

**Ergebnisse der Therapie der  
Achskorrektur  
mittels  
kniegelenksnaher temporärer  
Hemiepiphyseodese**

Natascha Heckel

Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Sportorthopädie

Klinikum Rechts der Isar

Direktor: Prof. Dr. med. Rüdiger von Eisenhart-Rothe

**Ergebnisse der Therapie der  
Achskorrektur  
mittels  
kniegelenksnaher temporärer  
Hemiepiphyseodese**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin

an der Medizinischen Fakultät der Technischen Universität München

vorgelegt von

Natascha Heckel

aus München

2021

**Ergebnisse der Therapie der Achskorrektur mittels kniegelenksnaher temporärer Hemiepiphyseodese**

Natascha Heckel

---

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Medizin genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Florian Eyer

Prüfer\*innen der Dissertation:

1. apl. Prof. Dr. Rainer Burgkart

2. apl. Prof. Dr. Chlodwig Kirchhoff

---

Die Dissertation wurde am 14.06.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 04.01.2022 angenommen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1 Einführung in das Thema Beinachsenfehlstellungen	4
1.2 Motivation und Ziele	6
1.3 Geometrie der unteren Extremität	7
1.3.1 Entwicklung des aufrechten Gangs und anatomische Anpassungsvorgänge	7
1.3.2 Achsenverhältnisse der unteren Extremität	8
1.3.3 Funktion und Biomechanik des Kniegelenks	9
1.3.4 Physiologische Entwicklung der Beinachse	10
1.4 Konsequenzen von Achsfehlstellungen auf den Bewegungsapparat	11
1.5 Gründe für pathologische Achsfehlstellungen	14
1.5.1 Traumata	14
1.5.2 Neoplasien	17
1.5.3 Osteochondrosen im Kindes- und Jugendalter	17
1.5.4 Lähmungen	18
1.5.5 Kongenitale Systemerkrankungen	18
<b>2 Die Geschichte der Wachstumslenkung – Entwicklung der operativen Therapie von Beinachsenfehlstellungen</b>	<b>22</b>
2.1 Permanente Verfahren zur definitiven Wachstumsblockade	22
2.1.1 Offene Methode	22
2.1.2 Perkutane Methoden	23
2.2 Temporäre Verfahren zur vorübergehenden Wachstumsblockade mittels verschiedener Implantate	24
2.2.1 Klammer-Implantate	25
2.2.2 Platten-Implantate	27
2.2.3 Schrauben-Implantate	28
2.3 Aktueller Stand der Forschung zum Thema Wachstumslenkung	30
2.3.1 Weiterentwicklung der Implantate	30
2.3.2 Experimentelle Methoden	31
<b>3 Die Technik der Wachstumslenkung</b>	<b>33</b>
3.1 Präoperative Diagnostik	33
3.1.1 Indikationsstellung	33
3.1.2 Lokalisation der Fehlstellung	34
3.1.3 Zeitliche Therapieplanung	36
3.2 Implantationstechnik	36
3.2.1 Zweilochplatten	37
3.2.2 Schraubenmethode (PETS)	40
3.3 Metallentfernung	41
3.3.1 Zweilochplatten	41
3.3.2 Schraubenmethode (PETS)	41

<b>4</b>	<b>Fragestellung</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>Material und Methode</b>	<b>43</b>
5.1	Studiendesign und Einschlusskriterien	43
5.2	Zeitplan	44
5.3	Untersuchungsmaterial	45
5.3.1	Konventionelle bilaterale Ganzbein-Standaufnahme	45
5.3.2	Weiterentwicklung der radiologischen Technik	46
5.3.3	Digitale Patientenakte	47
5.4	Methodische Auswertung	47
5.4.1	Achskorrektur	47
5.4.2	Komplikationen	49
5.5	Hemiepiphyseodese versus Korrekturosteotomie	50
5.6	Statistikmethode	51
5.7	Forschungsethik und Datenschutz	51
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>52</b>
6.1	Übersicht	52
6.2	Achskorrektur	54
6.2.1	Änderung der mechanischen Beinachse und der Gelenkorientierungswinkel	54
6.2.2	Alter bei Implantation	56
6.2.3	Therapiedauer	57
6.3	Komplikationen	58
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>62</b>
7.1	Interpretation und Beurteilung der Ergebnisse des Korrekturereffekts von Zweilochplatten und PETS	62
7.1.1	Änderung der mechanischen Beinachse und der Gelenkorientierungswinkel	62
7.1.2	Alter bei Implantation	64
7.1.3	Therapiedauer	67
7.2	Interpretation und Beurteilung der Ergebnisse des Komplikationspotenzials von Zweilochplatten und PETS	69
7.3	Limitationen der Studie und Schlussfolgerungen	73
7.3.1	Ausschlussquote und Vermessungsmethode	73
7.3.2	Multifaktorialität	74
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>75</b>
	<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis</b>	<b>78</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>80</b>
	<b>Anhang</b>	<b>87</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>114</b>
	<b>Publikationen</b>	<b>115</b>

## Abkürzungsverzeichnis

MAD	Mechanical Axis Deviation
MPTA	Medial Proximal Tibia Angle
LDFA	Lateral Distal Femur Angle
LPFA	Lateral Proximal Femur Angle
LDTA	Lateral Distal Tibia Angle
I.C.P.	Infantile Cerebralparese
PETS	Percutaneous epiphyseodesis using transphyseal screws
IKA	Interkondylenabstand
IMA	Intermalleolenabstand
a.p.	anterior-posterior
JLCA	Joint Line Convergence Angle

# **1 Einleitung**

## **1.1 Einführung in das Thema Beinachsenfehlstellungen**

Achsfehler der unteren Extremität bei Heranwachsenden sind häufig. Die Entscheidung, ob und wann Korrekturbedarf besteht, ist für den behandelnden Kinderorthopäden im Einzelfall oft eine Herausforderung. Er benötigt eine genaue Kenntnis der physiologischen Skelettentwicklung, um zu beurteilen, ob eine abweichende Beinachse im Wachstumsalter noch als normal gilt oder bereits behandlungsbedürftig ist. (Westhoff et al. 2007; Friend/Widmann 2008)

Das Spektrum an Ursachen für Beinachsenfehlstellungen ist groß. In den allermeisten Fällen ist die Fehlstellung nur milde ausgeprägt und stellt den charakteristischen Verlauf im Rahmen des natürlichen Entwicklungsprozesses des Bewegungsapparats dar (Westhoff et al. 2007). Im weiteren Wachstum gleicht sich diese oft spontan aus. Beinachsendiformitäten können zum Beispiel Folge eines Traumas sein. Nach einem Knochenbruch besitzt das Skelett beim Heranwachsenden normalerweise ein gewisses biologisches Korrekturpotenzial. Übersteigt das Ausmaß der posttraumatischen Fehlstellung diesen Anpassungsvorgang, kann der Knochen im Heilungsprozess die Abweichung nicht mehr vollständig ausgleichen. Verletzungen der Wachstumsfuge sowie Infektionen mit Knochen- und Gelenkbeteiligungen können zu einem vorzeitigen teilweisen Fugenschluss mit nachfolgend ungleichem Wachstum führen. Auch neoplastische Erkrankungen führen häufig zu Wachstumsstörungen, genauso wie angeborene Skelettdysplasien und Systemerkrankungen mit Beteiligung des Knochen-, Knorpel- und Bindegewebsstoffwechsels. Diese können zu einem gestörten Aufbau der Strukturbestandteile des Skelettapparats führen und so die Knochen- oder Knorpelarchitektur beeinträchtigen. Beispiele hierfür sind Rachitis, Osteogenesis imperfecta oder das Marfan-Syndrom. (Westhoff et al. 2007; Lauen et al. 2015)

Ein Risikofaktor für die Entstehung orthopädischer Krankheitsbilder, wie zum Beispiel Beinachsenfehlstellungen, ist zudem ein hohes Körpergewicht. Es stellt für die Gelenke und Knochen der unteren Extremität eine hohe Belastung dar. (Günther/Thielemann 2005)

Die steigende Anzahl an übergewichtigen Kindern in Deutschland stellt somit auch aus kinderorthopädischer Sicht ein Problem dar (Mauz et al. 2019).

Es gilt, sekundäre Ursachen für eine Beinachsenfehlstellung differentialdiagnostisch abzugrenzen, bevor man über die weitere Behandlung nachdenkt.

Beinachsenfehlstellungen können unbehandelt schwerwiegende Folgen für die Biomechanik haben. Unter einer chronischen Fehlbelastung leiden die Gelenke und ein verfrühter Gelenkverschleiß ist möglich. (Stevens et al. 1999; Stevens 2007; Westhoff et al. 2007; Wiemann et al. 2009; Schünke et al. 2011)

Bei dem Versuch des wachsenden Skeletts eine ausgeprägte Primärdeformität zu kompensieren, entstehen oft weitere Deformitäten, die sich auf das gesamte Skelett auswirken können (Lauen et al. 2015). Dies kann das tägliche Leben der jungen Patienten beeinträchtigen (Ghanem et al. 2011).

Daher besteht die dringende Empfehlung ausgeprägte Beinachsenabweichungen, bei denen eine Spontankorrektur nicht mehr zu erwarten ist, bereits im präadoleszenten Alter operativ zu begradigen. (Stevens et al. 1999; Westhoff et al. 2007; Friend/Widmann 2008; Ballal et al. 2010; Ghanem et al. 2011)

Beim Erwachsenen ist zur Korrektur von Achsfehlern der unteren Extremität oft ein invasives Prozedere mittels Knochendurchtrennung und anschließender Osteosynthese notwendig. Bei Kindern und Jugendlichen kann das Wachstum der offenen Epiphysenfugen der langen Röhrenknochen der unteren Extremität durch operative Eingriffe beeinflusst werden. Durch Ausbohrung eines Teils der Fuge kann ein permanenter Wachstumsstopp herbeigeführt werden. Mittels spezieller Implantate ist auch eine temporäre Blockade des Wachstums möglich. Bei einer Beinachsenfehlstellung werden diese je nach Fehlstellung entweder medial oder lateral im Bereich der kniegelenksnahen Epiphysenfuge eingesetzt, um das Wachstum auf der entsprechenden Seite vorübergehend zu bremsen (Hemiepiphyseodese). Dadurch, dass die nicht behandelte Fugenseite in normalem Tempo weiterwächst, korrigiert sich im Verlauf der Behandlung die Fehlstellung. Hat sich die Beinachse zufriedenstellend begradigt, wird das eingebrachte Implantat entfernt und das Wachstum kann sich in physiologischer Form fortsetzen. (Vogt et al. 2014)

Dieser wenig invasive Eingriff scheint degenerativen Folgeschäden vorzubeugen und die Lebensqualität der Kinder verbessern zu können. (Stevens et al. 1999; Stevens 2007; Wiemann et al. 2009; Ghanem et al. 2011)

Hier zeigt sich welche wichtige Rolle der Präventionsaspekt in der Arbeit des Orthopäden spielt.



Aufgrund guter Erfahrungen über mehrere Jahrzehnte und der Entwicklung moderner Implantate ist die temporäre Hemiepiphyseodese bei Kindern und Jugendlichen mit therapiebedürftigen Achsfehlstellungen mittlerweile der Goldstandard (Vogt et al. 2014). Rechtzeitig und richtig eingesetzt, können damit in geeigneten Fällen spätere aufwendige Korrekturosteotomien mit langwieriger Nachbehandlung verlässlich verhindert werden (Stevens 2007; Wiemann et al. 2009).

Der Knochen ist postoperativ schnell belastungsfähig, daher können die Patienten schon kurz nach der Operation mobilisiert werden. Eine Ruhigstellung der behandelten Extremität mittels Gipses oder Schiene ist nicht notwendig (Lauen et al. 2015).

Vor dem wachstumlenkenden Eingriff ist eine sorgfältige präoperative Planung mit radiologischer und klinischer Untersuchung notwendig. Die Bestimmung des idealen Implantationszeitpunkts ist oft nicht einfach und erfordert eine hohe Expertise des behandelnden Arztes. Präzise Operationstechniken sowie regelmäßige Verlaufskontrollen sind obligat. Ebenfalls sollten auch postoperativ weiterhin Kontrolluntersuchungen durchgeführt werden, um den Therapieerfolg zu sichern. Die Auswahl des geeigneten Implantats ist immer eine strategische Entscheidung und setzt viel Erfahrung mit den Operationstechniken voraus. Der Chirurg kann mittlerweile zwischen Klammer-, Platten- und Schraubenimplantaten wählen. (Vogt et al. 2014)

## **1.2 Motivation und Ziele**

Laut Hurrelmann et al. (2010) nimmt heutzutage aufgrund der hohen Prävalenz chronischer Erkrankungen die Bedeutung der kurativen Medizin ab. Die Ausrichtung des ärztlichen Handelns auf vorbeugende Maßnahmen spielt eine immer größere Rolle. Die Präventivmedizin konzentriert sich auf die Erhaltung und Verbesserung des Gesundheitszustands der Bevölkerung und einzelner Personen. (Hurrelmann et al. 2010)

Ein Teil der Präventivmedizin ist die Primärprävention. Sie richtet sich vor allem an Personen ohne Krankheitssymptome und soll Erkrankungen verhindern bevor sie entstehen. (Bundesministerium für Gesundheit 2019)

Das Prinzip der Epiphyseodese repräsentiert diesen Präventionsaspekt. Durch diesen Eingriff können Jahrzehnte später auftretende orthopädische Folgeschäden und damit verbundene größere Operationen verhindert werden. (Stevens et al. 1999; Stevens 2007; Wiemann et al. 2009; Ghanem et al. 2011)

Das motivierte uns zur Durchführung der vorliegenden Arbeit. Sie beschäftigt sich mit den Ergebnissen der Hemiepiphyseodese der zwei großen Gruppen der Zweilochplatten- und Schrauben-Implantate zur Korrektur von Achsabweichungen der unteren Extremität und vergleicht sie in Bezug auf die Effektivität der Korrektur und die während der Behandlung aufgetretenen Komplikationen. Das Hauptaugenmerk soll dabei auf der Schraubenmethode liegen, da diese bisher in der einschlägigen Literatur wenig behandelt wurde.

### **1.3 Geometrie der unteren Extremität**

#### **1.3.1 Entwicklung des aufrechten Gangs und anatomische Anpassungsvorgänge**

Im Zuge der Evolution entwickelte sich vor circa vier bis fünf Millionen Jahren der aufrechte Gang (Aumüller et al. 2017). Dies bedingte zahlreiche Anpassungsprozesse des menschlichen Bewegungsapparats. Beim Menschenaffen, der sich oft mithilfe der oberen Extremität fortbewegte, verlief die Wirbelsäule in einer nach dorsal konvexen Rundung. Die Entwicklung des zweibeinigen Gangs führte zu einer Verschiebung des Körperschwerpunkts über die Füße. Der Verlauf der Wirbelsäule als zentrales Achsorgan des Körpers veränderte sich von einer einfach kyphotischen zu einer doppelten S-Form, wodurch der Schwerpunkt des Oberkörpers samt innerer Organe direkt über den Hüftgelenken zu liegen kam. Zudem änderte sich der Aufgabenbereich der Extremitäten. Die untere Extremität diente von nun an nicht mehr nur der Fortbewegung, auf ihr lastete das gesamte Gewicht der Rumpfmasse. Die obere Extremität hingegen wurde entlastet und konnte so zunehmend zum Tragen und zur Ausführung feinmotorischer Arbeiten eingesetzt werden. (Schünke et al. 2011; Aumüller et al. 2017)

Um diese Tragefunktion zu gewährleisten, waren starke Knochen und ein funktionierendes Zusammenspiel von Bändern, Bindegewebe, Muskeln und Gelenken notwendig (Aumüller et al. 2017).

### 1.3.2 Achsenverhältnisse der unteren Extremität

In der Statik der unteren Extremität unterscheidet man zwischen anatomischen und mechanischen Achsen. Die Vertikalachsen der Femur- und Tibiadiaphyse sind mit den anatomischen Achsen der jeweiligen Röhrenknochen gleichzusetzen (Frick et al. 1992). Die mechanische Achse des Femurs entspricht der Verbindung vom Femurkopfzentrum zur Mitte des Kniegelenks. Die anatomische und mechanische Femurachse bilden einen Winkel von  $7^\circ$  ( $\pm 2^\circ$ ). Die mechanische und anatomische Achse der Tibia verlaufen nahezu parallel, wobei die anatomische Achse wenige Millimeter medial der mechanischen liegt. Die mechanische Beinachse verbindet das Femurkopfzentrum und die Mitte des oberen Sprunggelenks. Nach Paley schneidet diese Linie bei normwertigen Achsverhältnissen das Kniegelenk nicht genau im Zentrum, sondern durchschnittlich 8 ( $\pm 7$ ) mm medial davon. Eine mechanische Achsabweichung (MAD, mechanical axis deviation) liegt vor, wenn der Schnittpunkt der mechanischen Beinachse außerhalb dieses Punktes liegt. Erstreckt sie sich weiter lateral oder medial davon, so spricht man entweder von einer Valgus- oder Varusfehlstellung. Der mediale proximale Tibiawinkel zwischen frontaler Ebene des Kniegelenks und Tibia (MPTA, medial proximal tibia angle) misst sowohl für die mechanische (mMPTA) als auch für die anatomische Achse (aMPTA) aufgrund der Parallelität beider Achsen  $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$ . Der laterale distale Winkel (LDFA, lateral distal femur angle) zwischen mechanischer Femurachse und Frontalebene des Kniegelenks (mLDFA) beträgt ebenfalls  $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$ , zwischen anatomischer Femurachse und dergleichen (aLDFA) jedoch nur  $80^\circ \pm 3^\circ$ . Die Verbindungslinie des höchsten Punktes des Trochanter major zur Mitte des Femurkopfs stellt die Gelenkstellung der Hüfte in der Frontalebene dar. Der Winkel zwischen dieser Linie und der Achse des Femurs ist der laterale proximale Femurwinkel (LPFA, lateral proximal femur angle). Der Normwert zwischen der mechanischen Femurachse und dieser Linie (mLPFA) beträgt  $90^\circ \pm 5^\circ$ . Zwischen der anatomischen Achse des Femurs und dieser Linie liegt der Winkel (aLPFA) physiologisch bei  $83^\circ \pm 5^\circ$ . Der Winkel zwischen Tibia und Sprunggelenklinie ist der laterale distale Tibiawinkel (LDTA, lateral distal tibia angle) und beträgt sowohl für die mechanische als auch für die anatomische Achse der Tibia  $89^\circ \pm 3^\circ$ . (Paley 2000; Abb. 1)

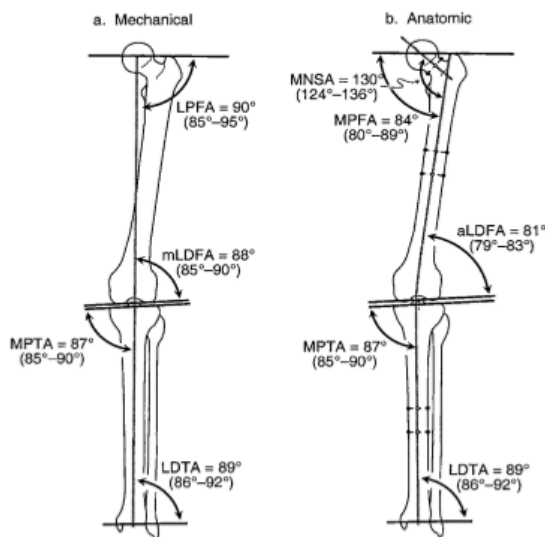


Abbildung 1: Darstellung der Achsen und Gelenkwinkel in der Frontalebene.  
a.: Mechanische Achsen und Gelenkwinkel mit den physiologischen Werten.  
b.: Anatomische Achsen und Gelenkwinkel mit den physiologischen Werten  
(Paley 2000)

### 1.3.3 Funktion und Biomechanik des Kniegelenks

Das Kniegelenk ist das größte Gelenk des Menschen und die Knochenverbindung des Körpers mit den längsten Hebelarmen. Daher wirken dort hohe axiale Druckmomente. (Aumüller et al. 2010)

Die beiden Gelenkflächen werden durch die knorpeligen Bereiche der paarigen Femur- und Tibiakondylen gebildet. Die Femurkondylen sind gebogen, wobei diese Biegung hinten stärker ist als vorne. Bei einer Beugung im Kniegelenk kommt es anfänglich zu einer Abrollbewegung der Femurkondylen auf dem um 3-7° nach hinten geneigten Tibiaplateau. (Frick et al. 1992)

Bei stärkerer Flexion spannen sich die Kreuzbänder zunehmend an und begrenzen diese Rollbewegung, sodass zusätzlich eine Gleitbewegung des Oberschenkels gegenüber dem Unterschenkel ausgeführt wird (Frick et al. 1992).

Zwischen den Gelenkkörpern befinden sich die beiden Menisken, zwei aus Faserknorpel bestehende halbmondförmige Scheiben. Sie liegen medial und lateral dem Tibiaplateau auf und sorgen bei der Roll-Gleit-Bewegung für eine gleichmäßige Verteilung der einwirkenden Kräfte über die Femurkondylen auf die Gelenkflächen der Tibia. (Frick et al. 1992)

Neben den artikulierenden knöchernen Strukturen und den Menisken gehört zum Kniegelenk ein starker Kapsel-Band-Apparat. Durch seine passiven Stützkräfte hat er eine Stabilisierungsfunktion und begrenzt das Bewegungsausmaß des Gelenks. Je nach Gelenkstellung ist das Kapsel-Band-System unterschiedlich stark gespannt. Die

Kreuzbänder verbinden die Gelenkflächen zentral und verhindern Verschiebewegungen der Femur- gegenüber der Tibiakondylen nach vorne und hinten sowie ein Abrutschen der Gelenkflächen bei Flexion. Die Seitenbänder begrenzen die Streckung im Kniegelenk und verhindern in Streckstellung die seitliche Aufklappbarkeit. Zusätzlich ist das Kniegelenk von einem kräftigen Muskelsystem umgeben, welches die aktive Führung des Gelenks gewährleistet. (Hunziker et al. 1990)

Das Kniegelenk ist ein kombiniertes Rad-Scharnier-Gelenk. Es besitzt drei rotatorische Freiheitsgrade, eingeteilt in Extension/Flexion, Innen-/Außenrotation, Abduktion/Adduktion und drei translatorische Freiheitsgrade, eingeteilt in anterior-posterior, medial-lateral, proximal-distal. Das Ausmaß der Rotations- und Translationsbewegungen ist abhängig vom Grad der Flexion. Das physiologische Bewegungsausmaß nach der Neutral-Null-Methode beträgt: Extension/Flexion 10°/0/145°, Innen-/Außenrotation in 20° Flexion 15°/0/35°. (Hunziker et al. 1990)

#### **1.3.4 Physiologische Entwicklung der Beinachse**

Die in Kapitel 1.3.2 genannten Winkelangaben beziehen sich auf den erwachsenen Menschen. Vom Säuglingsalter bis um das zehnte Lebensjahr durchläuft das kindliche Beinskelett im Wachstum sichtbare morphologische Veränderungen. Verantwortlich dafür ist die zunehmende Beanspruchung der unteren Extremität, wenn die Kinder mobiler werden und laufen lernen. Neugeborene kommen mit einer varischen Beinachse von circa 15° auf die Welt. Durch den Laufbeginn kommt es mit circa zwölf Monaten durch die veränderte Belastung zu einer zunehmenden Verlagerung der Traglinie der nach lateral. Das Gewicht des Körpers, welches fortan auf den Beinen lastet, führt zu einer valgischen Beinachse von bis zu 10-12° bei Erreichen des dritten bis vierten Lebensjahrs. Bis zum zehnten Lebensjahr pendeln sich die Winkelverhältnisse auf die bei abgeschlossener Skelettentwicklung physiologische Valgusstellung von 4-7° ein. (Salenius/Vankka 1975; Abb 2.; Westhoff et al. 2007)

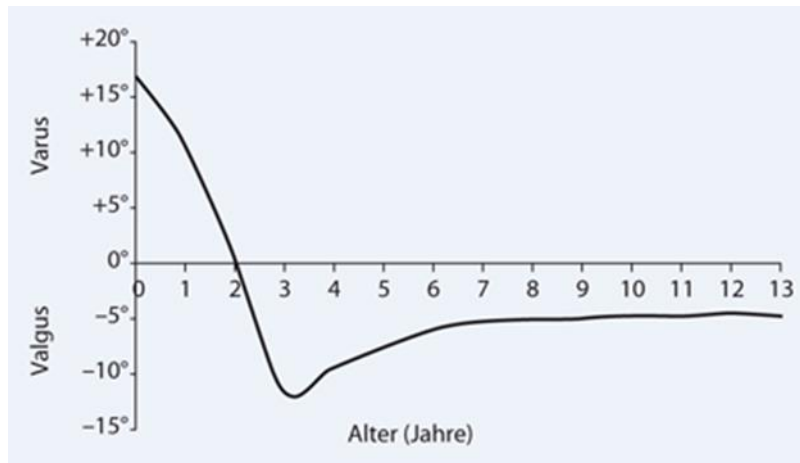


Abbildung 2: Physiologische Entwicklung der kniegelenksnahen frontalen Beinachsenverhältnisse nach Salenius/Vankka (1975) (Vogt et al. 2014)

#### 1.4 Konsequenzen von Achsfehlstellungen auf den Bewegungsapparat

Doch auch schon im Wachstumsalter können verschiedenste Ursachen zu pathologischen Beinachsenfehlstellungen führen (vgl. Kapitel 1.4). Eine einseitige Ausprägung kann eine Beinlängendifferenz bedingen und in der Folge zu einem Beckenschiefstand führen. Dieser begünstigt Wirbelsäulenproblematiken und Fehlhaltungen. (Hasler 2000)

Die Wirbelsäule verbindet die knöchernen Bewegungsstrukturen der oberen und unteren Extremität miteinander. Außerdem besitzt der Körper ein Faszien-system, das vom Scheitel bis zur Fußspitze miteinander kommuniziert und viele Schmerzrezeptoren enthält. Dadurch entsteht eine kinetische Kette, die erklärt, dass punktuelle Fehlbelastungen für Schmerzen und funktionelle Langzeitschäden im gesamten Bewegungsapparat verantwortlich sein können. (Müller-Wohlfahrt 2018)

Im Gegensatz zu den systemischen Auswirkungen von Beinachsenfehlstellungen, die die Funktion des gesamten Skelettapparats betreffen, kann eine langjährige Fehlbelastung auch zu lokalen morphologisch fassbaren Schäden beitragen. Eine pathologische Valgusfehlstellung im Kniegelenk führt zu einer erhöhten Belastung im lateralen Gelenkbereich, eine pathologische Varusfehlstellung erhöht umgekehrt die Beanspruchung des medialen Anteils. (Abb. 3)

Degenerative Prozesse am Knorpel- und Kapselgewebe des Gelenks werden beschleunigt. Daher sind diese Beinachsenfehlstellungen präarthrotische Deformitäten. (Stevens et al. 1999; Stevens 2007; Wiemann et al. 2009)

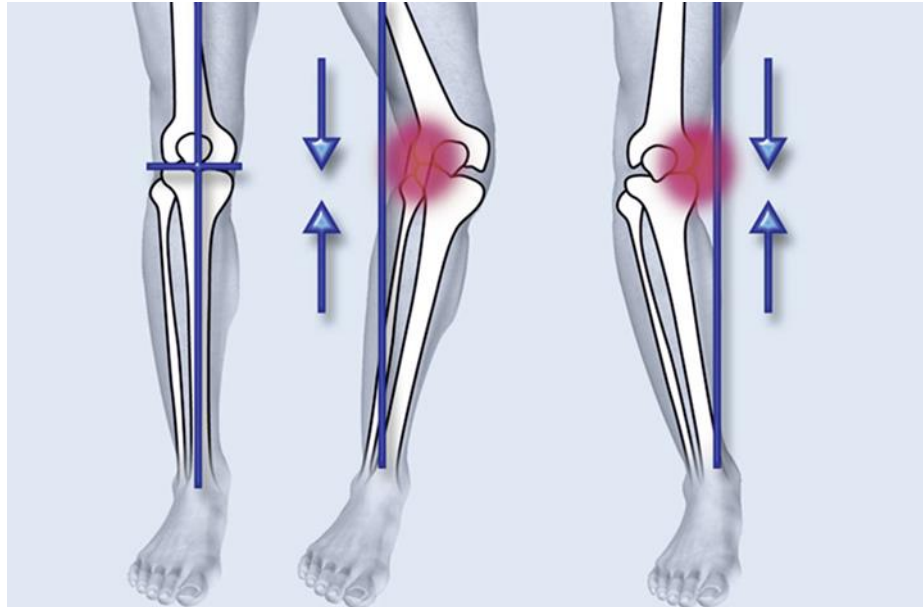


Abbildung 3: Einseitig vermehrte Belastung der Knorpelschicht des Kniegelenks durch pathologische Valgus- (Mitte) und Varusfehlstellungen (rechts) (MedCenter Bayreuth 2020)

Innerhalb der sekundären Fehlstellungen nimmt die Valgusdeformität den höchsten Anteil ein (Gercek et al. 2017). Ein Genu valgum bringt scheinbar jedoch ein geringeres Arthrosrisiko mit sich als ein Genu varum (Hefti 2000).

