

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie

Sektion Orthopädie

der Universität zu Lübeck

Leitung: Prof. Dr. med. Martin Russlies

Einfluss der kniegelenknahen passageren Hemiepiphyseodese mit der “eight-Plate™” auf
die frontale Kniegelenkebene

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der Universität zu Lübeck

- Aus der Sektion Medizin –

Vorgelegt von

Nils Heinrich Wolfgang Kudernatsch

aus Reutlingen

Lübeck 2016

1. Berichterstatter/in: Prof. Dr. med. Martin Russlies

2. Berichterstatter/in: Priv.-Doz. Dr. med. Dr. med. dent. Hans-Christian Jacobsen

Tag der mündlichen Prüfung: 11.07.2017

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 11.07.2017

-Promotionskommission der Sektion Medizin-

1. Einleitung und Fragestellung.....	1
1.1 Längenwachstum der unteren Extremität	1
1.2 Die Epiphysenfuge.....	2
1.2.1 Geschlechtsspezifische Wachstumskurven und Perzentilen.....	4
1.2.2 Die physiologische Entwicklung der Beinachse während des Wachstums.....	4
1.3 Beinachsabweichungen in der frontalen Ebene	5
1.3.1 Grundlagen physiologischer und pathologischer Achsverhältnisse der Beine.....	5
1.3.2 Arten der Beinachsfehlstellungen in der frontalen Ebene	7
1.3.3 Ätiopathologie.....	8
1.4 Epiphyseodeseverfahren	9
1.4.1 Permanente Epiphyseodesen.....	9
1.4.2 Temporäre Epiphyseodesen	9
1.5 Korrekturverläufe unter passagerer Epiphyseodese mit der eight-Plate™	14
1.5.1 Distal femorales Vorgehen	14
1.5.2 Proximal tibiales Vorgehen.....	15
1.5.3 Kombiniert tibiofemorales Vorgehen.	16
1.6 Korrekturverlust nach erfolgter Achskorrektur	17
1.7 Fragestellung.....	18
2. Material und Methoden.....	20
2.1 Datenerhebung	20
2.2 Erhobene klinische Parameter	20
2.3 Patientenkollektiv	22
2.4 Radiologische Befunderhebung.....	23
2.5 Erhobene röntgenologische Parameter	25
2.5.1 Bestimmung der Gelenksmittelpunkte.....	25
2.5.2 Bestimmung der tibialen und femoralen mechanischen Knochenachse	26
2.5.3 Mechanischer tibiofemoraler Winkel	27
2.5.4 Mechanische Beinachsabweichung (MAD)	27
2.5.5 Mechanischer lateraler distaler femoraler Winkel (mLDFA).....	29
2.5.6 Mechanischer medialer proximaler tibialer Winkel (mMPTA)...	29
2.5.7 Tibiaplateaubreite	31
2.5.8 MAD zur Tibiaplateaubreite	31
2.6 Verlauf der frontalen Kniegelenkebene	32
2.7 Joint line convergence angle (JLCA)	34

2.8 Frontaler Gelenkebenen-Boden-Winkel (fGBW).....	35
2.9 Statistik	39
2.10 Datendarstellung und -auswertung	40
3. Ergebnisse.....	41
3.1 Implantatverweildauer von Epiphyseodesen	41
3.2 Gelenkwinkel- und Beinachsänderungen	42
3.2.1 Entwicklung der mechanischen Beinachse anhand des mechanischen tibiofemorale Winkels	42
3.2.2 Entwicklung des mL DFA	44
3.2.3 Entwicklung des m MPTA.....	45
3.3 Änderung der Beinachsen und Gelenkwinkel (°) im Verhältnis zum Körperlängenwachstum (cm)	46
3.3.1 Änderung des mechanischen tibiofemorale Winkels (°) im Verhältnis zum Körperlängenwachstum (cm) bei Genua valga und Genua vara.....	46
3.3.2 Singuläre Epiphyseodesen / kombinierte Epiphyseodesen	47
3.4 Frontaler Gelenkebenen-Boden-Winkel (fGBW).....	49
3.4.1 Allgemeine Entwicklung des fGBW (n = 78)	49
3.4.2 Vergleich der Entwicklung des fGBW bei Einzel- Hemiepiphyseodesen (n = 57) und bei femorotibial-kombinierten Hemiepiphyseodesen (n = 21)	50
3.4.3 Entwicklung des fGBW unter Therapie in Abhängigkeit zum Ausgangsbefund	53
3.4.4 Korrekturverlusten in Abhängigkeit zum fGBW	54
3.4.5 Binäre logistische Regressionsanalyse	56
4. Diskussion	60
4.1 Evaluation des Einflusses der Hemiepiphyseodese auf die frontale Kniegelenkebene.....	62
4.1.1 Entwicklung des fGBW im Verlauf der Achskorrektur	62
4.1.2 Änderung des Verlaufes des fGBW in Abhängigkeit zum Hemiepiphyseodeseverfahren	64
4.2 Einfluss der frontalen Kniegelenkebene auf die spätere Entwicklung eines Korrekturverlustes	65
4.3 Änderung der Beinachsen und Gelenkwinkel (°) pro cm Körperlängenwachstum	67
4.4 Stärken und Schwächen dieser Studie, klinische Konsequenz und Ausblick	69

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung	71
6. Literaturverzeichnis.....	73
7. Abbildungsverzeichnis.....	76
8. Tabellenverzeichnis.....	79
9. Abkürzungsverzeichnis.....	81
10. Anhang.....	83
11. Danksagung.....	96
12. Publikationsliste	977

1. Einleitung und Fragestellung

1.1 Längenwachstum der unteren Extremität

Das Wachstum des Menschen ist ein individueller und multifaktoriell beeinflusster Vorgang. Es ist genetisch determiniert, hormonell reguliert und durch exogene Faktoren beeinflusst.

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren ist das genetische Erbgut der Eltern. Es bestimmt bis zu etwa 70 % die Körperlänge eines Kindes (Hoffmann, et al., 2014).

Das Wachstum ist hormonell reguliert. Die wichtigsten Hormone des Kalziumhaushaltes sind Parathormon, Calcitonin und Cholecalciferol. Sie regulieren die Mineralisierung der Knochensubstanz. Das Wachstumshormon (Synonyme: growth hormone, Abk. GH; bzw. Somatotropes Hormon, Abk. STH) und die insulin-like growth factors 1 und 2 (IGF1 und IGF2) sind entscheidende Hormone des Längenwachstums und stimulieren besonders die Differenzierung von Chondrozyten in der Zone des Blasenknorpels der Epiphysenfugen (siehe Abbildung 2, B). Schilddrüsenhormone (Thyroxin / T4, Triiodthyronin / T3) haben eine anabole Wirkung auf die Chondrozyten und wirken stimulierend auf die Transkription von STH und den IGF1 und IGF2 und fördern auf diese Weise das Wachstum. Corticosteroide hemmen die Proliferation von Osteoblasten und damit den Aufbau von extrazellulärer Knochenmatrix. Sie induzieren hierüber die Differenzierung und Aktivität von Osteoklasten und damit die Knochenmatrixresorption. Androgene wirken knochenwachstumsinduzierend, und Östrogene fördern das Schließen der Epiphysenfugen; beide Hormone wirken sich steigend auf die Knochendichte aus. (Heinrich, et al., 2014)

1.2 Die Epiphysenfuge

Die Epiphysenfugen sind verantwortlich für das Längenwachstum langer Röhrenknochen. Die für das Längenwachstum der unteren Extremität wichtigsten Epiphysenfugen verlaufen kniegelenknah distal femoral und proximal tibial.

Die Entwicklung von hyalinem Knorpelgewebe zu Knochengewebe verläuft über mehrere Zonen. Zu Beginn der Entwicklung ruhen Chondrozyten in der Reservezone (siehe Abbildung 1, A). In der darauffolgenden Zone des Säulenknorpels beginnen die Chondrozyten zu proliferieren (siehe Abbildung 1, B). Anschließend bildet sich die Zone des Blasenknorpels aus (siehe Abbildung 1, C), in welcher die Chondrozyten hypertrophieren und im Bereich der extrazellulären Matrix Kalzifikationsprozesse ablaufen. Schließlich tritt in der Resorptions- und der Verknöcherungszone (siehe Abbildung 1, D) ein knöcherner Umbau ein. Hier finden an der verkalkten Extrazellulärmatrix ein Knochenanbau durch Osteoblasten und anschließend ein Knorpelabbau durch resorbierende Chondroklasten statt. Über Blutgefäße immigrierende Osteoklasten sorgen zusammen mit Osteoblasten für eine ständige Knochengeweberemodellierung. [nach (Kühnel, 2014) (Jorge, 2014)]

Ein wichtiger wachstumsbestimmender exogener Faktor ist die mechanische Belastung der Epiphysenfugen. So reagiert die Epiphysenfuge auf Biegebelastung, indem sie versucht sich durch differenziertes Wachstum senkrecht zur Achse des dominierenden Kraftflusses einzustellen. Es konnte experimentell und klinisch nachgewiesen werden, dass eine Abhängigkeit des Knorpelwachstums zu der Größe des axialen Druckes besteht. Dabei wird die Epiphysenfuge durch exzentrischen Überdruck zu einem Mehrwachstum stimuliert, wodurch Achsenfehler ausgeglichen werden können. (Pazzaglia U, 1997) (Hefti, 2006)

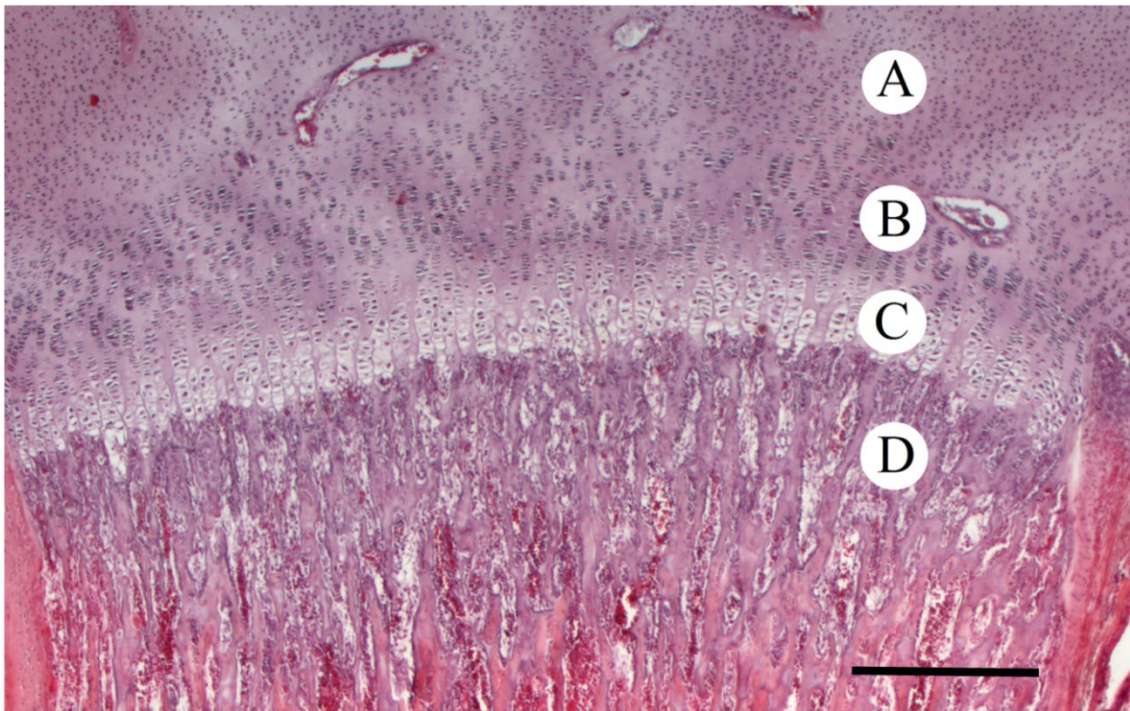
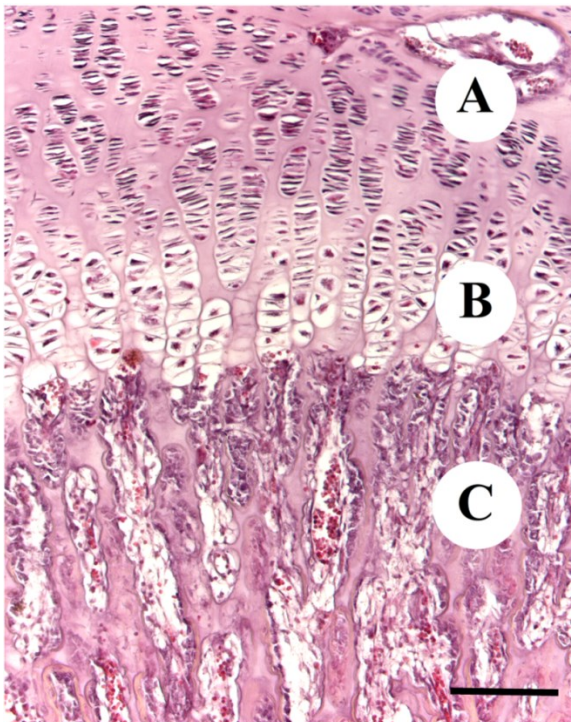


Abbildung 1: Beispiel einer embryonalen enchondralen Ossifikation einer Röhrenknochenmetaphyse (Hämatoxylin-Eosin-Färbung, Maßstabsbalken = 400µm); A) Reservezone (ruhender Knorpel), B) Zone des Säulenknorpels, C) Zone des Blasenknorpels, D) Resorptionszone und Verknöcherungszone (Zone des Knorpelabbaus und des Knochenaufbaus) (Bildquelle: selber angefertigt im Institut für Anatomie der Universität zu Lübeck, institutseigenes Präparat)



- A) Zone des Säulenknorpels
- B) Zone des Blasenknorpels
- C) Resorptions- und Knochenaufbaubereich (Zone des Knorpelabbaus und des Knochenaufbaus)

Abbildung 2: Bereichsvergrößerung der Abbildung 1 (Maßstabsbalken = 200 µm)

1.2.1 Geschlechtsspezifische Wachstumskurven und Perzentilen

Das Längenwachstum im Laufe der Entwicklung verläuft nicht konstant linear. Das schnellste Wachstum erfolgt während des ersten Lebensjahres. Eine zweite deutliche Akzeleration der Wachstumsgeschwindigkeit tritt im Rahmen des pubertären Wachstumsschubes ein, der bei Mädchen im Durchschnitt 2 Jahre früher eintritt als bei Jungen (Hefti, 2006).

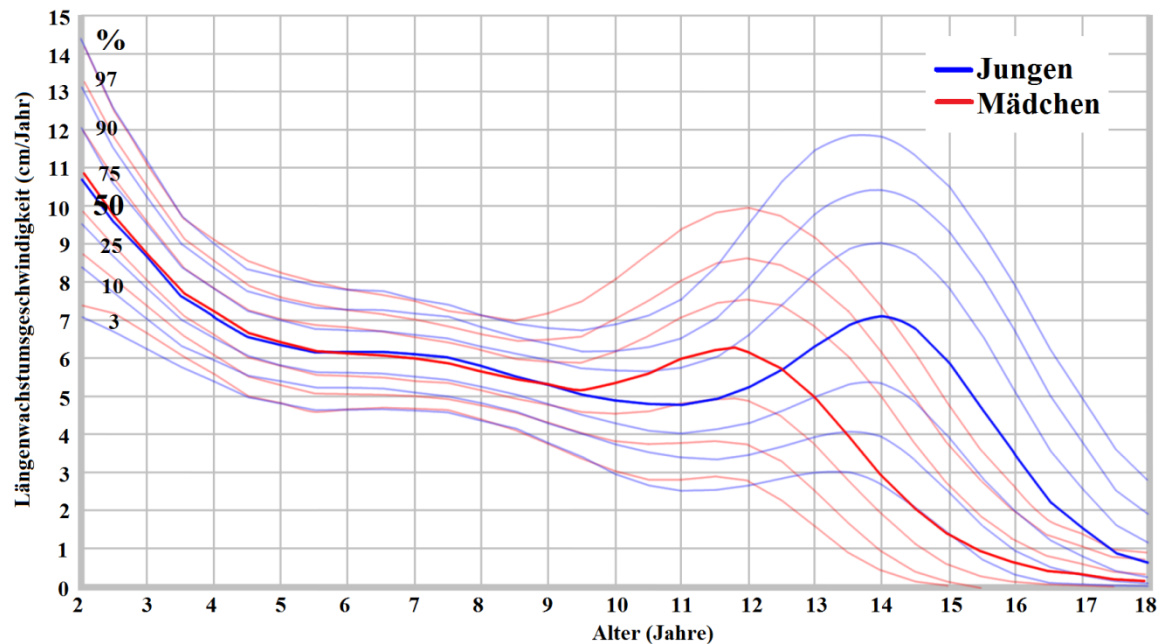


Abbildung 3: Wachstumsgeschwindigkeitsperzentilen von Jungen und Mädchen gegenübergestellt [nach (Prader, et al., 07/1989) (Braegger, et al., 2011) (WHO, 2015)]

1.2.2 Die physiologische Entwicklung der Beinachse während des Wachstums

Säuglinge weisen nach der Geburt eine varische Beinachse von etwa 15° auf. Diese varische Beinachse ist weniger durch ein Genu varum als durch ein Crus varum bedingt. Ab dem Zeitpunkt, an dem das Kleinkind beginnt sich aufzurichten und zu gehen, kommt es zu einer asymmetrischen Belastung der kniegelenknahen Wachstumsfugen (distal femoral und proximal tibial), da die mechanische Traglinie des Beines (Achse zwischen Hüftkopffzentrum und Sprunggelenkszentrum; siehe auch 2.5.4) medial des Kniegelenkzentrums verläuft. Durch die medial verlaufende Lastachse herrscht im medialen Kniegelenk eine erhöhte Belastung entsprechend einer exzentrischen

Überdruckbelastung (s.o.). Lateral dominiert eine Zugbelastung. Diese asymmetrischen, biomechanischen Verhältnisse sorgen für eine asymmetrische Stimulation der kniegelenknahen Wachstumsfugen mit der Folge eines überproportionalen Wachstums der medialen kniegelenknahen Wachstumsfugen und konsekutiver Entwicklung der Beinachse aus einer varischen Form hin zu einer valgischen Form. Im Alter von 3-4 Jahren hat die Beinachse die größte Valgität erreicht (bis ca. 10°). Die Traglinie verläuft dann lateral des Kniegelenkzentrums. Nun kommt es im lateralen Kniegelenkbereich aufgrund der erhöhten lateralen Druckbelastung zu einem Wachstumsstimulus der Wachstumsfugen, sodass sich im Alter von etwa 8 bis 10 Jahren eine gerade Beinachse entwickelt hat, wie sie physiologischerweise beim Erwachsenen besteht. (Salenius, et al., 1975) (Westhoff, et al., 2007) (Hefti, 2006)

1.3 Beinachsabweichungen in der frontalen Ebene

1.3.1 Grundlagen physiologischer und pathologischer Achsverhältnisse der Beine

Die Analyse der Achsverhältnisse der Beine erfolgt am stehenden a.p.-Röntgenbild. Hierzu betrachtet man die mechanische femorale Knochenachse und die mechanische tibiale Knochenachse (siehe auch 2.5.2). In dem Schnittpunkt dieser beiden mechanischen Knochenachsen kann der mechanische tibiofemorale Winkel gemessen werden, der das Ausmaß einer Achsabweichung im Valgus- oder Varussinne angibt (siehe 2.5.3). Physiologischerweise beträgt der mechanische tibiofemorale Winkel 0° , sodass die mechanische Gesamt-Beinachse oder Traglinie (Mikulicz-Linie) des Beines exakt durch das Kniegelenkzentrum verläuft (siehe 2.5.4). Bei Achsabweichung der unteren Extremität verläuft die Traglinie außerhalb des Kniegelenkmittelpunktes (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5, sowie Abbildung 17). Das Ausmaß der Abweichung der Traglinie vom Kniegelenkzentrum wird als mechanische Achsabweichung (MAD) angegeben (siehe 2.5.4). Nur wenn die Traglinie durch das Kniegelenkzentrum verläuft kann man von einer vollständig gleichmäßigen Kräfteverteilung im Kniegelenk ausgehen.

Um die Lastverteilung im Kniegelenk und Orientierung der frontalen Kniegelenkebene im Verhältnis zu den mechanischen Knochenachsen zu untersuchen, werden zusätzlich die

sogenannten mechanischen Kniegelenkorientierungswinkel gemessen: mechanischer lateraler distaler femoraler Winkel (mLDFA, siehe 2.5.5) und mechanischer medialer proximaler tibialer Winkel (mMPTA, siehe 2.5.6).

Betrachtet man die frontale Kniegelenkebene (siehe Abbildung 24), so verläuft diese physiologischerweise bei hüftbreitem Stand mit einem circa 3° medialem Gefälle zum Boden hin. Bei diesem hüftbreitem bzw. „lockeren“ Stand sind die mechanischen Beinachsen vertikal im Raum angeordnet. Stehen die Füße nahe beieinander, so positioniert sich die frontale Kniegelenkebene in eine parallele Position zur Bodenlinie. Hierbei weichen die mechanischen Beinachsen 3° von einer vertikalen Raumachse ab. (Paley, et al., 2001) (siehe auch 2.6).

1.3.2 Arten der Beinachsfehlstellungen in der frontalen Ebene

1.3.2.1 Genu valgum

Verläuft die mechanische Beinachse lateral des Kniegelenkmittelpunktes, und entspricht die Abweichung mehr als 2 Standardabweichungen von der altersentsprechenden Norm, so spricht man von einem Genu valgum (Staheli, 2008) (siehe Abbildung 4: Genua valga, „X-Beine“).

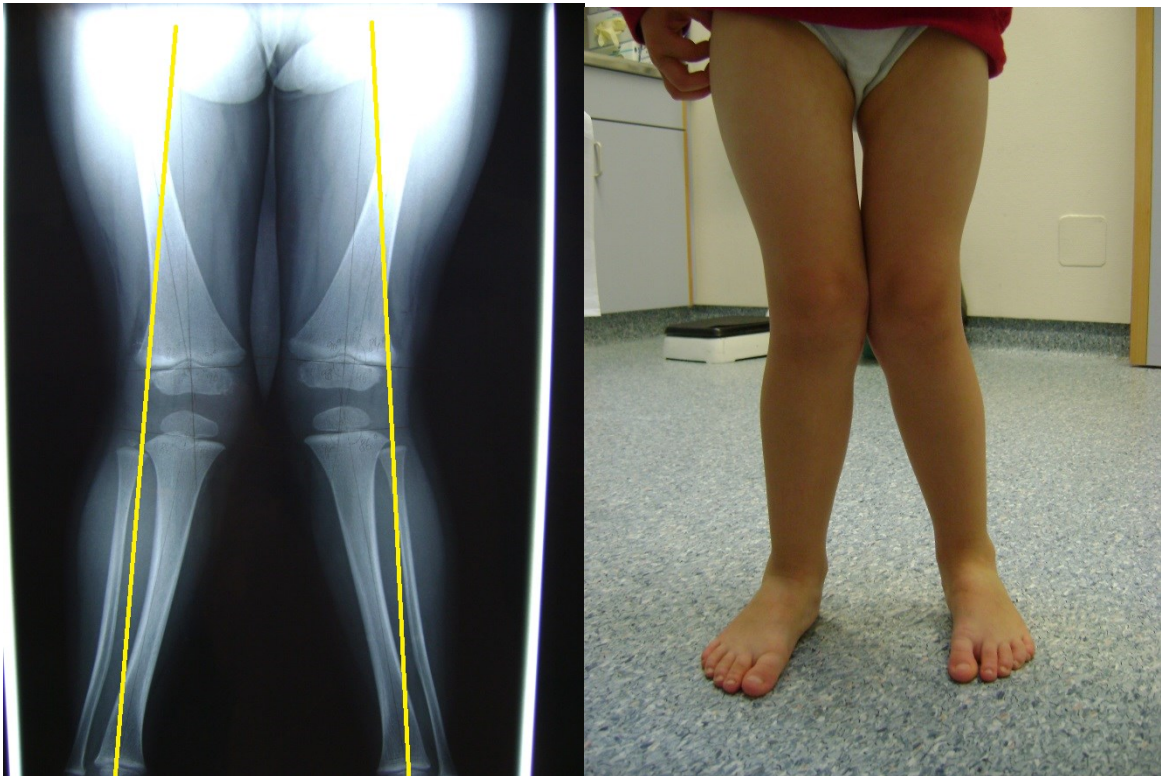


Abbildung 4: Genua valga, „X-Beine“

1.3.2.2 Genu varum

Verläuft die mechanische Beinachse medial des Kniegelenkmittelpunktes, und entspricht die Abweichung mehr als 2 Standardabweichungen von der altersentsprechenden Norm, so spricht man von einem Genu varum (Staheli, 2008) (siehe Abbildung 5: Genua vara, „O-Beine“).

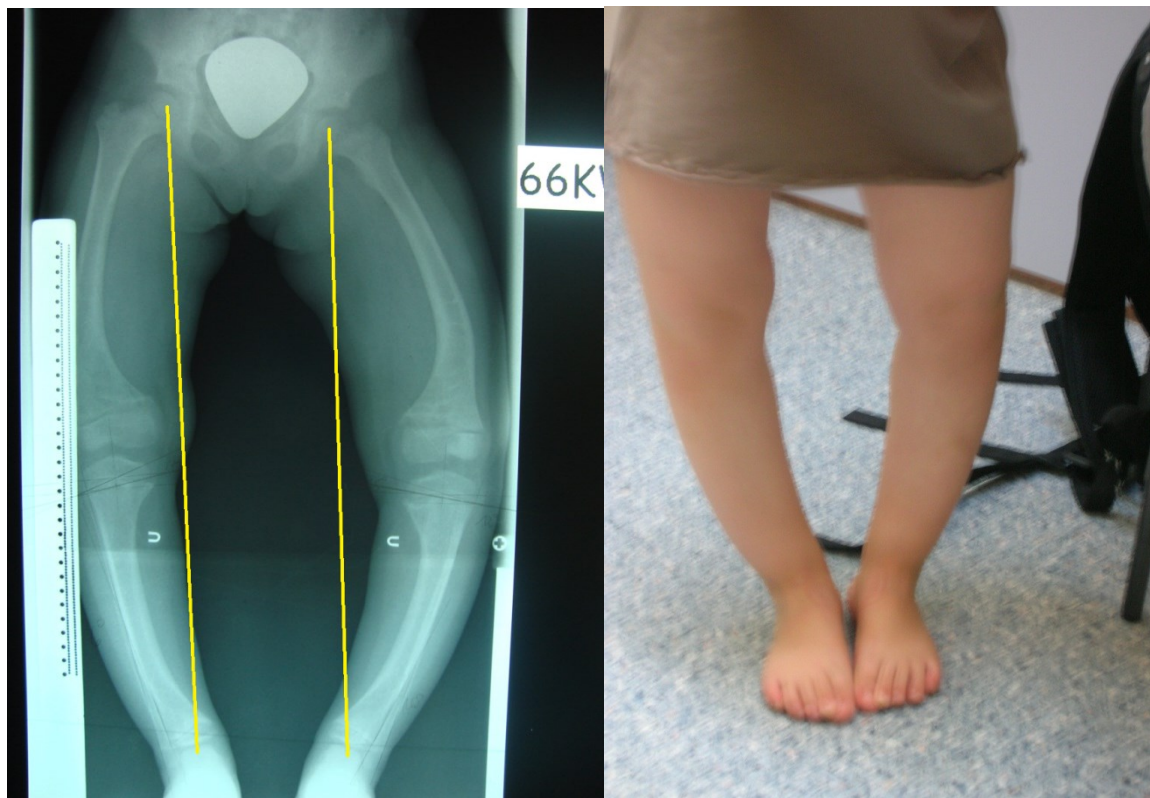


Abbildung 5: Genua vara, „O-Beine“

1.3.3 Ätiopathologie

Primäre und sekundäre Formen einer Achsabweichung der unteren Extremität können unterschieden werden. Primäre Achsdeformitäten wie Genua vara und valga bei Kindern und Jugendlichen können angeboren sein oder sich im Rahmen des Wachstums ohne erkennbare Ursache entwickeln. Das Persistieren des physiologischen Kleinkindes-Genu valgum über das 10. Lebensjahr hinaus ist häufig mit einem relativ starken Übergewicht assoziiert; bei Genua vara konnte dieser Zusammenhang nicht beobachtet werden (Hefti, 2006). Weitere im Laufe des Wachstums auftretende Achsabweichungen sind durch asymmetrisches Wachstum der Epiphysenfuge begründet und daher mit zunehmendem Alter häufig progredient (Paley, et al., 2001).

Sekundäre Achsdeformitäten können durch eine asymmetrische Mehrdurchblutung der kniegelenknahen Wachstumsfugen z.B. in Folge von Entzündungen (rheumatisch oder infektiös) oder Frakturheilung erworben sein. Sie können auch durch einen vorzeitigen Fugenschluss im Falle einer traumatischen oder iatrogenen partiellen Verletzung des medialen oder lateralen Anteils der kniegelenknahen Epiphysenfugen auftreten und dann

zu einer sich progredient entwickelnden Deformität führen (Paley, et al., 2001). Im Rahmen von angeborenen Knochenstoffwechselstörungen (Phosphatdiabetes, Vitamin-D-resistente Rachitis etc.) können durch Beteiligung der Wachstumsfugen Achsdeformitäten v.a. im Varussinne, seltener auch als Genu valgum entstehen (Hefti, 2006).

1.4 Epiphyseodeseverfahren

Epiphyseodesen können zur Korrektur von Achsdeformitäten oder Längendifferenzen der Beine im Wachstumsalter als wachstumslenkende Maßnahme im Bereich der kniegelenknahen Wachstumsfuge eingesetzt werden. Zur Korrektur von Beinlängendifferenzen werden Blockierungen der Wachstumsfuge bilateral zur Bremsung des Längenwachstums am längeren Bein durchgeführt. Achsdeformitäten werden durch eine unilaterale Epiphyseodese der distalen femoralen und/oder proximalen tibialen Wachstumsfuge (je nach Richtung der Achsfehlstellung medial oder lateral) im Sinne einer Hemi-Epiphyseodese korrigiert, um über das Längenwachstum des nicht-blockierten Bereiches der kontralateralen Epiphysenfuge eine sukzessive Begradigung der Beinachse zu ermöglichen.

