

# Prinzipien der kniegelenknahen Deformitätenkorrektur

## Zusammenfassung

Die Ausrichtung der frontalen und sagittalen Ebene der unteren Extremität und die Gelenkstellung haben erhebliche Konsequenzen für die Funktion und den Verschleiß von Hüfte, Knie- und Sprunggelenk. Es gibt einen Normalbereich für die Stellung dieser Gelenke bezüglich der mechanischen und anatomischen Achse von Femur und/oder Tibia. Wir können die normale Gelenkstellung zur akuraten Planung einer Wiederausrichtung von deformiertem Femur oder Tibia verwenden. In der frontalen Ebene gebrauchen wir beide, anatomische und mechanische, Achslinien für die Planung. In der sagittalen Ebene hat die mechanische Achse weniger Relevanz, deshalb wird nur die anatomische Achse für die Planung verwendet.

## Schlüsselwörter

Deformitätenkorrektur · Osteotomien · Planungsverfahren

## Analyse der frontalen Ebene

Die mechanische Achse der unteren Extremität ist die Linie vom Zentrum des Femurkopfes zur Mitte des Sprunggelenks. Die mechanische Achsabweichung (MAD, mechanical axis deviation) ist die Entfernung vom Zentrum des Kniegelenks zur mechanischen Achslinie. Die mechanische Achse des Femurs ist die Linie vom Zentrum des Femurkopfes zum Zentrum des Kniegelenks. Entsprechend ist die mechanische Achse der Tibia die Linie vom Zentrum des Kniegelenks zum Zentrum des Sprunggelenks. Die anatomische Achse von Femur und Tibia ist die Mittschafflinie des entsprechenden Knochens. In der Tibia liegen mechanische und anatomische Achse parallel und nur wenige Millimeter entfernt voneinander (mit medialer Lage der anatomischen Achse).

Im Femur liegt die anatomische Achse  $7^\circ (\pm 2^\circ)$  zu der mechanischen Achse. Die Gelenkstellung des Kniegelenks in der frontalen Ebene bezüglich der mechanischen Achse des Femurs nennt man mechanischer lateraler distaler Femurwinkel (Normwert mL DFA =  $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$ ); während dessen sie bezüglich der anatomischen Achse des Femurs als anatomischer lateraler distaler Femurwinkel (normaler Wert aL DFA =  $80^\circ \pm 3^\circ$ ) bezeichnet wird. Die Gelenkstellung des Kniegelenks in frontaler Ebene bezüglich zu beiden, der mechanischen und anatomischen

Achse der Tibia, bezeichnet man als medialer proximaler Tibiawinkel (Normwert MPTA =  $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$ ).

Die Gelenkwinkel werden, abhängig von welcher Seite der anatomischen oder mechanischen Achslinie sie gemessen werden, benannt (anterior, posterior, medial oder lateral) und ob sich der Winkel am proximalen oder distalen Ende des Knochens befindet. Für jedes Knochenende in einer bestimmten Ebene liegen 2 mögliche Winkel vor (z. B. medialer oder lateraler proximaler Tibiawinkel). Ich bevorzuge generell den Winkel, der kleiner als  $90^\circ$  ist. Das Präfix „a“ (anatomisch) oder „m“ (mechanisch) wird hinzugefügt, um zwischen ähnlichen anatomischen und mechanischen Winkeln, die weniger als  $90^\circ$  betragen, zu unterscheiden (z. B. aL DFA und mL DFA) (Abb. 1).

Eine Fehlstellung (Malalignment) setzt das Vorhandensein einer signifikanten MAD voraus (MAD > 15 mm medial oder 1 mm lateral). Die Ursache der MAD wird mit dem Malalignment-Test (MAT) indentifiziert: messe den L DFA, den MPTA und den konvergierenden Gelenkwinkel (joint line coverage angle, JLCA) (Abb. 2). Wenn entweder MPTA oder L DFA oder beide abnormal sind, weist das daraufhin, daß die Tibia oder das Femur bzw. beide die

---

D. Paley, MD, FRCSC  
Department of Orthopedics,  
University of Maryland, Baltimore,  
Maryland, USA

D. Paley

## Principles of deformity correction around the knee

### Summary

Lower limb frontal and sagittal plane alignment and joint orientation have significant consequences for function and wear on the hip, knee and ankle. There is a normal range for the orientation of these joints relative to the mechanical and anatomic axis of the femur and/or tibia. We can use the normal joint orientation to accurately plan realignment of a deformed femur or tibia. In the frontal plane we use both anatomic and mechanical axis lines for planning. In the sagittal plane, the mechanical axis has less relevance and, therefore, only the anatomic axis is used for planning.

### Key words

Deformity correction • Osteotomies • Preoperative planning

Quelle der Fehlstellung sind. Dieser Test sollte immer vor einer weiteren Deformitätenanalyse durchgeführt werden. Wenn die femoralen oder tibialen Gelenklinien nicht parallel sind, tragen entweder Kollateralbandlaxizität, Knorpel- oder Knochenverlust oder intraartikuläre Inkongruenz zur mechanischen Achsabweichung bei. Der MAT kann sogar normal sein, wenn eine Fehlstellung der Hüfte oder des Sprunggelenks vorliegt. Daher sollte der Test der Fehlausrichtung (Malorientation-Test) von Sprunggelenk und Hüfte auch durchgeführt werden, um Deformitäten bezüglich von Sprunggelenk und Hüfte zu erkennen.

Die Linie von der Spitze des Trochanter major zum Hüftkopfbereich repräsentiert die Gelenkstellung der Hüfte in frontaler Ebene. Die Stellung dieser Linie zur mechanischen Achse des Femurs wird lateraler proximaler Femurwinkel genannt (Normwert LPFA =  $90^\circ \pm 5^\circ$ ). Die Stellung der Linie zur anatomischen Achse heißt medialer proximaler Femurwinkel (Normwert MPFA =  $83^\circ \pm 5^\circ$ ). Die Gelenkstellung der Sprunggelenklinie zu beiden, sowohl der anatomischen wie der mechanischen Achslinie der Tibia, ist der laterale distale Tibiawinkel (Normwert LDFA =  $89^\circ \pm 3^\circ$ ).

Angulationsdeformitäten sind durch 4 Parameter charakterisiert (Abb. 3):

- ▶ Höhe des Scheitelpunktes (Apex) der Angulation (center of rotation of angulation, CORA),
- ▶ Ebene der Angulation,
- ▶ Richtung des Scheitelpunktes (Apex) in der Ebene der Angulation,
- ▶ Größe der Angulation.

Zur Korrektur von Angulationsfehlstellung ist es notwendig, alle diese Parameter zu bestimmen vor der Wahl der Höhe und der zu verwendenden Osteotomie. CORA wird bestimmt als Schnittpunkt zwischen der proximalen und distalen Achslinie. Die Größe der Angulation wird bestimmt in Höhe von CORA als Querwinkel, der gewöhnlich geringer als  $90^\circ$  ist. Die Winkelhalbierende wird durch CORA gezogen, die den longitudinalen Winkel, der gewöhnlich größer als  $90^\circ$  ist, in 2 gleiche Hälften teilt. Der Schnittpunkt dieser Winkelhalbierenden mit der konkaven Knochenkante ist der Punkt einer zuklappenden Keilosteotomie. Der Schnittpunkt mit der konvexen Knochenkante ist der Punkt einer offenen Keilosteotomie (Abb. 4).

Wenn eine Osteotomie durch CORA durchgeführt ist, dann stellt al-

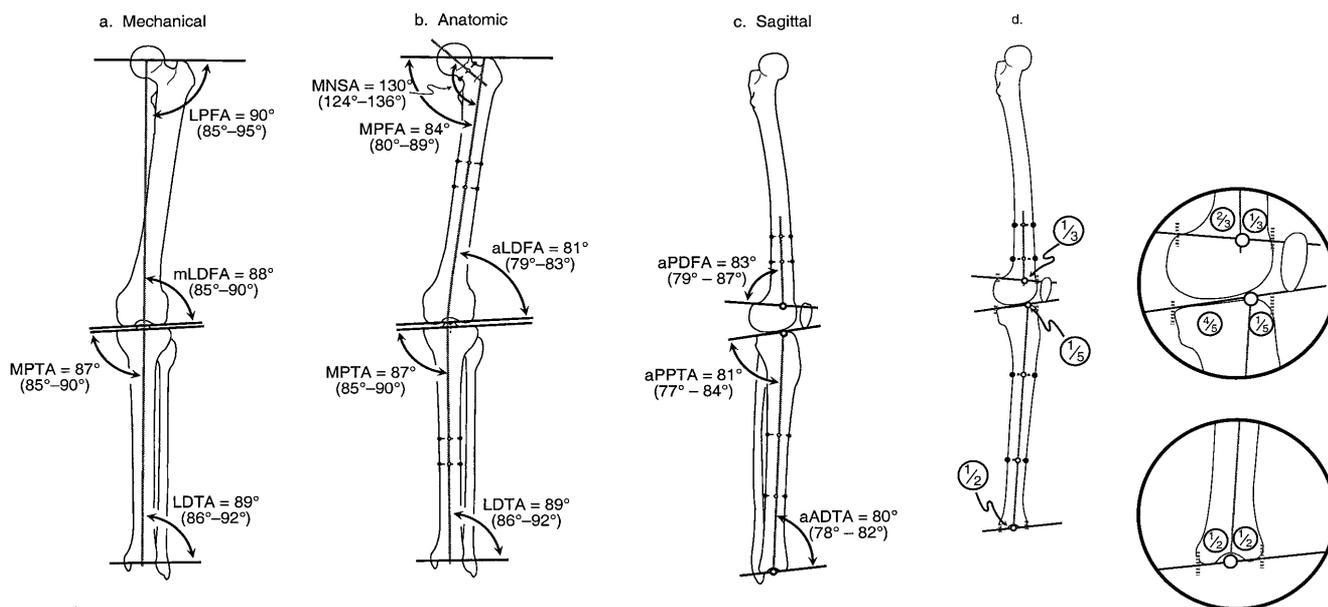


Abb. 1 **a** Bezeichnung der Gelenkwinkel und Normwerte für die frontale Ebene: mechanische Achslinien. **b** Bezeichnung der Gelenkwinkel und Normwerte für die frontale Ebene: anatomische Achslinien. **c** Bezeichnung der Gelenkwinkel und Normwerte für die sagittale Ebene. **d** Anatomische Achse – Gelenkbreiten-Relation für die sagittale Ebene (Abbildungs-Beschriftung s. Glossar S. 38)

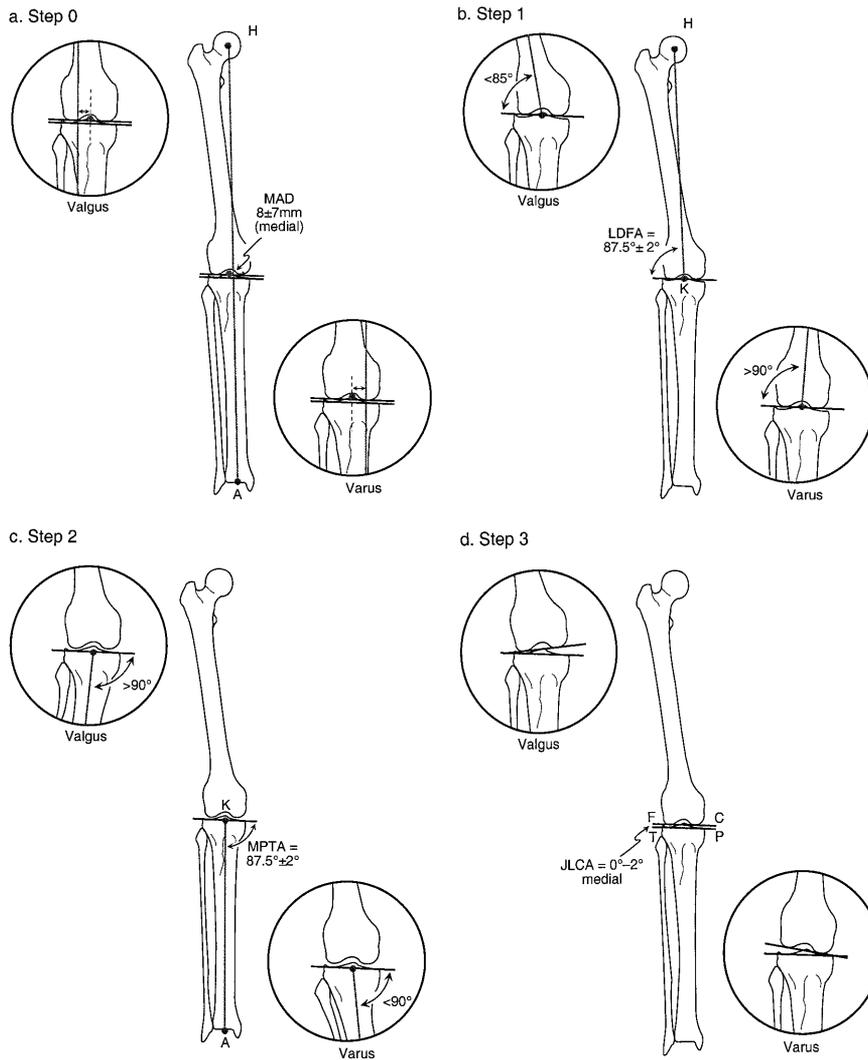


Abb. 2 a–d ◀ Der Malignant-Test.

**a Schritt 0:** Messung der MAD. Der Normwert ist  $8^\circ \pm 7^\circ$  medial. MAD medial weiter als der Normwert ist eine Varus- und MAD lateral weiter als der Normwert ist eine Valgusfehlstellung (Auschnitt).

