

Orthopäde 2022 · 51:415–432
<https://doi.org/10.1007/s00132-022-04219-8>
Angenommen: 17. Januar 2022
Online publiziert: 31. März 2022
© Der/die Autor(en) 2022

Wissenschaftliche Leitung

C. Chiari, Wien
H. Gollwitzer, München
J. Grifka, Bad Abbach
M. Jäger, Essen
A. Meurer, Frankfurt a.M.
D. Pape, Luxemburg



CME

Zertifizierte Fortbildung

Epiphysiodesen und Hemiepiphysiodesen

Wachstumsstopp und Wachstumslenkung an der unteren Extremität

Madeleine Willegger^{1,2} · Maryse Bouchard² · Reinhard Windhager¹ · Alexander Kolb¹ · Catharina Chiari¹

¹ Universitätsklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Klinische Abteilung für Orthopädie, Medizinische Universität Wien, Wien, Österreich

² Division of Orthopaedics, Hospital for Sick Children, Toronto, Kanada

Zusammenfassung

Durch das Prinzip der Wachstumsblockade mittels Epiphysiodese und der Wachstumslenkung durch Hemiepiphysiodese können sowohl Beinlängendifferenzen als auch sagittale, koronare und schräge Achsdeformitäten an der unteren Extremität während des Wachstums korrigiert werden. Es werden temporäre und permanente Techniken unterschieden. Der große Vorteil liegt in der minimal-invasiven Anwendung und den geringen Komplikationen. Essenziell sind die genaue Planung sowie das exakte Timing, besonders wenn permanente Verfahren angewandt werden. Die Anwendung rund um das kindliche Kniegelenk kann als Goldstandard der Behandlung von Beinlängendifferenzen und Varus- und Valguskorrekturen bezeichnet werden. Die Wachstumslenkung an der unteren Extremität hat über die letzten Jahre viele neue Einsatzmöglichkeiten an der Hüfte und am Sprunggelenk gefunden. Die erfolgreichen klinischen Ergebnisse mit geringen Komplikationen unterstützen die breite Anwendung der Hemiepiphysiodese und Epiphysiodese am wachsenden Skelett bei Achsfehlstellungen und Beinlängendifferenzen.

Schlüsselwörter

Wachstumslenkung · Deformitätenkorrektur · Beinlängendifferenz · Kind · Zuggurtungsplatte

Online teilnehmen unter:
www.springermedizin.de/cme

Für diese Fortbildungseinheit werden 3 Punkte vergeben.

Kontakt

Springer Medizin Kundenservice
Tel. 0800 77 80 777
(kostenfrei in Deutschland)
E-Mail:
kundenservice@springermedizin.de

Informationen

zur Teilnahme und Zertifizierung finden Sie im CME-Fragebogen am Ende des Beitrags.



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

Lernziele

Nach Lektüre dieses Beitrags ...

- ist Ihnen das Prinzip der Epiphysiodese und Hemiepiphysiodese bekannt,
- sind Sie mit dem physiologischen Verlauf des Wachstums und der Beinachsen vertraut,
- kennen Sie die Grundlagen der Wachstumsprognose und des Timings der Epiphysiodese,
- wissen Sie, welche Techniken der Wachstumslenkung an der unteren Extremität (Hüfte, Knie, Sprunggelenk) Anwendung finden,
- sind Sie informiert über die klinischen und radiologischen Ergebnisse der Epiphysiodese und Hemiepiphysiodese rund um das kindliche Kniegelenk,
- sind Ihnen die potenziellen Komplikationen der Wachstumslenkung an der unteren Extremität (Hüfte, Knie, Sprunggelenk) bekannt.

Einleitung

Der Begriff **Epiphysiodese** (von gr. „epiphyesthai“ – darauf wachsen und gr. „desis“ – binden) bedeutet, dass die Wachstumsfuge durch eine chirurgische Intervention verschlossen wird. Durch das Prinzip der Epiphysiodese (ED) können Beinlängendifferenzen (BLD) am wachsenden kindlichen Skelett ausgeglichen oder angeglichen werden. Essenziell ist eine genaue Planung, da ein zu früher Verschluss der Fugen zu einer Überkorrektur (zu kurze Extremität) oder ein zu später Verschluss zu einer Unterkorrektur (zu lange Extremität) führen kann. Eine klinische und radiologische Observanz der Achsverhältnisse im Verlauf ist ebenfalls wichtig, um ggf. sekundäre Deformitäten frühzeitig zu erkennen und zu behandeln [1, 2, 3, 4]. Eine **Hemiepiphysiodese** (HED) betrifft nur eine Hälfte der Wachstumsfuge, wodurch ein weiteres Wachstum auf der nicht verschlossenen Seite gegeben ist. Dadurch können

Abkürzungen

ADTA	Anteriorer distaler Tibiawinkel
a/p	Anterior/posterior
BLD	Beinlängendifferenz
CCD	Centrum-Collum-Diaphysen-Winkel
dF	Distales Femur
d/p	Dorsopalmar
ED	Epiphysiodese
HED	Hemiepiphysiodese
HME	Hereditäre multiple Exostosen
IVO	Intertrochantäre Varisationsosteotomie
LDTA	Lateraler distaler Tibiawinkel
MAD	Mechanical axis deviation
mLDFA	Mechanischer lateraler distaler Femurwinkel
MI	Migrationsindex
mM	Medialer Malleolus
mMPTA	Mechanischer medialer proximaler Tibiawinkel
mMS	Mediale Malleolusschraube
PETS	Percutaneous epiphysiodesis using transphyseal screws
pF	Proximale Fibula
pT	Proximale Tibia
TM	Trochanter major
UE	Untere Extremitäten
ZGP	Zuggurtungsplatte

Epiphysiodese and hemiepiphysiodese. Physeal arrest and guided growth for the lower extremity

The principals of growth arrest by epiphysiodese and growth guidance by hemiepiphysiodese are effective and powerful surgical techniques in pediatric orthopedics. These procedures can be used to correct leg length discrepancies as well as sagittal, coronal and oblique deformities. A differentiation is made between temporary and permanent techniques. The most significant advantage is that these techniques are minimally invasive and have low complication rates compared to acute osteotomy and gradual deformity correction. For optimal outcome an exact preoperative planning is needed to ensure accurate timing of the procedure, especially when permanent epiphysiodese techniques are used. Although epiphysiodese and hemiepiphysiodese around the pediatric knee are most frequently used and can be considered the gold standard treatment of coronal plane deformities and leg length discrepancies, novel techniques for the hip and ankle are increasingly being performed. The successful clinical results with low complications support the broad use of hemiepiphysiodese and epiphysiodese for a variety of indications in the growing skeleton with deformities and leg length differences.

Keywords

Guided growth · Deformity correction · Leg length discrepancy · Child · Tension band plate

Achsfehlstellungen graduell über das Restwachstum auf der konvexen Seite der Deformität korrigiert werden. Mittels HED können je nach Platzierung und Lokalisation sowohl sagittale, koronare als auch schräge Achsdeformitäten an der unteren Extremität korrigiert werden. Die HED bei Deformitäten des heranwachsenden Kindes ist sehr effektiv und vermeidet die Komplikationen von akuten Korrekturen durch Osteotomien oder graduellen Korrekturen durch externe Fixierung (Fixateur externe) [5, 6, 7].

Grundprinzipien

Hueter lieferte 1862 erstmals eine wissenschaftliche Erklärung für das Phänomen der mechanischen Beeinflussung des Knochenwachstums, als er berichtete, dass ein erhöhter Druck parallel zur Achse der Epiphyse das Wachstum hemmt, während ein veringertes Druck das Wachstum fördert [8]. Sieben Jahre später stellte Volkmann fest, dass Veränderungen der **Druckkräfte** ein asymmetrisches Wachstum eines Gelenks verursachen. Diese Beobachtungen, die vor fast 150 Jahren gemacht wurden, legten den Grundstein für das Konzept der **Epiphysenklammern** und haben andere Aspekte der pädiatrischen orthopädischen Praxis beeinflusst [9]. Die Beziehung zwischen Belastung und epiphysärer Modellierung ist jedoch komplexer, als es das Hueter-Volkmann-Gesetz vermuten lässt. Die Theorie der „**chondralen Modellierung**“ von Frost besagt, dass die Beziehung zwischen Belastung und chondralem Wachstum einer umgekehrten U-Form ähnelt ([10]; **Abb. 1**).

Physiologische **Belastungen** stimulieren das Wachstum, während Belastungen außerhalb dieses Bereichs, ob höher oder niedriger, das Wachstum hemmen. Geringfügige **Inkongruenzen** im Gelenk, bei denen die Belastungen innerhalb der physiologischen Grenzen bleiben, rufen also eine negative Rückkopplung hervor, um das Gelenk wieder zu normalisieren. Eine zunehmende Inkongru-

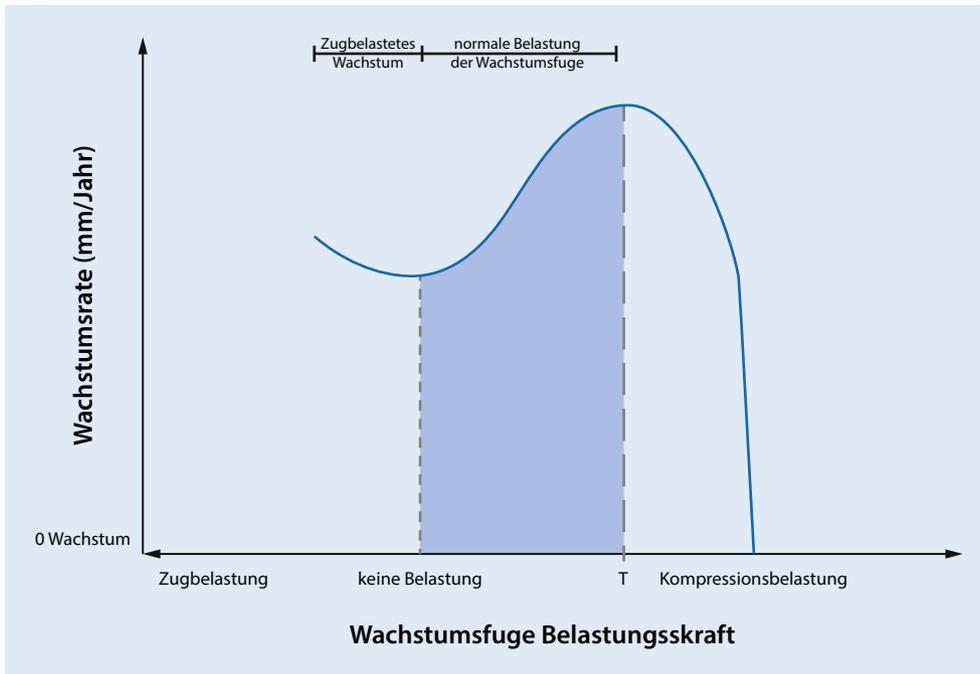


Abb. 1 ◀ Kurvenverlauf, der die Reaktion der Wachstumsfuge auf mechanische Belastungen zeigt. T ist der Schwellenwert der Belastung, der das Längenwachstum hemmt. (Mod. nach: [11, 12])

enz führt dazu, dass die Wachstumsfuge Belastungen ausgesetzt wird, die außerhalb des normalen physiologischen Bereichs liegen, und ruft einen positiven Rückkopplungsmechanismus hervor, der zu einer fortschreitenden Deformierung führt [5]. Diese komplexe, nichtlineare Beziehung hat viele Auswirkungen auf die Behandlung von Deformitäten einschließlich eines Zeitfensters, außerhalb dessen eine Manipulation der Wachstumsfuge fehlschlagen kann. Vor allem aber legt sie nahe, dass jeder Eingriff in einem frühen Stadium erfolgen sollte, in dem eine **negative Rückkopplungskorrektur** genutzt werden kann. Eine frühzeitige Wiederherstellung der mechanischen Achse ist wünschenswert, um dauerhafte Anomalien an den angrenzenden Gelenkflächen zu vermeiden, die andernfalls zu langfristiger Morbidität führen würden.

Evolution

Die initial 1933 von Phemister beschriebene ED-Technik zum definitiven Verschluss der Wachstumsfugen rund um das kindliche Kniegelenk beinhaltet eine Osteotomie mit Extraktion eines Knochenblocks auf Höhe der Wachstumsfuge [13]. Der **Knochenblock** wird rotiert und wieder eingesetzt, um einen Verschluss der Fuge zu erzielen. Diese Technik ist wirksam, wurde jedoch über die Jahre aufgrund der Invasivität großteils von weniger invasiven Techniken abgelöst. Die **perkutane Drillepiphysiodese** nach Canale mit Kürettage der Wachstumsfuge ist eine beliebte weniger invasive definitive Lösung mit reproduzierbaren Ergebnissen, solange auf eine korrekte Durchführung geachtet wird [3].

