sind. Ein hoher ICC deutet darauf hin, dass die Messmethoden sehr ähnliche Ergebnisse liefern, während ein niedriger ICC darauf hindeutet, dass die Methoden weniger konsistent sind (ebenda). Der Spearman-Korrelationskoeffizient (ρ (rho)) ist eine statistische Kennzahl, die die Stärke und Richtung der Beziehung zwischen zwei gerankten Variablen bewertet (Akoglu 2018). Im Gegensatz zum Pearson-Korrelationskoeffizienten, der die lineare

Beziehung zwischen zwei kontinuierlichen Variablen misst, ist der Spearman-Korrelationskoeffizient für sowohl kontinuierliche als auch ordinale Variablen geeignet (ebd.).

Die Berechnung des Spearman-Korrelationskoeffizienten beinhaltet das separate Ranken jeder Variable und anschließend die Berechnung des Pearson-Korrelationskoeffizienten aus den gerankten Daten (ebd.). Er reicht von -1 bis 1, wobei gilt:

$\rho = 1$ zeigt eine perfekte positive monotone Beziehung an (wenn eine Variable steigt, steigt auch die andere).

$\rho = -1$ zeigt eine perfekte negative monotone Beziehung an (wenn eine Variable steigt, sinkt die andere).

$\rho = 0$ zeigt keine monotone Beziehung zwischen den Variablen an.

Zudem erfolgte auch hier die Generierung von Bland-Altman-Plots zum Vergleich der verschiedenen Indices.

Die Validität wurde zudem über einen Surrogatparameter bestimmt, nämlich die Korrelation der Veränderung der Patellahöhe für den jeweiligen Index. Auch hierfür wurden ICC und Spearman-Korrelationskoeffizienten verwendet.

2.5.3 Vergleich von digitaler und analoger Vermessung

Es wurde ein Vergleich zwischen der digitalen und analogen Messung in unserem Setting durchgeführt. Neben der Bestimmung des ICC wurde auch eine Bland-Altman-Analyse durchgeführt, um mögliche systematische Unterschiede zwischen den Messmethoden visuell zu identifizieren. Die Bland-Altman-Analyse zeigt die Unterschiede zwischen den Messungen im Vergleich zum Mittelwert der Messungen beider Methoden auf (Gerke 2020).

2.5.4 Einfluss einer TKA auf die Patellahöhe im Rahmen dieser Studie im Hinblick auf eine PPI und TPI

Um herauszufinden, ob es zu einer Veränderung der Patellahöhe vor und nach einer Prothesenimplantation kommt, wurde der paired t-Test verwendet. Dieser Test vergleicht die Mittelwerte zweier verbundener Gruppen und bestimmt, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten gibt. Im Kontext der Fragestellung handelt es sich um verbundene Stichproben, da die Messungen bei

denselben Patienten vor und nach dem Eingriff durchgeführt wurden. Eine Voraussetzung für den paired t-Test sind normalverteilte Daten. Eine einfache Methode, um dies zu prüfen ist die graphische Darstellung der Verteilung der Daten anhand eines Histogramms. Wenn die Daten normalverteilt sind, zeigt das Histogramm eine Glockenkurve mit symmetrischer Verteilung, bei der die Daten um den Mittelwert zentriert sind. Zudem erfolgte die Bestimmung von Cohen's d, als häufig verwendete Effektgröße für den Unterschied zwischen zwei Mittelwerten. Ein großer Wert von Cohen's d deutet auf einen großen Unterschied zwischen den Gruppen hin (Kwiecien et al. 2011). Es erfolgte zudem eine Darstellung der absoluten Indexwerte im Hinblick auf eine Patella alta, eine Patella norma und eine Patella infera.

3 Ergebnisse

3.1 Beschreibung des Patientenkollektivs

Insgesamt wurden n=154 Kniegelenke (entsprechend der Fallzahlplanung) mit primärer Knieendoprothese analysiert. Unter den Patienten waren 82 (= 53.3%) weiblich und 72 (46.7%) männlich. Von den Kniegelenksoperationen wurden 76 (=49.4%) am rechten Knie und 78 (50.6%) am linken Knie durchgeführt. Das durchschnittliche Alter (Median) der Patienten betrug 71 Jahre, wobei die Spanne von 52 bis 88 Jahre reichte.

3.2 Intra-Rater-Reliabilität

Für die Bestimmung der Intra-Rater-Reliabilität wurde gemäß der beschriebenen Methodik jeweils der Intraclass-Korrelationskoeffizient (ICC) verwendet. Die folgenden Tabellen zeigen die erhobenen ICC-Werte für sämtliche durchgeführten Messungen nach den verschiedenen Ratern.

Rater 1

Tabelle 4: Rater 1 Intra-Rater-Reliabilität

Messzeitpunkt	ICC
präoperativ: CDI	0.94
postoperativ: dCI	0.92
präoperativ: ISI	0.96
postoperativ: ISI	0.95
präoperativ: FRI	0.79
postoperativ: FRI	0.86
präoperativ: BPI	0.93
postoperativ: BPI	0.92

Rater 2

Tabelle 5: Rater 2 Intra-Rater-Reliabilität

Messzeitpunkt	ICC
präoperativ: CDI	0.98
postoperativ: dCDI	0.97
präoperativ: ISI	0.97
postoperativ: ISI	0.99
präoperativ: FRI	0.95
postoperativ: FRI	0.93

Abbildungen 12-15 zeigen jeweils einen Bland-Altman-Plot für die Intra-Rater-Reliabilität vor und nach TKA für den CDI/dCDI und den ISI. Für alle 4 Fälle liegt die durchschnittliche Differenz zwischen 0.01 und das 95%-Konfidenzintervall gibt an, wie genau die geschätzte durchschnittliche Differenz ist (0.14-0.16).

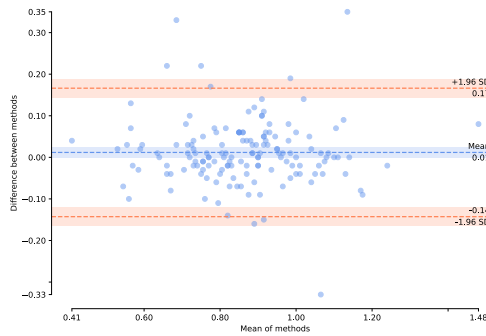


Abbildung 12: Bland-Altman-Plot für CDI Intra-Rater-Reliabilität vor TKA für Rater 1

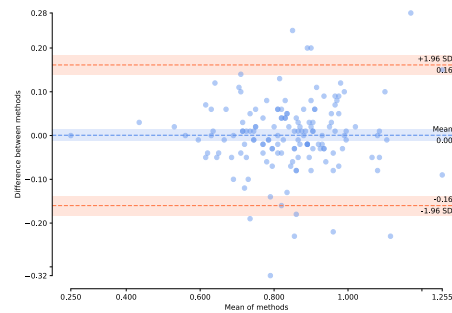


Abbildung 13: Bland-Altman-Plot für dCDI Intra-Rater-Reliabilität nach TKA für Rater 1

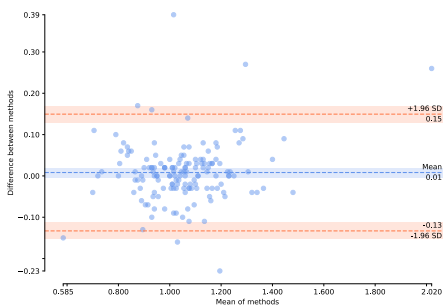


Abbildung 14: Bland-Altman-Plot für ISI Intra-Rater-Reliabilität vor TKA für Rater 1

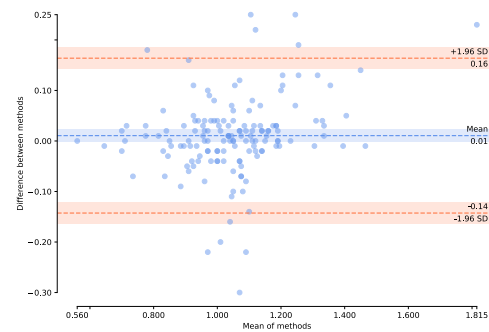


Abbildung 15: Bland-Altman-Plot für ISI Intra-Rater-Reliabilität nach TKA für Rater 1

3.3 Inter-Rater-Reliabilität

Für die Bestimmung der Inter-Rater-Reliabilität wurde ebenfalls gemäß der oben beschriebenen Methodik jeweils der Intraclass-Korrelationskoeffizient (ICC) verwendet. Die folgenden Tabellen zeigen die erhobenen ICC-Werte für sämtliche durchgeführten Messungen im Vergleich der verschiedenen Rater.

Rater 1 und Rater 2

Tabelle 6: Inter-Rater-Reliabilität Rater 1 und Rater 2

Messzeitpunkt	ICC
präoperativ: CDI	0.95
postoperativ: dCDI	0.91

Messzeitpunkt	ICC
präoperativ: ISI	0.95
postoperativ: ISI	0.93
präoperativ: FRI	0.90
postoperativ: FRI	0.89

Anmerkung: Rater 1 und 2 haben zu zwei verschiedenen Zeitpunkten gemessen, es wurden zum Vergleich die beim ersten Messpunkt erhobenen Werte zur Berechnung des ICCs verwendet, da dies einem realistischen klinischen Setting entspricht.

Rater 1 und Rater 3

Tabelle 7: Inter-Rater-Reliabilität Rater 1 und Rater 3

Messzeitpunkt	ICC
präoperativ: CDI	0.86
postoperativ: dCDI	0.82
präoperativ: ISI	0.89
postoperativ: ISI	0.92
präoperativ: FRI	0.85
postoperativ: FRI	0.82

Anmerkung: Rater 1 hat zu zwei verschiedenen Zeitpunkten gemessen, es wurden zum Vergleich die beim ersten Messpunkt erhobenen Werte zur Berechnung des ICCs verwendet, da dies einem realistischen klinischen Setting entspricht.

Rater 2 und Rater 3

Tabelle 8: Inter-Rater-Reliabilität Rater 2 und Rater 3

Messzeitpunkt	ICC
präoperativ: CDI	0.89
postoperativ: dCDI	0.83
präoperativ: ISI	0.89
postoperativ: ISI	0.90
präoperativ: FRI	0.83
postoperativ: FRI	0.82

Anmerkung: Rater 2 hat zu zwei verschiedenen Zeitpunkten gemessen, es wurden zum Vergleich die beim ersten Messpunkt erhobenen Werte zur Berechnung des ICCs verwendet, da dies einem realistischen klinischen Setting entspricht.

Es erfolgte zudem die Erstellung dreidimensionaler Streudiagramme zur Bewertung der Inter-Rater-Reliabilität im Hinblick auf die Validierung der dCDIs und des FRIs.

Abbildungen 16 bis 19 zeigen sowohl prä- als auch postoperativ in einer dreidimensionalen Darstellung die im Rahmen der Validierung erhobenen Werte für die 3 Rater an n=50 Kniegelenken, die sich um die optimale Gerade entsprechend einer absoluten Übereinstimmung streuen

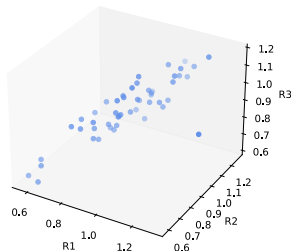


Abbildung 16: Streudiagramm für Inter-Rater-Reliabilität für CDI vor TKA

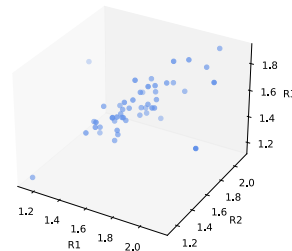


Abbildung 17: Streudiagramm für Inter-Rater-Reliabilität für FRI vor TKA

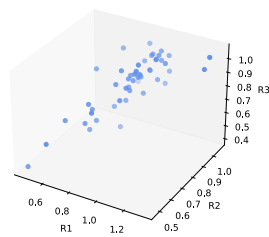


Abbildung 18: Streudiagramm für Inter-Rater-Reliabilität für CDI nach TKA

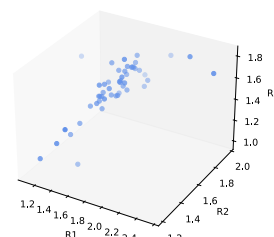


Abbildung 19: Streudiagramm für Inter-Rater-Reliabilität FRI nach TKA

3.4 Agreement und Validität der Indices

Um die Gültigkeit des FRI zu überprüfen und sicherzustellen, dass er tatsächlich das misst, was er messen soll, wurde eine Untersuchung der Validität durch den ICC durchgeführt. Diese Überprüfung erfolgte im Rahmen eines realistischen Szenarios speziell für Rater 1, insbesondere auch, da dieser Rater alle Indices inklusive des BPI bestimmt hat. Diese Herangehensweise ermöglichte es, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der vom Rater 1 ermittelten Indices zu bewerten und sicherzustellen, dass sie den beabsichtigten Messgegenstand korrekt widerspiegeln.

Tabelle 9: ICC der verschiedenen Indices

Verglichene Indices	ICC
CDI-BPI präoperativ	0.89
dCDI-BPI postoperativ	0.91
CDI – ISI präoperativ	0.56
dCDI-ISI I postoperativ	0.33
BPI- ISI präoperativ	0.42
BPI – ISI postoperativ	0.27
CDI-FRI präoperativ	0.08
dCDI-FRI postoperativ	0.07
ISI-FRI präoperativ	0.02
ISI-FRI postoperativ	0.03

Die Bestimmung des Agreements erfolgte zudem über den Spearman-Korrelationskoeffizienten, die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Tabelle 10: Spearman-Korrelationskoeffizienten der verschiedenen Indices

Verglichene Indices	Spearman-Korrelationskoeffizienten
CDI-BPI präoperativ	0.86
dCDI-BPI postoperativ	0.88
CDI – ISI präoperativ	0.56
dCDI-ISI I postoperativ	0.36
BPI- ISI präoperativ	0.46
BPI – ISI postoperativ	0.32
CDI-FRI präoperativ	0.14
dCDI-FRI postoperativ	0.62
ISI-FRI präoperativ	- 0.14
ISI-FRI postoperativ	- 0.02

Im Rahmen der Validitätsprüfung der Indices erfolgte zudem die graphische Darstellung der Ergebnisse über einen Bland-Altman-Plot für Rater 1. Die Abbildungen 20 bis 29 zeigen Bland-Altman-Plots der verschiedenen Indices im Hinblick auf ihre systematischen Unterschiede. Vor der totalen Knieendoprothetik wiesen CDI/BPI einen durchschnittlichen Unterschied von 0.06 auf, während er nach TKA 0.03 betrug. CDI/ISI zeigten vor TKA einen durchschnittlichen Unterschied von 0.19 und nach TKA von 0.21. Bei CDI/FRI betrug der durchschnittliche Unterschied vor TKA -0.74 und nach TKA -0.76. Das Konfidenzintervall für CDI/FRI bzw. ISI/FRI war deutlich breiter als für CDI/BPI oder CDI/ISI.