**b Schritt 1:** Messung der LDFA. Der Normwert ist  $87,5^\circ \pm 2^\circ$ . LDFA kleiner als dieser Wert bedeutet, daß die femorale Knochenfehlstellung die Ursache des lateralen MAD (Valgus) darstellt. LDFA größer als dieser Wert bedeutet, daß die femorale Knochenfehlstellung Ursache des medialen MAD (Varus) ist.

**c Schritt 2:** Messung des MPTA. Der Normwert ist  $87,5^\circ \pm 2^\circ$ . MPTA größer bedeutet: tibiale Deformität Ursache für laterales MAD (Valgus). MPTA kleiner bedeutet: tibiale Deformität Ursache des medialen MAD (Varus).

**d Schritt 3:** Messung des JLCA. Normwert ist  $0^\circ - 1^\circ$  mediale Konvergenz der Gelenklinien. Medialer JLCA größer als Normwert bedeutet: laterale ligamentokapsuläre Laxizität oder medialer Knorpelverlust Ursache des medialen MAD (Varus). Ein lateraler JLCA bedeutet: mediale ligamentokapsuläre Laxizität oder Verlust des lateralen Knorpels Ursache des lateralen MAD (Valgus).

leine die Angulation die proximale und distale Achse des Knochens vollkommen wieder her (Osteotomieregel 1) (Abb. 5). Wenn die Osteotomie in einer unterschiedlichen Höhe zu CORA durchgeführt wird, dann führt die Angulation alleine zu einer Translation der proximalen und distalen Achse des Knochens. Wenn die Osteotomie in einer unterschiedlichen Höhe zu CORA durchgeführt wird, dann stellt die Angulation mit der Translation die proximale und distale des Knochens wieder her (Osteotomieregel 2) (Abb. 6). Diese Regel kann sowohl bei der öffnenden als auch zuklappenden Keilosteotomie wie auch bei der Domeosteotomie (zirkulär-zylindrisch) angewendet werden. Wenn CORA im Zentrum des Kreises der Domeosteotomie liegt (focal dome osteotomy), dann führt die Korrektur zu einer völligen Wiederherstellung der

Achslinien des Knochens. Um die Schaffung sekundärer Translationsfehlstellungen zu vermeiden, ist es wichtig, sehr genau die Höhe von CORA zu bestimmen. CORA wird bestimmt durch den Verlauf der proximalen und distalen Achslinie des deformierten Femurs oder Tibia (Abb. 7).

Wenn die Deformität allein in der Diaphyse auftritt, führt das dazu, daß die Achslinien als 2 mittlere Diaphysenlinien (anatomische Achse) proximal und distal der Höhe der Angulation gezogen werden. In der Frontalebene, wo das Ziel der Deformitätenkorrektur in der Wiederherstellung der mechanischen Achse und Normalisierung der Gelenkwinkel liegt, kann diese anatomische Achsplanung zu Fehlern führen, wenn reichlich Kallus vorhanden ist oder ein 2. Apex einer Angulation vorhanden ist. Daher wird die mechanische

Achsplanung in der frontalen Ebene bevorzugt. Für Deformitäten in Höhe der Epiphyse oder Metaphyse ist es nicht möglich, am einen Ende des Knochens exakt eine Mittschafflinie zu ziehen. Die mechanische Achsplanung basiert auf der Bestimmung des Gelenkwinkels des angrenzenden Knochenendes, um damit eine Achslinie zu erhalten und ist deshalb nicht durch die Höhe von CORA limitiert.

Man sollte sich bei dieser Planungsmethode vorstellen, daß die mechanische und anatomische Achse auf den Knochen aufgezeichnet ist, wenn dieser gerade ist. Wenn der Knochen gebogen oder in einer Höhe gebrochen wird, dann bricht die Achslinie in 2 Segmente mit korrespondierender proximaler und distaler Achslinie (Abb. 8). Verlängert man diese Teilachslinien, so definiert ihr Schnittpunkt CORA. Selbst

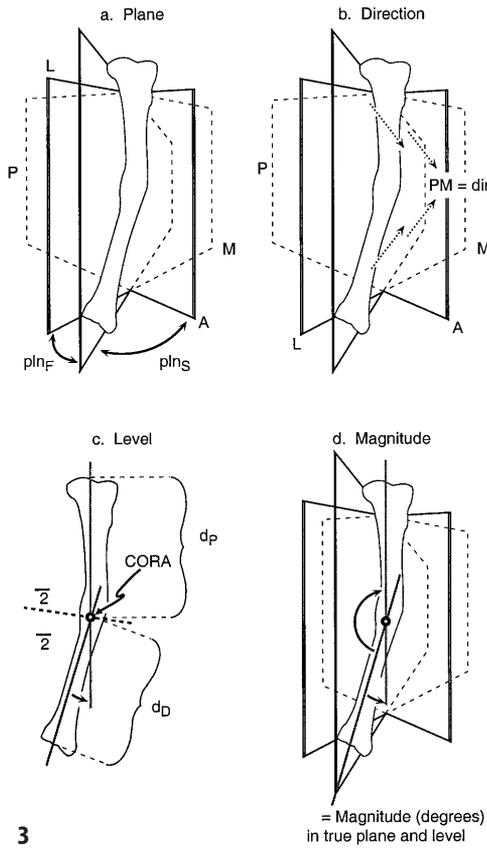


Abb. 3 a–d ◀ **Angulationsparameter.**

a Ebene der Angulation (*pln*): Die Stellung der Ebene der Angulation wird in Grad angegeben in der transversen Ebene in Bezug zu 1 oder 2 anatomischen Ebenen (frontal-*pln F* oder sagittal-*pln S*).

b Apikale Richtung der Angulation (*dir*): Die Ebene der Angulation des Scheitels der Deformität wird apikale Richtung genannt. Für jede Ebene der Angulation gibt es 2 Richtungen. Die Angulationsrichtung bezieht sich auf die anatomischen Gegebenheiten: anterior (A), posterior (P), medial (M) und lateral (L), ebenso wie die schrägen Ebenen in den Quadranten; anteromedial (AM), anterolateral (AL), posteromedial (PM) und posterolateral (PL).

c Höhe des Zentrums der Rotation und Angulation (center of rotation of angulation; CORA): Die Höhe der Angulation ist definiert durch die Winkelhalbierende, die durch den Schnittpunkt der proximalen und distalen anatomischen oder mechanischen Achslinie verläuft. Der Schnittpunkt wird als Zentrum der Rotation und Angulation (CORA) bezeichnet. Die Höhe wird gemessen als Abstand des CORA vom proximalen (*dp*) oder distalen (*dd*) Gelenk.

d Größe der Angulation (*mag*): Die Größe der Angulation wird gemessen zwischen den proximalen und distalen anatomischen oder mechanischen Achslinien

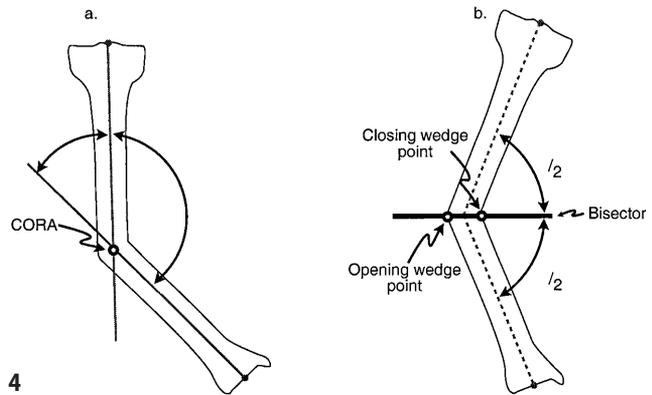


Abb. 4 ▲ a Der Schnittpunkt der proximalen und distalen Achslinien ist das Zentrum der Rotation und Angulation (CORA). Die Größe der Angulation ( $\alpha$ ) ist der longitudinale Winkel. Der transversale Winkel ist  $\beta$ .

b Eine Winkelhalbierende teilt Winkel  $\beta$  in 2 gleiche Hälften ( $\beta/2$ ). Der Schnittpunkt dieser Winkelhalbierenden mit dem konvexen Kortex ist der Punkt eines öffnenden Keils und der Schnittpunkt mit dem konkaven Kortex ist der Punkt eines zuklappenden Keils

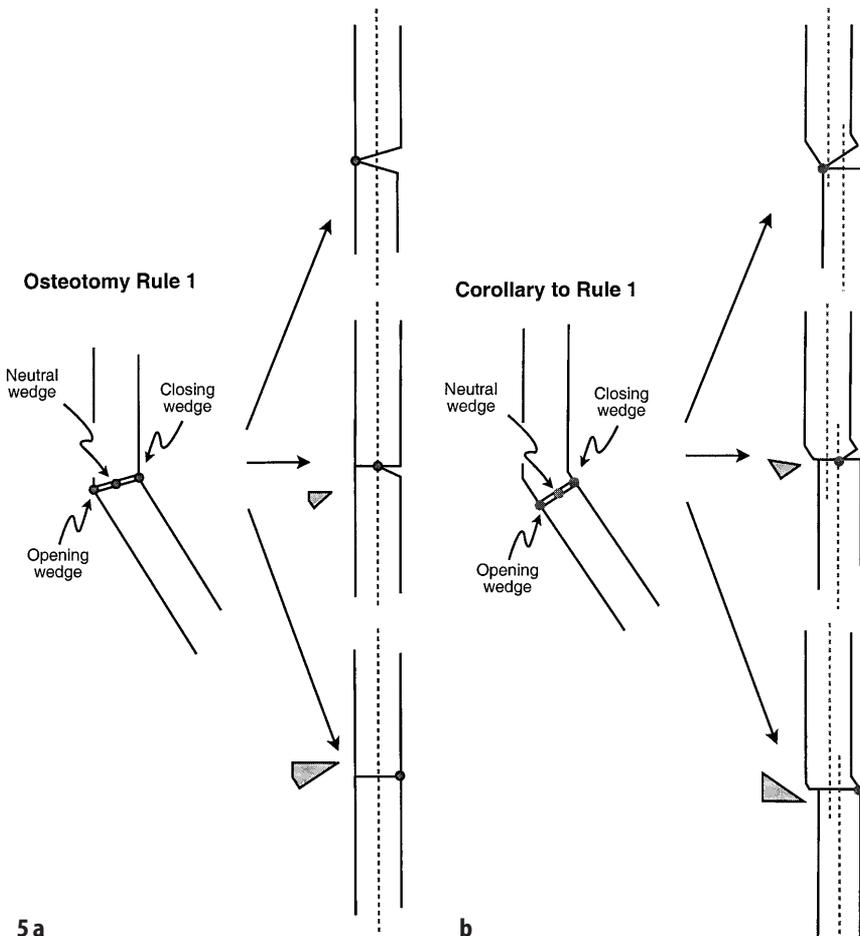


Abb. 5 ◀ a Osteotomieregel 1: Wenn die Osteotomie und die Achse der Korrektur der Angulation (axis of correction of angulation; ACA) durch CORA verlaufen, dann ist nur eine Angulation notwendig, um die proximalen und distalen Achsverhältnisse des Knochens wieder herzustellen. Alle CORA liegen auf einer transversalen Winkelhalbierenden dieser Fehlstellung. Wenn CORA auf der konvexen Seite der Winkelhalbierenden gewählt wird, dann resultiert eine offene Keilkorrektur. Wenn CORA auf der konkaven Seite der Winkelhalbierenden gewählt wird, dann resultiert eine zuklappende Keilkorrektur. Wenn CORA in der Mitte des Knochens gewählt wird, dann resultiert eine teilweise offene, teilweise zuklappende (neutrale) Keilkorrektur.

b Erweiterung der Regel 1: Wenn die Osteotomie durch eine andere Höhe als CORA verläuft und ACA auf der Osteotomielinie liegt, dann resultiert eine Translationsfehlstellung. Dies tritt sowohl mit öffnender, neutraler oder zuklappende Keilkorrektur auf

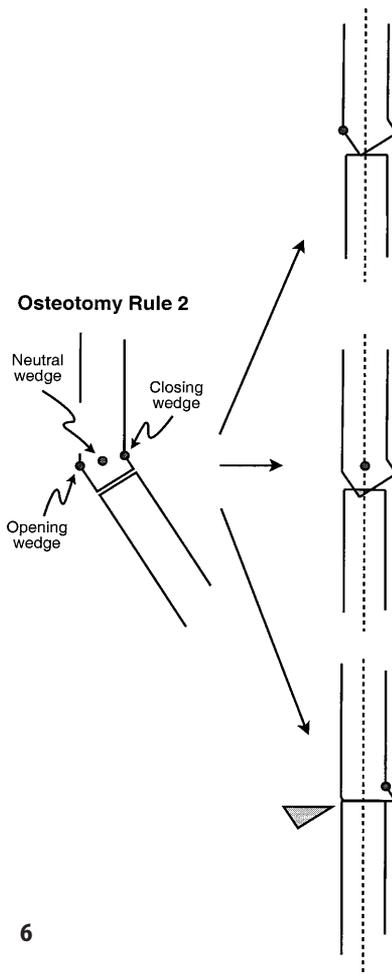


Abb. 6 ◀ **Osteotomieregel 2: Wenn ACA durch CORA verläuft, aber die Osteotomie in einer anderen Höhe durchgeführt wird, dann sind Angulation und Translation zur korrekten Ausrichtung der Knochenenden notwendig. Angulations- und Translationskorrektur erfolgen mit offenem, neutralem oder zuklappendem Keil**

wenn der Knochen direkt unterhalb der Gelenklinie anguliert, gibt es daher immer eine Teilachslinie, die zu diesem kurzen Gelenksegment in Verbindung steht.