Inspiziert von Tierexperimenten von Haas, entwickelten Blount und Clarke ein Klammerimplantat zur temporären Blockade der Wachstumsfuge. Die **Blount-Klammer** war das erste Implantat, das breite Anwendung fand. Komplikationen mit Implantatbruch, Dislokation und Extrusion der Klammern führten zu einem Korrekturverlust mit hohen Revisionsraten. Ein sog. **Rebound-Phänomen**

nach Entfernen einer Blount-Klammer-HED mit überschießendem Wachstum der blockierten Fuge und erneuter Deformität konnte bei bis zu 40% der Kinder und Jugendlichen beobachtet werden. Vor allem junge Patienten mit einem hohen Restwachstumspotenzial neigten zum Rebound, weshalb eine Überkorrektur bei Mädchen unter 12 Jahren und Jungen unter 13 Jahren empfohlen wurde [2, 14].

► Cave

Die **Blount-Klammer-Epiphysiodese/Hemiepiphysiodese** war mit hohen Implantat-assoziierten Komplikationsraten sowie dem **Rebound-Phänomen** verbunden.

Zusammenfassend führten diese Eigenschaften zu einer sehr hohen Unvorhersehbarkeit der Methode. Zur Behandlung der Beinlängendifferenz zeigten die Blount-Klammern ebenfalls nur mäßig zufriedenstellende Ergebnisse mit einem Drittel an Revisionsepiphysiodesen [15]. Métaizeau propagierte die **gekreuzte Schraubentechnik**, auch PETS („percutaneous epiphysiodesis using transphyseal screws“) genannt [16]. Eine ED mit gekreuzten Schrauben ist sicherlich die minimal-invasivste Technik. Ob diese Technik tatsächlich eine temporäre Wachstumsblockade hervorruft, bleibt umstritten. Bei einer adäquaten präoperativen Planung inklusive Timing, sollte es jedoch ohnehin zu keiner Überkorrektur kommen, weshalb eine temporäre Lösung zur ED eigentlich obsolet ist. Anzumerken ist, dass die perkutane Entfernung der Schrauben Probleme bereiten kann. Die Ergebnisse zur Behandlung der BLD als auch zur Achskorrektur sind jedoch unumstritten erfolgreich [17, 18]. Peter M. Stevens revolutionierte im Jahr 2005 die Wachstumslenkung mit einem neuen Implantat. Dieses besteht aus einer kleinen 2-Loch-Platte mit niedrigem Profil, die extraperiostal angebracht wird und mit zwei 4,5 mm kanülierten nicht-winkelstabilen Vollgewindeschrauben zur Blockade der Wachstumsfuge implantiert



Gesamt- wachstum UE	Wachstum pro Knochen	Wachstum pro Fuge (Alter >5 Jahre)	Wachstum pro Fuge pro Jahr (Menelaus)	Wachstum pro Fuge pro Jahr (Dimeglio)
[%]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]
15	29	3-4	3	
37	71	10	9	11
28	57	6	6	9
21	43	4-6	5	

Abb. 2 ◀ Überblick über den aktuellen Wissensstand zum Wachstum der unteren Extremitäten (UE) [21]

wird. Die Platte wirkt entsprechend dem **Zuggurtungsprinzip** und ist dementsprechend ein Zuggurtungsplatten(ZGP)-Konstrukt. Das Fulcrum (Drehpunkt) liegt außerhalb der Wachstumsfuge, und es erfolgt die Ausübung einer Zugspannung auf die Wachstumsfuge. Während eine Klammer einen starren Drehpunkt innerhalb der Wachstumsfuge bildet, liegt das Rotationszentrum des Implantats außerhalb der Wachstumsfuge, wodurch ein längerer Hebelarm für das Wachstum entsteht, der theoretisch eine schnellere Korrektur bei gleichbleibender Gesamtlänge des Knochens ermöglicht [19]. Die Fähigkeit der Schraube, sich zu bewegen, führt zu einer geringeren Druckübertragung über die Wachstumsfuge, wodurch das Risiko einer Fusion der Fuge verringert wird [20]. Andere Implantate, die auf ähnlichen Prinzipien beruhen, sind in der Zwischenzeit ebenfalls am Markt. Diese vielfache Verbesserung der Anpassungsfähigkeit des Implantates gegenüber der Blount-Klammer hat zu einem erneuten Interesse an der Wachstumslenkung und folglich zu einer raschen Ausweitung seiner Indikationen geführt.

Planung und Timing

Eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Planung einer ED oder HED ist das Wissen über den physiologischen Verlauf des **Wachstums** sowie über die normalen Achsverhältnisse an der unteren Extremität. Das Femur und die Tibia machen 54% bzw. 46% der Gesamtlänge der unteren Extremität bei der Skelettreife aus. Vier Wachstumsfugen (proximale und distale Femur- bzw. Tibiafuge) und der Fuß sind für das Längenwachstum verantwortlich, der größte Längenzuwachs findet um das Kniegelenk statt [21]. Anderson stellte fest, dass 71% des Femurwachstums distal und 57% des Tibiawachstums proximal stattfinden ([22]; **Abb. 2**). Die Gesamtwachstumsrate und das Wachstum der Extremitäten nehmen von der Geburt an ab, und zwar bis zur Pubertät, wenn der pubertäre Wachstumsschub einsetzt. Die unteren Gliedmaßen wachsen ab

dem 5. Lebensjahr bis zur Pubertät im Durchschnitt 3,2 cm pro Jahr (ca. 2 cm pro Jahr am Oberschenkelknochen und 1,5 cm pro Jahr am Schienbein). Bis zum Beginn der Pubertät (Tanner-Stadium 2 und Skeletalter von 13 Jahren bei Jungen und 11 Jahren bei Mädchen) beträgt das verbleibende Wachstum der unteren Extremitäten im Durchschnitt 10 cm bei Jungen und 9 cm bei Mädchen, bevor die Skelettreife erreicht ist. Die Pubertät ist ein kurzer Zeitraum von etwa 2 Jahren mit raschen Wachstumsveränderungen. Die Wachstumsrate der unteren Extremitäten beschleunigt sich von 3,2 cm auf 5 cm pro Jahr am Höhepunkt der Pubertät [23, 24]. Das Alter zum Zeitpunkt des schnellsten Längenwachstums („peak height velocity“) liegt vor dem Einsetzen der Menstruation oder dem Auftreten des Risser-Zeichens bei Mädchen [25]. Menelaus definierte das Ende des Wachstums im Alter von 14 Jahren für Mädchen bzw. 16 Jahren für Jungen.

► Merke

Nach Menelaus ist das Ende des Längenwachstums bei Mädchen im Alter von 14 und bei Jungen im Alter von 16 Jahren erreicht.

Diese Formeln gelten nur, wenn die Pubertät im normalen Altersabschnitt beginnt. Das Wachstum eines Kindes mit Pubertas praecox oder tarda verhält sich anders, und eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit mit pädiatrischen Endokrinologen ist zu einer genaueren Analyse wünschenswert. Der beste Weg, das Wachstum einzuschätzen, sind möglichst exakte und **wiederholte Messungen**. Je genauer und häufiger die Daten erhoben werden, desto sensibler und präziser ist die Wachstumsprognose, wodurch die chirurgische Therapie gezielter geplant werden kann. Strenge Analyse und Flexibilität bei der Interpretation sind der Schlüssel zum Erfolg.

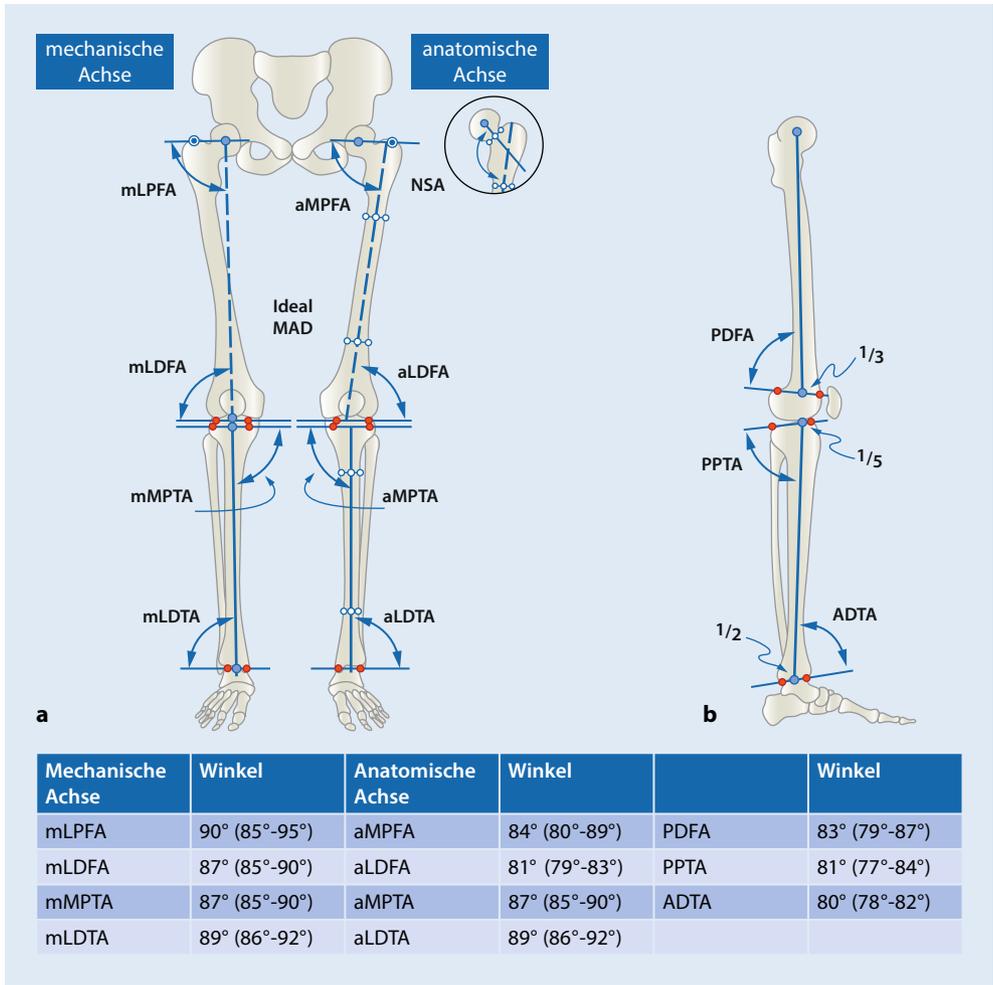


Abb. 3 ◀ Mechanische und anatomische Achsverhältnisse an der unteren Extremität. **a)** zeigt eine schematische Darstellung der anterioren Ansicht eines beidseitigen Ganzbeinröntgens im Stehen. Auf der linken Seite ist die mechanische Achse des Femurs und der Tibia eingezeichnet, auf der rechten Seite die anatomische Achse beider Knochen. Die internationale Nomenklatur der proximalen und distalen Winkel wird folgendermaßen im Englischen bezeichnet: *m* mechanical, *a* anatomical, *L* lateral, *D* distal, *P* proximal, *F* Femur, *T* Tibia, *A* angle. Die MAD beschreibt die „mechanical axis deviation“. Im Idealfall verläuft die mechanische Beinachse (gerade Falllinie vom Zentrum des Hüftgelenks zum Zentrum des Sprunggelenks) durch das Zentrum des Kniegelenks. Am proximalen Femur wird der neckshaft angle (NSA) beschrieben, welcher im Deutschen als Centrum-Collium-Diaphysenwinkel (CCD-Winkel) bezeichnet wird. **b)** zeigt eine schematische Darstellung einer lateralen Ansicht eines seitlichen Ganzbeinröntgens. Die modifizierte sagittale mechanische Achse des Femurs und der Tibia ist eingezeichnet. Die Nomenklatur der Winkel ist: *PDFFA* posterior distal femur angle, *PPTA* posterior proximal tibia angle, *ADTA* anterior distal tibia angle. (Mod. nach: [26])

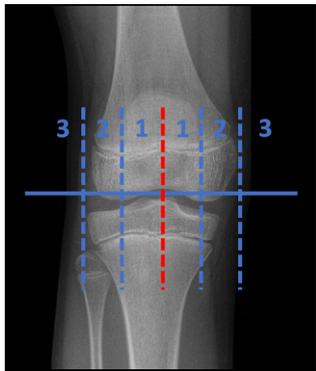


Abb. 4 ◀ Darstellung der MAD („mechanical axis deviation“)-Zonen am Kniegelenk. Liegt die MAD in Zone 1, ist kein Handlungsbedarf. Verläuft die MAD durch Zone 2, ist eine Hemiepiphysiodese (HED) indiziert. Bei Zone 3 handelt es sich um eine schwere Fehlstellung, die eine absolute Indikation zur HED am kindlichen Knie darstellt

Achsverhältnisse an der unteren Extremität

Es wurden Normwerte für die Ausrichtung der Beinachse in der Frontalebene festgelegt, die die mechanische Belastung der unteren Extremitäten beschreiben. Diese werden anhand eines stehenden Ganzbeinröntgens (anterior-posterior) vermessen. Es wird zwischen einer mechanischen und anatomischen Achse der korrespondierenden Knochen unterschieden. Für die Sagittalebene gibt es ebenfalls Normwerte, die anhand eines seitlichen Ganzbeinröntgens vermessen werden (Abb. 3).