Genu valgum werden so über eine Epiphyseodese im medialen Bereich der kniegelenknahen Wachstumsfuge korrigiert, bei Genu varum erfolgt die Korrektur über den lateralen Anteil der kniegelenknahen Wachstumsfugen. Das Vorgehen kann hierbei distal femoral, proximal tibial oder kombiniert erfolgen.

Generell können bei den genannten Vorgehensweisen permanente und passagere Epiphyseodeseverfahren unterschieden werden (Pfeil, et al., 1996).

1.4.1 Permanente Epiphyseodesen

Die verschiedenen Verfahren der permanenten Epiphyseodese sind irreversible Verfahren zur Wachstumsinhibierung und –lenkung, da sie die Wachstumsfuge beschädigen und so einen vorzeitigen Epiphysenschluss bewirken. (Pfeil, et al., 1996) (Phemister, 1933)

1.4.2 Temporäre Epiphyseodesen

Die temporäre oder passagere Epiphyseodese ist ein vorübergehendes also prinzipiell reversibles Verfahren zur Wachstumsinhibierung und –lenkung, da die Wachstumsfuge nicht beschädigt wird und so ihre Fähigkeit zum Längenwachstum behält.

1.4.2.1 Temporäre Epiphyseodese mittels Blount-Klammerung

Die temporäre Epiphyseodese mittels rigider klammerförmiger Implantate zur Wachstumslenkung wurde 1949 von Blount vorgestellt (Blount, et al., 1949) (Blount, 1971). Hierbei werden nach Nadelmarkierung der Epiphysenfuge nacheinander zwei bis drei in seitlicher Ebene versetzte Blount-Klammern je nach Achsfehlstellung von medial oder lateral unter Bildwandlerkontrolle senkrecht zur Wachstumsfuge eingebracht, so dass die proximalen und distalen Schenkel jeweils gleich weit von der Epiphysenfuge entfernt zu liegen kommen und die Klammern zur Knochenmitte hin gerichtet sind. Hierdurch wird eine einseitige Kompression der Wachstumsfuge mit Überschreiten des exzentrischen Überdruckes bewirkt, so dass das Längenwachstum in diesem Bereich gebremst wird. (Pfeil, et al., 1996). Die Rigidität der Blount- Klammern bedingte ein erhöhtes Risiko eines Implantatversagens mit Auswanderung oder Bruch der Klammern. Durch den lokal hohen Druck auf die Epiphysenfuge im Bereich der rigiden Klammerung wurden vorzeitige Epiphysenverschlüsse beschrieben (Stevens, 2007).

1.4.2.2 Temporäre Epiphyseodese mittels Zuggurtungsverfahren unter Verwendung der eight-Plate™

P. M. Stevens stellte 2006 erstmals ein Implantat zur temporären Epiphyseodese vor, das im Sinne eines Zuggurtungsverfahrens den lokalen Druck auf die Epiphysenfuge verringern sollte, um die Nachteile der Blount-Klammer zu vermeiden. Bei der sogenannten „eight-Plate™“ (siehe Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 11) handelt es sich um ein Implantat in Form eines Zweiloch-Plättchens, das eine Acht nachahmt und so die Bezeichnung „eight-Plate™“ prägte. Die Platte wird über ihr proximales und distales Schraubenloch mit Schrauben über der Epiphysenfuge fixiert und ermöglicht so einen semirigiden Zuggurtungseffekt auf die Epiphysenfuge. Hierüber kommt der das Wachstum bremsende Überdruck peripherer zur Wirkung, was die gewünschte Reduktion des Längenwachstums im Bereich der medialen oder lateralen Epiphysenfuge gleichmäßiger verteilt.

OP-Technik: Das Markieren der Epiphysenfuge erfolgt ebenfalls mit einer Nadel unter Durchleuchtungskontrolle in 2 Ebenen (siehe Abbildung 8). Nach Vorlegen eines Kirschner-Drahtes in streng mittiger Position in der seitlichen Röntgenkontrolle wird eine eight-Plate™ nun in ihrem zentralen Loch im mittleren Bereich der Epiphysenfuge fixiert.

Es werden die beiden äußeren Löcher der eight-Plate™ mit je einem K-Draht besetzt, und daraufhin eine weitere röntgenologische Lagekontrolle in 2 Ebenen durchgeführt (siehe Abbildung 9). Liegen die beiden K-Drähte jeweils korrekt und möglichst parallel proximal und distal der Wachstumsfuge, folgt das Eindrehen der kanülierten Schrauben und das anschließende Entfernen der K-Drähte (siehe Abbildung 10).



Abbildung 6: eight-Plates™ mit kanülierten Schrauben (Bildmaterialquelle: Orthofix®, Hersteller der eight-Plate™)



Abbildung 7: Kniemodell mit femorotibial kombinierter Epiphyseodese mittels eight-Plates™ (Bildmaterialquelle: Orthofix®, Hersteller der eight-Plate™)

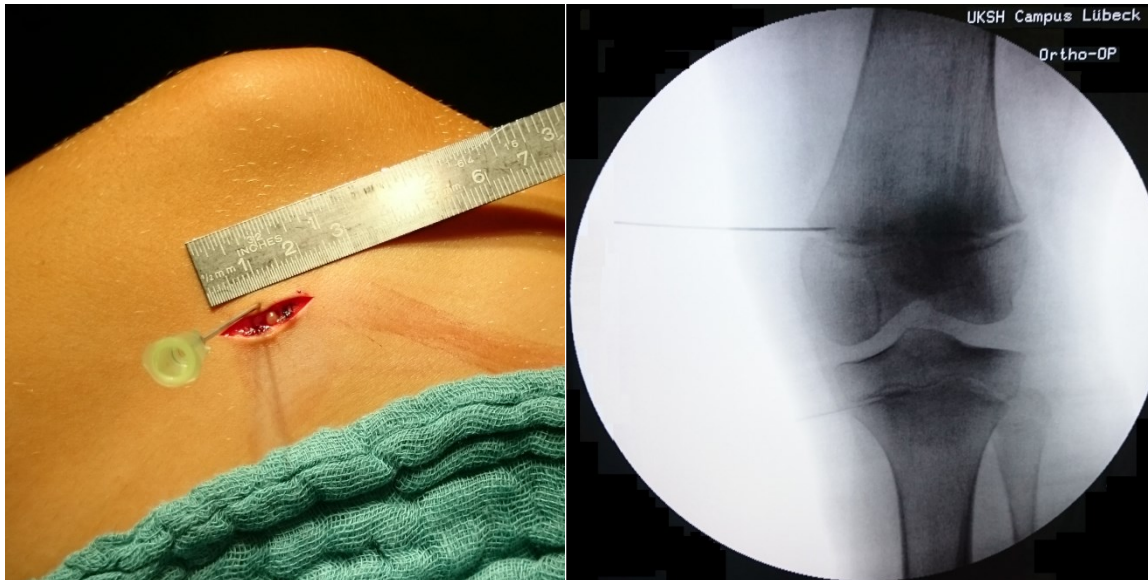


Abbildung 8: Markieren der Epiphysenfuge mit einer Nadel unter Durchleuchtungskontrolle in 2 Ebenen (Hier nur in a.p.-Darstellung)

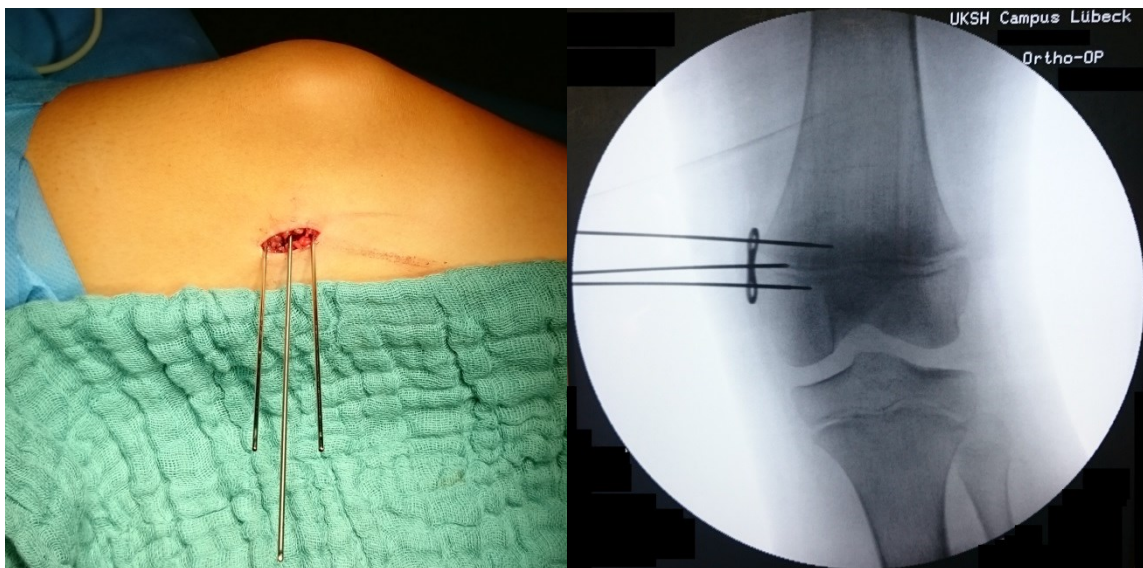


Abbildung 9: Vorlegen eines Kirschner-Drahtes in streng mittlerer Position. In der seitlichen Röntgenkontrolle wird eine eight-Plate™ nun in ihrem zentralen Loch im mittleren Bereich der Epiphysenfuge fixiert. Anschließend werden die beiden äußeren Löcher der eight-Plate™ mit je einem K-Draht besetzt. Daraufhin erfolgt eine weitere röntgenologische Lagekontrolle in 2 Ebenen (hier nur in a.p.-Darstellung).



Abbildung 10: Eindrehen der kanülierten Schrauben, sowie das anschließende Entfernen der Kirschner-Drähte. Es folgt die röntgenologische Kontrolle in 2 Ebenen (hier nur in a.p.-Darstellung).



Abbildung 11: Vergleich der eight-Plate™-Länge zur Schnittlänge

1.5 Korrekturverläufe unter passagerer Epiphyseodese mit der eight-Plate™

1.5.1 Distal femorales Vorgehen

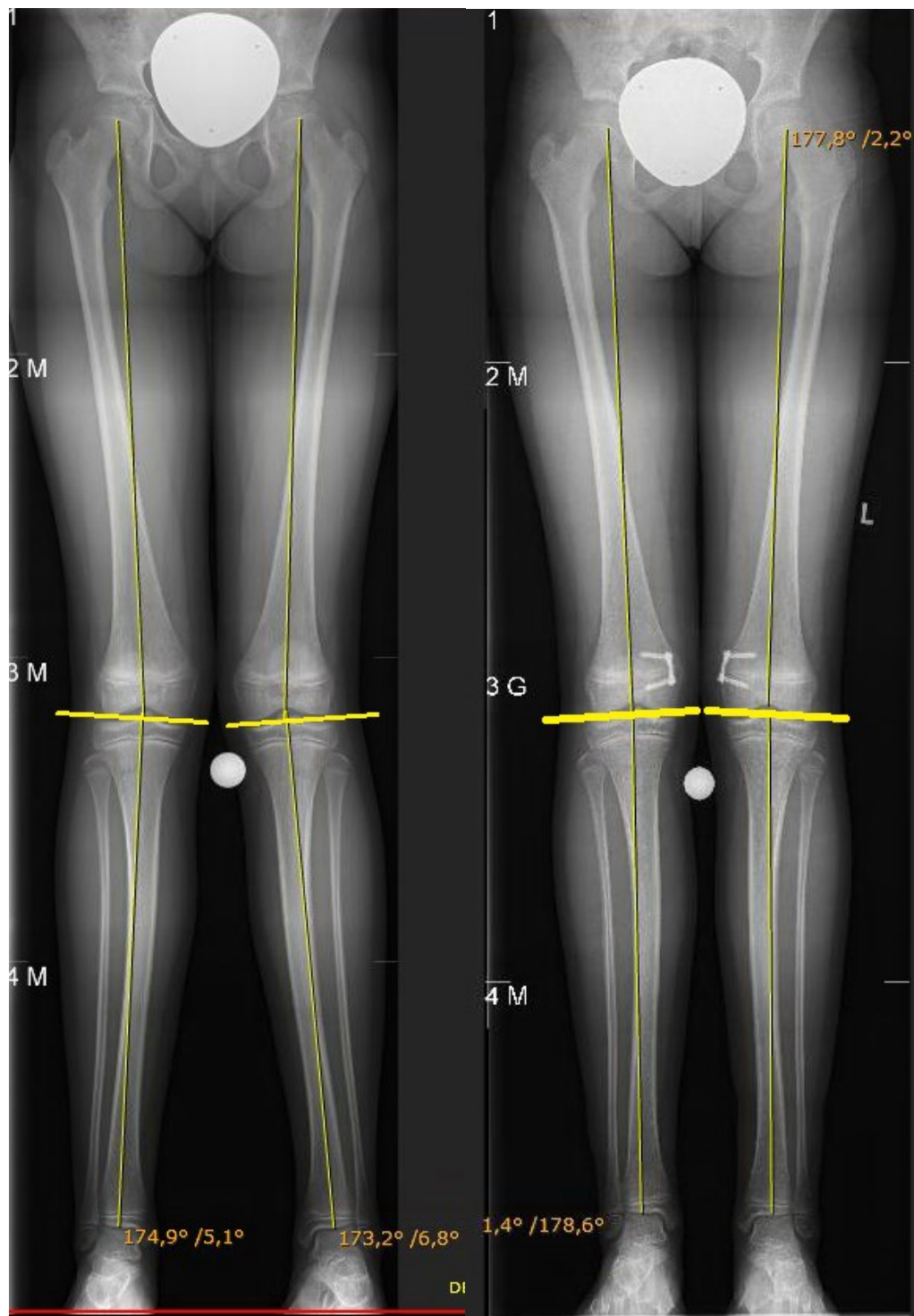


Abbildung 12: Genua valga präoperativ / 5 Monate nach passagerer Epiphyseodese distal femoral medial beidseits.

1.5.2 Proximal tibiales Vorgehen

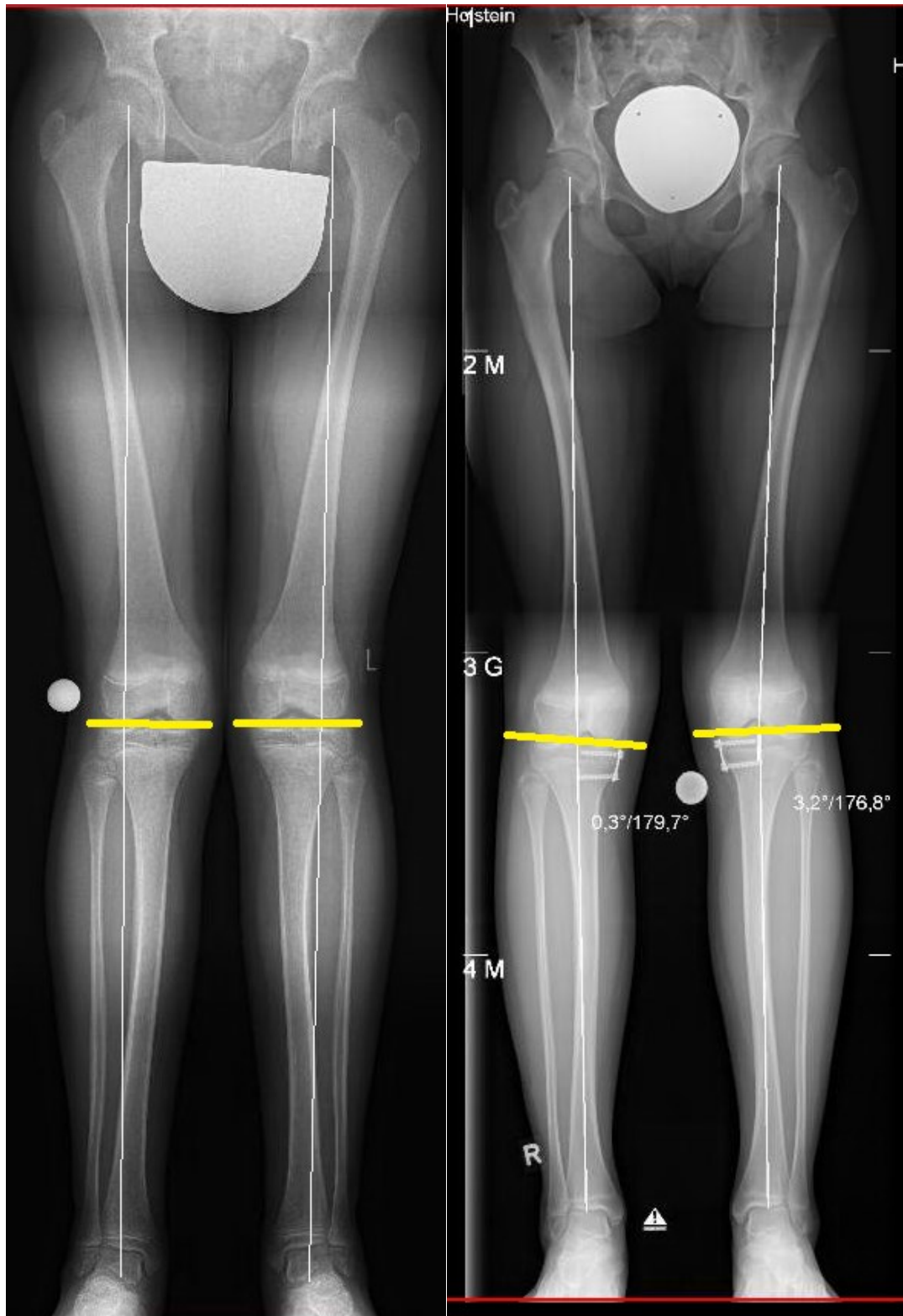


Abbildung 13: Genua valga, rechts mit passagerer Epiphyseodese proximal tibial medial.

1.5.3 Kombiniert tibiofemorales Vorgehen.



Abbildung 14: Genua valga präoperativ / 7 Monate nach passagerer Epiphyseodese kombiniert distal femoral medial und proximal tibial medial.

1.6 Korrekturverlust nach erfolgter Achskorrektur

Die Reversibilität der Achskorrektur nach passagerer Epiphyseodese im Sinne eines Korrekturverlustes („rebound“-Phänomen) über ein möglicherweise verbliebenes Rest-Wachstum wurde mehrfach beschrieben [(Degreef I, 2003) (Burghardt, et al., 2010) (Goyeneche, et al., 2009) (Yilmaz, et al., 2013)]. So beobachteten Degreef et al. (2003) einen therapiebedürftigen Korrekturverlust in 10 % der therapierten Patienten mit idiopathischen Genua valga (n = 44). Bei Patienten mit Mukopolysaccharidose trat ein therapiebedürftiger Korrekturverlust gar bei über 80 % der nachuntersuchten Patienten ein Jahr nach Achskorrektur auf [n = 6; (Ashby, et al., 2015)].

Das Risiko eines Korrekturverlustes scheint umso höher, je mehr Rest-Wachstum nach erfolgter Achskorrektur noch vorhanden ist. So wurde beobachtet, dass jüngere Kinder häufiger betroffen sind (Stevens, 2007). Des Weiteren scheint ein Korrekturverlust bei Patienten mit sekundären Achsdeformitäten infolge von Skelettdysplasien oder Knochenstoffwechselstörungen ebenfalls häufiger aufzutreten (Ashby, et al., 2015). Als zusätzliche denkbare Risikofaktoren werden ein erhöhter Body-Mass-Index (BMI) und ein weibliches Geschlecht diskutiert.

Einzelne Autoren diskutieren eine geplante leichte Überkorrektur von Achsdeformitäten bei verbleibendem Rest-Wachstum, um den Korrekturverlust zu kompensieren (Yilmaz et al. 2013). Differenzierte Daten zu den Ursachen eines möglichen Korrekturverlustes nach erfolgter Korrektur der mechanischen Beinachse fehlen jedoch bisher.

1.7 Fragestellung

Die passagere Hemiepiphyseodese mit der „eight-Plate™“ als femorale, tibiale oder femorotibiale wachstumslenkende Maßnahme ist eine bewährte Methode zur Korrektur von idiopathischen oder sekundären Achsdeformitäten der Beine im Wachstumsalter. Ihre Effektivität hinsichtlich einer Korrektur der mechanischen Beinachse (MA bzw. MAD) sowie ihr Einfluss auf die mechanischen Kniegelenkorientierungswinkel (mLDFA / mMPTA) ist in einigen Studien belegt worden. Ein Problem ist die spontane Reversibilität des Verfahrens im weiteren Wachstum mit der Folge eines möglichen Korrekturverlustes [(Stevens, 2007) (Burghardt, et al., 2010) (Goyeneche, et al., 2009) (Yilmaz, et al., 2013)].

Physiologischerweise verläuft die frontale Kniegelenkebene nach Paley et al. 0 bis 3 ° nach medial absteigend. Dies entspricht einem mLDFA von 88 ° und einem mMPTA von 87 °. Bei einer Achsdeformität im Valgus- oder Varussinne können diese mechanischen Kniegelenkwinkel verändert sein, was die frontale Kniegelenkebene beeinflusst. Eine Änderung der physiologischen frontalen Kniegelenkebene infolge der Achsdeformität wird mit einer ungünstigen Gelenkbelastung verbunden. Diese Änderung ist jedoch prinzipiell auch infolge einer Hemiepiphyseodese möglich. Die Lokalisation der Hemiepiphyseodese femoral und/oder tibial sollte daher am Ort der größten Winkelabweichung (mLDFA / mMPTA) gewählt werden, um neben der Korrektur der Beinachse auch eine physiologische frontale Kniegelenkebene zu generieren.

In seiner ersten evaluierenden Studie der „eight-Plate™“ als Zuggurtungsverfahren zur korrigierenden Wachstumslenkung betont Stevens (2007), dass bei allen untersuchten Patienten mit korrigierter mechanischer Beinachse „die Horizontalität der frontalen Kniegelenkebene in einem Rahmen von 0 – 3 ° bestehen blieb“. Trotz zahlreicher Nachfolgestudien, die den achskorrigierenden Effekt des Verfahrens bestätigten, wurde dieser Aspekt des Verfahrens von den Folgeautoren nicht mehr erwähnt.

In dieser Arbeit soll daher der Einfluss der temporären Hemiepiphyseodese auf die Orientierung der frontalen Kniegelenkebene differenziert evaluiert werden. Um eine im Vergleich zu den mechanischen Kniegelenkorientierungswinkeln einfachere und schnelle Orientierung über die reelle Position der frontalen Kniegelenkebene zu ermöglichen, wurde hierzu im Rahmen dieser Arbeit der frontale Gelenkebenen-Boden-Winkel (fGBW) entwickelt. Hiermit sollte des Weiteren analysiert werden, inwieweit eine Veränderung der

frontalen Kniegelenkebene zu einem im Verlauf auftretenden Korrekturverlust führen kann.

2. Material und Methoden

2.1 Datenerhebung

Der Zeitraum der Datenerhebung erstreckte sich von Dezember 2013 bis Februar 2014. Dabei wurden Daten aus den Jahren 2006 – Ende 2013 ermittelt, welche in dieser Studie Verwendung fanden. In diese Studie flossen Daten von Patienten, bei denen eine kniegelenknahe passagere Hemiepiphyseodese unter Verwendung von eight-Plates™ zur Korrektur einer primären oder sekundären Achsdeformität der Beine durchgeführt wurde. Der Zeitpunkt der Explantation der Eight-Plates™, und damit der Therapieabschluss, mussten dabei vor dem Januar 2014 liegen. Bis dahin nicht abgeschlossene Fälle fanden in der Studie keine Verwendung.

Grundlage der retrospektiven Erhebung der klinischen Parameter waren die Befundberichte der Orthopädischen Poliklinik. Eingeschlossen wurden alle Patienten, bei denen eine lückenlose klinische Dokumentation des Therapieverlaufes sowie ein vollständiger Röntgenverlauf vorlagen. Für den Zugriff auf die Patientendaten wurde das Krankenhaus-Informationssystem ORBIS von Agfa Healthcare genutzt.

2.2 Erhobene klinische Parameter

Die Patienten wurden präoperativ sowie nach erfolgter Hemiepiphyseodese in mindestens 3-monatigen Abständen in der orthopädischen Poliklinik des UKSH Lübeck klinisch untersucht. Nach Therapieende und Metallentfernung erfolgten nach Möglichkeit weitere klinische Kontrollen bis zum Wachstumsabschluss (s.u.).

Es wurde das Geburtsdatum sowie das Alter zum Zeitpunkt der Implantation und das Alter zum Zeitpunkt der Explantation ermittelt. Hierbei haben wir bei ansonsten gesunden Patienten das Skeletalter entsprechend dem Lebensalter angenommen. Bei Patienten mit Knochenstoffwechselstörungen wurde anhand eines Handradiogrammes der nicht-dominanten Hand nach Greulich-Pyle eine grobe Abweichung des Skeletalters vom Lebensalter ausgeschlossen.

Die Art (Valgus oder Varus) und Ausmaß der Achsabweichung ist als absolute Zahl in Grad (°) dokumentiert worden.

Die Befundung der Beinachsen erfolgte hier zunächst klinisch, d.h. es wurde der Malleolen- und Kondylenabstand zwischen beiden Beinen in cm gemessen. Konnte eine therapierelevante Achsabweichung erkannt werden, so wurde röntgenologisch eine Ganzaufnahme beider Beine angefertigt. Anhand dieser wurde die operative Therapie geplant. Nach Implantation einer oder mehrerer eight-Plates™ wurde die Beinachse klinisch fortlaufend in 3-monatigen Kontrollintervallen erfasst. Zudem wurden bei jeder Kontrolle die Beweglichkeit des Knies und die Körpergröße gemessen. War das klinische Bild einer geraden Beinachse erreicht, wurde kurz vor der Explantation erneut eine nativradiologische Beinganzaufnahme a.p. im Stand angefertigt (siehe 2.4 Radiologische Befunderhebung).

Die Körperlänge ist prä implantationem und prä explantationem erfasst worden. Dadurch konnte in Kombination mit der Therapiedauer die Wachstumsgeschwindigkeit berechnet werden. Zudem konnte die Gradänderung der Gelenkwinkel zur Körpergrößenzunahme in Relation gesetzt werden. Dadurch ließ sich beschreiben, um wieviel Grad sich die Beinachse pro cm Körperlängenzunahme im Durchschnitt korrigierte.

Zur Beinachskorrektur mittels Epiphyseodese kamen vier Lokalisationen in Betracht. Zur Korrektur von Genua valga waren es eine mediale distale femorale (mdf) bzw. eine mediale proximale tibiale (mpt) Position. Lag ein Genu varum vor, so erfolgte die Epiphyseodese am lateralen distalen Femur (ldf) bzw. an der lateralen proximalen Tibia (lpt). Die eight-Plates™ wurden kombiniert femoral UND tibial (femorotibial) oder singulär femoral ODER tibial genutzt. Die Gründe für ein kombiniertes Vorgehen sind das Vorliegen von pathologischen Gelenkwinkeln in beiden Kniegelenkpartnern der betroffenen unteren Extremität oder zusätzlich eine geringe Restwachstumspotenz im fortgeschrittenen Jugendalter mit dem Ziel einer höheren Korrekturgeschwindigkeit. Singuläre eight-Plates™ (femoral ODER tibial) wurden am anatomischen Ort der größten Achsabweichung implantiert. Zudem wurde immer die jeweilige Seite der Extremität (rechts/links) vermerkt.

Durch die Erhebung des Implantations- und Explantationsdatums konnte, zusammen mit dem Geburtsdatum, das Alter zum Zeitpunkt der Implantation und Explantation, sowie die Epiphyseodeseverweildauer bestimmt werden.

Die Untersuchung der Patienten nach Therapieende und Implantatentfernung hinsichtlich des weiteren Wachstumsverlaufes und der Frage nach einer erneuten Entwicklung einer Beinachsendeformität im Sinne eines Korrekturverlustes erfolgte klinisch anhand des Malleolen- bzw. Kondylenabstandes. Erneute Röntgenaufnahmen wurden aus Strahlenschutzgründen nur bei wahrscheinlicher therapeutischer Konsequenz angefertigt.

Klinisch wurde bei der Beurteilung der Beinachse im weiteren Wachstumsverlauf zwischen einem milden und einem therapiebedürftigen Korrekturverlust unterschieden. Ein milder Korrekturverlust wurde als ein im Vergleich zum Zeitpunkt der Metallentfernung neu aufgetretener Malleolen-Abstand (*Genua valga*) bzw. als ein Kondylen-Abstand (*Genua vara*) von $>2 - <5$ cm definiert. Eine erneute Korrektur eines milden Korrekturverlustes erfolgte nicht. Ein therapiebedürftiger Korrekturverlust wurde als neu aufgetretener intermalleolärer Abstand ≥ 5 cm bzw. Abstand zwischen den Kondylen ≥ 5 cm definiert.

2.3 Patientenkollektiv

Das Patientenkollektiv unserer Studie beinhaltet insgesamt 44 Patienten, wobei 24 / 44 (54,5 %) weiblichen Geschlechts und 20 / 44 (45,5 %) männlichen Geschlechts sind.

38 von 44 Patienten (89 %) litten an idiopathischen Achsdeformitäten. 6 von 44 Patienten (11 %) zeigten eine sekundäre Achsdeformität infolge einer Knochenstoffwechselstörung (siehe Tabelle 17).

Bei den 44 Patienten wurden insgesamt 78 Beinachsdeformitäten korrigiert. Davon wurde an 64 Extremitäten ein *Genu valgum* und an 14 Extremitäten ein *Genu varum* korrigiert.

Idiopathische Achsdeformitäten bestanden bei 69 / 78 operierten Beinen (88 %), in 9 Fällen (12 %) lagen sekundäre Achsdeformitäten infolge von Knochenstoffwechselstörungen vor (siehe Tabelle 17). Bei den 6 Patienten mit Knochenstoffwechselstörungen lagen fünfmal ein Phosphatdiabetes und einmal eine cartilaginäre Exostosenkrankheit vor.

An den genannten 78 Extremitäten wurden insgesamt 99 Epiphyseodesen durchgeführt. Davon erfolgten an 57 Extremitäten einzelne (singuläre) Epiphyseodesen; dies bedeutet, es wurde pro Extremität eine Epiphyseodese entweder distal femoral (n=44) ODER proximal

tibial (n=13) durchgeführt. An 21 Extremitäten wurden Epiphyseodesen femorotibial kombiniert; d.h. hier wurde distal tibial UND proximal femoral je eine Epiphyseodese vorgenommen (siehe Tabelle 1).