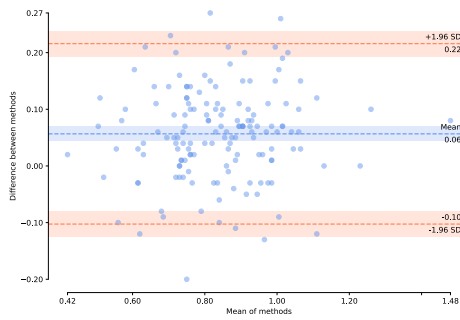


Abbildung 20: Bland-Altman-Plot für CDI/BPI vor TKA für Rater 1

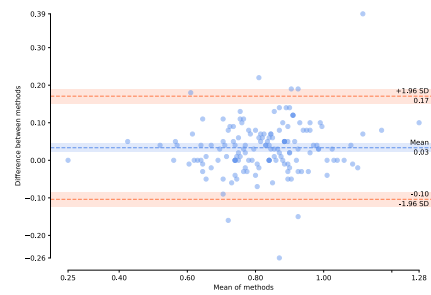


Abbildung 21: Bland-Altman-Plot für dCDI/BPI nach TKA für Rater 1

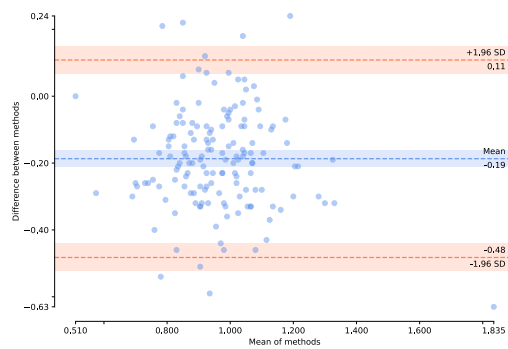


Abbildung 22: Bland-Altman-Plot für CDI/ISI vor TKA für Rater 1

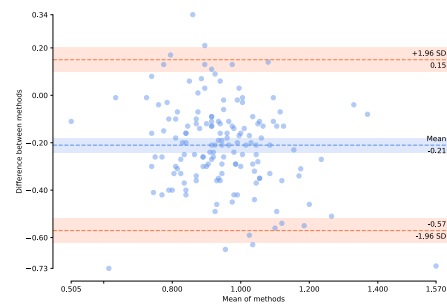


Abbildung 23: Bland-Altman-Plot für dCDI/ISI nach TKA für Rater 1

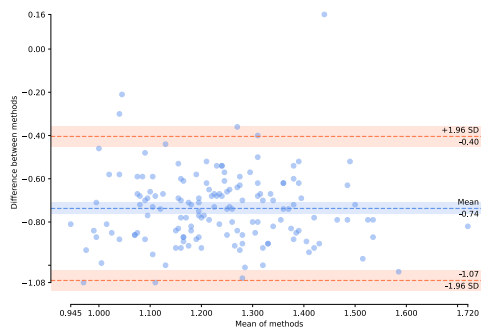


Abbildung 24: Bland-Altman-Plot für CDI/FRI vor TKA für Rater 1

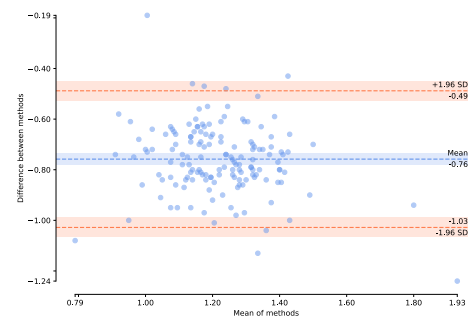


Abbildung 25: Bland-Altman-Plot für dCDI/FRI nach TKA für Rater 1

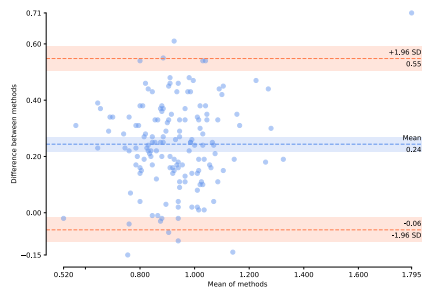


Abbildung 26: Bland-Altman-Plot für ISI/BPI vor TKA für Rater 1

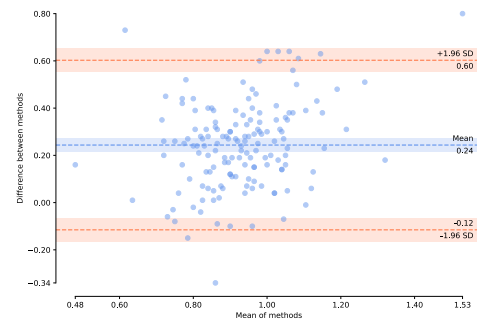


Abbildung 27: Bland-Altman-Plot für ISI/BPI nach TKA für Rater 1

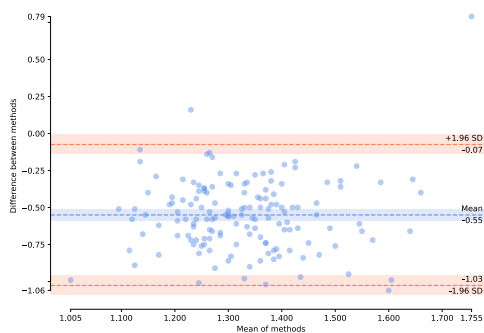


Abbildung 28: Bland-Altman-Plot für ISI/FRI vor TKA für Rater 1

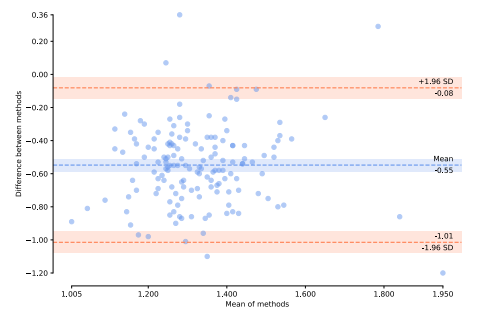


Abbildung 29: Bland-Altman-Plot für ISI/FRI nach TKA für Rater 1

Die Validität der Indices wurde zudem über den Surrogatparameter, die Veränderung der Patellahöhe vor und nach TKA-Einlage, bestimmt, wobei hier die Bestimmung sowohl des ICCs und des Spearman-Korrelationskoeffizienten erfolgte.

Tabelle 11: Validität über Surrogatparameter- ICC

Verglichene Indices	ICC
CDI/dCI - ISI	0.45
CDI/dCI - BPI	0.90
ISI-BPI	0.39
CDI/dCDI-FRI	0.69
ISI - FRI	-0.04

Den höchsten ICC zeigten (d)CDI/BPI mit ICC = 0.90, den niedrigsten ISI/FRI mit ICC = -0.04.

Tabelle 12: Validität über Surrogatparameter - Spearman-Korrelationskoeffizient

Verglichene Indices	Spearman-Korrelationskoeffizienten
CDI/dCI - ISI	0.19
CDI/dCI - BPI	0.80
ISI-BPI	0.13
CDI/dCDI-FRI	0.52
ISI - FRI	-0.09

Analog zum ICC lag auch der Spearman-Korrelationskoeffizient beim (d)CDI/BPI am höchsten.

Es erfolgte zudem die Darstellung des Surrogatparameters im Rahmen von Bland-Altman-Plots im Hinblick auf systematische Fehler (siehe Abbildung 30 bis 34).

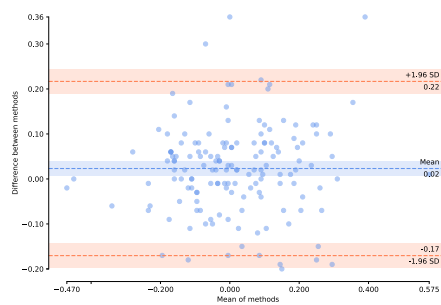


Abbildung 30: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für (d)CDI/BPI

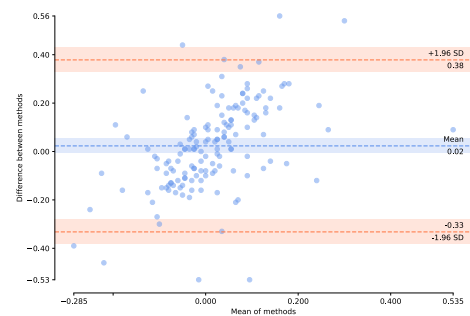


Abbildung 31: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für (d)CDI/ISI

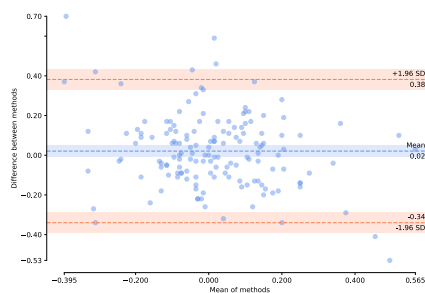


Abbildung 32: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für (d)CDI/FRI

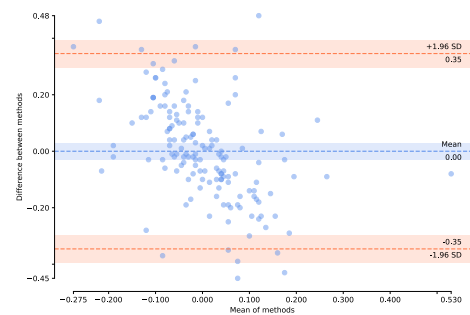


Abbildung 33: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für (d)ISI/BPI

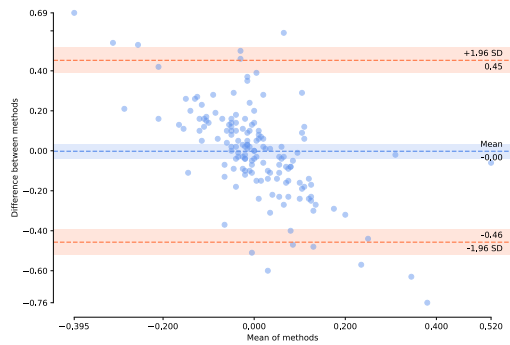


Abbildung 34: Bland-Altman-Plot für den Surrogatparameter der Patellahöhenänderung für ISI/FRI

3.5 Methodenvergleich

Tabelle 13 zeigt die Werte für den ICC, erhoben für den Vergleich analog-digital für Rater 1 zum ersten Zeitpunkt. Dies wurde gewählt, da es dem klinischen Setting am ehesten entspricht.

Vergleich zur Messung zu Zeitpunkt 1

Tabelle 13: Methodenvergleich – ICC-Rater 1 analog/digital

Messzeitpunkt	ICC
präoperativ: CDI	0.95
postoperativ: dCDI	0.98
präoperativ: ISI	0.96
postoperativ: ISI	0.91
präoperativ: FRI	0.92
postoperativ: FRI	0.93

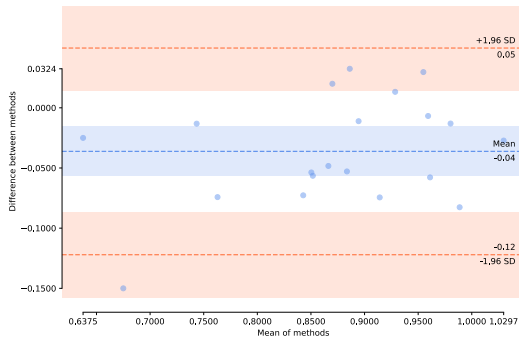


Abbildung 35: Bland-Altman-Plot für CDI präoperativ analoge vs. digitale Messung

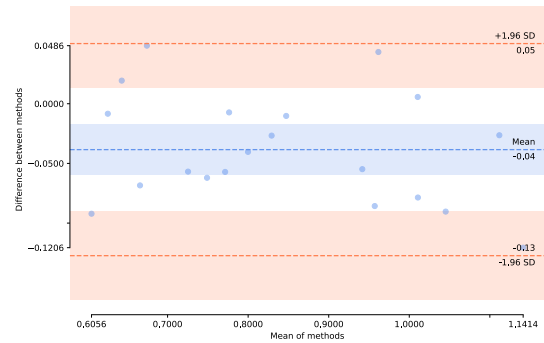


Abbildung 36: Bland-Altman-Plot für dCDI postoperativ analoge vs. digitale Messung

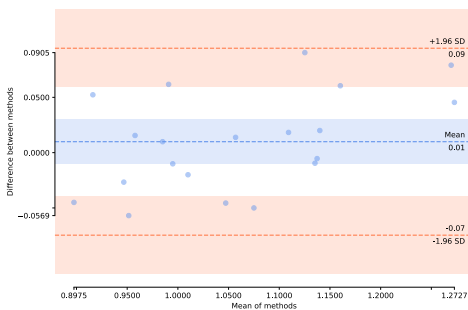


Abbildung 37: Bland-Altman-Plot für ISI präoperativ analoge vs. digitale Messung

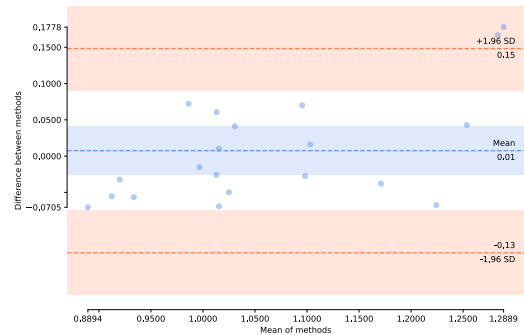


Abbildung 38: Bland-Altman-Plot für ISI postoperativ analoge vs. digitale Messung

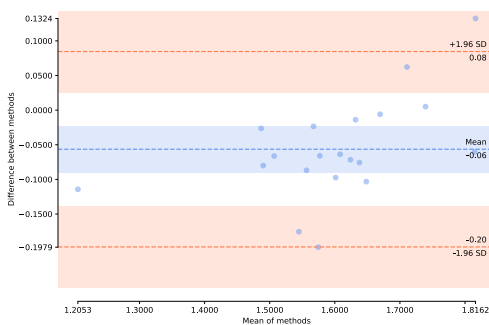


Abbildung 39: Bland-Altman-Plot für FRI präoperativ analoge vs. digitale Messung

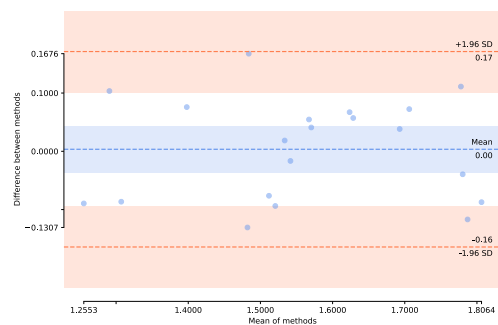


Abbildung 40: Bland-Altman-Plot für FRI postoperativ analoge vs. digitale Messung

Abbildungen 35-40 entsprechen Bland-Altman-Plots für den Methodenvergleich analog/digital für die jeweiligen Indices, im Hinblick auf systematische Unterschiede. In allen Abbildungen 35-40 ergibt sich ein Mittelwert unweit der Nulllinie und ein kleines Konfidenzintervall, insbesondere für den CDI/(d)CDI.

Vergleich ICC zu Zeitpunkt 1 und Zeitpunkt 2 (Intra-Rater-Reliabilität)

Tabelle 14: Methodenvergleich - digital: Intra-Rater-Reliabilität

Messzeitpunkt	ICC
präoperativ: CDI	0.93
postoperativ: dCDI	0.99
präoperativ: ISI	0.98
postoperativ: ISI	0.94
präoperativ: FRI	0.95
postoperativ: FRI	0.96

Tabelle 14 zeigt eine Übersicht über den ICC für die Intra-Rater-Reliabilität in der digitalen Messung für den CDI/dCDI vor/nach TKA, sowie den ISI und FRI vor und nach TKA. Alle Indices hatten digital eine Intra-Rater-Reliabilität von >0.9 .

3.6 Veränderung der Patellahöhe nach Prothesen-Einlage

Zunächst erfolgte die Prüfung der Normalverteilung anhand von Histogrammen. Hierfür wurden die Mittelwerte aus allen vorliegenden Messungen für den jeweiligen Index prä- und postoperativ gebildet und anschließend Histogramme graphisch erzeugt.