Der Prozess der Arthrose des Kniegelenks kann klinisch in verschiedene Stadien eingeteilt werden. Die degenerativen Veränderungen entwickeln sich oft schleichend über Jahre hinweg, ohne dass die Patienten Symptome bemerken (latente Arthrose). Mit Zunahme der Verschleißerscheinungen entsteht vermehrter Knorpelabrieb, der zu einer Reizung und Entzündungsreaktion der Gelenkkapsel und der Gelenkschleimhaut führt (aktivierte Arthrose) (Scanzello/Goldring 2012). (Schünke et al. 2011)

In dieser aktiven Phase der Arthrose sezerniert die Synovialmembran entzündungsfördernde Botenstoffe, wie Tumornekrosefaktor (TNF)-alpha und Interleukin (IL)-1 in den Gelenkspalt. Diese beschädigen die Gelenkoberfläche zusätzlich und tragen zur Entstehung von Schmerzen bei, die zunächst vor allem bei Belastung auftreten. Bei Fortschreiten des Krankheitsprozesses entstehen tiefere Defekte im Knorpel, in die Synovialflüssigkeit eindringt und auch dort eine entzündliche Reaktion auslösen kann. (Hügler/Valderrabano 2011)

Im weit fortgeschrittenen Stadium äußert sich die Arthrose durch anhaltende Schmerzen und eine deutlich verminderte Belastbarkeit bis hin zur Gelenkversteifung. Degenerativ bedingte knöcherne Anbauten (Osteophyten) führen zu einer veränderten Form der

Gelenkflächen und zur Instabilität im Gelenk. Reaktiv können sich starke Kontrakturen der Muskulatur ausbilden. (Schünke et al. 2011)

Mikroskopisch zeigt sich im Anfangsstadium die normalerweise glatte Gelenkoberfläche aufgefasert. Radiologisch ist eine beginnende Verdickung des subchondralen Knochens sichtbar, was die Belastung abfedern soll (Grad 1 nach Kellgren-Lawrence). Mit der Zeit entstehen größere Risse in der Oberfläche und es geht immer mehr Knorpelgewebe verloren. Durch den progressiven Knorpelabbau verschmälert sich der Gelenkspalt. Kompensatorisch entstehen an den Gelenkrändern Osteophyten zur Vergrößerung der lasttragenden Oberfläche (Grad 2 nach Kellgren-Lawrence). Im weiteren Verlauf nimmt die Osteophytenbildung immer weiter zu und durch den Knorpelverlust kommt es zu ausgeprägten Destruktionen der Gelenkoberfläche (Grad 3 nach Kellgren-Lawrence). Im Endstadium verschwindet der Gelenkknorpel vollständig und die freien Knochenenden liegen direkt aufeinander. Die starke Belastung führt zur Zystenbildung im subchondralen Knochen und zum Untergang von Knochengewebe (Grad 4 nach Kellgren-Lawrence). (Kellgren/Lawrence 1957; Abb. 4; Schünke et al. 2011)



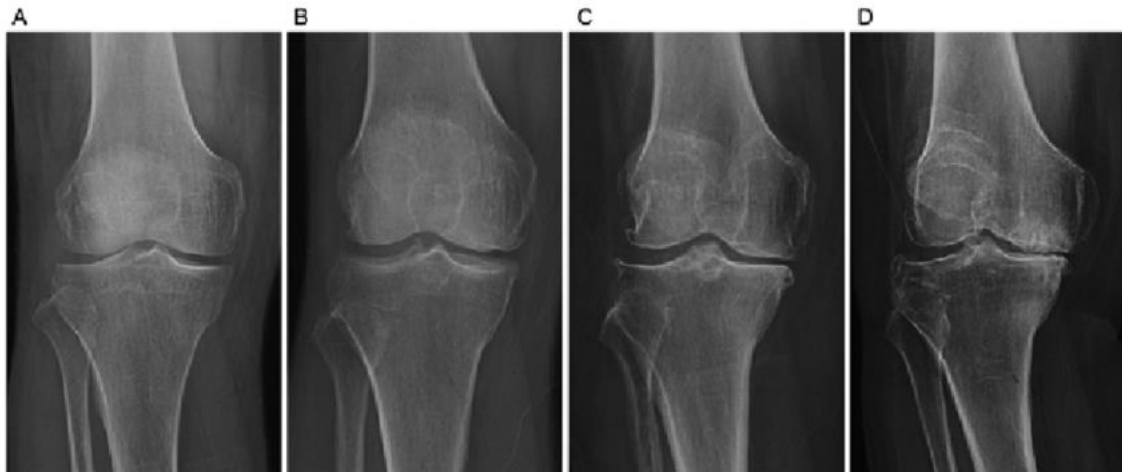


Abbildung 4: Radiologische Stadien der Arthrose Kellgren-Lawrence. (Weixiong et al. 2017)  
 (A) Grad 1: Mögliche Osteophytenbildung, fragliche Gelenkspaltverschmälerung.  
 (B) Grad 2: Beginnende Osteophytenbildung, mögliche Gelenkspaltverschmälerung.  
 (C) Grad 3: Ausgeprägte Osteophytenbildung, beginnende Gelenkspaltverschmälerung, angedeutete Unregelmäßigkeiten der Gelenkoberfläche.  
 (D) Grad 4: Osteophyten, ausgeprägte Gelenkspaltverschmälerung, deutliche Unregelmäßigkeiten der Gelenkoberfläche bis zur Destruktion und Nekrose.

## 1.5 Gründe für pathologische Achsfehlstellungen

Die Ursachen für Beinachsenfehlstellungen sind zahlreich und vielfältig. Trotz dieser vielen nachgewiesenen Ursachen kann in den meisten Fällen kein eindeutiger Grund festgestellt werden kann, der für die Deformität verantwortlich ist. Diese Fehlstellungen bezeichnet man als idiopathisch.

### 1.5.1 Traumata

Bei Kindern können Knochenbrüche ein Grund für sekundäre Fehlstellungen und Wachstumsstörungen des Skeletts sein. Direkt posttraumatisch unterscheidet man zwischen Achs- und Drehfehlstellungen, einer Verkürzung der Extremität sowie einer Beteiligung der Wachstumsfuge (Gercek et al. 2017).

Im Allgemeinen kommt der kindliche Körper mit Knochenbrüchen gut zurecht. Die langen Röhrenknochen besitzen bei Frakturen in diaphysärer Lokalisation im Vergleich zum Erwachsenen ein nennenswertes Korrekturvermögen. Die spontane Korrekturfähigkeit des unreifen Skeletts ist jedoch abhängig von der Art des Knochens, vom Alter und der Art beziehungsweise Lokalisation der Fehlstellung. (Lauen et al. 2015)

Die Korrekturgrenzen von frontalen und sagittalen Achsabweichungen sind größer als die von rotatorischen Fehlstellungen. Mit dem achten Lebensjahr nimmt das Korrekturpotenzial ab. (Heinrich/Mooney 2006)

Spontankorrekturen einer Achsfehlstellung nach einer Schaftfraktur des Unterarms oder des Oberschenkels eines Kindes sind eher zu erwarten als bei Frakturen des Unterschenkels (Bohn/Durbin 1991; Gercek et al. 2017).

Ein Sonderfall ist die zusätzliche Verletzung der Wachstumsfuge. Dadurch kann die physiologische Regenerationsfähigkeit des Knochens beeinträchtigt werden. Außerdem kann es nach erfolgter Ausheilung des Bruchs im weiteren Verlauf zu Wachstumsstörungen mit konsekutiven Fehlstellungen kommen. (Täger et al. 2007)

Es gilt zu beachten, dass sich die verschiedenen Epiphysenfugen in ihrer Wachstumspotenz unterscheiden (Abb. 5). So trägt die proximale Fuge der Tibia circa 60% und die distale Fuge circa 40% zum Längenwachstum des Röhrenknochens bei. Zudem stellt sich das Wachstum der distalen Fuge deutlich früher ein als das der proximalen (Gercek et al 2017). Beim Femur entfallen 70% des Wachstumspotenzials auf die distale und 30% auf die proximale Epiphysenfuge. Das Wachstumspotenzial der Epiphysenfugen des Femurs gemessen am gesamten Längenwachstum der unteren Extremität beträgt 55% und das der Tibia 45%. Die kniegelenksnahen Wachstumsfugen tragen zum Gesamtwachstum des Beins circa 65% bei (Hasler 2000).

Auf diese Tatsache muss bei eventuellen posttraumatischen Wachstumsstörungen geachtet werden.

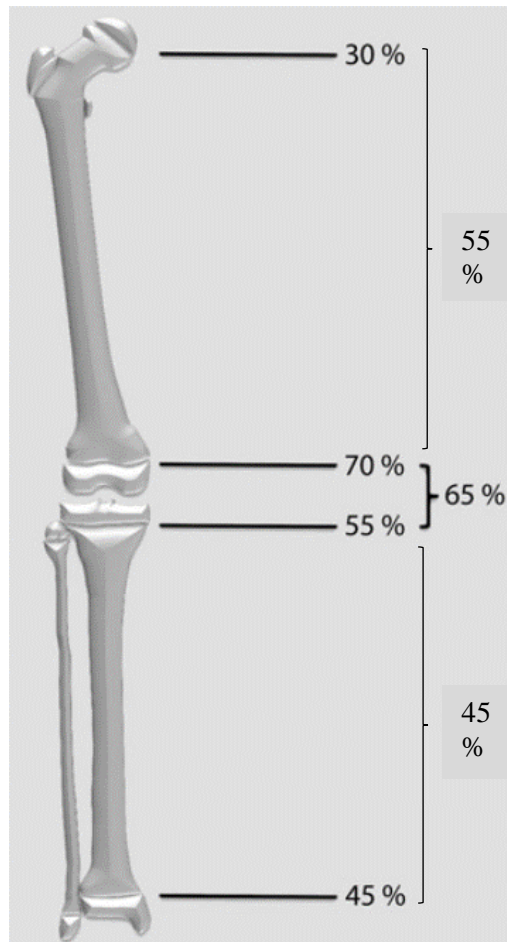


Abbildung 5: Prozentuale Verteilung des Wachstumspotenzials der Epiphysenfugen des Femurs und der Tibia gemessen am gesamten Längenwachstum der unteren Extremität nach Hasler (2000) (Vogt et al. 2014)

Aus den genannten Gründen ist eine sorgfältige radiologische Frakturdiagnostik mit dem Augenmerk auf eine etwaige Fugenbeteiligung sehr wichtig (Täger et al. 2009).

Die Diagnostik und Therapie von kindlichen Frakturen ist aufgrund dieser Besonderheiten keine leichte Aufgabe. Bei der Wahl des therapeutischen Vorgehens stehen verschiedene konservative als auch operative Verfahren zur Osteosynthese zur Verfügung. Neben dem Reifezustand des Skeletts mit den altersabhängigen Grenzen des Korrekturpotenzials sollte das Ausmaß der Fehlstellung, die funktionelle Einschränkung als auch das noch zu erwartende Wachstum in die Therapieentscheidung mit einbezogen werden. Als Therapieziel wird eine achsengerechte Frakturheilung mit Wiedererlangen des vollständigen Bewegungsausmaßes in den angrenzenden Gelenken angestrebt. (Gercek et al. 2017)

Auch nach erfolgter Frakturheilung sind weitere klinische Verlaufskontrollen wichtig, um zu kontrollieren, ob im Laufe des weiteren Wachstums Unregelmäßigkeiten auftreten (Täger et al. 2007).

### **1.5.2 Neoplasien**

Erworbene epiphysennahe benigne oder maligne Knochentumoren können neben der Beeinträchtigung der Wachstumsfuge durch die Raumforderung auch durch pathologische Frakturen die Epiphyse verletzen. (Lauen et al. 2015)

Die primären Knochentumoren sind selten, die gutartigen sind häufiger als die bösartigen. Sie entstehen meist im Bereich der Metaphysen. Der häufigste gutartige primäre Knochentumor ist das knorpelige Osteochondrom. Die häufigsten bösartigen primären Knochentumoren im Kindes- und Jugendalter sind das Osteosarkom und das Ewing-Sarkom. (Thielemann 2019)

### **1.5.3 Osteochondrosen im Kindes- und Jugendalter**

Osteochondrosen im Kindes- und Jugendalter sind ein Komplex von Erkrankungen, bei denen es zu einer Störung der chondralen Ossifikation, der Umwandlung von Knorpel zu Knochen im Bereich der Wachstumsfugen, vor allem von Röhrenknochen kommt. Dieser Prozess ist Teil des physiologischen Skelettwachstums. Ist dieser Vorgang beeinträchtigt, kann es zu Knochennekrosen und Wachstumsstörungen kommen. (Schneider/Raith 2006)

Ein Beispiel hierfür ist der Morbus Blount. Bei diesem Krankheitsbild kommt es zu einer Störung und Minderung des Längenwachstums häufig im Bereich der proximalen, medialen Tibiaepiphyse, selten auch im Bereich der distalen, medialen Femurepiphyse (Abb. 6). Man unterscheidet eine infantile, juvenile und adoleszente Form. Daraus können Wachstumsstörungen resultieren, die zur Verbiegung der Knochen und zur Ausbildung einer erheblichen Varusfehlstellung führen (Tibia vara). (Greene 1993)

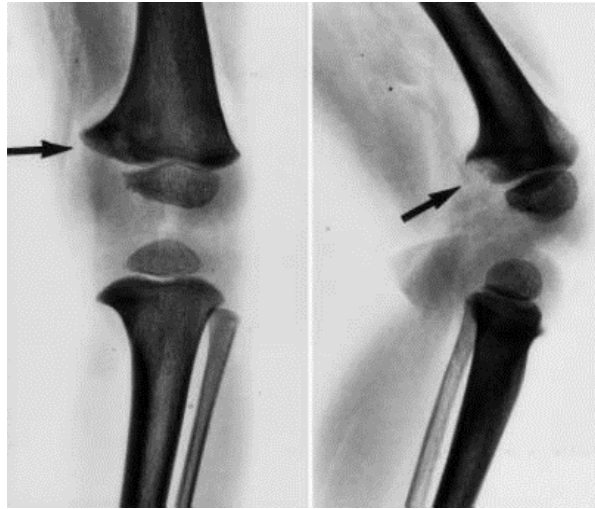


Abbildung 6: Röntgenbilder eines dreijährigen Jungen a.-p. (links) und seitlich (rechts) zeigen eine Knochennekrose hier im Bereich der medialen Femurkondyle (Morbus Blount) (Hefti 2000)

#### 1.5.4 Lähmungen

Auch die infantile Cerebralparese (I.C.P.) kann Deformitäten verursachen. Die I.C.P. ist eine perinatale Schädigung des unreifen Gehirns mit unterschiedlich stark ausgeprägten orthopädischen Problemen. Oft leiden die Kinder unter einer krankhaften Erhöhung des Muskeltonus, der zu spastischen Paresen und Fehlstellungen führen kann. (Döderlein 2015)

#### 1.5.5 Kongenitale Systemerkrankungen

Es gibt auch einige seltene Grunderkrankungen, die bereits von Geburt an bestehen und zu Deformitäten der Knochen führen können.

Hier sind beispielsweise bestimmte angeborene, teilweise tumoröse Fehlbildungen des Skeletts zu nennen, die bereits kongenital zu Fehlstellungen führen können. Diese sind meist benigner Natur. Dazu gehören die fibröse Dysplasie, die Enchondromatose sowie die multiple kartilaginäre Exostosenkrankheit. (Westhoff et al. 2007; Lauen et al. 2015)

Zu einer fehlerhaften Skelettentwicklung und zu Wachstumsstörungen kann es auch kommen, wenn der Knochen- und Knorpelstoffwechsel gestört ist. Knochengewebe ist eine Form des Bindegewebes und besteht aus Knochenzellen (Osteozyten) und Extrazellulärsubstanz (Knochenmatrix). Bezogen auf ihr Trockengewicht setzt sich die Knochengrundsubstanz aus etwa 65% anorganischen Mineralstoffen, überwiegend Calciumsalzen, und 35% organischer Substanz, vor allem Kollagenfasern vom Typ I und

Wasser, zusammen. Der Aufbau von Knorpelgewebe ist ähnlich. Es setzt sich ebenfalls aus zwei Hauptbestandteilen zusammen, den spezialisierten Knorpelzellen (Chondrozyten) und einer extrazellulären Matrix. Diese hat einen Wasseranteil von bis zu 70% und besteht je nach Knorpelart aus unterschiedlichen kollagenen Fasertypen. (Aumüller et al. 2010)

Das Hormon Vitamin D reguliert den Calcium-Phosphat-Haushalt. Es fördert die Calcium- und Phosphataufnahme aus Darm und Niere und sorgt dafür, dass diese Mineralien in die Knochenmatrix eingebaut werden. Dadurch erhält er seine Härte und Belastbarkeit. (Herold 2019)

Bei einer ungenügenden Aufnahme von Calcium, einer verminderten Vitamin-D-Zufuhr oder einer gestörten Vitamin-D-Synthese kann es zu einer Mineralisationsstörung des Knochens (Calciummangel-Rachitis) kommen. Auch ein Phosphatmangel kann zu einer Störung des Knochenaufbaus führen. Bei der hypophosphatämischen Rachitis (Phosphatmangel-Rachitis) wird aufgrund eines Gendefekts mit dem Harn zu viel Phosphat ausgeschieden, welches eigentlich über die proximalen Nierentubuli rückresorbiert werden müsste. Da sich die Symptome durch eine Vitamin-D-Gabe im Gegensatz zur Calciummangel-Rachitis nicht bessern, spricht man auch von der Vitamin-D-resistenten Rachitis (Abb. 7). Beide Rachitis-Formen können erworben oder angeboren sein. (Schnabel/Haffner 2005)

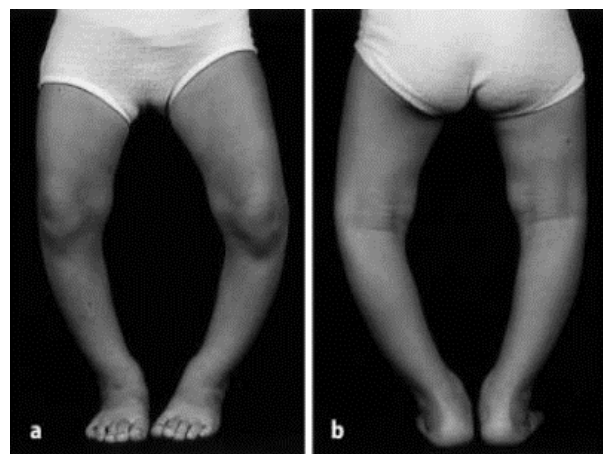


Abbildung 7: Fünfjähriges Mädchen mit Vitamin-D resistenter Rachitis und ausgeprägter Varusfehlstellung beidseits. a = von vorne, b = von hinten (Hefti 2000)

Die Cystinose ist eine hereditäre Erkrankung, bei der durch eine Störung der Transportmechanismen Cystin in den Lysosomen gespeichert wird und nicht mehr aus der Zelle befördert werden kann. Dieses lagert sich im Gewebe und in verschiedenen Organen, unter anderem in den Nieren ab. Dort führt es zu einer Beeinträchtigung der Wiederaufnahme von Aminosäuren, Ionen und anderer wichtiger körpereigener Stoffe. Durch die vermehrte Ausscheidung von Phosphat kann so das Bild einer hypophosphatämischen Rachitis imponieren. Bei Beteiligung der Nieren spricht man vom renalen Fanconi-Syndrom. (Pape et al. 2017)

Die Osteogenesis imperfecta ist charakterisiert durch eine Störung der Biosynthese von Kollagen, welches Hauptbestandteil der organischen Knochensubstanz ist. Die Patienten leiden unter einer deutlich gesteigerten Brüchigkeit der Knochen. (Niethard/Pfeil 2017)

Kollagen ist nicht nur Bestandteil der Knochenstruktur, sondern auch des Knorpels. Bei der kongenitalen spondyloepiphysären Dysplasie kommt es zu einem Defekt in der Synthese des Knorpelkollagens. (Niethard/Pfeil 2017)

Bei der Achondroplasie sind durch einen Gendefekt die Vermehrung und Reifung der Chondrozyten gestört. Die Wachstumszone der Epiphysenfuge verknöchert zu früh. Dadurch ist das Längenwachstum eingeschränkt. Es kommt zu einem disproportionierten Kleinwuchs mit verkürzten, verformten Extremitäten bei normaler Rumpflänge. Außerdem treten knöcherne Veränderungen im Kopf- und Gesichtsbereich auf. Bei der Pseudoachondroplasie fehlen diese kraniofazialen Auffälligkeiten. (Niethard/Pfeil 2017)

Außerdem gibt es noch Skelettdeformitäten, die Teil eines differenzierten Symptomkomplexes sind und im Rahmen verschiedener genetischer Syndrome auftreten können.

Das Marfan-Syndrom führt genetisch bedingt zu einer verminderten Produktion wichtiger Proteine, die Bestandteil des Bindegewebes sind. Es kann zu einer gesteigerten Laxizität der Bänder und Sehnen und zu einem gestörten Knochenaufbau kommen. (Niethard/Pfeil 2017)

Beim Down-Syndrom treten neben der geistigen Behinderung auch körperliche Fehlbildungen wie unter anderem eine ausgeprägte Valgusstellung der Beine auf. (Merrick et al. 2000)

Das Fragile X-Syndrom ist ebenfalls ein polysymptomatischer Gendefekt, welches neben kognitiven Defiziten auch mit skelettalen Missbildungen einhergeht. (Davids et al. 1990)



## **2 Die Geschichte der Wachstumslenkung – Entwicklung der operativen Therapie von Beinachsenfehlstellungen**

### **2.1 Permanente Verfahren zur definitiven Wachstumsblockade**

#### **2.1.1 Offene Methode**

Die Geschichte der chirurgischen Eingriffe an offenen Wachstumsfugen geht zurück bis in die 30-er Jahre des 20. Jahrhunderts. Dallas B. Phemister beschrieb 1933 als Erster das Konzept des operativen Verschlusses der Wachstumsfuge zum Ausgleich von Beinlängendifferenzen und gilt daher als Begründer der permanenten Epiphyseodese. Er entfernte hierbei im Bereich des Kniegelenks des längeren Beins ein rechteckiges Knochenfragment und setzte es, um 180° gedreht, wieder ein. Das Knochenstück bestand aus einem Drittel Epiphyse und zwei Drittel Metaphyse. Diese Prozedur führte er medial und lateral an der zu behandelnden Wachstumsfuge durch. Die gedreht eingeheilten Fragmente führten zur Ausbildung von Knochenbrücken und damit zu einem kompletten Verschluss der Fuge. Die Folge war ein permanenter Wachstumsstopp. (Phemister 1933; Hasler 2000; Abb. 8; Raab et al. 2001)

Bei Anwendung dieses Verfahrens wurde in der Literatur teilweise von Wundheilungsstörungen, einer überschießenden Narbenbildung und auftretenden oberflächlichen Wundinfektionen berichtet. Zudem kam es bei einigen Patienten zu Bewegungseinschränkungen im Kniegelenk und einer Bildung von störenden Knochenauswüchsen im Bereich des versetzten Knochenstücks. Es war häufig eine physiotherapeutische Behandlung erforderlich, um die Beweglichkeit wieder ausreichend herzustellen, die teilweise auch durch fortdauernde Schmerzzustände eingeschränkt war. (Liotta et al. 1992; Hasler 2000)

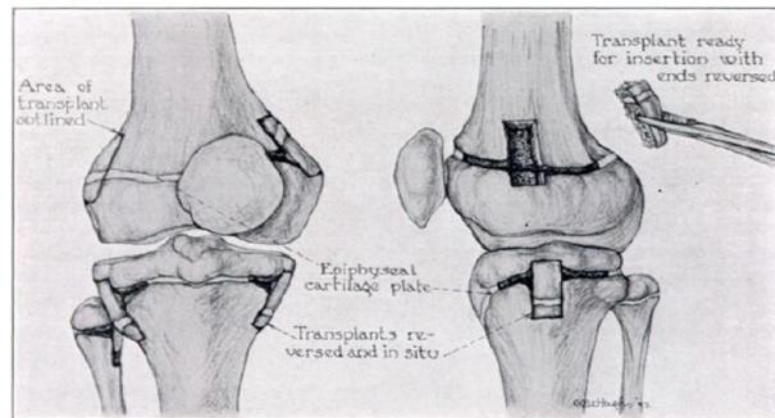


Abbildung 8: Offenes Verfahren zur permanenten Wachstumsblockade nach Phemister – Operationsskizze aus der Original-Publikation in JBJS Am (Phemister 1933)

### 2.1.2 Perkutane Methoden

Durch die Entwicklung einer leistungsstarken Bildgebung konnten ab den 1980er-Jahren minimalinvasive Techniken zur permanenten Okklusion der Wachstumsfuge angewandt werden (Hasler 2000). Dazu gehörte die Methode von Bowen und Johnson (1984). Sie beschrieben die Ausschabung des medialen und lateralen Fugenbereichs über einen perkutanen Zugang. Der zentrale Teil sollte dabei geschont werden. (Bowen/Johnson 1984)

Canale und Christian (1990) sowie Gabriel et al. (1994) schlugen zusätzlich die Verwendung eines kanülierten Bohrers vor. (Canale/Christian 1990; Gabriel et al. 1994)

Die Operationszeit verkürzte sich durch die neuen Techniken deutlich. Durch Belassen des zentralen Fugenanteils wurde selbst bei frühzeitiger Vollbelastung nur selten von Frakturen berichtet (Hasler 2000). Postoperative Komplikationen wie Wundheilungsstörungen, Schmerzen und Bewegungseinschränkungen, die beim Einsatz des offenen Verfahrens nach Phemister noch eine nennenswerte Rolle spielten, konnten durch die perkutanen Techniken reduziert werden. Dadurch konnte auch die stationäre Behandlungsdauer verkürzt werden. (Canale/Christian 1990; Liotta et al. 1992; Gabriel et al. 1994; Hasler 2000)

Die permanenten Methoden hatten das Ziel, durch die Fugenverletzung einen dauerhaften Wachstumsstillstand zu erzeugen. Fehlkalkulationen bei der Wahl des richtigen Zeitpunkts für die Operation konnten zu Komplikationen wie Über- oder Unterkorrektur bei verfrühtem beziehungsweise verspätetem Fugenarrest führen. Zudem wurde über Fälle mit inkompletem Verschluss der Wachstumsfuge und in der Folge aufgetretenen Beinachsenfehlstellungen berichtet. (Hasler 2000)

Zur Korrektur mussten teilweise zusätzliche Operationen wie Osteotomien zur Begradigung der Achse oder Verlängerung der Extremität durchgeführt werden. (Stevens et al. 1999; Hasler 2000; Ferrick et al. 2004; Stevens 2006; Campens et al. 2010)

## 2.2 Temporäre Verfahren zur vorübergehenden Wachstumsblockade mittels verschiedener Implantate

1945 beschrieb Sylvan L. Haas seine Technik der Fugenblockade mit einer Drahtschlinge. Bei einem Tierversuch an Hunden beobachtete er zufällig, dass eine geschlossene Drahtschlinge um die Wachstumsfuge das Längenwachstum stoppte. Sobald sich die Drahtschlinge öffnete, setzte das Wachstum wieder ein. Damit konnte Haas zeigen, dass eine Wachstumsbremsung auch ohne direkte Fugenverletzung durch spezielle Hilfsmittel herbeigeführt und nach Entfernung der blockierenden Instrumente wieder aufgehoben werden konnte. (Haas 1945; Abb. 9)



Abbildung 9: Temporäre Wachstumsblockade mittels Drahtschlinge nach Haas - Postoperative Röntgenbilder aus der Original-Publikation in JBJS Am (Haas 1945)

### 2.2.1 Klammer-Implantate

1949 beschrieb Blount dann die Ergebnisse des ersten operativen Versuchs der vorübergehenden Wachstumsbremsung am Menschen. Er implantierte zwei bis drei rostfreie Stahlklammern um die Wachstumsfuge und behinderte so das Wachstum (Blount/Clarke 1949). Durch die Form der Implantate sollte die Wachstumsfuge und deren versorgende Blutgefäße bei Ein- und Ausbau nicht beschädigt werden. Dies begünstigte die Reversibilität der Blockade nach Entfernung der Klammern und sollte dazu beitragen das Risiko von Wachstumsstörungen nach der Behandlung zu vermindern. (Mielke/Stevens 1996; Stevens et al. 1999)

Damit gilt Blount als Begründer der temporären Epiphyseodese. In der Literatur gibt es zahlreiche Studien, die von guten Ergebnissen mit diesem Verfahren zum Ausgleich von Beinlängenunterschieden als auch durch einen hemiepiphysären Fugenarrest zur Korrektur von Beinachsenabweichungen berichteten. (Blount/Clarke 1949; Mielke/Stevens 1996; Stevens et al. 1999; Raab et al. 2001)

Im Jahr 1971 veränderte Blount wegen häufiger Materialbrüche das Klammer-Design. Als neues Material verwendete er Vitallium und verstärkte die Klammern im Bereich der Schultern. (Blount 1971; Abb. 10)

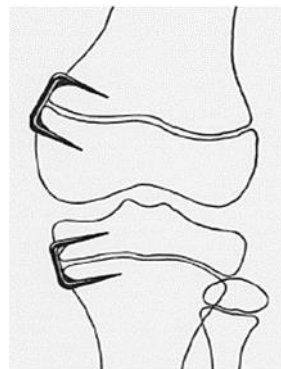


Abbildung 10: Schemazeichnung des Blount-Staples aus der Original-Publikation von Blount 1971 in CORR (Blount 1971)

Dennoch gab es in der Literatur weiterhin Berichte über Materialversagen im Sinne von Auswandern oder Brüchen der Klammern vor allem bei jüngeren Kindern. (Mielke/Stevens 1996; Raab et al. 2001; Stevens 2006; Westhoff et al. 2007; Gorman et al. 2009)

Auch wurde ein etwas höheres perioperatives Komplikationspotenzial beschrieben als bei den perkutanen Verfahren. Zum einen war zum Einsetzen der Klammern ein größerer Zugang notwendig, zum anderen musste bei diesem Verfahren eine zweite Operation zur Metallentfernung durchgeführt werden. (Stevens et al. 1999; Hasler 2000; Raab et al. 2001; Gorman et al. 2009; Ghanem et al. 2011; Vogt et al. 2013)

Dafür brachte die Reversibilität des temporären Verfahrens viele Vorteile mit sich. Sie verschaffte den Ärzten mehr Flexibilität bei der Berechnung des Interventionszeitpunktes und ermöglichte so den Einsatz der Wachstumslenkung bereits bei jüngeren Kindern (Stevens et al. 1999). Zeitliche Fehlkalkulationen hatten keine so gravierenden Konsequenzen wie bei der permanenten Methode. Jedoch war die Aktivität der Fuge nach Entfernung der Implantate schwer vorhersagbar (Hasler 2000). Es gab Berichte über Rezidive der ursprünglich korrigierten Fehlstellung (Raab et al. 2001; Ghanem et al. 2011). Aufgrund dieses Rebound-Phänomens wurde vor allem bei sekundären Beinachsenfehlstellungen eine leichte Überkorrektur der Fehlstellung von 3-5°, sowie Kontrollen der Beinachse in festen Abständen nach Metallentfernung empfohlen (Raab et al. 2001; Westhoff et al. 2007).