	Genu valgum (64 Beine)	Genu varum (14 Beine)
Kombinierte EPD (n = 21)	16	5
Singuläre femorale EPD (n = 44)	40	4
Singuläre tibiale EPD (n = 13)	8	5

Tabelle 1: Verteilung der Epiphyseodesen (EPD)

Das Gesamtdurchschnittsalter der Patienten lag bei 12 Jahren 4 Monaten ($\pm$ 2 Jahre 5 Monate, range 2 Jahre 7 Monate – 15 Jahren 10 Monate).

Das Durchschnittsalter war bei Mädchen zum Zeitpunkt des Behandlungsbeginns mit 11 Jahren und 2 Monaten ($\pm$ 2 Jahre 5 Monate, range 2 Jahre 7 Monate – 14 Jahre 1 Monat) etwas jünger als bei Jungen mit 13 Jahren 8 Monaten ($\pm$ 1 Jahr 10 Monate, range 9 Jahre 8 Monate – 15 Jahre 10 Monate) entsprechend des früher einsetzenden pubertären Wachstumsschubes (siehe Anhang 10.3, Tabelle 18).

2.4 Radiologische Befunderhebung

Die nativradiologische Darstellung der Beinachsen erfolgte bei allen Patienten in Form einer Beinganzaufnahme (Becken-Bein-Statik) a.p. im Stehen vor Durchführung der Hemiepiphyseodese sowie nach Erreichen einer klinisch geraden Beinachse zur Planung der Metallentfernung.

Durch die großzügige Zurverfügungstellung eines Arbeitsplatzes in der Radiologie des UKSH Lübeck, konnte die Auswertung der digital-gespeicherten Becken-Bein-Statiken unter optimalen Rahmenbedingungen erfolgen. Zur Röntgenbildbetrachtung und – Vermessung kam hierbei die Software IMPAX EE R20 Release XIII von Agfa Healthcare zum Einsatz. Der radiologische Arbeitsplatz war mit einer Z620 Workstation von Hewlett Packard, einem 19“ Monitor, sowie zwei EIZO Radiforce RX 340-Monitoren ausgestattet.

Ältere Daten lagen als konventionelle Röntgenaufnahmen vor und wurden manuell ausgewertet.

Alle Becken-Bein-Statiken wurden im Institut für Radiologie des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein (UKSH) in Lübeck angefertigt. Als geeignetes Radiographiesystem kam dazu das Ysio von Siemens Healthcare zum Einsatz. Dabei wurden pro Becken-Bein-Statik mehrere Röntgenbilder angefertigt. Jedes Bild wurde jeweils auf unterschiedlicher Höhe erstellt. Diese Einzelbilder wurden anschließend an einem Syngo Workplace von Siemens Healthcare zu einer einzigen Becken-Bein-Statik zusammengefügt.

Es wurde als Referenzmaß eine Kalibrierkugel mit einem Durchmesser von 25 mm genutzt.

Zur Anfertigung der Becken-Bein-Statiken wurden die Patellae so ausgerichtet, dass sie bei einer a.p.-Aufnahme Mittig zum Kniegelenk lagen, um vergleichbare Rotationseinstellungen der abgebildeten Extremitäten und der damit gemessenen Winkelverhältnisse zu generieren. Die Standbreite war hüftbreit, sodass die Sprunggelenke unter den Hüftgelenken positioniert waren.

2.5 Erhobene röntgenologische Parameter

2.5.1 Bestimmung der Gelenksmittelpunkte

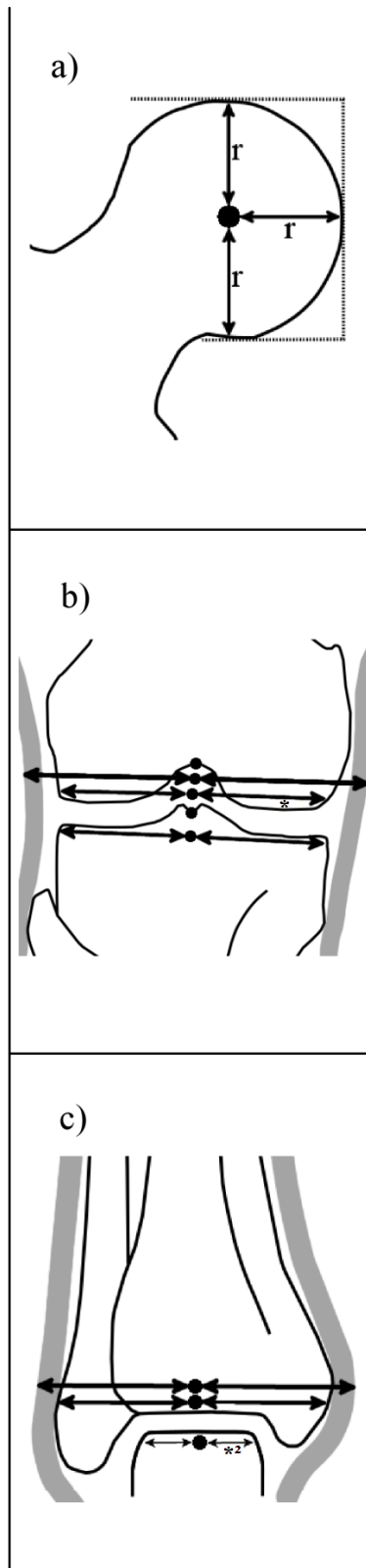
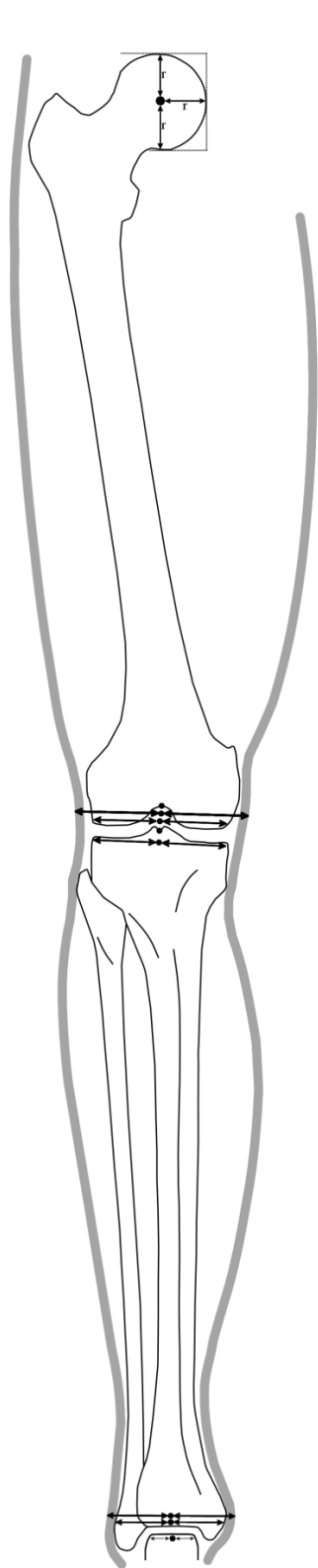


Abbildung 15
Gelenksmittelpunkte [nach
(Paley, et al., 2001),
(Moreland, et al., 1987)]

a) Mittelpunkt des
Hüftgelenkes /
Femurkopfmittelpunkt

b) mögliche
Kniegelenksmittelpunkte; Es
wurde in dieser Studie der
mittlere Abstand zwischen
den Femurkondylen
gewählt. (*)

c) mögliche
Gelenksmittelpunkte des
oberen Sprunggelenkes; Es
wurde in dieser Studie der
Mittelpunkt der Trochlea tali
gewählt. (*²)

2.5.2 Bestimmung der tibialen und femoralen mechanischen Knochenachse

Die mechanische femorale Knochenachse verläuft vom Zentrum des Hüftkopfes bis zum Zentrum des Kniegelenkes. Die mechanische tibiale Knochenachse verläuft von der Mitte des oberen Sprunggelenkes bis zur Mitte des Kniegelenkes.

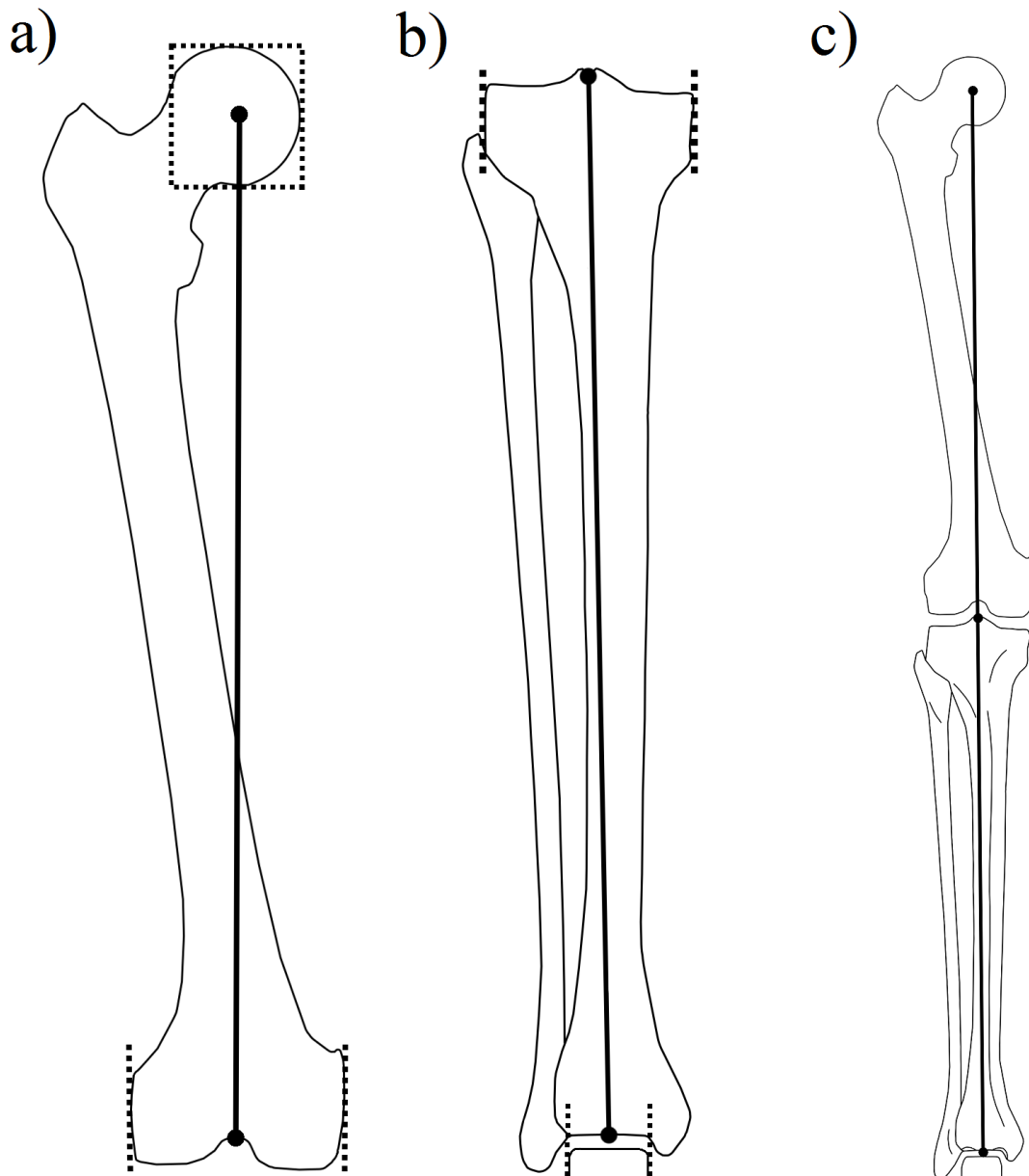


Abbildung 16: Mechanische Knochenachsen des Femurs (a) und der Tibia (b); Mikulicz-Linie (c)

2.5.3 Mechanischer tibiofemoraler Winkel

Die mechanischen Knochenachsen des Beines sind Grundlage für die Bestimmung des mechanischen tibiofemorale Winkels. In dem Schnittpunkt dieser beiden mechanischen Knochenachsen kann der mechanische tibiofemorale Winkel gemessen werden. Der physiologische mechanische tibiofemorale Winkel beträgt 0° , d.h. die Traglinie (Mikulicz-Linie) des Beines geht durch das Kniegelenkzentrum (siehe Abbildung 17).

Ist die Beinachse valgisch, so wurde der mechanische tibiofemorale Winkel größer 0° angegeben. Liegt eine varische Beinachse vor, so wurde der Gradwert des mechanischen tibiofemorale Winkles als negative Zahl angegeben.

Der tibiofemorale Winkel wurde prä implantationem und prä explantationem gemessen. Anschließend wurde die Differenz aus beiden Werten ermittelt (siehe Anhang 10.4, Tabelle 19).

2.5.4 Mechanische Beinachsabweichung (MAD)

Die mechanische Achsabweichung (engl. mechanical axis deviation, MAD) ist die Distanz zwischen der Mikulicz-Linie (mechanische Traglinie des Beines) und dem Kniegelenkmittelpunkt in Millimetern (mm). Dabei verläuft die mechanische Traglinie vom Hüftkopfbereich bis zum Zentrum des oberen Sprunggelenkes (siehe Abbildung 17).

Die Mikulicz-Linie verläuft physiologischerweise durch das Kniegelenkzentrum. Bei valgischer Achsabweichung der unteren Extremität verläuft die Traglinie lateral des Kniegelenkmittelpunktes (siehe Abbildung 17 b), und bei varischer Achsdeformität medial des Kniegelenkzentrums. Nur wenn die Traglinie durch das Kniegelenkzentrum verläuft kann man von einer vollständig gleichmäßigen Kräfteverteilung im Kniegelenk ausgehen.

Die mechanische Achsabweichung wurde vor der Implantation und kurz vor Explantation gemessen. Die Differenzen aus Anfangs- und Endwert wurden berechnet.

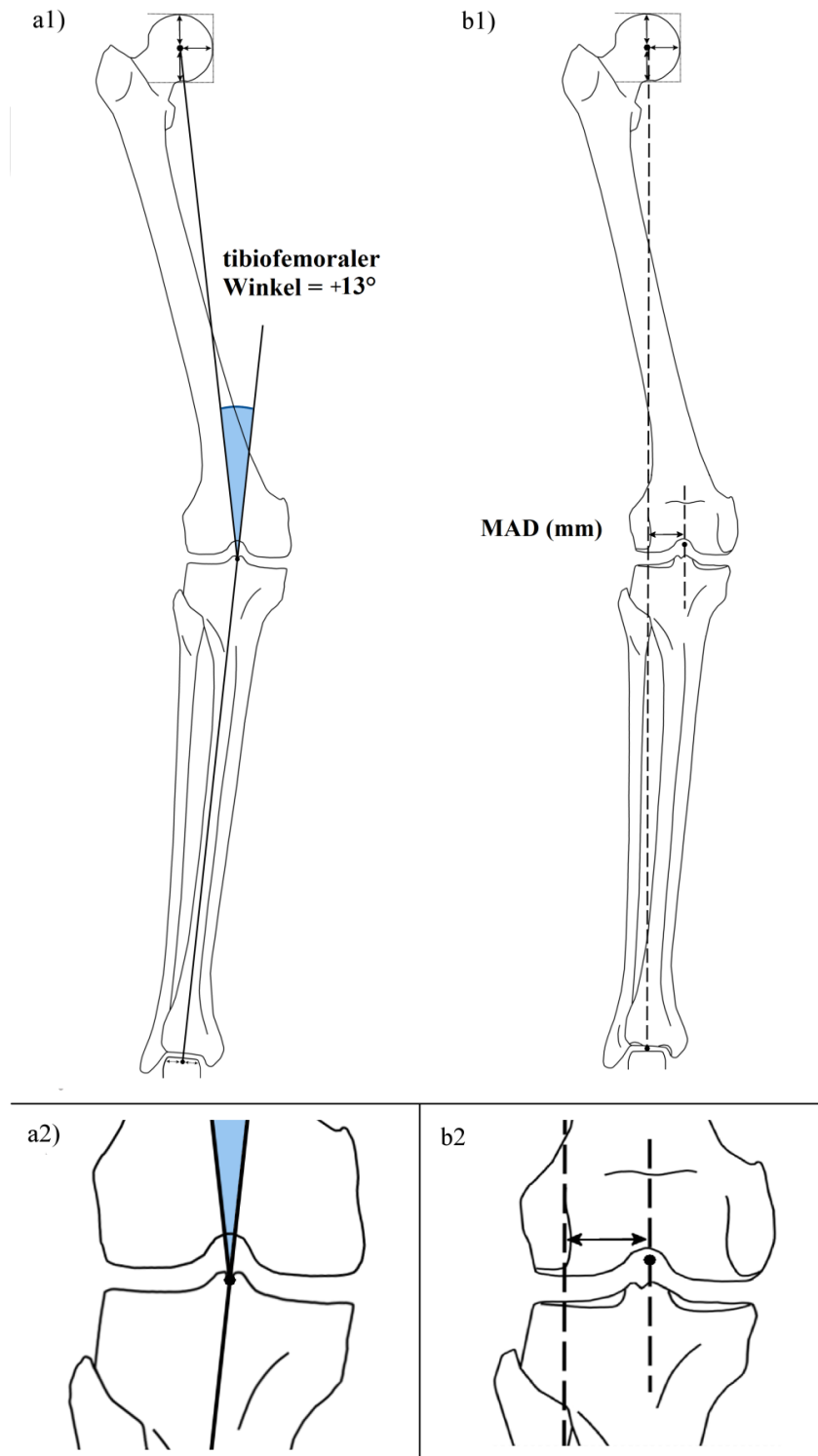


Abbildung 17: a) Messung des mechanischen tibiofemorale Winkels bei einem Genu valgum [nach (Paley, et al., 2001) (Moreland, et al., 1987)]

b) MAD (mechanical axis deviation, mechanische Achsabweichung); die zwei gestrichelten Linien stehen einerseits für die Traglinie (Mikulicz-Linie), und andererseits für eine Linie, die vertikal durch den Kniegelenkmittelpunkt verläuft. Die Spanne des doppelköpfigen Pfeils steht für die MAD (mm).

2.5.5 Mechanischer lateraler distaler femoraler Winkel (mLDFA)

Um den mechanischen lateralen distalen femoralen Winkel (mechanical lateral distal femoral angle, mLDFA) erheben zu können, müssen zwei Geraden bestimmt werden. Die erste Gerade ist die Tangente der femoralen Kondylen. Die zweite Gerade ist die mechanische Femurachse (siehe auch Abbildung 16 a, mechanische femorale Knochenachse). Im Anschluss muss der Winkel zwischen diesen beiden Linien am lateralen distalen Femurpol gemessen werden.

Bei Genua recta ergibt sich ein physiologischer mLDFA von 88° ($85 - 90^\circ$). Liegt eine femorale Mitbeteiligung der Achsdeformität vor, so ist der mLDFA bei Genua valga kleiner als 88° ($85 - 90^\circ$), und bei Genua vara größer als 88° ($85 - 90^\circ$) (Paley, et al., 2001) (siehe Abbildung 18).

Der mechanische laterale distale Femurwinkel (mLDFA) wurde vor der Implantation, sowie kurz vor der Explantation gemessen. Die Differenz dieser beiden Werte wurde anschließend ermittelt.

2.5.6 Mechanischer medialer proximaler tibialer Winkel (mMPTA)

Zur Erhebung des mechanischen medialen proximalen tibialen Winkels (engl. mechanical medial proximal tibial angle, mMPTA) müssen zwei Geraden bestimmt, und anschließend der Winkel am medialen proximalen Tibiapol gemessen werden. Die erste Gerade ist die Tangente des Tibiaplateaus. Die zweite Gerade ist die mechanische Achse der Tibia (siehe auch Abbildung 16 b, tibiale Knochenachse).

Bei Genua recta ergibt sich ein physiologischer mMPTA von 87° ($85 - 90^\circ$). Liegt eine tibiale Mitbeteiligung der Achsdeformität vor, so ist der mMPTA bei Genua valga größer als 87° ($85 - 90^\circ$), und bei Genua vara kleiner als 87° ($85 - 90^\circ$) (Paley, et al., 2001) (siehe Abbildung 18).

Der mMPTA wurde prä implantationem, sowie prä explantationem gemessen. Aus diesen beiden Werten wurde der Differenzwert berechnet.

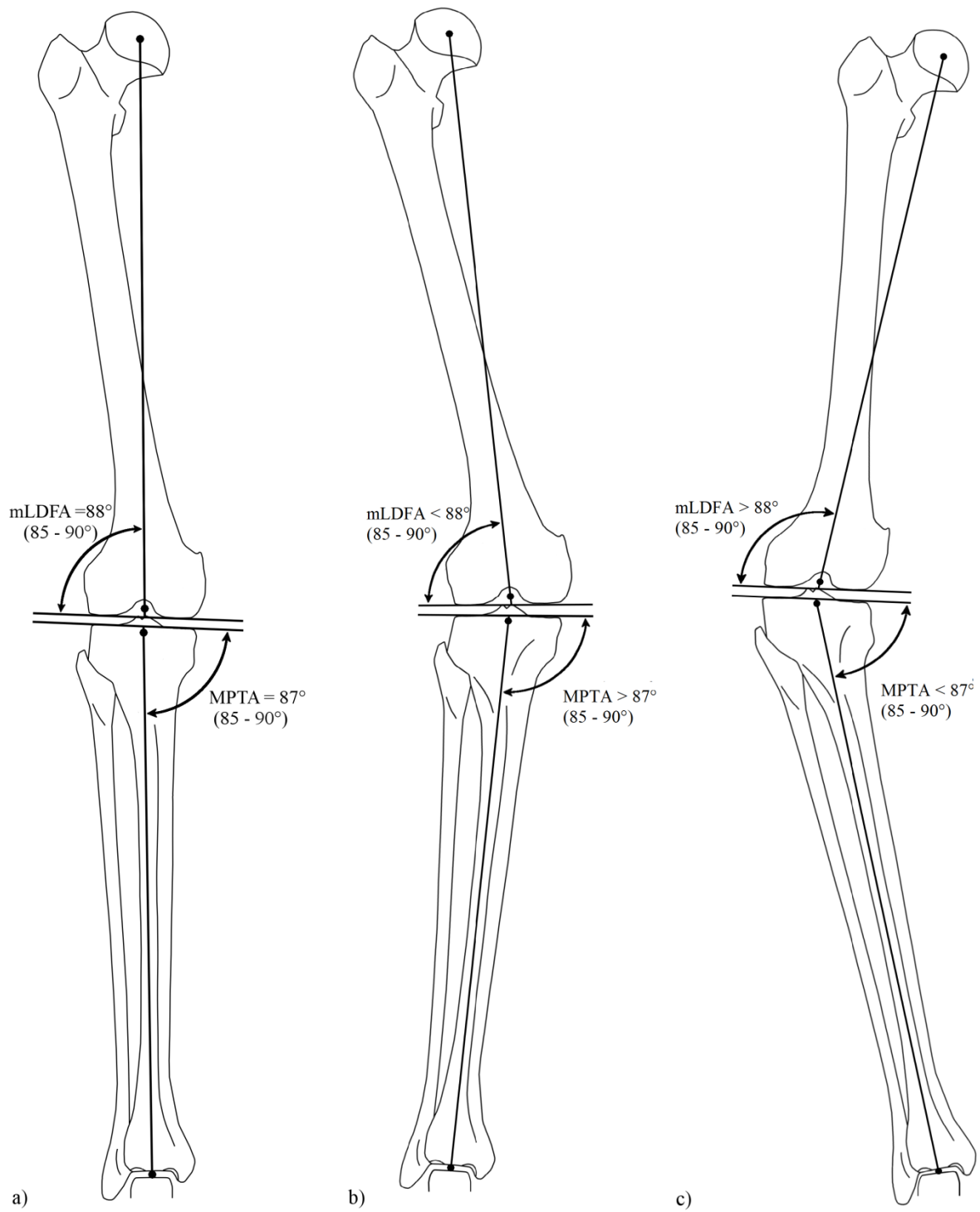


Abbildung 18: mLDFA und mMPTA bei a) Genu rectum, b) Genu valgum, c) Genu varum
[nach (Paley, et al., 2001), (Moreland, et al., 1987)]

2.5.7 Tibiaplateaubreite

Die Tibiaplateaubreite wurde bei allen Extremitäten vor der Implantation, sowie kurz vor der Explantation gemessen. Diese Werte wurden benötigt, damit die jeweiligen MAD's in Relation zur halben Tibiaplateaubreite gesetzt werden konnten (siehe Abbildung 22, 2.5.8, MAD zur Tibiaplateaubreite).

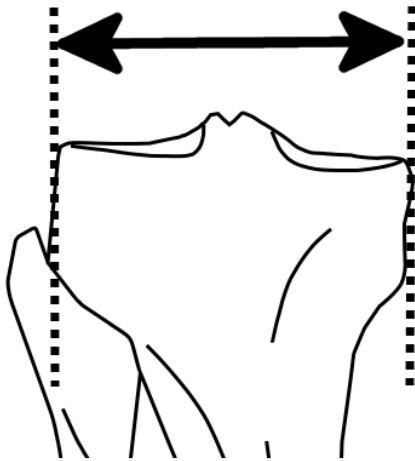


Abbildung 19: Tibiaplateaubreite

Die gestrichelten Linien markieren die Enden des Tibiaplateaus. Die Pfeilspanne steht für den Abstand zwischen diesen gestrichelten Linien, und damit für die Tibiaplateaubreite.

2.5.8 MAD zur Tibiaplateaubreite

Um eine bessere Darstellung der Entwicklung der Beinachsen zu ermöglichen und um größen- bzw. wachstumsbedingte Unterschiede zu erfassen, wurden die MAD's aller Extremitäten in Relation zu der Breite des Tibiaplateaus gesetzt. Es wurde hierfür nur die Hälfte der Tibiaplateaubreite (TPB/2) betrachtet. So wurden vom Zentrum des Tibiaplateaus aus Zonen bestimmt. In Zone 1 fallen jene Fälle mit einer $MAD \leq 50\%$ der TPB/2. In Zone 2 fallen jene Fälle mit einer MAD von 51-100 % der TPB/2. In Zone 3 fallen alle Fälle mit einer MAD von 101-200 % der TPB/2. In Gruppe 4 fallen alle Fälle mit einer $MAD > 200\%$ der TPB/2. Beispiel: Beträgt die Tibiaplateaubreite (TPB) 8cm, so ist die TPB/2 4cm; weicht die MAD von der Mitte des Tibiaplateaus 3 cm ab, so beträgt die MAD 75 % der TPB/2 und zieht somit durch Zone 2 (siehe Abbildung 20) [vgl. (Yilmaz, et al., 2013)].

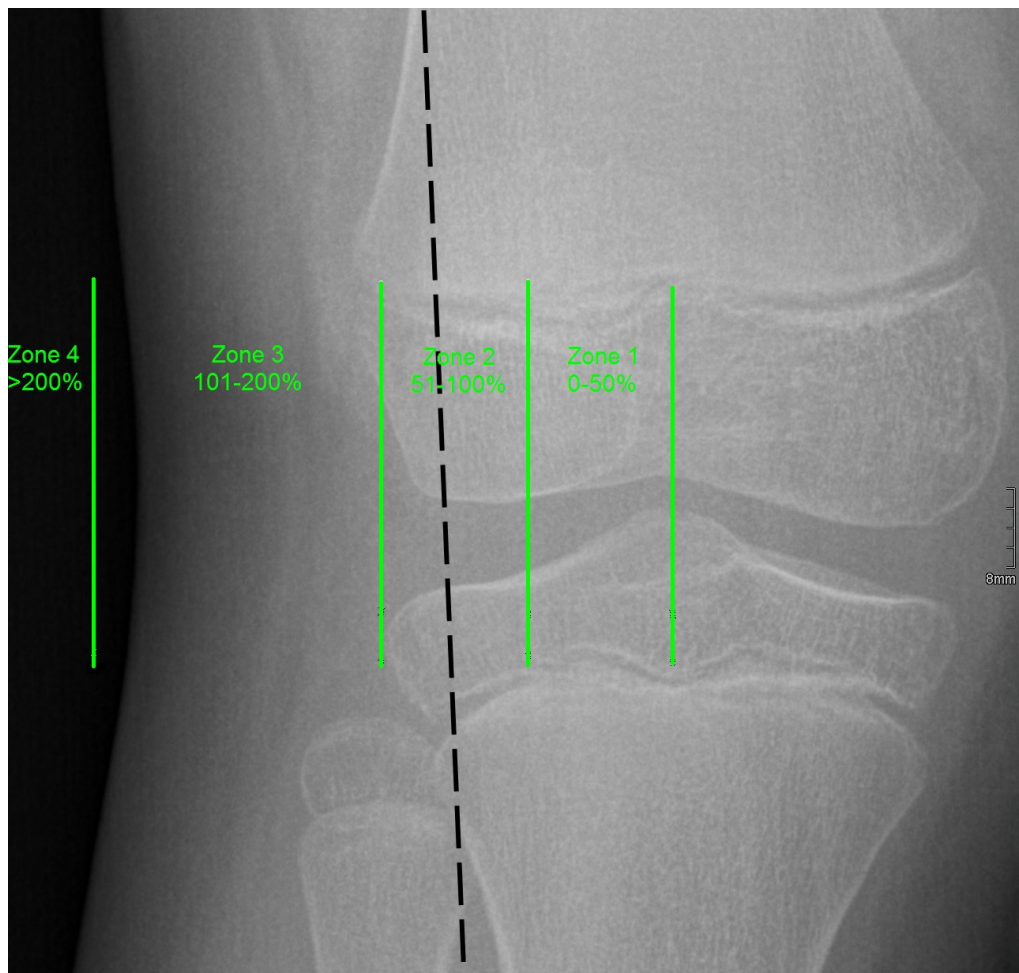


Abbildung 20: Darstellung der MAD's zur Tibiaplateaubreite anhand eines Röntgenbildes in anteriorer-posteriorer Projektion

2.6 Verlauf der frontalen Kniegelenkebene

Wie einleitend bereits erwähnt verläuft die frontale Kniegelenkebene physiologischerweise bei hüftbreitem Stand mit einem circa 3 Grad medialem Gefälle zum Boden hin. Bei diesem hüftbreitem bzw. „lockeren“ Stand sind die mechanischen Beinachsen vertikal im Raum angeordnet (siehe Abbildung 24 a).

Stehen die Füße nahe beieinander, so positioniert sich die frontale Kniegelenkebene in eine parallele Position zur Bodenlinie. Die mechanischen Beinachsen zeigen dabei eine Abweichung von circa 3 ° zur vertikalen Körperachse. Auch während des Gangzyklus‘ nimmt das Standbein eine solche Position ein (Paley, et al., 2001) (siehe Abbildung 24 b).