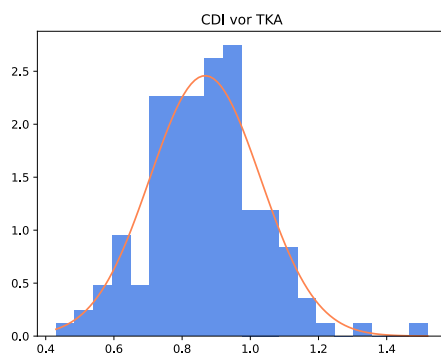


Abbildung 41: Normalverteilung CDI präoperativ

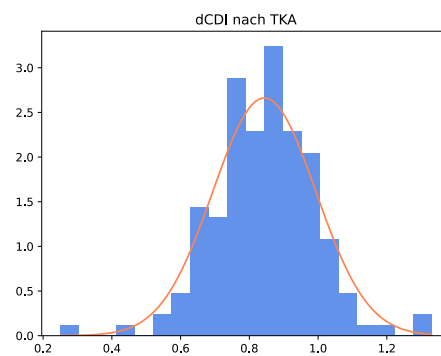


Abbildung 42: Normalverteilung CDI postoperativ

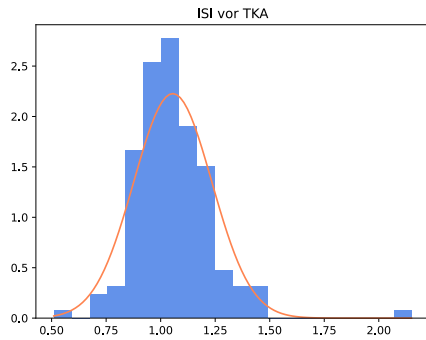


Abbildung 43: Normalverteilung ISI präoperativ

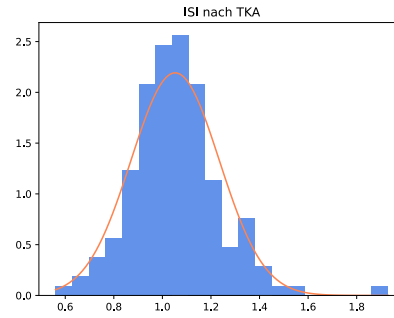


Abbildung 44: Normalverteilung ISI postoperativ

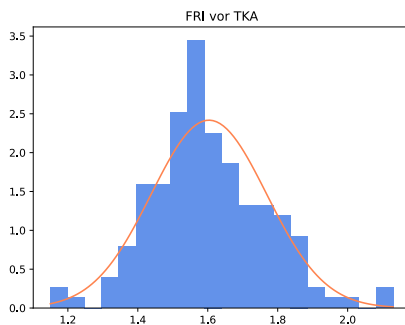


Abbildung 45: Normalverteilung FRI präoperativ

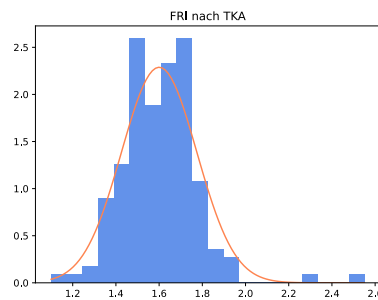


Abbildung 46: Normalverteilung FRI postoperativ

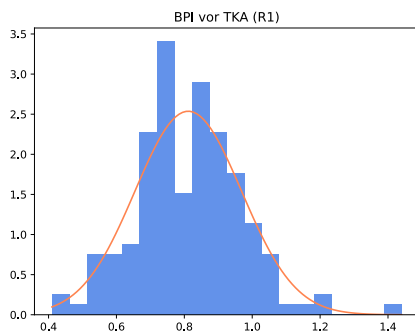


Abbildung 47: Normalverteilung BPI präoperativ

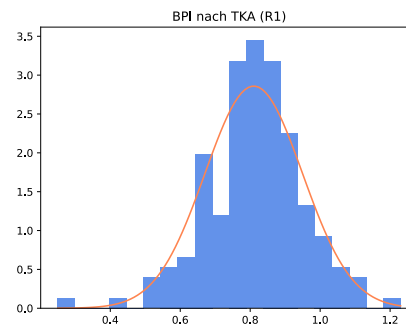


Abbildung 48: Normalverteilung BPI postoperativ

Anmerkung:

Der BPI wurde nur von einem Rater bestimmt, der Mittelwert wurde nur aus dessen Messergebnissen ermittelt.

Anschließend erfolgte die Durchführung des paired t-Tests.

Im Folgenden (siehe Tabelle 15 und 16) zunächst eine Übersicht über den Mittelwert und den Median der Patellahöhe der entsprechenden Indices.

Tabelle 15: Mittelwerte der Patellahöhe nach Indices

Index	Mittelwert (mean)	Standardabweichung
CDI vor TKA	0.87	0.158
CDI nach TKA	0.85	0.130
ISI vor TKA	1.06	0.177
ISI nach TKA	1.07	0.178
BPI vor TKA	0.82	0.155
BPI nach TKA	0.81	0.136
FRI vor TKA	1.60	0.165
FRI nach TKA	1.60	0.174

Tabelle 16: Median der Patellahöhe nach Indices

Index	Median (median)	Standardabweichung
CDI vor TKA	0.87	0.158
dCDI nach TKA	0.85	0.130
ISI vor TKA	1.06	0.177
ISI nach TKA	1.07	0.178
BPI vor TKA	0.81	0.155
BPI nach TKA	0.82	0.136
FRI vor TKA	1.59	0.165
FRI nach TKA	1.60	0.174

Folgende Übersichtstabelle (Tabelle 17) zeigt die Ergebnisse des paired t-Tests für den Mittelwert unter Berücksichtigung der Signifikanz.

Tabelle 17: paired t-Test: Änderung der Patellahöhe

Index	Mittelwert	Standardabweichung	Signifikanz (2-tailed)
CDI/dCDI	0.026	0.153	0.040
ISI	-0.01	0.084	0.135
BPI	0,001	0.012	0.040
FRI	0.194	0.165	0.845

Zudem wurden die absoluten Zahlen für eine PPI und TPI für einen Rater entsprechend dem realistischen klinischen Setting erhoben (siehe Tabelle 18 und 19):

Tabelle 18: Patellahöhe Absolute Ergebnisse 1

Zeitpunkt	Patella alta	Patella norma	Patella infera
Präoperativ N=154	24 (15.6%) nach ISI 3 (1.9%) nach CDI	125 (81.1%) nach ISI 143 (92.9%) nach CDI	5 (3.2%) nach ISI 8 (5.2%) nach CDI
Postoperativ N=154	23 (14.9%) nach ISI 3 (1.9%) nach CDI	121 (78.6%) nach ISI 145 (94.2%) nach CDI	10 (6.5%) nach ISI 6 (3.9%) nach dCI

Anmerkung für Referenzbereich: CDI/dCDI PI <0.6 PN 0.6-1.2, PA >1.2, ISI PI <0.8, PN 0.8-1.2, PA >1.2

Tabelle 19: Patellahöhe Absolute Ergebnisse 2

Zeitpunkt	Patella alta	Patella norma	Patella infera
Präoperativ N=154	24 (15.6%) nach ISI 3 (1.9%) nach CDI	125 (81.1%) nach ISI 101 (65.6%) nach CDI	5 (3.2%) nach ISI 50 (32.5%) nach CDI
Postoperativ N=154	23 (14.9%) nach ISI 3 (1.9%) nach CDI	121 (78.6%) nach ISI 92 (59.7%) nach CDI	10 (6.5%) nach ISI 59 (38.3%) nach dCI

Anmerkung für Referenzbereich: CDI/dCDI PI <0.8 PN 0.8-1.2, PA >1.2, ISI PI <0.8, PN 0.8-1.2, PA >1.2

Tabelle 20: Cohen's d für CDI und ISI vor und nach TKA

Index	Cohen's d
Caton-Deschamps-Index vor und nach TKA	0.148
Insall-Salvati-Index vor und nach TKA	0.016
FRI-Index vor und nach TKA	0.019

Tabelle 20 stellt den Cohen's d für den Unterschied vor und nach TKA unter Anwendung verschiedener Patellahöhen-Indices (CDI/dCDI, ISI und FRI) dar. Alle 3 Patellahöhen-Indices können nur eine geringe (CDI, Cohen's d bei 0.148) bis zu einer vernachlässigbaren Effektstärke (ISI, Cohen's d bei 0.016 und FRI, Cohen's d bei 0.019) darstellen.

Tabelle 21: Kreuztabelle für verschiedene Konstellationen hinsichtlich der Veränderung der Patellahöhe

	CDI präoperativ > dCDI postoperativ	CDI präoperativ = dCDI postoperativ	CDI präoperativ < dCDI postoperativ
ISI präoperativ > ISI postoperativ	6	6	3
ISI präoperativ = ISI postoperativ	37	57	30
ISI präoperativ < ISI postoperativ	6	2	7

Die Tabelle 21 zeigt folgende Gegebenheit: Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der CDI und der dCDI insgesamt eine gute Korrelation hatten, jedoch sowohl bei Inter-Rater- als auch bei Intra-Rater-Reliabilität keine vollständige Übereinstimmung erbrachten, erfolgte die absolute Analyse der Patellahöhe im Rahmen dieser Kreuztabelle mit einem Cut-Off-Wert von 0.1, d.h. eine Veränderung der Patellahöhe wurde nur akzeptiert, wenn es zu einer Veränderung von >0.1 im Rahmen des Index kam. Bei 57 Kniegelenken kam es zu keinen wesentlichen Veränderungen der Patellahöhe, während hingegen 37 Kniegelenke nur eine wesentliche Veränderung des CDI/dCDIs zeigten. Insgesamt war der Anteil an Kniegelenken mit einer Veränderung der Patellahöhe beim CDI/dCDI größer als beim ISI.

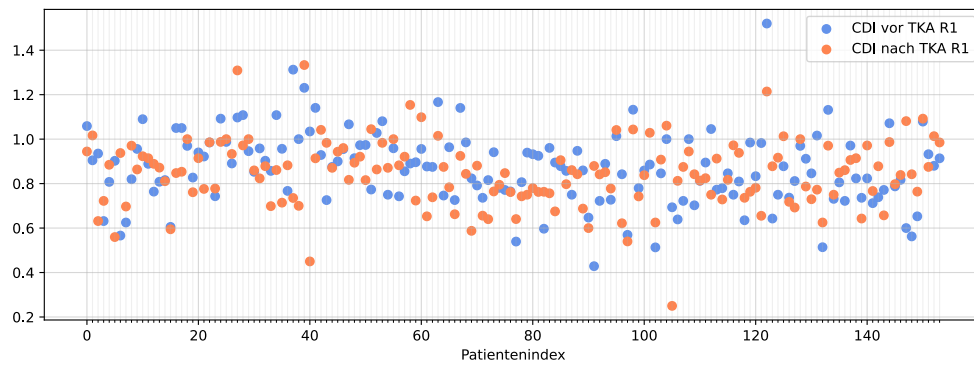


Abbildung 49: Übersicht über die Messergebnisse CDI/dCDI für Rater 1 vor und nach TKA

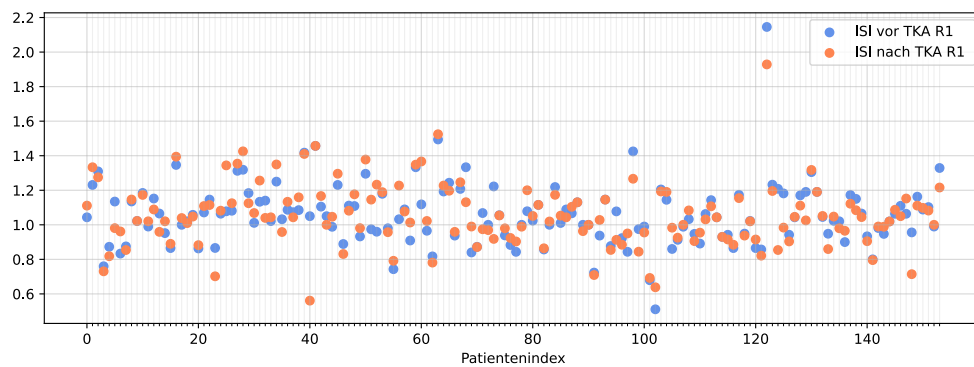


Abbildung 50: Übersicht für die Messergebnisse ISI für Rater 1 vor und nach TKA

Abbildung 49 und 50 zeigen eine Übersicht für die Messergebnisse für Rater 1 für den CDI/dCDI und den ISI vor und nach Operation. Auf der Horizontalachse sind die Patienten mit den jeweiligen erhobenen Messwerten vor und nach Operation eingetragen, während hingegen auf der Vertikalachse die Höhe des Patellahöhenindex angegeben wird. Die blauen Punkte präsentieren hierbei den Wert vor Operation und die orangenen Punkte nach Operation.

4 Diskussion

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten in Bezug auf die Reliabilität sehr gute Intra- und Inter-Observer Reliabilität für die gemessenen Indices. Insbesondere der Insall-Salvati-Index zeichnete sich durch eine hohe Inter-Rater-Reliabilität aus. Auch der Vergleich der Messmethoden ergab eine gute Vergleichbarkeit, wobei die digitale Messung tendenziell höhere Werte lieferte. In Bezug auf die Validität ergab sich eine gute Übereinstimmung für den CDI, dCDI und BPI, welche zur Bestimmung einer Pseudopatella infera herangezogen werden können. Die Korrelation mit dem ISI, der die tatsächliche Verkürzung der Patellasehne berechnet, war daher konklusiv auch weniger ausgeprägt. Eine Korrelation zwischen dem FRI und den bereits veröffentlichten Indices konnte nicht festgestellt werden.

4.1. Bewertung der Reliabilität der Indices im Rahmen der Studie

Im Rahmen der Versuchsdurchführung erfolgte die Bestimmung der Reliabilität für verschiedene Patellahöhenindices im Hinblick auf die Entwicklung eines Schemas zur Evaluation der Patellahöhe (siehe Abbildung 55 Workflow zur Erhebung der Patellahöhe sowie Abbildung 56). Die Indices zur Bestimmung der PPI (CDI und BPI) ergaben eine sehr gute Konsistenz für Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten durch denselben Rater sowohl vor als auch nach TKA. Auch der ISI ergab eine sehr gute Intra-Rater-Reliabilität (ICC für alle Fälle >0.8). Auch die Bland-Altman-Plots bestätigten die gute Intra-Rater-Reliabilität (siehe Abbildung 12-15) für den CDI/dCDI und den ISI vor und nach TKA, für alle Fälle liegt die durchschnittliche Differenz bei 0.01 und das Konfidenzintervall für die geschätzte Differenz zwischen 0.14 und 0.16, was die gute Intra-Rater-Reliabilität der Indices ebenfalls unterstreicht. Insgesamt sind die Werte für die Intra-Rater-Reliabilität im Rahmen dieser Studie als sehr gut anzusehen und passen zu in der Literatur zu findenden Werten für Kniegelenke ohne TKA, wie z.B. bei van Duijvenbode et al. 2016 mit einem ICC von 0.90 für den ISI, 0.70 für den BPI und 0.76 für den CDI. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl für einen unerfahrenen Untersucher als auch für einen erfahreneren Untersucher eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten besteht. Dies verdeutlicht die Qualität der im Rahmen der Dissertation durchgeführten Messungen und ist insbesondere für die Verwendung im klinischen Alltag wichtig.