### 2.2.2 Platten-Implantate

Die Implantate wurden über die Jahre stetig weiterentwickelt. 2007 brachte Stevens eine achtförmige Zweilochplatte aus Titan zur Therapie von Beinachsenfehlstellungen und Beinlängendifferenzen auf den Markt (Orthofix GmbH, Lewisville, TX) (Abb. 11). Diese wurde mittels kanülierter Schrauben im Knochen verankert. (Stevens 2007; Vogt et al. 2014)

Das Zusammenspiel aus Schrauben und Platte sollte zu einer Verlagerung der Korrekturkraft außerhalb der Epiphysenfuge führen. Es sollte die starre Kompression der Wachstumsfuge verhindern. (Stevens 2007; Ghanem et al. 2011)



Abbildung 11: Eight-Plate Guided Growth System der Firma Orthofix (AKVA Surgical 2020)

Die Verankerung der Platte durch Schrauben gab dem Implantat einen festen Halt und verringerte das Risiko aus seiner ursprünglichen Position herauszuwachsen. Das ermöglichte den Einsatz bereits bei sehr jungen Kindern mit unreifen Knochen. (Stevens 2007; Burghardt et al. 2008)

Aufgrund ihrer einfachen Handhabung bei Im- und Explantation und der geringeren implantatassoziierten Probleme haben die Zweilochplatten die steifen Blount-Klammern im klinischen Alltag weitgehend abgelöst. (Stevens 2007; Burghardt et al. 2008; Schroerlucke et al. 2009; Wiemann et al. 2009; Ballal et al. 2010; Jelinek et al. 2012)

Doch insbesondere bei sekundären Fehlstellungen wie dem Morbus Blount und bei Kindern mit Übergewicht stoßen auch die Eight-Plate-Implantate in der Behandlung von

Beinachsenfehlstellungen an ihre Grenzen. (Schroerlucke et al. 2009; Wiemann et al. 2009; Ballal et al. 2010; Burghardt et al. 2010; Vogt et al. 2013)

Das bereits bei den Blount-Klammern erwähnte Rebound-Phänomen konnte auch bei den Zweilochplatten beobachtet werden. (Stevens 2007; Ballal et al. 2010)

Beim Einsatz der Eight-Plates zur Korrektur von Beinlängendifferenzen wurde von vereinzeltm Auftreten von sekundären Beinachsenfehlstellungen in der Sagittalebene berichtet, wie unter anderem einem Genu recurvatum. Das zeigte wie wichtig eine akkurate Platzierung der Klammern auch in der lateralen Ebene war. (Vogt et al. 2014)

Schon im Rahmen der Therapie von Beinlängenunterschieden mit den Blount-Klammern hatten einige Arbeitsgruppen von Fällen mit iatrogenen Achsabweichungen berichtet. (Raab et al. 2001; Gorman et al. 2009; Vogt et al. 2013)

In den letzten Jahren wurden zudem Arbeiten veröffentlicht, in denen das sogenannte Vulkan-Phänomen thematisiert wurde. Dabei kam es bei der Therapie von Beinlängendifferenzen mit den Eight-Plates zur Verformung der femoralen und vor allem der tibialen Gelenkflächen. Die genaue Auswirkung dieses Phänomens auf die Biomechanik des Kniegelenks ist noch unbekannt. (Vogt et al. 2014; Sinha et al. 2018)

### **2.2.3 Schrauben-Implantate**

Eine gänzlich andere Methode wurde von Métaizeau im Jahr 1998 beschrieben, die „Percutaneous epiphysiodesis using transphyseal screws“, kurz PETS. Er nutzte kanülierte Schrauben, die er gekreuzt oder ungekreuzt durch die Wachstumsfuge einbrachte, um das Längenwachstum aufzuhalten. Bei Erreichen des Therapieziels wurden die Schrauben wieder entfernt. (Metaizeau et al. 1998; Abb. 12; De Brauwer/Moens 2008; Campens et al. 2010)

Obwohl Khoury et al. (2007) die Fortsetzung des Wachstums nach Entfernung der Schrauben gezeigt haben, ist nicht wissenschaftlich bewiesen, ob diese Methode verlässlich reversibel ist, da es zu einer gezielten Verletzung der Wachstumsfuge kommt, deren Auswirkungen nach der Metallentfernung schwer abschätzbar sind (Nouth/Kuo 2004).

Wie zu Beginn der Arbeit erwähnt, ist die Datenlage zu diesem Thema spärlich. In den wenigen vorhandenen Studien wird jedoch von einer erfolgreichen Anwendung dieser

Methode sowohl bei Beinlängendifferenzen als auch bei Beinachsenfehlstellungen gesprochen.

Unter den bereits beschriebenen temporären Verfahren scheint die PETS als minimalinvasive Methode ein sehr günstiges Nebenwirkungsprofil zu haben. Sie verursacht nur kleine Narben und erzielt damit gute kosmetische Ergebnisse. (Metaizeau et al. 1998; Stevens 2006; Khoury et al. 2007; De Brauwer/Moens 2008; Ghanem et al. 2011)

Murphy et al. berichteten in einer aktuellen Studie über Erfolge in der Therapie von varischen Beinachsenfehlstellungen im Bereich der Tibia mit PETS auch bei Patienten mit Übergewicht, nachdem es bei der Anwendung anderer Implantattypen in diesem Patientenkollektiv zu Materialversagen kam (Murphy et al. 2020).

Jedoch konnte auch bei dieser Technik teilweise ein Rebound-Phänomen nach erfolgter Behandlung von 2-3° beobachtet werden (Khoury et al. 2007; De Brauwer/Moens 2008). Außerdem kam es auch hier in manchen Fällen zum Auftreten von iatrogenen Beinachsenfehlstellungen sowohl in der Frontal- als auch in der Sagittalebene. (Metaizeau et al. 1998; Khoury et al. 2007; De Brauwer/Moens 2008; Campens et al. 2010; Ghanem et al. 2011)

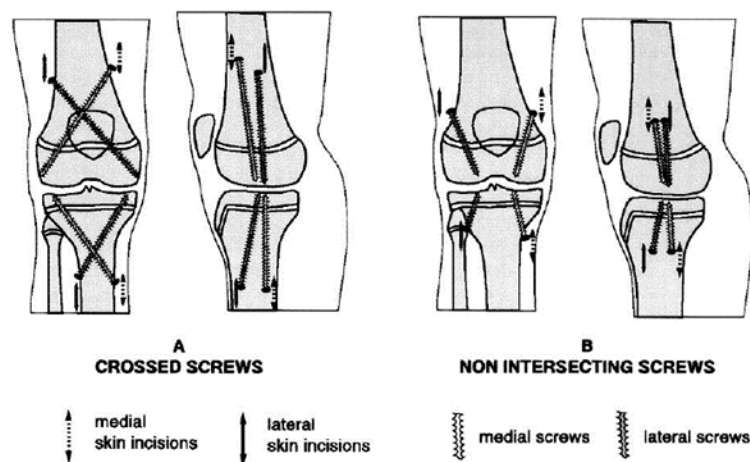


Abbildung 12: PETS-Methode nach Metaizeau mit gekreuzten (A) und ungekreuzten (B) Schrauben, hier am Beispiel der Korrektur von BLD: Operationsschema aus der Original-Publikation von Métaizeau 1998 in JPO (Metaizeau et al. 1998)



## **2.3 Aktueller Stand der Forschung zum Thema Wachstumslenkung**

### **2.3.1 Weiterentwicklung der Implantate**

Aufgrund der guten Erfahrungen wurden in den letzten Jahren weitere Plattensysteme hergestellt, die in ihrem Aufbau den Eight-Plates ähnlich sind. Zu nennen ist hier die PediPlate (Orthopediatrics Inc., Warsaw, IN), eine Platten-Schrauben-Konstruktion aus Edelstahl. Hosseinzadeh zeigte in seiner Studie, dass mit diesem Implantat, verglichen mit den Klammer-Implantaten und den Eight-Plates, gute Ergebnisse hinsichtlich der Korrektoreffektivität und der Komplikationsrate erzielt werden können. (Hosseinzadeh 2016)

Zusätzlich wurde eine Klammer mit kantülierten Schenkeln entwickelt, die ein flexibles Zwischenstück besitzt, welches die Kompression der Fugenmitte wie bei den Zweilochplatten-Systemen verhindern soll (Flex-Tack, Merete GmbH, Berlin) (Abb. 13). Aktuell werden dazu klinische Erfahrungen gesammelt. (Vogt et al. 2014)

Eine Studie von Vogt et al. 2015 konnte beim Einsatz dieser Klammer zur Korrektur von frontalen Beinachsenfehlstellungen im Vergleich zu einem Patientenkollektiv mit Eight-Plates einen vergleichbaren Korrektoreffekt und wenig Komplikationen verzeichnen. (Vogt et al. 2015)

Allerdings benötigt es noch weitere wissenschaftliche Untersuchungen, um zu prüfen, ob diese Ergebnisse reproduzierbar sind.

Zum Ausgleich von Beinlängendifferenzen wurde hingegen eine Klammer mit starrem Steg entwickelt (Rigid-Tack, Fa. Merete GmbH, Berlin). Die einwirkende Kraft soll sich so nicht auf die Fugenperipherie konzentrieren, sondern gleichmäßig über die gesamte Fuge verteilt werden. So können eventuell Komplikationen der Zweilochplatten-Systeme wie das Vulkan-Phänomen und iatrogene Beinachsenfehlstellungen vermieden werden. (Vogt et al. 2014)



Abb.13: Flex-Tack, Merete GmbH, Berlin (Merete 2020)

### 2.3.2 Experimentelle Methoden

Es wurden bereits einige experimentelle Methoden wie PETS mit bioresorbierbaren Schrauben im Tierversuch erprobt. Der bisher erforderliche zusätzliche Eingriff zur Metallentfernung könnte so entfallen. Hier wäre aber wie bei der permanenten Methode die Kenntnis des exakten Zeitpunkts des Auflösens der Schrauben wichtig, um die Dauer bis zum Wirkverlust des Implantats zu bestimmen. Weiterhin gibt es Versuche das Wachstum der Fuge mittels Radiofrequenzablation, CO<sub>2</sub>-Lasern, Elektrokaatern, photodynamischer Therapie sowie durch lokale Applikation von Wachstumsfaktoren zu beeinflussen. (Ghanem et al. 2011)

Bisland et al. erprobten 2007 die Methode der photodynamischen Therapie zum Verschluss der Wachstumsfuge in der Therapie von Beinlängenunterschieden an Mäusen. Zuerst wurde ein fluoreszierender Wirkstoff gespritzt, der die Blutgefäße, die die Wachstumsfuge versorgen, visualisieren sollte. Anschließend wurden diese mittels Laserstrahlung zerstört. Der Gedanke dahinter war, dass durch den entstandenen Sauerstoffmangel vaskuläre Wachstumsfaktoren ausgeschüttet werden, die zu einer überschießenden Neubildung von Gefäßen und zur Verkalkung der Fuge führen sollten. Die Arbeitsgruppe berichtete von einer deutlichen Verkürzung der behandelten Extremität. Gleichzeitig konnten sie zeigen, dass durch diese Methode der Knorpel der Gelenkoberfläche nicht beschädigt wurde. (Bisland et al. 2007)

Lee et al. injizierten in ihrer Studie Hasen im Bereich der Epiphyse den Botenstoff SDF-1, der eine Rolle in der Entstehung von degenerativen Knorpelveränderungen bei rheumatoider Arthritis und in der entzündlichen Phase der Arthrose spielen soll.

Röntgenaufnahmen und histologische Untersuchungen zeigten einen vorzeitigen Verschluss der Fuge, ohne dass der nahegelegene Gelenkknorpel geschädigt wurde. Allerdings konnten sie auch am unbehandelten Bein eine geringe Wachstumsbremsung feststellen, welche sie auf den systemischen Effekt des SDF-1 zurückführten. (Lee et al. 2007)

Da die Radiofrequenzablation bereits gute Ergebnisse in der Therapie von orthopädischen Erkrankungen wie dem Osteoidosteom hervorgebracht hatte, erhofften sich die Arbeitsgruppen von Ghanem und Widmann mit dieser Methode auch Erfolge in der Wachstumslenkung zu erzielen. In ihrem Versuchsmodell mit Hasen konnten beide zeigen, dass die Behandlung der Wachstumsfuge mit Radiofrequenzstrahlung ebenfalls zu einem Wachstumsarrest führen kann. Auch hier kam es in beiden Studien zu keiner Beeinträchtigung des Gelenkknorpels. (Ghanem et al. 2009; Widmann et al. 2010)

Die Erprobung dieser Methoden erfolgte bisher vorwiegend im Tiermodell. Es wird noch ein erheblicher Forschungsaufwand notwendig sein, um zu testen, ob diese Verfahren in Zukunft an Kindern im Rahmen der Wachstumslenkung eingesetzt werden können. (Ghanem et al. 2011)

### **3 Die Technik der Wachstumslenkung**

#### **3.1 Präoperative Diagnostik**

##### **3.1.1 Indikationsstellung**

Kommt ein junger Patient zur Abklärung einer Beinachsendiformität zum Kinderorthopäden, ist dessen gesamte Expertise gefragt, um die Therapiebedürftigkeit einzuschätzen. Denn Fehlstellung ist nicht gleich Fehlstellung. Viele Beinachsenabweichungen im Kindes- und Jugendalter spiegeln den natürlichen Wachstumsprozess des unreifen Skeletts wider und benötigen häufig keine Behandlung (Abb. 2). Sie wachsen sich im Laufe der Zeit oft von selbst aus. Besteht eine Deformität über die Präadoleszenz fort, korrigiert sie sich nur noch selten von selbst. (Westhoff et al. 2007; Friend/Widmann 2008)

Der Kinderorthopäde verlässt sich bei der Diagnosestellung auf Parameter klinischer Untersuchungsverfahren. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser wird die Indikation zur Röntgenaufnahme gestellt. Strahlenbelastung im Kindesalter ist ein heikles Thema, deswegen sollte die körperliche Untersuchung strukturiert und gründlich durchgeführt werden. Um die klinische Untersuchung zu standardisieren, hat man sich auf bestimmte Diagnosekriterien geeinigt. Im Falle eines Genu varum hat sich die Vermessung des Interkondylenabstands (IKA) als einfache Methode etabliert. Beim Genu valgum wird der Intermalleolenabstand (IMA) vermessen. (Westhoff et al. 2007)

Ab einem IKA > 2 cm (Hefti 2000) beziehungsweise einem bleibenden IMA > 10 cm über das achte bis zehnte Lebensjahr hinaus (De Brauwier/Moens 2008) wird eine weitere apparative Abklärung empfohlen. Alternativ kann auch ein Goniometer eingesetzt werden, um den Winkel zwischen den Ober- und Unterschenkellängsachsen zu vermessen. Der Vollständigkeit halber sollte auch ein Blick auf die Rotationsverhältnisse und die Achsenverhältnisse in der Sagittalebene geworfen werden. (Westhoff et al. 2007)

Die Bildgebung liefert meist genauere Informationen als die ärztliche Untersuchung. Der radiologische Goldstandard zur Analyse von Beinachsenfehlstellungen ist die bilaterale Ganzbein-Standaufnahme im anterior-posterior (a.p.) -Strahlengang. Ergibt sich der klinische Verdacht auf eine Fehlstellung in der Sagittalebene oder auf fehlerhafte Rotationsverhältnisse, sind eine zusätzliche laterale Aufnahme beziehungsweise bestimmte Schnittbildverfahren, wie die Magnetresonanztomographie, sinnvoll. Anschließend werden die Achsenverhältnisse und sämtliche Beinsegmentlängen mit

einer Vermessungssoftware wie mediCAD (Hectec GmbH, Altdorf/Landshut) oder TraumaCad (Brainlab, München) bestimmt. Auch hierbei hat man standardisierte Diagnoseparameter festgelegt. (Westhoff et al. 2007)

Als wesentlicher technischer Wert gilt die mechanische Achsdeviation (MAD). Die MAD bezeichnet die Abweichung der mechanischen Beinachse von einem Punkt 8 (+/-7) mm medial des Kniegelenkszentrums in der Röntgenaufnahme. (Paley 2000)

Das Ausmaß der MAD ist ein Kriterium für die Entscheidung über die Notwendigkeit eines operativen Eingriffs. Außerdem tragen klinische Beschwerden wie Mobilitätseinschränkungen und Schmerzen wesentlich zur Therapieentscheidung bei (Stevens et al. 1999; Ballal et al. 2010; Ghanem et al. 2011). Eine MAD von >15 mm nach medial definiert eine signifikante Varus- und von >10 mm nach lateral eine signifikante Valgusfehlstellung. (Paley 2000)

Neben einer signifikanten MAD muss außerdem ein ausreichendes Restwachstums gewährleistet sein (Stevens et al. 1999; Ballal et al. 2010; Ghanem et al. 2011).

Wird aus der Zusammenschau der Ergebnisse die OP-Indikation gestellt, sind für den Arzt im Rahmen der präoperativen Diagnostik noch zwei weitere Dinge interessant. Erstens muss er wissen von welchem Knochen die Fehlstellung ausgeht, damit er das Implantat an der richtigen Stelle einsetzen kann. Und zweitens muss er den richtigen Zeitpunkt für die Intervention festlegen.

### **3.1.2 Lokalisation der Fehlstellung**

Der Ursprung einer signifikanten MAD kann durch den Malalignment-Test nach Paley ermittelt werden (Abb. 14). Dazu werden die mechanischen Gelenkorientierungswinkel am lateralen distalen Femur (mLDFA) und an der medialen proximalen Tibia (mMPTA) bestimmt. Eine Abweichung von den physiologischen Werten dieser Winkel zeigt die Lokalisation der Fehlstellung und gibt somit den Ort für die Implantation an. Die Normwerte für beide Winkel liegen nach Paley bei  $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$ . (Paley 2000)

Ein  $MAD > 15$  mm nach medial definiert eine Varusfehlstellung. Bei mLDFA-Werten über  $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$  und einem normalen mMPTA gilt die Varusfehlstellung als isoliert femoral bedingt und bei ausschließlich pathologischen mMPTA-Werten von  $> 87,5^\circ \pm 2,5^\circ$  als isoliert tibial bedingt. Eine kombinierte Fehlstellung mit sowohl femoral als auch tibial pathologischen Gelenkwinkeln kommt häufig vor. (Paley 2000)

Eine pathologische Valgusstellung wird durch eine  $MAD > 10$  mm nach lateral angezeigt. Hier ist die Fehlstellung umgekehrt bei mL DFA-Werten unter  $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$  femoral bedingt und bei mMPTA-Werten über  $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$  tibial bedingt. (Paley 2000)

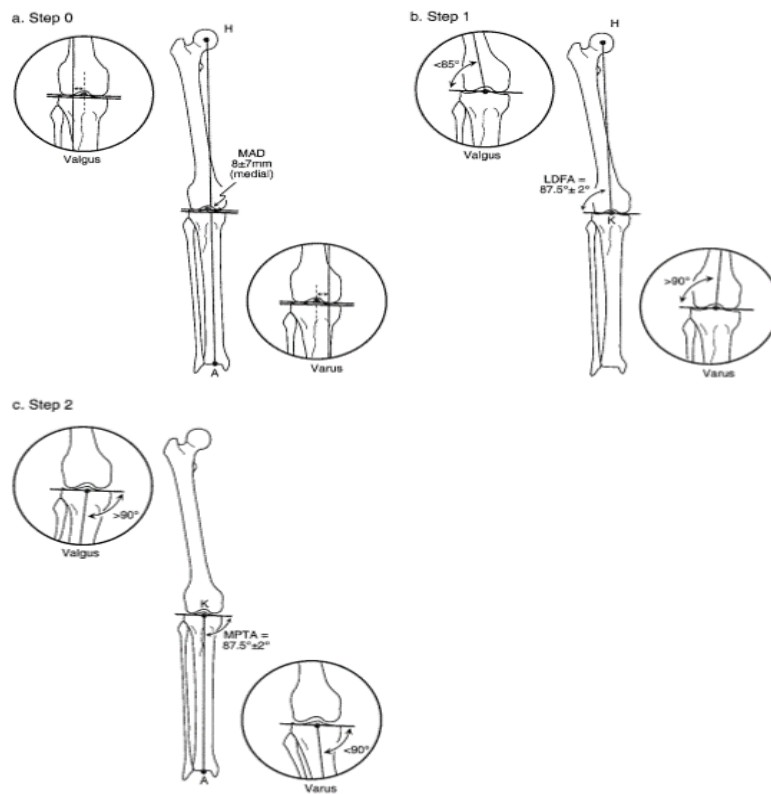


Abbildung 14: Malalignment-Test nach Paley (2000) zur Bestimmung des Ursprungs knielenksnaher frontaler Beinachsenfehlstellungen.

a.: Schritt 0: Bestimmung der mechanischen Achsenabweichung (MAD)

b.: Schritt 1: Bestimmung der mechanischen Gelenkwinkel des lateralen distalen Femurs (mL DFA)

c.: Schritt 2: Bestimmung der mechanischen Gelenkwinkel der medialen proximalen Tibia (mMPTA)

### **3.1.3 Zeitliche Therapieplanung**

Zur Festlegung des Operationszeitpunktes ist eine Kenntnis des residualen Wachstumspotenzials notwendig. Die Abschätzung des verbleibenden Wachstums kann durch eine radiologische Bestimmung des Skeletalters erfolgen. Dadurch kann die Dauer bis zum Fugenschluss und damit das Zeitfenster für die Intervention eingegrenzt werden. Hierfür kann zum Beispiel der Vergleich einer a.p.-Röntgenaufnahme der Knochenkerne der linken Hand mit den Atlasaufnahmen von Thiemann und Nitz, Greulich und Pyle oder Tanner und Whitehouse angewandt werden. (Horter et al. 2012)

Bei den permanenten Verfahren ist eine exakte Bestimmung des Operationszeitpunktes wichtig, um eine Überkorrektur durch eine zu frühe oder eine Unterkorrektur durch eine verspätete Implantation zu vermeiden. (Hasler 2000)

Mit Entwicklung der temporären Verfahren wurde eine genaue Kenntnis des verbleibenden Wachstums weniger relevant. Allerdings entstanden neue Probleme, wie ein Korrekturverlust nach Metallentfernung (Rebound). Eine leichte Überkorrektur kann eventuell sinnvoll sein. Zusätzlich sollten nach der Explantation regelmäßige Kontrollen der Beinachse erfolgen. (vgl. Kapitel 2.2.1)

## **3.2 Implantationstechnik**

Der Eingriff erfolgt in der Regel auf der konvexen Seite der Deformität. Beim Genu valgum wird eine mediale Hemiepiphyseodese durchgeführt, beim Genu varum ist der Zugang am lateralen Fugenende. Das korrekte Einsetzen der Implantate erfordert viel Präzision und Erfahrung. Röntgenaufnahmen des Operationsgebiets vor, während und nach dem Eingriff zur Kontrolle der Implantatlage sind obligat. (Vogt et al. 2014)

Im Folgenden sollen die Insertionstechniken der Implantate, die in dieser Arbeit behandelt werden, der Zweilochplatten und der PETS, beschrieben werden.

### **3.2.1 Zweilochplatten**

Stellvertretend für die Zweilochplatten wird hier die Implantationstechnik des Eight-Plate-Systems beispielhaft dargestellt (vgl. Abb. 15, 16). Zunächst erfolgt eine radiologische Darstellung der Epiphyse in frontaler und sagittaler Ansicht. Dann setzt der Chirurg einen circa 2,5 cm langen vertikalen Hautschnitt und präpariert das Gewebe vorsichtig bis auf das Periost. Im nächsten Schritt wird das Eight-Plate nach Augenmaß an der richtigen Stelle auf den Knochen aufgelegt. Für den distalen Femur wird oft ein etwas größeres Implantat verwendet als für die proximale Tibia. Dieses wird zunächst über eine Führungsnadel, die durch das zentrale Loch der Platte in die Epiphyse gebohrt wird, am Knochen fixiert. Die Position der Platte soll vor der endgültigen Befestigung radiologisch in zwei Ebenen kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden. Sie sollte nicht nur in der Frontalebene mittig über der Fuge liegen, sondern auch in der Lateralansicht zentriert sein. (Burghardt et al. 2008)

Anschließend werden durch die zwei äußeren Löcher der Eight-Plates jeweils eine Führungsnadel möglichst parallel zur Wachstumsfuge eingebracht, über welche dann zwei kanülierte Titanschrauben zur Befestigung der Platte in den Knochen gebohrt werden. Dies erfolgt unter Röntgenkontrolle, um die Fuge nicht zu verletzen. Hierbei handelt es sich entweder um 24 oder 32 mm Schrauben. Für die Metaphyse werden vor allem 32 mm Schrauben verwendet, weil Veränderungen während des Wachstums in diesem Bereich dazu führen können, dass die kürzere Schraube ihren Halt verliert. Bevor die Schrauben eingebracht werden, wird der Knochen bis auf 5 mm eingebohrt. Nachdem sie vorsichtig im Knochen verankert wurden, werden alle Führungsnadeln entfernt. Zuletzt erfolgt noch einmal eine bildgebende Kontrolle. (Burghardt et al. 2008)



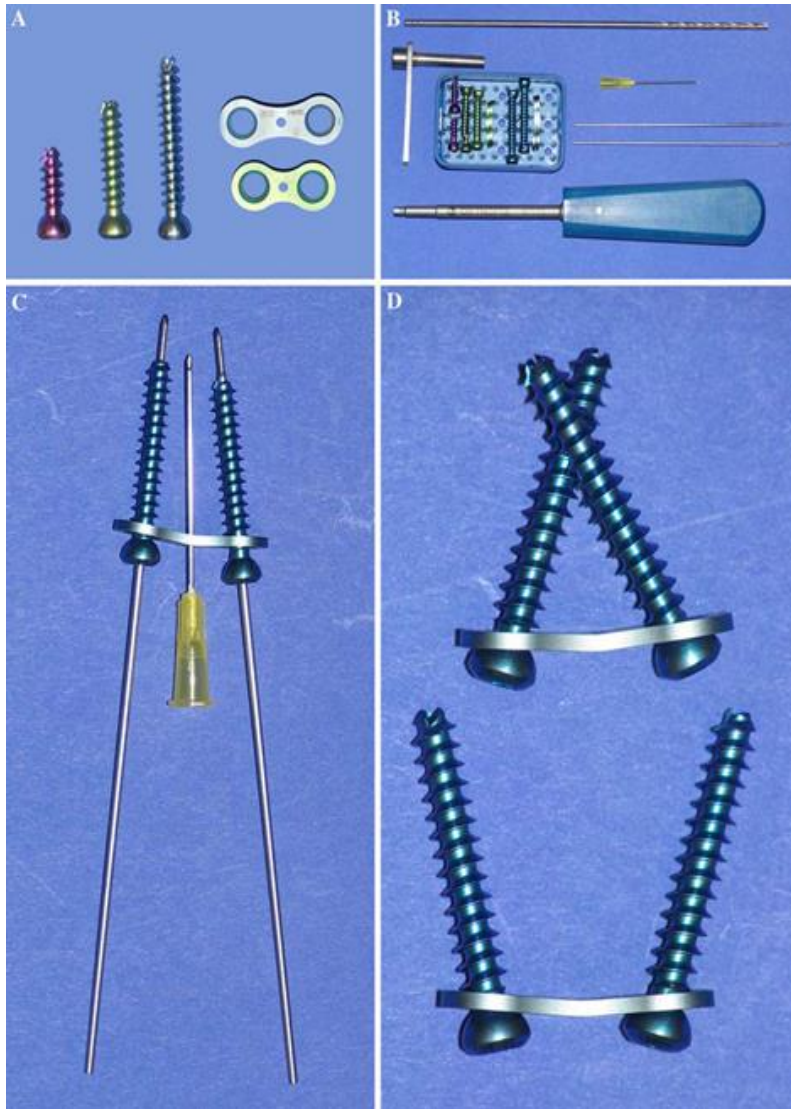


Abbildung 15: Eight-Plate Guided Growth System mit Insertionshilfen

A = Das Foto zeigt zwei Größen des Eight-Plate Guided Growth Systems: 12 und 16 mm. Das Eight-Plate-System enthält drei kanülierte Schrauben unterschiedlicher Größe (16, 24, and 32 mm).  
 B = Das Foto zeigt das komplette Eight-Plate Set inklusive Werkzeug zum Eindrehen der Schrauben, Führungs- und Fixierungsnadeln.  
 C = Das Foto zeigt das Schrauben-Platten-System zusammengefügt inklusive Führungs- und Fixierungsnadeln.  
 D = Das Foto zeigt die Flexibilität des Schrauben-Platten-Konstrukts mit Möglichkeit der Schrauben sich innerhalb der Platte zu bewegen (mehr als 45° Rotation ist möglich). (Burghardt et al. 2008)

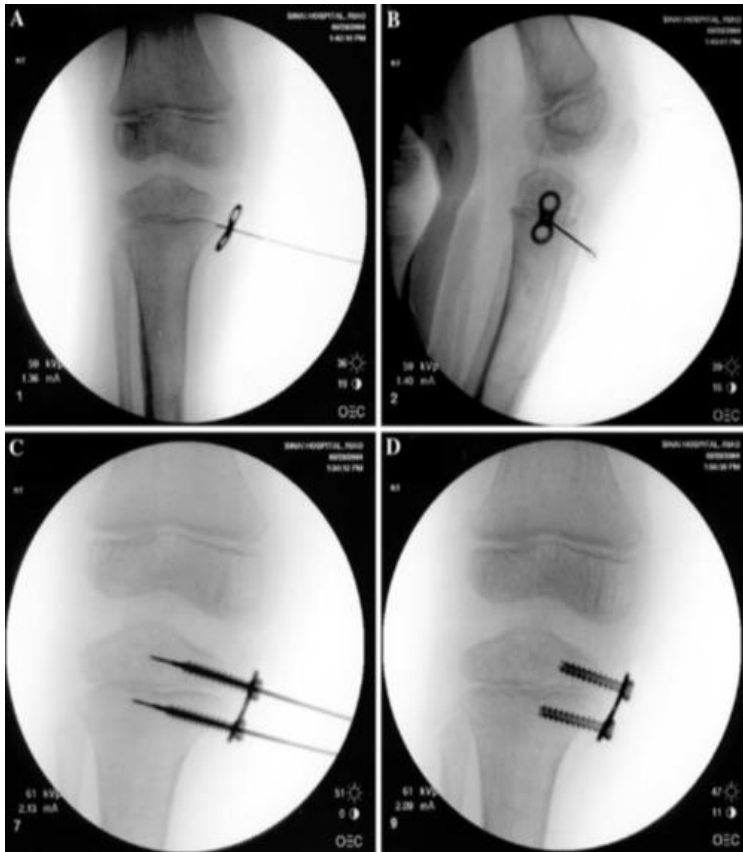


Abbildung 16: Implantation eines Eight-Plates.

A = A.p.-Ansicht: Das Röntgenbild zeigt die vorläufige Fixierung der Platte mittels Kirschner Draht über das zentrale Führungsloch.  
 B = Laterale Ansicht: Das Röntgenbild zeigt den gleichen Schritt in der zweiten Ebene. Das Eight-Plate wird in der Sagittalebene so positioniert, dass es nicht zu weit anterior oder posterior ist.

C = A.p.-Ansicht: Das Röntgenbild zeigt zwei Hilfsnadeln in den Seitenlöchern der Platte über die die Schrauben in den Knochen eingebracht werden.  
 D = A.p.-Ansicht: Das Röntgenbild zeigt die das Eight-Plate System in seiner endgültigen Position.  
 (Burghardt et al. 2008)

### 3.2.2 Schraubenmethode (PETS)

Im Folgenden soll die Insertionstechnik der PETS zum Ausgleich von Beinachsenfehlstellungen erklärt werden.