Die **mechanische Achse** der unteren Extremität ist die Linie, die den Mittelpunkt des Hüftkopfes mit dem Mittelpunkt des Sprunggelenks verbindet (Frontalebene). Wird die mechanische Achse relativ zur Mitte des Knies nach medial verschoben, entsteht ein Genu varum; wird die Achse umgekehrt relativ zur Mitte des Knies nach lateral verschoben, entsteht ein Genu valgum. Die sog. „**mechanical axis deviation**“ (MAD) kann in Millimetern vermessen werden [27]. Da die Normwerte der Achsverhältnisse am erwachsenen Skelett definiert wurden, sind für das kindliche Skelett andere Parameter ausschlaggebend. Der Winkel zwischen der mechanischen Achse des Femurs und der Tibia wird als **femorotibialer Winkel** bezeichnet. Die Entwicklung der Achsverhältnisse der unteren Extremitäten in der Frontalebene während der Kindheit wurde von Salenius und Vankka beschrieben [28]. Das normale Entwicklungsmuster des pädiatrischen femorotibialen Winkels ist symmetrisch und folgt einem einheitlichen Muster [29]. Neugeborene werden typischerweise in varus („O-Beine“) geboren. Im Alter von 18 bis 24 Monaten erreichen sie einen neutralen Winkel von 0°, anschließend entwickeln sie im Alter von etwa 3 Jahren einen Valguswinkel („X-Beine“). Salenius und Vankka definierten ein normales Alignment als einen endgültigen femorotibialen Winkel von 6° valgus, der im Alter von 7 Jahren erreicht wurde [11, 28]. Der femorotibiale Winkel ist jedoch ein indirektes Maß für die

Tab. 1 Planung der Lokalisation und des Zeitpunkts der Epiphysiodese zur Korrektur der Beinlängendifferenz (BLD) <5 cm zu Beginn der Pubertät nach Bestimmung des Skeletalters [24]		
BLD	Lokalisation Epiphysiodese	Timing/Zeitpunkt
5 cm	Femur + Tibia	Beginn Pubertät (Skeletalter: 13 Jahre Jungen, 11 Jahre Mädchen)
4 cm	Femur + Tibia	Beginn Pubertät + 6 Monate
3 cm	Femur	Beginn Pubertät
2 cm	Femur	Beginn Pubertät + 1 Jahr
2 cm	Tibia	Beginn Pubertät

tatsächliche Ausrichtung der Beine. Er ermöglicht keine Analyse oder Quantifizierung des Verlaufs der mechanischen Kräfte, die beim Stehen auf das Knie wirken [26, 30]. Bei der Analyse von frontalen Achsabweichungen der Kniegelenke kann die MAD gemessen und nach der ursprünglich von Müller und Müller-Färber entwickelten Klassifikation in Zonen eingeteilt werden [31]. Diese Klassifizierung wird v. a. zur Indikationsstellung für wachstumslenkende Eingriffe im Kindesalter verwendet. Eine Achsabweichung, die in Zone 1 fällt, gilt als geringfügig und liegt wahrscheinlich im normalen Bereich. Liegt die MAD in Zone 2, ist die Fehlstellung bereits relativ schwerwiegend und erfordert eine Behandlung oder zumindest eine engmaschige Verlaufskontrolle, denn unbehandelt kann diese Fehlstellung rasch in Zone 3 wandern. Zone 3 ist eine absolute Indikation für einen wachstumslenkenden Eingriff ([11]; **Abb. 4**).

Timing

Der wichtigste limitierende Faktor ist der adäquate Zeitpunkt der Epiphysiodese, das sog. „Timing“. Dies spielt v. a. beim Ausgleich von Beinlängendifferenzen eine essenzielle Rolle. Die Prognose der zu erwartenden Beinlängendifferenz bei abgeschlossener Skelettreife als auch der Zeitpunkt und die Lokalisation der Epiphysiodese (rund um das Kniegelenk) sind die Schlüsselfragen, die präoperativ zu beantworten sind.

► Merke

Die Wachstumsprognose der definitiven Länge des Knochens oder Körpergröße ist mit einem gewissen Fehler behaftet, der bei der Operationsplanung und der Beurteilung des Operationsergebnisses berücksichtigt werden muss.

Auf der Grundlage der Daten von Anderson, Green und Messner wurden mehrere Methoden zur **Wachstumsvorhersage** beschrieben und finden derzeit Anwendung [22]. Diese Daten umfassen die Femur- und Tibialängen von Kindern (Jungen und Mädchen) im Alter von 1 Jahr bis zur Skelettreife entsprechend dem chronologischen Alter. Für eine einfache Berechnung der zu erwartenden Beinlänge oder Beinlängendifferenz wird beispielsweise die aktuelle Länge des Femurs und der Tibia des „normalen“ Beins mit den Messungen von Anderson verglichen („Green-Anderson growth remaining chart“). Je nach Alter und Geschlecht kann die entsprechende Perzentile auf dem Diagramm definiert werden, und aus den Perzentilen kann die voraussichtliche Länge zum Zeitpunkt

der Skelettreife abgelesen werden. Moseley hat diese Daten in eine Tabelle mit geraden Linien umgewandelt („Moseley straight line graph“), sodass die vorhergesagte Beinlänge aus dem Diagramm abgelesen werden kann, indem die aktuellen Beinlängen und das Skeletalter aufgetragen werden [32]. Menelaus und White beschrieben eine vereinfachte Methode zur Wachstumsprognose, die auf eigenen Berechnungen beruhte und besagte, dass die unteren Extremitäten pro Jahr um 23 mm wachsen und das größte Wachstum dabei aus den Wachstumsfugen rund um das Kniegelenk resultiert mit 15 mm (9 mm aus dem distalen Femur und 6 mm aus der proximalen Tibia) [33, 34]. Die derzeit populärste Methode ist die von Paley entwickelte **Multipliiert-Methode**. Auf der Grundlage der Daten von Anderson und Green sowie eines Datensatzes von Maresch [35], der radiologisch gemessene Längen von Femora und Tibiae von Säuglingen im Alter von 0 bis 1 Jahr enthält, wurde ein Multiplikator ($M = „multiplier“$) berechnet, der sich aus der erwarteten Länge des Knochens bei Skelettreife (L_m) geteilt durch die Länge zum Zeitpunkt des aktuellen Alters (L) ergibt: $M = L_m / L$. Das Restwachstum oder die erwartete BLD kann mit einer einfachen Formel berechnet werden [36].

Die **Dimeglio-Methode** ist ähnlich der arithmetischen Menelaus-White-Methode. Dimeglio berechnet das Wachstum am Knie mit 2 cm pro Jahr (1,1 cm am Femur und 0,9 cm an der Tibia) zu Beginn der Pubertät (Knochenalter von 11 Jahren bei Mädchen und 13 Jahren bei Jungen). In diesem Modell hört das Wachstum im Knochenalter von 13,5 Jahren bei Mädchen und 15,5 Jahren bei Jungen auf. Basierend auf dieser Grundlage, werden für jede Beinlängendifferenz ab 5 cm ein Zeitpunkt und eine Lokalisation der Epiphysiodese erstellt ([37]; **Tab. 1**).

Tabellen, Graphen und mittlerweile Smartphone-Apps können die Darstellung und Berechnung der Wachstumsprognose vereinfachen. Im Hinterkopf ist jedoch zu behalten, dass die Genauigkeit der Berechnung unter allen Methoden schlecht ist mit einer signifikanten Rate von Fehlprognosen zwischen 10 und 27 % mit einer Abweichung des endgültigen Wachstums von über 2 cm vom prognostizierten Wert [38]. Der behandelnde Kinderorthopäde sollte auch bedenken, dass einfache Berechnungsfehler in 18 % der Fälle nachweislich auftreten [39]. In einem direkten Vergleich der **Vorhersagegenauigkeit** zeigte die ursprüngliche Green-Anderson-Methode für das verbleibende Wachstum die größte Korrelation zwischen der erwarteten und der endgültigen BLD nach Epiphysiodese. Dennoch generierten alle Methoden einen überkorrigierten Wert [40]. Durch die Anwendung mehrerer Methoden, Messwiederholungen im Laufe der Zeit und die Bestimmung des Skeletalters kann die Präzision der Prognose erhöht werden [24, 41]. Die Genauigkeit der Vorhersage der endgültigen Beinlängendifferenz nimmt zu, je älter das Kind wird (Kinder über 10 Jahre) [21].

► Merke

Durch Messwiederholungen im Laufe der Zeit, die Verwendung des Skeletalters sowie die Berechnung mit mehreren Methoden können Fehlprognosen hinsichtlich des Restwachstums minimiert werden.

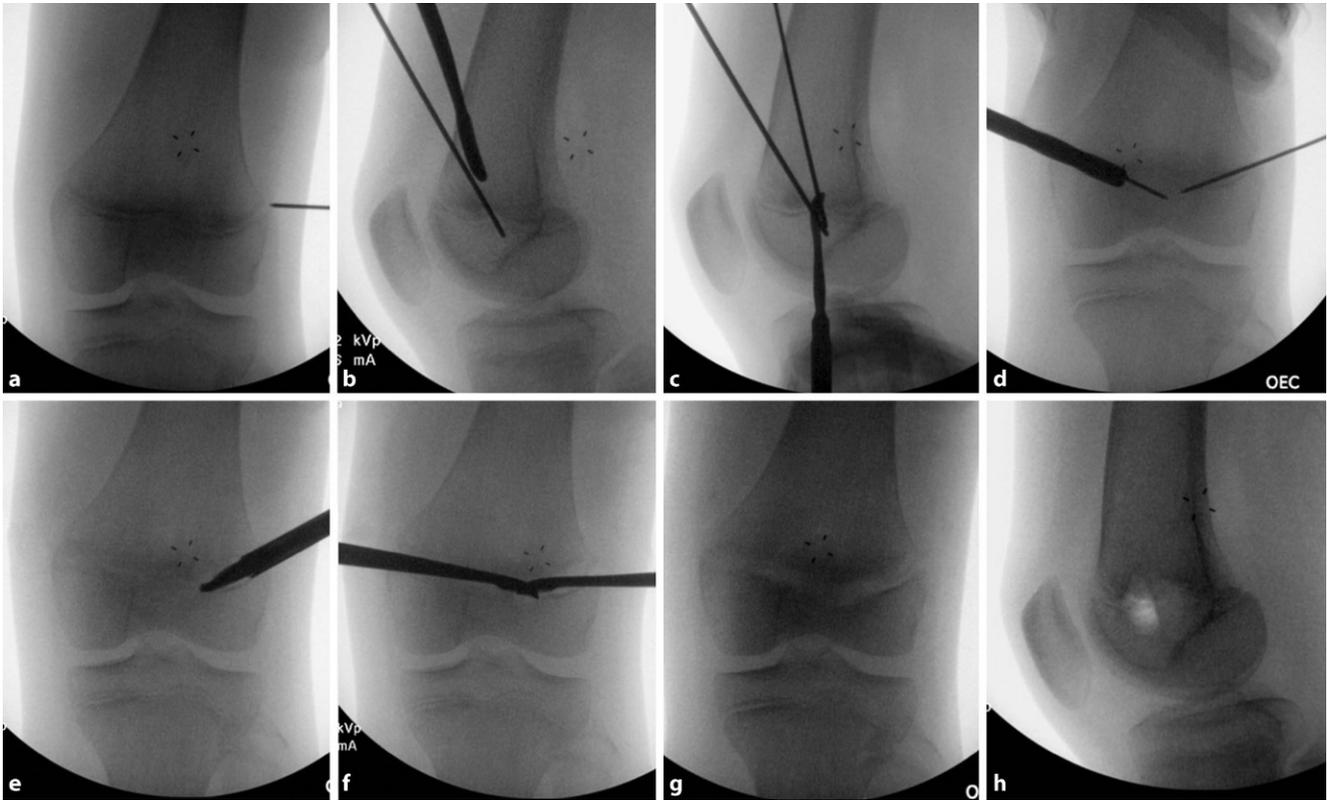


Abb. 5 ▲ Technik der Drillepiphysiodese am distalen Femur. **a** Die Lokalisation der Wachstumsfuge wird von lateral unter Bildwandlerkontrolle bestimmt, und ein Bohrdraht wird zentral in die Fuge eingebracht. **b** Die Position des Bohrdrahtes in der Sagittalebene wird im seitlichen Röntgenbild verifiziert. **c** Ein 2. Bohrdraht wird nun von medial eingebracht, und die Position des Drahtes wird ebenfalls im a/p (anterior/posterior) und lateralen Röntgenbild kontrolliert. **d** Nun wird ein 7,3 mm kanülierter Bohrer verwendet, um die Fuge von medial und lateral aufzubohren und einen Arbeitskanal zu kreieren. **e** Die Bohrdrähte werden entfernt, und ein solider 6,0-mm-Bohrer wird verwendet, um schrittweise das Fugengewebe zu zerstören. Der Bohrer kann axial fächerförmig von anterior nach posterior bewegt werden. **f** Küretten werden verwendet, um das restliche Fugengewebe zu entfernen. **g, h** Abschließende a/p und laterale Röntgenbilder bestätigen eine suffiziente Kürettage der Fuge. Die postoperative Mobilisierung ist belastend. Eine Sportkarenz für 6 Wochen sollte eingehalten werden, um das Risiko einer Salter-Harris-Fraktur zu minimieren