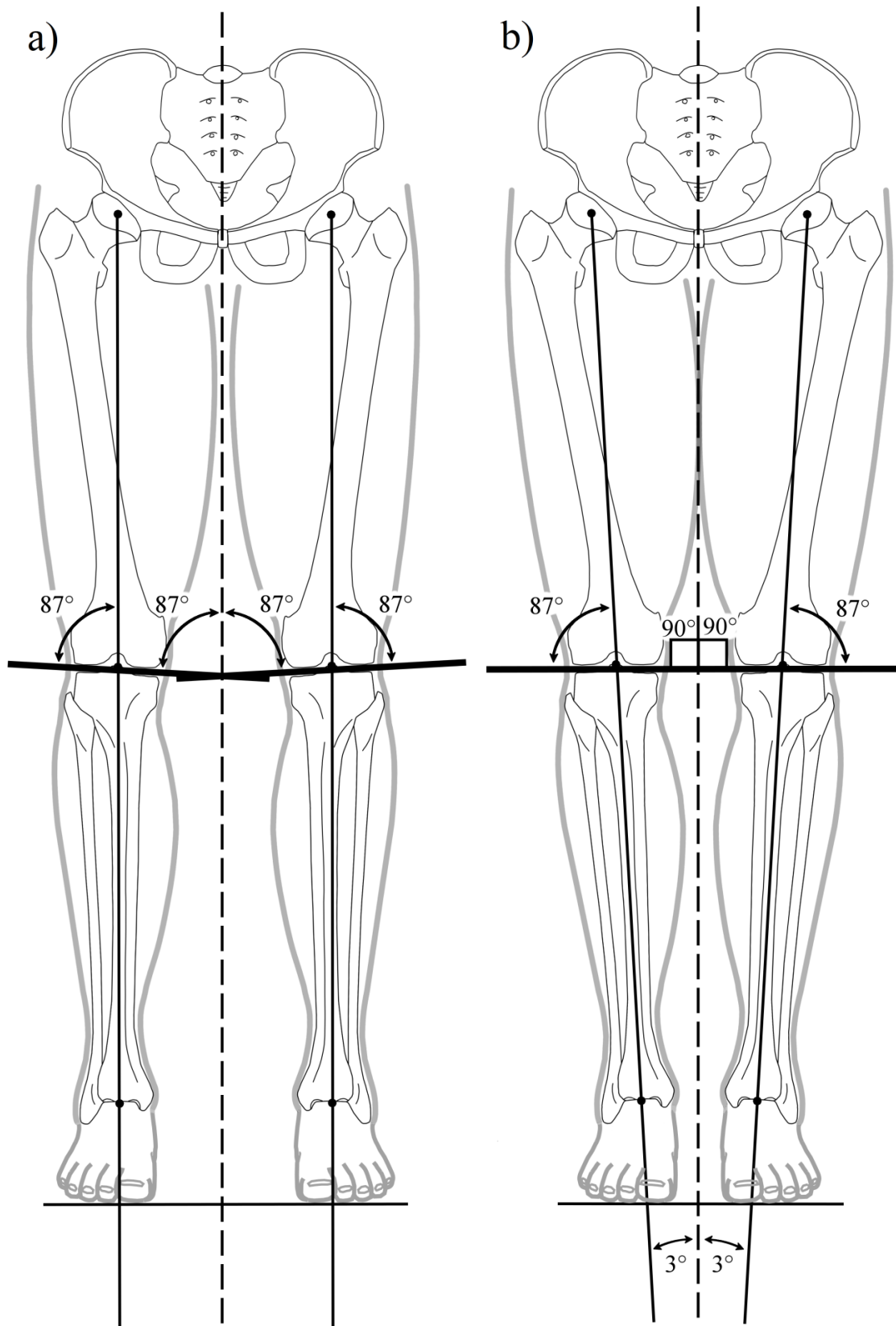


Abbildung 21: Verhalten der Gelenkwinkel bei a) hüftbreitem Standbild („lockerer Haltung“) und b) engem Standbild („Bereitschaftshaltung“, vgl. Standbeinphase während des Gehens) Gestrichelte Linie = vertikale Mittellinie [nach (Paley, et al., 2001)]

2.7 Joint line convergence angle (JLCA)

Der Gelenklinien-Konvergenz-Winkel (Joint line convergence angle, JLCA) beschreibt eine mögliche Konvergenz der femoralen und tibialen frontalen Kniegelenklinie zueinander [(Paley, et al., 2001)]. Stehen die Gelenklinien (Tangenten der radiologischen Gelenkflächen) nicht parallel zueinander, so ist der $JLCA \neq 0^\circ$. Hierdurch wird eine eventuelle Bandlaxizität mit kollateraler Aufklappbarkeit, möglicherweise auch eine asymmetrische Knorpeldicke im medialen und lateralen Kniegelenkkompartiment widergespiegelt. Nach Paley et al. (2001) beträgt der JLCA beim Erwachsenen physiologischerweise $0-2^\circ$.

Die Beurteilung dieses Winkels gewinnt besonders bei Hypermobilitätssyndromen und bei jungen Kindern an Gewicht, bei denen die Ausprägung der knöchernen Epiphysen noch gering und somit die Knorpeldicke höher ist. Hierdurch ist die Beurteilung der tatsächlichen frontalen Kniegelenkebene im Röntgenbild anhand der Kniegelenkorientierungswinkel, die die Tangenten der knöchernen radiologischen Gelenkflächen berücksichtigen erschwert.

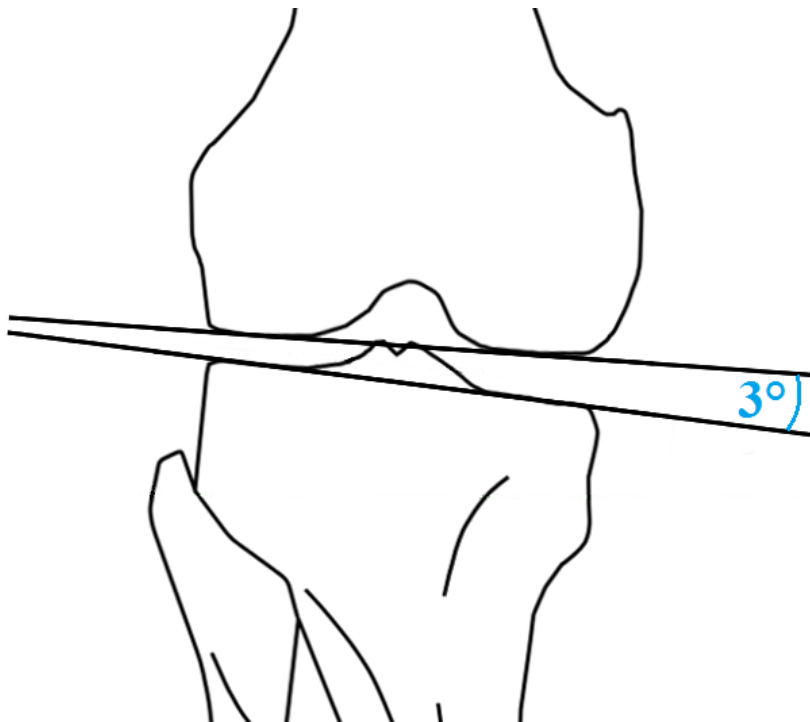


Abbildung 22: Gelenkslinien-Konvergenz-Winkel (engl. joint line convergence angle, JLCA). Stehen die Gelenkslinien (Tangenten der Gelenkflächen) nicht parallel zueinander, so ist der $JLCA \neq 0^\circ$ [nach(Paley, et al., 2001)].

2.8 Frontaler Gelenkebenen-Boden-Winkel (fGBW)

Wie oben ausgeführt verläuft die frontale Kniegelenkebene physiologischerweise nahezu parallel zum Boden, d.h. je nach Standbreite der Füße zwischen 0 und 3 ° nach medial abfallend. Hinweise über den Verlauf der frontalen Kniegelenkebene geben die mechanischen Kniegelenkorientierungswinkel mL DFA und m MPTA. Da diese jedoch nach Paley einen relativ großen Referenzbereich von 85 – 90 ° aufweisen, ist die Beurteilung dieser Winkel hinsichtlich der frontalen Kniegelenkorientierung nur im Zusammenhang und nicht einzeln möglich. Zusätzlich muss bei der Bewertung der Kniegelenkorientierungswinkel der mechanische tibiofemorale Winkel als Maß für die Beinachse mit beurteilt werden, da je nach Achsdeformität die Kniegelenkorientierungswinkel erheblich pathologisch verändert sein können und dennoch eine physiologisch parallel zum Boden verlaufende frontale Kniegelenkebene besteht (s.o.). Schließlich hat auch der „joint line convergence angle“ (JLCA) einen – je nach Lebensalter mehr oder minder ausgeprägten – Einfluss auf die frontale Kniegelenkebene.

Um eine schnellere und einfache Orientierung über die reelle Position der frontalen Kniegelenkebene zu ermöglichen, wurde daher im Rahmen dieser Arbeit der frontale Gelenkebenen-Boden-Winkel (fGBW) entwickelt und hiermit eine neue bisher nicht etablierte Möglichkeit zur quantitativen Messung einer möglichen Abweichung der frontalen Kniegelenkebene von der Parallelität zum Boden vorgestellt.

Der fGBW beschreibt einen Winkel zwischen einer horizontalen Linie im Raum (Parallele zur Bodenlinie) und einer mittigen Linie zwischen den Tangenten der kniegelenkbildenden Gelenkflächen. Er wird im Röntgenbild der Beinachsen unter Belastung (stehend) bestimmt. Die Angabe des Wertes wurde folgendermaßen gewählt: Ist der Winkel positiv, so steigt die Kniegelenkebene nach lateral an. Ist der Winkel negativ, so fällt die Kniegelenkebene nach lateral ab. Physiologischerweise ergibt sich je nach Fußposition ein Wert von 0 – 3 ° (siehe Abbildung 23, Abbildung 24 und Abbildung 25).

Dieser Winkel ist im Gegensatz zu den Kniegelenkorientierungswinkeln (LDFA/MPTA) unabhängig vom Verlauf der mechanischen Beinachse sowie der mechanischen oder anatomischen Femur- bzw. Tibiaachse und berücksichtigt zusätzlich den „joint line convergence angle“ (JLCA) nach Paley (2001) (s.o.). Somit reicht die Messung eines einzigen Winkels zur schnellen Orientierung über den Verlauf der frontalen

Kniegelenkebene aus.

Der fGBW wurde vor Therapiebeginn und nach Korrektur- und vor geplanter Metallentfernung gemessen und verglichen.

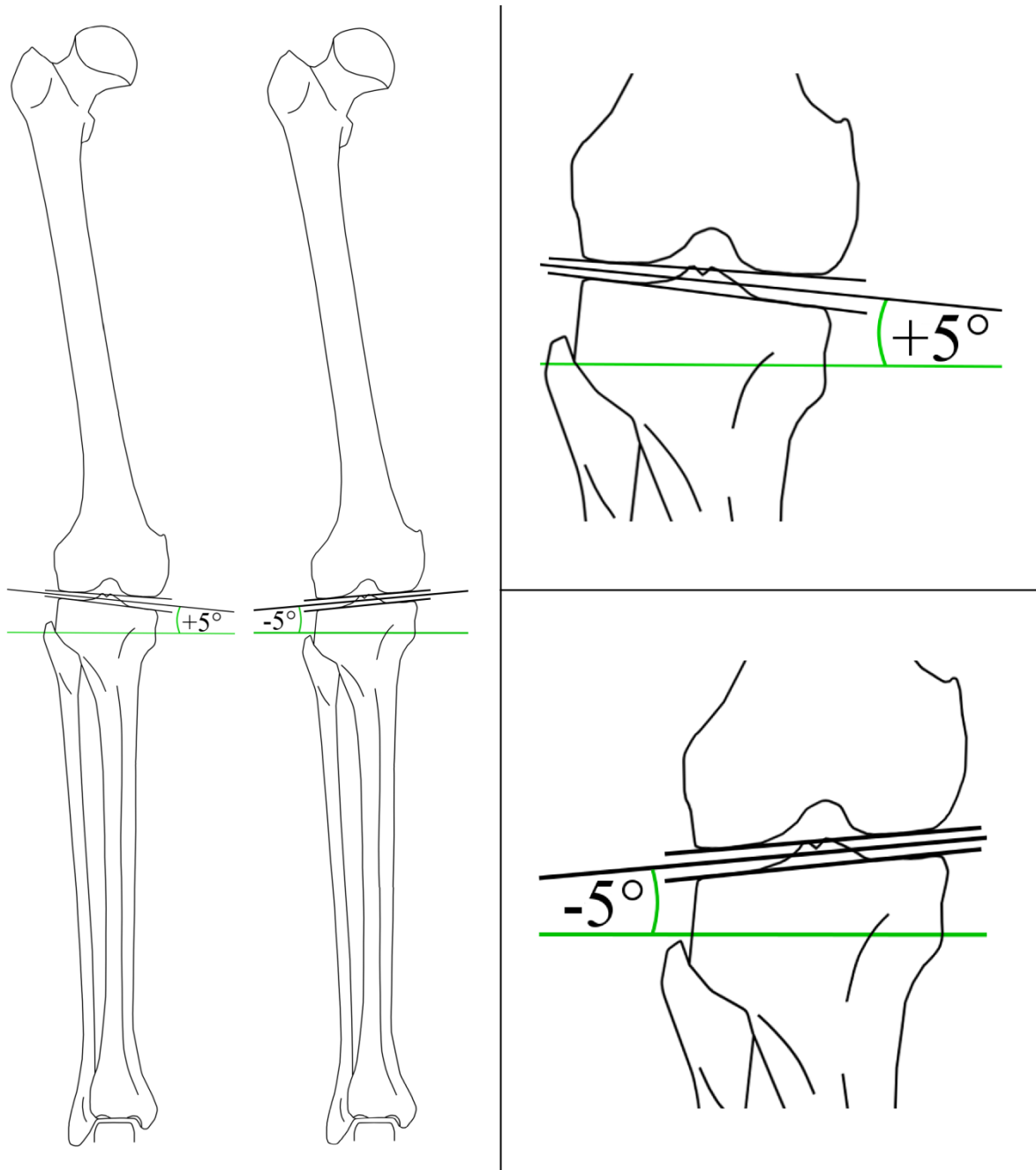


Abbildung 23: Positiver und negativer frontaler Gelenkebenen-Boden-Winkel

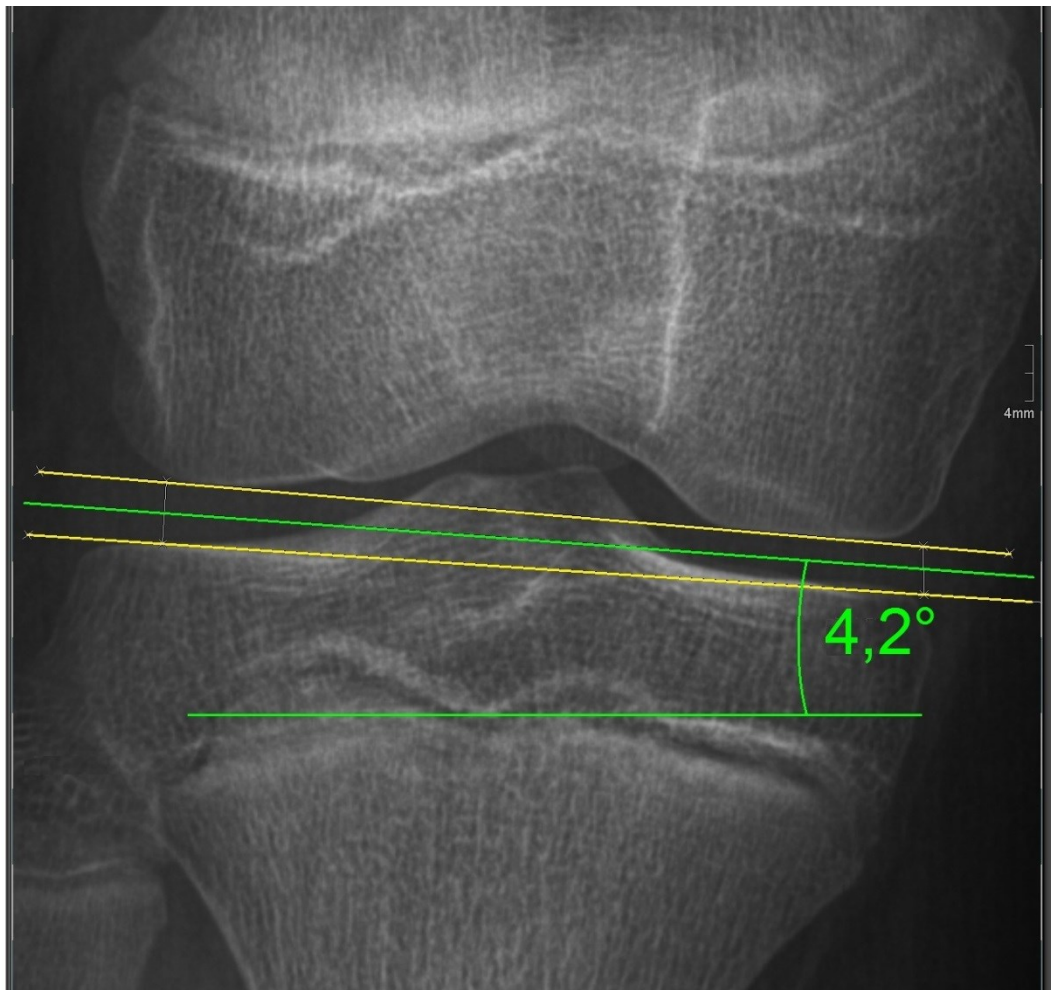


Abbildung 24: positiver fGBW; gelbe Linien = Tangenten der Femurkondylen und des Tibiaplateaus, horizontale grüne Linie = Bodenebene, schräge grüne Linie = mittige Linie zwischen den Tangenten

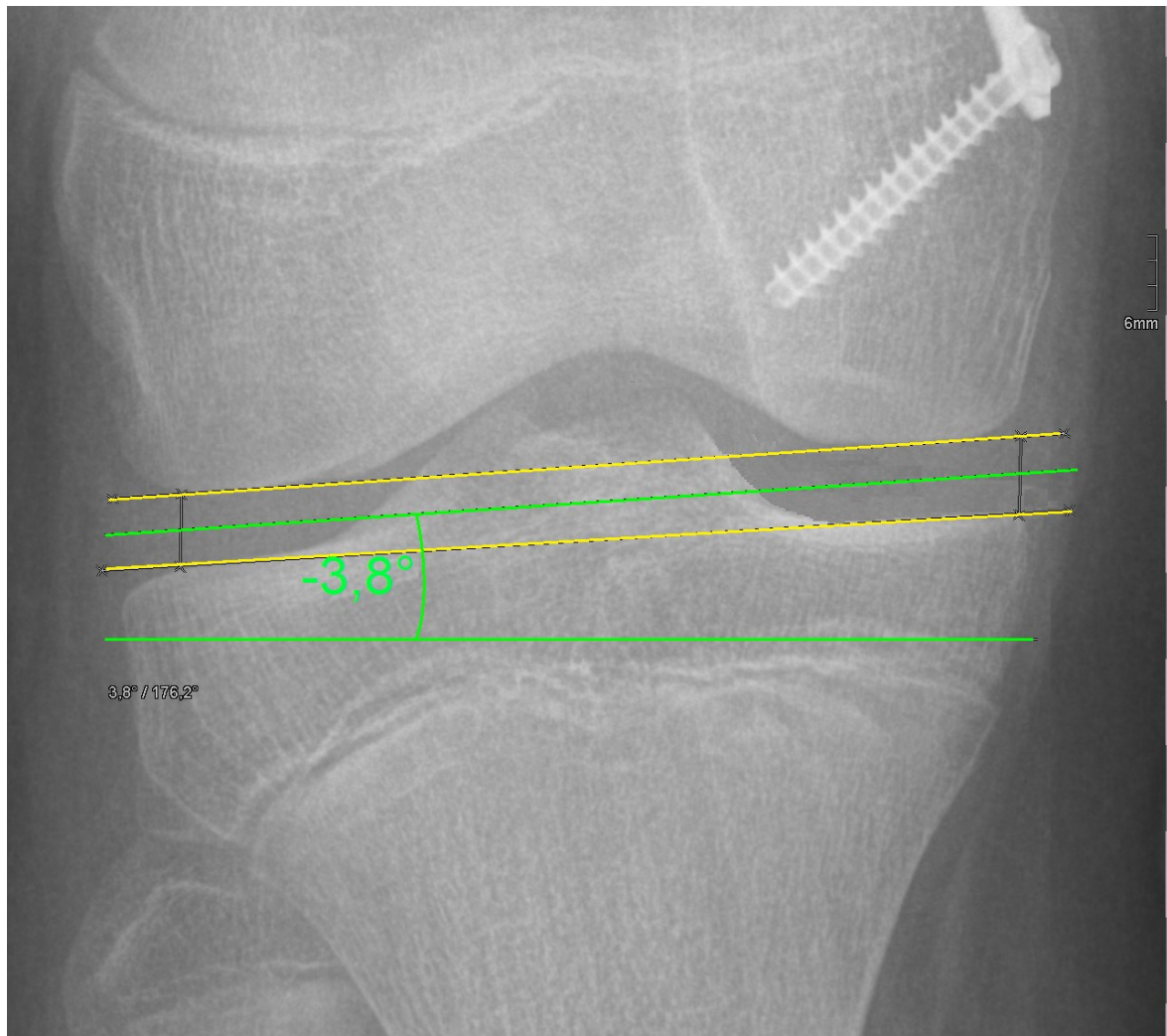


Abbildung 25: negativer fGBW; gelbe Linien = Tangenten der Femurkondylen und des Tibiaplateaus, horizontale grüne Linie = Bodenebene, schräge grüne Linie = mittige Linie zwischen den Tangenten

2.9 Statistik

Die grafische Verteilung und vergleichende Darstellung der Daten erfolgte anhand von Box-Whisker-Plots, welche in SPSS® Version 22 von IBM® angefertigt wurden (siehe Anhang 10.1). Zur statistischen Auswertung wurden SPSS® von IBM® und Excel® von Microsoft® verwendet.

Es wurden die Ergebnisse i.d.R. durch Mittelwert, Standardabweichung und „range“ dargestellt. Der Mittelwert ist hier definiert als der Quotient aus der Summe aller Werte und der Anzahl aller Werte (= arithmetisches Mittel). Die Standardabweichung ist eine Kenngröße der Streuung einer Variablen und wird aus der Quadratwurzel der Varianz berechnet. Die „range“ ist auch ein Streuungsmaß und gibt die Spannweite von Messwerten wieder; sie ist die Spannweite zwischen dem größten und dem kleinsten gemessenen Wert.

Die Regressionsanalyse wurde mit SPSS® von IBM® angefertigt. Sie wurde erhoben, um einen möglichen Effekt des fGBW auf die Korrekturverlustwahrscheinlichkeit nachzuweisen zu können. Hierbei wurde u.a. der p-Wert, die Odds Ratio und das 95%-Konfidenzintervall berechnet. Der p-Wert wird auch Signifikanzwert genannt und sagt aus, wie wahrscheinlich es ist, dass die Nullhypothese verworfen werden kann, also wie wahrscheinlich es ist, dass ein Effekt nachgewiesen werden kann. Der p-Wert ist also ein Maß für eine Wahrscheinlichkeit. Er kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je kleiner der p-Wert, desto wahrscheinlicher kann die Nullhypothese verworfen werden. In dieser Arbeit wird ab einem p-Wert $\leq 0,05$ angenommen, dass ein Wert statistisch signifikant ist. Die Odds Ratio sagt aus, wie stark der Zusammenhang zweier Merkmale ist. Je höher die Odds-Ratio, desto höher der Zusammenhang. Das hier verwendete 95%-Konfidenzintervall besagt, dass zu 95% die wahre Odds Ratio innerhalb einer bestimmten Spannweite (dem berechneten Konfidenzintervall) liegt. (Weiß, et al., 2013)

Eine statistische Beratung erfolgte durch das Institut für medizinische Biometrie und Statistik der Universität zu Lübeck (Herr Dr. rer. hum. biol. Arne Schillert).

2.10 Datendarstellung und -auswertung

Zur Datendokumentation und Datenverwertung wurde Microsoft® Excel® und SPSS® von IBM® genutzt. SPSS® wurde insbesondere für die Erstellung von Box-Whisker-Plots und für die binäre logistische Regressionsanalyse verwendet (siehe Anhang 10.1, Abbildung 32).

Zur Textverarbeitung wurde das Programm Microsoft® Word® 2010 verwendet. Mit dessen Hilfe ließ sich eine Textdatei erstellt, in die alle erstellten Grafiken und Tabellen einfließen. In Microsoft® Word® wurde eine Dokumentenvorlage verwendet, die von der Arbeitsgruppe „Elektronisches Publizieren“ der Humboldt-Universität zu Berlin frei zur Verfügung gestellt wurde, und unter der Creative-Commons-Lizenz steht. Diese Dokumentenvorlage ermöglichte das Anlegen eines Inhalts- und Quellenverzeichnisses, sowie deren effektive Verwaltung. Die Tabellen wurden meist in Excel®, seltener in Microsoft® Word® erstellt. In Microsoft® Word® wurde insbesondere die grafische Oberfläche der Tabellen gestaltet. Für die Erstellung von grafischen Darstellungen wurde das Programm GIMP Version 2.8 genutzt. GIMP steht für „GNU Imaging Manipulation Program“ und ist eine kostenlose Software zur Erstellung und Bearbeitung von pixelbasierten Bildern. „GNU“ steht dabei für das GNU-Projekt, welches sich für freie Software einsetzt.

3. Ergebnisse

3.1 Implantatverweildauer von Epiphyseodesen

Der durchschnittliche Zeitraum der passageren Epiphyseodese bis zur Achskorrektur betrug bei den Jungen 10,8 Monate ($\pm 6,6$ Monate, range 3 – 29 Monate), bei den Mädchen 7,6 Monate ($\pm 4,3$ Monate, range 3 – 22 Monate). Dies ergibt insgesamt im Durchschnitt eine Standzeit von 9 Monaten ($\pm 5,6$ Monate, range 3 – 29 Monate) (siehe Tabelle 2).

Gesamt (n = 99)	Mittelwert	SD	Min	Max
♂ (n = 43)	10,8 Monate	6,6 Monate	3,0 Monate	29,0 Monate
♀ (n = 56)	7,6 Monate	4,3 Monate	3,0 Monate	22,0 Monate
total (n = 99)	9,0 Monate	5,6 Monate	3,0 Monate	29,0 Monate

Tabelle 2: Implantatverweildauer der Epiphyseodesen (n=99)

3.2 Gelenkwinkel- und Beinachsänderungen

Es wurden zusätzlich zu den unteren Punkten noch die Entwicklung der MAD (siehe Anhang 10.5) und die Entwicklung der Position der MAD zu der halben Tibiaplateaubreite (siehe Anhang 10.6) beschrieben.

3.2.1 Entwicklung der mechanischen Beinachse anhand des mechanischen tibiofemoralen Winkels

Eine vollständige Korrektur der mechanischen Beinachse konnte bei 39 / 44 Patienten (71 / 78 Extremitäten) erreicht werden. In 7 der 78 Fälle (9 %) war die Beinachse aufgrund eines nicht mehr ausreichenden Rest-Wachstums bei Therapieende zwar deutlich gebessert, aber nicht vollständig korrigiert. Die Indikation zu weiteren operativen Maßnahmen im Sinne einer Korrekturosteotomie ergab sich in diesen Fällen nicht.

Eine therapiebedürftige Überkorrektur sahen wir bei 3 der 44 Patienten (5 / 78 Extremitäten, 6,4 %; alle Fälle Genua valga). Bei diesen 3 Patienten (5 überkorrigierte Beinachsen) erfolgte die operative Gegenregulation mittels einer kontralateralen Hemiepiphyseodese. Hiermit konnte bei allen eine komplette Achskorrektur erreicht werden.

Bei zwei weiteren Patienten zeigte sich bei Therapieende eine lediglich milde Überkorrektur, welche sich klinisch über das weitere Wachstum spontan korrigierte.

Insgesamt betrug prä implantationem der mechanische tibiofemorale Winkel in der Gruppe der Genua valga im Durchschnitt $6,9^{\circ}$ ($\pm 3,3^{\circ}$, range $3 - 23^{\circ}$).

Nach erfolgter Achskorrektur kurz vor Explantation der eight-Plates™ betrug der mittlere mechanische tibiofemorale Winkel $-0,2^{\circ}$ ($\pm 2,9^{\circ}$, range $-7,0 - 7,0^{\circ}$). Somit wurde der mechanische tibiofemorale Winkel bei Genua valga um durchschnittlich $7,1^{\circ}$ ($\pm 4,0^{\circ}$, range $1,0 - 17,0^{\circ}$) korrigiert (siehe Anhang 10.4 und Abbildung 26).

Bei Genua vara betrug der mechanische tibiofemorale Winkel präoperativ $-7,2^{\circ}$ ($\pm 4,0^{\circ}$, range $-19 - -3^{\circ}$). Kurz vor Explantation betrug der mechanische tibiofemorale Winkel im Durchschnitt $-1,2^{\circ}$ ($\pm 2,6^{\circ}$, range $-9,0 - 2,0^{\circ}$). Der mechanische tibiofemorale Winkel wurde bei Genua vara im Mittel um $6,0^{\circ}$ ($\pm 2,7^{\circ}$, range $2,0 - 12,0^{\circ}$) korrigiert (siehe Anhang 10.4 und Abbildung 26).