Vor dem Zeichnen der mechanischen Teilachslinien sollte der MAT durchgeführt werden. Selbst wenn es offensichtlich ist, daß entweder die Tibia oder das Femur eine Deformität aufweist, ist es wichtig zu wissen, ob das gleichseitige Femur oder auch die Tibia normal geformt sind. Ebenfalls ist es nützlich zu wissen, ob die Gelenkwinkel des gegenseitigen Femurs oder der Tibia im Normbereich liegen, denn dann können diese Winkel als Referenz für die Planung von deformiertem Femur oder Tibia herangezogen werden.

Als nächstes werden die proximalen und distalen Achslinien der deformierten Knochen (Femur und/oder Tibia) eingezeichnet (Abb. 9–12). Sowohl

die proximale Tibia- wie auch die distale Femurachslinie werden in bezug auf die Kniegelenklinie eingezeichnet. Für tibiale Fehlstellungen wird die proximale mechanische Achslinie der Tibia auf dem Röntgenbild bezüglich folgendem Algorithmus eingezeichnet:

- ▶ man verlängere die mechanische Femurachslinie nach distal, wenn der gleichseitige LDFA normal ist;
- ▶ wenn der gleichseitige LDFA außerhalb der Norm liegt und der gegenüberliegende MPTA normal ist, ziehe man die Linie durch das Zentrum des Kniegelenks zum gegenüberliegenden MPTA;
- ▶ wenn beide, sowohl der gleichseitige LDFA und der kontralaterale MPTA außer der Norm sind, ziehe man eine Linie durch das Zentrum des Kniegelenks mit einem MPTA von 87°, denn dies ist der Durchschnittswert.

Für Femurdeformitäten wird die distale mechanische Achslinie des Femurs folgendermaßen auf dem Röntgenbild aufgezeichnet:

- ▶ man verlängere die tibiale mechanische Achslinie nach proximal, wenn der gleichseitige MPTA normal ist;

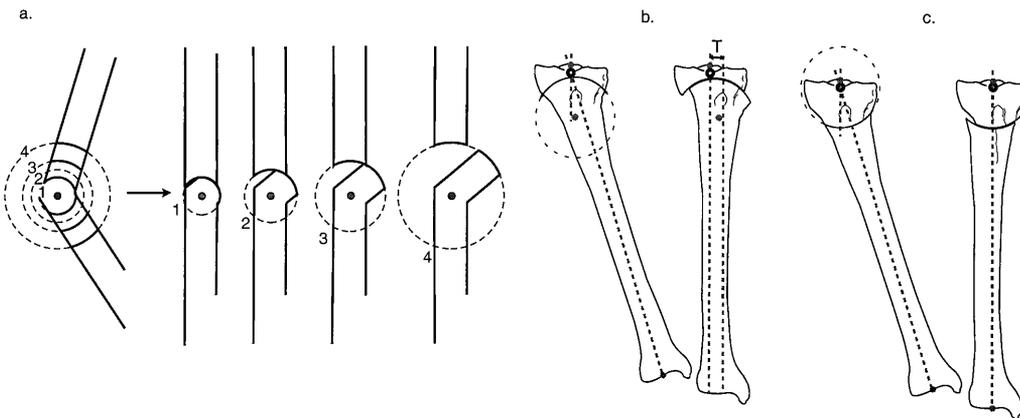


Abb. 7 ▲ a Die Focal-dome-Osteotomie ist eine zirkuläre (zylindrische) Osteotomie, bei der CORA im Zentrum des zirkulären Schnitts liegt. Für jedes CORA gibt es zirkuläre Schnitte mit unterschiedlichen Radien. Der limitierende Faktor ist der Betrag des Knochenkontaktes an der Osteotomielinie. Je größer der Radius der fokalen Domeosteotomie, desto größer die Translation und desto geringer der Knochenkontakt. Über einen gewissen Punkt hinaus ist dies dann unpraktikabel (Kreis 3 und 4).

b Die Maquet-dome-Osteotomie (Konkavität distal) für eine varische Tibia mit dem Scheitel der Domeosteotomie durch CORA. Die Achse der zirkulären Osteotomie ist distal zu CORA, sogar dann, wenn die Osteotomie direkt durch CORA verläuft. Die Knochenenden translieren an der Osteotomiestelle nach medial und rufen eine sekundäre mediale Translationsfehlstellung hervor mit kompletter Korrektur des Varus, aber hinzugekommener Translation der Achse.

c Bei der Focal-dome-Osteotomie für dieses CORA ist die Konkavität proximal. Wiederherstellung der Achslinien mit Angulation und lateraler Translation im Bereich der Osteotomie

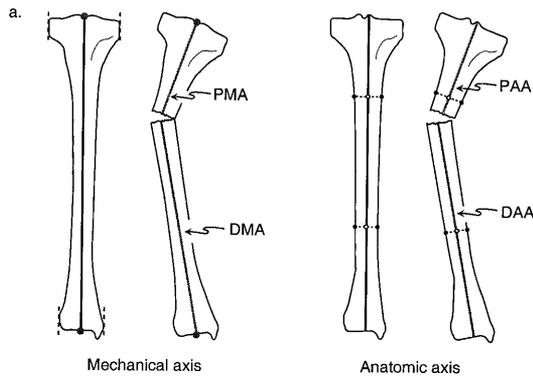
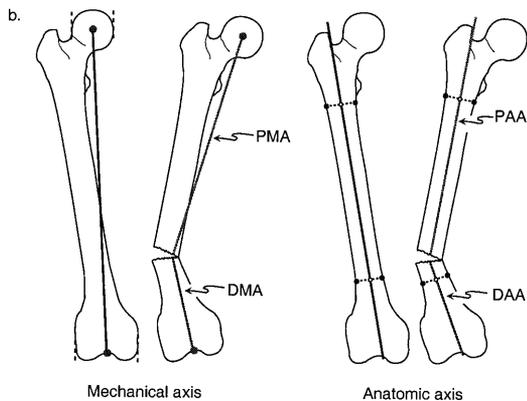


Abb. 8 a, b ◀ Tibiale mechanische Achsplanung (DAA distaler anatomischer Winkel, DMA distaler mechanischer Winkel, PMA proximaler mechanischer Winkel, PAA proximaler anatomischer Winkel)



a Schritt 1: Zeichne die proximale mechanische Achse der Tibia: I) Wenn das gleichseitige Femur einen normalen LDFA aufweist, dann verlängere dessen mechanische Achse nach distal, um die mechanische Achse der proximalen Tibia zu erhalten. II) Wenn der gleichseitige LDFA außer der Norm liegt, aber der gegenseitige MPTA normal ist, dann gebrauchte den gegenseitigen MPTA, um die mechanische Achse der proximalen Tibia einzuzichnen. III) Wenn der gleichseitige LDFA und der gegenüberliegende MPTA außer der Norm liegt, dann verwende den Normwert ( $87^\circ$ ) für den MPTA.

b Schritt 2: Zeichne die mechanische Achse der distalen Tibia und führe den Malorientations-Test für das Sprunggelenk durch: I) Zeichne eine Linie vom Mittelpunkt der Tibiagelenklinie parallel zum Schaft der Tibia (parallel zur anatomischen Achse, mittlere Diaphysenlinie). Messe den LDFA von der Sprunggelenklinie zu dieser Linie. II) Wenn der Schaft der Tibia distal der Deformität extrem kurz ist, so daß keine parallele Linie exakt genau eingezeichnet werden kann und der gegenseitige LDFA im Normbereich ist, dann verwende zur Orientierung die mechanische Achse der distalen Tibia. III) Wenn die Höhe der Deformität extrem distal liegt und der kontralaterale LDFA außerhalb der Norm ist, dann verwende den Normwert von  $90^\circ$  zur Bestimmung der distalen mechanischen Achsline

a. Step 1: Draw the Proximal Mechanical Axis Line

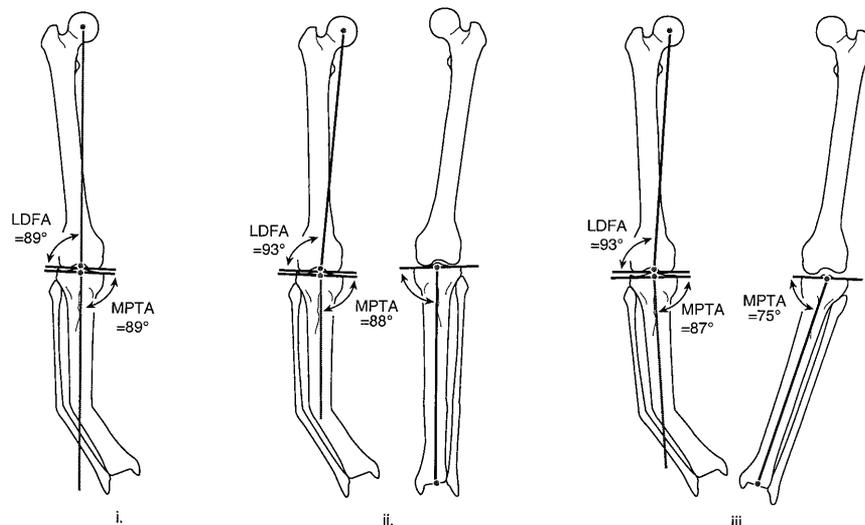
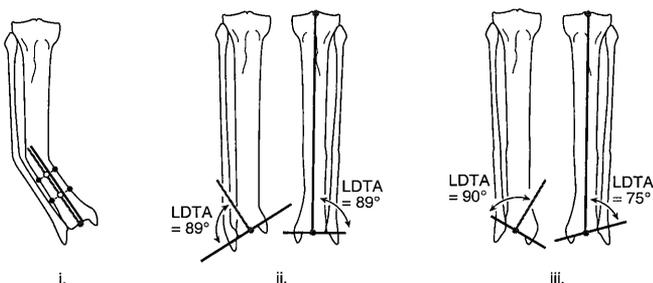


Abb. 9 a, b ◀ Korrekturplanung Femur/Tibia.

a i. LDFA im Normbereich. Die Verlängerung kann zur Planung der Tibia verwandt werden. ii. LDFA außerhalb der Norm. Verwenden des normalen (gegenseitigen) MPTA zur tibialen Korrekturplanung. iii. LDFA und gegenseitiger MPTA sind pathologisch. Verwenden des physiologischen MPTA's ( $87^\circ$ )

b i. Bei normalem MPTA Verlängerung der tibialen Achsline nach proximal. ii. LDFA pathologisch; Intersection MPTA auf Sprunggelenksniveau, Fehlstellung im Sprunggelenk selbst. iii. Beidseitige isolierte Sprunggelenksfehlstellung

b. Step 2: Draw the Distal Mechanical Axis Line



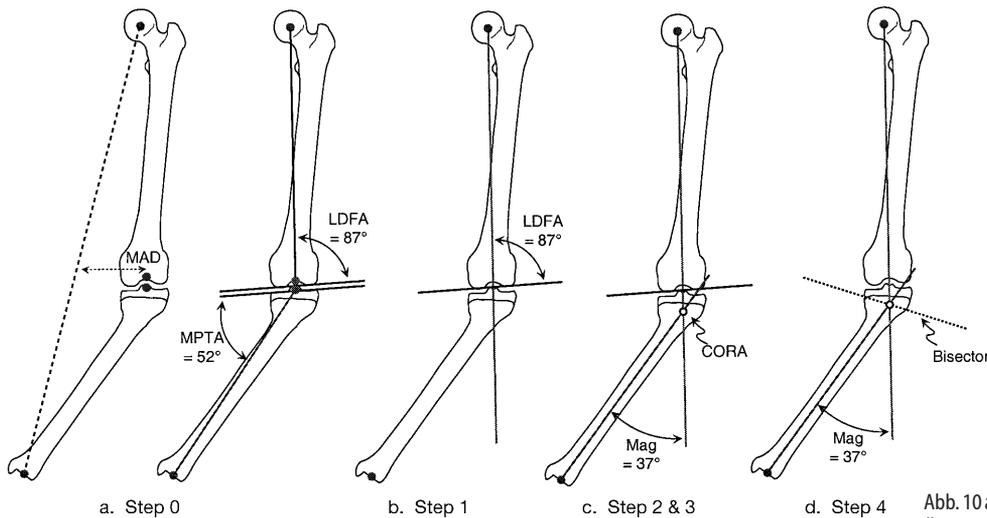
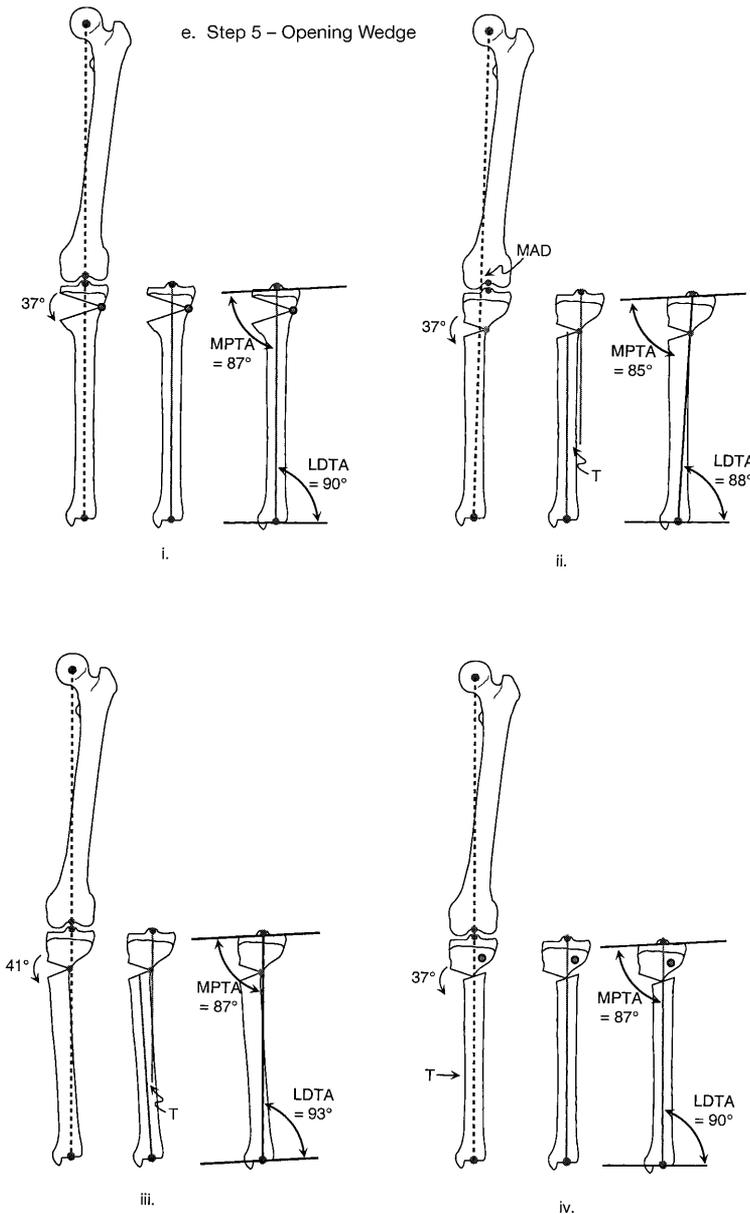