Skeletalter

Das chronologische Alter basiert auf den tatsächlichen Lebensjahren. Das Skeletalter (Knochenalter) ist ein **Reifeindikator**, der auf einer Reihe von röntgenologischen „Normen“ basiert, die uns Vorhersagen über das zukünftige Wachstum ermöglichen. Der Greulich-Pyle-Atlas beschreibt die Stadien der Verknöcherung auf einer einfachen dorsopalmar (d/p) Röntgenaufnahme der linken Hand einschließlich des Handgelenks [42]. Die Tanner-Whitehouse- und die Short-Hand-Bone-Age-Methode sind weitere Verfahren zur Beurteilung des Knochenalters anhand einer Röntgenaufnahme der linken Hand [43, 44]. Die unterschiedlichen Merkmale der Verknöcherung im kindlichen Skelett können genutzt werden, um ein Knochenalter zu bestimmen und die Befunde mit dem chronologischen Alter des Kindes zu korrelieren. Eine Differenz von chronologischem Alter zum Skeletalter von ± 1 Jahr oder mehr kann als akzeleriertes, normales oder retardiertes Knochenalter klassifiziert werden [45]. Während der 2 Jahre des pubertären Wachstumsschubs hat sich die **Sauvegrain-Methode** als zuverlässig erwiesen. Die Sauvegrain-Methode bestimmt das Knochenalter mithilfe eines 27-Punkte-Scoring-Systems anhand einer anterioren/posterioren (a/p) und seitlichen Röntgenaufnahme des linken

Ellbogens [46]. Der Ellbogen wird durch eine ausgeprägte Entwicklungsfolge seiner Ossifikationszentren definiert, die bei Mädchen im Alter von 9 und bei Jungen im Alter von 11 Jahren beginnt. Die Fusion der Wachstumsfugen des Ellenbogens ist bei Mädchen im Alter von 13 und bei Jungen im Alter von 15 Jahren abgeschlossen [43]; 50% der Kinder haben ein akzeleriertes oder retardiertes Skeletalter [24]. Ein Knochenalter, das um mehr als 2 Standardabweichungen vom mittleren Alter abweicht, ist wahrscheinlich auf einen pathologischen Zustand zurückzuführen [47].

► Merke

Die Verwendung des Skeletalters zur Berechnung der Wachstumsprognose erhöht die Genauigkeit der Prognose.

Anwendungen und Ergebnisse rund um das Kniegelenk

Epiphysiodesen rund um das Kniegelenk zur Beinlängendifferenzkorrektur

Im Allgemeinen ist die Epiphysiodese ein zuverlässiges und sicheres Verfahren zur Behandlung von BLD. Die ED wird am häufigsten am distalen Femur (dF), an der proximalen Tibia (pT) (mit oder

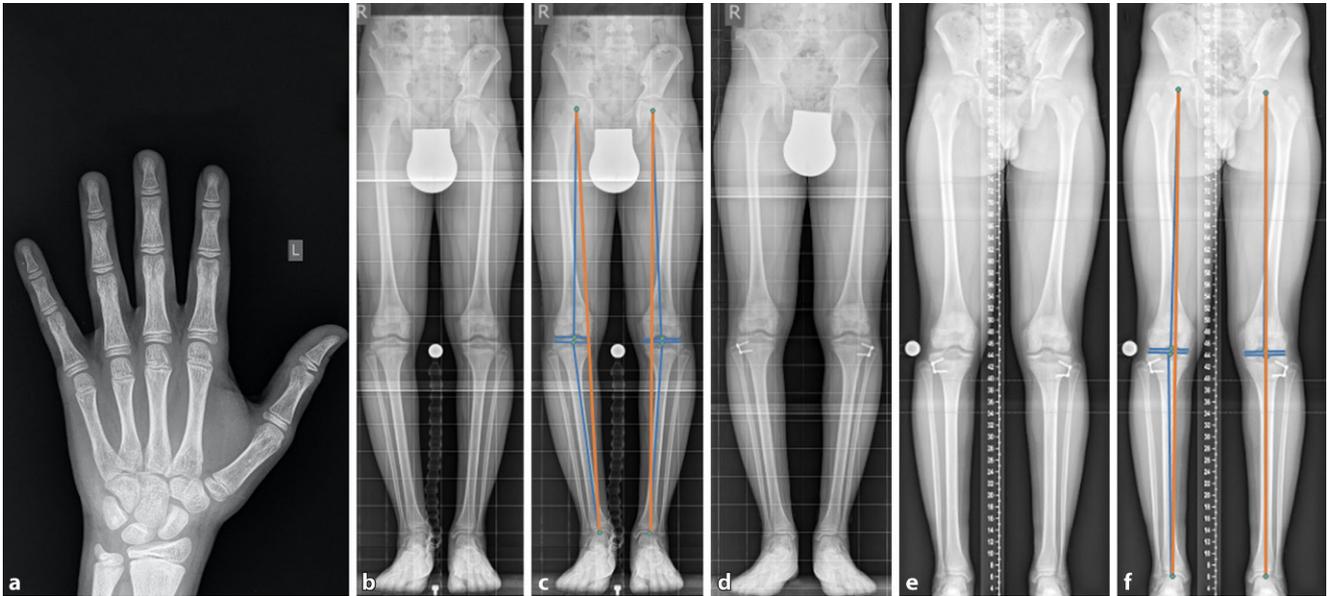


Abb. 6 ▲ Fallbeispiel Genu-varum-Korrektur mittels Zuggurtungsplatte nach Peter M. Stevens. Ein 14-jähriger Junge (14 Jahre und 3 Monate chronologisches Alter) wurde aufgrund einer idiopathischen Genu-varum-Fehlstellung vorstellig. Seine Körpergröße beträgt 160 cm. **a** Im Handröntgen sind die Epiphysenossifikationszentren der Metacarpalia und Phalangen breiter als die zugehörigen Metaphysen, „überdachen“ diese jedoch noch nicht. Im Bereich der Handwurzel ist der Hamulus des Os hamatum abgrenzbar. Das Ossifikationszentrum des Daumensesambeins ist noch nicht sichtbar. Das Skeletalter nach Greulich und Pyle beträgt 12,5 Jahre. Dementsprechend handelt es sich um ein retardiertes Knochenalter. **b** Ein stehendes Ganzbeinröntgen mit Raster und Kalibrierungskugel wurde zur Beinachsenvermessung angefertigt. Das Risser-Stadium ist 0. **c** Die Beinachse (*orange Linie*) verläuft durch das mediale Kompartiment des Kniegelenks durch Zone 2. Die Deformitätenanalyse durch Einzeichnen der mechanischen Achsen des Femurs und der Tibia ergeben einen mMPTA von $81,4^\circ$ rechts und $83,9^\circ$ links sowie einen mLDA von $87,3^\circ$ rechts und $91,3^\circ$ links (*blaue Linien*). Der Großteil der Fehlstellung resultiert aus der proximalen Tibia weshalb die Indikation zur temporären Hemiepiphysiose der lateralen proximalen Tibia gestellt wurde. **d** Erstes Ganzbeinröntgen post operationem. **e** Follow-up nach 8 Monaten zeigt eine beidseitige Korrektur der Beinachse. Die Schrauben des Implantats divergieren. **f** Die mechanische Beinachse verläuft durch Zone 1 (*orange Linie*), der mMPTA beträgt $88,6^\circ$ rechts und $89,3^\circ$ links (*blaue Linien*), sodass die Metallentfernung in den folgenden 2 Monaten geplant wurde

ohne proximale Fibula [pF]) oder an beiden durchgeführt („Pangenu“-Epiphysiodese).

Komplikationen im Zusammenhang mit der ED rund um das Kniegelenk werden zwar im Allgemeinen als selten angesehen, sind aber vielfältig. Dazu gehören Wundhämatome, postoperativer Hämarthros mit oder ohne begleitende Kniegelenksteifigkeit, oberflächliche oder tiefe Infektionen, vorübergehende oder dauerhafte Neuropathie, ungenaues Timing der Operation, das zu einer Unter- oder Überkorrektur der BLD führt, und ein unbeabsichtigter unvollständiger Epiphysiodeseffekt, der eine Wiederholung der Operation erfordert oder die Entwicklung einer Achsdeformität mit sich bringt [16, 48, 49, 50]. Makarov et al. berichteten von einer Gesamtkomplikationsrate von 7% bei 863 behandelten Kindern. In dieser Studie wurden die klassische Phemister-Technik, die offene Kürettage der Wachstumsfuge sowie die minimal-invasivere Drillepiphysiodese untersucht. Die Entwicklung einer Achsdeformität ist eine mögliche Komplikation, insbesondere bei kongenitaler BLD, jüngeren Patienten und größeren Längenunterschieden der Extremitäten [51].

Die perkutane **Drillepiphysiodese** stellt eine solide und wenig invasive Methode zur Behandlung von BLD dar. Sie wird meist durch 1 oder 2 Inzisionen von medial und lateral durchgeführt ([3]; **Abb. 5**). Eine zufriedenstellende Korrektur der BLD wurde in 82% der Fälle berichtet, wobei eine asymmetrische Fusion oder Überkorrektur in 12% der Fälle zu Komplikationen führte [52].

Die **PETS** („percutaneous epiphysiodese using transphyseal screws“) -Technik mit einer gekreuzten Schraubenkonfiguration stellt eine minimal-invasive Methode zur ED dar. Vollgewindeschrauben aus Stahl mit einem großen Durchmesser (6,5 mm, 7,3 mm) werden verwendet, um die Wachstumsfuge zu blockieren. Es muss darauf geachtet werden, dass die Schrauben die Mitte der medialen und lateralen Fuge kreuzen. Eine Nachuntersuchung von 82 Patienten mit 126 behandelten Wachstumsfugen zeigten eine niedrige 3,7%-Revisionsrate [53]. Wichtig ist, dass mindestens 4 Schraubengewinde in der Epiphyse platziert werden, um eine angemessene Verankerung zu erzielen [16, 54].

► Merke

Bei der gekreuzten Schraubeneiphysiodese sollten mindestens 4 Gewindegänge die Epiphyse erreichen.

Die Verwendung von **Zuggurtungsplatten** zur Epiphysiodese findet v. a. Anwendung bei jungen Kindern mit größer prognostizierten BLD, die zu jung für eine definitive ED rund um das Kniegelenk sind, um die Beinlänge Schritt für Schritt anzugleichen. Einerseits ist v. a. an der proximalen Tibia wenig Platz in der Epiphyse, um genug Schraubengewinde mit der PETS-Methode sicher zu platzieren, andererseits besteht dennoch die Gefahr eines definitiven Fugenverschlusses durch die gekreuzte Schraubentechnik. Fraglich ist, ob die Platzierung von medialen und lateralen ZGP an

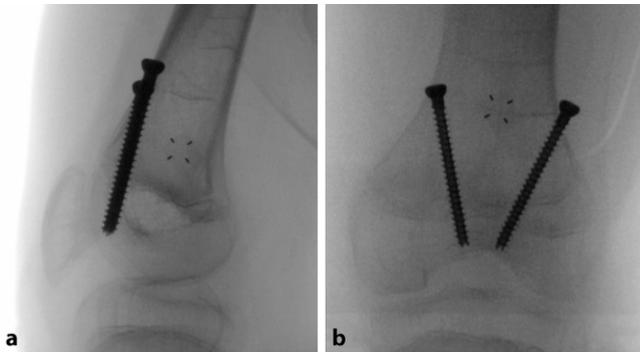


Abb. 7 ▲ 12 Jahre alter Junge mit Arthrogrypose und Osteoporose und einer fixierten Flexionskontraktur des linken Kniegelenks von 30°. Zur Wachstumslenkung und graduellen Korrektur der Flexionskontraktur erfolgte eine Hemiepiphysiodese des anterioren distalen Femurs mit 2 kanülierten 4,5-mm-Schrauben aus Stahl. **a** Die Fuge sollte in der Sagittalebene (laterales Röntgen) ca. im anterioren Drittel mit den Schrauben gekreuzt werden. **b** In der Frontalebene (a/p[anterior/posterior]-Röntgen) zielen die Schrauben Richtung Notch

der proximalen Tibia einen sog. „roofing effect“ bewirkt und eine intraartikuläre Deformität kreierte [55]. Rezente Daten von Ballhause et al. zeigten bei 44 Patienten jedoch keine intraartikuläre Deformität [56].