Die Ergebnisse zeigten zudem für alle Indices eine sehr gute Inter-Rater-Reliabilität, wobei anzumerken ist, dass alle drei Indices (CDI, ISI, BPI) bereits mehrfach in

anderen Studien angewendet wurden und hinsichtlich der Inter-Rater-Reliabilität untersucht worden sind. Insbesondere der ISI hatte im Rahmen der Ergebnisse unserer Arbeitsgruppe eine sehr gute Inter-Rater-Reliabilität. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Verhulst et al. 2020 für Kniegelenke ohne einliegende Implantate, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unserer Arbeitsgruppe unterstreicht. Ein Grund für die hervorragende Inter-Rater-Reliabilität des ISIs könnte die klare Konstruktion des Index ohne Hilfslinien sein, was die Bestimmung gegebenenfalls gegenüber dem dCDI vereinfacht, da der ISI klare anatomische Landmarken hat, die Tuberositas tibiae ist oft durch die auf den Röntgenbildern durchscheinende Patellasehne einfach zu identifizieren. Diese Hypothese unterstützt auch die Tatsache, dass der von uns entworfene FRI einen im Vergleich zum ISI/CDI diskret geringeren ICC ergab – gegebenenfalls durch die aufwändigere Konstruktion über Hilfslinien bedingt, ebenso wie der dCDI (einzelne Werte siehe Tabelle 6 bis 8). Zu einem anderen Ergebnis hinsichtlich der Inter-Rater-Reliabilität kamen z.B. Rogers et al. (ICC für ISI 0.58 vor TKA und 0.53 nach TKA, der dort am besten bewertete Index war der BPI). Zu ähnlichen ICC-Werten für die Inter-Rater-Reliabilität kamen auch Cabral et al. 2017 mit durchweg hohen ICC-Werten (ISI 0.90 vor TKA und 0.93 nach TKA bzw. CDI vor TKA 0.89 und nach TKA 0.90). Abbildungen 16 bis 19 stellen zudem im Rahmen dreidimensionaler Streudiagramme die Inter-Rater-Reliabilität für den CDI und FRI dar. Ein systematischer Fehler bei einzelnen Ratern ist abgesehen von einzelnen Ausreißern bei auf der optimalen Diagonale liegenden Punkten, eher unwahrscheinlich, was ebenfalls die gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen erfahrenen und weniger erfahrenen Anwendern unterstreicht.

Im Vergleich zu anderen Studien, die die Reliabilität von Indices verglichen, ist die Fallzahl von n=154 bei Rater 1 und 2 und n=50 bei Rater 3 als ausreichend anzusehen, so entsprechen die Fallzahlen bei Cabral et al. 2017 z.B. n=203, bei Jawhar et al. 2013 n=103, bei van Duijvenbode et al. 2016 n=45 und bei Rogers et al. 2006 n=45.

4.2 Bewertung der Validität der Indices im Rahmen der Studie

Für die abschließende Bewertung der Indices, ist neben der Reliabilität zudem eine Analyse der Validität notwendig. Es erfolgte zunächst eine Bestimmung des ICCs für die verschiedenen Indices. Dabei zeigte sich eine sehr gute Korrelation für den CDI und BPI vor TKA (ICC 0.89) und ebenfalls eine sehr gute Korrelation postoperativ (ICC 0.91). Eine mäßige Korrelation zeigten der CDI/ISI präoperativ (ICC 0.56) und

postoperativ (ICC 0.33) sowie der BPI und der ISI vor (ICC 0.42) und nach (ICC 0.27) Operation. Eine vernachlässigbare Übereinstimmung zeigte sich zwischen dem (d)CDI/FRI und dem ISI (ICC jeweils < 0.1). Es erfolgte auch die Prüfung mit Hilfe des Spearman-Korrelationskoeffizienten, da die Patellahöhe nicht als streng stetig anzusehen ist und die Referenzbereiche der Indices eine nicht vollständige lineare Beziehung zueinander aufweisen. Eine gute Korrelation zueinander ergaben der (d)CDI und der BPI sowohl vor als auch nach TKA (0.86 bzw. 0.88), was dazu passt, dass beide Indices in der Lage sind, eine PPI zu identifizieren (Konrads et al. 2022). Als ein weiterer Aspekt für die bessere Korrelation dieser Indices ist die Tatsache anzusehen, dass sich die Indices zur Berechnung den gemeinsamen Nenner (Länge der Patellagelenkfläche) teilen. Zu diskutieren wäre daher zudem die Prüfung einer Korrelation des mISI (Modifikation nach Grelsamer et al. 1992) mit dem CDI und BPI, da dieser ebenfalls die Länge der Patellagelenkfläche als Nenner hat. Eine mäßige Korrelation beider Indices ((d)CDI und BPI) bestand jeweils mit dem ISI (Spearman-Korrelationskoeffizient 0.36-0.56, wobei präoperativ höhere Korrelationswerte bestanden). Ähnliche Korrelationen für den CDI (nicht der Modifikation von Xu. et al. 2017 entsprechend), den ISI und den BPI konnten Cabral et al. 2017 ebenfalls zeigen (Spearman's-Korrelationskoeffizient präoperativ ISI/CDI 0.39 und postoperativ 0.49 oder z.B. BPI/CDI 0.91 vor TKA und 0.94 nach TKA). Dies zeigt vergleichbare Ergebnisse mit unserer Studie.

Keine relevante systematische Beziehung bestand zwischen dem FRI und dem ISI, während hingegen postoperativ der FRI und der CDI überraschenderweise eine mäßige Korrelation (Spearman-Korrelationskoeffizient 0.62) zeigten, was im Widerspruch zu den zuvor erhobenen Werten steht. Wie im Ergebnisteil bereits erläutert wurde die Validität zudem über einen Surrogatparameter, die Veränderung der Patellahöhe vor und nach TKA-Anlage, bestimmt. Sowohl der ICC als auch der Spearman-Korrelationskoeffizient zeigten eine gute Korrelation des Surrogatparameters (Spearman-Koeffizient bei 0.90) für den (d)CDI und BPI, eine mäßige Korrelation bestand zwischen ISI und (d)CDI bzw. ISI und BPI, was wiederum dadurch erklärt ist, dass der ISI dazu geeignet ist, eine TPI zu identifizieren, während (d)CDI und BPI dazu geeignet sind, auch eine PPI zu identifizieren. Die Abbildungen 20-29 zeigen jeweils einen Bland-Altman-Plot für die verschiedenen Index-Konstellationen, Abbildungen 20-21 (dCDI/BPI) unterstreicht die gute Korrelation zwischen (d)CDI und BPI. Ein nicht zufälliges Verteilungsmuster der Differenzen bei

Abbildung 31 (CDI/ISI), 32(ISI/BPI), 34 (ISI/FRI) könnte als Hinweis gewertet werden, dass der ISI im Vergleich zu den anderen Indices in der Lage ist, eine TPI zu detektieren, wie auch Grelsamer 2002 darstellte. Die Bestimmung des Agreements über einen Surrogatparameter neben der alleinigen Korrelation ist insbesondere im Zusammenhang mit der Fragestellung und klinischen Relevanz einer Patellahöhenveränderung sinnvoll, z.B. im Hinblick auf die klinische Bedeutung der Patellahöhe auf anterioren Knieschmerz (Vandeputte et al. 2017).

Eine Fragestellung, die im Rahmen der Statistik dieser Dissertation immer wieder von Relevanz war, war die Frage, ob der Mittelwert aller Messungen oder die Einzelwerte einzelner Rater zur Bestimmung der Ergebnisse, z.B. im Hinblick auf eine tieferstehende Patella, verwendet werden sollten. Insgesamt zeigten alle Rater für die Inter-Rater-Reliabilität und Intra-Rater-Reliabilität hohe ICC-Werte von meist >0.9 für die Indices, sodass sowohl das Verwenden einzelner Messwerte als auch des Mittelwerts gerechtfertigt sein kann. Prinzipiell könnte eine Verwendung der Mittelwerte sinnvoll sein, da potentielle Voreingenommenheit einzelner Rater so minimiert wird. Die Variabilität der Messungen war nicht stark und auch der unerfahrene Untersucher (Rater 1) zeigte eine gute Konsistenz mit den anderen Ratern. Es ist daher als gerechtfertigt anzusehen, auch die Ergebnisse des unerfahrenen Raters für die Analyse zu verwenden insbesondere auch, weil dieser als einziger alle Indices vermessen hatte, die für die Analyse des Agreements herangezogen wurden.

4.3 Erstmalige Validierung des derived Caton-Deschamps-Index

Im Zuge der Dissertation wurde erstmalig die Validierung des abgeleiteten Caton-Deschamps-Index durchgeführt. Die im Rahmen der Dissertation gewonnenen Messungen dienten als Grundlage für die Publikation "Reliability of a Caton-Deschamps-derived patella height index for knee arthroplasty" in International Orthopaedics von Konrads et al. (2021).

Bei einem Validierungsprozess müssen verschiedene Kriterien erfüllt sein, darunter die Inter-Rater- und Intra-Rater-Reliabilität sowie eine ausreichende Übereinstimmung des Index mit anderen Indices. Zudem sollte nachgewiesen werden, ob sowohl digitale als auch analoge Vermessungen des Index möglich sind.

Der Caton-Deschamps-Index ist in der Literatur ein häufig angewendeter Index zur Bestimmung der Patellahöhe und weist im Allgemeinen eine gute Inter-Rater- und Intra-Rater-Reliabilität auf. Die im Rahmen dieses Dissertationsprojekts präoperativ erhobenen Messwerte ergaben sowohl für den weniger erfahrenen als auch den erfahrenen Rater einen ICC-Wert von $>0,9$ für die Intra-Rater-Reliabilität. Dies deutet darauf hin, dass die Messungen sehr reproduzierbar und konsistent für denselben Untersucher sind und der Caton-Deschamps-Index präoperativ zuverlässig für die Patellahöhenbestimmung geeignet ist, was beispielsweise auch durch Verhulst et al. (2020) mit einem ICC von 0.84 gezeigt werden konnte.

Auch postoperativ ergaben sich für den abgeleiteten Caton-Deschamps-Index (dCDI) ICC-Werte von $>0,9$, was darauf hinweist, dass der Index auch zwischen verschiedenen Untersuchern eine sehr gute Übereinstimmung aufweist. Es ist auffällig, dass der ICC-Wert bei dem erfahrenen Rater höher ist als bei dem weniger erfahrenen Rater, was gegebenenfalls durch die klinisch-radiologische Erfahrung der jeweiligen Rater mitbedingt ist. Dennoch liefert der abgeleitete Caton-Deschamps-Index auch bei einem weniger erfahrenen Rater zuverlässige Ergebnisse (R1 ICC dCDI 0.92, R2 ICC dCDI 0.97), was die gute Anwendbarkeit des CDI für die Patellahöhenbestimmung im klinischen Alltag unterstreicht.

Neben einer guten Intra-Rater-Reliabilität ist auch eine ausreichende Inter-Rater-Reliabilität von entscheidender Bedeutung. Präoperativ ergaben sich für den Caton-Deschamps-Index (CDI) ein ICC von 0.95 (R1-R2), ein ICC von 0.86 (R1-R3) und ein ICC von 0.89 (R2-R3). Diese Ergebnisse deuten insgesamt auf eine hohe Konsistenz der Messwerte hin. Aus verschiedenen Studien ist die hohe Inter-Rater-Reliabilität des CDI bereits bekannt (zum Beispiel Verhulst et al. (2020) mit einem ICC von 0.76 oder Cabral et al. (2017) mit einem ICC von 0.89).

Auch für den abgeleiteten Caton-Deschamps-Index (dCDI) bestand eine gute Inter-Rater-Reliabilität, mit einem ICC von 0.91 (R1-R2), einem ICC von 0.82 (R1-R3) und einem ICC von 0.83 (R2-R3). Diese Ergebnisse weisen auf eine gute Reproduzierbarkeit hin. Auffallend ist im Rahmen dieser Dissertationschrift die etwas bessere Korrelation zwischen den Ratern R1 und R2, möglicherweise bedingt dadurch, dass Rater 1 von Rater 2 eingelernt wurde, was auf einen möglichen Bias hinweisen könnte. Auch die 3D-Streudiagramme (Abbildung 16 und 17) verdeutlichen die gute Inter-Rater-Reliabilität.

Für das Agreement des Index ist zudem durch Rater 1 ein Vergleich mit bereits etablierten Messmethoden dem BPI erfolgt. Präoperativ ergab sich ein guter ICC von 0.89 und postoperativ ebenfalls ein guter ICC von 0.91, was auf eine gute Korrelation der verschiedenen Messwerte hinweist. Auch der Spearman-Korrelationskoeffizient ergab eine gute Korrelation von 0.86 prä- bzw. 0.88 postoperativ. Im Rahmen der Validitätsprüfung erfolgte zudem die Bestimmung eines Surrogatparameters, die Veränderung der Patellahöhe, die einen ICC von 0.90 bzw. einen Spearman-Korrelationskoeffizient von 0.80 erbrachte. Die auch hier gute Korrelation des CDIs und des BPIs präoperativ bzw. des dCDIs und des BPIs postoperativ reproduziert die in der bisherigen Literatur beschriebene Eignung von CDI und BPI zur Bestimmung einer PPI bzw. einer Veränderung der tibio-femorale Gelenklinienveränderung (Konrads et al. 2022 oder Grelsamer 2002).

Auch der Vergleich zwischen der analogen und der digitalen Messmethode im Rahmen des Methodenvergleichs ergab eine sehr gute Korrelation präoperativ für den CDI mit einem ICC von 0.95 und postoperativ von 0.98, auch die Intra-Rater-Reliabilität war mit einem ICC von 0.93 für den CDI vor TKA und den dCDI von 0.99 ausreichend, anzumerken ist hier jedoch eine deutlich kleinere Fallzahl von $n=20$. Ein systematischer Fehler erscheint nach Generierung eines Bland-Altman-Plots (siehe Abbildung 35-40) als unwahrscheinlich, da die Differenzen zufällig um die Mittellinie verteilt sind. Insgesamt werden in klinischen Studien neben analogen Messungen vorwiegend digitale Messungen durchgeführt wie beispielsweise in Schreiner et al. (2023).

4.4 Nachweis ob digitale und analoge Vermessungen der Indices im Rahmen dieser Studie vergleichbar sind

Im Rahmen dieser Dissertation erfolgte die Prüfung der Vergleichbarkeit einer analogen und digitalen Messmethode für den CDI/dCDI, den ISI und den FRI. Alle drei Indices zeigten im intramodalen Vergleich (analog-digitale Messung) eine sehr gute Korrelation anhand des ICCs > 0.9 (CDI vor TKA: 0.95, dCDI nach TKA: 0.98, ISI vor TKA: 0.96, ISI nach TKA 0.91, FRI vor TKA: 0.92, FRI nach TKA 0.93).

Zur Prüfung auf systematische Fehler der Messmethoden erfolgte zudem die Generierung eines Bland-Altman-Plots für die jeweiligen Indices vor und nach TKA. Alle Indices (CDI/dCDI, ISI und FRI) zeigten eine akzeptable Mittelwertdifferenz und konsistente Streuung der Differenzen um die Nulllinie, für alle Indices ergab sich ein

Mittelwert nahe bei 0 (Mittelwert jeweils für: CDI vor TKA -0.04, dCDI nach TKA 0.04, ISI vor TKA 0.01, ISI nach TKA 0.01, FRI vor TKA -0.06, FRI nach TKA 0.00), was für geringe systematische Unterschiede spricht. Insgesamt gab es bei keinem Index im Vergleich zwischen der analogen und digitalen Methode relevante Ausreißer und die Standardabweichungen für die jeweiligen Indices befinden sich zudem im Rahmen einer akzeptablen Toleranzgrenze (SD jeweils für: CDI vor TKA 0.08, dCDI nach TKA 0.14 ISI vor TKA 0.08, ISI nach TKA 0.14, FRI vor TKA 0.14, FRI nach TKA 0.17). Bei in allen Plots vorliegender weitestgehend gleichmäßiger Streuung um die Nulllinie liegt eine gute Übereinstimmung zwischen den Methoden vor. Ein Trend, der auf potentielle Probleme mit einer Methode hinweisen könnte, besteht nicht.

Zu kritisieren wäre hier, dass der Methodenvergleich nur durch Rater 1 erfolgte, der die geringste klinisch-radiologische Erfahrung hatte, andererseits ist die gute Korrelation auch in diesem Setting als Hinweis für konsistente Untersuchungsergebnisse auch bei weniger erfahrenen Untersuchern zu werten.