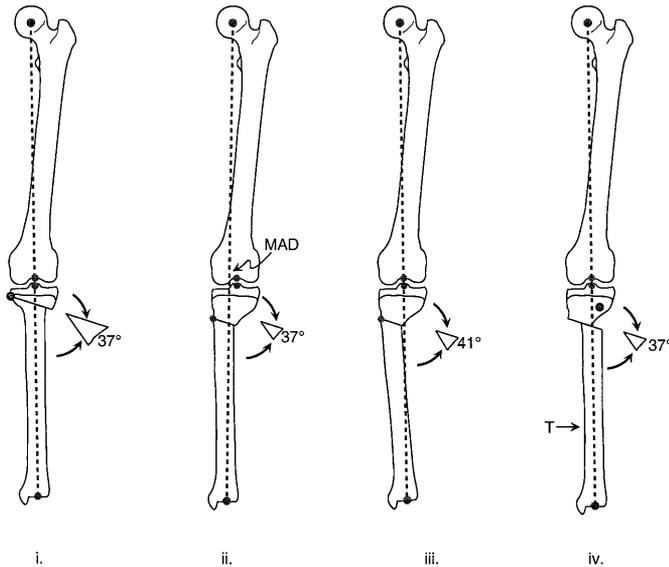
Abb. 10 a-e ◀ Tibiale Deformitätenplanung und Überlegungen bezüglich der Osteotomie: 37° proximale tibiale Winkelabweichung.

a **Schritt 0:** Die mediale mechanische Achsabweichung an der Tibia wird lokalisiert mittels des Malignanz-Test.  
 b **Schritt 1:** Da das Femur nicht Ursache der Fehlstellung ist (mLDFA = 87°), wird seine mechanische Achse nach distal verlängert als mechanische Achse der proximalen Tibia.  
 c **Schritt 2 und 3:** Die mechanische Achse der distalen Tibia wird nach proximal verlängert vom Zentrum des Sprunggelenks durch den Schaft der Tibia. CORA ist der Schnittpunkt dieser 2 mechanischen Achslinien und liegt knapp unterhalb der Epiphyse. Die Größe der Angulation beträgt 37°.  
 d **Schritt 4:** Die Winkelhalbierende wird eingezeichnet zur Festlegung der öffnenden und zuklappenden Keil-CORA.

e **Schritt 5:** Osteotomie. Durchführung einer offenen Keilosteotomie: I Die Osteotomie erfolgt durch und die Angulationskorrektur um CORA der Winkelhalbierenden: 37° Winkelkorrektur, keine mechanische Achsabweichung, anatomische Achsstellung, normale Sprunggelenk- und Kniegelenkstellung. II Die Osteotomie erfolgt distal und die Korrektur um einen Punkt distal der Winkelhalbierenden von CORA: 37° Winkelkorrektur, resultierende mediale mechanische Achsabweichung, mediale Translation der anatomischen Achse der distalen Tibia, Sprunggelenk- und Kniegelenkstellung sind leicht verändert. III Die Osteotomie wird distal durchgeführt und die Korrektur erfolgt um einen Punkt distal der Winkelhalbierenden von CORA: 41° Korrektur (4° Überkorrektur), keine mechanische Achsfehlstellung, Valgus und laterale Translation der anatomischen Achse der distalen Tibia, abnormale Sprunggelenkwinkel (Valgus) und normale Kniegelenkstellung. IV Die Osteotomie erfolgt distal, aber die Korrektur um die Winkelhalbierende von CORA: 37° Angulationskorrektur, keine mechanische Achsabweichung, normale anatomische Achsverhältnisse der distalen Tibia (eine Vorwölbung erscheint zusätzlich in Höhe der Osteotomie und Translation), normale Sprunggelenk- und Kniegelenkstellung



f. Step 5 – Closing Wedge



g. Step 5 – Focal Dome

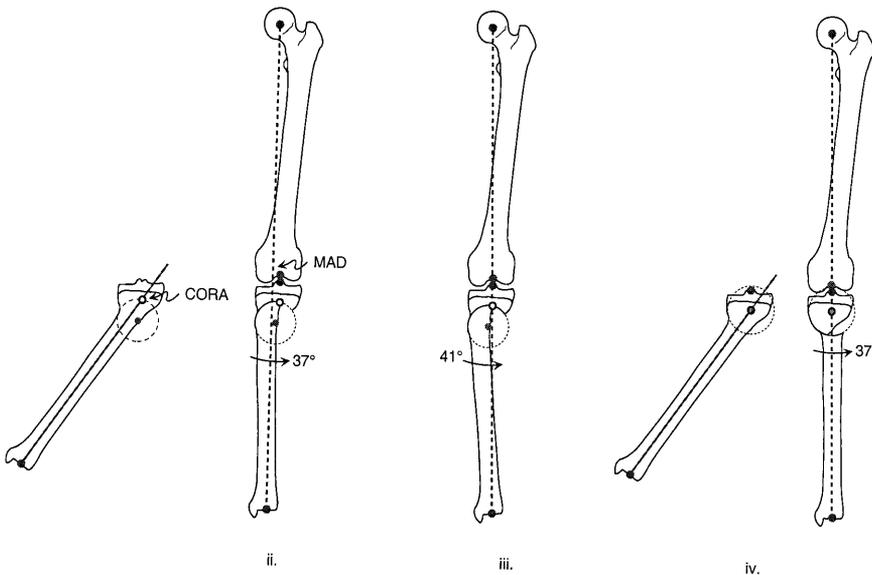


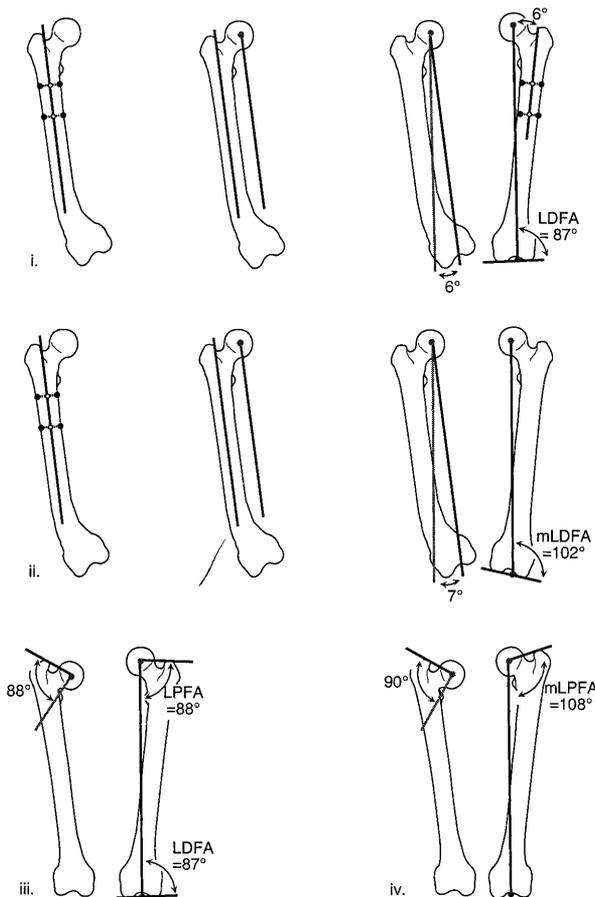
Abb. 10f, g ▲ f Durchführen einer zuklappenden Keilosteotomie: Die selben Schritte wie für die offene Keilosteotomie (I–IV) werden auch für die zuklappende Keilosteotomie durchgeführt. g Durchführung der Focal-dome-Osteotomie: I Dieser Schritt bei der offenen oder zuklappenden Keilosteotomie wird bei der Domeosteotomie nicht verwendet und deshalb hier nicht erwähnt. II und III Die Domeosteotomie wird so durchgeführt, daß der Apex der Domeosteotomie durch CORA verläuft. Das Zentrum des Dome's ist distal von CORA. Hier hinterläßt eine 37° Korrektur ein MAD, so daß eine 41° (4° Überkorrektur) zur Eliminierung des MAD benötigt wird. Die gleichen Effekte auf die anatomische Achsen des Sprunggelenks und der Kniegelenkstellung bei den Schritten II und III (s. oben) werden auch bei der Domeosteotomie gefunden. IV Focal-dome-Osteotomie: CORA korrespondiert mit dem Zentrum der zirkulären Osteotomie, eine 37° Korrektur eliminiert MAD, anatomische Achsen sowie Kniegelenk- und Sprunggelenkstellung sind normalisiert

- ▀ wenn der gleichseitige MPTA außer der Norm liegt und der gegenüberliegende LDFA normal ist, muß die Linie durch das Zentrum des Kniegelenks zum gegenüberliegenden LDFA gezogen werden;
- ▀ wenn beide, sowohl der gleichseitige MPTA und der kontralaterale LDFA außer der Norm liegen, ziehe man eine Linie durch das Zentrum des Kniegelenks mit einem LDFA von 87° (Durchschnittswert).

Um die proximale mechanische Femurachse und die distale mechanische Tibiaachse zu zeichnen, werden die anatomischen Achsen des proximalen Femurs bzw. des distalen diaphysären Tibiassegments als Referenz verwendet. Die mechanische Achse der Tibia liegt normalerweise parallel zur anatomischen Achse, daher kann die mechanische Achse der distalen Tibia als Linie durch das Zentrum des Sprunggelenks parallel zur diaphysären Mittschafflinie der Tibia gezeichnet werden. Wenn die Deformität extrem distal liegt, so kann eine exakte mittlere Diaphysenlinie nicht eingezeichnet werden. Für extrem distal gelegene CORA dient der distal mechanischen Achslinie die Stellung der Sprunggelenklinie als Referenz. Wenn der gegenüberliegende LDFA normal ist, wird die Linie durch das Zentrum der Sprunggelenklinie mit dem LDFA der Normseite gezogen. Wenn der LDFA der gegenüberliegenden Seite außer der Norm ist, wird der Durchschnittswert LDFA = 90° als Referenzlinie verwendet.