Auch bei der Schraubentechnik nach Metaizeau wird die Ebene der Epiphysenfuge zunächst radiologisch dargestellt. Je nach Art und Lokalisation der Fehlstellung erfolgt der Eingriff an der medialen oder lateralen Seite des distalen Femurs beziehungsweise der proximalen Tibia. Nach Setzen eines kleinen Hautschnitts wird im Bereich der Metaphyse zunächst ein Führungsdraht eingebracht, der schräg in die Epiphyse zieht. Über diesen wird eine kanülierte Schraube mit Vollgewinde so weit eingeführt, dass sie kurz vor der Gelenkoberfläche zu liegen kommt. Der Schraubendurchmesser beträgt sieben Millimeter. Die richtige Position der Schrauben wird radiologisch kontrolliert. Der Schraubenkopf sollte dabei einen Überstand von 5 mm haben und dem Knochen nicht direkt aufliegen. (Metaizeau et al. 1998; Nouth/Kuo 2004; Abb. 17)

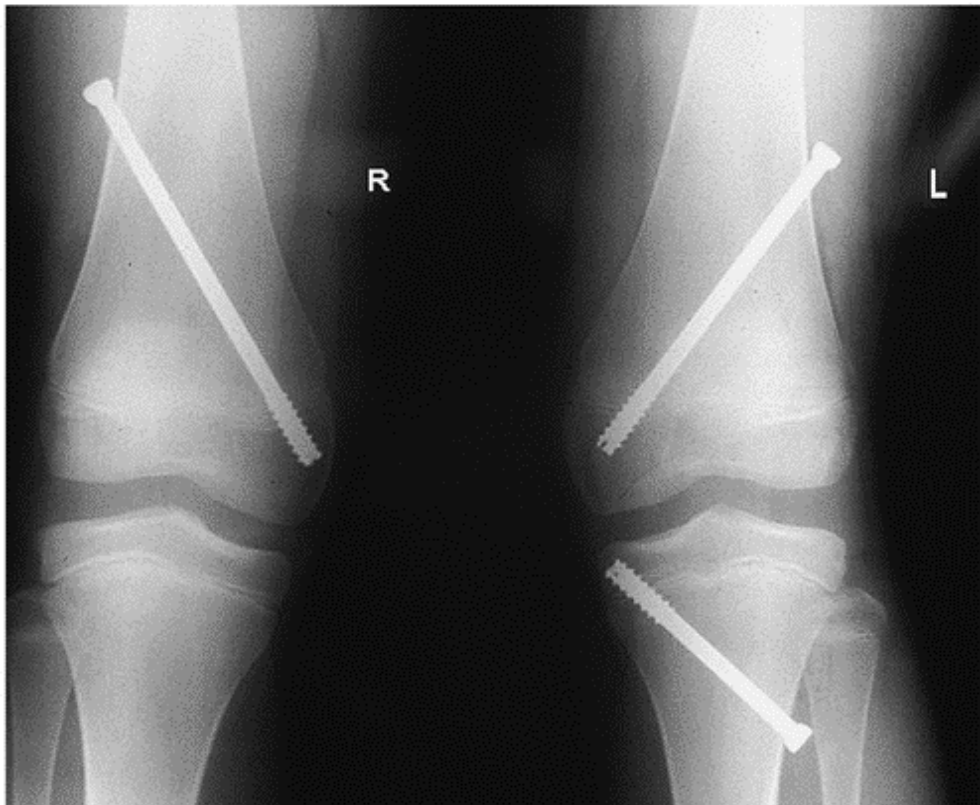


Abbildung 17: Die Röntgenbilder zeigen die PETS-Technik von Metaizeau zum Ausgleich einer Beinachsenfehlstellung (Nouth/Kuo 2004)

### **3.3. Metallentfernung**

#### **3.3.1 Zweilochplatten**

Die Metallentfernung erfolgt unter Vollnarkose. Es wird eine Inzision im Bereich der alten Operationsnarbe und eine Präparation in die Tiefe bis zur Darstellung der Platte mit Schrauben durchgeführt. Sollte es zu Schwierigkeiten beim Aufsuchen des Implantats kommen, kann die Präparation unter Röntgenkontrolle erfolgen. Zunächst werden die beiden Schrauben mit einem Schraubenzieher gelockert und entfernt. Danach kann die dem Knochen aufliegende Zweilochplatte ebenfalls herausgenommen werden. Zur Förderung der Blutgerinnung kann ein steriler, resorbierbarer Gelatineschwamm in die ehemaligen Schraubenlöcher eingelegt werden. Anschließend erfolgt der Wundverschluss. (vgl. OP-Bericht 2012)

#### **3.3.2 Schraubenmethode (PETS)**

Nach einem Hautschnitt im Bereich der alten Narbe erfolgt die Präparation zum Eintrittspunkt des Schraubenkopfs. Dann wird ein Kirschner Draht in die Hohlschraube eingeführt und die Schraube wird herausgedreht. Gelingt das Einbringen des Kirschner Drahts nicht, muss der Hautschnitt gegebenenfalls noch etwas erweitert werden. Sollte die Schraube zu fest sitzen oder sogar von Knochen überwachsen sein, muss der Knochen unter Durchleuchtung sparsam aufgemeißelt werden oder es kann versucht werden, die Schraube mit einem Extraktionsset zu bergen. Nach Entfernung des Implantats kann in eventuelle entstandene Knochendefekte und in das ehemalige Schraubenloch ein resorbierbarer Gelatineschwamm eingelegt werden. Anschließend erfolgt der Wundverschluss. (vgl. OP-Bericht 2016)

#### **4 Fragestellung**

Auf dem Gebiet der temporären Hemiepiphyseodese zur Korrektur von Beinachsenfehlstellungen bei Kindern finden sich in der Literatur hauptsächlich Untersuchungen zu den Platten- und Klammer-Implantaten. Diese wurden klinisch bereits umfassend analysiert. Mit der Schraubentechnik von Metaizeau hat sich die Literatur bisher kaum beschäftigt. Dies motivierte uns, den Korrektoreffekt und das Komplikationspotenzial der Wachstumslenkung durch kniegelenksnahe temporäre Hemiepiphyseodese mittels PETS wissenschaftlich nachzuuntersuchen und zu prüfen, ob diese Methode eine gleichwertige Option zur Achskorrektur mit Zweilochplatten darstellt. Es sollen die folgenden zwei Hypothesen untersucht werden:

1. Zur schnellen und effektiven Korrektur von Beinachsenfehlstellungen stellen die Schrauben-Implantate eine geeignete Alternative zu den klinisch etablierten und gut untersuchten Zweilochplatten dar.
2. Das Komplikationspotenzial der Schrauben-Implantate ist nicht größer als das der Zweilochplatten. Durch eine Analyse der Komplikationen der Hemiepiphyseodese können Ursachen für ein Therapieversagen identifiziert und Kriterien definiert werden, die prädiktiv für einen guten Behandlungserfolg sind.

## **5 Material und Methode**

### **5.1 Studiendesign und Einschlusskriterien**

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine monozentrische, nicht interventionelle Fallserienanalyse. Die Datenerhebung erfolgte retrospektiv.

Das Gesamtkollektiv bestand aus Patienten der Schön Klinik München-Harlaching. Für den Studieneinschluss mussten folgende Kriterien erfüllt werden:

1. Es musste im Zeitraum 2010-2016 bei einer Beinachsenfehlstellung eine temporäre Hemiepiphyseodese mit entweder Zweilochplatten oder PETS durchgeführt worden sein.
2. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung musste die Wachstumslenkung abgeschlossen sein. Das heißt, die Implantate mussten entweder vollständig entfernt oder die Wachstumsfugen bei noch einliegenden Implantaten bereits verschlossen sein.
3. Von jedem Patienten musste eine radiologische Becken-Bein-Statik beider Beine vom kranialen Ende der Hüftgelenkspfanne bis zum Talus jeweils zeitnah vor Implantation und kurz vor oder nach Explantation durchgeführt worden sein, um die progrediente Veränderung sowie das Ergebnis nach erfolgter Therapie exakt messen zu können. Zur Objektivierung der Korrektur berechneten wir die geometrischen Daten, die MAD und die mechanischen Gelenkorientierungswinkel nach Paley (2000).

Im genannten Zeitraum haben in der Schön Klinik München-Harlaching 106 Patienten eine Wachstumslenkung erhalten. Von diesen konnten 44 Patienten in die Studie eingeschlossen werden. Davon waren 25 männlich und 19 weiblich. Die hohe Ausschlussquote ist mit den Einschlusskriterien begründet. Fehlende Röntgenbilder oder eine schlechte Bildqualität führten häufig zu einem Studienausschluss.

## 5.2 Zeitplan

Für die Gesamtdauer des Projekts wurden 12 Monate eingeplant. In der Vorbereitungsphase, die circa drei Monate dauerte, wurde eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt sowie sämtliche organisatorische Aufgaben, die für einen reibungslosen Ablauf des Projekts und zur effektiven Erfassung der Patientendaten notwendig waren, erledigt.

Danach wurde aus der OP-Statistik-Liste die Anzahl der potenziellen Patienten bestimmt. Die Gewinnung der erforderlichen Patientendaten aus den digitalen Akten und den vorhandenen Röntgenbildern hat vier bis sechs Monate in Anspruch genommen. Parallel dazu wurde die Datenverarbeitung und -auswertung durchgeführt. Nach etwa zwölf Monaten war die Datenerfassung und Auswertung beendet und es folgte die Erstellung der Dissertation sowie die Diskussion der Ergebnisse in der Fachöffentlichkeit. (vgl. Tabelle 1)

Projektaufgaben	Monate											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>1. Vorbereitungen</b>												
- Literaturrecherche	x	x										
- Projektplanung	x	x										
Vorbereitung/Organisation der Datenerhebung			x	x								
<b>- 2. Patientenakquise/Datenerhebung</b>												
Analyse der Akten/Röntgenbilder			x	x	x	x	x	x				
<b>- 3. Datenauswertung</b>												
- Datenauswertung								x	x	x		
<b>- 4. Dokumentation der Ergebnisse</b>												
Publikation/Dissertation										x	x	x

Tabelle 1: Studienaufgaben im zeitlichen Verlauf nach Monaten

## 5.3 Untersuchungsmaterial

### 5.3.1 Konventionelle bilaterale Ganzbein-Standaufnahme

Zum Vergleich der prä- und postoperativen Beinachse wurde die bilaterale Ganzbein-Standaufnahme als bildgebendes Mittel der Wahl ausgewählt. Dieses Verfahren eignet sich zur Bestimmung der Achsenverhältnisse und Gelenkwinkel. Es gibt exakte Vorgaben für die Ausrichtung des Beins in der a.p.-Aufnahme. Die gut tastbare Patella wurde als Einstellkriterium definiert. Die Kinder werden frontal vor dem Röntgengerät positioniert. Dabei soll die Patella streng mittig zentriert sein und die Beine sollten zusammenstehen. (Paley 2002; Westhoff et al. 2007)

Bei einem Torsionsfehler nach innen oder nach außen kann es zu einer zu weit lateralen oder medialen Stellung der Patella kommen. Ist dies der Fall, so soll das Bein so lange gedreht werden bis die Kniescheibe sich mittig auf die distalen Femurkondylen projiziert. Eine zusätzliche Aufnahme zur Beurteilung der Stellung des Unterschenkels und des Fußes kann bei der genauen Positionierung helfen. (Paley 2002; Abb. 18)

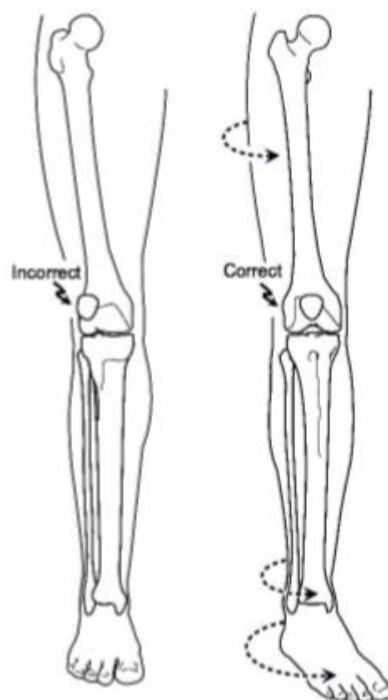


Abbildung 18: Korrekte Ausrichtung des Beins für die Röntgenstandbeinaufnahme a.p. (Paley 2002)



Problematisch wird es außerdem, wenn die Patienten extreme Achsfehler aufweisen. Bei einer stark ausgeprägten Valgusfehlstellung kann es zu einer teilweisen oder vollständigen Luxation und starken lateralen Verschiebung der Patella kommen. In solchen Fällen kann die Kniescheibe nicht als Orientierungspunkt zur korrekten Ausrichtung des Beins dienen. Hier kann die Extension-Flexion-Achse des Kniegelenks als Hilfslinie benutzt werden, um das Bein in der Frontalebene richtig zu positionieren. Sie entspricht der Ebene des nach vorne gerichteten Knies. (Paley 2002)

Im Vergleich zur Frontalebene ist die Extension-Flexion-Achse des Kniegelenks etwa  $3^\circ$  nach außen gedreht, sodass die messbaren geometrischen Daten vergleichbar sind (Hollister et al. 1993).

Sind die Beine in der Frontalebene ausgerichtet, sollte zusätzlich darauf geachtet werden, dass keine Hilfsmaterialien wie beispielsweise der Röntgenschutz wichtige knöcherne Strukturen wie den Hüftkopf verdecken und so später beim Vermessen stören. Die Bildqualität der Röntgenaufnahme ist für die anschließende Beurteilung sehr wichtig. Daher sollte die Durchführung dieser Spezialaufnahme auch nur sehr erfahrenem radiologisch-technischem Personal überlassen oder durch den behandelnden Arzt selbst durchgeführt werden.

### **5.3.2 Weiterentwicklung der radiologischen Technik**

Das Unternehmen EOS imaging hat 2008 eine innovative Untersuchungsstation zur Anfertigung von Ganzbein-Standaufnahmen entwickelt. In dieser Kabine sind die Strahlenquellen im rechten Winkel zueinander sowie die Detektoren angebracht. Damit können gleichzeitig Bilder von der Seite und von vorne gemacht werden. So entstehen schnell qualitativ hochwertige Abbildungen des gesamten menschlichen Skeletts (Illés/Somoskeöy 2012; Wybier/Bossard 2013). (EOS Imaging 2020)

### **5.3.3 Digitale Patientenakte**

Die digitale Patientenakte bestand aus Sprechstunden-Dokumentationen, Operations-, sowie Entlassberichten.

Die in regelmäßigem Abstand abgehaltenen Sprechstunden zeigten den Therapieverlauf und gaben Aufschluss über Entscheidungen und das weitere Vorgehen des behandelnden Arztes. Aus der Dokumentation der Behandlung war ersichtlich, ob und welche Komplikationen im Verlauf auftraten. Die Operationsberichte von Implantation und Metallentfernung lieferten Informationen zur Insertionstechnik, intraoperativen Schwierigkeiten und den verwendeten Implantaten.

## **5.4 Methodische Auswertung**

### **5.4.1 Achskorrektur**

Anhand der Ganzbein-Standaufnahme wurde eine strukturierte Fehlstellungsanalyse durchgeführt (Paley 2000; Westhoff et al. 2007). Dafür wurde die professionelle Planungs- und Vermessungssoftware mediCAD von der Firma Hectec verwendet. Hierfür wurden die in Kapitel 1.3.2 beschriebenen geometrischen Achsen und Gelenkorientierungswinkel bestimmt. Diese Fehlstellungsanalyse wurde sowohl beim präoperativen Bild, bei den Verlaufsaufnahmen während der Behandlung - sofern vorhanden - als auch bei dem Bild durchgeführt, das kurz vor oder nach der Metallentfernung angefertigt wurde.

Zunächst wurde mit der Software Impax EE R20, ein Produkt von AGFA HealthCare (Dedalus Health Care Group, Bonn), der gewünschte Patient gesucht und die entsprechende Röntgenaufnahme mit mediCAD geöffnet. Nach der initial durchgeführten Skalierung wurde eine Körperhälfte ausgewählt.

Die Vermessung der Beingeometrie begann mit der manuellen Festlegung des Hüftgelenksmittelpunkts. Dazu wurde der Durchmesser des Acetabulums bestimmt. Im nächsten Schritt wurde die Lagebeziehung der Gelenkflächen des Kniegelenks bestimmt. Dazu wurde zum einen eine Tangente entlang der gelenkbildenden Fläche der Femurkondylen gelegt und deren Mittelpunkt ermittelt, zum anderen erfolgte analog die Bestimmung der Tibiaplateaulinie und die Lage deren Mittelpunkts. Die Beziehung der Gelenkflächen zueinander kann durch den konvergierenden Gelenkwinkel (JLCA, joint line convergence angle) dargestellt werden. Unter normalen Bedingungen verlaufen sie

nahezu parallel, nach medial etwas aufeinander zu (Paley 2000). Weiter wurde die Sprunggelenksbasis bestimmt, indem jeweils der höchste Punkt des lateralen und medialen Endes der Sprunggelenksrolle miteinander verbunden wurde. Danach erfolgte auch hier wieder die Berechnung des Mittelpunkts der Basis.

Aus der Verbindungslinie zwischen dem höchsten Punkt des Hüftkopfs und dem Mittelpunkt der Femurbasis wurde die Femurlänge berechnet. Die Tibialänge wurde aus der Verbindung zwischen dem Mittelpunkt der Femurbasis und der Mitte des distalen Endes der Tibia bestimmt. Die Gesamtlänge des Beins wurde noch einmal extra berechnet, indem die Oberkante des Hüftkopfs mit der Mitte der Tibiaunterkante verbunden wurden.

Durch die Bestimmung des Femurdurchmessers an einem proximalen und distalen Punkt der Diaphyse konnte im nächsten Schritt dessen anatomische Achse berechnet werden. Analog erfolgte die Bestimmung der anatomischen Tibiaachse.

Das identische Prozedere wurde am anderen Bein durchgeführt.

Die errechneten Daten wurden in eine Excel-Tabelle übertragen. Die für die Beurteilung einer Beinachsenfehlstellung wesentlichen Kenngrößen sind die MAD, und die kniegelenksnahen Orientierungswinkel mL DFA und mMPTA. Durch diese drei Parameter konnte die Veränderung der Beinachse im Laufe der Behandlung dargestellt werden. Es wurde sowohl die Gesamtänderung als auch die Änderung pro Monat bestimmt, indem wir diese ins Verhältnis zur Verweildauer der Implantate setzten. Gleichzeitig wurde das Bilddatum, das Patientenalter sowie Auffälligkeiten, wie eine schlechte Bildqualität, notiert.

Die Ergebnisse wurden nach Schrauben- und Platten-Implantaten geordnet und miteinander verglichen.

Gleichzeitig erfolgte eine Analyse der Sprechstunden-Dokumentationen und Operationsberichte aus den digitalen Patientenakten. Zur Strukturierung der Informationen wurde eine anonymisierte Studienverwaltungstabelle erstellt mit den Kategorien Diagnose, Fallnummer, Patientenummer, Geschlecht, Alter bei Implantation, Implantationsseite und -lokalisation, Therapiedauer, den Gelenkorientierungswinkel mL DFA und mMPTA sowie der MAD jeweils vor und nach der Behandlung, mit ihrer absoluten Änderung und der Änderung pro Monat (vgl. Anhang 3.1).

## 5.4.2 Komplikationen

Um die Vielfalt an Komplikationen zu überblicken, wurden fünf Gruppen erstellt (A-E). Zur ersten Subgruppe wurden Fehler in der präoperativen Planung und der Indikationsstellung (A) gezählt. Dazu gehören eine Implantation in den falschen Knochen, also bei einer femoralen Fehlstellung in die Tibia und umgekehrt. Ein weiteres Beispiel ist, wenn eine zu geringe Ausprägung der Fehlstellung die Durchführung der Wachstumslenkung nicht rechtfertigt. Auch bei der Festlegung des Operationszeitpunkts können Fehler passieren, wenn zum Beispiel das verbleibende Wachstumspotenzial überschätzt wird und folglich die Deformität nicht komplett ausgeglichen werden kann.

Zur Gruppe B gehörte eine inkorrekte Lokalisation der Implantate. Dies passiert entweder direkt bei der Implantation oder wenn das Implantat im Laufe der Behandlung seine Lage verändert. Folgen können die ungewollte Entwicklung einer Sekundärdeformität in der Frontal- oder Sagittalebene oder eventuell die Einbuße an Korrektoreffekt sein. Sitzen die Implantate zu weit vorne, kann sich ein Genu recurvatum entwickeln. Bei einer zu weit dorsalen Lokalisation in der Sagittalebene, kann ein Streckdefizit entstehen (Genu procurvatum).

Die Folgen einer zeitlichen Fehlplanung der Metallentfernung wurden der Gruppe C zugeordnet. Dazu gehören eine frühzeitige Explantation bei einer noch nicht vollständig ausgeglichenen Fehlstellung oder eine Überkorrektur bei einer verspäteten Entfernung der Implantate. Neben einer Unterkorrektur wegen einer verfrühten Explantation kann auch ein einsetzendes Rebound-Phänomen bei gerader Beinachse nach der Behandlung und ausreichendem Restwachstum für einen Korrekturverlust verantwortlich sein.

Zur Gruppe D gehörten generelle perioperative Komplikationen wie Wundheilungs- und Narbenbildungsstörungen, Infektionen und persistierende Schmerzzustände sowie Sensibilitätsstörungen.

Und zur Gruppe E wurden jegliche Arten des Implantatversagens gezählt, die während der Wachstumslenkung oder während des Entfernungsprozesses auftraten. Dazu gehören zum Beispiel Schraubenbrüche.

Die Auswertung der Röntgenbilder vor und nach der Behandlung, sowie der Verlaufsbilder, half, Komplikationen der Gruppen A, B und C zu erkennen. Die Patientenakten gaben Aufschluss über Komplikationen der Gruppen D und E. Wir ergänzten die Studienverwaltungstabelle um die Komplikationen, aufgeteilt in die entsprechenden Kategorien (vgl. Anhang 3.2).

## 5.5 Hemiepiphyseodese versus Korrekturosteotomie

Mit der Hemiepiphyseodese werden auf dem Gebiet der Achskorrektur gute Ergebnisse erzielt (vgl. Kapitel 2.2). Es gibt aber auch Fälle, bei denen die Wachstumslenkung an ihre Grenzen stößt. Bei einer sehr ausgeprägten Beinachsenfehlstellung kann diese Methode unter Umständen nicht zum gewünschten Erfolg führen (Vogt et al. 2014). Zustände, die eine veränderte Aktivität der Wachstumsfuge zur Folge haben können, wie gelenknahe Frakturen oder Grunderkrankungen mit Beteiligung der Wachstumsfuge (vgl. Kapitel 1.5) können die Effektivität dieses Verfahrens ebenfalls abschwächen. Diese Komplikationen erfordern womöglich alternative Verfahren zur Korrektur von Beinachsenfehlstellungen. (Vogt et al. 2014).

Neben der Hemiepiphyseodese ist die Korrektur- oder Umstellungsosteotomie mit internen und externen Fixateursystemen eine Methode zur Fehlstellungskorrektur. Eine Umstellungsoperation zur Korrektur von Beinachsenabweichungen findet meist kniegelenksnah an den langen Röhrenknochen der unteren Extremität statt. Je nach Diagnose wird entweder der Oberschenkel- oder der Unterschenkelknochen durchtrennt und anschließend unter Korrektur der Achse in beiden Ebenen osteosynthetisch wieder zusammengesetzt. (Milch 1947)

Die Osteotomie ist ein aufwendiger Eingriff, der mit Risiken wie einem verlängerten Krankenhausaufenthalt und einer vorübergehenden Phase der Ruhigstellung der operierten Extremität verbunden ist. Weitere Komplikationen sind Nerven- und Gefäßverletzungen während der Operation, postoperative Wundinfekte und Schmerzzustände sowie die Gefahr der Entwicklung eines Kompartment-Syndroms. Weiterhin gibt es Berichte über iatrogene Frakturen, Schädigung der Epiphyse sowie Rückkehr der ursprünglichen Fehlstellung nach dem Eingriff (Pinkowski/Weiner 1995; Stevens 2007; Wiemann et al. 2009).

Die Osteotomie-Techniken haben sich im Laufe der Jahre jedoch weiterentwickelt. Heutzutage werden öffnende (opening wedge) und schließende (closing wedge) Verfahren durchgeführt. Zunächst wird kniegelenksnah ein Spalt in den betroffenen Knochen gesägt. Bei der schließenden Osteotomie wird anschließend ein Knochenstück herausgenommen (Freiling et al. 2010). Bei der öffnenden Methode wird der Spalt vorsichtig aufgebogen (Galla/Lobenhoffer 2004).

## **5.6 Statistikmethode**

Der Korrektoreffekt der Platten- und Schraubenmethode wurden hinsichtlich festgelegter Kriterien verglichen. Um ein statistisch signifikantes Ergebnis nachzuweisen zu können, wurden die vorliegenden Zielgrößen nach Berechnung des Varianzunterschieds mittels T-Test für unabhängige Stichproben unter der Annahme gleicher oder unterschiedlicher Varianzen geprüft (vgl. Anhang 2).

Die Ergebnisse des Komplikationspotenzials beider Methoden wurde mittels Methoden der deskriptiven Statistik dargestellt.

## **5.7 Forschungsethik und Datenschutz**

Die Datenerhebung erfolgte rein retrospektiv aus den in der Schön Klinik München-Harlaching digital gespeicherten Patientenakten und den vorhandenen Röntgenbildern – entsprechend entstand hieraus für den Patienten keinerlei zusätzliche Belastung oder Risiko. Alle persönlichen Daten der Patienten wurden anonymisiert. Dabei wurden die personenbezogenen Daten wie Name und Geburtsdatum durch einen Code ersetzt, um die Identifikation des Studienteilnehmers auszuschließen. Sämtliche Primärdaten, wie zum Beispiel das Operationsdatum wurden nur mit dem entsprechenden Patientencode zusammengeführt. Die personenbezogenen Daten wurden getrennt und verschlossen aufbewahrt und waren nur den für die Datenerhebung zuständigen Personen zugänglich. Sie wurden in keinem Fall in Verbindung mit den Forschungsdaten und auf keinem allgemein zugänglichen Datenträger gespeichert.

## **6 Ergebnisse**

### **6.1 Übersicht**

Das Gesamtkollektiv bestand aus 44 Patienten, 25 männlichen und 19 weiblichen. Es wurden insgesamt 49 Wachstumslenkungen durchgeführt. 38 Operationen wurden beidseitig durchgeführt, davon 21 femoral und tibial, 12 nur femoral und 5 nur tibial. Ein Patient wurde femoral nur links und tibial beidseits operiert. 10 Eingriffe wurden einseitig durchgeführt, sieben links, davon einer femoral und tibial, drei nur femoral und drei nur tibial, und drei rechts, davon einer femoral und tibial und zwei nur tibial. Es wurden insgesamt 133 Fugen operiert, 70 Zweilochplatten und 63 Schrauben-Implantate wurden eingesetzt.

Von den 49 Eingriffen wurden in 27 Fällen Zweilochplatten und in 22 Fällen Schrauben im Rahmen der PETS eingesetzt. Die Zweilochplatten-Implantate unterteilten sich in 18 Fälle mit Eight-Plates und neun Fälle mit PediPlates.

Die Differenz zwischen der Patientenzahl ( $n = 44$ ) und der Anzahl der erfolgten Hemiepiphyseodesen ( $n = 49$ ) ist dadurch erklärt, dass fünf Patienten aufgrund von Komplikationen eine zusätzliche Wachstumslenkung benötigten. Zwei Patienten, die anfänglich mit Zweilochplatten behandelt wurden, erhielten eine zusätzliche Hemiepiphyseodese mit Zweilochplatten. Zwei Kinder, mit einer anfänglichen Zweilochplatten-Behandlung, benötigten eine zusätzliche Wachstumslenkung mit PETS, und ein Patient, der zuerst mit PETS behandelt wurde, erhielt eine zweite Hemiepiphyseodese, ebenfalls mit PETS.

Bei einem Patienten wurden die femoralen und tibialen Fugen an beiden Beinen operiert, aufgrund qualitativer Mängel des Röntgenbilds des linken Beins konnte jedoch nur die rechte Extremität vermessen werden.

Die Ursache für die 49 Eingriffe waren in 41 Fällen eine Valgus- und in acht Fällen eine Varusdeformität. Die 41 Valgusfälle teilten sich auf in 27 idiopathische oder primäre und 14 sekundäre Fälle mit einer zugrundeliegenden Grunderkrankung. In drei Fällen lag ein Down-Syndrom vor, drei Patienten litten an einer Cystinose, zweimal lag eine familiäre Hypophosphatämie vor, zwei Patienten hatten eine I.C.P., einmal lag ein Marfan-Syndrom vor, in einem Fall eine valgusierende Dysplasie der Kondylen, einmal eine Pseudoachondroplasie und in einem Fall ein Fragiles X-Syndrom. Unter den acht Varusfällen gab es sechs primäre und zwei sekundäre Fälle. Ein Patient hatte eine epiphysäre Dysplasie und einer litt an einem Morbus Blount. (vgl. Abb. 19)

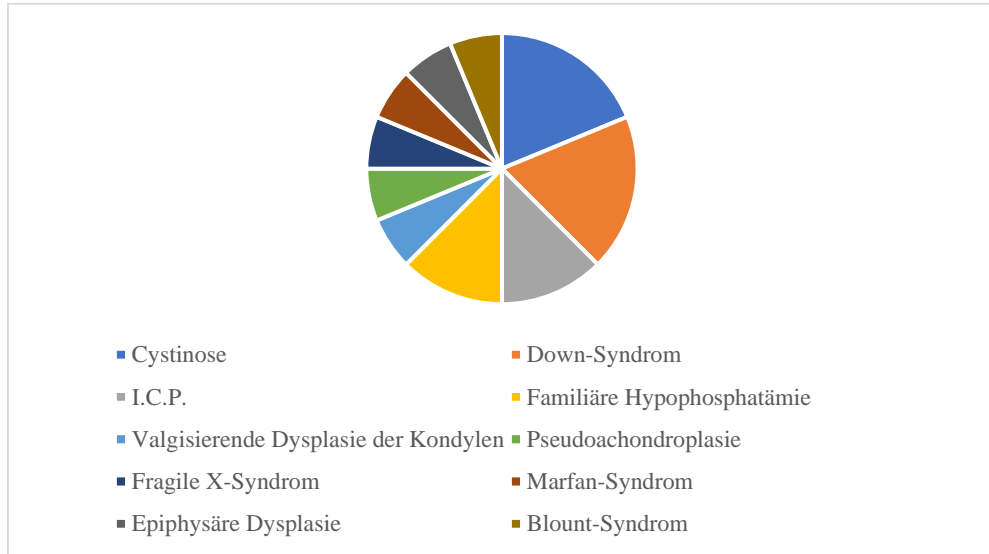


Abbildung 19: Patienten mit Grunderkrankung und Beinachsenfehlstellung (n = 16)



## 6.2 Achskorrektur

### 6.2.1 Änderung der mechanischen Beinachse und der Gelenkorientierungswinkel

In den folgenden drei Boxplots wird jeweils für die Gruppe der Zweilochplatten und die Gruppe der PETS die monatliche Änderung der mechanischen Achsabweichung ( $\Delta\text{MAD}/\text{Monat}$ ) in der Einheit Millimeter pro Monat, sowie der geometrischen Winkelmaße mL DFA ( $\Delta\text{mL DFA}/\text{Monat}$ ) und mMPTA ( $\Delta\text{mMPTA}/\text{Monat}$ ) in Grad pro Monat dargestellt ( $^{\circ}/\text{Monat}$ ).