Ob eine Epiphysiodese an der proximalen Fibula (pF ED) notwendig ist, wenn eine definitive ED der proximalen Tibia (pT ED) durchgeführt wird, um ein überschießendes Wachstum der Fibula mit proximaler Migration des Fibulaköpfchens zu vermeiden, bleibt umstritten. Es besteht wie bei jeder Operation im Bereich des Fibulaköpfchens die potenzielle Komplikation einer Verletzung des N. peroneus. Boyle et al. untersuchten retrospektiv 234 Patienten nach pT ED mit und ohne pF ED [57]. Innerhalb der Untergruppe der jüngeren Kinder (≥ 2 Jahre verbleibendes Wachstum zum Zeitpunkt der ED) gab es statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Patienten mit und ohne pF ED zum Zeitpunkt der Skelettreife in Bezug auf den proximalen Tibia-Fibula-Abstand und das Verhältnis von Tibia zu Fibula („tibia:fibula ratio“). Bei 10 Patienten wurde ein offensichtliches **Überwachstum** der proximalen Fibula radiologisch bei Skelettreife festgestellt, darunter 5 von 55 (9%) ohne pF ED und 5 von 179 (2,8%) mit pF ED. In dieser Kohorte gab es keine Komplikationen durch die zusätzliche pF ED. Patienten mit relativem Überwachstum der proximalen Fibula waren alle symptomfrei und zeigten keine Irritation des N. peroneus [57]. Eine gleichzeitige pF ED scheint bei Patienten mit einer verbleibenden Wachstumszeit von 2 Jahren oder weniger nicht notwendig zu sein und verhindert nicht eindeutig ein zu starkes Wachstum des Fibulaköpfchens. McCarthy et al. beobachteten eine Wachstumsrate von 3 mm pro Jahr im Bereich der proximalen Fibula nach pT ED [49].

► Merke

Eine proximale Fibulaepiphysiodese während der Durchführung einer proximalen Tibiaepiphysiodese ist potenziell bei Patienten mit einem verbleibenden Restwachstum von mehr als 2 Jahren anzudenken.

Im Fall eines **prognostizierten Hochwuchses** wie beispielsweise beim familiären Hochwuchs, dem Marfan-Syndrom oder auch dem Beckwith-Wiedemann-Syndrom kann eine beidseitige Epiphysiodese der kniegelenknahen Wachstumsfugen durchgeführt werden. Die vorhandenen Studien zeigen eine Größenreduktion von ca. 5 cm. Im Allgemeinen gibt es keine Empfehlung für das perfekte Alter zur Korrektur eines zu erwartenden extremen Hochwuchses. Der Zeitpunkt sollte sich an den Wachstumsprognosen, der Pubertät und der gewünschten Größenreduktion orientieren [58].

Epiphysiodese zur koronaren Achskorrektur (Genu varum, Genu valgum)

Genu varum und Genu valgum sind häufige Fehlstellungen des Kindes- und Jugendalters, ihre genaue Prävalenz ist jedoch unbekannt. Die unbekannte Prävalenz ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Deformität durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden kann wie beispielsweise dem Geschlecht, der ethnischen Zugehörigkeit, der Ernährung, einer Krankheit und der körperlichen Aktivität [11]. Der Ursprung der **frontalen Achsabweichung** kann auf das distale Femur oder die proximale Tibia zurückgeführt werden (s. Normwerte **Abb. 3**). In zahlreichen Reviews wurden die Studien zur Wirksamkeit von ZGP zur Korrektur von Deformitäten der koronaren Ebene im Bereich des Knies zusammengefasst ([5, 11, 59]; **Abb. 6**). Danino et al. untersuchten in einer Multicenterstudie die Korrektur mittels ZGP anhand von 206 Patienten (362 Wachstumsfugen). Sie erreichten in 93 % eine mechanische Achsausrichtung (mL DFA zwischen 85 und 89°) am Femur und in 92 % eine Winkelkorrektur der mechanischen Ausrichtung der Tibia (mMPTA zwischen 85 und 89°) [60]. Berichtete Komplikationen der Wachstumslenkung mit ZGP sind Schraubenmigration, Infektion, Über- oder Unterkorrektur, vorzeitiger Verschluss der Wachstumsfuge und gebrochene Schrauben/Platten. Das sog. Rebound Phänomen beschreibt den Rückfall in die Achsdeformität nach Entfernen der ZGP. Patienten mit pathologischen Wachstumsfugen, Cozen-Deformität (Valgusdeformität nach proximaler metaphysärer Tibiafraktur) und Patienten im Alter von < 10 Jahren haben eine höhere Rebound-Rückfallquote [61, 62, 63].

► Cave

Patienten mit pathologischen Wachstumsfugen (z.B. Rachitis, Blount etc.), Cozen-Deformität und junge Kinder mit einem Alter von unter 10 Jahren neigen zu einem Rebound.

Eine erhöhte **Rebound-Häufigkeit** wurde auch bei Patienten mit einer anfänglichen Deformität von $> 20^\circ$ beschrieben [61]. Bei Patienten mit höherem Risiko empfiehlt Stevens [64] die Entfernung der metaphysären Schraube, sobald die gewünschte Korrektur erreicht ist, wobei die ZGP mit der epiphysären Schraube in situ belassen wird („**schlafende Platte**“). Tritt ein Rebound auf, kann die metaphysäre Schraube wieder eingesetzt werden, ohne dass eine neue Platte eingesetzt werden muss. Die potenziellen Vorteile dieser Strategie müssen gegen die möglichen unerwünschten Auswirkungen ihrer Anwendung abgewogen werden. In einer kürzlich durchgeführten multizentrischen Studie, an der 3 Zentren in



Abb. 8 ◀ Fallbeispiel einer medialen Malleolus(mM)-Hemiepiphysiose: 9 Jahre alter Junge mit einem Sprunggelenkvalgus und hereditären multiplen Exostosen. a–c a/p (anterior/posterior), Mortise und laterales Röntgen des rechten Sprunggelenks zeigen eine Valgusfehlstellung mit einem lateralen distalen Tibiawinkel (LDTA) von 69°. d–g Intraoperative Bilder: Zur besseren Darstellung des knorpeligen Anteils der mM erfolgte eine Arthrographie. Eine kanülierte 3,5-mm-Vollgewindeschraube wurde zur mM-HED (Hemiepiphysiose) verwendet. h–j a/p, Mortise und laterales Sprunggelenkröntgen zur postoperativen Nachuntersuchung 28 Monate später zeigen eine Korrektur des Sprunggelenkvalgus mit einem LDTA von 86°. Die Schraube zeigt eine leichte Biegung. In 6 Monaten sollte ein erneutes Röntgen stattfinden, und die Metallentfernung kann geplant werden

Argentinien und Chile beteiligt waren, wurden 28 Operationen mit „schlafenden Platten“ untersucht. Bei 22% der Extremitäten musste die metaphysäre Schraube erneut eingebracht werden [65]. Es wurde auch eine **Überkorrektur** vorgeschlagen, um den Rebound-Effekt abzuschwächen [66]. Da der Rebound-Effekt jedoch nicht vorhersehbar ist, kann eine deutliche Überkorrektur bei jedem mit Wachstumslenkung behandelten Patienten zu einer entgegengesetzten Deformität bei den Patienten führen, bei denen kein Rebound auftritt.

► Cave

Ein Rebound-Effekt ist schwer vorhersehbar. Dementsprechend sind prophylaktische Überkorrekturen als riskant einzustufen.

Epiphysiodese am anterioren distalen Femur

Patienten mit verschiedenen neuromuskulären Störungen, darunter Zerebralparese, Myelomeningozele, Arthrogrypose und andere Erkrankungen, weisen häufig **fixierte Kniebeugekontrakturen** auf. Bei einer fixierten Kniebeugekontraktur von mehr als 10°

müssen chirurgische Optionen in Betracht gezogen werden, die jedoch meist sehr invasiv sind (ausgedehnte Weichteilrelease, Extensionsosteotomien des distalen Femurs). Es hat sich gezeigt, dass durch minimal-invasive Wachstumslenkung am distalen anterioren Femur Fehlstellungen in der Sagittalebene korrigiert werden können [67, 68]. Die Indikation sollte gestellt werden, solange noch ein Restwachstum von über 12 Monaten zu erwarten ist [6, 67]. Spiro et al. berichten, dass v. a. junge Kinder mit einer ausgeprägten Flexionsfehlstellung von mehr als 30° von der Wachstumslenkung profitieren [68]. Schrauben, Klammern oder ZGP können verwendet werden [6]. Eine Serie von 83 behandelten Kniegelenken zeigte eine Verbesserung der Flexionskontraktur von 21° (10–60°) auf 8° (0–50°) [69]. Patella alta kann eine Folgeerscheinung sein, die jedoch nicht als klinisch signifikant empfunden wurde [70]. Obwohl in der Literatur nur wenig darüber berichtet wird, werden die Platten oder Klammern nach einer anterioren HED am distalen Femur oft als störend empfunden [71]. Die Verwendung von fugenkreuzenden Schrauben stellt hier eine minimal-invasivere Methode dar (Abb. 7). Studiendaten mit einem Vergleich der Methoden sind



Abb. 9 ▲ Beispiel einer anterioren distalen Tibiahemiephysiodese. Acht Jahre alter Junge mit einem neurogenen Klumpfuß (links) aufgrund eines Tethered Cords. a–c Laterale und a/p (anterior/posterior) Röntgenansicht des Fußes und Sprunggelenks zeigen einen massiven Spitzfuß mit Cavovarusfehlstellung. Es erfolgte eine erste chirurgische Korrektur mit offener Achillessehnenverlängerung und Weichteilrelease inklusive seriellen Klumpfußgipsen. d, e Postoperative a/p und laterale belastete/stehende Röntgenaufnahmen mit einer residualen Fehlstellung. f Intraoperative Röntgenbilder einer anterioren distalen Tibiahemiephysiodese mittels 12-mm-Zuggurtungsplatte und 2 × 20 mm 4,5 mm Schrauben. Zur selben Zeit erfolgte ebenfalls eine mediale und plantare opening-wedge-Osteotomie des medialen Os cuneiforme mit Allograft. g–j Nachuntersuchung 21 Monate post operativ: Im Verlauf zeigt sich eine Divergenz der Schrauben mit einer Verbesserung der ADTA (anterioren distalen Tibiawinkel) von präoperativ 90° auf 86° und einer klinischen Besserung der Spitzfußfehlstellung

nicht vorhanden. Schrauben können sich aufgrund der starken Wachstumsfuge jedoch verbiegen [6, 72].

Anwendungen und Ergebnisse rund um das Sprunggelenk

Epiphysiodese des medialen Malleolus

Eine **Valgusdeformität** des Sprunggelenks kann bei Kindern mit verschiedenen Erkrankungen auftreten. Diese Valgusfehlstellung wird mit der Zeit fortschreiten und evtl. zu einer Fehlbelastung und vorzeitiger Abnützung des Sprunggelenks führen [73]. Die Valgusdeformität wird am häufigsten bei Kindern mit neuromuskulären Störungen wie Myelomeningozele, Poliomyelitis und Zerebralparese beobachtet. Sie tritt auch bei Kindern mit postaxialer Hypoplasie, kongenitalem Klumpfuß, angeborener Pseudarthrose der Tibia oder hereditären multiplen Exostosen (HME) auf ([59]; **Abb. 8**).

Die Hemiephysiodese des medialen Malleolus (mM) mit Schrauben wurde erstmals 1997 von Stevens und Belle als einzelne vertikale Schraube beschrieben, die in der midkoronalen Ebene des Malleolus und die Wachstumsfuge kreuzend platziert wird, um einen Sprunggelenkvalgus zu korrigieren [74]. Die **HED des mM** ist bei einem Valgus des Sprunggelenks von 5–8° bei Patienten mit offenen Wachstumsfugen indiziert. Als Implantat wird meist eine einzelne kanülierte 4,0- oder 4,5-mm-Vollgewindeschraube verwendet, und eine Korrektur von 9,7–12° wurde in klinischen

Studien erzielt [73, 75]. Die korrekte Platzierung der **medialen Malleolusschraube** (mMS) sowohl in der koronalen als auch in der sagittalen Ebene ist entscheidend. Je medialer (d. h. peripherer) die mMS in der koronalen Ebene platziert wird, desto stärker ist der Tethering-Effekt in Bezug auf die anschließende Winkelkorrektur, wie bei der partiellen Epiphysiodese und einem peripheren Physisverschluss nach einem Trauma zu beobachten ist [76]. Eine **intraoperative Durchleuchtung** ist erforderlich, um zu vermeiden, dass die mMS zu weit lateral platziert wird, wodurch das Risiko eines Durchbruchs in das Sprunggelenk und einer Erosion der medialen Talussehle besteht [6]. Eine sekundäre Deformität in der Sagittalebene kann auftreten, wenn die Schraube nicht zentral im medialen Malleolus platziert wird. Das Wiederauftreten der Valgusdeformität im Sinne eines Rebound-Effekts bei Kindern, bei denen die mMS vor der Skelettreife entfernt wurde, ist in vielen Studien beschrieben und deutet darauf hin, dass der Tethering-Effekt der Schraube reversibel ist. Stevens empfiehlt eine Überkorrektur von ca. 5° (varus), wenn die mMS noch bei offenen Fugen entfernt wird [6, 75, 76]. In keiner Arbeit wurde über einen Wachstumsstillstand nach Verwendung dieser Technik berichtet. Es wurden Bedenken hinsichtlich der Verwendung von mMS geäußert, da diese zu Infektionen führen können [74, 76]. Zuggurtungsplatten (ZGP) wurden ebenfalls erfolgreich zur Sprunggelenkvalguskorrektur eingesetzt [77]. Eine vergleichende retrospektive Studie zeigte, dass die **Korrekturgeschwindigkeit** mit der mMS um 50% schneller ist als mit einer ZGP. **Chirurgische Komplikationen** wurden jedoch bei insgesamt 23% der mMS-Knöchel im Vergleich zu 4% der ZGP-