Die mechanische Achse des Femurs liegt normalerweise in einem Winkel zwischen 5°–9° zur anatomischen Femurachse (anatomisch-mechanische Winkel, AMA). Wenn die gegenüberliegenden LDFA und AMA im Normbereich liegen, wird die proximale mechanische Achslinie durch das Hüftkopffzentrum mit dem gleichen AMA gelegt, wie dieser auf der gegenüberliegenden Femurseite in bezug zur Mittschafflinie liegt. Wenn am gegenüberliegenden Femur LDFA oder AMA außer der Norm liegen, wird der Durchschnittswinkel von 7° verwendet. Nur wenn die Fehlstellung extrem proximal liegt, ist der Gebrauch der Hüftgelenklinie zur Erstellung der mechanischen Achslinie des proximalen Femurs vorzuziehen. In diesen Fällen wird die Linie durch das Hüftkopffzentrum mit dem gegenüber-

a. Step 1: Draw Proximal Mechanical Axis Line



b. Step 2: Draw Distal Mechanical Axis Line

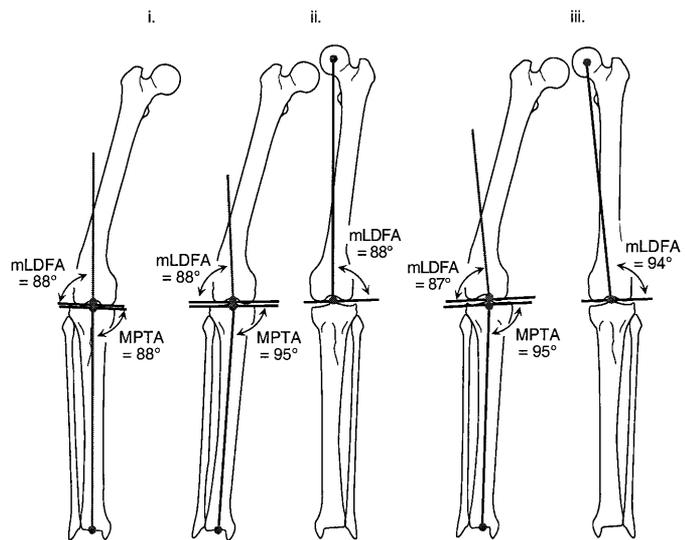


Abb. 11 a, b ▲ Femorale mechanische Achsplanung.

a **Schritt 1:** Zeichne die mechanische Achse des proximalen Femurs und führe den Malorientations-Test der Hüfte durch. / Ziehe eine mittlere Diaphysenlinie des proximalen Femurs (1. Linie links) gefolgt von einer parallelen Linie, die durch das Zentrum des Femurkopfes verläuft (2. Linie Mitte). Wenn der kontralaterale mLDFA im Normbereich liegt, dann verwende den Winkel zwischen der kontralateralen anatomischen und mechanischen Achse (AMA), um die proximale mechanische Achslinie einzuzeichnen. Diese 3. Linie verläuft vom Zentrum des Femurkopfes mit dem ausgemessenen AMA in einer Richtung lateral der 2. Linie (3. Linie rechts). Ziehe anschließend eine Linie von der Spitze des Trochanter major zum Zentrum des Femurkopfes und messe den LPFA. // Wenn der kontralaterale mLDFA außerhalb der Norm liegt, verwende den Durchschnittswert von AMA = 7°, um die proximale mechanische Achslinie zu erhalten (3. Linie), messe anschließend den LPFA. III Ist die Fehlstellung zu weit proximal, um eine proximale mittlere Diaphysenlinie einzuzeichnen (1. Linie), dann verwende den mLPGA der Gegenseite als Referenzwinkel (wenn dieser im Normbereich liegt), um die proximale mechanische Achse zu erhalten. IV In letztgenannter Situation, wenn der mLPGA außerhalb der Norm liegt, nehme den Durchschnittswert (mLPGA = 90°) zum Erhalt der proximalen mechanischen Achse des Femurs.

b **Schritt 2:** Zeichne die distale mechanische Achse des Femurs durch das Zentrum des Kniegelenks. / Wenn der gleichseitige MPTA in der Norm liegt, verlängere die mechanische Achse der Tibia nach proximal. // Wenn der gleichseitige MPTA außerhalb der Norm liegt, verwende den kontralateralen mLDFA, wenn dieser normgerecht ist. III Wenn beide, sowohl der gleichseitige MPTA und der gegenüberliegende mLDFA, außerhalb der Norm liegen, dann wähle den Durchschnittswert von mLDA = 87°

liegenden normalen LPFA gelegt. Wenn letztgenannter Winkel außer der Norm ist, wird der Durchschnittswert von LPFA = 90° genommen.

Die Korrektur von Femurfehlstellungen kann auch mit anatomischer Achsplanung erreicht werden (Abb. 13–15). Die proximale anatomische Achslinie des Femurs ist die mittlere Diaphysenlinie des Femurs. Wenn der mediale Winkel zwischen dieser Linie und der Hüftgelenklinie (MPFA) außer der Norm ist (Normwert MPFA = 83° ± 6°), bezieht sich die proximale anatomische Linie auf die Hüftgelenklinie. Die normale anatomische Achse verläuft durch die Fossa piriformis.

Für proximale Femurfehlstellungen wird die anatomische Achse durch die Fossa piriformis gezeichnet mit dem Winkel des normalen gegenüberliegenden MPFA oder mit dem Durchschnittswert (MPFA = 83°). Die normale distale anatomische Achslinie verläuft durch die mediale Tibiaeminentia mit dem Winkel des gegenüberliegenden normalen aLDFA (anatomischer lateraler distaler Femurwinkel) oder mit dem Durchschnittswert aLDFA = 80°.

Einer Fehlstellung in der frontalen Ebene liegt nicht immer nur eine Knochendeformität zugrunde. Wenn die distale Femurgelenklinie und die proximale Tibiagelenklinie nicht parallel verlaufen, dann besteht eine Varus- oder Valgusdeformität mit der Größe des konvergierenden Gelenkwinkels (JLCA). Der häufigste Grund liegt in ei-

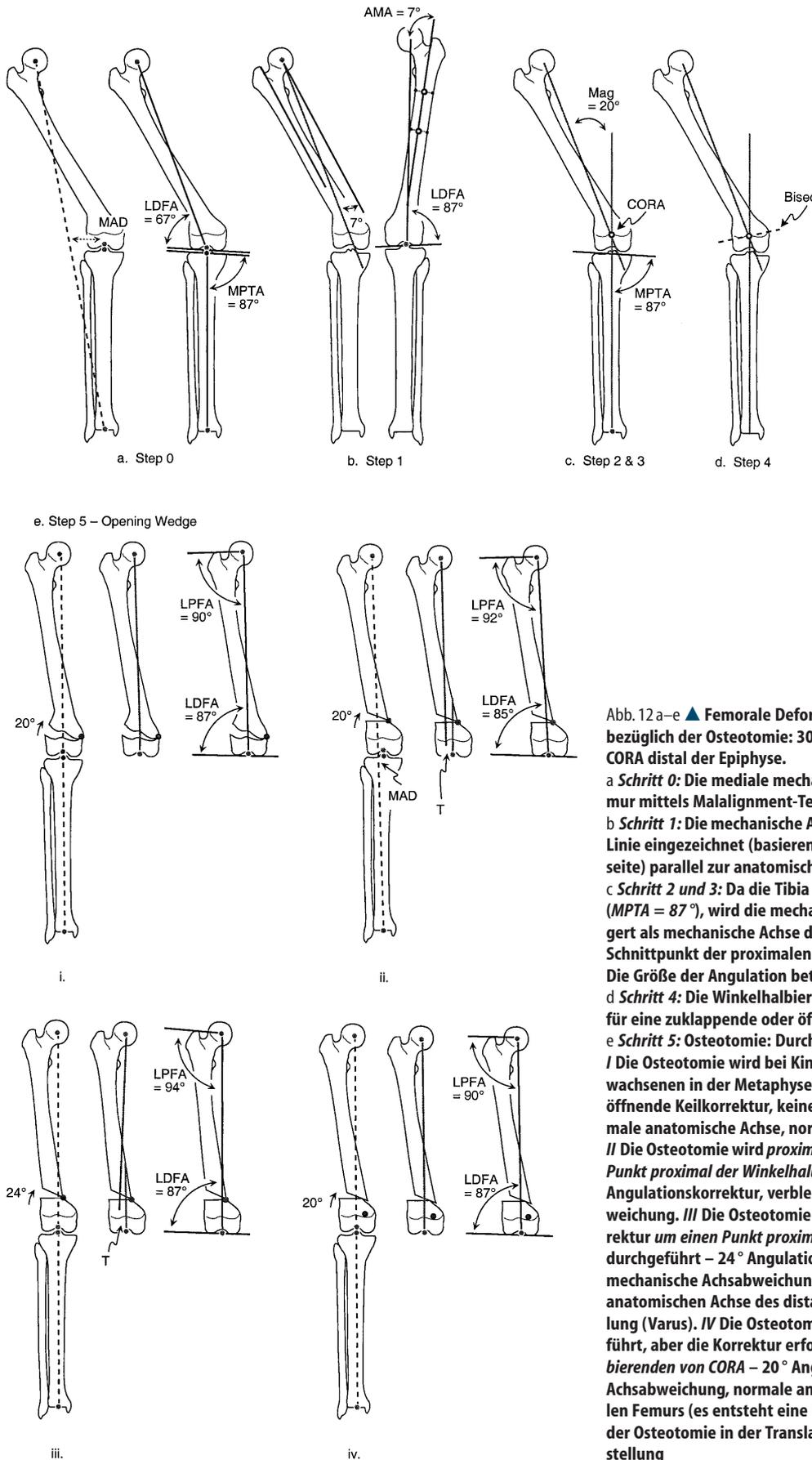


Abb. 12 a-e ▲ Femorale Deformitätenplanung und Überlegungen bezüglich der Osteotomie: 30° distale femorale Valgusdeformität – CORA distal der Epiphyse.

a **Schritt 0:** Die mediale mechanische Achsabweichung wird am Femur mittels Malalignment-Test bestimmt ( $LDFA = 67^\circ$ ).

b **Schritt 1:** Die mechanische Achse des proximalen Femurs wird als  $7^\circ$  Linie eingezeichnet (basierend auf dem  $AMA$  der normalen Gegenseite) parallel zur anatomischen Achse.

c **Schritt 2 und 3:** Da die Tibia keine Fehlstellung aufweist ( $MPTA = 87^\circ$ ), wird die mechanische Achslinie nach proximal verlängert als mechanische Achse des distalen Femurs.  $CORA$  ist der Schnittpunkt der proximalen und distalen mechanischen Achslinie. Die Größe der Angulation beträgt  $20^\circ$ .

d **Schritt 4:** Die Winkelhalbierende wird eingezeichnet, um die  $CORA$  für eine zuklappende oder öffnende Keilosteotomie festzulegen.

e **Schritt 5:** Osteotomie: Durchführung einer offenen Keilosteotomie:  
**I** Die Osteotomie wird bei Kindern in der Wachstumsfuge, bei Erwachsenen in der Metaphyse in Höhe von  $CORA$  durchgeführt –  $20^\circ$  öffnende Keilkorrektur, keine mechanische Achsabweichung, normale anatomische Achse, normale Hüft- und Kniegelenkstellung.  
**II** Die Osteotomie wird proximal von  $CORA$  und die Korrektur um einen Punkt proximal der Winkelhalbierenden von  $CORA$  durchgeführt –  $20^\circ$  Angulationskorrektur, verbleibende mediale mechanische Achsabweichung.  
**III** Die Osteotomie wird proximal von  $CORA$  und die Korrektur um einen Punkt proximal der Winkelhalbierenden von  $CORA$  durchgeführt –  $24^\circ$  Angulationskorrektur ( $4^\circ$  Überkorrektur), keine mechanische Achsabweichung, Varus und mediale Translation der anatomischen Achse des distalen Femurs, abnorme Hüftgelenkstellung (Varus).  
**IV** Die Osteotomie wird proximal von  $CORA$  durchgeführt, aber die Korrektur erfolgt um einen Punkt auf der Winkelhalbierenden von  $CORA$  –  $20^\circ$  Angulationskorrektur, keine mechanische Achsabweichung, normale anatomische Achsverhältnisse des distalen Femurs (es entsteht eine kleine Vorwölbung aufgrund der Höhe der Osteotomie in der Translation), normale Knie- und Hüftgelenkstellung

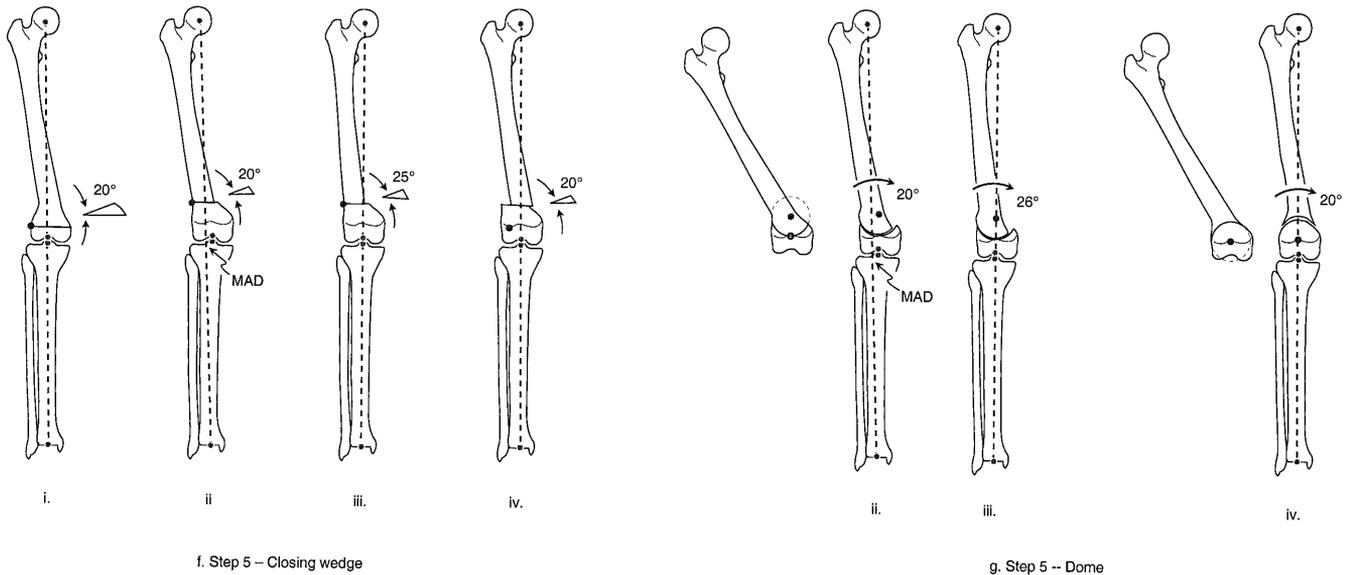


Abb. 12 f, g ▲ f Durchführung einer zuklappenden Keilosteotomie: Die selben Schritte wie für die offene Keilosteotomie (I–IV) werden auch für die zuklappende Keilosteotomie durchgeführt.

g Domeosteotomie: I Dieser Schritt tritt bei der Domeosteotomie nicht auf. II und III Die Domeosteotomie wird so durchgeführt, daß der Apex des Dome's durch CORA verläuft. Das Zentrum der Domeosteotomie ist proximal von CORA. Daher führt eine 20° Korrektur zu einer mechanischen Achsabweichung und 26° (6° Überkorrektur) ist erforderlich, um die mechanische Achsabweichung zu nivellieren. Die gleichen Effekte auf der anatomischen Achse sowie die Knie- und Hüftgelenkstellung bei den Schritten II und III (s. oben) sind auch für die Domeosteotomie gültig. IV Focal-dome-Osteotomie: CORA stimmt mit dem Zentrum der zirkulären Osteotomie überein – 20° Korrektur eliminiert die mechanische Achsabweichung. Die anatomische Achse sowie die Knie- und Hüftgelenkstellung sind normalisiert