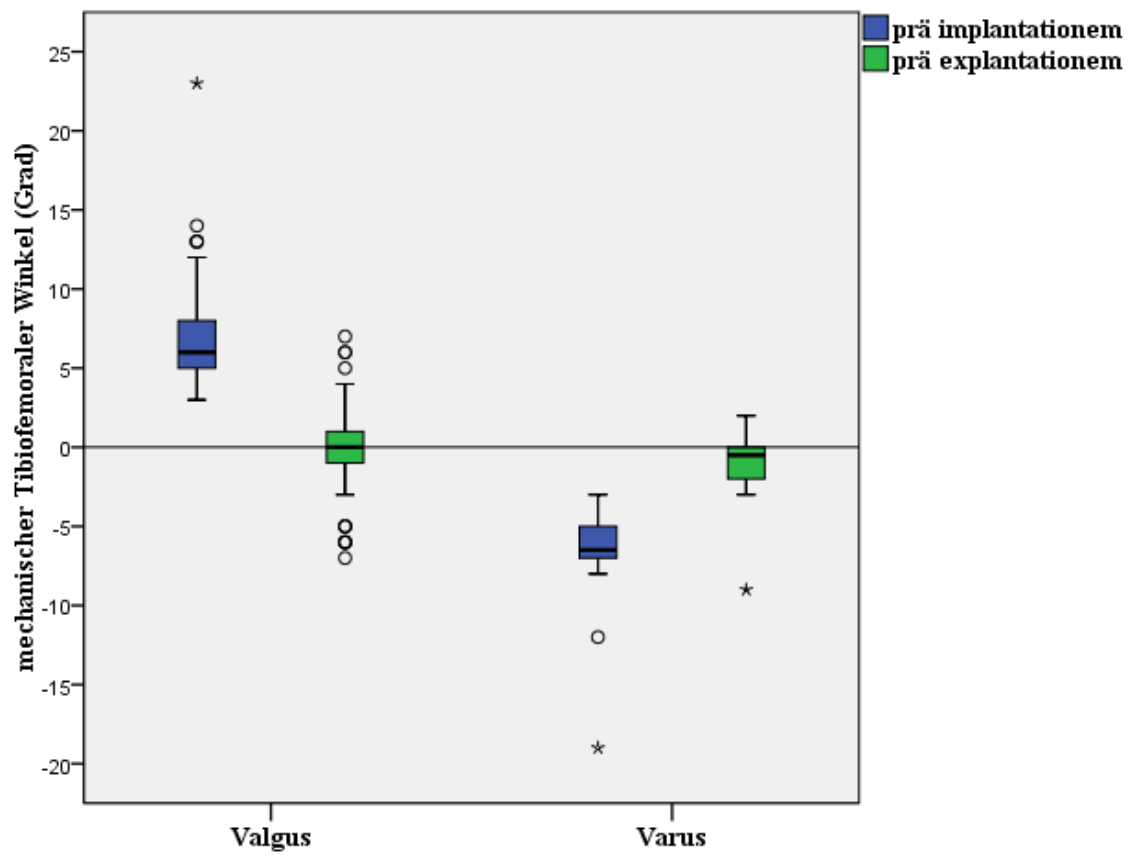


Abbildung 26: Entwicklung der mechanischen Beinachse (femorotibialer Winkel) bei Genua valga und vara

3.2.2 Entwicklung des mL DFA

Bei Genua valga betrug der mL DFA vor Implantation im Mittel $83,1^\circ$ ($\pm 3,1^\circ$, range 70 – 88°). Kurz vor Explantation betrug der mL DFA im Mittel $89,5^\circ$ ($\pm 2,8^\circ$, range 82,0 – $96,0^\circ$). Damit wurde der mL DFA bei Genua valga durchschnittlich um $6,4^\circ$ ($\pm 2,9^\circ$, range 1,0 – $13,0^\circ$) korrigiert (siehe Anhang 10.4 und Abbildung 27).

Präoperativ betrug der mL DFA bei Genua vara durchschnittlich $93,2^\circ$ ($\pm 3,8^\circ$, range 89 – 102°). Post explantationem betrug der mL DFA bei Genua vara im Durchschnitt $89,7^\circ$ ($\pm 3,5^\circ$, range 83 – 96°). Damit wurde der mL DFA bei Genua vara durchschnittlich um $3,6^\circ$ ($\pm 2,1^\circ$, range 1,0 – $6,0^\circ$) korrigiert (siehe Anhang 10.4 und Abbildung 27).

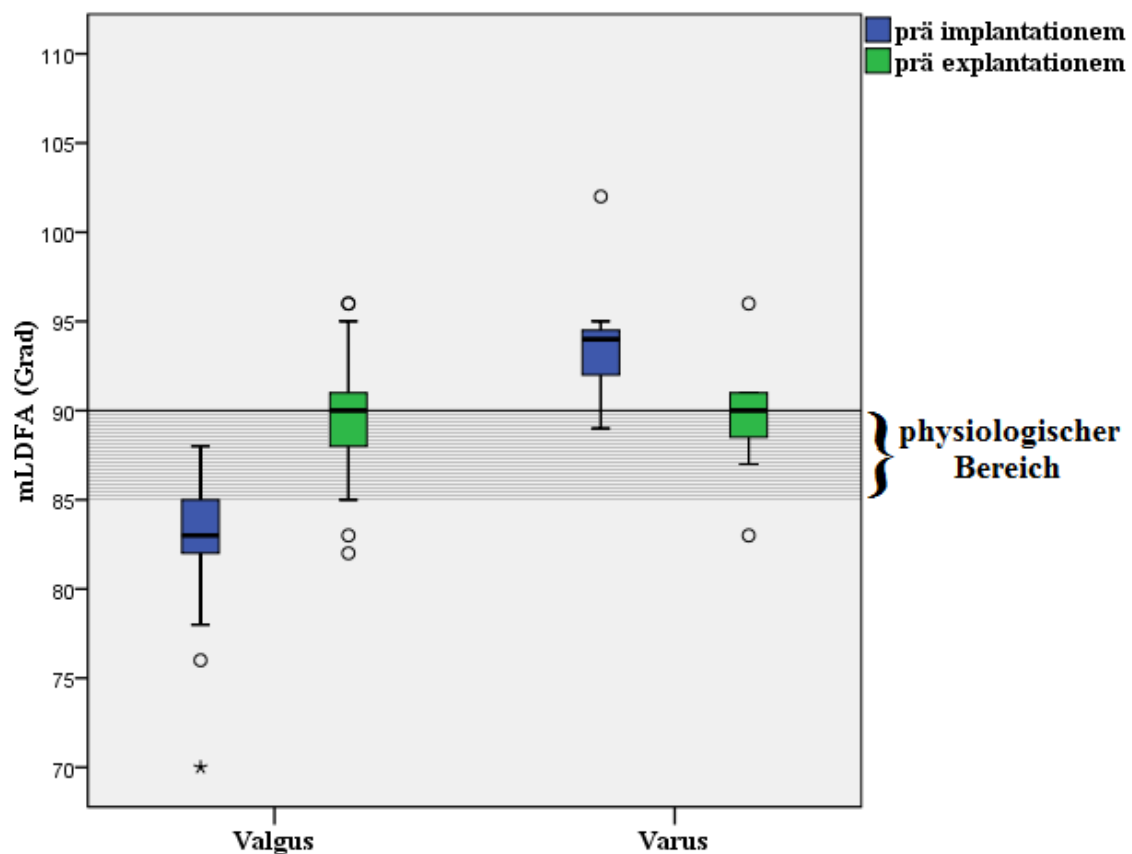


Abbildung 27: Entwicklung des mL DFA bei Genua valga und vara

3.2.3 Entwicklung des mMPTA

Der mMPTA belief sich prä implantationem bei Genua valga im Mittel auf $92,3^\circ$ ($\pm 3,0^\circ$, range $88 - 102^\circ$). Kurz vor Entfernung der Implantate ergab sich ein mMPTA von durchschnittlich 88° ($\pm 2,2^\circ$, range $83,0 - 92,0^\circ$). Somit wurde eine Korrektur der mMPTA bei Genua valga um $4,3^\circ$ ($\pm 3,9^\circ$, range $1,0 - 19,0^\circ$) erreicht (siehe Anhang 10.4 und Abbildung 28).

Vor Implantation betrug der mMPTA bei Genua vara im Durchschnitt $84,6^\circ$ ($\pm 2,4$, range $80,0 - 87^\circ$). Kurz vor Explantation belief sich der mMPTA im Mittel auf $88,4^\circ$ ($\pm 1,8^\circ$, range $85,0 - 91^\circ$). Der mMPTA ließ sich durchschnittlich um $4,2^\circ$ ($\pm 2,5^\circ$, range $1,0 - 9,0^\circ$) ändern (siehe Anhang 10.4 und Abbildung 28).

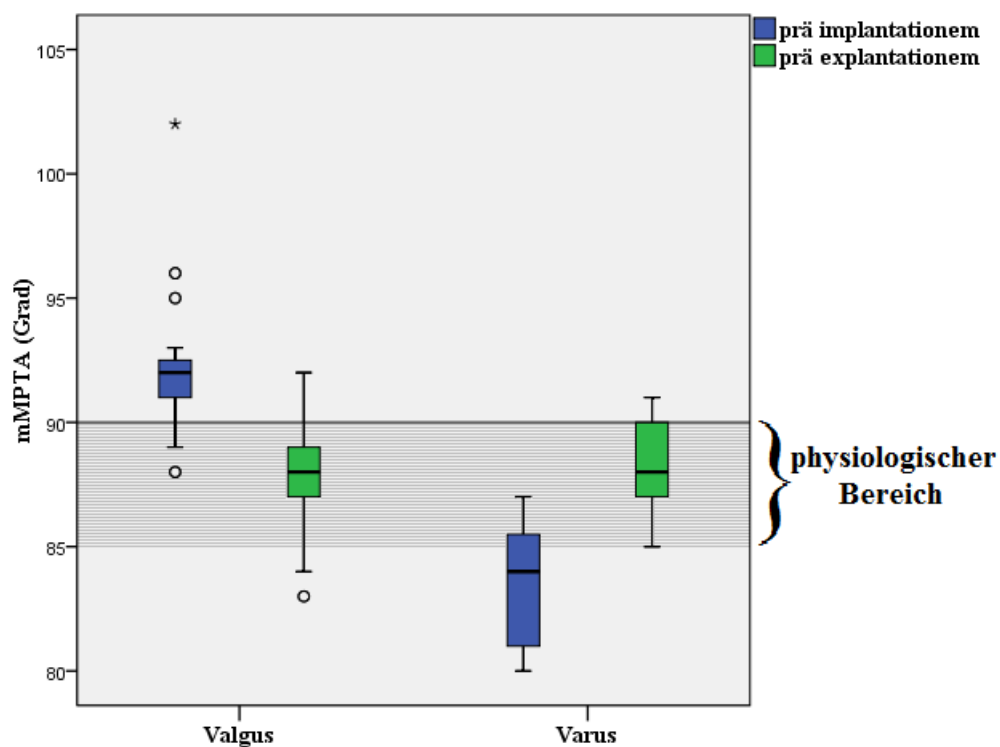


Abbildung 28 Entwicklung des mMPTA bei Genua valga und vara

3.3 Änderung der Beinachsen und Gelenkwinkel (°) im Verhältnis zum Körperlängenwachstum (cm)

Es wurden zusätzlich zu den unten genannten Punkten die allgemeinen mittleren Gelenkwinkel- und Beinachsenänderungen pro Monat ermittelt (siehe Anhang 10.7). Auch eine Gegenüberstellung der Gelenkwinkel- und Beinachsenänderungsgeschwindigkeiten bei einzelnen Hemiepiphyseodesen und femorotibial-kombinierten Hemiepiphyseodesen befindet sich im Anhang (10.9).

3.3.1 Änderung des mechanischen tibiofemorale Winkels (°) im Verhältnis zum Körperlängenwachstum (cm) bei Genua valga und Genua vara

Die mechanische Beinachse konnte bei Genua valga im Durchschnitt um 1,6 °/cm Längenwachstum ($\pm 1,3$ °/cm, range 0,1 – 6,5 °/cm) korrigiert werden. Bei varischen Beinachsen konnte im Mittel eine Korrektur von 1,4 °/cm ($\pm 0,6$ °/cm, range 0,4 – 2,5 °/cm) erzielt werden. Im Gesamtkollektiv zeigte sich eine durchschnittliche Korrekturgeschwindigkeit der Beinachsendeformitäten von 1,6 °/cm ($\pm 1,2$ °/cm, range 0,1 – 6,5 °/cm) (siehe Tabelle 3).

	Mittelwert	SD	Min	Max
Valgus-Korrektur (°/cm)	1,6	1,3	0,1	6,5
Varus-Korrektur (°/cm)	1,4	0,6	0,4	2,5
Gesamt (°/cm)	1,6	1,2	0,1	6,5

Tabelle 3: Änderung des mechanischen tibiofemorale Winkels (°) / Körperlängenwachstum (cm) bei Valgus- und Varusdeformitäten

3.3.2 Singuläre Epiphyseodesen / kombinierte Epiphyseodesen

Es wurde zusätzlich zu den unten aufgeführten Punkten die Änderung der MAD (mm) pro Körperlängenwachstum (cm) bestimmt (siehe Anhang 10.8).

3.3.2.1 Änderung des mechanischen tibiofemoralen Winkels (°) pro Körperlängenwachstum (cm)

In der Gruppe der singulären Epiphyseodesen ($n = 57$) konnte eine durchschnittliche Änderung des mechanischen tibiofemoralen Winkels (°) pro cm Körperlängenwachstums von 1,23 °/cm ($\pm 0,52$ °/cm, range 0,13 – 2,67 °/cm) erreicht werden (siehe Tabelle 4).

Bei kombiniertem Vorgehen ($n = 21$) konnte eine mittlere Korrektur des tibiofemoralen Winkels (°) pro cm Körperlängenwachstum von 2,64 °/cm ($\pm 1,89$ °/cm, range 0,43 – 6,50 °/cm) erreicht werden (siehe Tabelle 4).

	Mittelwert	SD	Min	Max
Singuläre EPD ($n = 57$) (°/cm)	1,23	0,52	0,13	2,67
Kombinierte EPD ($n = 21$) (°/cm)	2,64	1,89	0,43	6,50

Tabelle 4: Änderung des mechanischen tibiofemoralen Winkels (°) pro Körperlängenwachstum (cm) bei singulären Epiphyseodesen und kombinierten Epiphyseodesen

3.3.2.2 Änderung des mL DFA (°) pro Körperlängenwachstum (cm)

Bei singulärem femoralen Vorgehen ($n = 44$) wurde eine mittlere Korrektur des mL DFA von 1,37 ° pro cm Körperlängenwachstum ($\pm 0,51$ °/cm, range 0,50 – 2,57 °/cm) erreicht (siehe Tabelle 5).

Es wurde bei kombiniertem Vorgehen ($n = 21$) im Durchschnitt eine Korrekturrate des mL DFA von 1,40 ° pro cm Körperlängenwachstum ($\pm 1,04$ °/cm, range 0,40 – 4,00 °/cm) erzielt (siehe Tabelle 5).

	Mittelwert	SD	Min	Max
Singuläre EPD; ldf bzw. mdf (n = 44) (°/cm)	1,37	0,51	0,50	2,57
Kombinierte EPD (n = 21) (°/cm)	1,40	1,04	0,40	4,00

Tabelle 5: mL DFA-Änderung (°) pro Körperlängenwachstum (cm) bei singulären EPD und kombinierten EPD

3.3.2.3 Änderung des mMPTA (°) pro Körperlängenwachstum (cm)

In der Gruppe der singulären tibialen EPD (n = 13) konnte der mMPTA im Mittel um 0,81 ° pro cm Körperlängenwachstum ($\pm 0,47$ °/cm, range 0,14 – 1,81 °/cm) geändert werden (siehe Tabelle 6).

Bei kombiniertem Vorgehen wurde eine durchschnittliche Korrektur der mMPTA um 1,26 °/cm Körperlängenwachstum ($\pm 1,07$ °/cm, range 0,2 – 4,00 °/cm) erreicht (siehe Tabelle 6).

	Mittelwert	SD	Min	Max
Singuläre EPD; lpt / mpt (n = 13) (°/cm)	0,81	0,47	0,14	1,81
Kombinierte EPD (n = 21) (°/cm)	1,26	1,07	0,20	4,00

Tabelle 6: mMPTA-Gradänderung pro Körperlängenwachstum (cm) bei singulären EPD und kombinierten EPD

3.4 Frontaler Gelenkebenen-Boden-Winkel (fGBW)

3.4.1 Allgemeine Entwicklung des fGBW (n = 78)

Genua valga zeigten präoperativ in der Regel eine leicht nach medial abfallende frontale Kniegelenkebene. Somit betrug der frontale Gelenkebenen-Boden-Winkel (fGBW) der Patienten mit Genua valga kurz vor Therapiebeginn im Mittel $3,9^\circ$ ($\pm 3,5^\circ$, range $-4 - 10^\circ$) entsprechend der um diesen Wert nach medial deszendierenden frontalen Gelenkebene. Nach Korrektur der Beinachse kurz vor Explantation des Epiphyseodesematerials lag der fGBW mit durchschnittlich $-0,2^\circ$ ($\pm 3,0^\circ$, range $-7 - 6^\circ$) nahezu parallel zur Horizontalen. Es konnte also im Mittel eine Änderung von $5,0^\circ$ ($\pm 3,4^\circ$, range $0 - 15^\circ$) beobachtet werden (siehe Tabelle 7).

Valgus (n = 64)	Mittelwert	SD	Min	Max
Initialer fGBW ($^\circ$)	3,9	3,5	-4	10
Terminaler fGBW ($^\circ$)	-0,2	3,0	-7	6
Änderung des fGBW ($^\circ$)	5,0	3,4	0	15

Tabelle 7: Änderung des fGBW bei der Korrektur von Valgusdeformitäten

Bei den varischen Beinachsen wurde im Mittel ein initialer fGBW von $-1,0^\circ$ ($\pm 2,1^\circ$, range $-4 - 3^\circ$) entsprechend einer leicht nach medial ansteigenden frontalen Kniegelenkebene ermittelt. Nach Therapieende betrug der durchschnittliche fGBW $-0,8^\circ$ ($\pm 1,8^\circ$, range $-4 - 3^\circ$). Die Änderung des fGBW bei der Korrektur von Genua vara betrug im Mittel $2,8^\circ$ ($\pm 1,7^\circ$, range $1 - 6^\circ$) (siehe Tabelle 8).

Varus (n = 14)	Mittelwert	SD	Min	Max
Initialer fGBW ($^\circ$)	-1,0	2,1	-4	3
Terminaler fGBW ($^\circ$)	-0,8	1,8	-4	3
Änderung des fGBW ($^\circ$)	2,8	1,7	1	6

Tabelle 8: Änderung des fGBW bei der Korrektur von Varusdeformitäten

3.4.2 Vergleich der Entwicklung des fGBW bei Einzel-Hemiepiphyseodesen (n = 57) und bei femorotibial-kombinierten Hemiepiphyseodesen (n = 21)

Da die Anzahl von Genua vara in der Gruppe der Einzel-Hemiepiphyseodesen (n = 9) und femorotibial-kombinierten Epiphyseodesen (n = 5) sehr klein ist, wird für diesen Vergleich nur auf die jeweiligen Gruppen der Genua valga eingegangen.

3.4.2.1 Entwicklung des fGBW bei Einzel-Hemiepiphyseodesen bei Genua valga (n = 48)

Der initiale fGBW bei Korrektur von Valgus-Deformitäten belief sich im Durchschnitt bei einer medialen distalen femoralen (mdf) Epiphyseodesenlokation (n = 40) auf $5,8^{\circ}$ ($\pm 2,6^{\circ}$, range $2 - 10^{\circ}$). Kurz vor Explantation betrug der GBW im Mittel $-0,5^{\circ}$ ($\pm 3,1^{\circ}$, range $-7 - 5^{\circ}$). Es konnte eine durchschnittliche Änderung des fGBW von $6,3^{\circ}$ ($\pm 3,3^{\circ}$, range $1 - 15^{\circ}$) bei Einsatz einer mdf Epiphyseodese beobachtet werden (siehe Anhang 10.10 und Abbildung 29).

Bei einer medialen proximalen tibialen (mpt) Epiphyseodesenlokation (n = 8) bei Genua valga zeigte sich initial ein mittlerer fGBW von $-0,4^{\circ}$ ($\pm 1,9^{\circ}$, range $-4 - 2^{\circ}$). Prä explantationem belief sich der durchschnittliche fGBW auf $2,0^{\circ}$ ($\pm 3,0^{\circ}$, range $-2 - 6^{\circ}$). Es ergab sich eine fGBW-Änderung im Durchschnitt von $3,1^{\circ}$ ($\pm 3,4^{\circ}$, range $0 - 10^{\circ}$) (siehe Anhang 10.10 und Abbildung 29).

3.4.2.2 Entwicklung des fGBW bei femorotibial-kombinierten Hemiepiphyseodesen bei Genua valga (n = 16)

Bei Genua valga mit kombinierter femorotibialer Epiphyseodesen (n = 16) betrug der fGBW vor der Implantation im Durchschnitt $1,4^{\circ}$ ($\pm 2,3^{\circ}$, range $-4,0 - 4,0^{\circ}$). Prä explantationem machte der fGBW im Schnitt $-0,3^{\circ}$ ($\pm 2,6^{\circ}$, range $-7,0 - 4,0^{\circ}$) aus. Die Änderung des fGBW betrug durchschnittlich $2,4^{\circ}$ ($\pm 1,5^{\circ}$, range $0,0 - 6,0^{\circ}$) (siehe Anhang 10.10 und Abbildung 29).

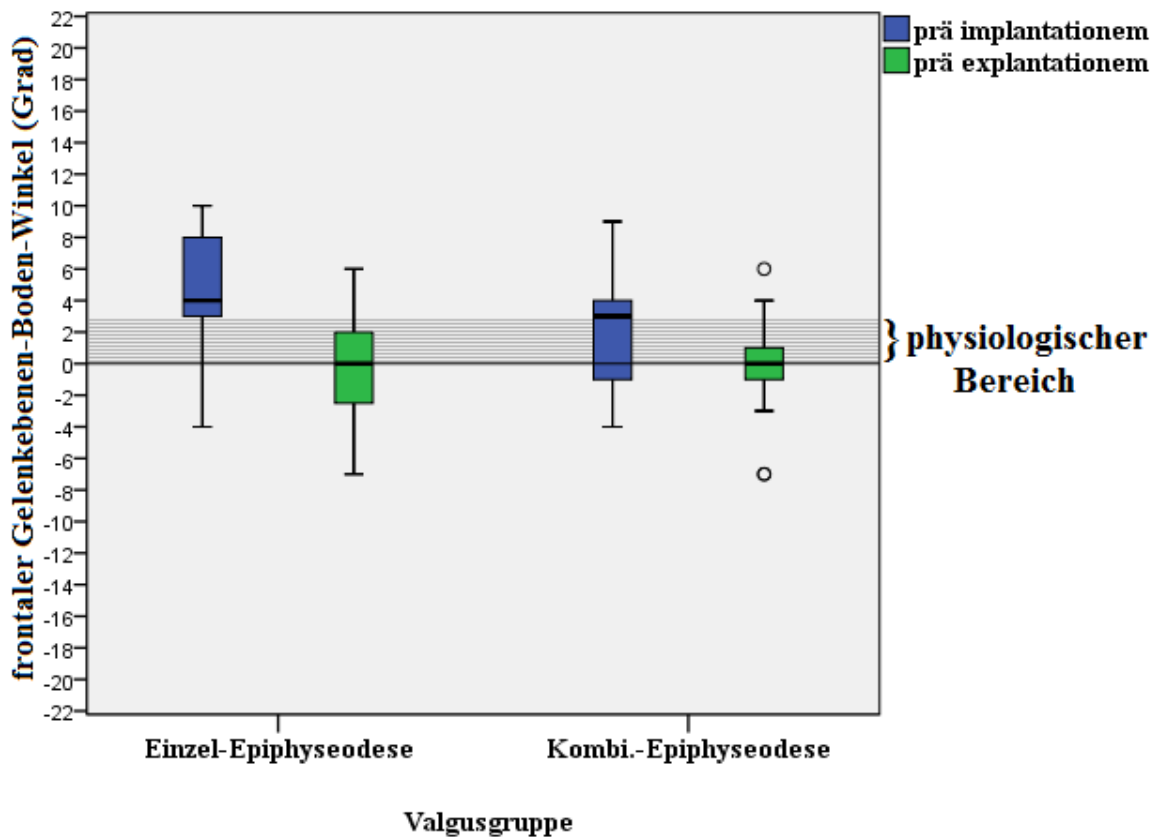


Abbildung 29: Entwicklung des fGBW bei Valgus-Extremitäten prä implantationem und prä explantationem. Einzel-Hemiepiphyseodesen und femorotibial-kombinierte Epiphyseodesen im Vergleich.

3.4.2.3 Änderung des fGBW bei singulären und kombinierten EPD im Vergleich (Valgus und Varus)

Das Ausmaß der Änderung des fGBW vor und nach Achskorrektur wurde als Delta-fGBW im Gesamt-Patientenkollektiv (Valgus und Varus) analysiert. Beim Vergleich der verschiedenen Epiphyseodeseverfahren zeigte sich beim singulären Vorgehen femoral ODER tibial ($n = 57$) eine deutliche stärkere Änderung des fGBW im Therapieverlauf als bei kombinierter femoraler UND tibialer Hemiepiphyseodese ($n = 21$) (siehe Abbildung 30 und Tabelle 9). Dieser Unterschied des Delta-fGBW zwischen den beiden Gruppen erwies sich als statistisch signifikant (siehe Tabelle 10).

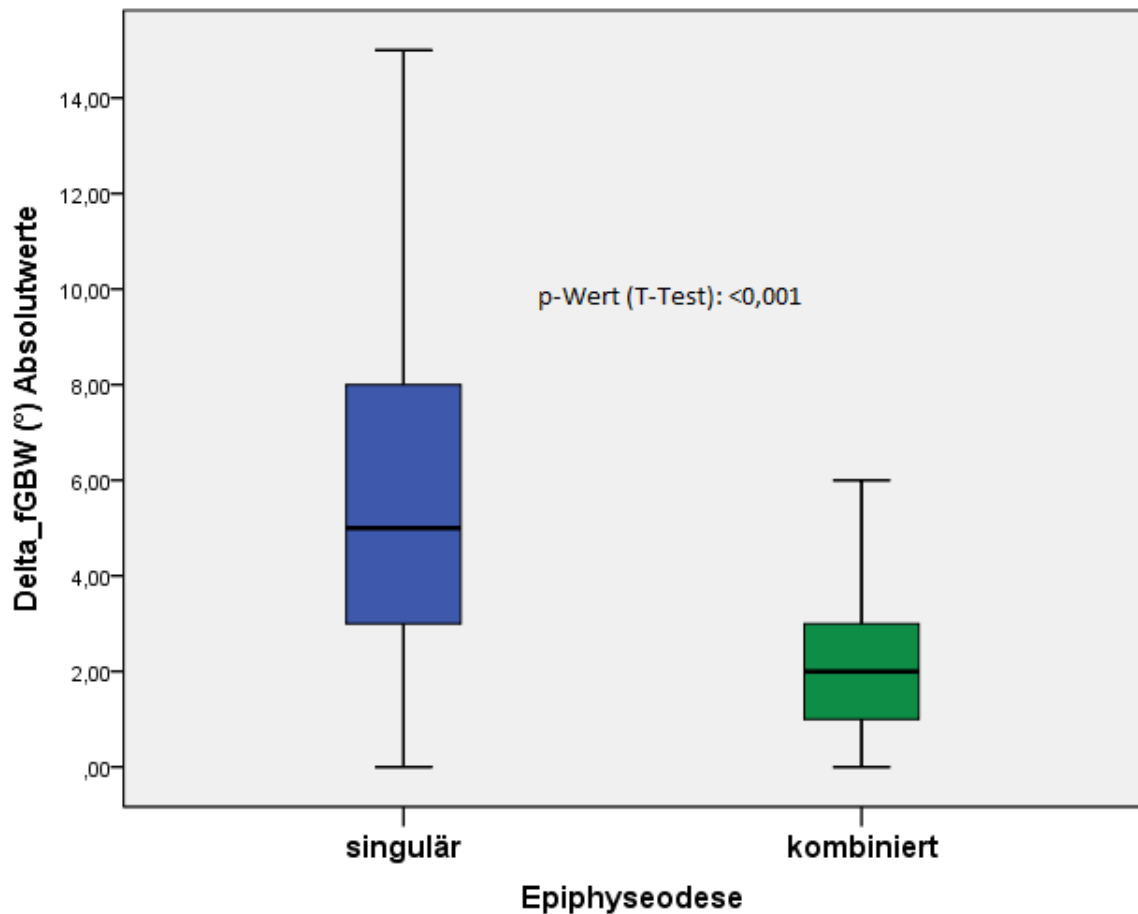


Abbildung 30: Delta-fGBW (°) als Absolutwerte im Vergleich; d.h. die absoluten Differenzenwerte zwischen fGBW prä implantationem und prä explantationem bei singulären EPD und kombinierten EPD (T-Test: p-Wert <0,001).

Änderung des fGBW	Mittelwert	SD	Min	Max
Singuläre EPD (°) (n = 57)	5,4	3,4	0,0	15,0
Kombinierte EPD (°) (n = 21)	2,2	1,5	0,0	6,0

Tabelle 9: Änderung des fGBW bei singulären und kombinierten EPD im Vergleich

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
Delta_GBW Equal variances assumed	22.817	.000	5.652	97	.000	3.17168	.56114	2.05798	4.28538
Delta_GBW Equal variances not assumed			6.278	80.945	.000	3.17168	.50518	2.16652	4.17684

Tabelle 10: T-Test der Delta-GWB-Werte von singulären und kombinierten EPD prä explantationem, (P-Wert <0,001)

3.4.3 Entwicklung des fGBW unter Therapie in Abhängigkeit zum Ausgangsbefund

Zur Evaluation der Entwicklung der frontalen Kniegelenkebene im Verlauf der Korrektur der mechanischen Beinachse anhand des fGBW schlossen wir die Patienten mit sekundären Achsdeformitäten infolge von Knochenerkrankungen (n = 9 Beine) und diejenigen mit einer ungeplanten Überkorrektur (n = 5 Beine) aus. Zur Auswertung kamen somit 64 von 78 unteren Extremitäten.

40 untere Extremitäten wiesen prä implantationem einen fGBW außerhalb des von uns in Anlehnung an Paley definierten Referenzbereiches von 0-3° (s.o.) auf. Von diesen Fällen zeigten nach Abschluss der Achskorrektur 57,50 % (23 / 40) einen fGBW innerhalb des Referenzbereiches. Bei 42,50 % der Fälle (17 / 40) wurde ein Verbleiben des fGBW außerhalb des Referenzbereiches beobachtet (siehe Tabelle 11).

fGBW	Anzahl	Anteil
Prä implantationem außerhalb des Referenzbereiches (RB)	40	100,00 %
Prä explant. außerhalb des RB geblieben	17	42,50 %
Prä explant. von außerhalb des RB zu innerhalb des RB	23	57,50 %

Tabelle 11: Der fGBW prä implantationem außerhalb des Referenzbereiches (RB)

Bei 24 Beinen lag der fGBW zu Beginn der Achskorrektur trotz Abweichen der mechanischen Beinachse innerhalb des Referenzbereiches. Davon verblieben bis zum Entfernen der eight-Plates™ 45,83 % (11 / 24) der fGBW innerhalb des Referenzbereiches (siehe Tabelle 12).