Abb. 10 ▲ Fallbeispiel einer Epiphysiodese des Trochanter major (TM) sowie einer Epiphysiodese (ED) am distalen Femur zur Korrektur einer Beinlängendifferenz. **a** Das Ganzbeinröntgen eines 13 Jahre und 2 Monate alten Jungen mit beidseitigem Morbus Perthes und einem Zustand nach intertrochantärer Varisationsosteotomie (IVO) beidseits und Salter-Beckenosteotomie rechts zeigt einen Hochstand des rechten Trochanter major sowie eine Beinlängendifferenz von minus 26 mm rechts resultierend aus dem Femur. Die Analyse des Skeletalters (nach Sauvegrain) zeigt ein Alter von 13,5 Jahren (20 Punkte) entsprechend dem chronologischen Alter und ein Risser-Stadium 0. Die Beinlängendifferenz hat von vom letzten Follow-up vor 1 Jahr von 23 mm auf 26 mm zugenommen (entspricht der Wachstumsrate von 3 mm aus dem proximalen Femur). Die zu erwartende Beinlängendifferenz beträgt ca. 33–34 mm (26 mm aktuell $+2,5 \times 3$ mm = Wachstum aus dem proximalen Femur über ca. 2,5 Jahre bis zum Erreichen der Skelettreife mit ca. 16 Jahren). Die aktuelle Größe des Patienten beträgt 162,2 cm. Laut Bayley und Pinneau beträgt die erwartete Gesamtkörpergröße 179,8 cm oder 182,6 cm laut Multiplier. Eine Epiphysiodese der distalen Femurwachstumsfuge links wird bis zur Skelettreife ca. 22–25 mm an Längenwachstum hemmen ($2,5 \times 9$ –10 mm). Um die Beinlänge entsprechend anzugleichen, wurde die Indikation zur sofortigen Epiphysiodese am linken (längere Seite) distalen Femur gestellt. Eine Schraubenepiphysiodese des linken distalen Femurs sowie des rechten Trochanter major zur Behandlung des Trochanterhochstandes wurde durchgeführt. **b–e** Die ED des TM erfolgte mittels einer 5-mm-Knochenschraube. **f, g** Intraoperatives a/p und laterales Hüft-röntgen zeigt die Knochenschraube welche aus humanen Femurkortices hergestellt wird. **h, i** Laterales und a/p Kniegelenksröntgen. Die ED des distalen Femurs erfolgte mittels PETS („percutaneous epiphysiodesis using transphyseal screws“)-Technik (2 gekreuzten 6,5 mm soliden Stahlvollgewindeschrauben)

Knöchel beobachtet. Zu den beschriebenen Komplikationen der mMS zählen die Schraubenmigration, die knöcherne Überwucherung des Schraubenkopfes mit erschwelter Materialentfernung, Schraubenbruch oder ein schmerzhafter prominenter Schraubenkopf. Zu den potenziellen Komplikationen der ZGP gehört die Infektion oder auch das Versagen des Konstrukts [78]. Kleine Epiphysen und osteopenischer Knochen mahnen zur Vorsicht bei der Verwendung von ZGP [79]. Generell wird die Wachstumslenkung zur Behandlung des Knöchelvalgus als sichere, gut tolerierte und effektive Operationsmethode angesehen [75].

Epiphysiodese der distalen Tibia

Die Hemiepiphysiodese der anterioren distalen Tibia wird zur Korrektur des **anterioren distalen Tibiawinkels** (ADTA) v. a. bei residualen Spitzfußfehlstellungen nach Klumpfußbehandlung angewandt (**Abb. 9**). Ein erhöhter ADTA ($>80^\circ$) in Kombination mit einem sog. Flat-top-Talus und einer eingeschränkten Dorsalextension des oberen Sprunggelenks stellt die Hauptindikation für dieses operative Verfahren dar. Die Verwendung von Klammern oder ZGP ist am gängigsten. Al-Aubaidi et al. berichteten über ihre Ergebnisse bei 31 Füßen und fanden eine mittlere Reduktion des ADTA von 13° . Die Verbesserung der Dorsalextension betrug im Mittel 2° , und es bestand keine Korrelation der Beweglichkeit mit der Winkelkorrektur. Die temporäre Hemiepiphysiodese wurde entfernt,

wenn der gewünschte Effekt von etwa 15° Dorsalexension erreicht war oder der ADTA um mehr als 15° korrigiert wurde [80].

Eine neuartige Anwendung der Hemiepiphysiodese wurde von Laine et al. demonstriert, um Frakturen von Crawford-Typ-II- oder -III-Tibiae bei kongenitaler Tibiapseudarthrose („anterolateral tibial bowing/congenital tibial deficiency“) zu verhindern. Zehn Patienten wurden mittels anterolateraler distaler Tibiahemiepiphysiodese behandelt, und keiner entwickelte eine Tibiapseudarthrose oder eine Fraktur während des Follow-up von 5 Jahren [81].

Anwendungen rund um das Hüftgelenk

Epiphysiodese des Trochanter major

Um die mit dem übermäßigen Wachstum des Trochanter major (TM) verbundene Deformität zu verhindern oder zu minimieren, haben Chirurgen versucht, das Wachstum der TM-Apophyse zu verlangsamen oder zu stoppen. Im Jahr 1967 beschrieben Langenskiöld und Selenius erstmals eine **Pemister-Hemiepiphysiodese** des lateralen TM bei Überwuchs im Rahmen einer avaskulären Nekrose der Hüfte [82]. Im Jahr 1980 untersuchten Gage und Cary 15 Patienten, bei denen derselbe Eingriff vorgenommen wurde. Sie berichteten über schlechtere Ergebnisse bei Kindern mit **Morbus Perthes** als bei Kindern mit neonataler avaskulärer Nekrose oder Hüftdysplasie. Bessere Ergebnisse konnten erzielt werden, wenn die Operation vor dem 8. Lebensjahr durchgeführt wurde [83]. Das Alter zum Zeitpunkt der TM-Epiphysiodese dürfte eine große Rolle spielen. McCarthy und Weiner untersuchten 35 Kinder mit Morbus Perthes nach TM-Epiphysiodese, die mit einem Knochenstift, einer Drillepiphysiodese oder einer Schraubenepiphysiodese behandelt wurden. Das Wachstum des Trochanter major wurde um 0,9 mm/Jahr im Vergleich zur nichtbetroffenen Seite gehemmt. Eine stärkerer Effekt (1,8 mm/Jahr) wurde bei Kindern festgestellt, die mit einer Knochenstifttechnik operiert wurden, und überraschenderweise auch bei Kindern älter als 8 Jahre ([84]; **Abb. 10**). ZGP wurden auch am TM mit guten Ergebnissen bei Morbus Perthes verwendet [85].

Epiphysiodese am Schenkelhals (proximale Femurwachstumsfuge)

Die Hemiepiphysiodese des inferomedialen Schenkelhalses wurde zur Korrektur der **Caput-valgum-Deformität** beschrieben, die durch einen lateralen Wachstumsstillstand (Typ II) der proximalen Femurwachstumsfuge im Rahmen einer Hüftdysplasie bedingt ist [86]. Eine große kanülierte Vollgewindeschraube (z. B. 7,3 mm) kann in den inferomedialen Aspekt der Femurfuge gesetzt werden, um so eine Wachstumslenkung mit mehr superolateralem Wachstum der Femurepiphysie zu kreieren. Torode und Young publizierten ihre Ergebnisse anhand von 11 Patienten (13 Hüften) mit lateralem Wachstumsstillstand nach medialer offener Reposition des Hüftgelenks. Signifikante Verbesserungen der femoralen und acetabulären Röntgenanatomie wurden nach der Hemiepiphysiodese festgestellt. In 5 Hüften war eine Revision der Schraube durch weiteres Eindrehen oder Auswechseln gegen eine längere Schraube notwendig [87].

Zur Behandlung der **Coxa valga** bei Patienten mit Zerebralparese besteht eine relativ gute Datenlage. Hsieh et al. behandelten 25 Kinder mit inferomedialer proximaler Femurhemiepiphysiodese aufgrund einer Coxa valga. Die Indikationen für eine Operation waren eine Subluxation des Femurkopfes mit einem Migrationsindex (MI) nach Reimers von >30 % und eine Coxa valga mit einem Centrum-Collum-Diaphysen (CCD)-Winkel von >155° bei einem verbleibenden Wachstum von mindestens 2 Jahren. Die Coxa-valga-Fehlstellung und die laterale Hüftsubluxation verbesserten sich mit einer Verkleinerung des CCD um durchschnittlich 13° und die Verringerung des MI um 10 %. Auch in diesem Patientenkollektiv war das „Auswachsen“ über die Schraubenlänge mit 43 % die häufigste Komplikation bzw. der häufigste Revisionsgrund [88]. Die **Schraubenposition** dürfte eine Rolle spielen. Eine exzentrische (inferomediale) Position der Gewindegänge in der Epiphyse bewirkt einen biomechanisch effizienteren Hemiepiphysiodeseeffekt, hat jedoch den Nachteil einer kürzeren Länge des Gewindes in der kuppelförmigen Femurepiphysie und somit ein höheres Risiko des „Auswachsens“ [89]. Klinische Studien mit Langzeitergebnissen dieses Ansatzes sind erforderlich, um die Wirksamkeit der Wachstumslenkung bei der Korrektur von Deformitäten im Bereich des Hüftgelenks zu ermitteln. Der potenzielle Nutzen zur Minimierung invasiver Osteotomien ist nach wie vor ein wichtiger Impuls für diese Forschung.

Fazit für die Praxis

- Die permanente Epiphysiodese (ED) rund um das Kniegelenk ist eine sichere und effektive Methode zur Behandlung von Beinlängendifferenzen, sofern das Timing mit einer adäquaten Wachstumsprognose korrekt ist.
- Die Wachstumslenkung durch Hemiepiphysiodese (HED) ist an der unteren Extremität eine etablierte Methode zur Deformitätenkorrektur.
- Die Anwendung der Zuggurtungsplatte hat die Wachstumslenkung durch eine verbesserte biomechanische Wirkung auf die Wachstumsfuge revolutioniert.
- Die Anwendung von Schrauben zur ED und HED bietet viele Optionen und gewinnt als minimal-invasive Technik immer mehr an Popularität.
- Komplikationen nach ED und HED sind selten und geringgradig.
- Das Überwachen des Wachstums nach Achs- oder Längenkorrektur durch ED und HED ist essenziell, um bei temporären Methoden eine rechtzeitige Materialentfernung zu indizieren und um potenzielle Achsabweichungen frühzeitig zu detektieren.
- Im Laufe der Zeit hat die Methode der Wachstumslenkung die invasiveren und aufwendigeren Osteotomien zunehmend verdrängt.

Korrespondenzadresse

PD Dr. Madeleine Willegger, FEBOT

Universitätsklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Klinische Abteilung für Orthopädie, Medizinische Universität Wien
Währinger Gürtel 18–20, 1090 Wien, Österreich
madeleine.willegger@meduniwien.ac.at
madeleine.willegger@sickkids.ca

Funding. Open access funding provided by Medical University of Vienna.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. Gemäß den Richtlinien des Springer Medizin Verlags werden Autoren und Wissenschaftliche Leitung im Rahmen der Manuskripterstellung und Manuskriptfreigabe aufgefordert, eine vollständige Erklärung zu ihren finanziellen und nichtfinanziellen Interessen abzugeben.

Autoren. **M. Willegger:** A. Finanzielle Interessen: M. Willegger gibt an, dass kein finanzieller Interessenkonflikt besteht. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Angestellte Fachärztin für Orthopädie und Traumatologie, Univ. Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Medizinische Universität Wien (aktuell karenziert), Clinical Fellow, Hospital for Sick Children – Division of Orthopaedics, University of Toronto | Mitgliedschaften: Österreichische Gesellschaft für Fußchirurgie (ÖGF, Generalsekretärin), Österreichische Gesellschaft für Orthopädie (ÖGO, Genderbeauftragte). **M. Bouchard:** A. Finanzielle Interessen: M. Bouchard gibt an, dass kein finanzieller Interessenkonflikt besteht. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Paediatric Orthopaedic Surgeon | The Hospital for Sick Children, Assistant Professor Department of Surgery | University of Toronto, Associate Program Director | Orthopaedic Surgery Residency. **R. Windhager:** A. Finanzielle Interessen: Forschungsförderung zur persönlichen Verfügung; nicht zur persönlichen Verfügung De Puy Synthes – Product Development Agreement/Royalties für MedUni Wien, Johnson & Johnson Medical Limited – Visitation Agreement für MedUni Wien – Life Case Observation Agreement für MedUni Wien – Educational Agreement für MedUni. – Bezahlter Berater/interner Schulungsreferent/Gehaltsempfänger o. Ä.: Johnson & Johnson Medical Limited – Master Service Agreement – Consulting Agreement, Stryker European Operations Limited – Consulting Agreement. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Leiter, Medizinische Universität Wien, Universitätsklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie. **A. Kolb:** A. Finanzielle Interessen: A. Kolb gibt an, dass kein finanzieller Interessenkonflikt besteht. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Oberarzt der Med. Universität Wien, Klinik für Orthopädie und Traumatologie. **C. Chiari:** A. Finanzielle Interessen: Sämtliche Forschungsförderungen gehen an die Universitätsklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie. – Referentenhonorar oder Kostenerstattung als passiver Teilnehmer: Reisekostenunterstützung: Gemeinde Wien, Drittmittel (EU Projekt), Firmenunterstützung. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Angestellte Fachärztin an der Universitätsklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Medizinische Universität Wien | Leiterin des Spezialteams für Kinderorthopädie, Vorstandsmitglied der Österreichischen Gesellschaft für Orthopädie und Traumatologie, Vorstandsmitglied der Österreichischen Gesellschaft für Orthopädie.