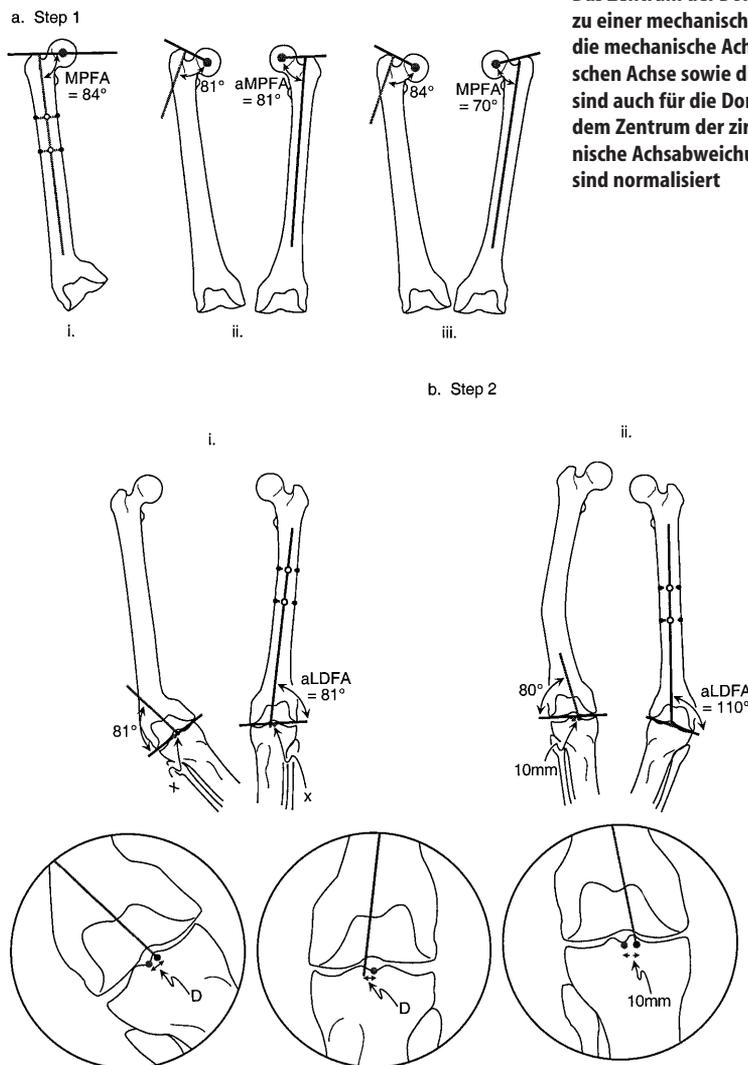


Abb. 13 a, b ◀ Anatomische Achsplanung des Femurs.

a Schritt 1: Ziehe die proximale anatomische Achse des Femurs und führe den Malorientation-Test der Hüfte durch. I Die mittlere Diaphysenlinie ist die proximale anatomische Achse des Femurs, messe den medialen proximalen Femurwinkel mittels dieser Linie. II Ist keine ausreichende Länge des proximalen Femurs vorhanden, um eine mittlere Diaphysenlinie einzuzichnen, dann verwende eine Linie von der Spitze des Trochanter major zum Zentrum des Femurkopfes und verwende sie als Referenzgelenklinie. Messe den aMPFA der Gegenseite und verwende diesen Winkel, wenn er im Normbereich liegt. III Wenn der gegenseitige aMPFA außer der Norm liegt, dann verwende den Durchschnittswert von 84°.

b Schritt 2: Zeichne die distale femorale anatomische Achslinie. I Wenn das gegenseitige Femur normal bezüglich des MAT ist, dann verwende dessen aLDFa und den Abstand „x“ vom Schnittpunkt der anatomischen Achse mit der Kniegelenklinie und verwende diese Werte für die Planung der deformierten Seite. Die distale anatomische Achse des deformierten Femur startet an einem Punkt des Kniegelenks mit dem definierten Abstand „x“ vom Zentrum des Kniegelenks zum Kniegelenk von aLDFa, sofern dieser auf der gegenüberliegenden Seite im Normbereich liegt. II Wenn auch die Gegenseite eine Deformität aufweist, so kann der Schnittpunkt dieser Seite und der Winkel nicht als Referenz verwendet werden. Anstatt dessen werden Normwerte verwendet, der Abstand des Schnittpunktes der anatomischen Achse zur Mitte des Kniegelenks (Joint Center Distance; JCD) beträgt bei Erwachsenen 10 mm nach medial, es wird ein Winkel von 80° verwendet (merke: der Schnittpunkt der normalen anatomischen Achse mit der Gelenklinie korrespondiert normalerweise mit der medialen Eminencia)

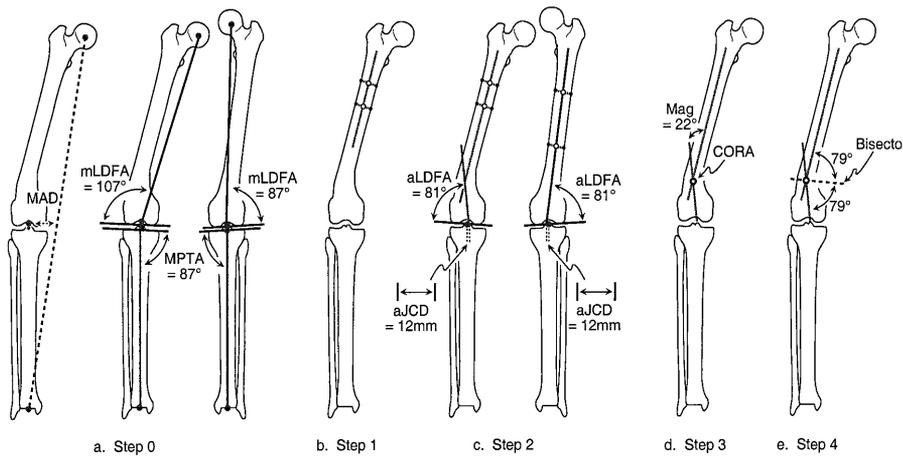


Abb. 14 a-e ◀ Anatomische Achsplanung des Femurs.

a **Schritt 0: MAT** medialer Achsabweichung aufgrund einer Femurdeformität.

b **Schritt 1: Proximaler anatomischer Winkel (PAA) und Malorientation-Test (MOT):** Die proximale anatomische Achslinie ist die mittlere Diaphysenlinie des proximalen Femurs. Der MPFA ist normal.

c **Schritt 2: Distaler anatomischer Winkel (DAA):** Der gegenseitige aLDFA ist normal. Die distale femorale anatomische Achse beginnt 12 mm medial des Kniegelenkzentrums (gegenüberliegende aJCD: anatomischer Gelenkzentrumabstand) der Gegenseite beträgt 12 mm, der aLDFA von 81° der Gegenseite wird als Referenz genutzt.

d **Schritt 3: CORA und Größe:** Größe der distalen Deformität der Metaphyse beträgt 22°.

e **Schritt 4: Winkelhalbierende:** Die Winkelhalbierende wird durch CORA gelegt

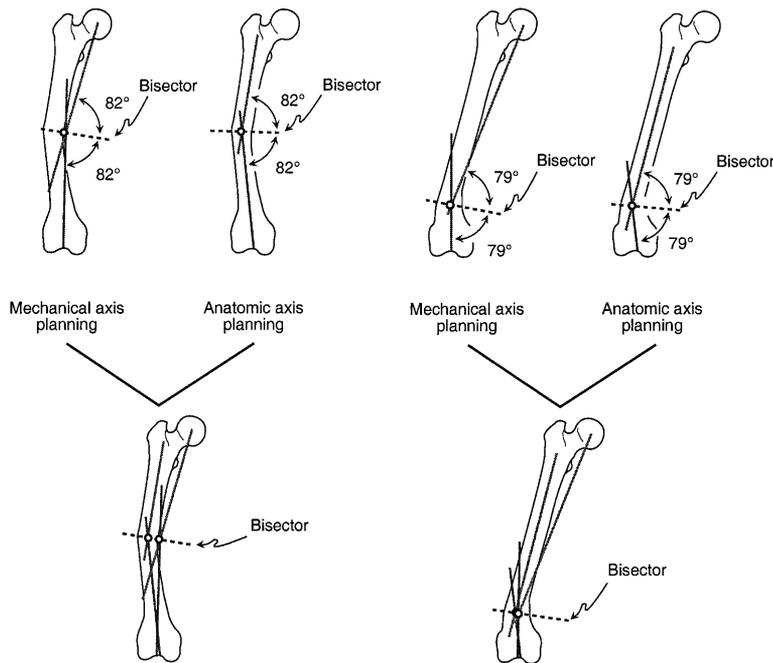


Abb. 15 ▲ Deformitäten des Femurs können entweder mit anatomischen oder mechanischen Achslinien geplant werden. Die CORA, die durch den Schnittpunkt der proximalen und distalen anatomischen bzw. proximalen und distalen mechanischen Achslinien definiert sind, sind allerdings bei beiden Planungen unterschiedlich. Dennoch liegen beide CORA auf der gleichen Winkelhalbierenden. Es ist die Winkelhalbierende und nicht ein individueller CORA, der die Höhe der Deformität definiert

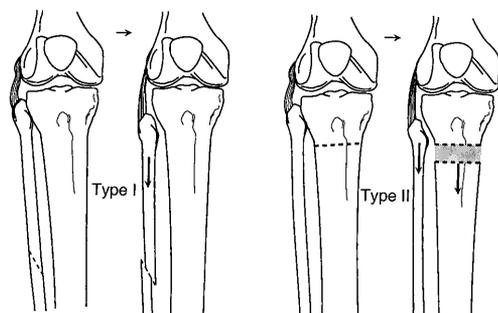


Abb. 16 ◀ Die Straffung des lateralen Kollateralbandes durch Distalisierung der proximalen Fibula (Typ 1) oder Verlängerung der Tibia und der Fibula ohne Fibulaosteotomie (Typ 2). Diese Methoden benötigen einen Fixateur externe zur graduellen Distraction. Typ 1 kann allerdings auch akut durch ein Release der proximalen Fibula von der Tibia durchgeführt werden

ner lateralen Seitenbandlaxizität aufgrund eines Überwuchses des Fibulaköpfchens oder der Überdehnung durch eine lang bestehende Varusfehlstellung. Dies kann indirekt korrigiert werden durch die Distalisierung der proximalen Fibula mit einem Fixateur externe (Abb. 16). Eine mediale Kollateralbandinstabilität kann ebenso Grund einer Fehlstellung sein. Diese Instabilität kann direkt durch Straffung des medialen Kollateralbandes mittels Durchführung einer offenen Keilosteotomie proximal des Bandansatzes der proximalen Tibia (Abb. 17) behandelt werden. Die Vertiefung des Tibiaplateaus, entweder durch ein Trauma oder entwicklungsbedingt (z. B. Morbus Blount, Ellis-Creveland-Syndrom), kann ebenfalls eine Fehlstellung verursachen. Eine Korrektur durch Osteotomie in der Metaphyse hat weiterhin eine Fehlstellung des Gelenks zur Folge. Eine Hemiepiophysenosteotomie (Abb. 18) kann zur Anhebung des vertieften Plateaus erfolgen und führt zu der Korrektur der inkongruenten Gelenklinie.