Ein Vergleich zwischen analogen und digitalen Messmethoden wurde bislang nach meiner Kenntnis nicht durchgeführt, wobei in den letzten Jahren vorwiegend digitale Messungen erfolgten (z.B. Xu et al. 2017). Deshalb war es für die Wertigkeit des Projekts unverzichtbar, sowohl digitale als auch analoge Messungen durchzuführen. Da die Intra-Rater-Reliabilität digital trotz kleinerer Fallzahl insgesamt höher war als in der analogen Methode (ICC für Rater 1 für alle Indices >0.9), kann eine Überlegenheit der digitalen Methode gegenüber der analogen Methode nicht ausgeschlossen werden.

Zudem sollte hier angemerkt sein, dass es im Rahmen eines Validierungsprozesses eines Index auch sinnvoll sein kann, diesen anhand CT/MRT-Bildern zu validieren, da diese einen im Verlauf höheren Stellenwert im Rahmen der Diagnostik bekommen, insbesondere auch bei anteriorem Knieschmerz (Hirschmann et al. 2016).

4.5 Bewertung des femoral-referenzierten Patellahöhenindex

Im Rahmen dieser Dissertation erfolgte die Validierung eines von uns entworfenem, rein-femoral-referenziertem Patellahöhenindex.

Im Rahmen der Reliabilitätsprüfung ergaben sich für den FRI gute Werte mit einem ICC für die Intra-Rater-Reliabilität von präoperativ 0.79 bzw. 0.95 postoperativ für Rater 1 und von 0.95 präoperativ bzw. 0.93 postoperativ für Rater 2. Auffallend ist hier

eine bessere Konsistenz der Messwerte bei Rater 2, gegebenenfalls dadurch, dass Rater 2 der erfahrenere Untersucher gewesen ist. Auch die Inter-Rater-Reliabilität erbrachte gute Werte mit einem ICC von 0.90 vor TKA und 0.89 nach TKA (R1-R2) bzw. 0.86 vor TKA und 0.82 nach TKA (R1-R3) und 0.83 vor TKA und 0.82 (R1-R3 nach TKA). Hier ist auffallend, dass zwischen Rater 1 und Rater 2 die Konsistenz der Messungen höher ist als zu Rater 3, ein Grund hierfür könnte sein, dass Rater 2 Rater 1 eingelernt hatte und dieser dadurch gegebenenfalls nicht als gänzlich unabhängiger Rater angesehen werden darf.

Die Validitätsprüfung ergab jedoch sowohl prä- als auch postoperativ keine ausreichende Korrelation der ICC-Werte mit dem CDI (vor TKA 0.08, nach TKA 0.07) und dem ISI (vor TKA 0.02, nach TKA 0.03) und auch der Spearman-Korrelationskoeffizient zeigte keine ausreichende Korrelation (vor TKA 0.14, nach TKA 0.62 für CDI bzw. -0.14 und -0.02 nach TKA). Da die Entwicklung des von uns vorgeschlagenen rein femoral-referenzierten Patellahöhenindex weder eine positive noch negative Korrelation mit den bereits etablierten Methoden zeigte, wurde der FRI nicht weiterverfolgt.

Prinzipiell müsste man davon ausgehen, dass der FRI wie der CDI in der Lage wäre, eine PPI oder auch TPI zu detektieren. Bereits während des ersten Messvorgangs ist jedoch aufgefallen, dass der FRI keine ausreichende Fähigkeit besitzt, eine tief stehende Patella zu detektieren. Unter der Prämisse, dass ein Tiefstand der Patella, sei es durch das Anheben der femorotibialen Gelenkfläche (PPI) oder durch eine postoperative Verkürzung der Patellasehne (TPI), in einem Verschieben der Patella auf einer Geraden durch ihre Gelenkfläche nach distal resultiert (siehe Abbildung 51), müsste der Zähler (die Strecke A) kleiner werden und der Index im Gesamten auch. Bei einer Zunahme der Patellahöhe oder z.B. Verminderung der Höhe der femorotibialen Gelenklinie müsste die Strecke A größer werden und somit der Index auch.

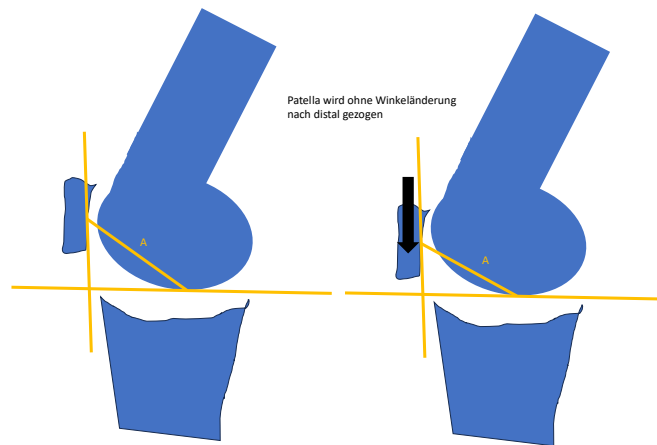


Abbildung 51: Einfluss der Veränderung der Patellahöhe auf FRI (ohne Änderung des Winkels zum Femur), eigene Darstellung

Faktisch trat dies aber nicht bei allen Veränderungen der Patellahöhe ein, so dass wir davon ausgehen müssen, dass bei einer Veränderung der Patellalinie keine Verschiebung auf der Geraden durch die Gelenkfläche stattfindet, sondern zudem eine Verkippung, z.B. bedingt durch den Zug der Patellasehne und des M. quadriceps femoris, auftritt. Dadurch verändert sich der Winkel und der Schnittpunkt der Orthogonale an der Femurkondyle (T) ist ein anderer, was als Störfaktor des Index anzusehen ist und diesen sehr anfällig für den Winkel der Patellagelenkfläche zum Femur macht. Unsere Hypothese war unter anderem, dass dies durch das Bilden der Orthogonale gegebenenfalls herausgerechnet werden kann, was sich jedoch in den Messungen nicht bestätigt hat.

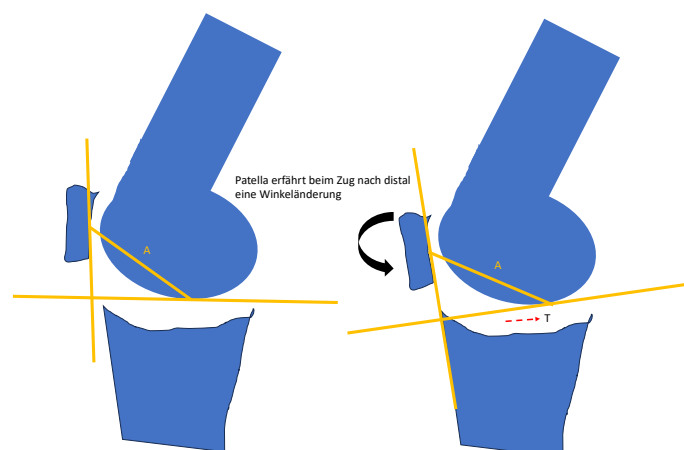


Abbildung 52: Einfluss der Veränderung der Patellahöhe auf den FRI (Abhängigkeit vom Winkel zum Femur), eigene Darstellung

Ein weiterer Grund für das schlechte Agreement mit den bereits etablierten Indices, könnte sein, dass sich durch eine Kniebeugung der Schnittpunkt der Tangente mit den Femurkondylen (T) verändert, da deren Form keiner Kugel, sondern eher einer Ellipse entspricht und es somit zu einer Vergrößerung des Index kommt (siehe schematische Zeichnung Abbildung 53). Während die Patella bei moderater Beugung von 10-30° noch auf der Vorderseite des Femurs aufliegt, befindet sie sich bei stärkerer Beugung (beispielsweise 80-90°) eher auf der distal-inferioren Seite des Femurknochens (Schindler, 2012).

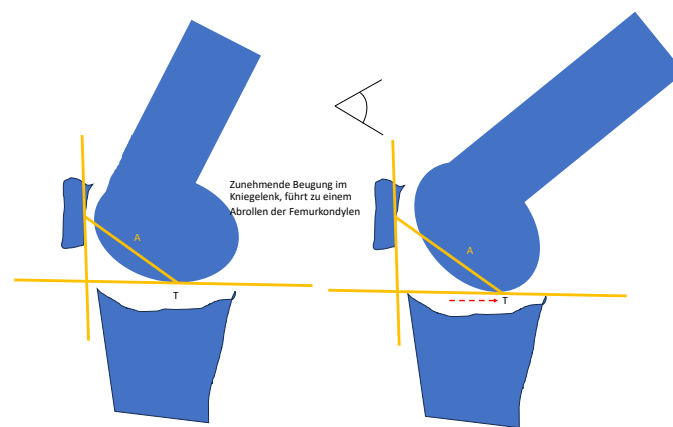


Abbildung 53: Einfluss der Patellahöhe auf den FRI (Einfluss der Beugung), eigene Darstellung

In der Literatur sind jedoch auch femoralreferenzierte Indices beschrieben, die nahezu unabhängig von der Knieflexion sind, wie z.B. die Methode von Chareancholvanich & Narkbunnam (Chareancholvanich et al. 2012). Aufgrund der Tatsache, dass der femorale Referenzpunkt nicht der Schnittpunkt einer Tangente mit einem Ellipsoid, sondern einem klar definierten Punkt entspricht, macht dies den Index weniger abhängig von der Flexion.

Eine relevante Veränderung des Index kann zudem auch durch eine Verkippung des Femurs bedingt sein (siehe Abbildung 54), da dies den Schnittpunkt der Tangente mit der Femurkondyle (T) und somit die Strecke A beeinflusst.

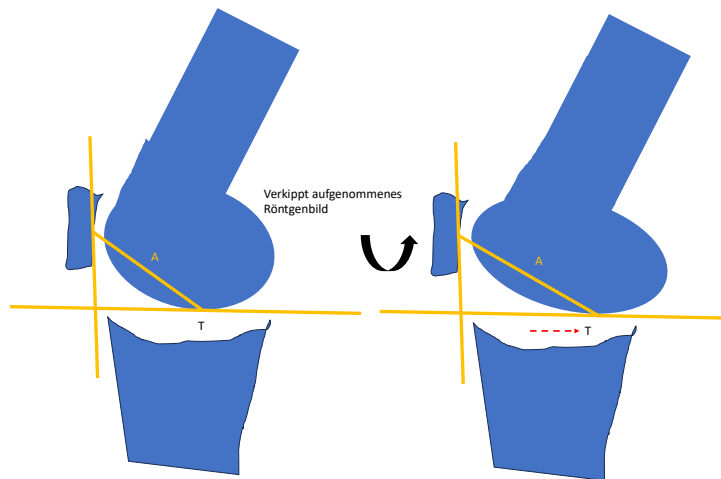


Abbildung 54: Einfluss der femoralen Verkippung auf den FRI, eigene Darstellung

4.6 Workflow zur Erhebung der Patella-Höhe

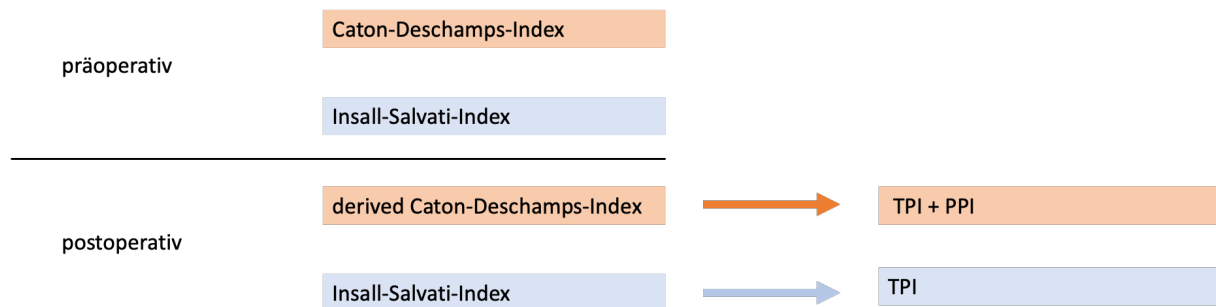


Abbildung 55: Workflow zur Erhebung der Patellahöhe

Bei gemeinsamer Betrachtung der dargestellten Zusammenhänge ist es sinnvoll, zur angemessenen Beurteilung der Patellahöhe und zur Unterscheidung zwischen einer TPI oder PPI, die Anwendung von zwei verschiedenen Indices prä- und postoperativ vorzunehmen. Während der Insall-Salvati-Index eine TPI erkennt, da er die Länge der Patellasehne als Teil des Verhältnisses, aus dem der Index gebildet wird, beinhaltet, ist zur Bestimmung einer PPI, bedingt durch eine Verminderung der Patellahöhe im Vergleich zur femorotibialen Referenzfläche, der Caton-Deschamps-Index präoperativ und der abgeleitete Caton-Deschamps-Index postoperativ heranzuziehen. Auf diese Weise lässt sich der Anteil einer TPI und PPI an der Veränderung der Patellahöhe genauer bestimmen, die Notwendigkeit zweier Indices zur Bestimmung und Differenzierung zwischen TPI und PPI zeigten beispielsweise auch Grelsamer 2002, Konrads et al. 2023 oder Graulich et al. 2020. Insgesamt ist daher die Anwendung zweier Indices, die zwischen einer Verkürzung der Patellasehne und Erhöhung der tibiofemorale Gelenklinie in Relation zur Patella stehen, als Standard anzusehen.

	CDI präoperativ > dCDI postoperativ	CDI präoperativ = dCDI postoperativ	CDI präoperativ < dCDI postoperativ
ISI präoperativ > ISI postoperativ	Verkürzung der Patellasehne und ggf. Erhöhung der Gelenklinie (TPI + ggf. zudem PPI)	Verkürzung der Patellasehne = TPI	Verkürzung der Patellasehne (TPI) und Erniedrigung der Gelenklinie
ISI präoperativ = ISI postoperativ	Erhöhung der Gelenklinie = PPI	Keine Veränderung	Erniedrigung der Gelenklinie
ISI präoperativ < ISI postoperativ	Verlängerung der Patellasehne und Erhöhung der Gelenklinie (PPI)	Verlängerung der Patellasehne	Verlängerung der Patellasehne und Erniedrigung der Gelenklinie

Abbildung 56: Interpretationshilfe zur Erhebung der Patellahöhe prä- und postoperativ, modifiziert nach Konrads et al. 2021

Abbildung 56 zeigt eine Interpretationshilfe zur Erhebung der Patellahöhe in Form eines Kreuzdiagrammes im Hinblick auf anterioren Knieschmerz. Unter Berücksichtigung, dass anteriorer Knieschmerz durch eine tieferstehende Patella bedingt ist (Vandeputte et al. 2017) und eine postoperative Verlängerung der Patellasehne eher untypisch ist, besteht die klinische Relevanz vor allem in den farbig hinterlegten Feldern. Hierbei entspricht das rosafarbene Feld einer TPI ohne PPI-Komponente, das orangene Feld einer PPI und das rote Feld einer TPI mit ggf. zusätzlicher PPI-Komponente.

Im Rahmen der Dissertationsschrift erfolgte die Bestimmung und Validierung des CDI/dCDI und des ISI. Auch Konrads et al. entwarfen eine instruktive Übersicht zur Bestimmung der Patellahöhe bei Kniegelenken ohne und mit einliegender Knieprothese (Konrads et al. 2022). Auch in diesem Review wird empfohlen, zwei verschiedene Indices zur Bestimmung der Patellahöhe zu verwenden (ebd.): ISI oder mISI für eine PPI und CDI/dCDI oder BPI. Konrads et al. publizierten zudem 2021 ein Schema zur Bestimmung der Patellahöhe, auf welchem das obige aufbaut (siehe Abbildung 56).