Die durchschnittliche  $\Delta\text{MAD}/\text{Monat}$  bei den Zweilochplatten betrug 2,5 mm/Monat, bei den PETS 2,9 mm/Monat. Abbildung 21 zeigt, dass die Streubreite der Ergebnisse der PETS-Gruppe deutlich war. Zur statistischen Auswertung wurde der Zweistichproben t-Test verwendet. Es konnte bei einem Signifikanzniveau von 5 % kein signifikanter Unterschied in der Veränderung der mechanischen Achsabweichung pro Monat ( $p = 0,36$ ) zwischen beiden Gruppen nachgewiesen werden. (vgl. Abb. 20; Anhang 2.1.1)

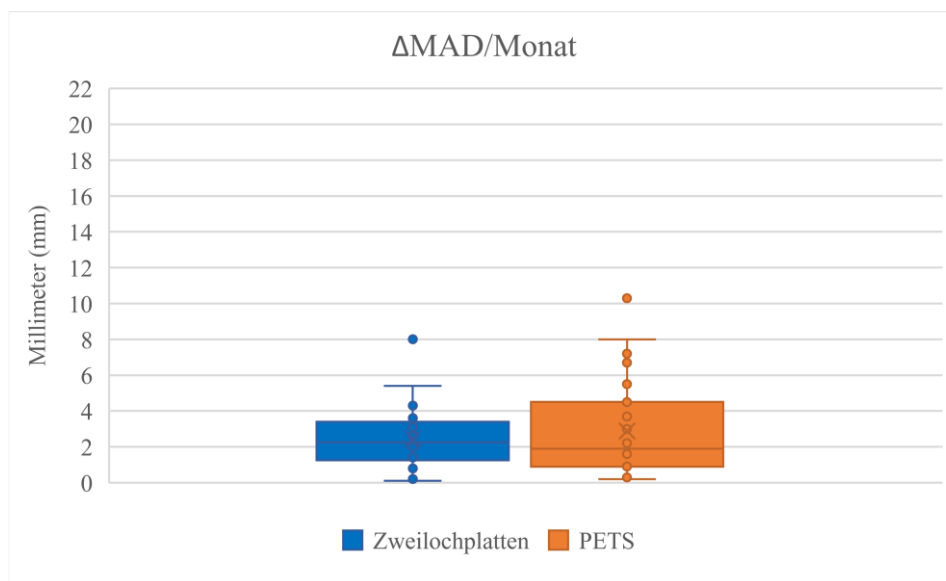


Abbildung 20:  $\Delta\text{MAD}/\text{Monat}$  in Millimeter. Blau: Zweilochplatten, Orange: PETS

In der Auswertung der Ergebnisse für die  $\Delta\text{mL DFA}/\text{Monat}$  ergab sich eine hohe Varianz innerhalb beider Implantatgruppen, vor allem in der PETS-Gruppe. Die durchschnittliche  $\Delta\text{mL DFA}/\text{Monat}$  bei den Zweilochplatten betrug  $0,61^{\circ}/\text{Monat}$  und bei den PETS  $0,64^{\circ}/\text{Monat}$ . Bei Prüfung der Signifikanz der Werte der  $\Delta\text{mL DFA}/\text{Monat}$  ergab der t-Test einen P-Wert von 0,77. Damit gab es keinen statistisch signifikanten Unterschied in

der monatlichen Änderung des mechanischen Gelenkwinkels mL DFA zwischen beiden Implantatgruppen. (vgl. Abb. 21; Anhang 2.1.2)

Der Mittelwert der  $\Delta$ mMPTA/Monat (vgl. Abb. 23) bei den Zweilochplatten betrug  $0,46^\circ$ /Monat und bei den PETS  $0,55^\circ$ /Monat. Die Streubreite innerhalb beider Gruppen war geringer als bei den Werten für die  $\Delta$ mL DFA/Monat. Es ermittelte sich ein P-Wert von 0,46. Damit war der Unterschied in der monatlichen Änderung des mechanischen Gelenkwinkels mMPTA zwischen beiden Implantatgruppen nicht statistisch signifikant. (vgl. Abb. 22; Anhang 2.1.3)

Die t-Tests für beide Gelenkwinkel wurden auf einem Signifikanzniveau von 5% durchgeführt.

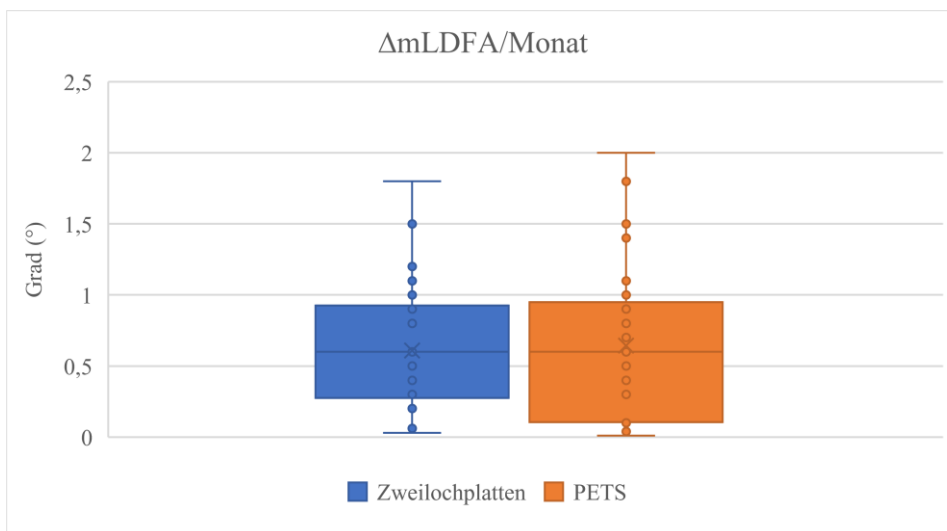


Abbildung 21:  $\Delta$ mL DFA/Monat in Grad. Blau: Zweilochplatten, Orange: PETS

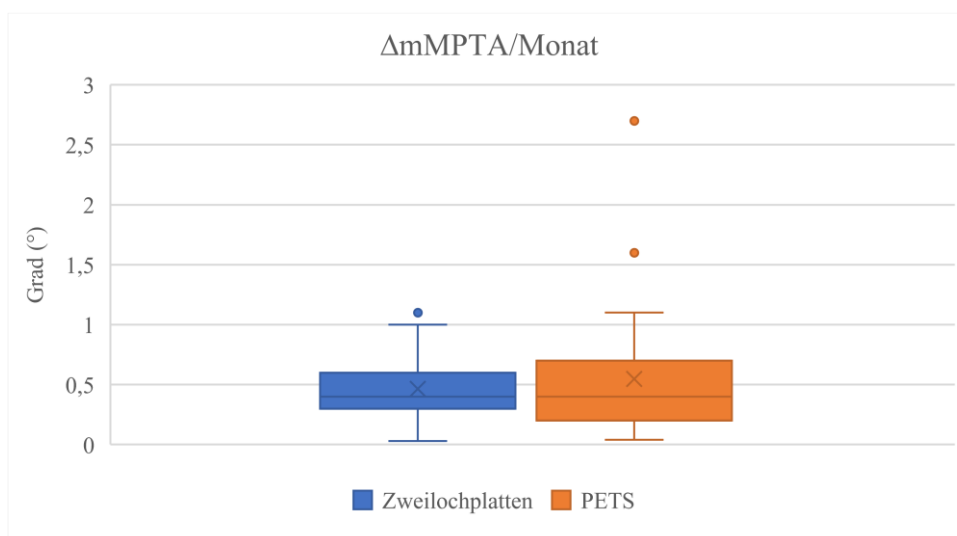


Abbildung 22:  $\Delta$ mMPTA/Monat in Grad. Blau: Zweilochplatten, Orange: PETS

## 6.2.2 Alter bei Implantation

Der unten dargestellte Boxplot zeigt die Verteilung des durchschnittlichen Implantationsalters bei den Platten- und Schraubenimplantaten in Jahren (vgl. Abb. 23). Das mittlere Implantationsalter bei den Zweilochplatten betrug 11,3 Jahre und bei den PETS 13,1 Jahre. Zur statistischen Auswertung wurde ebenfalls der Zweistichproben t-Test verwendet. Dieser ergab – bei einem Signifikanzniveau von 5 % - einen P-Wert von 0,005 und damit ein statistisch signifikantes Ergebnis. (vgl. Anhang 2.2)

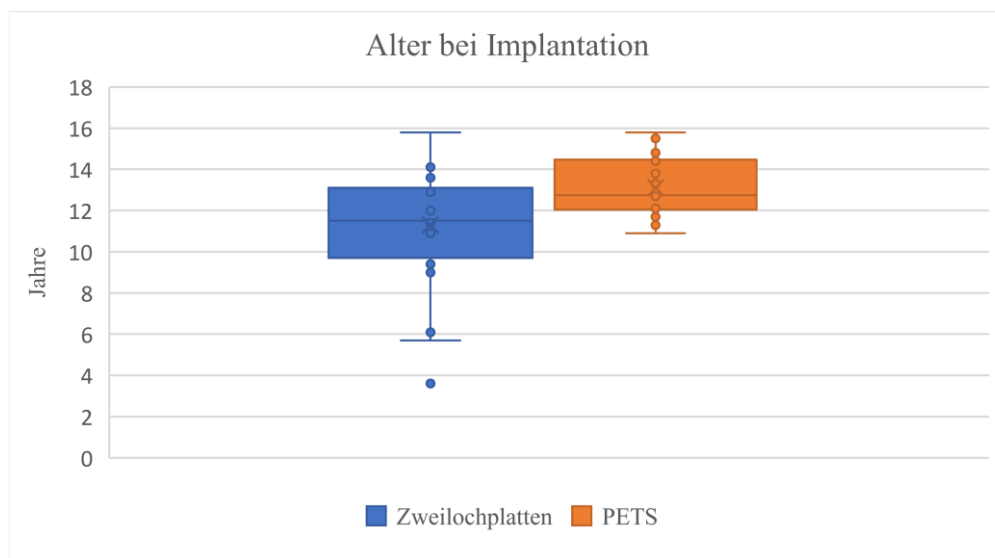


Abbildung 23: Alter bei Implantation in Jahren. Blau: Zweilochplatten, Orange: PETS

### 6.2.3 Therapiedauer

Die Abbildung 24 stellt die mittlere Therapiedauer in Monaten dar. Für die Zweilochplatten ergab sich eine durchschnittliche Therapiedauer von 14,6 Monaten und für die PETS von 10,0 Monaten. Es fiel eine ausgeprägte Streuung der Werte innerhalb beider Gruppen, insbesondere bei den Zweilochplatten auf. Bei einem Signifikanzniveau von 5 % ergab sich ein P-Wert von 0,048 und damit ein statistisch signifikantes Ergebnis. (vgl. Anhang 2.3)

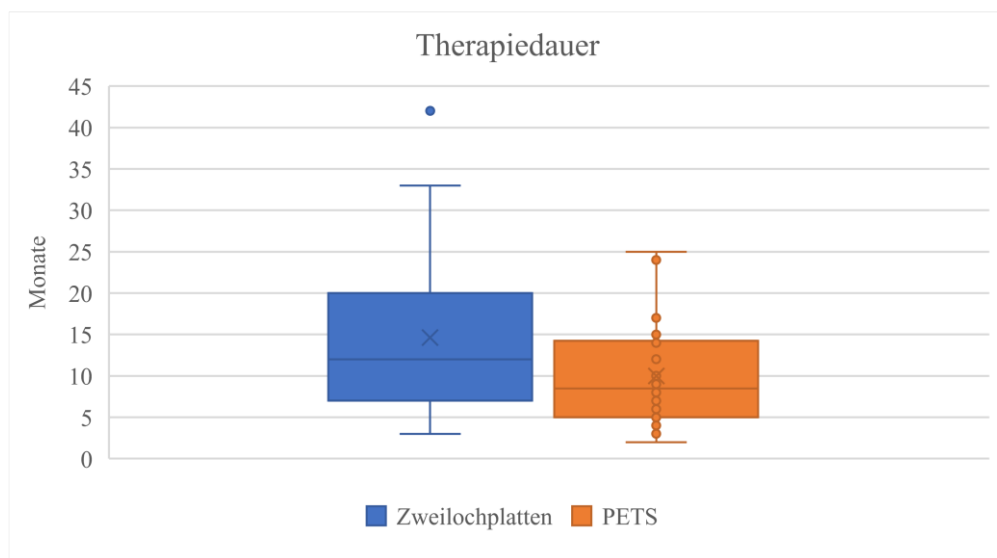


Abbildung 24: Therapiedauer in Monaten. Blau: Zweilochplatten, Orange: PETS

### 6.3 Komplikationen

Im Gesamtkollektiv der 44 Patienten wurden bei 24 Patienten Komplikationen erfasst (54,5%). Insgesamt wurden 35 Komplikationen gezählt. 17 Patienten hatten genau eine, vier Patienten hatten zwei, zwei Patienten hatten drei und ein Patient vier Komplikationen im Behandlungsverlauf.

Bei acht Patienten war eine Zusatz-Operation erforderlich. Diese bestanden aus sieben zusätzlichen wachstumslenkenden Eingriffen aufgrund eines bestehenden Achsfehlers nach der ersten Hemiepiphyseodese und einer Implantatrevision aufgrund einer fehlerhaften Implantatlage. Fünf von den sieben zusätzlichen achskorrigierenden Eingriffen wurden mit PETS und zwei davon mit Zweilochplatten durchgeführt. Bei der Implantatrevision wurden Zweilochplatten verwendet.

Die folgende Tabelle zeigt die Aufteilung der absoluten Häufigkeiten der 35 Komplikationen je nach Implantat auf die festgelegten Subkategorien (vgl. Tabelle 2).

	<b>Zweiloch platten (n=27)</b>	<b>PETS (n=22)</b>	<b>Gesamt</b>
A = Fehllindikation	7	2	<b>9</b>
B = Inkorrekte Implantatlage	3	0	<b>3</b>
C = Zeitliche Fehlplanung der Metallentfernung	7	1	<b>8</b>
D = Perioperative Komplikationen	6	3	<b>9</b>
E = Implantatversagen	0	6	<b>6</b>
<b>Gesamt</b>	<b>23</b>	<b>12</b>	<b>35</b>

Tabelle 2: Absolute Häufigkeiten der Komplikationen bezogen auf die Art des verwendeten Implantats

Neun Fälle, bestehend aus sieben Fällen in der Gruppe der Zweilochplatten und zwei Fällen in der Gruppe der PETS, wurden als Fehlindikation gewertet und der Kategorie A zugeordnet.

Bei zwei Fällen wurde eine Achskorrektur durchgeführt, obwohl sich die Werte der initial gemessenen Gelenkwinkel und der MAD im Normalbereich befanden. (vgl. Anhang 1.1.1, 1.1.2). In beiden Fällen kam es in der Konsequenz zu einer Überkorrektur, die nur in einem Fall durch eine zusätzliche Hemiepiphyseodese korrigiert wurde. In einem Fall wurde die Indikation zu spät gestellt (vgl. Anhang 1.1.3). Die Patientin war zum Zeitpunkt des Eingriffs 15,5 Jahre alt. Das verbleibende Wachstumspotenzial reichte nicht mehr aus, um die Fehlstellung vollständig zu korrigieren. In sechs Fällen passte die Insertion der Implantate nicht zum Ort der gemessenen Fehlstellung. Bei zwei Patienten wurden die Implantate nur tibial eingesetzt, obwohl auch der mL DFA beidseits pathologisch war (vgl. Anhang 1.1.4, 1.1.5). Bei beiden Patienten musste eine zusätzliche Hemiepiphyseodese durchgeführt werden mit Behandlung der femoralen Wachstumsfugen. Umgekehrt wurde in zwei Fällen die Fehlstellung nur femoral therapiert, obwohl die Korrektur aufgrund der gemessenen Gelenkwinkel auch tibial indiziert gewesen wäre (vgl. Anhang 1.1.6; Anhang 1.1.7). Aufgrund der nicht durchgeführten Simultanbehandlung von Femur und Tibia konnte mit dem Restwachstum bis zum Erreichen des Fugenschlusses keine Begradigung der Beinachse (MAD) erreicht werden. Bei einem Patienten (vgl. Anhang 1.1.8) kam es im Verlauf zu zwei Ereignissen, die der Kategorie A zugeordnet werden konnten. Zum einen erfolgte die Achskorrektur bei eigentlich beidseitiger Fehlstellung initial nur linksseitig. Erst in einer Folgeoperation wurde die rechte Seite behandelt. Zum anderen kam es nach der Metallentfernung zu einem Korrekturverlust der Achse des linken Beins, sodass die Indikation zur Achskorrektur erneut gegeben war. Letztendlich wurde aber keine erneute linksseitige Hemiepiphyseodese durchgeführt.

Zur Kategorie B gehörten alle Fälle mit einer inkorrekten Lokalisation der Implantate. Dieser Gruppe konnten drei Fälle zugeordnet werden.

Bei diesen drei Patienten, die allesamt mit Zweilochplatten behandelt wurden, war die Implantatlage nicht regelrecht. Bei einem Patienten erfolgte die Implantation der Platte zu weit ventral und wurde so belassen. Dies führte zur Entwicklung eines Genu recurvatum (vgl. Anhang 1.2.1). In zwei anderen Fällen (vgl. Anhang 1.2.2, 1.1.8) wurde

das Implantat zu nah an die Fuge platziert, wie die Röntgenaufnahme zeigte. Nur in einem dieser Fälle wurde die Implantatlage revidiert (vgl. 1.2.2).

Eine zeitliche Fehlplanung der Metallentfernung führte bei acht Patienten zu Komplikationen der Kategorie C.

Bei vier Patienten (vgl. Anhang 1.1.1, 1.3.1, 1.3.2, 1.1.2), die mit Zweilochplatten behandelt wurden, erfolgte eine Überkorrektur der Fehlstellung. Nur bei einem Patienten erfolgte die Korrektur des Fehlers durch eine zusätzliche Hemiepiphyseodese. Bei drei Patienten kam es zu einem Korrekturverlust nach Metallentfernung (Rebound) (vgl. Anhang 1.3.3; Anhang 1.1.8; Anhang 1.3.4). Nur bei zwei Patienten davon wurde dieses Rezidiv therapiert. In der PETS-Gruppe wurde ein Patient überkorrigiert und durch eine erneute Hemiepiphyseodese wieder begradigt (vgl. Anhang 1.3.5). In dieser Gruppe gab es keine Rebound-Fälle oder Unterkorrekturen.

In die Kategorie D wurden sämtliche perioperative Komplikationen eingeordnet. In der vorliegenden Studie konnten neun Fälle zu dieser Kategorie gezählt werden.

In der Gruppe der Zweilochplatten gab es drei Fälle mit postoperativen Wundheilungsstörungen und drei Fälle mit anhaltenden Schmerzen im Bereich des Operationszugangs. In der PETS-Gruppe gab es einen Fall mit einer etwas verbreiterten Narbenheilung und zwei Fälle mit postoperativ andauernden Dysästhesien.

Zur Kategorie E wurden alle Fälle gezählt, die eine Form des Implantatversagens hatten. Hier gab es in dieser Studie sechs Fälle.

Diese sechs Fälle traten alle in der PETS-Gruppe auf. Es gab bei den Schrauben in sechs Fällen relevante Probleme bei der Metallentfernung. Zweimal sind Schraubenteile abgebrochen, einmal war die Anwendung spezieller Instrumente notwendig, um das Implantat komplett zu entfernen. In den anderen vier Fällen war die Schraube teilweise oder ganz vom Knochen überwachsen, sodass in einem Fall der Operationszugang deutlich erweitert werden musste.

Die untersuchte Stichprobengröße der Zweilochplatten umfasste 27 Fälle, die der PETS umfasste 22 Fälle. Die folgende Tabelle zeigt die relativen Häufigkeiten der Komplikationen bezogen auf diese Gesamtzahlen (vgl. Tabelle 3).

	<b>Zweiloch platten (n=27)</b>	<b>PETS (n=22)</b>	<b>Gesamt</b>
A = Fehlindikation	0,26	0,09	<b>0,35</b>
B = Inkorrekte Implantatlage	0,11	0	<b>0,11</b>
C = Zeitliche Fehlplanung der Metallentfernung	0,26	0,05	<b>0,31</b>
D = Perioperative Komplikationen	0,22	0,14	<b>0,36</b>
E = Implantatversagen	0	0,27	<b>0,27</b>
	<b>0,85</b>	<b>0,55</b>	<b>1,4</b>

Tabelle 3: Relative Häufigkeiten der Komplikationen bezogen auf die Gesamtzahl der Fälle der jeweiligen Implantatgruppe

Die folgende Grafik veranschaulicht die prozentuale Verteilung der implantatbezogenen Komplikationen jeder Kategorie (vgl. Abb. 25).

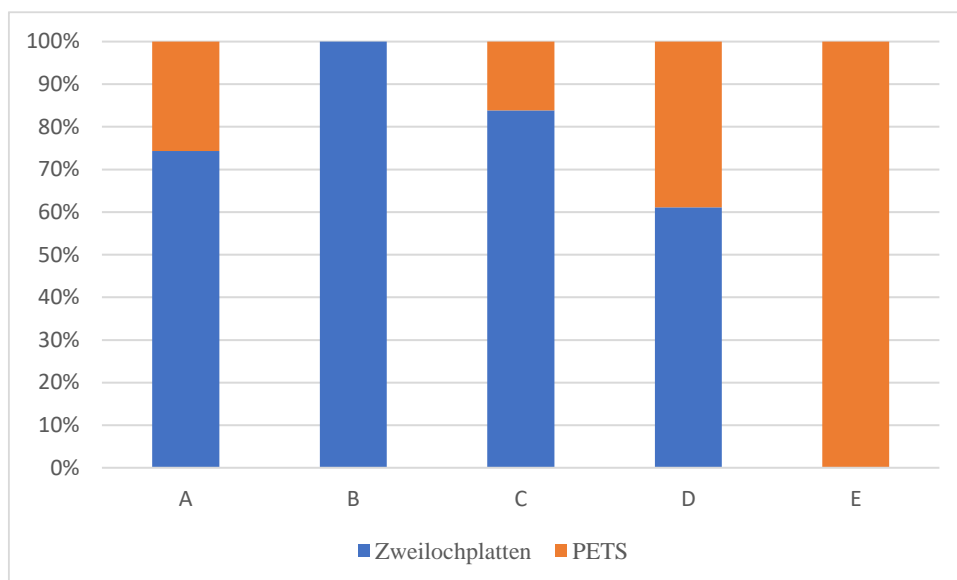


Abbildung 25: Prozentuale Verteilung der Komplikationen jeder Kategorie bezogen auf das verwendete Implantat



## **7 Diskussion**

### **7.1 Interpretation und Beurteilung der Ergebnisse des Korrektoreffekts von Zweilochplatten und PETS**

#### **7.1.1 Änderung der mechanischen Beinachse und der Gelenkorientierungswinkel**

Beim Vergleich der Ergebnisse der Änderung der mechanischen Beinachse ( $\Delta$ MAD/Monat) zwischen der Gruppe der Zweilochplatten und der Gruppe der PETS ergab sich kein statistisch signifikanter Unterschied.

Daraus kann abgeleitet werden, dass sich der durchschnittliche Korrektoreffekt beider Implantate nicht signifikant unterschied. Mit den PETS konnten in unserer Studie ein guter Korrektoreffekt erzielt werden, der mit dem der Zweilochplatten vergleichbar ist.

Bei der Auswertung der Ergebnisse für die  $\Delta$ MAD/Monat zeigte sich eine deutliche Streubreite der Werte bei den PETS. Das bedeutet, es gab bei den PETS sowohl Fälle mit überdurchschnittlich hoher Korrekturgeschwindigkeit als auch Fälle mit unterdurchschnittlich geringer Korrekturgeschwindigkeit.

Abbildung 23 zeigt, dass die Patienten der PETS-Gruppe zum Zeitpunkt der Implantation im Durchschnitt 13,1 Jahre alt waren und damit um knapp zwei Jahre älter als die der Zweilochplatten-Gruppe (11,3 Jahre). So fiel die Behandlungszeit bei einigen Patienten des PETS-Kollektivs in eine Entwicklungsphase, die häufig von dem pubertären Wachstumsspur geprägt ist (Kromeyer-Hauschild 2001; Charles et al. 2005). Aufgrund der hohen Wachstumsgeschwindigkeit kann es hier zu einer schnelleren Korrektur der Fehlstellung kommen. Andererseits waren auch Jugendliche in dieser Gruppe, bei denen die Wachstumsfugen schon fast geschlossen waren (Vogt et al. 2014). Bei diesen könnte eine Begradigung der Beinachse sehr langsam ablaufen oder sogar ausbleiben. Die dadurch unterschiedlich resultierenden Wachstumsgeschwindigkeiten können die Streubreite der Ergebnisse der  $\Delta$ MAD/Monat innerhalb der PETS-Gruppe erklären.

Die Ergebnisse der Gruppe der Zweilochplatten bezüglich der Änderung der mechanischen Beinachse zeigten eine geringe Streubreite. Das bedeutet, dass die Korrekturgeschwindigkeit der Zweilochplatten in unserer Studie keine großen Schwankungen aufwies.

Das durchschnittliche Implantationsalter der Patienten der Zweilochplatten-Gruppe lag bei 11,3 Jahren. Der Großteil der Kinder dieses Kollektivs befand sich entwicklungsbedingt in einer Phase, die von einem konstanten Wachstum geprägt ist

(Kromeyer-Hauschild 2001). Das kann die geringe Streubreite und damit konstante Korrekturgeschwindigkeit in dieser Gruppe erklären.

Die Ergebnisse der monatlichen Änderung der mechanischen Gelenkorientierungswinkel mL DFA und mMPTA ergab jeweils keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der Gruppe der Zweilochplatten und der Gruppe der PETS.

Das bedeutet wiederum, dass vergleichbar mit dem Ergebnis der  $\Delta$ MAD/Monat sich der durchschnittliche Korrektoreffekt beider Implantate in der vorliegenden Studie nicht signifikant unterschied und die PETS einen vergleichbaren Korrektoreffekt wie die Zweilochplatten aufwiesen.

In der PETS-Gruppe ergab sich für beide Gelenkorientierungswinkel mL DFA und mMPTA eine hohe Streubreite der Einzelwerte. Wie bei den Ergebnissen der  $\Delta$ MAD/Monat kann der pubertäre Wachstumsspur wieder zu einer schnellen Korrektur der Fehlstellung führen, bei fast geschlossenen Wachstumsfugen kann die Korrektur langsam erfolgen oder inkomplett sein.

Das Kollektiv der Zweilochplatten zeigte bei den Ergebnissen der  $\Delta$ mL DFA/Monat und  $\Delta$ mMPTA/Monat eine geringe Varianz der Ergebnisse. Das spricht vergleichbar mit den Werten der  $\Delta$ MAD/Monat für eine konstante Korrekturgeschwindigkeit, welche auf die altersbedingt gleichmäßige Wachstumsgeschwindigkeit der Patienten dieses Kollektivs zurückgeführt werden kann.

Insgesamt konnten mit beiden Implantaten gute Ergebnisse in der Korrektur von Achsfehlern erreicht werden. Die Ergebnisse der Korrekturgeschwindigkeit sind mit den bestehenden Werten aktueller Studien vergleichbar (Park et al. 2018).

### **7.1.2 Alter bei Implantation**

In der vorliegenden Studie waren die Patienten, die ein Zweilochplatten-Implantat erhielten, im Durchschnitt 11,3 Jahre alt und die Patienten, die ein Schrauben-Implantat erhielten, um knapp zwei Jahre älter (13,1 Jahre). Laut statistischer Auswertung ergab sich hier ein signifikanter Unterschied.

In der Gruppe der Zweilochplatten waren mitunter sehr junge Patienten. Eine operative Behandlung von Beinachsenfehlstellungen in sehr jungen Jahren kann beispielsweise notwendig sein, wenn die Fehlstellung sehr stark ausgeprägt ist. Ein eindruckliches Beispiel war ein Junge, der an einer epiphysären Dysplasie litt (vgl. Anhang 1.4.1). Er erhielt schon mit 3,6 Jahren eine Wachstumslenkung mittels Zweilochplatten. Trotz seiner Grunderkrankung konnte ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden (vgl. Anhang 3.1, Fall 18). Bei einem weiteren Fall wurde ein Morbus Blount mit varischer Veränderung der Beinachse diagnostiziert. Daher erfolgte bereits mit 5,7 Jahren eine wachstumslenkende Behandlung (vgl. Anhang 1.4.2). Ein junger Patient wies eine dysplastische Veränderung der Femurkondylen auf und erhielt daher mit 6,1 Jahren bereits eine Hemiepiphyseodese (vgl. Anhang 1.4.3).