54,17 % (13 / 24 Beine) entwickelten unter Korrektur der mechanischen Beinachse einen fGBW außerhalb des Referenzbereiches (siehe Tabelle 12).

fGBW	Anzahl	Anteil
Prä implantationem physiologisch	24	100,00 %
Prä explant. physiologisch geblieben	11	45,83 %
Prä explant. von physiologisch zu pathologisch	13	54,17 %

Tabelle 12: Der fGBW prä implantationem innerhalb des Referenzbereiches

3.4.4 Korrekturverlusten in Abhängigkeit zum fGBW

Die Auswertung der Korrekturverluste im Hinblick auf den bei Therapieende erreichten fGBW erfolgte ebenfalls nur bei primär idiopathischen Achsdeformitäten, um den Einfluss einer Knochenstoffwechselstörung auf die erneute Entstehung einer Achsfehlstellung auszuschließen. Voraussetzung für die Aufnahme der Fälle in diese Auswertung war weiterhin, dass das Wachstum zum Zeitpunkt der Metallentfernung nicht abgeschlossen war und ein Rest-Wachstum von noch min. 6 Monaten vorlag. Außerdem wurden Überkorrekturen der mechanischen Beinachse mit anschließender Gegenkorrektur ausgeschlossen, sowie Patienten bei denen kein klinisches Follow-up von min. 5 Monaten vorlag.

So wurden von 78 potentiellen Fällen (Beine) 33 Fälle ausgeschlossen. 5 Fälle wurden aufgrund einer Überkorrektur ausgeschlossen, da unmittelbar im Anschluss gegenkorrigiert wurde. Bei 9 Fällen erfolgte der Ausschluss aufgrund von Knochenstoffwechselerkrankungen. 15 Fälle wurden nicht aufgenommen, da die Metallentfernung erst bei nahezu abgeschlossenem Wachstum stattfand. 4 Fälle wurden aufgrund nicht vorhandener Nachfolgeuntersuchungen ausgeschlossen.

Im Mittel betrug die Dauer des Nachuntersuchungszeitraumes 461 ± 296 Tage (range 167 – 1284 Tage).

Insgesamt fand sich bei 18 der 45 nachuntersuchten unteren Extremitäten im weiteren Verlauf ein Korrekturverlust. Dieser war nach der von uns vorgenommenen Klassifikation in 17 Fällen milde ausgeprägt und in einem Fall therapiebedürftig.

Je nach Befund des fGBW nach erfolgter Korrektur der mechanischen Beinachse bei Therapieende wurden zwei Gruppen der untersuchten unteren Extremitäten gebildet: In einer Gruppe lag der fGBW kurz vor Entfernung der eight-Plates™ innerhalb des von uns in Anlehnung an Paley definierten Referenzbereiches von $0 - 3^\circ$ ($n = 21$). In der anderen Gruppe lag der fGBW kurz vor Entfernung der eight-Plates™ trotz Korrektur der mechanischen Beinachse außerhalb des Referenzbereiches von $0 - 3^\circ$ ($n = 24$).

In der Gruppe mit einem fGBW im Referenzbereich zeigten 19,05 % ($n = 4 / 21$) innerhalb des Nachuntersuchungszeitraumes einen Korrekturverlust. Davon waren alle Korrekturverluste milden Typs. Eine Therapiebedürftigkeit ergab sich bei diesen Patienten nicht (siehe Tabelle 13).

In der Gruppe mit einem fGBW außerhalb des Referenzbereiches zeigten 58,33 % ($n = 14 / 24$) innerhalb des Nachuntersuchungszeitraumes einen Korrekturverlust. Davon waren 13 Korrekturverluste milde und einer operationsbedürftig (siehe Tabelle 13).

Im Pearson-Chi-Quadrat-Test ergab sich ein signifikanter Unterschied (p -Wert = 0,01), sodass von einem Zusammenhang zwischen einem außerhalb des Referenzbereiches liegenden fGBW und dem Auftreten eines Korrekturverlustes ausgegangen werden kann (siehe Tabelle 14: Chi-Quadrat Tests).

(n = 45)	Gesamtzahl	Anzahl der Korrekturverluste	Korrekturverlust- anzahl / Gesamtzahl (%)
fGBW im Referenzbereich	21	4	19,05 %
fGBW außerhalb des Referenzbereiches	24	14	58,33 %

Tabelle 13: Korrekturverlusten in Abhängigkeit zum fGBW

	Wert	Asymp. Sig. (zweiseitig)	Exakte Sig. (zweiseitig)	Exakte Sig. (einseitig)
Pearson-Chi-Quadrat	6,667	,010	,022	,012
Kontinuitätskorrektur	5,104	,024		
Likelihood-Quotient	6,681	,010		
Exakter Test nach Fisher				
Zusammenhang linear-mit-linear	6,519	,011		
Anzahl der gültigen Fälle	45			

Tabelle 14: Chi-Quadrat Tests

3.4.5 Binäre logistische Regressionsanalyse

Auf der Grundlage der hinsichtlich eines Korrekturverlustes klinisch nachuntersuchten 45 unteren Extremitäten wurde eine binär logistische Regressionsanalyse durchgeführt. 33 der ursprünglich 78 Beine wurden hierfür wie bei 3.4.4 ausgeschlossen. In dem Untersuchungskollektiv von 45 Extremitäten waren 18 Korrekturverluste aufgetreten (siehe 3.4.4 / Tabelle 13). Für die Regressionsanalyse wurde von einem „Ideal-fGBW“ in Anlehnung an Paley (2001) von $1,5^\circ$ als Mittelwert des Referenzbereiches $0-3^\circ$ ausgegangen (s. auch 2.7.). Darauf beruhend wurden für die Regressionsanalyse die Abweichungen von diesem „Ideal-fGBW“ als absolute Zahl (Differenz) zum Therapieende verwendet.

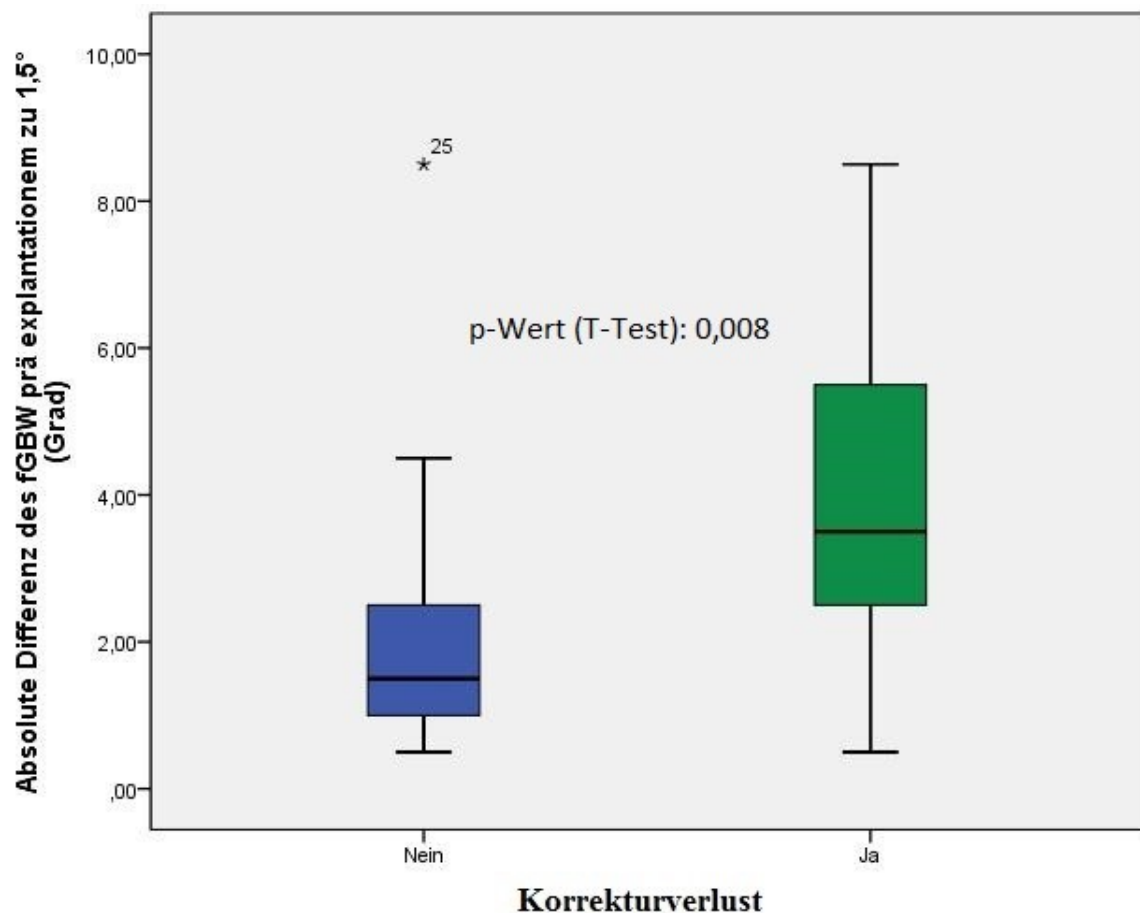


Abbildung 31: Vergleichende Darstellung von Korrekturverlusten und Nicht-Korrekturverlusten bezüglich der absoluten Differenzwerte des fGBW kurz vor Explantation zu dem Referenzwert-fGBW von 1,5 ° (n = 45) (T-Test: p-Wert = 0,008).

3.4.5.1 Primäranalyse: Einfluss des fGBW auf das Auftreten eines Korrekturverlustes ohne Kovariablen (n = 45 untere Extremitäten)

In der primären Analyse ohne Kovariablen wurde nur der Einfluss des bei Therapieende gemessenen fGBW auf das mögliche Eintreten eines Korrekturverlustes der mechanischen Beinachse untersucht.

Dazu wurden wie oben ausgeführt die absoluten Differenzen der gemessenen fGBW-Werte zum Therapieende zu 1,5 ° fGBW verwendet.

Die Odds Ratio (OR, bzw. EXP(B)) betrug 1,559, das 95%-Konfidenzintervall (95%-KI) erstreckte sich von 1,107 – 2,195. Der p-Wert betrug 0,011 (siehe Tabelle 15).

Da bei dieser Regressionsanalyse die Odds Ratio bei 1,559 liegt, ist in dieser Gruppe eine Steigerung der Korrekturverlustwahrscheinlichkeit von 55,9 % pro Grad Abweichung des fGBW vom Idealwert von 1,5 ° auszugehen. Hierfür wurde ein p-Wert von 0,017 errechnet, das bedeutet, dass der Einfluss des fGBW auf die Korrekturverlustwahrscheinlichkeit statistisch signifikant ist.

	Sig.	Exp(B)	95% Konfidenzintervall für EXP(B)	
			Unterer	Oberer
Abs_d_fGBW1,5°_präexpl.*	0,011	1,559	1,107	2,195

* Abs_d_fGBW1,5°_präexpl. = Absolute Differenz des fGBW zu 1,5 ° kurz vor Explantation

Tabelle 15: Binäre logistische Regressionsanalyse (Primäranalyse) bzgl. des Einflusses der absoluten Differenz des fGBW zu 1,5 ° kurz vor Explantation auf das Korrekturverlustrisiko (n = 45)

3.4.5.2 Sekundäranalyse: Untersuchung des Einflusses anderer Kovariablen auf des Korrekturverlustrisiko (n = 45 untere Extremitäten)

Hierbei wurde untersucht, ob zusätzlich zu dem fGBW auch andere Kovariablen einen Einfluss auf das Risiko für einen Korrekturverlust haben. Als Kovariablen wurden der Body-Mass-Index (BMI), das Alter zum Zeitpunkt der Materialentfernung, sowie das Geschlecht betrachtet (siehe Tabelle 16).

Die p-Werte aller untersuchter Kovariablen betrugen mehr als 0,05. Damit ist von nicht signifikanten Einflüssen der Kovariablen auszugehen (siehe Tabelle 16).

Bezüglich des fGBW fand sich in der Sekundäranalyse eine OR von 1,605 mit einem 95%-KI von 1,088 – 2,367. Der p-Wert betrug 0,017 (siehe Tabelle 16).

Damit zeigte sich in der Sekundäranalyse mit Kovariablen ein signifikanter Einfluss des fGBW auf die Wahrscheinlichkeit des Korrekturverlustauftretens (p-Wert = 0,017). Die Odds Ratio von 1,605 bedeutet, dass innerhalb dieser Rechnung die

Korrekturverlustwahrscheinlichkeit um 60,5 % pro Grad Abweichung des fGBW von dem Referenzwert (1,5 °) zunimmt. Das 95%-KI von 1,088 – 2,367 bedeutet, dass das wahre OR zu 95 % innerhalb dieses Bereiches liegt (siehe Tabelle 16).

	Sig.	Exp(B)	95% Konfidenzintervall für EXP(B)	
			Unterer	Oberer
Alter prä explantationem	,362	2,439	,359	16,575
BMI prä explantationem	,544	1,114	,785	1,582
Geschlecht	,938	,993	,837	1,179
Abs_Dif_fGBW_zu1,5°_präexpl*	,017	1,605	1,088	2,367
Konstante	,214	,029		

* Abs_d_fGBW1,5°_präexpl. = Absolute Differenz des fGBW zu 1,5 ° kurz vor Explantation

Tabelle 16: Binäre logistische Regressionsanalyse bzgl. des Einflusses von zusätzlichen Kovariablen auf das Risiko eines Korrekturverlustes (n = 45)

4. Diskussion

In seiner Erstevaluation der „eight-Plate™“ als Zuggurtungsverfahren zur korrigierenden Wachstumslenkung bei Beinachsdeformitäten beschreibt PM Stevens (2007) an 34 Patienten mit idiopathischen und sekundären Achsdeformitäten die Wirksamkeit des Verfahrens. Trotz heterogenem Krankengut mit einem Alter von 2-17 Jahren konnte er eine Achskorrektur von präoperativ 7-30° Fehlstellung (Varus oder Valgus) bei 32 von 34 Patienten zeigen. Stevens gibt an, dass bei allen Patienten mit korrigierter mechanischer Beinachse die Horizontalität der frontalen Kniegelenkebene in einem Rahmen von 3° bestehen blieb. 4 Patienten mit idiopathischen Genua valga zeigten nach Therapieabschluss ein bilaterales Rezidiv der Fehlstellung und wurden 14 Monate nach der ersten Metallentfernung erneut mit einer passageren Epiphyseodese versorgt. Alle Patienten mit einem Rezidiv waren bei Erstversorgung jünger als 11 Jahre (Stevens, 2007).

Seit der Erstevaluation durch Stevens sind verschiedene klinische Studien zur eight-Plate™ mit vergleichbaren Patientenkollektiven zu unserer Studie publiziert worden, die die Ergebnisse von Stevens zur Achskorrektur generell bestätigen. Der Einfluss der Hemiepiphyseodese auf die frontale Kniegelenkebene wurde jedoch bisher von keiner Arbeitsgruppe differenziert evaluiert. Auch die möglichen Ursachen eines Korrekturverlustes mit Rezidiv der Fehlstellung wurden bisher nicht grundlegend analysiert.

So beschrieben Burghardt und Herzenberg (2010) die Ergebnisse von 43 Patienten (Alter: 4 – 14 Jahre) mit 51 idiopathischen und sekundären Achsdeformitäten. Hierbei wurde lediglich in 4 Fällen keine vollständige Korrektur der Beinachse erreicht. Bei 13 unteren Extremitäten (Alter: 4 – 13 Jahre) konnten die Autoren ein klinisches und radiologisches Follow-up nach einem Zeitraum von min. 10 Monaten untersuchen und beschrieben ein Rezidiv der Achsdeformität in 10 der 13 Fälle (77 %). Dabei waren sowohl idiopathische als auch sekundäre Achsdeformitäten betroffen. Aufgrund der hohen Inzidenz einer erneuten Achsverschlechterung, die als „rebound“ bezeichnet wurde, forderten die Autoren eine Studie mit einer größeren Patientengruppe zur Evaluation möglicher Korrelationen zwischen der Grunderkrankung und dem Ausmaß eines „rebound“. Auch diskutierten sie die mögliche Notwendigkeit einer geplanten Überkorrektur der Achsdeformität, um den folgenden „rebound“ zu kompensieren. Eine differenzierte Analyse der frontalen Kniegelenkebene erfolgte nicht.

Jelinek et al. (2011) verglichen in einer Studie an insgesamt 35 Patienten (2 – 16 Jahre) mit idiopathischen und sekundären Achsdeformitäten die Effektivität der eight-Plate™ mit der Blount-Klammerung anhand von 29 versus 32 operierten Beinachsdeformitäten (Varus oder Valgus). Bis auf eine signifikant kürzere Implantations- und Explantationszeit bei der eight-Plate™ konnte kein Unterschied zwischen den beiden Implantaten festgestellt werden. Die Effektivität hinsichtlich einer Achskorrektur entsprach den Vorstudien. Da keine Nachuntersuchungen erfolgten, wurden lediglich die Möglichkeit von Korrekturverlusten und die Notwendigkeit weiterer prospektiver Studien zu diesem Aspekt betont. Auch hier wurde der Einfluss auf die frontale Kniegelenkebene nicht näher analysiert.

Yilmaz et al. (2013) untersuchten schließlich ein Kollektiv von 29 Patienten mit insgesamt 50 sekundären Beinachsdeformitäten (Varus und Valgus) infolge verschiedener Skelettdysplasien hinsichtlich des Effektes der Hemiepiphyseodese mit der eight-Plate™. Sie konnten bei insgesamt 4 von 29 Patienten mit Valgus- und 3 Patienten mit Varusdeformitäten keine vollständige Korrektur der mechanischen Beinachse erreichen. Als mögliche Ursache diskutierten sie ein zu fortgeschrittenes Alter von über 13 bzw. 14 Jahren bei 4 Patienten sowie die Grunderkrankung (Pseudoachondroplasie) bei 2 Patienten bzw. deren hohen Body-Mass-Index von $>30 \text{ kg/m}^2$. Als Limitation der eigenen Studie beschrieben sie das nur kurze Follow-up der Patienten, so dass keine Aussagen zu einem möglichen „rebound“-Phänomen möglich waren. Als weitere Limitation wurde die nicht durchgeführte Evaluation der Kniegelenkflächenparallelität zum Boden nach Therapieende erwähnt. Abschließend betonten diese Autoren jedoch die Möglichkeit einer vollständigen Korrektur der mechanischen Beinachse durch die Hemiepiphyseodese mit der Konsequenz einer aufgehobenen Parallelität der frontalen Kniegelenkebene zum Boden. Diese Arbeitsgruppe forderte nun erstmalig eine dezidierte weitere Abklärung des Phänomens, sowie diesbezüglich eine exakte operative Planung anhand der Kniegelenkorientierungswinkel.

In einer aktuellen Arbeit von 2015 untersuchten Ashby und Eastwood die Gesetzmäßigkeiten der Beinachsdeformitäten bei Patienten mit Mukopolysaccharidose I und II (MPS). Eine progrediente Änderung der frontalen Kniegelenkebene parallel zu einer Valgus-Abweichung der mechanischen Beinachse zeigte sich bei allen MPS-Patienten mit zunehmendem Alter. Die Hemiepiphyseodese mit der eight-Plate™ erwies sich auch bei diesem speziellen Patientenkollektiv als effektiv hinsichtlich einer Korrektur der

mechanischen Beinachse (10 Patienten, 20 Extremitäten). Die nach Achskorrektur bestehende frontale Kniegelenkorientierung wurde jedoch nicht beschrieben. Trotz initialer Achskorrektur kam es bei nahezu allen nachuntersuchten Patienten (5 von 6 Patienten, 10 von 12 Extremitäten) zu einem ausgeprägten „Rebound“-Phänomen nach einem Jahr mit erneuter Therapiebedürftigkeit. Nur bei einem Patienten blieb die Beinachse unverändert, da die Metallentfernung erst bei Wachstumsabschluss erfolgt war. Als Ursachen der hohen „rebound“-Rate wurden die Grunderkrankung und der Therapieabschluss bei noch bestehendem Restwachstum diskutiert.

Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertationsarbeit bestätigen nun ebenfalls die Effektivität des Verfahrens und sind hinsichtlich Größe und Heterogenität des Patientenkollektivs mit den genannten Vorstudien vergleichbar. Die therapeutischen Ergebnisse unserer Patienten lassen sich mit den Vorstudien vergleichen: Eine vollständige Achskorrektur konnte bei 39/44 Patienten (71/78 Extremitäten) erreicht werden. In 7 unserer 78 Fälle (9 %) war die Beinachse bei Therapieende gebessert, aber nicht vollständig korrigiert. Eine Überkorrektur sahen wir bei 5 Patienten. Als Ursache hierfür konnte in allen Fällen eine nicht zeitgerechte Verlaufskontrolle ausgemacht werden. Bei 18 von unseren 45 nachuntersuchten idiopathischen Beinachsdeformitäten (40 %) trat nach Achskorrektur im weiteren Verlauf ein mehr oder weniger ausgeprägter Korrekturverlust im Sinne des vorbeschriebenen „Rebound“-Phänomens auf.

4.1 Evaluation des Einflusses der Hemiepiphyseodese auf die frontale Kniegelenkebene

4.1.1 Entwicklung des fGBW im Verlauf der Achskorrektur

Die Korrektur der mechanischen Beinachse über eine einzeln distal femoral oder proximal tibial bzw. kombiniert femorotibial durchgeführte Hemiepiphyseodese mit der eight-Plate™ zeigt in unseren Ergebnissen einen ausgeprägten Effekt auf den Verlauf der frontalen Kniegelenkebene hier ausgedrückt als fGBW (siehe 3.4).

Bei unseren Patienten mit idiopathischer Achsdeformität und erfolgreicher Korrektur der Beinachse nach Therapieende (n = 64 Extremitäten) zeigte sich zu Beginn der Therapie

(vor EPD) bei 40 Extremitäten ein fGBW außerhalb des von uns definierten Referenzbereiches von 0 – 3°, und somit eine im Rahmen der Achsdeformität pathologisch veränderte frontale Kniegelenkebene. Nach abgeschlossener Korrektur der mechanischen Beinachse zeigten 23 dieser 40 Fälle (57,50 %) auch eine korrigierte frontale Kniegelenkebene mit einem normalisiertem fGBW. Demgegenüber war bei 17 der 40 Fälle (42,50 %) die frontale Kniegelenkebene trotz Korrektur der mechanischen Beinachse im pathologischen Bereich geblieben (siehe 3.4.3, Tabelle 11).

Bei 24 der diesbezüglich untersuchten 64 Extremitäten bestand vor Therapiebeginn trotz Achsdeformität eine physiologisch horizontal verlaufende frontale Kniegelenkebene mit einem fGBW innerhalb des Referenzbereiches. Bei diesen 24 Extremitäten blieb der fGBW im Verlauf der Achskorrektur in 11 Fällen physiologisch (45,83 %). Trotz exakter OP-Planung zeigten 13 / 24 Fälle (54,17 %) nach Korrektur der mechanischen Beinachse eine Verschlechterung des fGBW von ursprünglich physiologischen Werten in den pathologischen Bereich (siehe 3.4.3, Tabelle 12).

Diese individuelle Analyse des frontalen Kniegelenkverlaufes vor und nach Therapie ist in den Vorstudien nicht erfolgt. Sie belegt jedoch, dass entgegen der Erstevaluation der eight-Plate™ von Stevens (2007) die Horizontalität der frontalen Kniegelenkebene nach Korrektur der mechanischen Beinachse trotz exakter OP-Planung nicht sicher gewährleistet werden kann.

Zwei der oben zitierten Arbeitsgruppen geben tabellarisch die Einzeldaten ihrer Patienten hinsichtlich MAD, mL DFA und mMPTA vor und nach Therapie an. Anhand der Durchsicht der Einzeldaten der Kniegelenkorientierungswinkel lässt sich in diesen Studien auf die Entwicklung der frontalen Kniegelenkebene im Rahmen der Therapie schließen. So geben Burghard und Herzensberg (2010) bei 54 durchgeführten Hemiepiphyseodesen präoperativ in 48 / 54 Fällen (89 %) Kniegelenkorientierungswinkel (mL DFA / mMPTA) außerhalb des Normbereiches von 85 – 90 ° nach Paley an. Nach Therapieabschluss lagen trotz Korrektur der mechanischen Beinachse immer noch in 34 / 54 (63 %) Fälle der mL DFA bzw. mMPTA außerhalb der Referenzbereiches vor, was auf einen unphysiologischen frontalen Kniegelenkenverlauf schließen lässt. In 5 der 54 (9 %) Fälle war es im Rahmen der Achskorrektur gar zu einer Verschlechterung des mL DFA bzw. mMPTA von ursprünglich physiologischen Werten zu Werten im pathologischen Bereich gekommen. Bei Yilmaz et al. (2013) zeigten 40 der 50 durchgeführten

Hemiepiphyseodesen präoperativ bei pathologischer Beinachse auch einen mLDFA bzw. mMPTA außerhalb des Referenzbereiches und somit Anhalt für einen pathologischen Verlauf der frontalen Kniegelenkebene. Nach erfolgter Achskorrektur zeigten immer noch 40 der 50 Fälle einen mLDFA bzw. mMPTA außerhalb des Referenzbereiches, und somit wahrscheinlich einen pathologischen fGBW. Nur bei 7 Fällen hatte sich die frontale Kniegelenkebene im Rahmen der Achskorrektur normalisiert. In weiteren 7 Fällen war es zu einer Verschlechterung von ursprünglich normalen zu pathologischen Kniegelenkorientierungswinkeln gekommen.

Diese kritische Analyse der Einzeldaten der Vorstudien von Burghard und Herzensberg (2010) sowie Yilmaz et al. (2013) bestätigt retrospektiv die von uns gefundenen Ergebnisse hinsichtlich der frontalen Kniegelenkebene. Yilmaz und Koautoren fordern daher folgerichtig wie oben ausgeführt selbst eine weitere Untersuchung dieses Phänomens. Unsere Ergebnisse unterstützen dies, da trotz exakter präoperativer Planung der Epiphyseodese am Ort der größten Winkelabweichung (distal femoral und / oder proximal tibial) wie sie von uns durchgeführt und von allen Vorstudien angegeben wurde, eine sichere Gewährleistung des horizontalen frontalen Kniegelenkverlaufes nach Korrektur der mechanischen Beinachse entgegen der Angaben von Stevens (2007) offenbar nicht gegeben ist.

4.1.2 Änderung des Verlaufes des fGBW in Abhängigkeit zum Hemiepiphyseodeseverfahren

Vergleicht man in unserem Gesamt-Patientenkollektiv die Änderung des fGBW (Delta-fGBW) im Verlauf der Achskorrektur in der Gruppe der singulären Epiphyseodesen und in der Gruppe der femorotibial kombinierten Epiphyseodesen, so zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied: Der Einfluss des singulären Vorgehens war mit einer durchschnittlichen Änderung des fGBW um 5,4° doppelt so stark wie der des femorotibial kombinierten Vorgehens (Delta-FGBW 2,2°) ($p < 0,001$, siehe Abbildung 30, Tabelle 9 und Tabelle 10).

Diese Ergebnisse sind ebenfalls bisher in keiner der Vorstudien untersucht worden. Um eine möglichst physiologische frontale Kniegelenkebene unter Korrektur der mechanischen Beinachse zu generieren, sind diese aber für die Planung der Therapie relevant. Sie legen

nahe, bei präoperativ bestehender physiologischer frontaler Kniegelenkebene trotz Achsdeformität (unter Berücksichtigung der Kniegelenkorientierungswinkel) das kombinierte Hemiepiphyseodeseverfahren zu bevorzugen, da es die frontale Kniegelenkebene weniger zu beeinflussen scheint. Genauso sollte bei (je nach Veränderung der Kniegelenkorientierungswinkel) geplantem singulärem Vorgehen der präoperative Verlauf der frontalen Kniegelenkebene anhand des fGBW und dessen mögliche deutliche Änderung unter Therapie berücksichtigt werden. In Einzelfällen wäre unter Berücksichtigung dieser Daten gar ein differenziertes mehrzeitig femorales und tibiales Vorgehen zur Gewährleistung der Horizontalität der frontalen Kniegelenkebene nach Korrektur der mechanischen Beinachse zu erwägen. In welcher Form die beschriebenen Phänomene die Planung der Hemiepiphyseodese künftig beeinflussen könnte, muss durch weitere Untersuchungen evaluiert werden.

4.2 Einfluss der frontalen Kniegelenkebene auf die spätere Entwicklung eines Korrekturverlustes

Ausgehend von den vorangegangenen Überlegungen stellt sich jedoch zunächst die Frage nach der klinischen Konsequenz eines nach Achskorrektur bestehenden pathologischen frontalen Kniegelenkverlaufes. Neben einer möglicherweise ungünstigen Kniegelenkbelastung und konsekutiv vorzeitigen Abnutzung des Gelenkes fanden wir in unseren Daten Anhalt für ein höheres Risiko einer erneuten Verschlechterung der mechanischen Beinachse im Rahmen von noch bestehendem Restwachstum nach der Metallentfernung. Bei der klinischen Beurteilung eines möglichen Korrekturverlustes werteten wir aufgrund des kurzen Nachuntersuchungszeitraumes auch milde Verschlechterungen der nach Therapieende geraden Beinachse mit einem erneuten Malleolen- bzw. Kondylenabstand ab $\geq$ 5 cm. Aufgrund des in der Literatur angegebenen deutlich häufiger auftretenden „rebound“-Phänomens bei Skelettdysplasien wurden sekundäre Achsdeformitäten hier nicht untersucht, um den möglichen Einfluss der Grunderkrankung auszuschließen.

So sahen wir in unserem Kollektiv der 45 klinisch nachuntersuchten idiopathischen Achsdeformitäten mit noch bestehendem Rest-Wachstum in 18 Fällen einen erneuten Verlust an Achskorrektur im Sinne des von den Vor-Autoren beschriebenen „rebound“-Phänomens. Von den 45 nachuntersuchten Extremitäten wiesen 21 Fälle bei Achskorrektur

eine regelrechte frontale Kniegelenkebene mit einem fGBW im Referenzbereich von 0-3° auf. Bei diesen 21 Extremitäten trat im weiteren Verlauf in 4 Fällen (19,05 %) klinisch ein Korrekturverlust ein. 24 der 45 Fälle zeigten bei korrigierter mechanischer Beinachse eine fGBW außerhalb des Referenzbereiches. Bei diesen 24 Extremitäten war der Anteil eines erneuten Korrekturverlustes im weiteren Verlauf mit 14 / 24 Fällen (58,33 %) signifikant erhöht (p-Wert = 0,01) (siehe 3.4.4, Tabelle 13 und Tabelle 14).