Wissenschaftliche Leitung. Die vollständige Erklärung zum Interessenkonflikt der Wissenschaftlichen Leitung finden Sie am Kurs der zertifizierten Fortbildung auf www.springermedizin.de/cme.

Der Verlag erklärt, dass für die Publikation dieser CME-Fortbildung keine Sponsorengelder an den Verlag fließen.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien. Für Bildmaterial oder anderweitige Angaben innerhalb des Manuskripts, über die Patienten zu identifizieren sind, liegt von ihnen und/oder ihren gesetzlichen Vertretern eine schriftliche Einwilligung vor.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Bowen JR, Johnson WJ (1984) Percutaneous epiphysiodesis. *Clin Orthop Relat Res* 190:170–173
- Blount WP, Clarke GR (1949) Control of bone growth by epiphyseal stapling: a preliminary report. *J Bone Joint Surg Am* 31(3):464–478
- Canale S, Russell T, Holcomb R (1986) Percutaneous epiphysiodesis: experimental study and preliminary clinical results. *J Pediatr Orthop* 6(2):150–156
- Vogt B, Schiedel F, Rödl R (2014) Guided growth in children and adolescents. Correction of leg length discrepancies and leg axis deformities. *Orthopäde* 43(3):267–284
- Eastwood D, Sanghrajka A (2011) Guided growth: recent advances in a deep-rooted concept. *J Bone Joint Surg Br* 93(1):12–18
- Bouchard M (2017) Guided growth: novel applications in the hip, knee, and ankle. *J Pediatr Orthop* 37:532–56
- Willegger M, Kolb A, Chiari C (2017) Achskorrektur am wachsenden Skelett – therapeutisches Vorgehen. *Z Orthop Unfall* 155(02):232–248
- Huetter C (1862) Anatomische studien an den extremitaetengelenken neugeborener und erwachsener. *Virchows Arch Pathol Anat Physiol Klin Med* 25(5):572–599
- Richard V (1865) Krankheiten der Bewegungsorgane. *Handbuch der allgemeinen und speziellen Chirurgie Bd. 2. Ferdinand Enke, Stuttgart*, S 234–920
- Frost H (1979) A chondral modeling theory. *Calcif Tissue Int* 28(1):181–200
- Yang I, Gottlieb M, Martinkevich P, Schindeler A, Little DG (2017) Guided growth: current perspectives and future challenges. *JBJS Rev* 5(11):e1. <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.16.00115>
- Frost HM (1986) Intermediary organization of the skeleton. CRC Press, Boca Raton, FL
- Phemister DB (1933) Operative arrestment of longitudinal growth of bones in the treatment of deformities. *J Bone Joint Surg Am* 15(1):1–15
- Blount WP (1971) Section II GENERAL ORTHOPAEDICS: a mature look at epiphyseal stapling. *Clin Orthop Relat Res* 77:158–163
- Brockway A, Craig WA, Cockrell B Jr (1954) End-result study of sixty-two stapling operations. *J Bone Joint Surg Am* 36(5):1063–1086
- Metaizeau J-P, Wong-Chung J, Bertrand H, Pasquier P (1998) Percutaneous epiphysiodesis using transphyseal screws (PETS). *J Pediatr Orthop* 18(3):363–369
- Khouri JG, Tavares JO, McConnell S, Zeiders G, Sanders JO (2007) Results of screw epiphysiodesis for the treatment of limb length discrepancy and angular deformity. *J Pediatr Orthop* 27(6):623–628
- Ilharreborde B, Gaumetou E, Souchet P, Fitoussi F, Presedo A, Penneçot G et al (2012) Efficacy and late complications of percutaneous epiphysiodesis with transphyseal screws. *J Bone Joint Surg Br* 94(2):270–275
- Stevens PM (2007) Guided growth for angular correction: a preliminary series using a tension band plate. *J Pediatr Orthop* 27(3):253–259
- 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. *J Child Orthop* 2(3):187–197
- Lovell WW, Winter RB, Morrissy RT, Weinstein SL (2006) Lovell and Winter's pediatric orthopaedics. Lippincott Williams & Wilkins,
- Anderson M, Green WT, Messner MB (1963) Growth and predictions of growth in the lower extremities. *J Bone Joint Surg Am* 45(1):1–14
- Green W, Anderson M (1960) Skeletal age and the control of bone growth. *Instr Course Lect* 17:199
- Kelly PM, Diméglio A (2008) Lower-limb growth: how predictable are predictions? *J Child Orthop* 2(6):407–415
- Little DG, Song KM, Katz D, Herring JA (2000) Relationship of peak height velocity to other maturity indicators in idiopathic scoliosis in girls. *J Bone Joint Surg Am* 82(5):685
- Standard SC, Herzenberg JE, Conway JD, Lamm BM, Siddiqui NA (2016) The art of limb alignment: international center for limb lengthening. Rubin Institute for Advanced Orthopedics, Baltimore

27. Paley D, Herzenberg JE, Tetsworth K, McKie J, Bhava A (1994) Deformity planning for frontal and sagittal plane corrective osteotomies. *Orthop Clin North Am* 25(3):425–466
28. Salenius P, Vankka E (1975) The development of the tibiofemoral angle in children. *J Bone Joint Surg Am* 57(2):259–261
29. Sabharwal S, Zhao C (2009) The hip-knee-ankle angle in children: reference values based on a full-length standing radiograph. *J Bone Joint Surg Am* 91(10):2461–2468
30. Paley D (2002) Principles of deformity correction. Springer, Berlin, Heidelberg
31. Müller K, Müller-Färber J (1985) Indications, localization and planning of posttraumatic osteotomies about the knee. Corrective osteotomies of the lower extremity after trauma. Springer, S 195–223
32. Moseley C (1977) A straight-line graph for leg-length discrepancies. *J Bone Joint Surg Am* 59(2):174–179
33. Menelaus M (1966) Correction of leg length discrepancy by epiphysal arrest. *J Bone Joint Surg Br* 48(2):336–339
34. White JW, Stubbins S (1944) Growth arrest for equalizing leg lengths. *JAMA* 126(18):1146–1149
35. Maresh MM (1955) Linear growth of long bones of extremities from infancy through adolescence: continuing studies. *Am J Dis Child* 89(6):725–742
36. Paley D, Bhava A, Herzenberg JE, Bowen JR (2000) Multiplier method for predicting limb-length discrepancy. *J Bone Joint Surg Am* 82(10):1432
37. Dimeglio A (2001) Growth in pediatric orthopaedics. *J Pediatr Orthop* 21(4):549–555
38. Little DG, Nigo L, Aiona MD (1996) Deficiencies of current methods for the timing of epiphysodesis. *J Pediatr Orthop* 16(2):173–179
39. Dewaele J, Fabry G (1992) The timing of epiphysodesis. A comparative study between the use of the method of Anderson and Green and the Moseley chart. *Acta Orthop Belg* 58(1):43–47
40. Lee S, Shim J, Seo S, Lim K, Ko K (2013) The accuracy of current methods in determining the timing of epiphysodesis. *Bone Joint J* 95(7):993–1000
41. Birch JG, Makarov MA, Jackson TJ, Jo C-H (2019) Comparison of Anderson-Green growth-remaining graphs and White-Menelaus predictions of growth remaining in the distal femoral and proximal tibial physes. *J Bone Joint Surg Am* 101(11):1016–1022
42. Greulich WW, Pyle SI (1959) Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist. Stanford University Press,
43. Tanner JM, Whitehouse R, Cameron N, Marshall W, Healy M, Goldstein H (2001) Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 method). Saunders, London
44. Heyworth BE, Osei DA, Fabricant PD, Schneider R, Doyle SM, Green DW et al (2013) The shorthand bone age assessment: a simpler alternative to current methods. *J Pediatr Orthop* 33(5):569–574
45. Bayley N, Pinneau SR (1952) Tables for predicting adult height from skeletal age. Revised for use with the Greulich-Pyle hand standards. *J Pediatr* 40(4):423–441. [https://doi.org/10.1016/s0022-3476\(52\)80205-7](https://doi.org/10.1016/s0022-3476(52)80205-7)
46. Diméglio A, Charles YP, Daures J-P, de Rosa V, Kaboré B (2005) Accuracy of the Sauvegrain method in determining skeletal age during puberty. *J Bone Joint Surg Am* 87(8):1689–1696
47. Barstow C, Rerucha CM (2015) Evaluation of short and tall stature in children. *Am Fam Physician* 92(1):43–50
48. Inan M, Chan G, Littleton AG, Kubiak P, Bowen JR (2008) Efficacy and safety of percutaneous epiphysodesis. *J Pediatr Orthop* 28(6):648–651
49. McCarthy JJ, Burke T, McCarthy MC (2003) Need for concomitant proximal fibular epiphysodesis when performing a proximal tibial epiphysodesis. *J Pediatr Orthop* 23(1):52–54
50. Scott AC, Arquhart BA, Cain TE (1996) Percutaneous vs modified phemister epiphysodesis of the lower extremity. SLACK Incorporated, Thorofare, NJ
51. Makarov MR, Dunn SH, Singer DE, Rathjen KE, Ramo BA, Chukwunyerwa CK et al (2018) Complications associated with epiphysodesis for management of leg length discrepancy. *J Pediatr Orthop* 38(7):370–374
52. Kemnitz S, Moens P, Fabry G (2003) Percutaneous epiphysodesis for leg length discrepancy. *J Pediatr Orthop B* 12(1):69–71
53. Dodwell ER, Garner MR, Bixby E, Luderowski EM, Green DW, Blanco JS et al (2017) Percutaneous epiphysodesis using transphyseal screws: a case series demonstrating high efficacy. *HSS J* 13(3):255–262
54. Nouth F, Kuo LA (2004) Percutaneous epiphysodesis using transphyseal screws (PETS): prospective case study and review. *J Pediatr Orthop* 24(6):721–725
55. Sinha R, Weigl D, Mercado E, Becker T, Kedem P, Bar-On E (2018) Eight-plate epiphysodesis: are we creating an intra-articular deformity? *Bone Joint J* 100(8):1112–1116
56. Ballhause TM, Stiel N, Breyer S, Stücker R, Spiro AS (2020) Does eight-plate epiphysodesis of the proximal tibia in treating angular deformity create intra-articular deformity? a retrospective radiological analysis. *Bone Joint J* 102(10):1412–1418
57. Boyle J, Makarov MR, Podeszwa DA, Rodgers JA, Jo C-H, Birch JG (2020) Is proximal fibula epiphysodesis necessary when performing a proximal tibial epiphysodesis? *J Pediatr Orthop* 40(10):e984–e9
58. Willegger M, Schreiner M, Kolb A, Windhager R, Chiari C (2021) Epiphysodesis for the treatment of tall stature and leg length discrepancy. *Wien Med Wochenschr* 171(5):133–141
59. Masquijo JJ, Artigas C, de Pablos J (2021) Growth modulation with tension-band plates for the correction of paediatric lower limb angular deformity: current concepts and indications for a rational use. *EFORT Open Rev* 6(8):658–668
60. Danino B, Rödl R, Herzenberg J, Shabtai L, Grill F, Narayanan U et al (2019) Growth modulation in idiopathic angular knee deformities: is it predictable? *J Child Orthop* 13(3):318–323
61. Boero S, Micheli 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. *J Child Orthop* 5(3):209–216
62. Morin M, Klatt J, Stevens PM (2018) Cozen's deformity: resolved by guided growth. *Strategies Trauma Limb Reconstr* 13(2):87–93
63. Leveille LA, Razi O, Johnston CE (2019) Rebound deformity after growth modulation in patients with coronal plane angular deformities about the knee: who gets it and how much? *J Pediatr Orthop* 39(7):353–358
64. Stevens PM (2016) The role of guided growth as it relates to limb lengthening. *J Child Orthop* 10(6):479–486
65. Masquijo J, Allende V, Artigas C, Bueno JH, Morovic M, Sepúlveda M (2021) Partial hardware removal in guided growth surgery: a convenient strategy? *Rev Esp Cir Ortop Traumatol (Engl Ed)* 65(3):195–200
66. Shabtai L, Herzenberg JE (2016) Limits of growth modulation using tension band plates in the lower extremities. *J Am Acad Orthop Surg* 24(10):691–701
67. Klatt J, Stevens PM (2008) Guided growth for fixed knee flexion deformity. *J Pediatr Orthop* 28(6):626–631
68. Spiro AS, Stenger P, Hoffmann M, Vettorazzi E, Babin K, Lipovac S et al (2012) Treatment of fixed knee flexion deformity by anterior distal femoral stapling. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20(12):2413–2418
69. Stiel N, Babin K, Vettorazzi E, Breyer S, Ebert N, Rupprecht M et al (2018) Anterior distal femoral hemiepiphysodesis can reduce fixed flexion deformity of the knee: a retrospective study of 83 knees. *Acta Orthop* 89(5):555–559
70. MacWilliams B, Harjinder B, Stevens P (2011) Guided growth for correction of knee flexion deformity: a series of four cases. *Strategies Trauma Limb Reconstr* 6(2):83–90
71. Al-Aubaidi Z, Lundgaard B, Pedersen NW (2012) Anterior distal femoral hemiepiphysodesis in the treatment of fixed knee flexion contracture in neuromuscular patients. *J Child Orthop* 6(4):313–318
72. Long JT, Laron D, Garcia MC, McCarthy JJ (2020) Screw anterior distal femoral hemiepiphysodesis in children with cerebral palsy and knee flexion contractures: a retrospective case-control study. *J Pediatr Orthop* 40(9):e873–e9
73. Rupprecht M, Spiro AS, Breyer S, Vettorazzi E, Ridderbusch K, Stücker R (2015) Growth modulation with a medial malleolar screw for ankle valgus deformity: 79 children with 125 affected ankles followed until correction or physeal closure. *Acta Orthop* 86(5):611–615
74. Stevens PM, Belle RM (1997) Screw epiphysodesis for ankle valgus. *J Pediatr Orthop* 17(1):9–12
75. Stevens PM, Kennedy JM, Hung M (2011) Guided growth for ankle valgus. *J Pediatr Orthop* 31(8):878
76. Davids JR, Valadie AL, Ferguson RL, Bray EW, Allen BL (1997) Surgical management of ankle valgus in children: use of a transphyseal medial malleolar screw. *J Pediatr Orthop* 17(1):3–8
77. van Oosterbos M, van der Zwan A, van der Woude H, Ham S (2016) Correction of ankle valgus by hemiepiphysodesis using the tension band principle in patients with multiple hereditary exostosis. *J Child Orthop* 10(3):267–273
78. Driscoll MD, Linton J, Sullivan E, Scott A (2014) Medial malleolar screw versus tension-band plate hemiepiphysodesis for ankle valgus in the skeletally immature. *J Pediatr Orthop* 34(4):441–446
79. Oda JE, Thacker MM (2013) Distal tibial physeal bridge: a complication from a tension band plate and screw construct. Report of a case. *J Pediatr Orthop B* 22(3):259–263
80. Al-Aubaidi Z, Lundgaard B, Pedersen NW (2011) Anterior distal tibial epiphysodesis for the treatment of recurrent equinus deformity after surgical treatment of clubfeet. *J Pediatr Orthop* 31(6):716–720
81. Laine JC, Novotny SA, Weber EW, Georgiadis AG, Dahl MT (2020) Distal tibial guided growth for anterolateral bowing of the tibia: fracture may be prevented. *J Bone Joint Surg Am* 102(23):2077–2086
82. Langenskiöld A, Salenius P (1967) Epiphysodesis of the greater trochanter. *Acta Orthop Scand* 38(1–4):199–219