2007 beschrieb Stevens den erfolgreichen Einsatz von Zweilochplatten bei sehr jungen Kindern. Als Beispiele führte er die erfolgreiche Korrektur einer starken einseitigen Varusfehlstellung aufgrund einer femoralen Dysplasie bei einem 19 Monate alten Mädchen an. Die Begradigung der Beinachse war mit vier Jahren erreicht. Eine weitere junge Patientin seiner Studie wurde im Alter von 21 Monaten aufgrund einer ausgeprägten beidseitigen Varusfehlstellung bedingt durch eine metaphysäre Chondrodysplasie Typ Schmid mit Zweilochplatten behandelt. Auch hier konnte nach elf Monaten Behandlung eine deutliche Korrektur der Deformität erreicht werden. (Stevens 2007; Abb. 26)

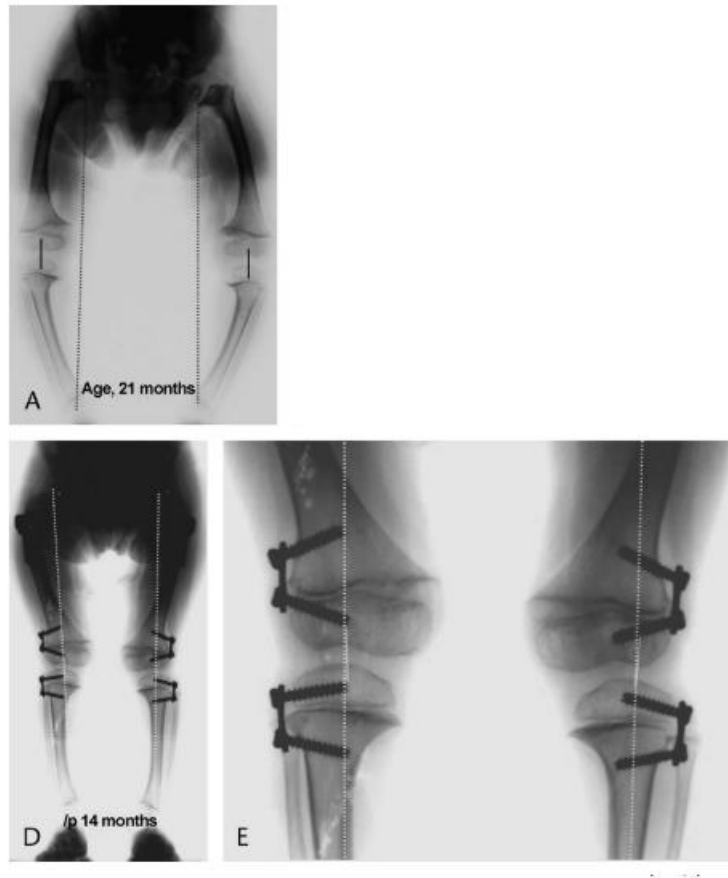


Abbildung 26: A: 21 Monate altes Mädchen mit ausgeprägter beidseitiger Varusfehlstellung bei metaphysärer Chondrodysplasie Typ Schmid; B, C: Veränderung der Beinachse durch Einsatz von Zweilochplatten zur Wachstumslenkung (Stevens 2007)

Burghardt et al. beschrieben den erfolgreichen Einsatz von Zweilochplatten zur Korrektur von Beinachsenfehlstellungen bei Kindern unter fünf Jahren (Burghardt et al. 2008).

In der festen Verankerung der Schrauben der Zweilochplatte in der kindlichen Epiphyse wird der Grund für den guten Halt gesehen. Die unreifen Epiphysen bei jungen Kindern besitzen nur einen kleinen Knochenkern und bestehen noch weitestgehend aus Knorpel. Die Schrauben garantieren einen festen Sitz in der kindlichen Epiphyse und minimieren das Risiko aus dem weichen Knorpelgewebe auszuwachsen. (Stevens 2007; Burghardt et al. 2008)

Da die PETS schräg durch die Epiphyse und nicht wie die Zweilochplatte parallel dazu eingesetzt werden, ist der Halt der PETS abhängig von der Größe der knöchernen Epiphyse. Bei kleinen Kindern sind die Knochenkerne womöglich nicht groß genug, um eine zuverlässige Verankerung der PETS-Schraube zu gewährleisten.

Die PETS wurden in der vorliegenden Studie bei Kindern mit dem durchschnittlichen Alter von 13,1 Jahren verwendet.

Der Grund für den Einsatz der PETS bei älteren Kindern ist die bei dieser Methode stattfindende Verletzung der Wachstumsfuge. Es existieren unterschiedliche Ansichten dazu, ob die Fugenauffektion nach der Implantatentfernung Wachstumsstörungen verursachen kann (Nouth/Kuo 2004; Khoury et al. 2007). Die Konsequenz von Wachstumsstörungen ist bei älteren Kindern, die nach der Metallentfernung nur noch ein geringes Restwachstum haben, kleiner. Das spricht dafür diese Methode für die Zielgruppe der älteren Kinder zu empfehlen. Es kann jedoch angenommen werden, dass es nach Metallentfernung einige Zeit dauert bis sich pathologische Knochenbrücken ausbilden, die das weitere Wachstum beeinträchtigen. Bis dahin werden wahrscheinlich die meisten Patienten ausgewachsen sein, was dieses Risiko relativiert. Die Follow-Up Periode dieser Studie war zu kurz, um zu dieser Problematik verlässliche Aussagen zu treffen.

In der Studie von Park et al. (2018) wurde der Einsatz von Zweilochplatten und PETS in der Therapie von Patienten mit idiopathischem Genu valgum verglichen. Die PETS wiesen in ihrem Kollektiv eine schnellere Korrekturgeschwindigkeit auf als die Zweilochplatten. Sie argumentierten dieses Resultat mit der Konstruktionsweise der Zweilochplatten. Der wachstumshemmende Effekt setzt nach Implantation erst verzögert ein, da durch das weitere Wachstum erst eine Spannung aufgebaut werden muss, die über die Schrauben auf die Platte weitergeleitet wird. Aus diesem Grund hielten sie den Einsatz von PETS vor allem bei Patienten, die sich kurz vor der Skelettreife befinden und bei denen schnell eine Korrektur erfolgen soll, für sinnvoll. (Park et al. 2018).

### 7.1.3 Therapiedauer

Für das Patientenkollektiv der Zweilochplatten ergab sich eine mittlere Behandlungsdauer von 14,6 Monaten und für die Gruppe der PETS lag diese bei 10,0 Monaten. Dieser Unterschied war laut der statistischen Auswertung signifikant. Damit dauerte die Therapie mit den Zweilochplatten im Schnitt ungefähr fünf Monate länger.

Innerhalb beider Gruppen fielen deutliche interindividuelle Unterschiede bezüglich der Therapiedauer auf.

Diese Tatsache deutet darauf hin, dass die Korrekturgeschwindigkeit neben dem verwendeten Implantat noch von weiteren Faktoren, wie zum Beispiel der Wachstumsgeschwindigkeit und dem Ausmaß der Deformität beeinflusst wird.

Der Unterschied der Therapiedauer zwischen beiden Gruppen und die deutliche Streubreite innerhalb beider Gruppen kann durch unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeiten und damit unterschiedliche Korrekturgeschwindigkeiten der Fehlstellung erklärt werden. Die Wachstumsgeschwindigkeit hängt vor allem vom Alter der Patienten ab.

In der PETS-Gruppe waren im Durchschnitt ältere Kinder. Kommt es bei einliegenden Implantaten zum Beispiel entwicklungsbedingt zu einem Wachstumsschub, kann es zu einer schnelleren Korrektur der Fehlstellung kommen, andererseits führt eine späte Behandlung bei nahezu geschlossenen Fugen zu einer potenziell inkompletten Korrektur. So könnten die Unterschiede der Behandlungsdauer in dieser Gruppe erklärt werden.

Bei der Gruppe der Zweilochplatten waren teils Patienten dabei, die sich aufgrund ihres Alters schon im pubertären Wachstumsschub befanden, als auch jüngere Patienten, die mit konstanter Geschwindigkeit wuchsen. Das könnte ein Grund für die Streubreite der Therapiedauer innerhalb dieser Gruppe gewesen sein.

Die im Durchschnitt um fünf Monate kürzere Behandlungszeit in der PETS-Gruppe könnte bedeuten, dass sich altersbedingt in diesem Kollektiv mehr Patienten in einem Wachstumsschub befanden als in der Gruppe der Zweilochplatten, in dem die Patienten um knapp zwei Jahre jünger waren.

Neben altersbedingten Unterschieden der Wachstumsgeschwindigkeit können zusätzlich auch manche Erkrankungen durch eine Beeinträchtigung der Fugenaktivität die Wachstumsgeschwindigkeit beeinflussen und sie pathologisch mindern. Als Beispiel können hier zwei weibliche Studienpatienten aufgeführt werden, die an der

Stoffwechselerkrankung Cystinose litten. Die eine Patienten erhielt zunächst eine Hemiepiphyseodese mittels Zweilochplatten, die beidseits femoral implantiert wurden. Die Therapiedauer betrug 42 Monate. Nach dieser Zeit wurde bei fehlendem Therapieansprechen zusätzlich für 15 Monate PETS tibial beidseits eingesetzt. Auch diese Behandlung war nicht erfolgreich. Die Therapiedauer der anderen Patientin mittels PETS betrug 24 Monate (vgl. Anhang 1.1.3). Beide konnten trotz überdurchschnittlich langer Behandlungsdauer am Ende keine gerade Beinachse erreichen (vgl. Anhang 3.1, Fall 48, Fall 49). Bei zwei weiteren Patienten überschritt die Behandlungsdauer die Durchschnittswerte ebenfalls deutlich. Der eine von beiden litt an einer Pseudoachondroplasia. Er erhielt eine Hemiepiphyseodese mit PETS und die Behandlungsdauer betrug 25 Monate (vgl. Anhang 1.1.7). Der andere der Beiden wies eine valgusierende Dysplasie der Femurkondylen auf. Er wurde mit Zweilochplatten für 32 Monate behandelt (vgl. Anhang 1.4.3).

Yilmaz et al. beleuchteten in ihrer Studie 2014 den Einsatz von Eight-Plates zur Begradigung von Beinachsenfehlstellungen bei Kindern mit einer Skelettdysplasie. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die Zweilochplatten auch in diesen Fällen einen festen Halt in der erkrankungsbedingt veränderten Epiphyse aufwiesen und effektiv wirken konnten. (Yilmaz et al. 2014)

Ähnliche Erkenntnisse gewannen auch schon Boero et al. 2011 in Ihrem Vergleich der Wachstumslenkung mit Zweilochplatten an normalen und pathologisch veränderten Wachstumsfugen. (Boero et al. 2011)

Daneben beeinflusst auch das Ausmaß der Deformität die Therapiedauer. In der Gruppe der Zweilochplatten gab es viel mehr Kinder mit einer präoperativen mechanischen Achsenabweichung  $>30$  mm als in der PETS-Gruppe. Dies könnte eine Erklärung für die im Durchschnitt fünf Monate kürzere Behandlungszeit mit PETS sein. Es gab innerhalb der PETS-Gruppe den Fall, dass eine Patientin (12,2 Jahre) mit geringer, idiopathisch bedingter Valgusfehlstellung (präoperativ rechts:  $mLDFA=83,6^\circ$ , links:  $mLDFA=83,7^\circ$ ) eine Behandlungsdauer von drei Monaten hatte (vgl. Anhang 3.1, Fall 31). Jedoch hatte im Vergleich dazu eine Patientin (11,3 Jahre) mit ebenfalls geringer idiopathisch bedingter Valgusfehlstellung (präoperativ rechts:  $mLDFA=83,9^\circ$ , links:  $mLDFA=85,8^\circ$ ) eine Behandlungsdauer von 15 Monaten (vgl. Anhang 3,1, Fall 35). Laut Paley besteht eine pathologische Valgusfehlstellung ab einem  $mLDFA <85,0^\circ$  (Paley 2000). Eine gering ausgeprägte Fehlstellung bedeutete daher nicht automatisch eine kürzere Behandlungsdauer.

## **7.2 Interpretation und Beurteilung der Ergebnisse des Komplikationspotenzials von Zweilochplatten und PETS**

Unsere Studie vergleicht das Komplikationspotenzial von Zweilochplatten und PETS und zeigt Schwachstellen der jeweiligen Implantattypen. Die Überlegungen sollen helfen diese Probleme in Zukunft zu minimieren, um die Wachstumslenkung als Methode zur Korrektur von Beinachsenfehlstellungen in Zukunft noch effektiver zu machen.

Im Gesamtkollektiv der 44 Patienten wiesen etwas mehr als die Hälfte der eingeschlossenen Patienten mindestens eine Komplikation im Behandlungsverlauf auf (54,5%). Insgesamt wurden 35 Komplikationen gezählt. 17 Patienten hatten genau eine, vier Patienten hatten zwei, zwei Patienten hatten drei und ein Patient vier Komplikationen. Durchschnittlich waren es 1,5 Komplikationen pro Patienten.

Daraus lässt sich ableiten, dass in der vorliegenden Studie die Komplikationsrate im untersuchten Patientenkollektiv sehr hoch war. Gründe dafür könnten sein:

1. Die vorliegende Studie fokussiert sich auf Probleme trotz am Ende guten Ergebnisses.
2. Viele der bisher publizierten Daten zu diesem Thema stammen aus kinderorthopädischen Zentren mit erfahrenen Ärzten im Bereich der Wachstumslenkung, die diese Eingriffe häufiger durchführen als Kinderorthopäden an Zentralkrankenhäusern oder allgemeinen orthopädisch-chirurgischen Einrichtungen.
3. In den Studien aus kinderorthopädischen Zentren stehen womöglich die Ergebnisse der Wachstumslenkung mehr im Vordergrund als aufgetretene Komplikationen.

Bei neun der 35 Komplikationen ereigneten sich Fehler im Rahmen der Indikationsstellung (Kategorie A).

Um die Behandlungsindikation einer Beinachsenfehlstellung richtig einschätzen zu können, sind sorgfältig durchgeführte Untersuchungen in der präoperativen Planungsphase wichtig. Durch die radiologische Auswertung sollte genau eruiert werden, ob eine Fehlstellung vorhanden ist und von welchem Knochen sie ausgeht. Die behandelnden Ärzte sollten im Umgang mit der Vermessungssoftware intensiv geschult werden, damit in der Bestimmung der Achsen- und Winkelverhältnisse keine Fehler passieren. Bezüglich des Interventionszeitpunkts empfiehlt es sich zur Bestimmung des



Restwachstums ergänzend das Knochenalter des Patienten zu berechnen. Doch nicht immer liegt die Schuld bei diesen Fehlern beim Operateur. Bei manchen Patienten erfolgt eine kinderorthopädische Vorstellung sehr spät, wenn sich die Kinder bereits kurz vor dem Wachstumsende befinden. Daher liegt es auch in der Verantwortung der Eltern und des Kinder-/Hausarztes Beinachsenfehlstellungen frühzeitig zu erkennen und somit eine rechtzeitige Behandlung einzuleiten. In solchen Fällen ist eine korrigierende Osteotomie im Erwachsenenalter gegebenenfalls sinnvoller. Erfolgt die Vorstellung jedoch rechtzeitig, sollte eine behandlungsbedürftige Fehlstellung vom Kinderorthopäden dann auch verlässlich erkannt und therapiert werden. Bei Unsicherheit des Arztes und zunächst Beobachtung der weiteren Entwicklung, kann der richtige Zeitpunkt womöglich verpasst werden.

In dieser Studie gab es drei Fälle mit einer fehlerhaften Lokalisation der Implantate nach dem Einsetzen (Kategorie B). In allen drei Komplikations-Fällen der Kategorie B wurde eine Zweilochplatte verwendet.

Um eine korrekte Implantatlage zu gewährleisten, spielt die Bildgebung eine wichtige Rolle. Diese sollte intraoperativ vor und nach der Platzierung sowohl a.p. als auch in der lateralen Sicht erfolgen. Eine fehlerhafte Position kann so frühzeitig erkannt und revidiert werden. Die Angst mancher jungen Chirurgen das Implantat zu nah an der Gelenkoberfläche einzusetzen, kann womöglich zu einer zu epiphysennahen Lage führen. Daher sollte das Einsetzen durch erfahrene Ärzte erfolgen oder zumindest begleitet werden. Im Verlauf sollten regelmäßige Follow-Up-Untersuchungen durchgeführt werden, bei denen eine radiologische Kontrolle der Implantatlage durchgeführt werden soll. Fällt dabei eine Fehllage auf, sollte diese umgehend revidiert werden.

Eine zeitliche Fehlplanung bei der Metallentfernung (Gruppe C) trat in acht Fällen auf.

Auch bei der Einschätzung des richtigen Zeitpunkts für die Explantation sind regelmäßige klinische und radiologische Follow-Up-Untersuchungen die wichtigste Maßnahme, um Fehlern vorzubeugen. Gründe für eine zu späte Metallentfernung, die zur Überkorrektur der ursprünglichen Fehlstellung führt, können sowohl auf Arzt- als auch auf Patientenseite liegen. Wird die Beinachse des Patienten nicht regelmäßig kontrolliert, kann der richtige Zeitpunkt für die Explantation verpasst werden. Hier liegt es sowohl in der Pflicht des Arztes den Patienten über die Notwendigkeit von Verlaufskontrollen zu informieren als auch in der Compliance des Patienten beziehungsweise der Eltern diese Kontrolltermine gewissenhaft wahrzunehmen. Um eine zu frühe Metallentfernung zu vermeiden, sollte sich der Arzt nicht nur auf die klinische Einschätzung verlassen. Daher

gehören radiologische Kontrollen in bestimmten Abständen im Verlauf unbedingt dazu. Vor allem bei jungen Patienten, die nach der Metallentfernung noch ein Restwachstum haben, sollte die Beinachse auch nach Explantation weiter beobachtet werden, um einen womöglich einsetzenden Rebound nicht zu übersehen.

Stevens berichtete 2007 über das Rebound-Phänomen beim Einsatz von Eight-Plates zur Wachstumslenkung. Bei zwei Patienten seines Studienkollektivs konnte er nach der Metallentfernung bei begradigter Fehlstellung eine Korrekturverlust beobachten, der so ausgeprägt war, dass sie eine weitere Hemiepiphysodese benötigten. (Stevens 2007)

Diese Fälle gab es auch in unserer Studie.

Farr et al. beleuchteten 2018 welche Faktoren einen Rebound begünstigen. Sie kamen zu dem Schluss, dass Patienten, die noch mindestens ein Jahr Restwachstum aufwiesen, ein größeres Risiko für ein Rebound-Phänomen hatten. (Farr et al. 2018)

In dieser Studie gab es mehr Rebound-Fälle bei den Patienten, die mit Zweilochplatten behandelt wurden. Das erscheint nachvollziehbar, da das Patientenkollektiv der Zweilochplatten durchschnittlich zwei Jahre jünger war als das der PETS und somit nach Metallentfernung in der Regel noch mehr Restwachstum aufwies.

In der Gruppe der perioperativen Komplikationen (Kategorie D) gab es sechs Ereignisse bei den Zweilochplatten und drei bei den PETS.

Die PETS wird in der Literatur als minimalinvasive Methode mit günstigem Nebenwirkungsprofil beschrieben, durch die nur kleine Narben entstehen. Damit können gute kosmetische Ergebnisse erzielt werden. (Metaizeau et al. 1998; Stevens 2006; Khoury et al. 2007; De Brauwer/Moens 2008; Ghanem et al. 2011)

Die geringere Anzahl an postoperativen Wundheilungsstörungen bei den PETS in unserer Studie kann eventuell durch die minimalinvasive Applikationsart erklärt werden.

In der Studie konnten ausschließlich für die PETS Ereignisse eines Implantatversagens nachgewiesen werden (Kategorie E).

Diese bestanden ausschließlich aus Fällen, bei denen es zu Schwierigkeiten bei der Metallentfernung kam, wie Schraubenbrüchen oder ein zu tiefer Sitz der Schraube, sodass diese teilweise von Knochen überwachsen war. Aus diesem Grund scheint es wichtig zu sein, die Schraube nicht zu tief in den Knochen einzudrehen. Eingewachsene Schrauben können den Einsatz spezieller Extraktionssets oder die Erweiterung des Operationszugangs erfordern, wie es bei einem Patienten in dieser Studie der Fall war.

Das kann zu einer Verlängerung der Operationszeit führen und das Auftreten von Kollateralschäden und Komplikationen begünstigen. Allerdings erscheint es sinnvoll sowohl bei den PETS als auch bei den Platten die Schrauben auch nicht zu weit überstehen zu lassen, sonst kann es womöglich in der Heilungsphase zu Nervenirritationen und Missempfindungen im Sinne von Taubheitsgefühlen und Schmerzzuständen und im schlimmsten Fall auch Bewegungseinschränkungen aufgrund der Materialprominenz kommen.

Ein in der Literatur empfohlener Überstand der Schraubenköpfe von circa 5 mm scheint sinnvoll zu sein, um sowohl Missempfindungen aufgrund der Materialprominenz als auch Probleme bei der Metallentfernung wegen eines zu festen Sitzes der Schraube zu vermeiden (Metaizeau et al. 1998; Nouth/Kuo 2004). Die Kenntnis der richtigen Lage des Schraubenkopfes erfordert ein gewisses Maß an Erfahrung des Operateurs.

In der Forschung wurde bezüglich der Komplikationen bei Wachstumslenkung mit den Zweilochplatten häufiger das Thema Implantatversagen behandelt. Burghardt et al. berichteten 2008 über einen komplikationsarmen Einsatz der Zweilochplatten in ihrem Patientenkollektiv. Es konnten unter anderem weder Materialbrüche noch ein Auswachsen der Eight-Plates aus ihrer ursprünglichen Position beobachtet werden. (Burghardt et al. 2008)

Auch Danino et al. verzeichneten 2018 in Ihrer Studie wenig Komplikationen beim Einsatz der Eight-Plates zur Achskorrektur (Danino et al. 2018).

Laut Burghardt et al. 2010 scheinen jedoch übergewichtige Kinder, die unter dem Morbus Blount litten, ein besonderes Risiko für ein Materialversagen der Eight-Plates zu haben (Burghardt et al. 2010). Auch Schroerlucke et al. berichteten 2009 vereinzelt von Schraubenbrüchen bei der Verwendung von Eight-Plates bei Patienten mit Morbus Blount (Schroerlucke et al. 2009).

Ein Implantatversagen bei den Zweilochplatten konnten in unserem Kollektiv nicht beobachtet werden.

## **7.3 Limitationen der Studie und Schlussfolgerungen**

### **7.3.1 Ausschlussquote und Vermessungsmethode**

Ein grundlegendes Problem der Studie war die hohe Ausschlussquote. Ein größeres Patientenkollektiv hätte die Aussagekraft der vorliegenden Studie noch erhöhen können.

Ein Grund dafür war die schlechte Verwertbarkeit der Röntgenbilder aufgrund von mangelnder Qualität.

In einigen Fällen waren die Aufnahmen überbelichtet, sodass einige Skelettstrukturen schwer beurteilbar waren. Bei anderen Patienten war zum Beispiel aufgrund erkrankungsbedingter Kontrakturen im Rahmen einer idiopathischen Zerebralparese die korrekte Positionierung der Beine nicht möglich. Eine inkorrekte Ausrichtung des Beines oder der Beine kann unter Umständen dazu führen, dass wesentliche Knochenorientierungspunkte schwer zu beurteilen sind.

Es gab auch Fälle, bei denen Röntgenbilder fehlten. Gründe dafür könnte der Versuch gewesen sein den Einsatz von Röntgenstrahlung bei Kindern zu verringern, oder die externe Anfertigung von Bildern. Unter der Annahme, dass die Bildgebung nicht durchgeführt wurde und die Behandlung auf klinischer Diagnostik basierte, lässt sich keine Aussage über eine korrekte Indikationsstellung treffen.

Zudem muss beachtet werden, dass die Vermessung der Winkel und Achsen manuell erfolgte. Trotz größter Bemühungen um eine exakte Messmethode und einer Messwiederholung können Ungenauigkeiten bei einzelnen Werten nicht ausgeschlossen werden.

### **7.3.2 Multifaktorialität**

In der vorliegenden Studie sind teilweise deutliche Schwankungen des Korrektoreffekts beziehungsweise der Korrekturgeschwindigkeit innerhalb beider Patientenkollektive erkennbar. Dies führte zu der Überlegung, welche Faktoren neben der Wahl des Implantats für den Korrekturerfolg verantwortlich sein könnten. Ein Kenntnis dieser Einflussfaktoren ist wichtig für den Therapieerfolg. Die Wachstumsgeschwindigkeit ist die wesentliche Variable, die die Korrekturgeschwindigkeit beeinflusst.

Diese unterliegt zum einen entwicklungsbedingten Schwankungen. Dazu zählt zum Beispiel der pubertäre Wachstumsschub. Zum anderen kann die Wachstumsgeschwindigkeit auch bei im Rahmen von Grunderkrankungen veränderten Wachstumsfugen verringert sein.

## 8 Zusammenfassung

Die temporäre Hemiepiphyseodese stellt heutzutage den Goldstandard in der Behandlung von Beinachsenfehlstellungen im Wachstumsalter dar. Achsfehler der unteren Extremität können idiopathisch sein oder sekundär im Rahmen von Grunderkrankungen oder nach Knochenbrüchen auftreten. Bleibt die Deformität unbehandelt, so können durch die Fehlbelastung Langzeitschäden wie ein verfrühter Gelenkverschleiß entstehen.

Zur Wachstumslenkung existieren verschiedene Implantattypen. Ziel der Studie war ein Vergleich des Korrektoreffekts und des Komplikationspotenzials der klinisch erprobten Zweilochplatten-Implantate mit der PETS-Methode, die in der Literatur bisher wenig behandelt wurde.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Veränderung der Beinachse ( $\Delta\text{MAD}/\text{Monat}$ ) und der Gelenkorientierungswinkel ( $\Delta\text{mLDFA}/\text{Monat}$  und  $\Delta\text{mMPTA}/\text{Monat}$ ) durch den wachstumslenkenden Eingriff zeigt die Studie einen vergleichbar guten Korrektoreffekt der Zweilochplatten und der PETS.

Bei beiden Methoden, aber besonders bei der Schraubenmethode fiel eine deutliche Streubreite der einzelnen Werte der Behandlungsdauer auf. Das zeigt, dass die Korrekturgeschwindigkeit neben dem verwendeten Implantattyp von weiteren Faktoren wie der Wachstumsgeschwindigkeit während der Therapie abhängt. Die Wachstumsgeschwindigkeit kann sich je nach Entwicklungsphase unterscheiden. Die PETS-Methode wurde in unserer Studie vorwiegend bei älteren Kindern angewandt, die sich in der Pubertät befanden oder deren Wachstumsfugen schon fast verschlossen waren. In der Pubertät kommt es häufig zu einem Wachstumsschub. Bei nahezu geschlossenen Fugen kann die Korrektur ausbleiben. Außerdem können zugrundeliegende Erkrankungen die Wachstumsgeschwindigkeit verändern. Die Kenntnis dieser Einflussfaktoren ist wichtig für die Planung und den Therapieerfolg.

Die Studie zeigte, dass die Zweilochplatten erfolgreich bei jüngeren Kindern mit Beinachsenfehlstellungen im Rahmen von angeborenen Grunderkrankungen verwendet werden können. Diese Erkenntnis deckt sich mit den bisherigen Erfahrungen der Forschung zu dieser Zielgruppe (Stevens 2007; Burghardt et al. 2008). Die Schrauben der Zweilochplatte haben einen festen Halt im Knorpel der unreifen kindlichen Epiphyse. Allerdings sollte bei Kindern mit erkrankungsbedingt veränderten Wachstumsfugen mit einer verlängerten Behandlungsdauer gerechnet werden.

Die Literatur empfiehlt den Einsatz der PETS vor allem bei älteren Kindern, die sich schon nahe des Wachstumsabschlusses befinden (Nouth/Kuo 2004; Houry et al. 2007; Park et al. 2018). Für einen festen Halt benötigt die schräg durch den Knochen ziehende PETS-Schraube eine ausreichend große Epiphyse. Bei jüngeren Kindern könnte die Größe des Knochenkerns nicht ausreichen, um der Schraube genug Stabilität zu geben. Zusätzlich haben potenzielle Wachstumsstörungen nach der Metallentfernung keine so gravierende Konsequenz mehr, wenn die Fugenreife fast erreicht ist.

In der vorliegenden Studie konnte für die Hemiepiphyseodese ein hohes Komplikationspotenzial beobachtet werden. Ein Grund dafür war vor allem der starke Fokus auf Probleme trotz eventuell guter achskorrigierender Wirkung. Zudem stammen die meisten publizierten Studiendaten zu Komplikationen der Wachstumslenkung aus kinderorthopädischen Zentren, die eine hohe Expertise auf diesem Gebiet aufweisen und sich in ihren Untersuchungen meist mehr mit den Ergebnissen der Achskorrektur als mit den auftretenden Komplikationen auseinandersetzen.

Diese Studie teilte die Komplikationen in fünf Gruppen ein, bestehend aus einer fehlerhaften Indikationsstellung, einer inkorrekten Lokalisation der Implantate, einer zeitlichen Fehlplanung der Metallentfernung, perioperativen Komplikationen - wie Wundheilungsstörungen und anhaltende Schmerzzustände - sowie ein Materialversagen des Implantats.

Fehler beim Stellen der Indikation können durch eine sorgfältige präoperative Planungsphase und eine intensive fachliche Schulung zur richtigen Anwendung des Vermessungssystems verhindert werden. Außerdem sollten Eltern und Kinderärzte bezüglich des Themas Beinachsenfehlstellungen sensibilisiert werden, um diese rechtzeitig zu erkennen.

Probleme beim richtigen Einsetzen des Implantats traten in dieser Studie ausschließlich in der Gruppe der Zweilochplatten auf. Eine mehrmalige radiologische Kontrolle der Fugenlokalisation und der Implantatlage vor, während und nach der Implantation in zwei Ebenen ist obligat. Zudem sollten bereits die Assistenzärzte mit den Implantationstechniken vertraut gemacht werden, um Routine zu erlangen.

Um die richtige Entscheidung bezüglich des Zeitpunkts der Metallentfernung treffen zu können, sollten in regelmäßigen Abständen klinische und radiologische Kontrolluntersuchungen der Beinachse stattfinden. Es ist wichtig, diese auch nach der Metallentfernung fortzusetzen, da so ein Rebound-Phänomen rechtzeitig erkannt und

therapiert werden kann. Um einem Rebound vorzubeugen, empfiehlt sich eine gewisse Überkorrektur vor allem bei jüngeren Kindern mit Restwachstum nach der Metallentfernung (Raab et al. 2001; Khoury et al. 2007; Stevens 2007; Westhoff et al. 2007; De Brauwer/Moens 2008; Ballal et al. 2010).

In den bisherigen wissenschaftlichen Studien erzielten die PETS gute kosmetische Ergebnisse. Ähnliche Beobachtungen ergaben sich auch in unserer Studie. Jedoch traten bei den PETS im Vergleich zu den Zweilochplatten vermehrt Probleme bei der Metallentfernung auf, wie Schraubenbrüche. Ein zu tiefer Sitz der Schrauben kann Probleme bei der Metallentfernung verursachen, die den Einsatz spezieller Instrumente oder eine Erweiterung des Operationszugangs erfordern. Steht jedoch der Schraubenkopf zu weit über, kann sich das Risiko für Missempfindungen und anhaltende Schmerzzustände erhöhen. Ein geringer Überstand des Schraubenkopfs von circa 5 mm scheint in dieser Hinsicht empfehlenswert. Bei den Zweilochplatten konnten in unserer Studie keine Fälle von Implantatversagen verzeichnet werden.