Auch bei Burghard und Herzenberg (2010) fand sich in 13 Fällen ein ausgeprägtes „rebound“-Phänomen nach erfolgter Achskorrektur. In dieser Studie wurden im Verlauf bei eingetretenem Korrekturverlust radiologische Kontrollen durchgeführt, so dass sich hier die angegebenen Kniegelenkorientierungswinkel mLDFA bzw. mMPTA bei Achskorrektur sowie im Verlauf bei Nachweis einer erneuten Achsverschlechterung angeben ließen. So lagen bei diesen 13 Fällen zum Zeitpunkt der Achskorrektur in 8 Fällen (62 %) die Kniegelenkorientierungswinkel und somit die frontale Kniegelenkebene außerhalb des Normbereiches. Bei Nachweis des Korrekturverlustes, also der erneuten Verschlechterung der mechanischen Beinachse, zeigten nur noch 2 Fälle einen pathologischen mLDFA bzw. mMPTA. Die frontale Kniegelenkebene hatte sich offenbar in ihrer Horizontalität wieder „eingestellt“, mit der Folge einer erneuten Deformität der mechanischen Beinachse. Diese Ergebnisse stützen retrospektiv die Annahme eines kausalen Zusammenhanges zwischen dem auftretenden Korrekturverlust und einem unphysiologischen frontalen Kniegelenkverlauf nach der Korrektur der Beinachse.

Um den möglichen Einfluss des fGBW auf die Entwicklung einer erneuten Achsdeformität im weiteren Wachstum zu evaluieren, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt (siehe 3.4.5.1), welche um eine Sekundäranalyse mit Kovariablen erweitert wurde, um zusätzlich den Einfluss anderer Variablen (Alter, Geschlecht, BMI; siehe 3.4.5.2) auf die Entwicklung eines Korrekturverlustes zu untersuchen.

In der Primäranalyse ohne Kovariablen zeigte sich ein signifikanter Einfluss des fGBW bei Abschluss der Achskorrektur auf das Risiko der Entwicklung eines Korrekturverlustes mit dem weiteren Wachstum (p-Wert 0,011). So stieg innerhalb dieser Berechnung das Risiko eines Korrekturverlustes pro Grad Abweichung des fGBW vom „Idealwert“ von 1,5 ° um 55,9 % an (Odds Ratio = 1,559).

Bei der Untersuchung der Kovariablen konnte für keine der untersuchten Variablen ein signifikanter Einfluss auf die Entwicklung eines Korrekturverlustes nachgewiesen werden.

Sowohl der BMI (p-Wert = 0,544), das Geschlecht (p-Wert = 0,938) als auch das Alter zum Zeitpunkt der Explantation als Ausdruck des noch bestehenden Rest-Wachstums (p-Wert = 0,362) zeigten keinen signifikanten Zusammenhang mit der Entwicklung eines Korrekturverlustes (siehe Tabelle 16).

Auch in der Sekundäranalyse mit Kovariablen wies der fGBW, nun als einzige Variable, einen signifikanten Einfluss auf das Eintreten eines Korrekturverlustes der Beinachse auf (p-Wert 0,017). Die Odds Ratio betrug hier 1,605. So stieg innerhalb dieser Berechnung das Risiko eines Korrekturverlustes pro Grad Abweichung des fGBW von 1,5 ° um 60,5 % an (Odds Ratio = 1,605) (siehe Tabelle 16).

Diese Ergebnisse belegen die Bedeutung und klinische Relevanz einer physiologischen frontalen Kniegelenkebene nach Achskorrektur zur Gewährleistung einer anhaltend geraden Beinachse bei noch bestehendem Rest-Wachstum. Durch die Analyse der Kovariablen tritt das Patientenalter, also der gewählte Zeitpunkt der Therapie, bei der OP-Planung in den Hintergrund und verliert -zumindest bei Patienten mit idiopathischen Achsdeformitäten- an Bedeutung. Hierdurch wird die Empfehlung der Vor-Studien zu einem möglichst späten Korrekturzeitpunkt ebenso relativiert wie der Vorschlag zu einer geplanten Überkorrektur der Achsdeformität (Burghardt und Herzensberg 2010). Inwieweit dies auch für zumindest einzelne Skelettdysplasien gelten kann, bleibt weiteren Studien vorbehalten.

4.3 Änderung der Beinachsen und Gelenkwinkel (°) pro cm Körperlängenwachstum

Neben der Analyse des frontalen Kniegelenkverlaufes waren in zweiter Linie auch die Korrekturraten im Gesamtpatientenkollektiv und den einzelnen Untergruppen Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit.

In unserem Gesamtkollektiv wurde dabei neben der Korrekturrate der Beinachse pro Monat die Korrekturrate pro cm Gesamtlängenwachstum der Patienten untersucht. Hierbei zeigte sich eine durchschnittliche Korrekturgeschwindigkeit der mechanischen Beinachse von 1,6 ° pro cm Zunahme der Körperlänge. Auch die Korrekturraten der Kniegelenkorientierungswinkel sowie die Unterschiede hinsichtlich dieser Korrekturraten

bei singulärer femoraler oder tibialer Hemiepiphyseodese im Vergleich zum kombinierten Vorgehen wurden in Relation zum tatsächlich erfolgten Längenwachstum in cm untersucht und definiert (siehe Tabelle 3, Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6).

Eine Analyse der Korrekturgeschwindigkeit in Bezug auf die Zunahme der Körperlänge der Patienten erfolgte in den beschriebenen Vorstudien nicht. Wir halten sie dennoch für wichtiger als die Analyse der Achskorrektur in Grad pro Monat wie von den Vor-Arbeiten angegeben, da die Wachstumsgeschwindigkeit/Monat bei jedem Patienten individuell und schwankend ist. Das Wachstum ausgedrückt in cm Körperlängenzunahme kann jedoch direkt mit einer Änderung der Beinachse in Grad in Relation gesetzt werden, da eine Änderung der Beinachse nur bei tatsächlich stattfindendem Längenwachstum erfolgt. Somit werden die klinischen Verlaufskontrollen mit Einschätzung der bereits erfolgten Achskorrektur anhand des erfolgten Längenwachstums vereinfacht. Die bereits erfolgte Korrektur kann so vor dem Hintergrund dieser Korrekturraten besser abgeschätzt werden, wodurch sich Röntgenkontrollen unter Umständen reduzieren lassen.

4.4 Stärken und Schwächen dieser Studie, klinische Konsequenz und Ausblick

Eine wesentliche Stärke besteht in der Anwendung des im Rahmen dieser Studie entwickelten fGBW, welcher ein schnelles und einfaches Beurteilen der tatsächlichen Lage der frontalen Kniegelenkebene im Raum ermöglicht. Entgegen der Kniegelenkorientierungswinkel mLDFA und mMPTA reicht hiermit die Messung eines einzigen Winkels zur sicheren Orientierung aus. Als klinische Konsequenz dieser Arbeit wird seit Auswertung der Daten die Messung dieses Winkels in der Orthopädischen Poliklinik bei jedem Patienten im Rahmen der Planung oder der Verlaufskontrolle einer Hemiepiphyseodese zur Beinachskorrektur standardisiert durchgeführt.

Eine weitere Stärke besteht im klinischen Follow-up nach Therapieende, welches bei einem großen Teil der untersuchten Patienten erfolgte und bei vielen dieser Patienten bis zum Wachstumsabschluss reichte. Hierdurch konnte im Gegensatz zu einigen Vor-Studien der weitere Verlauf hinsichtlich eines möglichen Korrekturverlustes beurteilt und analysiert werden.

Als weitere Stärke im Vergleich zu den beschriebenen Vor-Studien wurden in dieser Studie die wesentlichen Ergebnisse nicht nur hinsichtlich ihrer statistischen Signifikanz sondern auch im Rahmen einer logistischen Regressionsanalyse evaluiert. Hiermit konnte ein möglicher Zusammenhang zwischen fGBW bei Therapieende und dem späteren Auftreten eines Korrekturverlustes nicht nur beschrieben sondern auch statistisch nachgewiesen werden.

Eine Schwäche dieser Studie ist hinsichtlich der exakten Beurteilung des weiteren Wachstumsverlaufes nach Therapieende sicherlich, dass im Rahmen der Follow-up-Untersuchungen nur eine klinische Beurteilung der Beinachsverhältnisse erfolgte. Bei klinisch anhaltend gerader Beinachse oder nur mildem Korrekturverlust (<5cm Malleolen- oder Kondylenabstand) wurden aufgrund der fehlenden therapeutischen Konsequenz keine Röntgenaufnahmen angefertigt. Auch wenn die exaktere radiologische Untersuchung der Achs- und Winkelverhältnisse der unteren Extremität im Wachstumsverlauf gerade hinsichtlich der Fragestellung der Studie interessant gewesen wäre, wurde aus Gründen des Strahlenschutzes auf eine radiologische Verlaufskontrolle im Sinne einer Becken-Bein-Statik mit nicht unerheblicher Strahlenbelastung verzichtet. (siehe auch 2.2 - letzter Absatz).

Als klinische Konsequenz der Ergebnisse dieser Arbeit muss zur Planung der Achskorrektur mittels Hemiepiphyseodese eine noch exaktere OP-Planung gefordert werden. Neben Analyse der Kniegelenkorientierungswinkel zur Festlegung des operativen Procedere sollte bei jedem Patienten präoperativ der fGBW gemessen und als physiologisch oder pathologisch definiert werden.

Bei physiologischem fGBW und/oder ungefähr gleichmäßig stark femoral und tibial veränderten Kniegelenkorientierungswinkeln, ist ein kombiniert femorotibiales Vorgehen zu bevorzugen, um neben der Achskorrektur die horizontale frontale Kniegelenkebene zu bewahren.

Bei präoperativ pathologischem fGBW ist der hierfür hauptsächlich verantwortliche Gelenkpartner mit seinem Kniegelenkorientierungswinkel zu erfassen. Um eine Änderung der frontalen Kniegelenkebene in Richtung des physiologisch horizontalen Verlaufes zu generieren, ist in diesem Fall das singuläre Vorgehen im Bereich des vom Referenzbereich abweichenden Kniegelenkorientierungswinkel von Vorteil, da es einen stärker ändernden Einfluss auf den fGBW hat als das kombinierte Vorgehen und somit die Änderung des pathologischen fGBW in den physiologischen Bereich ermöglicht.

Verläuft der fGBW hingegen bei unterschiedlich stark ausgeprägter pathologischer Abweichung beider Kniegelenkorientierungswinkel physiologisch, so ist bei singulärer Hemiepiphyseodese lediglich am Ort der stärkeren Winkelabweichung eine pathologische frontale Kniegelenkebene nach Korrektur der Beinachse zu befürchten. Hier wären u.U. ein mehrzeitiges kombiniertes Verfahren bzw. ein kombiniert femorotibiales Vorgehen mit zweizeitiger Metallentfernung zu erwägen.

Als Ausblick dieser Studie muss die Überprüfung unserer Ergebnisse sowie die Evaluation der als Konsequenz beschriebenen unterschiedlichen therapeutischen Vorgehensweisen zur Gewährleistung einer physiologischen frontalen Kniegelenkebene nach Beinachskorrektur durch die Hemiepiphyseodese gefordert werden. Auch der fGBW müsste sich in der Anwendung und Reproduzierbarkeit noch bewähren. Hierzu sind weitere Studien mit größeren Patientenzahlen, u.U. auch unter Zusammenfassung von Patientendaten und Auswertung von Röntgenverläufen aus verschiedenen Zentren im Sinne einer Multicenterstudie zu fordern. Weiter zu evaluieren wäre in diesem Zusammenhang bei der singulären Hemiepiphyseodese eine mögliche Mitreaktion des unversorgten Gelenkpartners mit konsekutivem Einfluss auf die frontale Kniegelenkebene.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die passagere Hemiepiphyseodese mit der „eight-Plate™“ als femorale, tibiale oder femorotibiale wachstumslenkende Maßnahme stellt eine bewährte Methode zur Korrektur von idiopathischen und sekundären Achsdeformitäten der Beine im Wachstumsalter dar. Ihre Effektivität hinsichtlich einer Korrektur der mechanischen Beinachse sowie ihr Einfluss auf die mechanischen Kniegelenkorientierungswinkel (mLDFA / mMPTA) konnte anhand unserer Ergebnisse ebenso wie in diversen Vor-Studien belegt werden.

Eine mögliche Beeinflussung der frontalen Kniegelenkebene durch das Verfahren wurde von den Vorstudien beschrieben aber bisher nicht näher analysiert. Zur Evaluation dieses Aspektes wurden in der vorliegenden Arbeit die klinischen und radiologischen Verläufe von 78 Fällen einer Beinachskorrektur mittels passagerer Hemiepiphyseodese mit der „eight-Plate™“ retrospektiv untersucht. Um eine einfache und schnelle Orientierung über die reelle Position der frontalen Kniegelenkebene zu ermöglichen, wurde dabei der frontale Gelenkebenen-Boden-Winkel (fGBW) entwickelt.

Unsere Ergebnisse belegen den erheblichen Einfluss der kniegelenknahen passageren Hemiepiphyseodese auf die frontale Kniegelenkebene. Entgegen der Ergebnisse der Erstevaluation der eight-Plate™ von Stevens (2007) konnte in unserem Patientengut sowie in der retrospektiven Analyse der Daten einiger Vor-Studien trotz exakter OP-Planung die Horizontalität der frontalen Kniegelenkebene nach Korrektur der mechanischen Beinachse nicht sicher gewährleistet werden. Eine signifikant stärkere Änderung der frontalen Kniegelenkebene durch die Achskorrektur zeigte sich in unserer Studie bei singulär femoralem oder tibialen Vorgehen im Vergleich zum kombiniert femorotibialen Verfahren.

Bei nicht-physiologischem Verlauf der frontalen Kniegelenkebene nach erfolgter Achskorrektur war die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Korrekturverlustes bei noch verbliebenem Rest-Wachstum in unserem Patientenkollektiv von idiopathischen Achsdeformitäten signifikant erhöht. In der Regressionsanalyse stellte sich ein pathologischer fGBW als einzig signifikanter Risikofaktor für das Eintreten einer erneuten Achsverschlechterung über das Rest-Wachstum dar. Demgegenüber zeigte das Alter zum Zeitpunkt der Therapie in der Regressionsanalyse keinen signifikanten Einfluss, so dass der Korrekturzeitpunkt entgegen der Empfehlungen der Vorstudien an Bedeutung verliert.

Die Planung einer passageren Hemiepiphyseodese zur Korrektur von idiopathischen und sekundären Achsdeformitäten der Beine sollte daher zur Gewährleistung eines anhaltend guten Ergebnisses immer die frontale Kniegelenkebene und den zu erwartenden Einfluss der gewählten Maßnahme auf diese mit berücksichtigen. Als Konsequenz sind zur Gewährleistung der Horizontalität der frontalen Kniegelenkebene nach Korrektur der mechanischen Beinachse in künftigen Studien auch individuell differenzierte, mehrzeitige femoral-tibiale Vorgehensweisen zu evaluieren.

6. Literaturverzeichnis

- Ashby, E und Eastwood, D. 2015.** Characterization of knee alignment in children with mucopolysaccharidosis types I and II and outcome of treatment with guided growth. *J Child Orthop.* 2015, 9:227–233.
- Blount, W P. 1971.** A mature look at epiphyseal stapling. *Clin Orthop.* 1971, 77: 158-163.
- Blount, W P und R, Clark G. 1949.** Control of bone growth by epiphyseal stapling. *J Bone Joint Surg.* 1949, 31 A: 464-471.
- Braegger, Christian, et al. 2011.** Neue Wachstumskurven für die Schweiz. *Paediatrica.* 2011, Volumen 22 Nummer 1.
- Burghardt, R. D. und Herzenberg, J. E. 2010.** Temporary hemiepiphysiodesis with the eight-Plate for angular deformities: mid-term results. *Journal of Orthopaedic Science.* 2010, 15, S. 699–704.
- Degreef I, Moens P, Fabry G. 2003.** Temporary epiphysiodesis with Blount stapling for treatment of idiopathic genua valga in children. *Acta Orthop Belg.* 2003, 69(5):426-432.
- . 2003. Temporary epiphysiodesis with Blount stapling for treatment of idiopathic genua valga in children. *Acta Orthop Belg.* 2003, 69(5):426-32.
- Goyeneche, R. A., E., Primomo C. und Lambert, N. 2009.** Correction of Bone Angular Deformities: Experimental Analysis of Staples Versus 8-plate. *Journal of Pediatric Orthopaedics.* 2009, 29, S. 736–740.
- Hefti, Fritz. 2006.** *Kinderorthopädie in der Praxis.* 2. Auflage. Heidelberg : Springer, 2006. S. 42-44.
- Heinrich, Peter, Müller, Matthias und Graeve, Lutz. 2014.** *Löffler/Petrides Biochemie und Pathobiochemie.* 9. Auflage. Freiburg, Stuttgart : Springer, 2014. S. 952 - 960.
- Hoffmann, G.F., et al. 2014.** *Pädiatrie - Grundlagen und Praxis.* 4. Auflage. Heidelberg, Dortmund, Sinzheim, Mainz : Springer, 2014. S. 679.

- Jelinek, E. M.; Bittersohl, B.; Martiny, F.; Scharfstädt, A.; Krauspe, R.; Westhoff, B. 2012.** The 8-plate versus physeal stapling for temporary hemiepiphysodesis correcting genu valgum and genu varum: a retrospective analysis of thirty five patients. *International Orthopaedics (SICOT)*. 2012, 36, S. 599–605.
- Jorge, Belinha. 2014.** *Bone Tissue Remodelling Analysis*. Porto (Portugal) : Springer Verlag, 2014. S. 251-316.
- Kühnel, Wolfgang. 2014.** *Taschenatlas Histologie*. Lübeck : Georg Thieme Verlag, 2014. S. 152 ff.
- Moreland, J R, Bassett, L W und Hanker, G J. 1987.** Radiographic analysis of the axial alignment of the lower extremity. *J Bone Joint Surg Am*. 1987.
- Paley, D. und Herzenberg, J.E. 2001.** *Principles of Deformity Correction*. Berlin : Springer, 2001.
- Pazzaglia U, Andrini L, Di Nucci A. 1997.** The effects of mechanical forces on bones and joints. Experimental study on the rat tail. *Bone Joint Surg Br*. 79 B Nr.6, 1997, S. 1024-1030.
- Pfeil, Joachim, Grill, Franz und Graf, Reinhard. 1996.** *Extremitätenverlängerung, Deformitätenkorrektur, Pseudarthrosenbehandlung*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 1996. S. 83-86.
- Phemister, DB. 1933.** Operative arrestment of longitudinal growth of bones in the treatment of deformities. *J Bone Joint Surg*. 1933, 15: 1-15.
- Prader, A, et al. 07/1989.** Physical growth of Swiss children from birth to 20 years of age. First Zurich longitudinal study of growth and development. *Helvetica paediatrica acta. Supplementum* . 52:1-125, 07/1989.
- Ruchholtz, Steffen und Wirtz, Dieter Christian. 2010.** *Orthopädie und Unfallchirurgie*. Stuttgart : Thieme, 2010. S. 8.
- Salenius, P und Vankka, E. 1975.** The development of the tibiofemoral angle in children. *J Bone Joint Surg Am*. 57 (2), 1975, S. 259 -261.

Staheli, Lynn T. 2008. *Fundamentals of Pediatric Orthopedics*. 4. Auflage. Philadelphia (USA) : Lippincott Williams & Wilkins, 2008. S. 139.

Stevens, P.M. 2007. Guided growth for angular correction. A preliminary series using a tension band plate. 2007, S. 27 (3):253-9.

—. **2006.** Guided growth: 1933 to the present. *Strat Traum Limb Recon*. 2006, 1, S. 29–35.

Weiß, Christel und Berthold, Rzany. 2013. *Basiswissen medizinische Statistik*. 6. Auflage. s.l. : Springer-Verlag Berlin, 2013. S. 169-170, 250 ff. ISBN-13 978-3-642-34260-8.

Westhoff, B, Jäger, M und Krauspe, R. 2007. Kindliche Beinachsen - Was ist pathologisch? *Orthopäde*. 25.. April 2007, 36, S. 485–500.

WHO. 2015. World Health Organization. *World Health Organization*. [Online] 06. April 2015. [Zitat vom: 06. April 2015.] <http://www.who.int/childgrowth/standards/en/>.

Yilmaz, G., et al. 2013. Correction of Lower Extremity Angular Deformities in Skeletal Dysplasia With Hemiepiphysiodesis: A Preliminary Report. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2013.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel einer embryonalen enchondralen Ossifikation einer Röhrenknochenmetaphyse (Maßstabsbalken = 400µm); (Bildquelle: selber angefertigt im Institut für Anatomie der Universität zu Lübeck, institutseigenes Präparat)	3
Abbildung 2: Bereichsvergrößerung der Abbildung 1 (Maßstabsbalken = 200 µm).....	3
Abbildung 3: Wachstumsgeschwindigkeitsperzentilen von Jungen und Mädchen gegenübergestellt [nach (Prader, et al., 07/1989) (Braegger, et al., 2011) (WHO, 2015)] ...	4
Abbildung 4: Genua valga, „X-Beine“	7
Abbildung 5: Genua vara, „O-Beine“	8
Abbildung 6: eight-Plates™ mit kanülierten Schrauben (Bildmaterialquelle: Orthofix®, Hersteller der eight-Plate™).....	11
Abbildung 7: Kniemodell mit femorotibial kombinierter Epiphyseodese mittels eight-Plates™ (Bildmaterialquelle: Orthofix®, Hersteller der eight-Plate™)	11
Abbildung 8: Markieren der Epiphysenfuge mit einer Nadel unter Durchleuchtungskontrolle in 2 Ebenen (Hier nur in a.p.-Darstellung)	12
Abbildung 9: Vorlegen eines Kirschner-Drahtes in streng mittiger Position.....	12
Abbildung 10: Eindrehen der kanülierten Schrauben, sowie das anschließende Entfernen der Kirschner-Drähte. Es folgt die röntgenologische Kontrolle in 2 Ebenen.....	13
Abbildung 11: Vergleich der eight-Plate™-Länge zur Schnittlänge	13
Abbildung 12: Genua valga präoperativ / 5 Monate nach passagerer Epiphyseodese distal femoral medial beidseits.	14
Abbildung 13: Genua valga, 6 Monate nach passagerer Epiphyseodese proximal tibial medial.	15
Abbildung 14: Genua valga präoperativ / 7 Monate nach passagerer Epiphyseodese kombiniert distal femoral medial und proximal tibial medial.	16
Abbildung 18 Gelenksmittelpunkte [nach (Paley, et al., 2001), (Moreland, et al., 1987)]	25

Abbildung 16: Mechanische Knochenachsen des Femurs (a) und der Tibia (b); Mikulicz-Linie (c).....	26
Abbildung 17: a) Messung des mechanischen tibiofemorale Winkels bei einem Genu valgum [nach (Paley, et al., 2001) (Moreland, et al., 1987)].....	28
Abbildung 18: mL DFA und m MPTA bei a) Genu rectum, b) Genu valgum, c) Genu varum [nach (Paley, et al., 2001), (Moreland, et al., 1987)]	30
Abbildung 22: Tibiaplateaubreite	31
Abbildung 20: Darstellung der MAD's zur Tibiaplateaubreite anhand eines Röntgenbildes in anteriorer-posteriorer Projektion	32
Abbildung 24: Verhalten der Gelenkwinkel bei a) hüftbreitem Standbild („lockerer Haltung“) und b) engem Standbild [nach (Paley, et al., 2001)].....	33
Abbildung 22: Gelenkslinien-Konvergenz-Winkel (engl. joint line convergence angle, JLCA) (nach Paley, et al., 2001).	34
Abbildung 23: Positiver und negativer frontaler Gelenkebenen-Boden-Winkel	36
Abbildung 24: positiver fGBW; gelbe Linien = Tangenten der Femurkondylen und des Tibiaplateaus, horizontale grüne Linie = Bodenebene, schräge grüne Linie = mittige Linie zwischen den Tangenten	37
Abbildung 25: negativer fGBW; gelbe Linien = Tangenten der Femurkondylen und des Tibiaplateaus, horizontale grüne Linie = Bodenebene, schräge grüne Linie = mittige Linie zwischen den Tangenten	38
Abbildung 26: Entwicklung der mechanischen Beinachse (femorotibialer Winkel) bei Genu valgum und vara	43
Abbildung 27: Entwicklung des mL DFA bei Genu valgum und vara.....	44
Abbildung 28 Entwicklung des m MPTA bei Genu valgum und vara	45
Abbildung 29: Entwicklung des fGBW bei Valgus-Extremitäten prä implantationem und prä explantationem. Einzel-Hemiepiphyseodesen und femorotibial-kombinierte Epiphyseodesen im Vergleich.	51

Abbildung 30: Delta-fGBW ($^{\circ}$) als Absolutwerte im Vergleich; d.h. die absoluten Differenzenwerte zwischen fGBW prä implantationem und prä explantationem bei singulären EPD und kombinierten EPD.	52
Abbildung 31: Vergleichende Darstellung von Korrekturverlusten und Nicht-Korrekturverlusten bezüglich der absoluten Differenzwerte des fGBW kurz vor Explantation zu dem Referenzwert-fGBW von $1,5^{\circ}$ ($n = 45$)	57
Abbildung 32: Beispiel eines Box-Whisker-Plots.....	84
Abbildung 36: Entwicklung der MAD bei Genua vara und valga	87
Abbildung 37: Mechanische Achsabweichung (MAD) prä implantationem und prä explantationem [Vgl. (Yilmaz, et al., 2013)].....	90

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verteilung der Epiphyseodesen (EPD).....	23
Tabelle 2: Implantatverweildauer der Epiphyseodesen (n=99).....	41
Tabelle 3: Änderung des mechanischen tibiofemorale Winkels (°) / Körperlängenwachstum (cm) bei Valgus- und Varusdeformitäten.....	46
Tabelle 4: Änderung des mechanischen tibiofemorale Winkels (°) pro Körperlängenwachstum (cm) bei singulären Epiphyseodesen und kombinierten Epiphyseodesen	47
Tabelle 5: mL DFA-Änderung (°) / Körperlängenwachstum (cm) bei singulären EPD und kombinierten EPD	48
Tabelle 6: mMPTA-Gradänderung / Körperlängenwachstum (cm) bei singulären EPD und kombinierten EPD	48
Tabelle 7: Änderung des fGBW bei der Korrektur von Valgusdeformitäten.....	49
Tabelle 8: Änderung des fGBW bei der Korrektur von Varusdeformitäten	49
Tabelle 9: Änderung des fGBW bei singulären und kombinierten EPD im Vergleich.....	52
Tabelle 10: T-Test der Delta-GWB-Werte von singulären und kombinierten EPD prä explantationem, (P-Wert <0,001)	53
Tabelle 11: Der fGBW prä implantationem außerhalb des Referenzbereiches (RB).....	53
Tabelle 12: Der fGBW prä implantationem innerhalb des Referenzbereiches	54
Tabelle 13: Korrekturverlustraten in Abhängigkeit zum fGBW	55
Tabelle 14: Chi-Quadrat Tests.....	56
Tabelle 15: Binäre logistische Regressionsanalyse (Primäranalyse) bzgl. des Einflusses der absoluten Differenz des fGBW zu 1,5 ° kurz vor Explantation auf das Korrekturverlustrisiko (n = 45)	58
Tabelle 16: Binäre logistische Regressionsanalyse bzgl. des Einflusses von zusätzlichen Kovariablen auf das Risiko eines Korrekturverlustes (n = 45)	59

Tabelle 17: Verteilung von idiopathischen und sekundärer Achsabweichungen (Patientenanzahl)	85
Tabelle 18: Altersverteilung des Patientenkollektivs	85
Tabelle 19: Vergleich der Gelenkwinkel- und Beinachsenwerte prä implantationem und prä explantationem	86
Tabelle 20: Position der MAD zu der halben Tibiaplateaubreite [MAD/(TPB/2)].....	89
Tabelle 21: Gelenkwinkel- und Beinachsenänderung pro Monat	91
Tabelle 22: Änderung der MAD (mm) pro Körperlängenwachstum (cm) bei singulären EPD und kombinierten EPD	92
Tabelle 23: Vergleich der Deltawerte zwischen Einzel-Epiphyseodesen und kombinierten Epiphyseodesen	93
Tabelle 24: Entwicklung des fGBW bei Einzel-Hemiepiphyseodesen bei Valgus- Deformitäten	94
Tabelle 25: Entwicklung des fGBW bei Einzel-Hemiepiphyseodesen bei Varus- Deformitäten	94
Tabelle 26: Änderung des fGBW bei femorotibial-kombinierten Hemiepiphyseodesen bei Korrektur von Genua valga	95
Tabelle 27: Änderung des fGBW bei femorotibial-kombinierten Hemiepiphyseodesen bei Korrektur von Genua vara	95

9. Abkürzungsverzeichnis

a.p.	anterior-posterior
Bx	Beinachse
cm	Zentimeter
D	distal
Engl.	Englisch
EPD	Epiphyseodese
Exp(B)	Odds-Ratio (OR), = Quotenverhältnis
F	Femur
fGBW	frontaler Gelenkebenen-Boden-Winkel
G.	Genu
JLCA	joint line convergence angle, Gelenkslinienabweichungswinkel
L	lateral
ldf	lateral distaler Femur (als Position der Epiphyseodese)
lpt	laterale proximale Tibia (als Position der Epiphyseodese)
M	medial
MAD	mechanical axis deviation; mechanische Achsabweichung
Max	größter Wert
mdf	medial distaler Femur (als Position der Epiphyseodese)
Mech.	mechanisch
Min	kleinster Wert
mLDFA	mechanical lateral distal femoral angle; mechanischer lateraler distaler Femurwinkel

mm	Millimeter
mMPTA	medial proximal femoral angle, medialer proximaler tibialer Winkel
mpt	mediale proximale Tibia (als Position der Epiphyseodese)
n	Anzahl
OR	Odds Ratio = Quotenverhältnis = $\text{EXP}(B)$
P	proximal
S	Spanne
SD	Standartabweichung
Sig.	Signifikanzwert = p-Wert
T	Tibia
TPB	Tibiaplateaubreite
u.E.	unseres Erachtens
u.U.	unter Umständen
±	Standartabweichung
°	Grad

10. Anhang

1. Statistik/ Box-Whisker-Plots

Box-Whisker-Plots sind grafische Darstellungen zur Verdeutlichung von Werteverteilungen einer Variablen. Sie sind hervorragend dafür geeignet, dem Betrachter einen schnellen Überblick über die Streuung von Werten zu vermitteln. Ein Box-Whisker-Plot besteht aus einer Box, den Antennen/Fühlern (Whiskers) und ggf. den Ausreißerwerten.