Mortensen et al. (2021) untersuchten die Abhängigkeit der posterioren tibialen Neigung (posterior tibial slope) im Hinblick auf den BPI und konnten zeigen, dass eine Zunahme der posterioren tibialen Neigung zu einer Abnahme des BPI führt, was wiederum dafürsprechen könnte, den CDI zur Bestimmung der Patellahöhe zu verwenden. Sowohl für den BPI prä- und postoperativ als auch den dCDI postoperativ muss festgehalten werden, dass eine Verkippung des Kniegelenks um die horizontale Ebene (tibial slope) den Index beeinflussen kann und insbesondere durch die Bestimmung der Dicke des Inlays zu inkonsistenten Ergebnissen führen kann. Als Kritikpunkt am ISI ist zu nennen, dass dieser aufgrund von osteophytären Anlagerungen an der Patella im Hinblick auf die Patella-Diagonale teilweise schwierig zu bestimmen ist, weswegen z.B. der mISI ebenfalls ein Index zur Evaluation der TPI ist (Grelsamer 2002). Trotz diesem Nachteil zeigte der ISI eine hervorragende Intra- und Inter-Rater-Reliabilität. Dennoch könnte gegebenenfalls eine Festlegung, ob Osteophyten an der Patella mit in die Bestimmung der Diagonale der Patella (Zähler des Quotienten, aus dem der Index berechnet wird) einfließen sollen, sinnvoll sein.

Eine Messmethode, die als alternatives Vorgehen zur Evaluation zwischen PPI und TPI dient, wurde 2020 von Han et al. veröffentlicht. Diese Methode besteht aus drei Distanzen, die Achsen entsprechen und teilweise über die Achse des Tibiaschafts konstruiert werden. Dabei werden die Distanz zur Patella, die Gelenkachse der Patella und die Gelenkhöhenlinie über Referenzlinien berücksichtigt (Han et al. 2020). Dieser Ansatz erscheint ebenfalls sinnvoll, da marginale Landmarken, die beispielsweise durch die TKA wegfallen und über Hilfslinien gebildet werden müssen, nicht notwendig sind. Diese Methode entspricht zudem dem Anspruch eines universalen Patellahöhen-Index oder einer Methode zur Evaluation der Patellahöhe vor und nach TKA-Implantation. Gegebenenfalls wäre diese Methode mit klinischen Daten von Patienten im Rahmen einer prospektiven klinischen Studie zur Evaluation eines universalen Patellahöhenindex zu diskutieren.

4.7 Veränderung der Patellahöhe nach Prothesen-Implantation

Insgesamt ist die Veränderung der Patellahöhe im Sinne einer Veränderung des (d)CDIs und des ISIs im Rahmen des Studienkollektivs dieser Dissertationsschrift als gering anzusehen. Eine signifikante, wenn auch nur sehr diskrete Verminderung des Patellahöhenindex konnte im paired-t-Test nur für den CDI/dCDI (MW 0.026,

Signifikanz 0.040) nachgewiesen werden, weitere Indices ergaben keine signifikante Veränderung.

Auch die Effektstärke einer Verminderung des jeweiligen Index ist als eher gering anzusehen (Cohen's d für (d)CDI=0.148 und für ISI=0.019).

Dennoch passen unsere Ergebnisse zur Hypothese, dass es nach TKA zu einer Veränderung der Patellahöhe kommt. Unter Berücksichtigung der Reliabilität der Indices und Berücksichtigung einer Messunsicherheit von 0.1, d.h. es werden nur Veränderungen für die Auswertung berücksichtigt, die einen Einfluss von $>+/-0.1$ auf den jeweiligen Index haben, kommt es zu einer Abnahme der Patellahöhe. Dies gilt für den CDI in 37.67% (gleichbleibende Höhe 37.01% und Erhöhung 25.23%) der Fälle, so dass sich die Tendenz für eine Patella infera nach TKA bestätigt. Auch in der Analyse der absoluten Ergebnisse (siehe Tabelle 18 und 19) zeigt sich der Anteil an Kniegelenken mit einem dCDI postoperativ <0.8 zunehmend (50 vor TKA vs. 59 nach TKA), während es zu keiner wesentlichen Veränderung des Anteils mit einem (d)CDI <0.6 (8 vor TKA, 6 nach TKA) kommt. Der absolute Anteil einer Patella infera nach Bestimmung des ISIs war zunehmend (5 vor TKA vs. 10 nach TKA).

Eine genauere Analyse unseres Studienkollektivs erbrachte einen überproportionalen Anteil an einer Patella alta präoperativ von 15.9 % beim ISI bei nur insgesamt 1.6 % beim CDI. Eine wesentlich größere Studiengruppe bei Gaillard et al. (2019) hatte insgesamt 2778 Patienten eingeschlossen, wovon nur 223 Patienten eine Patella alta (Bestimmung über den BPI) aufwiesen (entsprechend 8.03%). Die Gründe für diese unterschiedlichen Ergebnisse sind nicht sicher zu eruieren, ein systematischer Fehler im Rahmen dieser Dissertation erscheint jedoch unwahrscheinlich bei guter Korrelation der Rater untereinander. Ein Grund könnte das Anwenden verschiedener Indices zur Patellahöhenbestimmung sein.

Insgesamt ist die Studienlage hinsichtlich des Auftretens von PPI und TPI nach Operation inhomogen. Auch sind die Referenzbereiche für eine Patella norma in der Literatur nicht abschließend bewertet und die verschiedenen Studien wählen zum Teil verschiedene Indices zur Detektion der Patellahöhe und zur Differenzierung zwischen PPI und TPI (zum Beispiel CDI und BPI sowie ISI und zum Teil mISI). Des Weiteren ist der Beobachtungszeitpunkt der Patienten inhomogen. All dies muss beim Vergleich der Studienergebnisse untereinander beachtet werden.

4.7.1 Pseudo Patella infera (PPI)

Carbral et al. (2017) konnten bei n=203 Patienten (einer vergleichbaren Fallzahl zu unserer Studie mit n=154) keine signifikante Veränderung der Patellahöhe für den ISI, den CDI und den BPI feststellen, auch wenn die Tendenz einer tieferstehenden Patella gezeigt werden konnte, was passend zu den Ergebnissen unserer Arbeitsgruppe ist.

Ähnlich zu unseren Ergebnissen zeigten Kazemi et al. (2011) bei 72% der Patienten keine Veränderung der Patellahöhe, während 25% eine Erhöhung der Gelenklinie aufwiesen, was zu unseren Ergebnissen in Abbildung 20 passt.

Prudhon et al. (2018) zeigten im Gegensatz hierzu eine signifikante Veränderung der Patellahöhe nach TKA. Auch Xu. et al. (2017) zeigten ebenfalls im Gegensatz zu unseren Ergebnissen eine deutlichere Abnahme der Patellahöhe von präoperativ 0.86 auf 0.74 im Vergleich bei uns von 0.87 gegenüber 0.84. Auch die Daten von Dos-Santos et al. (2021) widersprechen unseren Ergebnissen. Bei einer Patientenzahl von n=612 entwickelten postoperativ 64 Patienten (entsprechend 10.46%) eine PPI, korrelierend zu den Ergebnissen von Xu et al. (2017).

Die Gruppe von Gatha et al. zeigte 2004 an einer Fallzahl von n=105 ebenfalls keine signifikante Veränderung der Patellahöhe, es ergab sich jedoch die Tendenz einer Zunahme des BPIs nach TKA (BPI präoperativ 0.88 und BPI postoperativ 0.93). Dies könnte sich dadurch erklären, dass bei den Patienten ein femursparendes operatives Konzept zum Einsatz kam und im Studienkollektiv die Höhe der postoperativen Gelenklinie im Vergleich zum präoperativen Befund sogar eher erniedrigt war.

Ein Grund für die unterschiedlichen Studienergebnisse könnte im angewandten Operationsverfahren liegen. Je nach Zentrum könnte teilweise ein eher Femursparendes Verfahren – unter der Prämisse, die Höhe der Gelenklinie zu erhalten und das Resektionsausmaß des Femurs zu begrenzen – angewandt worden sein.

Die Erhaltung der ursprünglichen Gelenklinienhöhe scheint eine wichtige Rolle für die Stabilität im Kniegelenk darzustellen. So konnten Martin et al. (1990) zeigen, dass bei Erhaltung der Gelenklinienhöhe auch die präoperative Stabilität erhalten bleibt (ebd.). Der geringe Cohen's d Wert für den Unterschied zwischen dem CDI vor TKA und dem dCDI nach TKA unterstreicht den lediglich geringen Effekt einer Verkleinerung des (d)CDI im Hinblick auf eine PPI bzw. sehr diskrete Erhöhung der Gelenklinie des Kniegelenks in unserem Studienkollektiv.

Die Gründe für eine notwendige Erhöhung der femorotibialen Gelenklinie sind vielfältig. Neben einer zu großzügigen Resektion des Femurs, einer unzureichenden Resektion der Tibia (bzw. Einlage einer zu dicken Tibiakomponente) oder Notwendigkeit eines dicken Inlays aufgrund fehlender Stabilität z.B. bei intraoperativer Weichteilfreisetzung kann auch eine vorbestehende Instabilität eine PPI bedingen (Kazemi et al. 2011).

Die sehr kleine Verringerung des CDI/dCDIs bzw. BPIs im Rahmen dieser Dissertation spricht dafür, dass ein femursparendes Operationsverfahren angewandt wurde.

4.7.2 Echte Patella infera (TPI)

Koshino et al. (1990) konnten an n=94 Patienten über einen längeren Beobachtungszeitraum bis zu einem Durchschnitt von 2,6 Jahren nach Operation eine signifikante Veränderung des Insall-Salvati-Index von >10% nachweisen. Diese Ergebnisse stehen vermeintlich im Widerspruch zu unseren Ergebnissen, ein quasi vernachlässigbarer Cohen's d Wert für den ISI vor und nach TKA unterstreicht die nicht relevant nachweisbare Entwicklung einer TPI bzw. Patellasehnenverkürzung. Ein genauerer Vergleich unter Berücksichtigung des Beobachtungsintervalls und Messzeitpunktes postoperativ zeigt jedoch, dass unser Messintervall wesentlich kürzer war. Koshino et al. konnten nach einem Monat ebenfalls noch keine signifikante Veränderung der Patellahöhe finden.

Diesen Sachverhalt unterstreichen auch Davies et al. (2016), die eine signifikante Verminderung des ISIs im Sinne einer Verkürzung der Patellasehne von 1.02 auf 0.96 bei einem Beobachtungsintervall von 5 Jahren zeigen konnten, während nach einem Jahr nur eine Veränderung auf 1.01 entstand. Ähnlich zu Koshino (1990) et al. zeigten Meneghini et al. (2006) in einer retrospektiven Analyse bei n=1055 Patienten, dass es in ca. 50% der Fälle zu einer Reduktion des ISIs im Sinne einer Verkürzung der Patellasehne kam und sich bei 9.8% eine TPI entsprechend einem ISI <0.8 entwickelte.

Zusammenfassend kann unter Berücksichtigung der eigenen Ergebnisse sowie der o.g. Studien festgestellt werden, dass der postoperative Anteil an TPI verschieden ist, wobei eine abschließende Bewertung hinsichtlich TPI aufgrund von Vernarbungsprozessen erst nach einer gewissen Latenz nach TKA sinnvoll ist.

Zudem könnte eine Stratifizierung des Patientenkollektiv hinsichtlich primärer oder traumatischer Indikation für die TKA interessant sein, da dies einen Einfluss auf die Inzidenz der TPI haben könnte.

4.7.3 Outcome nach TKA

Auch im Hinblick auf das klinische Outcome nach TKA bei Entwicklung einer PPI oder TPI zeigen sich unterschiedliche Studienergebnisse.

So konnten Bugelli et al. (2018) bei n=208 Patienten zwar eine signifikante Anzahl an PPI nach TKA-Implantation (26%) und bei zumindest 6.7% eine TPI nachweisen, ein Einfluss auf das klinische Outcome bestand jedoch nicht.

Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse von Aguirre-Pastor et al. 2020. Sie zeigten im Rahmen einer prospektiven Studie bei n=354 Patienten, dass es bei 4.8% zu einer TPI und bei 14.4% zu einer PPI kam. Hierbei führte eine TPI zu einem schlechteren funktionellen Outcome, bei einer PPI konnte kein signifikant negativer Effekt nachgewiesen werden.

Eine signifikante Verschlechterung des Outcomes auch bei PPI konnten Dos-Santos et al. (2021) in einer retrospektiven Analyse zeigen, was die Inhomogenität des Outcomes nach TKA unterstreicht.

Kazemi et al. 2011 zeigten eine relevante Korrelation zwischen einer tieferstehenden Patella (TPI und PPI) und anteriorem Knieschmerz sowie verringertem Bewegungsumfang (ROM).

Da eine Veränderung der Patellahöhe sowohl im Sinne einer PPI als auch einer TPI in mehreren Studien zu einem signifikant schlechteren Outcome geführt hat, sollte dies als Risikofaktor für anterioren Knieschmerz gesehen werden. Auch weil dies darüber hinaus den Bewegungsumfang einschränken kann, ist eine systematische Bestimmung der Patellahöhe präoperativ, postoperativ sowie auch intraoperativ erstrebenswert.

Ein generelles Problem bis dato ist, dass in verschiedenen Studien unterschiedliche Patellahöhenindices zur Bestimmung der Patellahöhe herangezogen werden, so dass eine einheitliche Methode – insbesondere im Hinblick auf eine bessere Vergleichbarkeit – prinzipiell erstrebenswert ist. Picken et al. (2024) analysierten verschiedene Patellahöhenindices und konnten erstmals Formeln zur Umrechnung der

Indices untereinander etablieren. Die Ergebnisse dieser Dissertationsschrift sprechen für ein einheitliches Schema zur Bestimmung der Patellahöhe prä- und postoperativ.

4.8 Limitierende Faktoren der Dissertation

Ein limitierender Faktor ist die retrospektive Analyse und Messung bereits behandelter Patienten. Der Großteil der bisherigen Studien in diesem Feld war jedoch ebenfalls retrospektiv, was somit der gängigen Praxis für die Validierung bestimmter Messwerte entspricht. Zudem war die Anzahl der untersuchten Kniegelenke begrenzt. Verglichen zu anderen Studien, in denen eine Validierung eines Index durchgeführt wurde, sind jedoch ähnliche Fallzahlen verwendet worden. Insgesamt erfolgten im Rahmen dieser Arbeit 2426 Indexbestimmungen, was auch im Hinblick auf die verfügbaren Ressourcen bewertet werden muss. Die Tatsache, dass sowohl ein Facharzt für Radiologie als auch ein Facharzt für Orthopädie und Unfallchirurgie, sowie ein weniger erfahrener Rater die Messungen durchführten, kann eine gute Übertragung auf das klinische Setting geben, insbesondere, da die Patellahöhe im täglichen Geschäft vor allem durch die involvierten Kliniker mit einem unterschiedlichen Maß an Erfahrung bestimmt wird.

Unklar verblieb, wieso in diesem Studienkollektiv ein vergleichsweise hoher Anteil an Patienten mit einer Patella alta vorhanden war.

Prinzipiell könnte zu einer Validierung auch das Miteinbeziehen von CT- oder MRT-Bildgebung von Kniegelenken erfolgen und es sollte eine Validierung auf weitere Prothesengruppen wie eine Schlittenprothese (z.B. isoliert bei medialer oder lateraler Gonarthrose) im Verlauf erfolgen. Interessanterweise konnten Davies et al. (2016) keine Veränderung der Patellahöhe im Sinne einer TPI bei medialer Schlittenprothese zeigen, während nach totaler Knieendoprothese eine Veränderung in Richtung TPI nachweisbar war.