Die Wachstumslenkung ist ein sehr komplexes Gebiet und bedarf einer großen Expertise der behandelnden Kinderorthopäden. Schwierige Entscheidungen sollten nicht durch junge Ärzte allein getroffen werden. Die Eingriffe sollten von erfahrenem Kollegen begleitet werden. Mit Sicherheit sind Einschätzungen bezüglich der zeitlichen Planung eine der größten Herausforderungen in der Arbeit des Kinderorthopäden. Warum es so wichtig ist, Komplikationen zu vermeiden, begründet sich vor allem in der Verhinderung der dadurch notwendigen Folgeoperationen. Diese kosten Geld und sind wieder eine zusätzliche Belastung für den Organismus der Kinder.



## **Abbildungs- und Tabellenverzeichnis**

Abbildung 1: Darstellung der Achsen und Gelenkwinkel in der Frontalebene	9
Abbildung 2: Physiologische Entwicklung der frontalen Beinachse	11
Abbildung 3: Einseitig vermehrte Belastung der Knorpelschicht des Kniegelenks durch pathologische Valgus- und Varusfehlstellungen	12
Abbildung 4: Radiologische Stadien der Arthrose nach Kellgren-Lawrence	14
Abbildung 5: Prozentuale Verteilung des Wachstumspotenzials der Epiphysenfugen des Femurs und der Tibia	16
Abbildung 6: Dreijähriger Junge mit Knochennekrose im Bereich der medialen Femurkondyle (Morbus Blount)	18
Abbildung 7: Fünfjähriges Mädchen mit Vitamin-D resistenter Rachitis und Genua vara	19
Abbildung 8: Offenes Verfahren zur permanenten Wachstumsblockade nach Phemister – Operationsskizze aus der Original-Publikation von Phemister	23
Abbildung 9: Temporärer Wachstumsblockade mittels Drahtschlinge nach Haas - Postoperative Röntgenbilder aus der Original-Publikation von Haas	24
Abbildung 10: Schemazeichnung des Blount-Staples aus der Original-Publikation von Blount	25
Abbildung 11: Eight-Plate Guided Growth System der Firma Orthofix	27
Abbildung 12: PETS-Methode nach Metaizeau mit gekreuzten und ungekreuzten Schrauben	29
Abbildung 13: Flex-Tack, Firma Merete	31
Abbildung 14: Malalignment-Test nach Paley	35
Abbildung 15: Eight-Plate Guided Growth System mit Insertionshilfen	38
Abbildung 16: Implantation eines Eight-Plates	39
Abbildung 17: PETS-Technik von Metaizeau zum Ausgleich einer Beinachsenfehlstellung	40
Abbildung 18: Korrekte Ausrichtung des Beines für die Röntgenstandbeinaufnahme	45
Abbildung 19: Patienten mit Grunderkrankung und Beinachsenfehlstellung	53

Abbildung 20: $\Delta$ MAD/Monat in mm/Monat.	54
Abbildung 21: $\Delta$ mLDFA/Monat in Grad/Monat.	55
Abbildung 22: $\Delta$ mMPTA/Monat in Grad/Monat.	55
Abbildung 23: Alter bei Implantation	56
Abbildung 24: Therapiedauer	57
Abbildung 25: Prozentuale Verteilung der Komplikationen je Implantat	61
Abbildung 26: 21 Monate altes Mädchen mit beidseitiger Varusfehlstellung bei metaphysärer Chondroplasie Typ Schmid und Wachstumslenkung	65
Tabelle 1: Studienaufgaben im zeitlichen Verlauf nach Monaten	44
Tabelle 2: Absolute Häufigkeiten der Komplikationen je Implantat	58
Tabelle 3: Relative Häufigkeiten der Komplikationen je Implantat	61

## Literaturverzeichnis

- 1 AKVA surgical (2020). Eight-Plate Guided Growth System. <https://akvasurgical.com/eight-plate/>. Zugriff am 25.07.2020.
- 2 Aumüller, G.; Aust, G.; Doll, A. (2010). Bewegungssystem – Rumpfwand. In G. Aumüller (Hrsg.), *Duale Reihe Anatomie* (2. Auflage, S. 318–333). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 3 Aumüller, G.; Aust, G.; Doll, A. (2010). Bewegungssystem – Untere Extremität. In G. Aumüller (Hrsg.), *Duale Reihe Anatomie* (2. Auflage, S. 211). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 4 Aumüller, G.; Aust, G.; Doll, A. (2010). Grundlagen anatomischer Strukturen und ihrer Darstellung. In G. Aumüller (Hrsg.), *Duale Reihe Anatomie* (2. Auflage, S. 301). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 5 Aumüller, G.; Aust, G.; Doll, A. (2010). Grundlagen anatomischer Strukturen und ihrer Darstellung. In G. Aumüller (Hrsg.), *Duale Reihe Anatomie* (2. Auflage, S. 43–46). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 6 Ballal, MS.; Bruce, CE.; Nayagam, S. (2010). Correction genu varum and genu valgum in children by guided growth: temporary hemiepiphysiodesis using tension band plates. *J Bone Joint Surg Br*, 92, S. 273–276.
- 7 Bisland, SK.; Johnson, C.; Diab, M.; Wilson, B.; Burch, S. (2007). A new technique for physiodesis using photodynamic therapy. *Clin Orthop Relat Res*, 461, S.153–161.
- 8 Blount, WP.; Clarke, GR. (1949). Control of bone growth by epiphyseal stapling; a preliminary report. *J Bone Joint Surg Am*, 31A, S. 464–478.
- 9 Blount, WP. (1971). A mature look at epiphyseal stapling. *Clin Orthop*, 77, S. 158–163.
- 10 Boero, S.; Michelis, MB.; Riganti, S. (2011). Use of the eight-Plate for angular correction of knee deformities due to idiopathic and pathologic physis: initiating treatment according to etiology. *Journal of Children's Orthopaedics*, 5(3), S. 209–216. DOI: 10.1007/s11832-011-0344-4.
- 11 Bohn, WW.; Durbin, RA. (1991). Ipsilateral fractures of the femur and tibia in children and adolescents. *J Bone Joint Surg Am*, 73(3), S. 429–439.
- 12 Bowen, JR.; Johnson, WJ. (1984). Percutaneous epiphysiodesis. *Clin Orthop Relat Res*, 190, S. 170–173.
- 13 Bundesministerium für Gesundheit. (2019). Prävention. <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/service/begriffe-von-a-z/p/praevention.html.k>. Zugriff am 24.04.2020.
- 14 Burghardt, RD.; Specht, SC.; Herzenberg, JE. (2010). Mechanical Failures of eight-Plate Guided Growth System for Temporary Hemiepiphysiodesis. *J Pediatr Orthop*, 30, S. 594–597.
- 15 Burghardt, RD.; Herzenberg, JE.; Standard, SC. Paley, D. (2008). Temporary hemiepiphysal arrest using a screw and plate device to treat knee and ankle deformities in children: a preliminary report. *Journal of Children's Orthopaedics*, 2(3), S. 187–197. DOI: 10.1007/s11832-008-0096-y.

- 16 Campens, C.; Mousny, M.; Docquier, PL. (2010). Comparison of three surgical epiphyseodesis techniques for the treatment of lower limb length discrepancy. *Acta Orthop Belg*, 76, S. 226–232.
- 17 Canale, ST.; Christian, CA. (1990). Techniques for epiphyseodesis about the knee. *Clin Orthop Relat Res*, 255, S. 81–85.
- 18 Charles, YP.; Canavese, F.; Diméglio, A. (2005). Skelettaltersbestimmung am Ellbogen während des pubertären Wachstums. *Orthopade*, 34(10), 1052f., 1055-1057, 1059f. DOI: 10.1007/s00132-005-0856-z.
- 19 Schnabel, D., Haffner, D. (2005). Diagnostik und Therapie der Rachitis. *Monatsschrift Kinderheilkunde*, 153(1), S. 77–90. <https://doi.org/10.1007/s00112-004-1065-2>.
- 20 Danino, B.; Rödl, R.; Herzenberg, JE.; Shabtai, L.; Grill, F.; Narayanan, U.; Segev, E.; Wientroub, S. (2018). Guided growth: preliminary results of a multinational study of 967 physes in 537 patients. *Journal of Children's Orthopaedics*, 12(1), S. 91–96. DOI: 10.1302/1863-2548.12.170050.
- 21 Davids, J., Hagerman, RJ., & Eilert, RE. (1990). Orthopaedic aspects of fragile-X syndrome. *J Bone Joint Surg Am - Series A*, 72(6), S. 889-896.
- 22 De Brauwier, V.; Moens, P. (2008). Temporary hemiepiphysodesis for idiopathic genua valga in adolescents: percutaneous transphyseal screws (PETS) versus stapling. *J Pediatr Orthop*, 28, S. 549–554.
- 23 Dietrich, TJ.; Pfirrmann, CWA.; Schwab, A.; Pankalla, K.; Buck, F. (2013). Comparison of radiation dose, workflow, patient comfort and financial break-even of standard digital radiography and a novel biplanar low-dose X-ray system for upright full-length lower limb and whole spine radiography. *Skeletal radiology*, 42(7), S. 959–967. DOI: 10.1007/s00256-013-1600-0.
- 24 Döderlein, L. (2015). *Infantile Zerebralparese* (2. Ausgabe, S. 39–95). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- 25 EOS Imaging (2020). Produktinformation, EOS-Lösungen. <https://www.eos-imaging.de/de/gesundheitspezialisten/eos/eos>. Zugriff am 19.02.2020.
- 26 Farr, S.; Alrabai, HM.; Meizer, E.; Ganger, R.; Radler, C. (2018). Rebound of Frontal Plane Malalignment After Tension Band Plating. *J Pediatr Orthop*, 38(7), S. 365–369. DOI: 10.1097/BPO.0000000000000846.
- 27 Ferrick, MR.; Birch JG.; Albright, M. (2004). Correction of non-Blount's angular knee deformity by permanent hemiepiphysodesis. *J Pediatr Orthop*, 24, S. 397–402.
- 28 Freiling, D.; van Heerwaarden, R.; Staubli, A.; Lobenhoffer, P. (2010). Die varisierende Closed-Wedge-Osteotomie am distalen Femur zur Behandlung der unikompartimentalen lateralen Arthrose am Kniegelenk. *Orthop Traumatol*, 22, S. 217–234.
- 29 Frick, H.; Leonhardt, H.; Starck, D.; Kühnel, W.; Putz, R. (1992). Untere Extremität. Oberschenkel und Kniebereich. Kniegelenk. In H. Frick (Hrsg.) *Allgemeine Anatomie. Spezielle Anatomie I. Extremitäten, Rumpfwand, Kopf, Hals* (4. Auflage, S.361). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 30 Frick, H.; Leonhardt, H.; Starck, D.; Kühnel, W.; Putz, R. (1992). Untere Extremität. Oberschenkel und Kniebereich. Kniegelenk. In H. Frick (Hrsg.)

- Allgemeine Anatomie. Spezielle Anatomie I. Extremitäten, Rumpfwand, Kopf, Hals* (4. Auflage, S.365–376). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 31 Frick, H.; Leonhardt, H.; Starck, D.; Kühnel, W.; Putz, R. (1992). Untere Extremität. Oberschenkel und Kniebereich. Kniegelenk. In H. Frick (Hrsg.) *Allgemeine Anatomie. Spezielle Anatomie I. Extremitäten, Rumpfwand, Kopf, Hals* (4. Auflage, S.367–376). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
  - 32 Friend, L.; Widmann, RF. (2008). Advances in management of limb length discrepancy and lower limb deformity. *Curr Opin Pediatr*, 20(1), S. 46–51.
  - 33 Gabriel, KR.; Crawford, AH.; Roy, DR.; True, M.; Saunry, S. (1994). Percutaneous epiphyseodesis. *J Pediatr Orthop*, 14, S. 358–362.
  - 34 Galla, M.; Lobenhoffer, P. (2004). Die öffnende valgisierende Umstellungsosteomie der proximalen Tibia mit dem TomoFix™-Plattenfixateur. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 16(4), S. 397–417. DOI: 10.1007/s00064-004-1116-9.
  - 35 Gercek, E.; Nusselt, T.; Nienhaus, M.; Rothenbach, E.; Bernhardt, A.; Hartmann, F. 2017). Fehlverheilte Frakturen am Unterschenkel und Sprunggelenk. *Trauma Berufskrankh*, 19(2), S. 119–125. DOI: 10.1007/s10039-017-0275-5.
  - 36 Ghanem, I., El Hage, S., Diab, M.; Saliba, E.; Khazzaka, A.; Aftimos, G.; Dagher, F.; Kharrat, K. (2009). Radiofrequency application to the growth plate in the rabbit: a new potential approach to epiphysiodesis. *J Pediatr Orthop*, 29, S. 629–635.
  - 37 Ghanem, I.; Karam, JA.; Widmann, RF. (2011). Surgical epiphysiodesis indications and techniques: update. *Curr Opin Pediatr*, 23(1), S. 53–59.
  - 38 Gorman, TM.; Vanderwerff, R.; Pond, M.; MacWilliams, B.; Santora, S. (2009). Mechanical axis following staple epiphysiodesis for limb-length inequality. *J Bone Joint Surg Am*, 91, S. 2430–2439.
  - 39 Greene, WB. (1993). Infantile tibia vara. *J Bone Joint Surg Am*, 75(1), S. 130–143. DOI: 10.2106/00004623-199301000-00017.
  - 40 Günther, KP.; Thielemann, F. (2005). Orthopädische Komorbidität. In M. Wabitsch (Hrsg.) *Adipositas bei Kindern und Jugendlichen. Grundlagen und Klinik* (1. Aufl., S. 205–212). Berlin: Springer Verlag.
  - 41 Haas, S. (1945). Retardation of bone growth by a wire loop. *J Bone Joint Surg Am*, 27, S. 25–36.
  - 42 Hasler, CC. (2000). Leg length inequality. Indications for treatment and importance of shortening procedures. *Orthopade*, 29, S. 766–774.
  - 43 Hefti, F. (2000). Deviations in the axes of the lower extremities. *Orthopade*, 29, S. 814–820.
  - 44 Heinrich SD.; Mooney JF. (2006). Fractures of the Tibia and Fibula. In JH. Beaty; JR. Kasser (Hrsg.), *Rockwood and Wikin 's. Fractures in children* (S. 1033–1067). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
  - 45 Herold, G. (2019). *Innere Medizin* (S. 770f.). Gerd Herold Verlag.
  - 46 Hollister, AM.; Jatana, S.; Singh, AK. et al. (1993). The axes of rotation of the knee. *Clin Orthop*, 290, S. 259–268.

- 47 Horter, MJ.; Friesen, S.; Wacker, S.; Vogt, B.; Leidiger, B.; Roedl, R.; Schiedel, F. (2012). Determination of skeletal age: comparison of the methods of Greulich and Pyle and Tanner and Whitehouse. *Orthopade*, 41, S. 966–976.
- 48 Hosseinzadeh, P.; Ross, DR.; Walker, JL.; Talwalkar, V.; Iwinski, H.; Milbrandt, T. (2016). Three Methods Of Guided Growth For Pediatric Lower Extremity Angular Deformity Correction. *Iowa Orthop J*, 36, S. 123–127.
- 49 Hügler, T.; Valdarrabano, V. (2011). Wirkungen und Nebenwirkungen von Sport auf die Arthrose. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 59(4), S. 153–157.
- 50 Hunziker, E.B.; Stäubli, HU.; Jakob, RP. (1990). Chirurgische Anatomie des Kniegelenks. In HU. Stäubli; RP. Jakob (Hrsg.), *Kniegelenk und Kreuzbänder. Anatomie, Biomechanik, Klinik, Rekonstruktion, Komplikationen, Rehabilitation* (1. Auflage, S. 33–48). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- 51 Hurrelmann, K.; Klotz, T.; Haisch, J. (2010). *Lehrbuch Prävention und Gesundheitsförderung* (4. Auflage, S. 13–22). Bern: Verlag Hans Huber.
- 52 Ilharreborde, B.; Ferrero, E.; Alison, M.; Mazda, K. (2016). EOS microdose protocol for the radiological follow-up of adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*, 25(2), S. 526–531. DOI: 10.1007/s00586-015-3960-8.
- 53 Illés, T.; Somoskeöy, S. (2012). The EOS™ imaging system and its uses in daily orthopaedic practice. *International orthopaedics*, 36(7), S. 1325–1331. DOI: 10.1007/s00264-012-1512-y.
- 54 Jelinek, EM.; 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*, 36(3), S. 599–605. DOI: 10.1007/s00264-011-1369-5.
- 55 Kellgren, JH.; Lawrence JS. (1957). Radiological Assessment of Osteo-Arthritis. *Ann Rheum Dis*, 16(4), S. 494–502.
- 56 Khoury, JG., Tavares, JO., McConnell, S.; Zeiders, G.; Sanders, J. (2007). Results of screw epiphysodesis for the treatment of limb length discrepancy and angular deformity. *J Pediatr Orthop*, 27, S. 623–628.
- 57 Kromeyer-Hauschild, K.; Wabitsch, M.; Kunze, D.; Geller, F.; Geiß, HC.; Hesse, V.; von Hippel, A.; Jaeger, U.; Johnsen, D.; Menner, K.; Müller, G.; Müller, JM.; Niemann-Pilatus, A.; Remer, T.; Schaefer, F.; Wittchen, HU; Zabransky, S.; Zellner, K.; Zieger, A.; Hebebrand, J. (2001). Perzentile für den Body-mass-Index für das Kindes- und Jugendalter unter Heranziehung verschiedener deutscher Stichproben. *Monatsschr Kinderheilkd* 149, S. 807–818.
- 58 Lauen, J.; Schnell, H.; Rüger, M. (2015). Möglichkeiten der Achs- und Längenkorrektur beim Heranwachsenden. *Trauma und Berufskrankheit*, 17(1), S. 170–177.
- 59 Lee, MC., Bier, AD., Nickisch, F.; Ebersson, C.; Ehrlich, M.; Chen, Q. (2007). Epiphysodesis with infusion of stromal cell-derived factor-1 in rabbit growth plates. *J Bone Joint Surg Am*, 89, S.102–113.
- 60 Liao, W.; Li, Z.; Li, T.; Zhang, Q.; Zhang, H.; Wang, W. (2017). Proteomic analysis of synovial fluid in osteoarthritis using SWATH-mass spectrometry. *Molecular Medicine Reports*, 17(2), S. 2827-2836.

- 61 Liotta, FJ.; Ambrose, TA.; Eilert RA. (1992). Fluoroscopic technique versus Phemister technique for Epiphyseodesis. *Journal of Pediatric orthopedics*, 12, S. 248–251.
- 62 Mauz, E.; Lange, M.; Houben, R.; Hoffmann, R.; Allen, J.; Gößwald, A.; Hölling, H.; Lampert, T.; Lange, C.; Poethko-Müller, C.; Richter, A.; Schaffrath Rosario, A.; von Schenck, U.; Ziese, T.; Kurth, BM; KiGGS Cohort Research Team. (2019). Cohort profile: KiGGS cohort longitudinal study on the health of children, adolescents and young adults in Germany. *Int J Epidemiol*, 49(2), S. 375–375k. DOI: 10.1093/ije/dyz231.
- 63 MedCenter Bayreuth (2020). [Übersicht Knie-Achsenfehlstellungen]. Beinfehlstellungen: X- und O-Bein. <https://www.medcenter.info/spezialgebiete/knie/beinfehlstellungen/>. Zugriff am 05.01.2020.
- 64 Merete 2020. PediatrOS™ FlexTack™. <https://mereteusa.com/details/pediatros-flextack>. Zugriff am 26.06.2020.
- 65 Merrick, J.; Ezra, E.; Josef, B.; Hendel, D.; Steinberg, DM.; Wientroub, S. (2000). Musculoskeletal problems in Down Syndrome European Paediatric Orthopaedic Society Survey: the Israeli sample. *Journal of Pediatric orthopedics*, 9(3), S. 185–192.
- 66 Metaizeau, JP.; Wong-Chung, J.; Bertrand, H.; Pasquier, P. (1998). Percutaneous epiphysiodesis using transphyseal screws (PETS). *J Pediatr Orthop*, 18, S. 363–369.
- 67 Mielke, CH.; Stevens, PM. (1996). Hemiepiphyseal stapling for knee deformities in children younger than 10 years: a preliminary report. *J Pediatr Orthop*, 16, S. 423–429.
- 68 Milch, H. (1947). *Osteotomy of the long bones* (S. 113–146). Springfield: C.C Thomas.
- 69 Müller-Wohlfahrt, HW. (2018). *Mit den Händen sehen. Mein Leben und meine Medizin* (1. Auflage, S. 177–212). Berlin: Insel Verlag.
- 70 Murphy, RF.; Pacult, MA.; Barfield, WR.; Mooney, JF 3rd. (2020). Hemiepiphysiodesis for Juvenile and Adolescent Tibia Vara Utilizing Percutaneous Transphyseal Screws. *J Pediatr Orthop*, 40(1), S. 17–22. DOI: 10.1097/BPO.0000000000001067.
- 71 Niethard, FU.; Pfeil, J.; Biberthaler, P. (2017). Fehlbildungen und angeborene Entwicklungsstörungen von Skelett und Bindegewebe. Angeborene Skelettentwicklungsstörungen. In FU. Niethard (Hrsg.), *Duale Reihe – Orthopädie* (8. Auflage, S. 111). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 72 Niethard, FU.; Pfeil, J.; Biberthaler, P. (2017). Fehlbildungen und angeborene Entwicklungsstörungen von Skelett und Bindegewebe. Angeborene Skelettentwicklungsstörungen. In FU. Niethard (Hrsg.), *Duale Reihe – Orthopädie* (8. Auflage, S. 106f.). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 73 Niethard, FU.; Pfeil, J.; Biberthaler, P. (2017). Fehlbildungen und angeborene Entwicklungsstörungen von Skelett und Bindegewebe. Kongenitale Störungen der Bindegewebsentwicklung. In FU. Niethard (Hrsg.), *Duale Reihe – Orthopädie* (8. Auflage, S. 116). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

- 74 Nouth, F.; Kuo, L. (2004). Percutaneous epiphysiodesis using transphyseal screws (PETS): prospective case study and review. *J Pediatr Orthop*, 24(6), S. 721–725.
- 75 OP-Bericht Schön Klinik (14.12.2012). Metallentfernung Eight-Plates.
- 76 OP-Bericht Schön Klinik (29.01.2016). Metallentfernung PETS.
- 77 OrthoPediatrics Corp 2020. PediPlates®. [https://orthopediatrics.com/index.php/op\\_site/product-detail/pediplates](https://orthopediatrics.com/index.php/op_site/product-detail/pediplates). Zugriff am 28.09.2020.
- 78 Paley, D.; Pfeil, J. (2000). Prinzipien der kniegelenknahen Deformitätenkorrektur. *Orthopade*, 29, S. 18–38.
- 79 Paley, D. (2002). *Principles of deformity correction* (1. Auflage, S. 31–60). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- 80 Pape, L.; Pape, A.; Weber, LT.; Arbeiter, K.; Haffner, D.; Tönshoff, B.; Oh, J. (2017): Cystinose. *Der Nephrologe*, 12(3), S. 223–229. DOI: 10.1007/s11560-017-0152-z.
- 81 Park, H.; Park, M.; Kim, SM.; Kim, HW.; Lee, DH. (2018). Hemiepiphysiodesis for Idiopathic Genu Valgum: Percutaneous Transphyseal Screw Versus Tension-band Plate. *J Pediatr Orthop*, 38(6), S. 325–330. DOI: 10.1097/BPO.0000000000000821.
- 82 Phemister, D. (1933). Operative arrestment of longitudinal growth of bone in the treatment of deformities. *J Bone Joint Surg Am*, 15, S. 1–15.
- 83 Pinkowski, JL.; Weiner, DS. (1995). Complications in proximal tibial osteotomies in children with presentation of technique. *J Pediatr Orthop*, 15(3), S. 307–312. DOI: 10.1097/01241398-199505000-00009.
- 84 Raab, P.; Wild, A.; Seller, K.; Krauspe, R. (2001). Correction of length discrepancies and angular deformities of the leg by Blount's epiphyseal stapling. *Eur J Pediatr*, 160, S. 668–674.
- 85 Salenius, P.; Vankka, E. (1975). The development of the tibiofemoral angle in children. *J Bone Joint Surg Am*, 57, S. 259–261.
- 86 Scanzello, CR.; Goldring, SR. (2012). The role of synovitis in osteoarthritis pathogenesis. *Bone*, 51(2), S. 249–257. DOI: 10.1016/j.bone.2012.02.012.
- 87 Schneider, F.; Raith, J. (2006). Osteochondrosen im Kindes- und Jugendalter. In H. Tscherne (Hrsg), *Tscherne Unfallchirurgie. Unfallchirurgie im Kindesalter* (S. 993–1021). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- 88 Schroerlucke, S.; Bertrand, S.; Clapp, J.; Bundy, J.; Gregg, FO. (2009). Failure of Orthofix eight-Plate for the treatment of Blount disease. *J Pediatr Orthop*, 29, S. 57–60.
- 89 Schünke, M.; Schulte, E.; Schumacher, U.; Voll, M.; Wesker, K. (2011). Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. In M. Schünke (Hrsg.), *Prometheus - Lernatlas der Anatomie* (3. Auflage, S.408). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 90 Schünke, M.; Schulte, E.; Schumacher, U.; Voll, M.; Wesker, K. (2011). Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. In M. Schünke (Hrsg.), *Prometheus, Lernatlas der Anatomie* (3. Auflage, S. 46f). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.



- 91 Sinha, R.; Weigl, D.; Mercado, E. (2018). Eight-plate epiphysiodesis: are we creating an intra-articular deformity? *The bone & joint journal*. 100-B(8), S. 1112–1116. DOI: 10.1302/0301-620X.100B8.BJJ-2017-1206.R3.
- 92 Stevens, PM. (2006). Guided growth: 1933 to present. *Strategies Trauma Limb Reconstr*, 1(1), S. 29–35.
- 93 Stevens, PM. (2007). Guided growth for angular correction: a preliminary series using a tension band plate. *J Pediatr Orthop*, 3(27), S. 253–259.
- 94 Stevens, PM.; Maguire, M.; Dales, MD.; Robins, AJ. (1999). Physeal stapling for idiopathic genu valgum. *J Pediatr Orthop*, 19(5), S. 645–649.
- 95 Täger, G.; Hussmann, B.; Lendemans, S., Nast-Kolb, D. (2009): Epiphysäre und epiphysennahe Frakturen bei Kindern. *Der Unfallchirurg*, 112(2), S. 185–201. DOI: 10.1007/s00113-009-1566-5.
- 96 Täger, G.; Podleska, LE.; Ruchholtz, S.; Sommerfeldt, D.; Nast-Kolb, D. (2007): Epiphysennahe Frakturen bei Kindern. *Der Unfallchirurg*, 110(10), S. 867–883. DOI: 10.1007/s00113-007-1336-1.
- 97 Thielemann, F. (2019). Orthopädie. In CP. Speer; M. Gahr; J. Dötsch (Hrsg.), *Pädiatrie* (5. Auflage, S. 705–728). Berlin Heidelberg: Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-57295-5\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57295-5_27)
- 98 Vogt, B.; Schiedel, F.; Rödl, R. (2014). Wachstumslenkung bei Kindern und Jugendlichen. Korrektur von Beinlängendifferenzen und Beinachsendiformitäten. *Orthopade*, 43(3), S. 267–284.
- 99 Vogt, B.; Tretow, H.; Schuhknecht, B. et al. (o.V.) (2013). Coronal and sagittal axis deviation following temporary epiphysiodesis using Blount-Staples or eight-Plate for treatment of leg length discrepancy.X. *Kongress der ASAMI Deutschland, München*.
- 100 Vogt, B.; Kleine, MT.; Gosheger, G.; Tretow, H.; Horter, M.; Schiedel, F.; Rödl, R. (2015). FlexTack™ zur temporären Hemiepiphysiodese – Vereinfachte Implantation, reduzierte Durchleuchtung und schnellere Korrektur im Vergleich zur eight-Plate™. *Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU), Berlin*.
- 101 Westhoff, B.; Jager, M.; Krauspe, R. (2007). Axes of the legs in childhood. What is pathologic? *Orthopade*, 36(5), S. 485-498.
- 102 Widmann, RF.; Amaral, TD.; Yildiz, C.; Yang, X.; Bostrom, M. (2010). Percutaneous radiofrequency epiphysiodesis in a rabbit model: a pilot study. *Clin Orthop Relat Res*, 468, S. 1943–1948.
- 103 Wiemann, JMT.; Tryon, C.; Szalay, EA. (2009). Physeal stapling versus 8-plate hemiepiphysiodesis for guided correction of angular deformity about the knee. *J Pediatr Orthop*, 29(5), S. 481–485.
- 104 Wybier, M.; Bossard, P. (2013). Musculoskeletal imaging in progress: the EOS imaging system. *Joint, bone, spine: revue du rhumatisme*, 80(3), S. 238–243. DOI: 10.1016/j.jbspin.2012.09.018.
- 105 Yilmaz, G.; Oto, M.; Thabet, AM.; Rogers, KJ.; Anticevic, D.; Thacker, MM.; Mackenzie WG. (2014). Correction of lower extremity angular deformities in skeletal dysplasia with hemiepiphysiodesis: a preliminary report. *J Pediatr Orthop*, 34(3), S. 336–345. DOI: 10.1097/BPO.0000000000000089.