Die Box wird durch das obere und das untere Quartil begrenzt; so liegen 50 % aller Werte einer Variablen innerhalb der Box. Die Linie innerhalb der Box markiert den Median. Er ist jener Wert, der bei einer geordneten Zahlenreihe in der Mitte liegt. (Beispiel: geordnete Zahlenreihe: -15, -3, 0, 0, 1, 2, 3, 4, 5 ; Median = „1“).

Die Länge der Antennen kann maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstandes ausmachen, d.h. das 1,5-fache des Wertebereiches der Box. [Beispiel: Erfasst die Box einen Wertebereich von -2 bis +2 (Interquartilabstand = 4), kann die Antenne maximal 6 Einheiten ($1,5 * 4$) dieser Variablen lang sein, und würde bis zu dem Wert „8“ oder „-8“ reichen)]. Eine Antenne kann nur maximal so lang sein, wie der größte positive Wert, bzw. kleinste negative Wert, es zulässt. Sie ist also nicht immer das 1,5-fache des Interquartilabstandes lang, sondern kann auch kürzer sein. Dieser Fall trifft ein, wenn Werte nicht weiter als das 1,5 fache des Interquartilabstandes außerhalb der Box liegen. [Beispiel: Liegt der Interquartilabstand zwischen -2 und +2, und liegt der größte Wert einer Variable bei +7, wird die Antenne den Wert +8 ($+2 + (1,5*4)$) nicht erreichen, sondern bei dem Maximalwert von +7 enden. Die Größe der Antenne beträgt in diesem Fall nicht das 1,5-fache des Interquartilabstandes].

Liegen Werte weiter als das 1,5-fache des Interquartilabstandes außerhalb der Box, so werden diese Werte als gemäßigte Ausreißer bezeichnet. (siehe Abbildung 32, o³²)

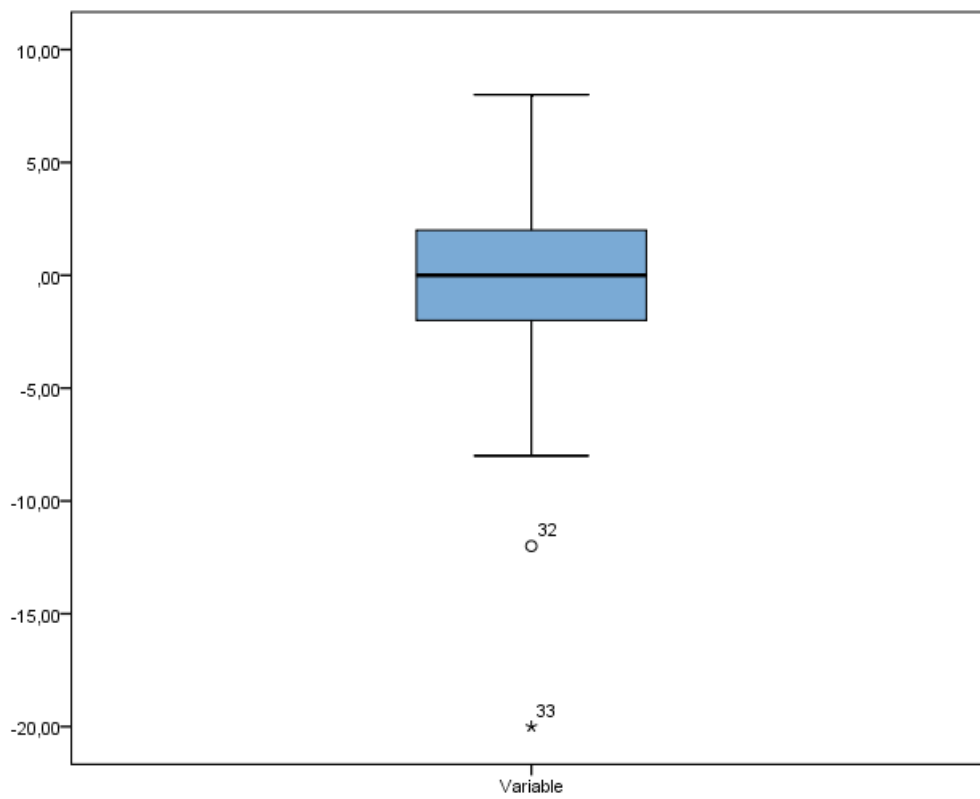


Abbildung 32: Beispiel eines Box-Whisker-Plots

2. Verteilung von idiopathischen und sekundärer Achsabweichungen (Patientenanzahl)

	(n)	Prozent
Idiopathisch + sekundär (100 %)		
♂	20	45,5 %
♀	24	54,5 %
total	44	100,0 %
Idiopathisch (86,4 %)		
♂	17	44,7 %
♀	21	55,3 %
total	38	100,0 %
Sekundär (13,6 %)		
♂	3	50,0 %
♀	3	50,0 %
total	6	100,0 %

Tabelle 17: Verteilung von idiopathischen und sekundärer Achsabweichungen (Patientenanzahl)

3. Altersverteilung des Patientenkollektivs

Gesamt (n = 44)	Mittelwert	SD	Min	Max
♂ (n = 20)	13 8/12 Jahre	1 10/12 Jahre	9 8/12 Jahre	15 10/12 Jahre
♀ (n = 24)	11 2/12 Jahre	2 5/12 Jahre	2 7/12 Jahre	14 1/12 Jahre
total (n = 44)	12 4/12 Jahre	2 5/12 Jahre	2 7/12 Jahre	15 10/12 Jahre

Tabelle 18: Altersverteilung des Patientenkollektivs

4. Vergleich der Gelenkwinkel- und Beinachsenwerte prä implantationem und prä explantationem

	Prä implantationem				Prä explantationem				Änderung der prä- impl. & prä- expl. Daten
	Mittelwert	SD	Min	Max	Mittelwert	SD	Min	Max	
Mech. Beinachse (°)*									
EPD bei <i>G.valgum</i> (n = 64)	6,9	3,3	3	23	-0,2	2,9	-7,0	7,0	7,1 (±4,0, range 1,0 – 17,0)
EPD bei <i>G.varum</i> (n = 14)	-7,2	4,0	-19	-3	-1,2	2,6	-9,0	2,0	6,0 (±2,7, range 2,0 -12,0)
Beinachse (MAD in mm)**									
EPD bei <i>G.valgum</i> (n = 64)	22,6	9,3	10,0	66,0	-0,3	9,7	-25,0	23,0	23,0 (±11,4, range 2,0 - 49,0)
EPD bei <i>G.varum</i> (n = 14)	-23,3	10,9	-54,0	-9,0	-3,8	7,8	-25,0	7,0	19,5 (±8,4, range 7,0 – 38,0)
mLDFA (°)									
EPD bei <i>G.valgum</i> (n = 56)	83,1	3,1	70	88	89,5	2,8	82,0	96,0	6,4 (±2,9, range 1,0 – 13,0)
EPD bei <i>G.varum</i> (n = 9)	93,2	3,8	89	102	89,7	3,5	83,0	96,0	3,6 (±2,1, range 1,0 – 6,0)
mMPTA (°)									
EPD bei <i>G.valgum</i> (n = 24)	92,3	3,0	88	102	88,0	2,2	83,0	92,0	4,3 (±3,9, range 1,0 – 19,0)
EPD bei <i>G.varum</i> (n = 10)	84,6	2,4	80	87	88,4	1,8	85,0	91,0	4,2 (±2,5, range 1,0 – 9,0)

* Valgus-Beinachse = positive Gradwerte (+) ; Varus-Beinachse = negative Gradwerte (-)

** Valgus-Beinachse = positive mm-Werte (+) ; Varus-Beinachse = negative mm-Werte (-)

Tabelle 19: Vergleich der Gelenkwinkel- und Beinachsenwerte prä implantationem und prä explantationem

5. Entwicklung der MAD

Die durchschnittliche MAD bei Genua valga betrug prä implantationem 22,6 mm ($\pm 9,3$ mm, range 10,0 – 66,0 mm). Nach Achskorrektur kurz vor Explantation zeigte sich eine durchschnittliche MAD von -0,3 mm ($\pm 9,7$ mm, range -25 – 23 mm). Daraus ergibt sich eine mittlere Korrektur von 23,0 mm ($\pm 11,4$ mm, range 2,0 – 49,0 mm) (siehe Abbildung 33 und Anhang 4).

In der Gruppe der Genua vara belief sich die durchschnittliche präimplantive MAD auf -23,3 mm ($\pm 10,9$ mm, range -54,0 – -9,0 mm). Kurz vor Explantation belief sich die MAD im Durchschnitt auf -3,8 mm ($\pm 7,8$ mm, range -25,0 – 7,0 mm). Somit betrug die durchschnittliche Korrektur der MAD bei Genua vara 19,5 mm ($\pm 8,4$ mm, range 7,0 – 38,0 mm) (siehe Abbildung 33 und Anhang 4).

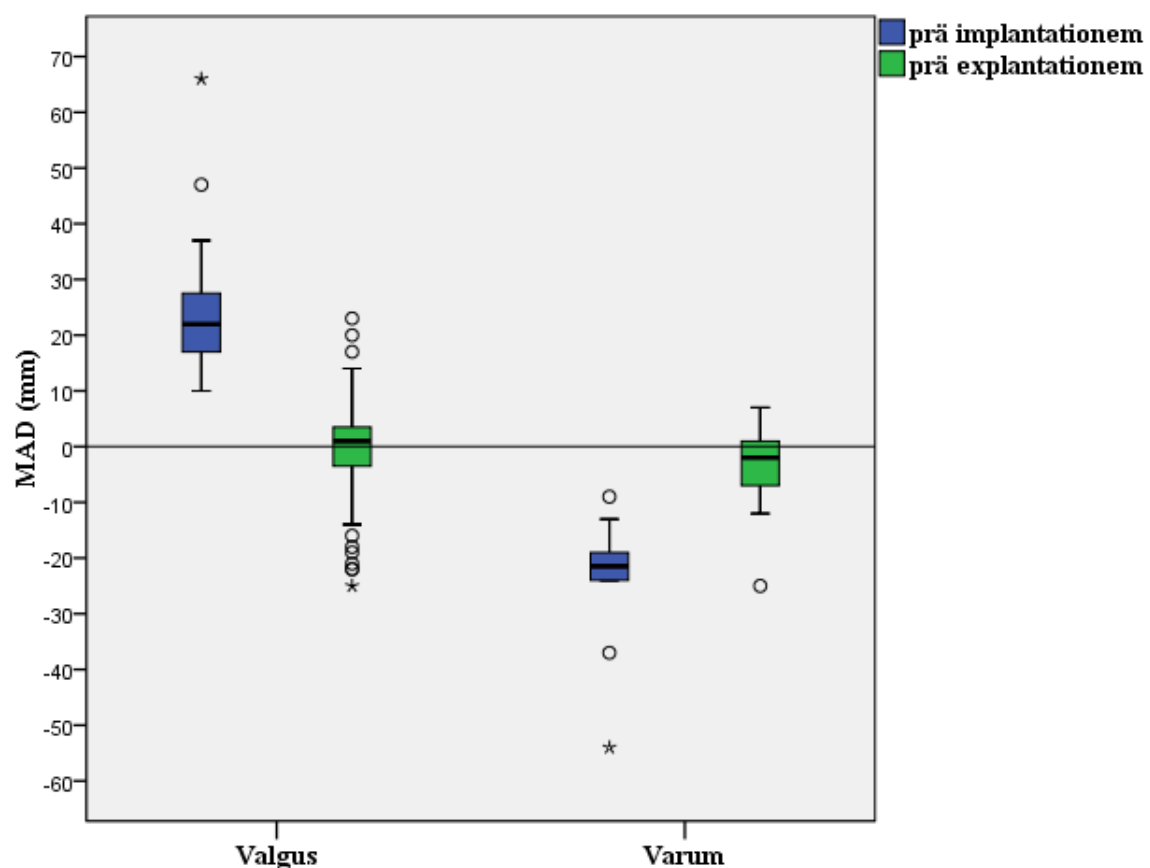


Abbildung 33: Entwicklung der MAD bei Genua vara und valga

6. Position der MAD zu der halben Tibiaplateaubreite [MAD/(TPB/2)]

In der Gruppe der Genua valga (n = 64) lag die Traglinie prä implantationem in 19 Fällen in Zone 1, in 39 Fällen in Zone 2, in 5 Fällen in Zone 3 und in einem Fall in Zone 4. Somit betrug die präoperative MAD der TPB/2 durchschnittlich 65,23 % ($\pm 29,27$ %, range 23,81 – 203,08 %). Kurz vor der Entfernung der eight-Plates™ lag die Traglinie bei den Genua valga in 55 Fällen in Zone 1 und in 9 Fällen in Zone 2. Es kamen keine Fälle in den Gruppen 3 und 4 mehr vor. Die durchschnittliche MAD/(TPB/2) lag in dieser Gruppe prä explantationem bei -2,57 % ($\pm 27,64$ %, range -81,97 – 56,34 %) (siehe Tabelle 20 und Abbildung 34).

In der Gruppe der Genua vara (n = 14) lag die Mikulicz-Linie präoperativ in 2 Fällen in Zone 1, in 10 Fällen in Zone 2, in 2 Fällen in Zone 3 und in keinem der Fälle in Zone 4. Durchschnittlich betrug die MAD der TPB/2 präoperativ -61,74% ($\pm 33,57$ %, range -161,19% – -28,57%). Kurz vor Entfernung der Implantate lag die Mikulicz-Linie in 13 Fällen in Zone 1 und in nur 1 Fall in Zone 2. In Zone 3 und 4 kamen postoperativ keine Traglinien mehr vor. Prä explantationem betrug die MAD/(TPB/2) bei den Genu vara durchschnittlich -9,77 % ($\pm 20,74$ %, range -64,94 – 19,44 %) (siehe Tabelle 20 und Abbildung 34).

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
Valgus (n = 64)				
<i>prä implantationem (n:)</i>	19	39	5	1
<i>prä explantationem (n):</i>	55	9	0	0
Varus (n = 14)				
	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
<i>prä implantationem (n):</i>	2	10	2	0
<i>prä explantationem (n):</i>	13	1	0	0
MAD-Gruppierung nach der				
TPB/2 (n = 78)	Mittelwert	SD	Min	Max
<i>Valgus prä implantationem</i>	65,23 %	29,27 %	23,81 %	203,08 %
<i>Valgus prä explantationem</i>	-2,57 %	27,64 %	-81,97 %	56,34 %
<i>Varus prä implantationem</i>	-66,74 %	33,53 %	-161,19 %	-28,57 %
<i>Varus prä explantationem</i>	-9,77 %	20,74 %	-64,94 %	19,44 %
[Vier Gruppen: Gruppe 1: MAD = 0-50 % der Tibiaplateaubreite/2, Gruppe 2: MAD>50-100 % der TPB/2, Gruppe 3: MAD>100 – 200 % der TPB/2, Gruppe 4: MAD>200 % der TPB/2]				

Tabelle 20: Position der MAD zu der halben Tibiaplateaubreite [MAD/(TPB/2)]

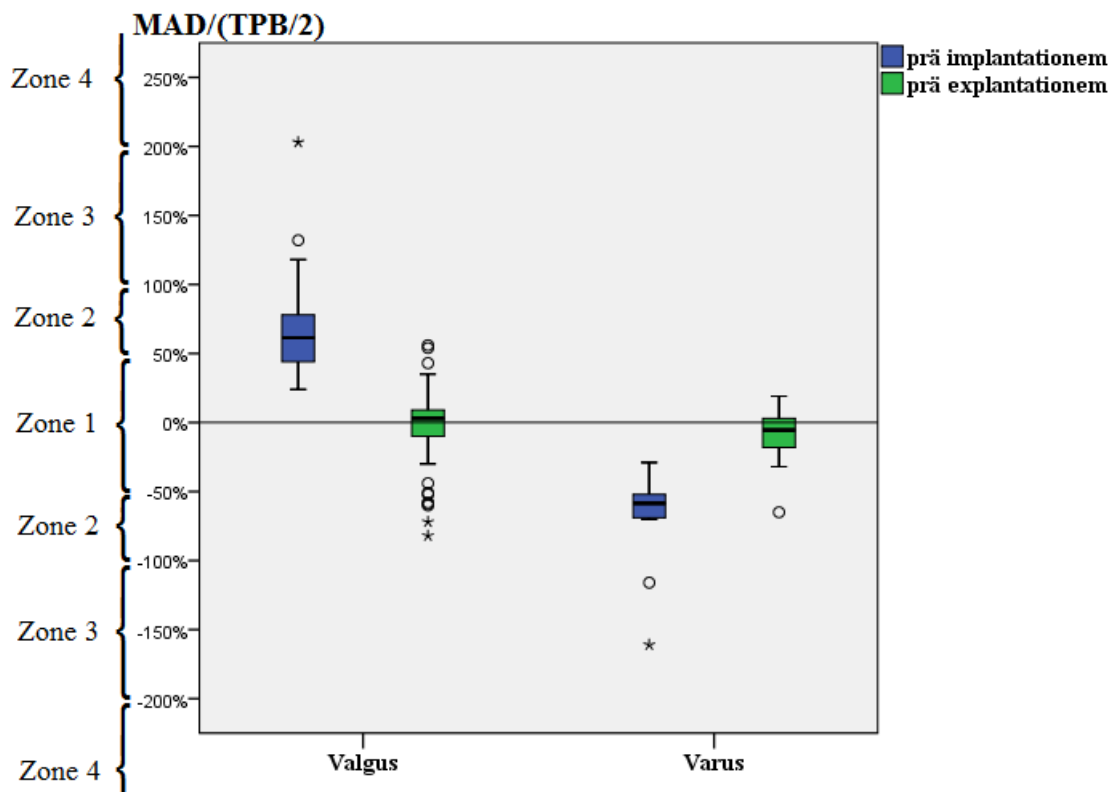


Abbildung 34: Mechanische Achsabweichung (MAD) prä implantationem und prä explantationem; Die MAD ist als Prozentualanteil der halben Tibiaplateaubreite [MAD / (TPB/2)] angegeben. Abweichungen von 0-50 % fallen in Zone 1, 51-100 % in Zone 2, 101-200 % in Zone 3, und >200 % in Zone 4. [Vgl. (Yilmaz, et al., 2013)]

7. Gelenkwinkel- und Beinachsenänderung pro Monat

In der Gruppe der Genua valga zeigte sich eine mittlere Korrekturgeschwindigkeit der mLDFA von 0,87 °/Monat. Der mMPTA korrigierte sich mit 0,6 °/Monat. Der mechanische tibiofemorale Winkel konnte mit 0,99 °/Monat beeinflusst werden. 3,2 mm/Monat betrug der durchschnittliche Einfluss auf die MAD bei Genua valga (siehe Tabelle 21).

Bei den Genua vara korrigierte sich der mLDFA im Durchschnitt um 0,58 °/Monat. Es zeigte sich eine mittlere Korrekturgeschwindigkeit des mMPTA von 0,51 °/Monat. Dadurch konnte die mechanische Beinachse im Mittel um 0,87 °/Monat beeinflusst werden. Die MAD wurde bei varischen Beinachsen mit einer Korrekturgeschwindigkeit von 2,9 mm/Monat korrigiert (siehe Tabelle 21).

In der Gesamtgruppe zeigte sich eine Änderung des mLDFA von 0,84 °/Monat. Der mMPTA korrigierte sich im Durchschnitt um 0,57 °/Monat. Dadurch konnte eine Korrektur der mechanischen Beinachse um 0,97 °/Monat erreicht werden. Die durchschnittliche Korrekturgeschwindigkeit der MAD belief sich auf 3,2 mm/Monat (siehe Tabelle 21).

	Valgus	Varus	Gesamt
mLDFA (°/Monat)	0,87	0,58	0,84
mMPTA (°/Monat)	0,60	0,51	0,57
mech. Beinachse (°/Monat)	0,99	0,87	0,97
MAD (mm/Monat)	3,2	2,9	3,2

Tabelle 21: Gelenkwinkel- und Beinachsenänderung pro Monat

8. Änderung der MAD (mm) pro Körperlängenwachstum (cm)

Die MAD konnte in der Gruppe der singulären EPD (n = 57) durchschnittlich um 4,3 mm pro cm Körperlängenwachstum ($\pm 1,86$ mm/cm, range 0,29 – 9,33 mm/cm) korrigiert werden (siehe Tabelle 22).

In der Gruppe der kombinierten EPD (n = 21) wurde eine mittlere Korrektur der MAD um 7,66 mm pro cm Körperlängenwachstum ($\pm 4,85$ mm/cm, range 1,71 – 20,00 mm/cm) erreicht (siehe Tabelle 22).

	Mittelwert	SD	Min	Max
Singuläre EPD (n = 57) (mm/cm)	4,30	1,86	0,29	9,33
Kombinierte EPD (n = 21) (mm/cm)	7,66	4,85	1,71	20,00

Tabelle 22: Änderung der MAD (mm) pro Körperlängenwachstum (cm) bei singulären EPD und kombinierten EPD

9. Vergleich der Deltawerte zwischen Einzel-Epiphyseodesen und kombinierten Epiphyseodesen

Die Korrektur der mechanischen Beinachse (femorotibialer Winkel) erfolgte bei Einzel-Epiphyseodesen (n = 57, 44 x femoral, 13 x tibial) mit 0,8 °/Monat ($\pm 0,4$ °/Monat, range 0,1 – 1,8 °/Monat). Die Korrektur der Beinachse bei kombinierten Epiphyseodesen (femoral und tibial, n = 21) erfolgte mit 1,4 °/Monat ($\pm 1,0$ °/Monat, range 0,2 – 3,5 °/Monat) (siehe Tabelle 23).

Analog betrug die Korrektur der MAD bei Einzel-Epiphyseodesen mit 2,7 mm/Monat ($\pm 1,5$ mm/Monat, range 0,2 – 6,3 mm/Monat). Die MAD bei kombinierten Epiphyseodesen konnte mit 4,1 mm/Monat ($\pm 2,6$ mm/Monat, range 0,8 – 10,0 mm/Monat) korrigiert werden (siehe Tabelle 23).

Der mL DFA konnte durch die femoralen Einzel-Epiphyseodesen (n = 44) um 0,9 °/Monat ($\pm 0,4$ °/Monat, range 0,1 – 1,8 °/Monat) korrigiert werden. Bei kombinierten Epiphyseodesen (n = 21) war eine Korrekturgeschwindigkeit von 0,7 °/Monat ($\pm 0,5$ °/Monat, range 0,3 – 2,0 °/Monat) erreicht worden (siehe Tabelle 23).

Der Einfluss durch die tibialen Einzel-Epiphyseodesen (n = 13) auf die mMPTA konnte mit 0,4 °/Monat ($\pm 0,3$ °/Monat, range 0,1 – 1,9 °/Monat) gemessen werden. Durch den Einsatz von kombinierten Epiphyseodesen (n = 21) konnte eine Korrekturgeschwindigkeit von 0,7 °/Monat ($\pm 0,6$ °/Monat, range 0,0 – 2,3 °/Monat) erreicht werden (siehe Tabelle 23).

	Mittelwert	SD	Min	Max	Femorale EPD (n)	Tibiale EPD (n)	Relation
Beinachsenkorrektur bei Einzel-Epiphyseodesen (°/Monat) (n = 57)	0,8	0,4	0,1	1,8	44	13	3,4
Beinachsenkorrektur bei kombinierten Epiphyseodesen (°/Monat) (n = 21)	1,4	1,0	0,2	3,5	21	21	1
MAD-Korrektur bei Einzel-Epiphyseodesen (mm/Monat) (n = 57)	2,7	1,5	0,2	6,3	44	13	3,4
MAD-Korrektur bei kombinierten Epiphyseodesen (mm/Monat) (n = 21)	4,1	2,6	0,8	10,0	21	21	1
mLDFA-Korrektur bei Einzel-Epiphyseodesen (°/Monat) (n = 44)	0,9	0,4	0,1	1,8	44	-	-
mLDFA-Korrektur bei kombinierten Epiphyseodesen (°/Monat) (n = 21)	0,7	0,5	0,3	2,0	21	-	-
mMPTA-Korrektur bei Einzel-Epiphyseodesen (°/Monat) (n = 13)	0,4	0,3	0,1	1,0	-	13	-
mMPTA-Korrektur bei kombinierten Epiphyseodesen (°/Monat) (n = 21)	0,7	0,6	0,0	2,3	-	21	-

Tabelle 23: Vergleich der Deltawerte zwischen Einzel-Epiphyseodesen und kombinierten Epiphyseodesen

10. Vergleich der Entwicklung des fGBW bei Einzel-Hemiepiphyseodesen (n = 57 Beine) und bei femorotibial-kombinierten Hemiepiphyseodesen (n = 21 Beine)

Epiphyseodesenlokation: mdf* (n = 40)	Mittelwert	SD	Min	Max
Initialer fGBW (°)	5,8	2,6	2	10
Terminaler fGBW (°)	-0,5	3,1	-7	5
Delta fGBW (°)	6,3	3,3	1	15
Epiphyseodesenlokation: mpt* (n = 8)	Mittelwert	SD	Min	Max
Initialer fGBW (°)	-0,4	1,9	-4	2
Terminaler fGBW (°)	2,0	3,0	-2	6
Delta fGBW (°)	3,1	3,4	0	10

* mdf = medialer distaler Femur, mpt = mediale proximale Tibia

Tabelle 24: Entwicklung des fGBW bei Einzel-Hemiepiphyseodesen bei Valgus-Deformitäten

Epiphyseodesenlokation: ldf* (n = 4)	Mittelwert	SD	Min	Max
Initialer fGBW (°)	-3,3	0,5	-4	-3
Terminaler fGBW (°)	-1,0	0,0	-1	-1
Delta fGBW (°)	2,3	0,5	2	3
Epiphyseodesenlokation: lpt* (n = 5)	Mittelwert	SD	Min	Max
Initialer fGBW (°)	0,4	2,4	-3	3
Terminaler fGBW (°)	-2,0	2,0	-4	1
Delta fGBW (°)	4	1,9	2	6

* ldf = lateraler distaler Femur, lpt = laterale proximale Tibia

Tabelle 25: Entwicklung des fGBW bei Einzel-Hemiepiphyseodesen bei Varus-Deformitäten

Valgus (n = 16)	Mittelwert	SD	Min	Max
Initialer fGBW (°)	1,4	2,3	-4,0	4,0
Terminaler fG1BW (°)	-0,3	2,6	-7,0	4,0
Delta fGBW (°)	2,4	1,5	0,0	6,0

Tabelle 26: Änderung des fGBW bei femorotibial-kombinierten Hemiepiphyseodesen bei Korrektur von Genua valga

Varus (n = 5)	Mittelwert	SD	Min	Max
Initialer fGBW (°)	-0,1	1,4	-2,0	3,0
Terminaler fGBW (°)	0,6	1,4	-1,0	3,0
Delta fGBW (°)	1,5	1,4	0,0	5,0

Tabelle 27: Änderung des fGBW bei femorotibial-kombinierten Hemiepiphyseodesen bei Korrektur von Genua vara

11. Genehmigung der Ethikkommission

Die Genehmigung zur retrospektiven Erhebung und Auswertung von Daten in anonymisierter Form im Rahmen der Studie „Einfluss der passageren Hemiepiphyseodese mit der eight-Plate™ auf die Kniegelenkorientierung im Raum“ wurde am 11. Dezember 2013 durch die Ethikkommission der Universität zu Lübeck erteilt. Das dazugehörige Aktenzeichen lautet: 13-260A.

11. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Martin Russlies für die Überlassung des Themas dieser Promotionsarbeit, für sein Vertrauen in mich, sowie für seine konstruktiven Ratschläge.

Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Dr. Barbara Behnke, welche die direkte Betreuung für meine Promotionsarbeit übernahm. Sie gab mir wertvolle Vorschläge, half mir sehr bei der Korrektur dieser Arbeit, bewies viel Geduld und unterstützte mich zudem stets mit ihrer freundlichen und herzlichen Art.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. med. J. Barkhausen für die freundliche Zurverfügungstellung eines Arbeitsplatzes in der Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin des UKSH Lübeck.

Ich danke dem Institut für medizinische Biometrie und Statistik der Universität zu Lübeck für die statistische Beratung, insbesondere Herrn Dr. rer. hum. biol. Arne Schillert.

Ich danke Herrn Prof. Dr. med. M. Klinger für die freundliche Ermöglichung der Anfertigung von histologischen Bildern im Institut für Anatomie der Universität zu Lübeck, sowie für die Zurverfügungstellung der histologischen Präparate.

Ich möchte mich bei meiner Freundin Sheila Meinecke bedanken, welche Mutter meiner Tochter Charlotte ist. Sie hat während der Dauer der Fertigstellung viel Verständnis gezeigt und spendete stets moralische Unterstützung.

Meinen Eltern danke ich für die Ermöglichung des Studiums der Medizin, für ihr großes Verständnis und ihre Weitsicht. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

12. Publikationsliste

Publikationen:

- "Hemiepiphyseodesis to correct lower limb deformities – effect on mechanical axis and frontal knee joint line"

Kudernatsch N, Behnke B, Schagemann J, Mittelstädt H, Russlies M
European Journal of Trauma and Emergency Surgery: June 2014, Volume 40, Issue 3, pp 410 – 411

- "Altered frontal knee joint line after hemiepiphyseodesis to correct lower limb deformities – increased risk of rebound deformity?"

Behnke B, Kudernatsch N, Schagemann J, Mittelstädt H, Russlies M
Journal of Pediatric Orthopedics 2016 (Submission in process)

Kongressbeiträge:

- "Hemiepiphyseodesis to correct lower limb deformities – effect on mechanical axis and frontal knee joint line"

Kudernatsch N, Behnke B, Schagemann J, Mittelstädt H, Russlies M
Jahrestagung der Sektion Kindertraumatologie, 13. – 14. Juni 2014 in Lübeck (Vortrag).

- "Altered frontal knee joint line after hemiepiphyseodesis to correct lower limb deformities – increased risk of rebound deformity?"

Kudernatsch N, Behnke B, Schagemann J, Mittelstädt H, Russlies M

Als Beitrag angemeldet bei: Kongress der American Academy of Orthopaedic Surgeons (AAOS) 2017