83. Gage JR, Cary J (1980) The effects of trochanteric epiphyseodesis on growth of the proximal end of the femur following necrosis of the capital femoral epiphysis. *J Bone Joint Surg Am* 62(5):785–794
84. McCarthy JJ, Weiner DS (2008) Greater trochanteric epiphysiodesis. *Int Orthop* 32(4):531–534
85. Stevens PM, Anderson LA, Gililland JM, Novais E (2014) Guided growth of the trochanteric apophysis combined with soft tissue release for Legg–Calve–Perthes disease. *Strategies Trauma Limb Reconstr* 9(1):37–43
86. McGillion S, Clarke N (2011) Lateral growth arrest of the proximal femoral physis: a new technique for serial radiological observation. *J Child Orthop* 5(3):201–207
87. Torode IP, Young JL (2015) Caput valgum associated with developmental dysplasia of the hip: management by transphyseal screw fixation. *J Child Orthop* 9(5):371–379
88. Hsieh H-C, Wang T-M, Kuo KN, Huang S-C, Wu K-W (2019) Guided growth improves coxa valga and hip subluxation in children with cerebral palsy. *Clin Orthop Relat Res* 477(11):2568
89. Hsu P-J, Wu K-W, Lee C-C, Lin S-C, Kuo KN, Wang T-M (2020) Does screw position matter for guided growth in cerebral palsy hips? *Bone Joint J* 102(9):1242–1247



Epiphysiodesen und Hemiepiphysiodesen

Zu den Kursen dieser Zeitschrift: Scannen Sie den QR-Code oder gehen Sie auf www.springermedizin.de/kurse-der-orthopaede

? In welcher Wachstumsfuge findet bei physiologischem Wachstum der Hauptteil des Längenwachstums statt?

- Distale Tibiaepiphysenfuge
- Epiphysenfuge des Hüftkopfes
- Proximale Tibiaepiphysenfuge
- Distale Femurepiphysenfuge
- Trochanter Major

? Ein 12-jähriger Junge wird wegen einer Beinlängendifferenz untersucht. Er hatte eine Osteomyelitis des linken distalen Femurs, die erfolgreich mit antibiotischer Therapie behandelt wurde. Ansonsten ist er gesund und hat keine weitere medizinische Vorgeschichte. Ganzbeinröntgenaufnahmen im Stehen bestätigen eine Beinlängendifferenz von 20 mm (2 cm), die auf einen Längenunterschied des rechten und linken Femurs zurückzuführen ist. Die Röntgenaufnahmen des Knies zeigen einen vollständigen Verschluss der linken distalen Femurwachstumsfuge ohne Achsdeformität. Wie groß ist die voraussichtliche Beinlängendifferenz im Erwachsenenalter, wenn sie unbehandelt bleibt? (Hilfestellung: Berechnung nach Menelaus)

- 2 cm
- 4 cm
- 6 cm
- 8 cm
- 10 cm

? In welchem Alter kommt das Längenwachstum bei Jungen in der Regel an der Wachstumsfuge des distalen Oberschenkels zum Stillstand?

- 18
- 16
- 14
- 12
- 10

? Ein 13-jähriger Junge stellt sich mit einer Beinlängendifferenz vor, wobei das rechte Bein kürzer ist als das linke. Er hat eine normale Größe für sein Alter, und sein Skeletalter entspricht seinem chronologischen Alter. Anamnese und Untersuchung nach Tanner zeigen, dass er vor 1 Monat in die Pubertät kam. Seine endgültige Beinlängendifferenz bei Skelett reife wird voraussichtlich 4,0 cm betragen. Welche der folgenden chirurgischen Optionen ist am besten geeignet?

- Blount-Klammerepiphysiodese der medialen linken Tibia und Femurwachstumsfuge und Klammerentfernung mit 16 Jahren
- Femurosteotomie und Verlängerung mittels Kallusdistraction mit einem hexapoden Fixateur externe
- Epiphysiodese des linken distalen Femurs in 1 Jahr nach Beginn der Pubertät
- Epiphysiodese des linken distalen Femurs und der linken proximalen Tibia in 6 Monaten

Epiphysiodese beider distaler Femora und akute Verkürzungsteotomie der linken Tibia (sofort)

? Ein 14-jähriger Junge erleidet eine signifikante distale Femurfraktur (Salter-Harris Typ 2). Wie groß ist die prognostizierte Beinlängendifferenz, wenn man von einem vollständigen Wachstumsstillstand ausgeht?

- Keine Beinlängendifferenz zu erwarten
- 1 cm
- 2 cm
- 3 cm
- 4 cm

? Ein 8-jähriges Mädchen wurde vor 2 Jahren wegen einer Salter-Harris-Fraktur Typ I des rechten distalen Femurs behandelt. Die Untersuchung zeigt eine symmetrische Knieflexion und -extension. Klinisch ist die Achse des Beines ident zur kontralateralen Seite (physiologisch). Sie hat jedoch eine Verkürzung des rechten Oberschenkels um 1 cm. Im Ganzbeinröntgen bestätigt sich eine Verkürzung des rechten Femurs um 1 cm. Aus der Anamnese geht hervor, dass sie immer in der 50. Perzentile der Körpergröße lag, und ihr Skeletalter entspricht ihrem chronologischen Alter. Was ist die zu

Informationen zur zertifizierten Fortbildung

Diese Fortbildung wurde von der Ärztekammer Nordrhein für das „Fortbildungszertifikat der Ärztekammer“ gemäß § 5 ihrer Fortbildungsordnung mit 3 Punkten (Kategorie D) anerkannt und ist damit auch für andere Ärztekammern anerkennungsfähig.

Anerkennung in Österreich und der Schweiz: Für das Diplom-Fortbildungsprogramm (DFP) werden die von

deutschen Landesärztekammern anerkannten Fortbildungspunkte aufgrund der Gleichwertigkeit im gleichen Umfang als DFP-Punkte anerkannt (§ 14, Abschnitt 1, Verordnung über ärztliche Fortbildung, Österreichische Ärztekammer (ÖÄK) 2013). Die Schweizerische Gesellschaft für Orthopädie vergibt 1 Credit für die zertifizierte Fortbildung in „Der Orthopäde“.

Hinweise zur Teilnahme:

- Die Teilnahme an dem zertifizierten Kurs ist nur online auf www.springermedizin.de/cme möglich.
- Der Teilnahmezeitraum beträgt 12 Monate. Den Teilnahmeschluss finden Sie online beim Kurs.
- Die Fragen und ihre zugehörigen Antwortmöglichkeiten werden online in zufälliger Reihenfolge zusammengestellt.

- Pro Frage ist jeweils nur eine Antwort zutreffend.
- Für eine erfolgreiche Teilnahme müssen 70% der Fragen richtig beantwortet werden.
- Teilnehmen können Abonnenten dieser Fachzeitschrift und e.Med- und e.Dent-Abonnenten.
- Abonnenten von „Der Orthopäde“ oder „Der Unfallchirurg“ können kostenlos an CME-Kursen beider Zeitschriften teilnehmen.



Abb. 11 ◀ Beidseitiges a/p Ganzbeinröntgen im Stehen

erwartende Folge im Erwachsenenalter?

- 7 cm Beinlängendifferenz mit einem längeren rechten Femur
- 7 cm Beinlängendifferenz mit einem längeren linken Femur
- 12° Varusdeformität rechtes Bein
- 18° Valgusdeformität linkes Bein
- 20° Recurvatumdeformität linkes Bein

? Bei einem 14-jährigen männlichen Patienten mit Beinlängendifferenz wird eine distale femorale und proximale tibiale Epiphysodesis am längeren Bein durchgeführt. Welches Ausmaß an Korrektur wird mit diesem Verfahren bei diesem Kind voraussichtlich erreicht? (Hilfestellung: Berechnung nach Menelaus)

- 1,6 cm
- 2 cm

- 3 cm
- 4 cm
- 6,4 cm

? Ein 10-jähriges Mädchen stellt sich mit einer mehrjährigen Vorgeschichte von beidseitigen Knieschmerzen und einer Deformierung der unteren Extremitäten vor, wobei ihre Knie beim Laufen aneinander reiben. Es sind keine Erkrankungen bekannt. Es ist kein Trauma in der Anamnese. Ein Ganzbeinröntgenbild im Stehen ist in Abb. 11 dargestellt. Um welche typische Fehlstellung im Kindes- und Jugendalter handelt es sich?

- Iatrogenes Genu recurvatum beidseits
- Posttraumatisches Genu recurvatum beidseits
- Posttraumatische Beinlängendifferenz

- Idiopathisches Genu varum beidseits
- Idiopathisches Genu valgum beidseits

? Die einseitige Blockade der Wachstumsfuge (Hemiepiphysiodese) mittels Klammerung (Blount-Klammer) ist eine etablierte Methode zur Beinachsenkorrektur. Inwiefern ist die Klammer ein Beispiel für das Hueter-Volkman-Prinzip?

- Erhöhte Kompression entlang der Wachstumsfuge verlangsamt das Längenwachstum.
- Verminderte Kompression entlang der Wachstumsfuge verlangsamt das Längenwachstum.
- Erhöhte Spannung entlang der Wachstumsfuge verlangsamt das Längenwachstum.
- Verminderte Spannung entlang der Wachstumsfuge verlangsamt das Längenwachstum.
- Erhöhte Kompression entlang der Wachstumsfuge verstärkt das Längenwachstum.

? Sie lesen das Konsil eines pädiatrischen Kollegen, der eine Überweisung zur Genu-valgum-Korrektur ausgestellt hat. Dieser beschreibt und eine MAD von 9 mm. Was bedeutet diese Abkürzung?

- „Mechanical axis deviation“
- „Multiple axis deviation“
- „Multiple angle deformity“
- „Multiple angle deviation“
- „Magnitude angle deformity“