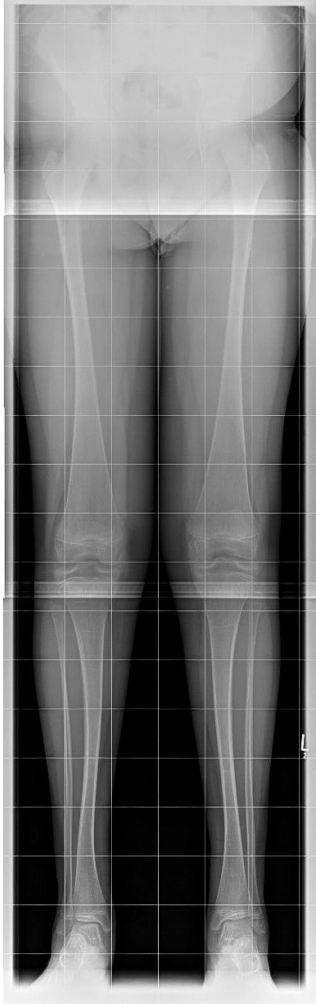
## **Anhang**

<b>Anhang 1: Röntgenbilder Schön Klinik München-Harlaching</b>	<b>88</b>
Anhang 1.1: Komplikationen Kategorie A	88
Anhang 1.1.1: Achskorrektur bei gerader Beinachse – keine Indikation	88
Anhang 1.1.2: Achskorrektur bei gerader Beinachse – keine Indikation	89
Anhang 1.1.3: Unvollständige Korrektur bei spätem Operationszeitpunkt	90
Anhang 1.1.4: Keine Implantation femoral trotz pathologischem mL DFA	91
Anhang 1.1.5: Keine Implantation femoral trotz pathologischem mL DFA	92
Anhang 1.1.6: Keine Implantation tibial trotz pathologischem mMPTA	93
Anhang 1.1.7: Keine Implantation tibial trotz pathologischem mMPTA	94
Anhang 1.1.8: Späte Achskorrektur rechtes Bein; keine Korrektur bei Rebound	95
Anhang 1.2: Komplikationen Kategorie B	97
Anhang 1.2.1: Implantation femoral und tibial beidseits zu weit ventral	97
Anhang 1.2.2: Implantation tibial rechts zu nah an Wachstumsfuge	98
Anhang 1.3: Komplikationen Kategorie C	100
Anhang 1.3.1: Überkorrektur der Fehlstellung durch späte Metallentfernung	100
Anhang 1.3.2: Überkorrektur der Fehlstellung durch späte Metallentfernung	101
Anhang 1.3.3: Korrekturverlust (Rebound)	102
Anhang 1.3.4: Korrekturverlust (Rebound)	103
Anhang 1.3.5: Überkorrektur der Fehlstellung durch späte Metallentfernung	104
Anhang 1.4: Diskussionsteil	105
Anhang 1.4.1: Patient mit epiphysärer Dysplasie und Genua vara	105
Anhang 1.4.2: Patient mit Morbus Blount und Genua vara	106
Anhang 1.4.3: Patient mit kondylärer Dysplasie	107
<b>Anhang 2: Statistische Auswertung</b>	<b>108</b>
Anhang 2.1: Statistische Auswertung Gelenkorientierungswinkel	108
Anhang 2.1.1: $\Delta$ MAD/Monat	108
Anhang 2.1.2: $\Delta$ mL DFA/Monat	108
Anhang 2.1.3: $\Delta$ mMPTA/Monat	109
Anhang 2.2: Statistische Auswertung Alter bei Implantation	109
Anhang 2.3: Statistische Auswertung Therapiedauer	110
<b>Anhang 3: Studententabellen</b>	<b>110</b>
Anhang 3.1: Studienverwaltungstabelle	110
Anhang 3.2: Ergänzung Studienverwaltungstabelle Komplikationen	113

## Anhang 1: Röntgenbilder Schön Klinik München-Harlaching

### Anhang 1.1: Komplikationen Kategorie A

#### Anhang 1.1.1: Achskorrektur bei gerader Beinachse – keine Indikation



präop

MAD<sup>1</sup>: 2;-7

mLDFA<sup>2</sup>: 88;88,2

mMPTA<sup>3</sup>: 90,9;92,8



vor ME (Überkorrektur)

MAD: 34;27

mLDFA: 92,6;94,6

mMPTA: 85,2;88

<sup>1</sup> MAD in mm; das Minussymbol (-) signalisiert die Abweichung in Richtung einer Valgusfehlstellung, positive Zahlen zeigen eine Abweichung in Richtung einer Varusfehlstellung an

<sup>2</sup> mLDFA in Grad (°)

<sup>3</sup> mMPTA in Grad (°)

## Anhang 1.1.2: Achskorrektur bei gerader Beinachse – keine Indikation



präop

MAD: -8;-2

mLDFA: 84,1;84,4



vor ME (Überkorrektur)

MAD: 15;24

mLDFA: 92,6;92,2

Patient erhielt erneute Achskorrektur.

### Anhang 1.1.3: Unvollständige Korrektur bei spätem Operationszeitpunkt

Weibliche Patientin, Achskorrektur mit 15,8 Jahren



präop

mLDFA: 80;76,2  
mMPTA: 89,9;88,5



vor ME

MAD: -29;-38

mLDFA: 79,7;76,3  
mMPTA: 87,1;89,6

#### Anhang 1.1.4: Keine Implantation femoral trotz pathologischem mL DFA



präop



vor ME

MAD: -24;-23

mL DFA: 80,5;80,4  
mMPTA: 91;89,4

MAD: -4;-1

mL DFA: 78,1;79,9  
mMPTA: 80;80,6

Patient erhielt erneute Achskorrektur.

### Anhang 1.1.5: Keine Implantation femoral trotz pathologischem mL DFA



präop



vor ME

MAD: -43

mL DFA: 76,3  
mMPTA: 89,9

MAD: -12

mL DFA: 78,6  
mMPTA: 74,6

Patient erhielt erneute Achskorrektur.

### Anhang 1.1.6: Keine Implantation tibial trotz patholischem mMPTA



präop

MAD: -20;-19

mLDFA: 84,5;83,2  
mMPTA: 91,9;93,4



vor ME

MAD: -13;-8

mLDFA: 86,3;85,5  
mMPTA: 92,7;92,3



### Anhang 1.1.7: Keine Implantation tibial trotz pathologischem mMPTA



präop

MAD: -25;-21

mLDFA: 78,1;91  
mMPTA: 91,4;92,5



vor ME

MAD: -17;-15

mLDFA: 85,8;89,4  
mMPTA: 92,5;89,1

## Anhang 1.1.8: Späte Achskorrektur rechtes Bein; keine Korrektur bei Rebound

Initial nur Achskorrektur links trotz pathologischem mMPTA rechts; Achskorrektur rechts erfolgte erst in einem Folgeingriff drei Monate später; Rebound links wurde nicht erneut therapiert.



vor Achskorrektur links

MAD: 22;33

mMPTA: 84,8;84,8



vor ME links und vor  
Achskorrektur rechts

MAD: 27;4

mMPTA: 85,3;88,8

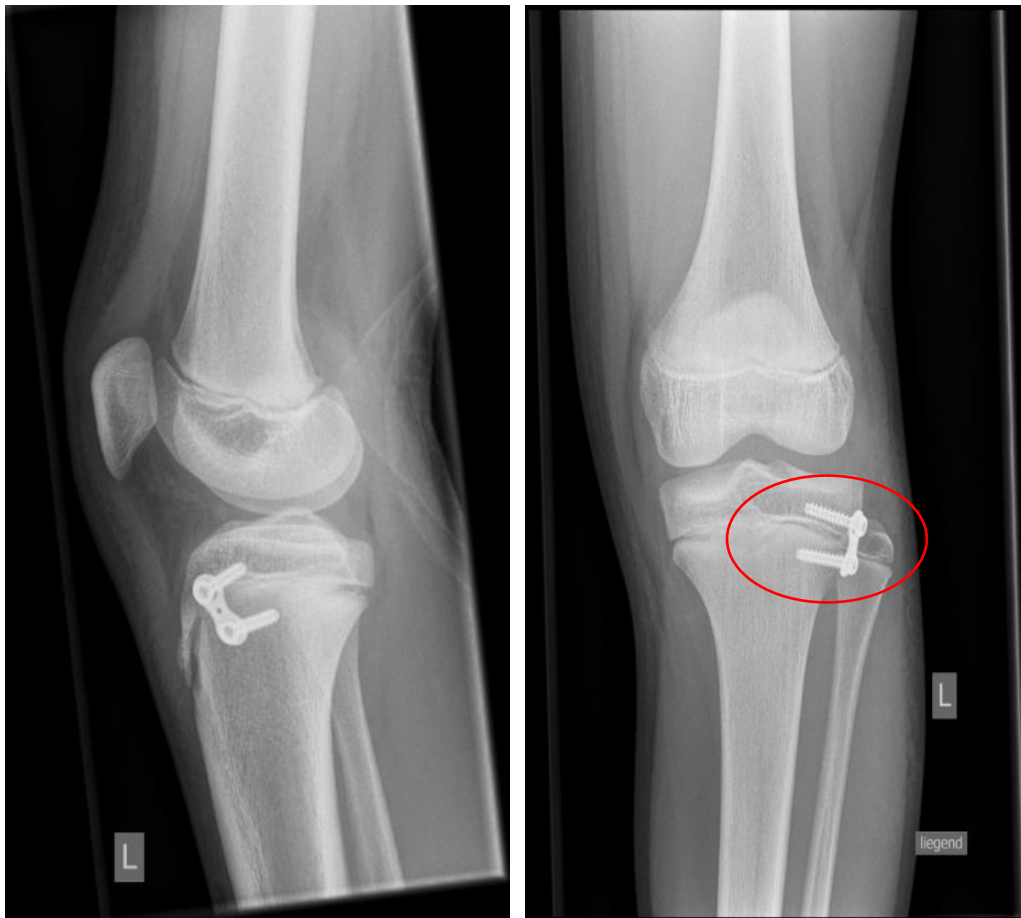


Rebound links

MAD: 25;27

mMPTA: 85,2;86,4

## Implantation tibial links zu nah an Wachstumsfuge



Knie linka a.p. und lateral

## Anhang 1.2: Komplikationen Kategorie B

### Anhang 1.2.1: Implantation femoral und tibial beidseits zu weit ventral



Knie links a.p. und lateral



Knie rechts a.p. und Knie a.p. beidseits



Patient entwickelte ein Genu recurvatum beidseits.

**Anhang 1.2.2: Implantation tibial rechts zu nah an Wachstumsfuge**



Knie rechts a.p. und lateral



Knie a.p. beidseits nach Revision

## Anhang 1.3: Komplikationen Kategorie C

### Anhang 1.3.1: Überkorrektur der Fehlstellung durch späte Metallentfernung



präop



vor ME

MAD: -12;-12

mLDFA: 83,8;83,5  
mMPTA: 89,6; 88,8

mLDFA: 83,2;81,2  
mMPTA: 78,3;76,3

### Anhang 1.3.2: Überkorrektur der Fehlstellung durch späte Metallentfernung



präop

MAD: -48;-49

mLDFA: 77,6;79,5

mMPTA: 100,4;98,8



vor ME

MAD: 13;20

mLDFA: 95,5;96,4

mMPTA: 89,6;82,6



### Anhang 1.3.3: Korrekturverlust (Rebound)



präop

MAD: 31;18

mLDFA: 90,7;87,2  
MPTA: 83,3;82,4



vor ME

MAD: -7;-17

mLDFA: 83,6;79,7  
mMPTA: 88,1;86,6



Rebound

MAD: 40;38

mLDFA: 89,8;88,6  
mMPTA: 81,6;82,4

Patient erhielt erneute Achskorrektur.

#### Anhang 1.3.4: Korrekturverlust (Rebound)



präop

MAD: -16;-20

mLDFA: 88,1;83,3

mMPTA: 93,4;91,3



Rebound nach Hemiepiphyseodese

MAD: -13;-22

mLDFA: 86,9;83,6

mMPTA: 92,9;89,9

Patient erhielt erneute Achskorrektur.

### Anhang 1.3.5: Überkorrektur der Fehlstellung durch späte Metallentfernung



präop



vor ME

MAD: 19;18

mLDFA: 94,1;93,8  
mMPTA: 88,2;87,2

MAD: -15;-18

mLDFA: 84,2;84,9  
mMPTA: 91,2;89,8

Patient erhielt erneute Achskorrektur.

## Anhang 1.4: Diskussionsteil

### Anhang 1.4.1: Patient mit epiphysärer Dysplasie und Genua vara

Männlicher Patient, 3,6 Jahre



präop

MAD: 15;8

mLDFA: 105,7;103,1  
mMPTA: 91,7;92



vor ME

MAD: -6;-9

mLDFA: 94,8;94  
mMPTA: 91,5;90,6

## Anhang 1.4.2: Patient mit Morbus Blount und Genua vara

Weibliche Patientin, 5,7 Jahre



präop

MAD: 37;15

mMPTA: 74,2;87



nach ME

MAD: 0;5

mMPTA: 88,2;88,4

### Anhang 1.4.3: Patient mit kondylärer Dysplasie

Männlicher Patient, 6,1 Jahre



präop

MAD: -39

mLDFA: 71,4



vor ME

MAD: -3 (links)

mLDFA: 87,8 (links)

## Anhang 2: Statistische Auswertung

### Anhang 2.1: Statistische Auswertung Gelenkorientierungswinkel

#### Anhang 2.1.1: $\Delta$ MAD/Monat

Zweistichproben t-Test		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mittelwert	2,45	2,88717949
Varianz	2,23404255	6,91851552
Beobachtungen	48	39
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	57	
t-Statistik	-0,9238332	
P(T<=t) einseitig	0,17973381	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,67202889	
P(T<=t) zweiseitig	0,35946762	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,00246546	

#### Anhang 2.1.2: $\Delta$ mL DFA/Monat

Zweistichproben t-Test		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mittelwert	0,61	0,6437931
Varianz	0,17523902	0,29548153
Beobachtungen	42	29
Gepoolte Varianz	0,22403308	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	69	
t-Statistik	-0,29571031	
P(T<=t) einseitig	0,38416971	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,66723855	
P(T<=t) zweiseitig	0,76833942	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	1,99494542	

### Anhang 2.1.3: $\Delta$ mMPTA/Monat

Zweistichproben t-Test		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mittelwert	0,46464286	0,54677419
Varianz	0,08108505	0,29336258
Beobachtungen	28	31
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	46	
t-Statistik	-0,73877747	
P(T<=t) einseitig	0,23189758	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,67866041	
P(T<=t) zweiseitig	0,46379517	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,0128956	

### Anhang 2.2: Statistische Auswertung Alter bei Implantation

Zweistichproben t-Test		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mittelwert	11,2962963	13,1045455
Varianz	7,80883191	2,00807359
Beobachtungen	27	22
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	40	
t-Statistik	-2,93147009	
P(T<=t) einseitig	0,00277744	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,68385101	
P(T<=t) zweiseitig	0,00555487	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,02107539	



### Anhang 2.3: Statistische Auswertung Therapiedauer

Zweistichproben t-Test		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mittelwert	14,6296296	10
Varianz	90,0883191	41,047619
Beobachtungen	27	22
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	46	
t-Statistik	2,02975752	
P(T<=t) einseitig	0,02409428	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,67866041	
P(T<=t) zweiseitig	0,04818856	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,0128956	

### Anhang 3: Studenttabellen

#### Anhang 3.1: Studienverwaltungstabelle

# Zweilochplatten

Fall	Diagnose	Alter in Jahren	Seite	Therapiedauer in Monaten	Knochen	Gelenkwinkel	Winkel (°) präop (R/L)	Winkel (°) postop (R/L)	ΔWinkel (°) absolut	ΔWinkel (°) Monat (R/L)	MAD (mm) präop (R/L)	MAD (mm) postop (R/L)	ΔMAD (mm) absolut (R/L)	ΔMAD (mm)/ Monat (R/L)
1	Idiopathisches Genu valgum	12,1	R+L	16	F+T	mLDFA mMPTA	88,88,2 90,92,8	92,6,94,6 85,2,88	4,66,4 5,74,8	0,30,4 0,40,3	2,-7	34,27	32,84	2,-1
2	Idiopathisches Genu valgum	15,8	R+L	5	F+T	mLDFA mMPTA	84,5,86,3 91,9,90,4	85,5,89,5 89,7,88,6	1,1,2,9 1,8,1,8	0,20,6 0,40,4	-21,-12	-11,8	10,20	2,4
3	Idiopathisches Genu valgum	9,1	R+L	25	T	mMPTA	91,89,4	80,80,6	11,8,8	0,40,4	-24,-23	-4,-1	20,22	0,80,9
4	Idiopathisches Genu valgum	11,2	R+L	20	F	mLDFA	79,4,79,8	95,8,11,2	16,4,11,4	0,80,6	-26,-29	25,1	5,150	2,6,1,5
5	Idiopathisches Genu valgum	14,4	R+L	12	F+T	mLDFA mMPTA	84,1,83,1 91,2,85,1	86,1,84,4 84,9,85,4	2,1,3 6,20,3	0,20,1 0,50,3	-26,-19	7,0	33,19	2,8,1,6
6	Idiopathisches Genu valgum	12,9	R+L	10	F	mLDFA	84,5,86,3	93,2,95,1	8,7,8,8	0,90,9	-15,-10	9,25	24,35	2,4,3,5
7	Idiopathisches Genu valgum	11,5	R+L	33	F	mLDFA	84,5,83,2	86,3,85,5	1,9,2,3	0,060,07	-20,-19	-13,-8	7,11	0,20,3
8	Idiopathisches Genu valgum	9,7	L	14	T	mMPTA	89,8	74,6	15,3	1,1	-4,3	-1,2	31	2,2
9	Idiopathisches Genu valgum	11,5	R+L	9	F+T	mLDFA mMPTA	84,5,83 92,7,94,1	92,90 91,4,90,4	7,7,7 1,3,3,7	0,90,8 0,10,4	-22,-27	7,2	29,29	3,2,3,2
10	Idiopathisches Genu valgum	11,5	R+L	7	F	mLDFA	83,8,82,8	87,6,84,6	3,8,1,8	0,50,3	-9,-12	8,2	17,14	4,3,2
11	Idiopathisches Genu valgum	10,9	R+L	21	F	mLDFA	83,8,83,5	83,2,81,2	0,6,2,3	0,030,1	-12,-12	24,21	24,21	1,1,1
12	Idiopathisches Genu valgum	13,7	R+L	7	F	mLDFA	84,1,84,4	92,6,92,2	8,5,7,8	1,2,1,1	-8,-2	15,24	33,26	4,7,3,7
13	Idiopathisches Genu valgum	12	R+L	17	F	mLDFA	83,7,81,2	92,7,86,7	9,5,5	0,50,3	9,-14	2,66	35,20	2,1,1,2
14	Idiopathisches Genu valgum	12,3	R+L	10	F	mLDFA	85,85,6	93,8,91	8,8,5,6	0,90,6	-4,10	27,8	31,18	3,1,1,8
15	Idiopathisches Genu valgum	12	R+L	7	F	mLDFA	84,3,83,4	88,4,87,7	4,9,4,3	0,60,6	-8,-11	2,1	10,12	1,4,1,7
16	Idiopathisches Genu valgum	14,1	R+L	3	F+T	mLDFA mMPTA	86,7,86,2 92,88,7	89,6,87,1 89,5,90,4	2,90,9 2,5,1,7	1,00,3 0,80,6	-18,-8	6,-5	24,3	8,1
17	Marran Syndrom	13,6	R+L	8	F+T	mLDFA mMPTA	84,1,84,1 91,5,93,2	87,4,87,2 87,9,89,6	3,3,3,1 3,6,5,6	0,40,4 0,50,5	-26,-30	8,-2	34,28	4,3,3,5
18	Epiphyse Dysplasie	3,6	R+L	6	F+T	mLDFA mMPTA	105,7,103,1 91,7,92	94,8,94 91,5,90,6	10,9,9,1 0,2,1,4	1,8,1,5 0,030,2	15,8	-6,-9	21,17	3,5,2,8
19	Morbus Blount	5,7	R	14	T	mMPTA	74,2	88,2	14	1	37	0	37	2,6
20	Idiopathisches Genu varum	11,2	L	13	T	mMPTA	84,8	88,8	4	0,3	33	4	29	2,2
21	Idiopathisches Genu varum	14,3	R	20	T	mMPTA	85,3	85,2	0,1	0,05	27	25	2	0,1
22	Idiopathisches Genu varum	13,1	R+L	7	F+T	mLDFA mMPTA	90,7,87,2 83,3,82,4	83,6,79,7 88,1,86,6	7,1,7,5 4,8,4,2	1,0,1,1 0,70,6	31,18	-7,-17	38,25	5,4,3,6
23	Familiäre Hypophosphatämie	9,4	R+L	18	F+T	mLDFA mMPTA	77,6,79,5 100,4,98,8	95,5,96,4 91,5,86,7	17,9,16,9 8,9,12,1	1,1 0,50,7	-48,-49	13,20	6,169	3,4,3,4
24	Familiäre Hypophosphatämie	9	R+L	7	F+T	mLDFA mMPTA	80,8,79 91,9,93,3	82,4,83,2 86,5,86,6	1,6,4,2 4,5,6,7	0,20,6 0,6,1	-16,-24	0,-1	16,23	2,5,3,3
25	Cystinose	11,4	L	42	F	mLDFA	79,6	87,3	7,7	0,2	-30	-4	26	0,6
26	Trisomie 21	12,9	R+L	12	F+T	mLDFA mMPTA	79,5,81,8 86,89,5	90,9,88,8 84,2,86,3	11,40,7 1,8,3,2	1,0,0,6 0,20,3	-4,-23	24,13	28,10	2,5,0,8
27	Valgisierende Dysplasie der Kondylen	6,1	L	32	F	mLDFA	71,4	87,8	16,4	0,5	-39	-3	36	1,1

4

4 m = männlich, w = weiblich, R = Rechts, L = Links, F = Femur, T = Tibia

Diagnose	Fall	Patient	Geschlecht	Alter in Jahren	Seite	Therapiedauer in Monaten	Knochen	Gelenkwinkel	Winkel (°) präop (R:L)	Winkel (°) postop (R:L)	ΔWinkel (°) absolut (R:L)	ΔWinkel (°) Monat (R:L)	MAD (mm) präop (R:L)	MAD (mm) postop (R:L)	ΔMAD (mm) absolut (R:L)	ΔMAD (mm) Monat (R:L)
Idiopathisches Genu valgum	28	26	m	14,9	R+L	9	F(0)+T	mLDEA mMPTA	83,6 92,8/89,9	88,9 90,4/88,1	5,3 2,5/1,8	0,6 0,3/0,2	13;-22	-4;7	9;29	1,3;2
Idiopathisches Genu valgum	29	7	w	13,3	L	12	F	mLDEA	83,7	79,4	4,3	0,4	-27	-13	14	1,2
Idiopathisches Genu valgum	30	27	w	12,1	R+L	2	F+T	mLDEA mMPTA	84,2/84,9 91,2/89,9	85,7/86,2 85,8/87,9	1,5/1,3 5,4;2	0,8/0,7 2,7;1	-15;-18	1;-3	16;15	8;7,5
Idiopathisches Genu valgum	31	28	w	12,2	R+L	3	F	mLDEA	83,6/83,7	86,8/86,9	3,2;3,2	1,1;1,1	-13;-13	-3;-3	10;10	3,3;3,3
Idiopathisches Genu valgum	32	29	m	12,7	L	6	T	mMPTA	91,8	90,6	1,2	0,2	-17	5	22	3,7
Idiopathisches Genu valgum	33	30	w	11,8	R+L	4	F+T	mLDEA mMPTA	84,2/83,7 90,3/89,8	87,7/86,5 87,5/87,7	3,5;2,8 2,8;2,1	0,9/0,7 0,7/0,5	-19;-17	3;1	22;18	5,5;4,5
Idiopathisches Genu valgum	34	31	m	12,9	R+L	5	T	mMPTA	84,5/91,1	86,3/88,5	1,8;2,6	0,4/0,5	-19;-26	-3;-9	16;15	3,2;3
Idiopathisches Genu valgum	35	32	w	11,3	R+L	15	F	mLDEA	83,9/85,8	90,5/91,4	6,6;5,6	0,4/0,4	-16;-13	-3;3	13;16	0,9;1,1
Idiopathisches Genu valgum	36	33	w	14	L	14	F+T	mLDEA mMPTA	84,8 89,5	85,7 88,6	0,9 0,9	0,04 0,06	-24	12	12	0,9
Idiopathisches Genu valgum	37	34	w	12,8	R	17	F+T	mLDEA mMPTA	86,4 85	88,9 91,3	2,5 6,3	0,1 0,4	16	-1	18	1,1
Idiopathisches Genu valgum	38	35	m	15,8	R+L	5	F+T	mLDEA mMPTA	81,5/80,7 88,1/87,8	82,2/80,9 86,4/86,7	0,7/0,2 1,7;1,1	0,1/0,0 0,3/0,2	-24;-23	-14;-20	10;3	2,0;6
Pseudoachondroplasia	39	36	w	12,1	R+L	25	F	mLDEA	78,1/91	85,8/89,4	7,7;1,6	0,3/0,06	-25;-21	-17;-15	8;6	0,32/0,24
Infantile Zerebralparese	40	37	m	14,7	R+L	4	F+T	mLDEA mMPTA	83,1/85 92,5/87,6	89,8/87 88,2/85,5	5,9;3,7 4,5;2,6	1,5/0,9 1,1/0,7	-37;-16	4;7	41;23	10,25;5,75
Infantile Zerebralparese	41	38	w	11,9	R+L	6	F+T	mLDEA mMPTA	85,1/84,2 93,5/90,1	88,8/9,9 87,8/83,9	2,9;5,7 5,7;6,2	0,5;1 1;1	-21;-18	2;22	23;40	3,8;6,7
Idiopathisches Genu varum	42	27	w	11,7	R+L	5	F+T	mLDEA mMPTA	94,1/93,8 88,2/87,2	84,2/84,9 91,2/89,9	9,9;8,9 3,2;7	2,1;8 0,6/0,5	19;18	-15;-18	24;36	4,8;7,2
Idiopathisches Genu varum	43	39	m	12,3	R+L	10	T	mMPTA	83,8/3,5	86,7/86,6	3,7;3,1	0,37/0,31	15;10	-4;-6	19;16	1,9;1,6
Idiopathisches Genu varum	44	40	m	14,8	R+L	14	T	mMPTA	83,8/4,5	87,8/8,1	4,3;6	0,3/0,3	20;14	16;12	4;4	0,3/0,3
Fragiles X Syndrom	45	41	m	14,4	R+L	10	F+T	mLDEA mMPTA	81,4/83,8 88,9/91,6	88,5/84,9 89,8/89,8	7,1;1,1 0,9;1,8	0,7/0,11 0,09/0,18	-16;-28	-5;-6	11;22	1,1;2,2
Trisomie 21	46	42	w	12,4	R+L	8	F+T	mLDEA mMPTA	81,8;X 90,4;X	84,3/84,6 87,5/87,3	2,5;X 2,9;X	0,3;X 0,4;X	-19;X	-8;-2	7;X	0,9;X
Trisomie 21	47	43	w	10,9	R+L	7	F+T	mLDEA mMPTA	74,8/6,7 95,8/6	83,5/82,8 83,6/85,1	9,5;3,9 1,6/0,1	1,4/0,6 1,6/0,1	-55;-10	-6;-8	49;2	7,0;3
Cystinose	48	23	w	13,8	R+L	15	T	mMPTA	97,6/93,5	84,8/81,1	12,8;12,4	0,9/0,8	-43;-31	-25;-4	18;27	1,2;1,8
Cystinose	49	44	w	15,5	R+L	24	F+T	mLDEA mMPTA	80,7/9,2 88,5/90,6	79,7/76,3 87,1/89,6	0,3;2,9 1,8;1,0	0,01/0,1 0,1/0,04	-26;-29	-38;-38	12,9	0,5/0,4

## Anhang 3.2: Ergänzung Studienverwaltungstabelle Komplikationen

### Zweilochplatten

Patient	Komplikation
	A = keine Indikation C = ME <sup>5</sup> zu spät D = Wundheilungsstörung
1	
3	A = falsche Indikation
26	D = Dysästhesie
4	B = inkorrekte Implantatlage
6	A = inkorrekte Indikation
7	A = inkorrekte Indikation
8	D = Wundheilungsstörung
10	C = ME zu spät
	A = keine Indikation
11	C = ME zu spät B = inkorrekte Implantatlage
16	D = Dysästhesie A = inkorrekte Indikation A = keine Behandlung trotz Indikation B = inkorrekte Implantatlage
19	C = Rebound C = Rebound
20	D = Dysästhesie
21	C = ME zu spät
22	D = Dysästhesie
24	D = Wundheilungsstörung

### PETS

Patient	Komplikation
26	E = Implantatversagen C = ME zu spät D = Dysästhesie
27	E = Implantatversagen
30	E = Implantatversagen
35	E = Implantatversagen
36	A = inkorrekte Indikation
38	D = Dysästhesie
39	D = Wundheilungsstörung
41	E = Implantatversagen
43	E = Implantatversagen
44	A = Indikation zu spät

<sup>5</sup> ME = Metallentfernung

## **Danksagung**

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

Besonders danken möchte ich Herrn PD Dr.med. Rolf Burghardt für seinen Einsatz für die Doktoranden und die enorme Hilfe bei der Umsetzung der gesamten Arbeit. Danke Rolf, auf deine Unterstützung war immer Verlass.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Prof. Dr. med. Rainer Burgkart für die Betreuung als Doktorvater und die fachlichen Ratschläge.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Kollegen Herrn Kevin von der Heydt und Herrn Alexander Frank für die gegenseitige Unterstützung und die gemeinsame Zeit bedanken.

Ebenfalls meinen Dank aussprechen möchte ich dem Team der Kinderorthopädie der Schön Klinik München-Harlaching für die fachkundigen Tipps und die Bereitstellung der Patientendaten sowie für die Möglichkeit, im OP zu hospitieren.

Und nicht zuletzt danke ich natürlich meiner Familie, vor allem meiner Mutter Claudia Heckel, und meinen Freunden für ihren objektiven Blick, ihre Geduld und Zusprüche während der Arbeit an dieser Dissertation.

## **Publikationen**

### Dissertation:

Thema: Ergebnisse der Therapie der Achskorrektur mittels kniegelenksnaher temporärer Hemiepiphyseodese

### Vorträge:

Rolf D. Burghardt, John E. Herzenberg, Peter Bernius, Michael Poschmann, Natascha Heckel, Kevin von der Heydt: Complications and Errors during Guided Growth. 38th EPOS Annual Meeting – European Paediatric Orthopaedic Society, Tel Aviv-Israel, 3.-6. April 2019 (beteiligt).

### Publikationen:

Rolf D. Burghardt, MD, Kevin von der Heydt, Natascha Heckel, John E. Herzenberg, MD, Peter Bernius, MD, Rainer Burgkart, MD: Complications and Errors in Guided Growth Surgery (im Review-Prozess für JPO)

Hemiepiphysiodesis with Screw Plate Devices versus Transphyseal Screws: a comparative study) basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Dissertation (zur Einreichung vorgesehen in JPO-B)

### Kongresse:

21st EFORT Annual Congress - European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology 28.-30. Oktober 2020 mit wissenschaftlichem Beitrag zum Thema Guided Growth In Case Of Varus/Valgus Deformity - Transphyseal Screw (PETS) Versus Screw Plate Device in Form eines ePosters (virtuell aufgrund von Covid-19)