Die Deformitätenplanung kann CORA in einer anderen Höhe erscheinen lassen, als der offensichtliche Apex der Angulation zu liegen kommt (Abb. 19, 20). Dies bedeutet, daß eine zusätzliche Translationsfehlstellung oder eine 2. Höhe einer Angulationsdeformität vorliegt. Beim Fehlen einer Translationsdeformität wird eine 3. Achsplanungslinie benötigt. Diese mittlere mechanische Achslinie beginnt

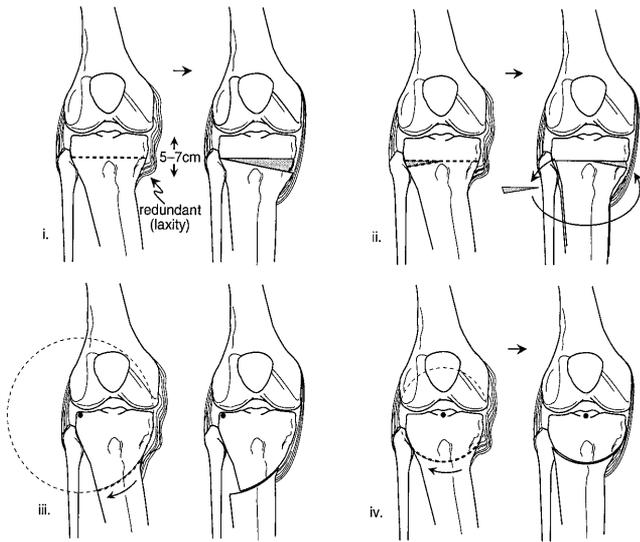


Abb. 17 ◀ Osteotomie zur Straffung des medialen Kollateralbandes (MCL). I offene Keilosteotomie; II neutrale Keilosteotomie; III öffnende Focal-dome-Osteotomie; IV neutrale Focal-dome-Osteotomie

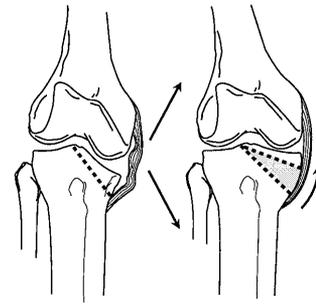


Abb. 18 ▲ Vertiefung des medialen Tibiaplateaus mit medialer Kollateralbandlaxizität. Die Osteotomie wird proximal der medialen Kollateralbandansatzstelle durchgeführt, das mediale Tibiaplateau wird angehoben mit dem Resultat der Straffung des medialen Kollateralbandes

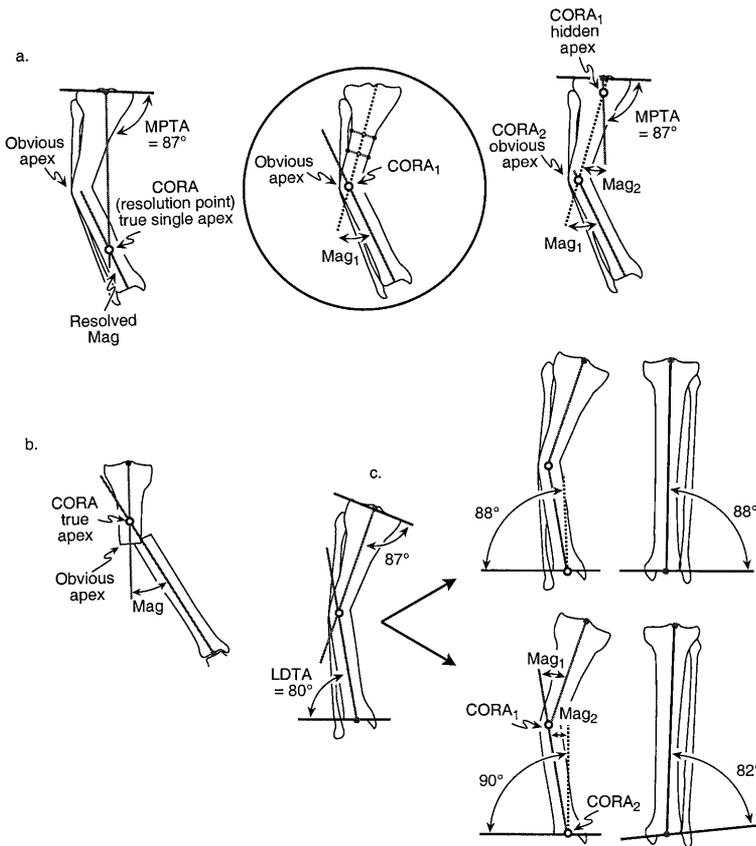


Abb. 19 a-c ▲ Wenn CORA nicht in Höhe der offensichtlichen Fehlstellung liegt, dann gibt es mehr als eine Fehlstellung bezüglich der Angulation (a) oder es gibt eine zusätzliche Translationsfehlstellung (b). Zeichne im ersten Fall eine dritte Linie, korrespondierend zur mechanischen Achse in Mitte der Tibia ein. Da die mechanische und die anatomische Achse der Tibia annähernd gleich sind, verwendet man eine mittladiaphysale Linie, markiert die 2 Cora und mißt die Größe der 2 Fehlstellungen. c Wenn der Winkel zwischen der distalen mechanischen Achslinie und des Sprunggelenks (LDTA) außerhalb der Norm liegt, dann besteht ein zusätzliches CORA des Sprunggelenks. Zeichne den LDTA der anderen Seite, um die Sprunggelenksachslinie zu bestimmen, falls auch der gegenseitige LDTA nicht der Norm entspricht, verwende 90° als Normwert zum Erhalt der 3. Achslinie. Bestimme dann die Größe des Winkels zwischen der Sprunggelenksachslinie und der distalen tibialen mechanischen Achse

in der Höhe des offensichtlichen Scheitelpunktes der Angulation (CORA 1). In der Tibia ist diese mittlere Linie in der Mitte der Diaphyse gelegen. Im Femur liegt diese mittlere Linie im 7° Winkel zur mittleren Diaphysenlinie und verläuft durch den offensichtlichen Apex (CORA 1). Die Schnittpunkte dieser mittleren Linie mit der proximalen und distalen mechanischen Achslinie sind die 2 CORA (CORA 1 und CORA 2). Wenn bei der mechanischen oder anatomischen Achsplanung der Tibia oder der anatomischen Achsplanung des Femurs CORA außerhalb oder am Rande des Knochens zu liegen kommt, dann ist die Deformität multiapikal (denn die mechanische und anatomische Achslinie der normalen Tibia und die anatomische Achslinie des normalen Femurs sind innerhalb des Knochens gelegen, ein CORA außerhalb des Knochens kann nicht mit einer uniapikalen Deformität einhergehen). Im Gegensatz dazu verläuft die mechanische Achse des normalen Femurs außerhalb desselben in seiner proximalen Höhe. Daher kann CORA bei einer mechanischen Achsplanung des proximalen Femurs außerhalb des Knochens liegen.

Multiapikale Deformitäten können korrigiert werden mittels einer Osteotomie in einer oder auch in mehreren Höhen (Abb. 21). Lösungen mit einer Osteotomie in nur einer Höhe sind nicht immer praktikabel, sogar dann, wenn sie geometrisch möglich sind. Osteotomien in unterschiedlichen Höhen stellen normale mechanische und anatomische Achsen wieder her und bewirken eine

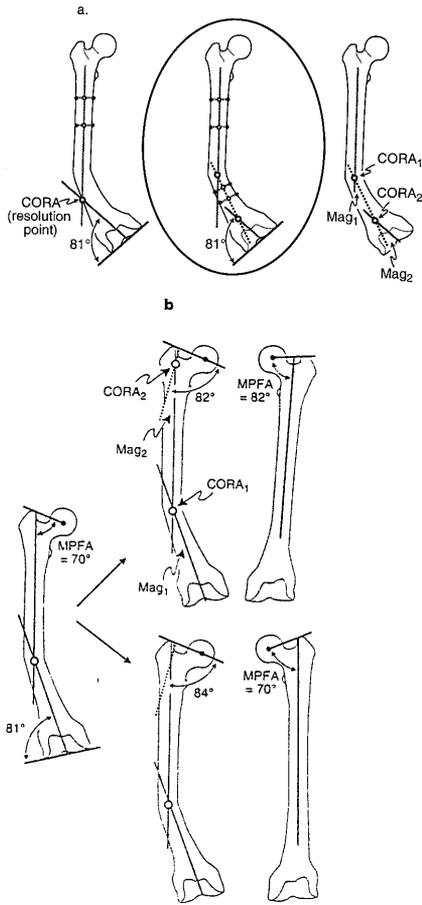


Abb. 20 **a** Wenn CORA nicht in Höhe der offensichtlichen Fehlstellung liegt, gibt es mehr als eine Fehlstellung der Angulation. Man zeichnet eine mittlere Linie, korrespondierend zur anatomischen Achse des mittleren Femurs und startet diese mittlere Linie in der mittleren Diaphyse in Höhe der offensichtlichen Angulation. Man zeichnet diese mittlere Linie mit Diaphysenlinie von diesem Punkt aus, markiert die CORA und mißt die Größen der Schnittpunkte mit der distalen und proximalen anatomischen Achsline.

**b** Wenn der MPFA außerhalb der Norm liegt ( $84^\circ \pm 5^\circ$ ), dann besteht ein zusätzliches CORA in Höhe des Hüftgelenks. Man nimmt hier aMPFA der Gegenseite, um die anatomische Achsline korrespondieren zum Hüftgelenk einzuzeichnen. Ist der gegenseitige aMPFA außerhalb der Norm, verwendet man  $90^\circ$  als Durchschnitswert und mißt nun die Größe des Winkels zwischen Hüftachsline und der proximalen femoralen anatomischen Achse

normale Gelenkstellung. Osteotomien in einer Höhe stellen ebenfalls die mechanische Achse wieder her und bewirken eine normale Gelenkstellung. Osteotomien in nur einer Höhe stellen die anatomischen Achsverhältnisse nicht wieder her und hinterlassen häufig eine deutlich verspürbare Knochenvorwölbung oder auch Deformität im Bereich des Schafts der Knochen. Marknägeln können in solchen Fällen zur Fixation leider daher nicht verwendet werden. Es gibt mehrere als nur eine Möglichkeit der Mehrfachosteotomie, die die mechanische Achse und die Gelenkorientierung wieder herstellt. Unterschiedliche Lösungen können durch das Verschieben der mittleren Achsline erreicht werden (Osteotomieregel 3). Für jede Position der mittleren Achsline gibt es 2 neue CORA mit neuem Ausmaß.

In der sagittalen Ebene wird die Planung mittels anatomischer Achsen

durchgeführt. Da das Femur in der sagittalen Ebene gekrümmt ist, ist die anatomische Achse in der sagittalen Ebene ebenfalls gekrümmt. Das proximale und distale mittlere Diaphysensegment des Femurs kann annähernd als gerade Linie betrachtet werden. Diese geraden Linien werden verwendet, um die Gelenkorientierung von Hüfte und Knie in der sagittalen Ebene zu ermöglichen. Der Winkel des Knies in der sagittalen Ebene bezüglich der anatomischen Achse des Femurs wird als posteriorer distaler Femurwinkel (PDFA) bezeichnet (Normwert PDFA =  $84^\circ \pm 4^\circ$ ). Der Winkel des Kniegelenks und des Sprunggelenks in der sagittalen Ebene bezüglich der anatomischen Achse der Tibia ist der posteriore proximale Tibiawinkel (PPTA) (Normwert PPTA =  $81^\circ \pm 4^\circ$ ), und der anteriore distale Tibiawinkel (ADTA) (Normwert ADTA =  $80^\circ \pm 2^\circ$ ). Zusätz-

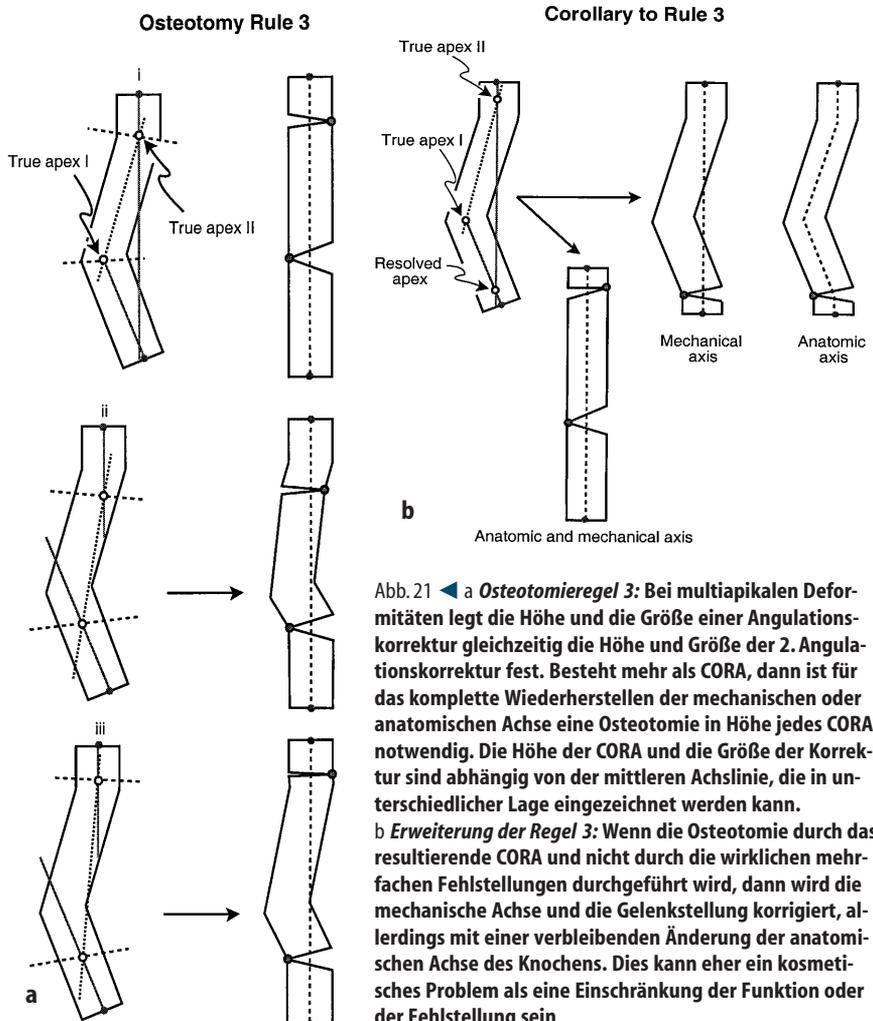


Abb. 21 **a** Osteotomieregel 3: Bei multiapikalen Deformitäten legt die Höhe und die Größe einer Angulationskorrektur gleichzeitig die Höhe und Größe der 2. Angulationskorrektur fest. Besteht mehr als CORA, dann ist für das komplette Wiederherstellen der mechanischen oder anatomischen Achse eine Osteotomie in Höhe jedes CORA notwendig. Die Höhe der CORA und die Größe der Korrektur sind abhängig von der mittleren Achsline, die in unterschiedlicher Lage eingezeichnet werden kann.