Ein weiterer Kritikpunkt am Studiendesign ist daher auch das Verwenden von frühen postoperativen Röntgenbildern, da Narbenbildungen und Verwachsungen ebenfalls zur Abnahme der Patellahöhe beitragen, jedoch teilweise erst im späteren Verlauf bis hin zu einem Zeitraum zwischen einem und fünf Jahren postoperativ auftreten (Chonko et al. 2004; Davies et al. 2016). Deshalb wäre ein deutlich längeres postoperatives Beobachtungsintervall zu diskutieren. Auch hätte das Patientenkollektiv strikter

gewählt werden können, z.B. wäre zu diskutieren, beispielsweise nur Patienten mit primärer Gonarthrose einzuschließen.

Für weitere Forschungsvorhaben wäre zudem ein Vergleich hinsichtlich der Ätiologie der Kniearthrose interessant, da Faktoren wie z.B. stattgehabte Traumata ebenfalls einen Einfluss auf die Länge der Patellasehne haben könnten oder eine Proximalisierung der Gelenklinie im Hinblick auf die Stabilität notwendig machen könnten.

Im Hinblick darauf, dass eine entscheidende Komponente der Methodik die Operationstechnik im Hinblick auf eine PPI ist, wäre eine Ausweitung der Messungen auf verschiedene Zentren zu diskutieren, z.B. auch auf Häuser mit geringer Fallzahl oder Berücksichtigung von Häusern mit einem anderen präoperativen Planungssystem. Eine weitere Objektivierung der Ergebnisse könnte zudem durch die Beteiligung weiterer unabhängiger Untersucher erzielt werden, was allerdings nicht ohne eine zusätzliche finanzielle und personelle Unterstützung zu leisten ist. Sollte man sich für so ein Design entscheiden wäre eine prospektive Studie, die auch das patientenindividuelle Outcome (PROMs etc.) berücksichtigt, anzustreben. Im Rahmen einer prospektiven Studie wäre es zudem sinnvoll zu evaluieren, ob bestimmte Maßnahmen ergriffen werden können, um das klinische Outcome des Patienten mit PPI zu verbessern, da eine PPI röntgentechnisch bereits im ersten postoperativen Röntgenbild sichtbar ist im Sinne einer erhöhten Gelenklinie. Es wäre beispielsweise interessant zu sehen, ob Patienten mit einer postoperativen PPI von einem individuell abgestimmten Rehabilitationskonzept im Hinblick auf den Bewegungsumfang und die Schmerzreduktion profitieren würden.

Ein universaler Patellahöhenindex für Kniegelenke mit und ohne einliegende Implantate konnte nicht entwickelt werden, dafür wurde jedoch ein Workflow zur Patellahöhenbestimmung erstellt, der diesen Index ersetzen soll und bereits in einer weiteren Dissertationsschrift mit Korrelation zu klinischen Befunden angewendet werden konnte (Reijabia, 2023). Als Kritikpunkt am Agreement für die Validität muss die Anwendung eines Surrogatparameters (Differenz für die Patellahöhe vor und nach TKA) gesehen werden, wobei dieser insbesondere auch im Hinblick auf die Fragestellung ein sinnvoll gewählter Surrogatparameter ist.

5 Zusammenfassung

Das Kniegelenk, als größtes Gelenk des menschlichen Körpers, fungiert als Drehscharniergelenk und ist häufig von degenerativen Erkrankungen wie Arthrose betroffen. Eine gängige Behandlungsmethode für fortgeschrittene Arthrose ist die Implantation einer Totalendoprothese des Kniegelenks (TKA). Im Rahmen einer TKA kann es zu einer Verminderung der Patellahöhe kommen, die wiederum zu Schmerzen und Bewegungseinschränkungen führen kann. Es ist daher von großer Bedeutung, die Patellahöhe vor und nach einer TKA genau zu bestimmen. Eine TKA kann sowohl zu einer echten Patella infera führen, z.B. durch Verkürzung der Patellasehne als auch zu einer Pseudopatella infera, z.B. durch Anhebung der ursprünglichen femorotibialen Gelenklinie.

Es existieren bereits zahlreiche Indices zur Bestimmung der Patellahöhe, von denen jeder seine Vor- und Nachteile hat. Ein allgemeines Problem besteht darin, dass nach einer TKA die Landmarken für einige dieser Indices durch die Knochenresektion verloren gehen, insbesondere bei tibial mitreferenzierten Indices. Vor diesem Hintergrund war ein Hauptziel dieser Dissertationsschrift die Validierung eines rein femoral-referenzierten Index. Zusätzlich dazu sollte eine Variation des Caton-Deschamps-Index validiert werden, da dieser ein weit verbreiteter und einfach zu bestimmender Index ist.

Im Rahmen dieser Dissertation wurden verschiedene Indices (einschließlich CDI/dCDI, ISI, BPI und ein eigener FRI) untersucht und ihre Validität, das Agreement und die Reliabilität überprüft. Des Weiteren wurde eine analoge und eine digitale Messmethode verglichen. Ein besonderes Augenmerk lag zudem darauf, ob es nach einer TKA zu einer relevanten Veränderung der Patellahöhe kommt.

Hinsichtlich der Reliabilität zeigten alle gemessenen Indices eine äußerst zuverlässige Intra- und Inter-Rater-Reliabilität. Insbesondere der Insall-Salvati Index stach durch eine herausragende Inter-Rater-Reliabilität hervor. Auch der Vergleich der Messmethoden ergab eine konsistente Vergleichbarkeit, wobei die digitale Messung generell eine Tendenz für höhere Werte zeigte. In Bezug auf die Validität zeigte sich eine starke Übereinstimmung für den CDI/dCDI und BPI, welche zur Diagnose einer Pseudo Patella infera herangezogen werden können. Die Korrelation mit dem ISI, der die tatsächliche Verkürzung der Patellasehne misst, war demgegenüber konklusiv weniger deutlich ausgeprägt. Eine Korrelation zwischen dem FRI und den bereits

veröffentlichten Indices konnte nicht festgestellt werden. Dies könnte auf die starke Abhängigkeit des Index vom Winkel der Patella zum Femur, der Verkipfung des Femurs in der Horizontalebene sowie einer möglichen Abhängigkeit vom Flexionsgrad des Kniegelenks zurückzuführen sein.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass folgendes Konzept besonders geeignet ist zur Beurteilung einer Pseudo Patella infera in Abgrenzung zu einer echten Patella infera: Man sollte den CDI/dCDI in Kombination mit dem ISI bestimmen. Die nach TKA häufig zu beobachtende Pseudo Patella infera liegt dann vor, wenn der Index nach Caton Deschamps sinkt, aber der ISI prä- und postoperativ unverändert bleibt. So kann man auf die Ursache der Patella infera (Patellasehnenverkürzung durch Vernarbung versus relativer Patellatiefstand durch Elevation der Gelenklinie) schließen und ggf. kausale Therapieoptionen erwägen.

Im Vergleich zu den in der Literatur veröffentlichten Ergebnissen war der gemessene Effekt einer totalen Knieprothesenimplantation auf die Patellahöhe im Rahmen dieser Studie deutlich geringer. Dies könnte beispielsweise an Unterschieden in der Operationstechnik, z.B. einem Femur-sparenden Verfahren oder einem weichteilschonenden Vorgehen im Hinblick auf eine PPI oder am Zeitpunkt der postoperativen Kontrollbildgebung liegen, die im Hinblick auf eine TPI zur Bestimmung des postoperativen Index herangezogen wurde.

Für zukünftige Studien ermöglicht das hier dargestellte Konzept zur Messung der Patellahöhe vor und nach Knieendoprothesenimplantation eine verbesserte Vergleichbarkeit und damit auch eine zuverlässigere Korrelation der radiologischen Patellahöhe mit klinischen Parametern.

6 Literaturverzeichnis

1. Aguirre-Pastor, A., Ortolá, D. J., Lizaur-Utrilla, A., Rosa, M. A., & Lopez-Prats, F. A. (2020). Is pseudo-patella baja really a serious complication of total knee arthroplasty?. *The Journal of arthroplasty*, 35(2), 557-562.
2. Akoglu, H. (2018). User's guide to correlation coefficients. *Turkish journal of emergency medicine*, 18(3), 91-93.
3. Ali, S. A., Helmer, R., & Terk, M. R. (2009). Patella alta: lack of correlation between patellotrochlear cartilage congruence and commonly used patellar height ratios. *American Journal of Roentgenology*, 193(5), 1361-1366.
4. Anagnostakos, K., Lorbach, O., Reiter, S., & Kohn, D. (2011). Comparison of five patellar height measurement methods in 90° knee flexion. *International orthopaedics*, 35(12), 1791–1797.
5. Aumüller, G., Aust, G., Conrad, A., Engele, J., Kirsch, J., Maio, G., ... & Zilch, H. G. (2020). *Duale Reihe Anatomie (Vol. 1)*. Stuttgart: Thieme.
6. Bannuru RR, Osani MC, Vaysbrot EE, Arden NK, Bennell K, Bierma-Zeinstra SM, et al. OARSI guidelines for the non-surgical management of knee, hip, and polyarticular osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2019;27(11):1578-89.
7. Bellamy, N. (2005). The WOMAC knee and hip osteoarthritis indices: development, validation, globalization and influence on the development of the AUSCAN hand OA indices. *Clinical and experimental rheumatology*, 23(5), S148.
8. Biedert, R. M., & Albrecht, S. (2006). The patellotrochlear index: a new index for assessing patellar height. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 14(8), 707–712.
9. Biedert, R. M., & Tscholl, P. M. (2017). Patella alta: a comprehensive review of current knowledge. *Am J Orthop*, 46(06), 290-300.
10. Blackburne, J. S., & Peel, T. E. (1977). A new method of measuring patellar height. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 59(2), 241-242.
11. Blagojevic, M., Jinks, C., Jeffery, A., & Jordan, 1. (2010). Risk factors for onset of osteoarthritis of the knee in older adults: a systematic review and meta-analysis. *Osteoarthritis and cartilage*, 18(1), 24-33.
12. Brander, V. A., Stulberg, S. D., Adams, A. D., Harden, R. N., Bruehl, S., Stanos, S. P., & Houle, T. (2003). Predicting total knee replacement pain: a prospective, observational study. *Clinical orthopaedics and related research*, (416), 27–36.
13. Bugelli, G., Ascione, F., Cazzella, N., Franceschetti, E., Franceschi, F., Dell'Osso, G., Svantesson, E., Samuelsson, K., & Giannotti, S. (2018). Pseudo-patella baja: a minor yet frequent complication of total knee arthroplasty. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 26(6), 1831–1837.

14. Bullinger, M. (1995). German translation and psychometric testing of the SF-36 health survey: preliminary results from the IQOLA project. *Social science & medicine*, 41(10), 1359-1366.
15. Burgess, R. C. (1989). A new method of determining patellar position. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 29(4), 389-389.
16. Cabral, F., Sousa-Pinto, B., Pinto, R., & Torres, J. (2017). Patellar height after total knee arthroplasty: comparison of 3 methods. *The Journal of arthroplasty*, 32(2), 552-557.
17. Cameron, H. U., & Jung, Y. B. (1988). Patella baja complicating total knee arthroplasty: a report of two cases. *The Journal of Arthroplasty*, 3(2), 178-180.
18. Caton, J., Deschamps, G., Chambat, P., Lerat, J. L., & Dejour, H. (1982). Les rotules basses. A propos de 128 observations [Patella infera. Apropos of 128 cases]. *Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur*, 68(5), 317-325.
19. Caton, J. H., Prudhon, J. L., Aslanian, T., & Verdier, R. (2016). Patellar height assessment in total knee arthroplasty: a new method. *International orthopaedics*, 40(12), 2527-2531.
20. Carr, A. J., Robertsson, O., Graves, S., Price, A. J., Arden, N. K., Judge, A., & Beard, D. J. (2012). Knee replacement. *Lancet (London, England)*, 379(9823), 1331-1340.
21. Chareancholvanich, K., & Narkbunnam, R. (2012). Novel method of measuring patellar height ratio using a distal femoral reference point. *International orthopaedics*, 36(4), 749-753.
22. Chonko, D. J., Lombardi Jr, A. V., & Berend, K. (2004). Patella baja and total knee arthroplasty (TKA): etiology, diagnosis, and management. *Surgical technology international*, 12, 231-238.
23. Conaghan, P. G., Kloppenburg, M., Schett, G., Bijlsma, J. W., & EULAR osteoarthritis ad hoc committee (2014). Osteoarthritis research priorities: a report from a EULAR ad hoc expert committee. *Annals of the rheumatic diseases*, 73(8), 1442-1445.
24. Cross, M., Smith, E., Hoy, D., Nolte, S., Ackerman, I., Fransen, M., ... & March, L. (2014). The global burden of hip and knee osteoarthritis: estimates from the global burden of disease 2010 study. *Annals of the rheumatic diseases*, 73(7), 1323-1330.
25. Dajani, K. A., Stuart, M. J., Dahm, D. L., & Levy, B. A. (2010). Arthroscopic treatment of patellar clunk and synovial hyperplasia after total knee arthroplasty. *The Journal of arthroplasty*, 25(1), 97-103.
26. Dammerer, D., Liebensteiner, M. C., Kujala, U. M., Emmanuel, K., Kopf, S., Dirisamer, F., & Giesinger, J. M. (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(4), 527–535.
27. Davies, G. S., van Duren, B., Shorthose, M., Roberts, P. G., Morley, J. R., Monk, A. P., Murray, D. W., & Pandit, H. G. (2016). Changes in patella tendon length over 5 years after different types of knee arthroplasty. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 24(9), 3029–3035.
 28. Dawson, J., Fitzpatrick, R., Murray, D., & Carr, A. (1998). Questionnaire on the perceptions of patients about total knee replacement. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 80(1), 63-69.
 29. de Carvalho, A., Holst Andersen, A., Topp, S., & Jurik, A. G. (1985). A method for assessing the height of the patella. *International orthopaedics*, 9(3), 195–197.
 30. Dejour, H. (1996). Instabilités de la rotule. *Encycl Méd Chir, appareil locomoteur*.
 31. Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie, S2k-Leitlinie Indikation Knieendoprothese, Update 1 04/2023 der Erstfassung aus 01/2018, verfügbar unter:
https://register.awmf.org/assets/guidelines/187004k_S3_Indikation_Knieendoprot_hese_2023-06.pdf, Zugriff am 09.03.2024.
 32. Dos-Santos, G., Gutierrez, M., Leite, M. J., & Barros, A. S. (2021). Pseudo-patella baja after total knee arthroplasty: Radiological evaluation and clinical repercussion. *The Knee*, 33, 334-341.
 33. Felson DT, Zhang Y. An update on the epidemiology of knee and hip osteoarthritis with a view to prevention. *Arthritis Rheum*. 1998;41(8):1343-55.
 34. Flandry, F., & Hommel, G. (2011). Normal anatomy and biomechanics of the knee. *Sports medicine and arthroscopy review*, 19(2), 82-92.
 35. Flören, M., Davis, J., Peterson, M. G., & Laskin, R. S. (2007). A mini-midvastus capsular approach with patellar displacement decreases the prevalence of patella baja. *The Journal of arthroplasty*, 22(6), 51-57.
 36. Gaillard, R., Bankhead, C., Budhiparama, N., Batailler, C., Servien, E., & Lustig, S. (2019). Influence of patella height on total knee arthroplasty: outcomes and survival. *The Journal of arthroplasty*, 34(3), 469-477.
 37. Gatha, N. M., Clarke, H. D., Fuchs, R., Scuderi, G. R., & Insall, J. N. (2004). Factors affecting postoperative range of motion after total knee arthroplasty. *The journal of knee surgery*, 17(04), 196-202.
 38. Gerke O. (2020). Reporting Standards for a Bland-Altman Agreement Analysis: A Review of Methodological Reviews. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 10(5), 334.
 39. Graulich, T., Kranz, C., Zhang, D., Oergel, M., Pacha, T. O., Haertle, M., ... & Panzica, M. (2020). Reduction of patella-baja and pseudo-patella-baja does not improve range of motion in patients after mega-TKA. *in vivo*, 34(3), 1153-1158.

40. Grelsamer, R. P., & Meadows, S. (1992). The modified Insall-Salvati ratio for assessment of patellar height. *Clinical orthopaedics and related research*, (282), 170–176.
41. Grelsamer, R. P. (2002). Patella baja after total knee arthroplasty: is it really patella baja?. *The Journal of arthroplasty*, 17(1), 66-69.
42. Han, H. S., Yu, C. H., Shin, N., Won, S., & Lee, M. C. (2019). Femoral joint line restoration is a major determinant of postoperative range of motion in revision total knee arthroplasty. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 27(7), 2090–2095.
43. Han, H., & Zhang, X. (2020). A new method for evaluation of patellar height and the position of the joint line before and after total knee arthroplasty. *BMC musculoskeletal disorders*, 21(1), 768.
44. Harmelink, K. E. M., Zeegers, A. V. C. M., Hullegie, W., Hoogeboom, T. J., Nijhuis-van der Sanden, M. W. G., & Staal, J. B. (2017). Are There Prognostic Factors for One-Year Outcome After Total Knee Arthroplasty? A Systematic Review. *The Journal of arthroplasty*, 32(12), 3840–3853.e1. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2017.07.011>
45. Hirschmann, A., & Hirschmann, M. T. (2016, February). Chronic knee pain: clinical value of MRI versus SPECT/CT. In *Seminars in musculoskeletal radiology* (Vol. 20, No. 01, pp. 003-011). Thieme Medical Publishers.
46. Hochberg MC, Altman RD, April KT, Benkhalti M, Guyatt G, McGowan J, et al. American College of Rheumatology 2012 recommendations for the use of nonpharmacologic and pharmacologic therapies in osteoarthritis of the hand, hip, and knee. *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2012;64(4):465-74.
47. Hockings, M., & Cameron, J. C. (2004). Patella baja following chronic quadriceps tendon rupture. *The Knee*, 11(2), 95-97.
48. Igoumenou, V. G., Dimopoulos, L., & Mavrogenis, A. F. (2019). Patellar height assessment methods: an update. *JBJs reviews*, 7(1), e4.
49. Insall, J., & Salvati, E. (1971). Patella position in the normal knee joint. *Radiology*, 101(1), 101-104.
50. Insall, J. N., Dorr, L. D., Scott, R. D., & Scott, W. N. (1989). Rationale of the Knee Society clinical rating system. *Clinical orthopaedics and related research*, (248), 13–14.
51. Jawhar, A., Sohoni, S., Shah, V., & Scharf, H. P. (2014). Alteration of the patellar height following total knee arthroplasty. *Archives of orthopaedic and trauma surgery*, 134(1), 91–97.

52. Jerosch J and Heisel J, (1998), *Knieendoprothetik: Indikationen, Operationstechnik, Nachbehandlung, Begutachtung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
53. Johnson VL, Hunter DJ. The epidemiology of osteoarthritis. *Best Pract Res Clin Rheumatol*. 2014;28(1):5-15.
54. Kakazu, R., Luczak, S. B., Grimm, N. L., Fitzsimmons, K. P., Andrish, J. T., Farrow, L. D., & Pace, J. L. (2022). Patellar tendon imbrication for patella alta. *Arthroscopy Techniques*, 11(1), e7-e12.
55. Kannus, P. A. (1992). Long patellar tendon: radiographic sign of patellofemoral pain syndrome--a prospective study. *Radiology*, 185(3), 859-863.
56. Kawahara, S., Matsuda, S., Fukagawa, S., Mitsuyasu, H., Nakahara, H., Higaki, H., ... & Iwamoto, Y. (2012). Upsizing the femoral component increases patellofemoral contact force in total knee replacement. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 94(1), 56-61.
57. Kazemi, S. M., Besheli, L. D., Eajazi, A., Sajadi, M. R. M., Okhovatpoor, M. A., Zanganeh, R. F., & Minaei, R. (2011). Pseudo-patella baja after total knee arthroplasty. *Medical science monitor: international medical journal of experimental and clinical research*, 17(5), CR292.
58. Kellgren, J. H., & Lawrence, J. S. (1957). Radiological assessment of osteoarthrosis. *Ann Rheum Dis*, 16(4), 494-502.
59. Kesmezacar, H., Erginer, R., Ogut, T., Seyahi, A., Babacan, M., & Tenekecioglu, Y. (2005). Evaluation of patellar height and measurement methods after valgus high tibial osteotomy. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 13(7), 539-544.
60. Kessler, O., Patil, S., Colwell Jr, C. W., & D'Lima, D. D. (2008). The effect of femoral component malrotation on patellar biomechanics. *Journal of biomechanics*, 41(16), 3332-3339.
61. Konrads, C., Grosse, L. C., Ahmad, S. S., Springer, F., Schreiner, A. J., Schmidutz, F., & Erne, F. (2021). Reliability of a Caton-Deschamps-derived patella height index for knee arthroplasty. *International orthopaedics*, 45(8), 2001-2005.
62. Konrads, C., Rejaibia, J., Grosse, L. C., Springer, F., Schreiner, A. J., Schmidutz, F., & Erne, F. (2021). Patella-height analysis and correlation with clinical outcome after primary total knee arthroplasty. *Journal of Orthopaedics*, 23, 169-174.
63. Konrads, C., Schreiner, A. J., Cober, S., Schüll, D., Ahmad, S. S., & Alshrouf, M. A. (2022). Evaluation of patella height in native knees and arthroplasty: an instructional review. *SICOT-J*, 8.
64. Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of chiropractic medicine*, 15(2), 155-163.

65. Koshino, T., & Sugimoto, K. (1989). New measurement of patellar height in the knees of children using the epiphyseal line midpoint. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 9(2), 216-218.
66. Koshino, T., Ejima, M., Okamoto, R., & Morii, T. (1990). Gradual low riding of the patella during postoperative course after total knee arthroplasty in osteoarthritis and rheumatoid arthritis. *The Journal of Arthroplasty*, 5(4), 323-327.
67. Kwiecien, R., Kopp-Schneider, A., & Blettner, M. (2011). Übersichtsarbeit-Konkordanzanalyse-Teil 16 der Serie zur Bewertung wissenschaftlicher Publikationen. *Deutsches Arzteblatt-Arztliche Mitteilungen-Ausgabe A*, 108(30), 515.
68. Laurin, C. A. (1977). The investigation of the patellofemoral joint. *J Bone Joint Surg Br*, 59, 107.
69. Lin, F., Wilson, N. A., Makhsous, M., Press, J. M., Koh, J. L., Nuber, G. W., & Zhang, L. Q. (2010). In vivo patellar tracking induced by individual quadriceps components in individuals with patellofemoral pain. *Journal of biomechanics*, 43(2), 235-241.
70. Linclau L. (1984). Measuring patellar height. *Acta orthopaedica Belgica*, 50(1), 70–74.
71. Lum, Z. C., Saiz, A. M., Pereira, G. C., & Meehan, J. P. (2020). Patella Baja in Total Knee Arthroplasty. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 28(8), 316–323.
72. Magnussen, R. A., De Simone, V., Lustig, S., Neyret, P., & Flanigan, D. C. (2014). Treatment of patella alta in patients with episodic patellar dislocation: a systematic review. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 22(10), 2545–2550.
73. Malo, M., & Vince, K. G. (2003). The unstable patella after total knee arthroplasty: etiology, prevention, and management. *JAAOS-Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 11(5), 364-371.
74. Martin, J. W., & Whiteside, L. A. (1990). The influence of joint line position on knee stability after condylar knee arthroplasty. *Clinical orthopaedics and related research*, (259), 146–156.
75. McAlindon, T. E., Bannuru, R. R., Sullivan, M. C., Arden, N. K., Berenbaum, F., Bierma-Zeinstra, S. M., Hawker, G. A., Henrotin, Y., Hunter, D. J., Kawaguchi, H., Kwoh, K., Lohmander, S., Rannou, F., Roos, E. M., & Underwood, M. (2014). OARSI guidelines for the non-surgical management of knee osteoarthritis. *Osteoarthritis and cartilage*, 22(3), 363–388.
76. Mortensen, A. J., Ludwig, T. C., Adams, B. M., Adeyemi, T. F., & Aoki, S. K. (2021). The blackburne–peel index for determining patellar height is affected by tibial slope. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, 3(2), e359-e365.

77. Munch, J. L., Sullivan, J. P., Nguyen, J. T., Mintz, D., Green, D. W., Shubin Stein, B. E., & Strickland, S. (2016). Patellar articular overlap on MRI is a simple alternative to conventional measurements of patellar height. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 4(7), 2325967116656328.
78. Nham, F. H., Patel, I., Zalikha, A. K., & El-Othmani, M. M. (2023). Epidemiology of primary and revision total knee arthroplasty: analysis of demographics, comorbidities and outcomes from the national inpatient sample. *Arthroplasty*, 5(1), 18.
79. Norman, O., Egund, N., Ekelund, L., & Rünow, A. (1983). The vertical position of the patella. *Acta orthopaedica Scandinavica*, 54(6), 908-913.
80. Petersen, W., Ellermann, A., Gösele-Koppenburg, A., Best, R., Rembitzki, I. V., Brüggemann, G. P., & Liebau, C. (2014). Patellofemoral pain syndrome. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 22(10), 2264–2274. <https://doi.org/10.1007/s00167-013-2759-6>
81. Picken, S., Summers, H., & Al-Dadah, O. (2024). Patella height measurements in patients with patellofemoral instability: the power to predict patella height indices. *Archives of orthopaedic and trauma surgery*, 144(4), 1511–1522.
82. Postler, A., Lützner, C., Beyer, F., Tille, E., & Lützner, J. (2018). Analysis of Total Knee Arthroplasty revision causes. *BMC musculoskeletal disorders*, 19(1), 55.
83. Prescher A (2011) Anatomie des Kniegelenks (Articulatio genus), in AE-Manual der Endoprothetik. Springer: p.1-18.
84. Prudhon, J. L., Caton, J. H., Aslanian, T., & Verdier, R. (2018). How is patella height modified after total knee arthroplasty?. *International orthopaedics*, 42(2), 311–316.
85. Pullig, O., Pfander, D., & Swoboda, B. (2001). Molekulare Grundlagen der Arthroseinduktion und-progression. *Der Orthopäde*, 11(30), 825-8
86. Rejaibia, J. (2023). Einfluss der Patellahöhe auf die klinischen Ergebnisse nach Knieendoprothesenimplantation (Doctoral dissertation, Universität Tübingen).
87. Rogers, B. A., Thornton-Bott, P., Cannon, S. R., & Briggs, T. W. R. (2006). Interobserver variation in the measurement of patellar height after total knee arthroplasty. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 88(4), 484-488.
88. Romero, J., Borgeat, A., & Cartier, P. (1999). Patella baja tiologie, Klinik und Therapie. *Arthroskopie*, 5(12), 237-245.
89. Schindler O. S. (2012). Basic kinematics and biomechanics of the patellofemoral joint part 2: the patella in total knee arthroplasty. *Acta orthopaedica Belgica*, 78(1), 11–29.
90. Schreiner, A. J., Spiegel, L., Yan, S. G., Konrads, C., Erne, F., Hemmann, P., & Schmidutz, F. (2023). Evaluation of modified and newly applied patella height

indices in primary total knee arthroplasty. *Skeletal Radiology*, 52(1), 73-82.

91. Talic-Tanovic, A., Hadziahmetovic, Z., Madjar-Simic, I., & Papovic, A. (2017). Comparison of clinical and radiological parameters at knee osteoarthritis. *Medical Archives*, 71(1), 48.
92. van Duijvenbode, D., Stavenuiter, M., Burger, B., van Dijke, C., Spermon, J., & Hoozemans, M. (2016). The reliability of four widely used patellar height ratios. *International orthopaedics*, 40(3), 493–497.
93. Vandeputte, F. J., & Vandenneucker, H. (2017). Proximalisation of the tibial tubercle gives a good outcome in patients undergoing revision total knee arthroplasty who have pseudo patella baja. *The Bone & Joint Journal*, 99(7), 912-916.
94. Verhulst, F. V., van Sambeek, J. D. P., Olthuis, G. S., van der Ree, J., & Koëter, S. (2020). Patellar height measurements: Insall-Salvati ratio is most reliable method. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 28(3), 869–875.
95. Waimann, C. A., Fernandez-Mazarambroz, R. J., Cantor, S. B., Lopez-Olivo, M. A., Zhang, H., Landon, G. C., ... & Suarez-Almazor, M. E. (2014). Cost-effectiveness of total knee replacement: a prospective cohort study. *Arthritis care & research*, 66(4), 592-599.
96. Xu, B., Xu, W. X., Lu, D., Sheng, H. F., Xu, X. W., & Ding, W. G. (2017). Application of different patella height indices in patients undergoing total knee arthroplasty. *Journal of orthopaedic surgery and research*, 12(1), 191.
97. Zhang, Y., & Jordan, J. M. (2010). Epidemiology of osteoarthritis. *Clinics in geriatric medicine*, 26(3), 355-369.

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der BG Klinik Tübingen unter der Betreuung von Prof. Dr. Christian Konrads durchgeführt. Die Konzeption der Studie und die Entwicklung des femoral-referenzierten Patellahöhenindex erfolgten in enger Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Christian Konrads.

Die Messungen wurden nach Schulung durch Prof. Dr. Christian Konrads von mir eigenständig durchgeführt. Zusätzliche Messungen wurden für den Validierungsprozess zu Vergleichszwecken von Prof. Dr. Christian Konrads und Prof. Dr. Fabian Springer durchgeführt.

Die statistische Auswertung wurde unter Einbeziehung einer Beratung durch das Institut für Biometrie der Universität Tübingen von mir durchgeführt.

Ich versichere, dass ich das Manuskript selbstständig verfasst habe und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen verwendet habe.

Tübingen, den 04.04.2024

8 Veröffentlichungen

Teile der erhobenen Ergebnisse und Erkenntnisse der vorliegenden Dissertationsschrift sind bereits in folgender Publikation veröffentlicht worden:

Konrads, C., Grosse, L. C., Ahmad, S. S., Springer, F., Schreiner, A. J., Schmidutz, F., & Erne, F. (2021). Reliability of a Caton-Deschamps-derived patella height index for knee arthroplasty. *International Orthopaedics*, 1-5.

Konrads, C., Rejaibia, J., Grosse, L. C., Springer, F., Schreiner, A. J., Schmidutz, F., & Erne, F. (2021). Patella-height analysis and correlation with clinical outcome after primary total knee arthroplasty. *Journal of Orthopaedics*, 23, 169-174.

9 Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt zunächst meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Christian Konrads, für seine hervorragende Betreuung während meiner Promotionszeit. Seine unermüdliche Unterstützung, die Vielzahl an guten Ideen und Anregungen sowie seine kritischen Anmerkungen haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Sein Engagement und seine fachliche Expertise haben das Projekt bereichert und wertvolle Erkenntnisse ermöglicht. Explizit gefreut hat mich, dass gewonnene Erkenntnisse in weiteren Projekten Anwendung gefunden haben.

Zudem möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. Fabian Springer bedanken, der sich großzügig die Zeit genommen hat, um bei der Vermessung der Röntgenbilder zu helfen.

Meiner Familie und meinen Freunden möchte ich von Herzen danken für ihre bedingungslose Unterstützung in allen Lebenslagen. Ihre Liebe, ihr Vertrauen und ihre Ermutigung haben mir stets die Kraft gegeben, meinen eigenen Weg zu gehen.

Ein besonderer Dank gebührt Björn für seine Bereitschaft, sich jeder Herausforderung mit mir gemeinsam zu stellen.

Herzlichen Dank.