**b** Erweiterung der Regel 3: Wenn die Osteotomie durch das resultierende CORA und nicht durch die wirklichen mehrfachen Fehlstellungen durchgeführt wird, dann wird die mechanische Achse und die Gelenkstellung korrigiert, allerdings mit einer verbleibenden Änderung der anatomischen Achse des Knochens. Dies kann eher ein kosmetisches Problem als eine Einschränkung der Funktion oder der Fehlstellung sein

## Zum Thema: Deformitätenkorrektur der Extremitäten

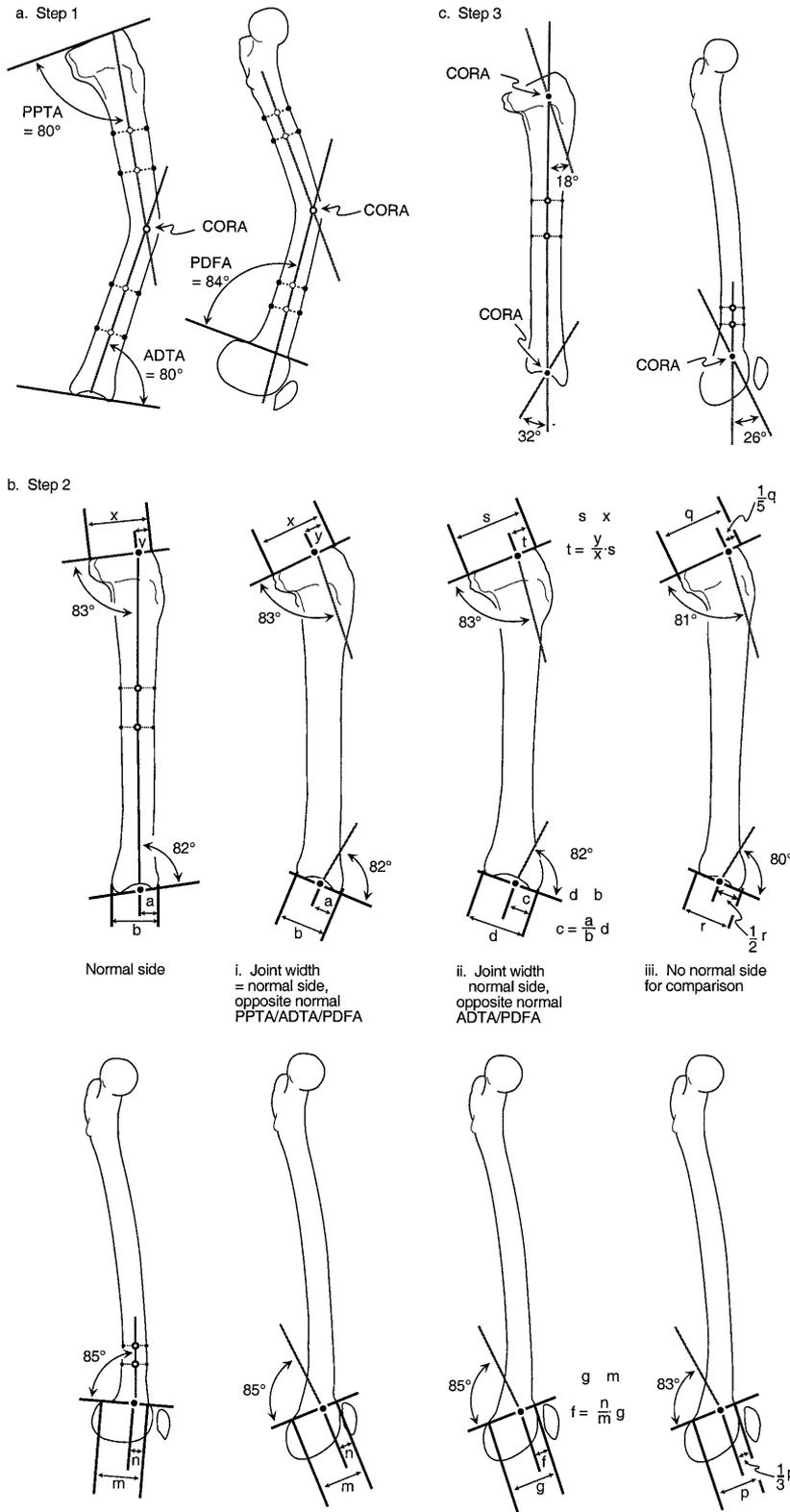


Abb. 22 a-c ◀ Anatomische Achsplanung in der sagittalen Ebene.

**a Schritt 1:** Man ziehe die mittleren diaphysären Linien. Wenn der Malorientation-Test normal ist, besteht nur ein diaphysäres CORA.

**b Schritt 2:** Besteht eine Gelenkfehlstellung, zeichnet man die anatomische Achse des Gelenksegments, beginnend von dem geeigneten vorderen Gelenkeckabstand (a-JED), orientierend am korrekten Gelenkstellungswinkel. Wenn die Werte der normalen Gegenseite vorhanden sind, zeichnet man die mittlere Diaphysenlinie der normalen Seite und mißt die Gelenkbreite (Joint Line Width, JLW;  $x, b, m$ ) und vorderer Gelenkkantenabstand (a-JED; anterior-Joint Edge Distance;  $y, a, n$ ) und berechne die Gelenkbreitenrelation (Joint Edge Ratio, JER;  $y/x, b/a, m/n$ ) für die normale Seite. I Wenn die normale Seite den gleichen JLM ( $x, b, m$ ) aufweist, verwendet man den gleichen a-JED ( $y, a, n$ ) gemessen an der normalen Gelenklinie. II Wenn die deformierte Seite einen unterschiedlichen JLW ( $s, d, g$ ) aufweist, wird der normale JLW ( $x, b, m$ ) mit A-HER ( $y/x, b/a, m/n$ ) multipliziert, um a-JED ( $t, c, f$ ) der deformierten Seite zu finden. III Ist keine normale Gegenseite vorhanden, dann verwendet man den normalen Durchschnittswert für a-JER = 1/5 im Bereich der proximalen Tibia; a-JER = 1/3 für die distale Femur und a-HER = 1/2 für die distale Tibia. Man multipliziert den gewählten a-JER mit JLW ( $q, r, p$ ) der deformierten Seite. Nun zieht man die Achslinie vom markierten Punkt mit dem entsprechenden Gelenkstellungswinkel der normalen Gegenseite. Ist der Gelenkstellungswinkel der Gegenseite außerhalb der Norm oder nicht vorhanden, verwendet man den normalen Durchschnittswert des entsprechenden Gelenks (aPPTA = 81°; a-ADTA = 80°; a-PDFA = 83°). Nun zeichnet man dann die anatomische Achse des Segments vom markierten Punkt mittels des normalen Durchschnittswertes des Gelenkwinkels.

**c Schritt 3:** Markierung der CORA am Schnittpunkt der Achslinien. Nun mißt man die Größe des Angulationswinkels zwischen den beiden Achslinien

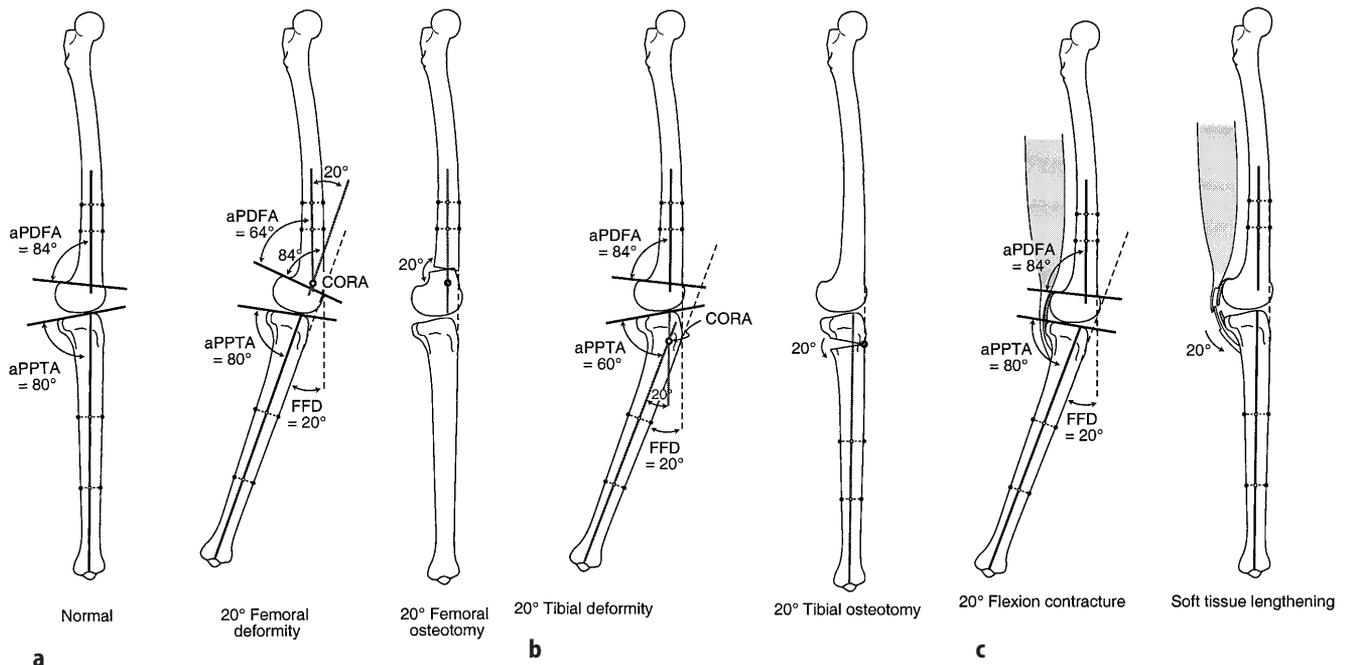


Abb. 23 ▲ a Knieflexionsfehlstellung von 20° (maximale Kniestreckposition). Normale seitliche Kniestellung zum Vergleich. Normseite PDFA = 84° und PPTA = 80°. Deformierte Seite: PDFA = 64° und PPTA = 80°. CORA im distalen Femur. Größe der femoralen Angulation 20°. Femorale Winkeldeformität hat die selbe Größe wie die Kniebeugedeformität. Deshalb ist allein die knöcherne Deformität Ursache der fixierten Beugedeformität. Behandlung: Distale femorale Osteotomie mit 20° Korrektur um CORA: Nach der Korrektur FFD = 0°.

b Knieflexionsfehlstellung von 20° (maximale Kniestreckposition). Deformierte Seite: PDFA = 84° und PPTA = 60°. CORA in der proximalen Tibia. Größe der tibialen Winkeldeformität 20°. Tibiale Winkeldeformität so groß wie die Kniebeugedeformität. Da ist allein die knöcherne Deformität der Tibia Ursache der fixierten Beugedeformität. Behandlung: Proximale Tibiaosteotomie und 20° Korrektur um CORA: Nach der Korrektur FFD = 0°.

c Knieflexionsfehlstellung von 20° (maximale Kniestreckposition). Deformierte Seite: PDFA = 84° und PPTA = 80°. Gelenkwinkel sind normal. Deshalb ist hier die Kontraktur ohne knöcherne Deformität Ursache der fixierten Beugedeformität. Behandlung: Weichteilrelease oder Distraction

lich zu den Gelenkwinkeln ist es notwendig, die Schnittpunkte der anatomischen Achse mit der Gelenklinie zu kennen.

Im Gegensatz zur mechanischen Achse schneidet die anatomische Achse die Gelenklinie nicht in ihrem Zentrum. Im distalen Femur schneidet die anatomische Achse die Gelenklinie im 1. Drittel der Gelenkbreite, beginnend von der vorderen Kante des Gelenks. In der proximalen Tibia schneidet die anatomische Achse die Gelenklinie im 1. Fünftel der Gelenkbreite, beginnend von der vorderen Kante des Sprunggelenks. In der distalen Tibia schneidet die anatomische Achse die Gelenklinie in der Hälfte der Gelenkbreite, beginnend an der vorderen Kante des Sprunggelenks. Mit diesen Informationen kann die anatomische Achsplanung durchgeführt werden.

Liegt eine diaphysäre Deformität vor, so werden die mittleren Diaphysenlinien an jeder Seite des diaphysär gelegenen Apex der Angulation eingezeichnet. Die Stelle, an der sich die Linien in der Diaphyse schneiden, ist das diaphysäre CORA. In der Tibia sollten der PPTA und der ADTA in bezug zur proximalen und distalen mittleren Diaphysenlinie gemessen werden. Sind diese Winkel außerhalb der Norm, sollten zusätzlich Achslinien in den Gelenksegmenten eingezeichnet werden. Bezüglich der tibialen Kniegelenklinien wird die proximale Achslinie der Tibia entsprechend dem gegenüberliegenden normalen PPTA oder dem Normwert von 81° gezeichnet. Bezüglich der Sprunggelenklinie verläuft die distale Achslinie der Tibia entsprechend dem Winkel des gegenüberliegenden normalen ADTA oder des Normwerts

(ADTA = 80°). Diese Linien sollten durch denselben Gelenklinienschnittpunkt verlaufen wie die gegenüberliegende normale mittlere Diaphysenlinie oder durch den Normwert von einem Fünftel oder der Hälfte der Gelenkbreite vom vorderen Punkt des Gelenks im Kniegelenk bzw. des Sprunggelenks. Bezüglich der femoralen Kniegelenklinie wird die distale Achslinie des Femurs entsprechend des gegenüberliegenden Normwinkels PDFA oder des Durchschnittswerts (PDFA = 84°) eingezeichnet. Hierbei wird der auf der Gegenseite normale Gelenkschnittpunkt oder der Durchschnittswert von 1/3 des Weges, beginnend von dem vorderen Punkt des Gelenks, verwendet (Abb. 22).

Knochenfehlstellungen in der Sagittalebene müssen von Kontrakturen unterschieden werden. Der Malorientations-Test identifiziert Knochenfehl-

## Zum Thema: Deformitätenkorrektur der Extremitäten

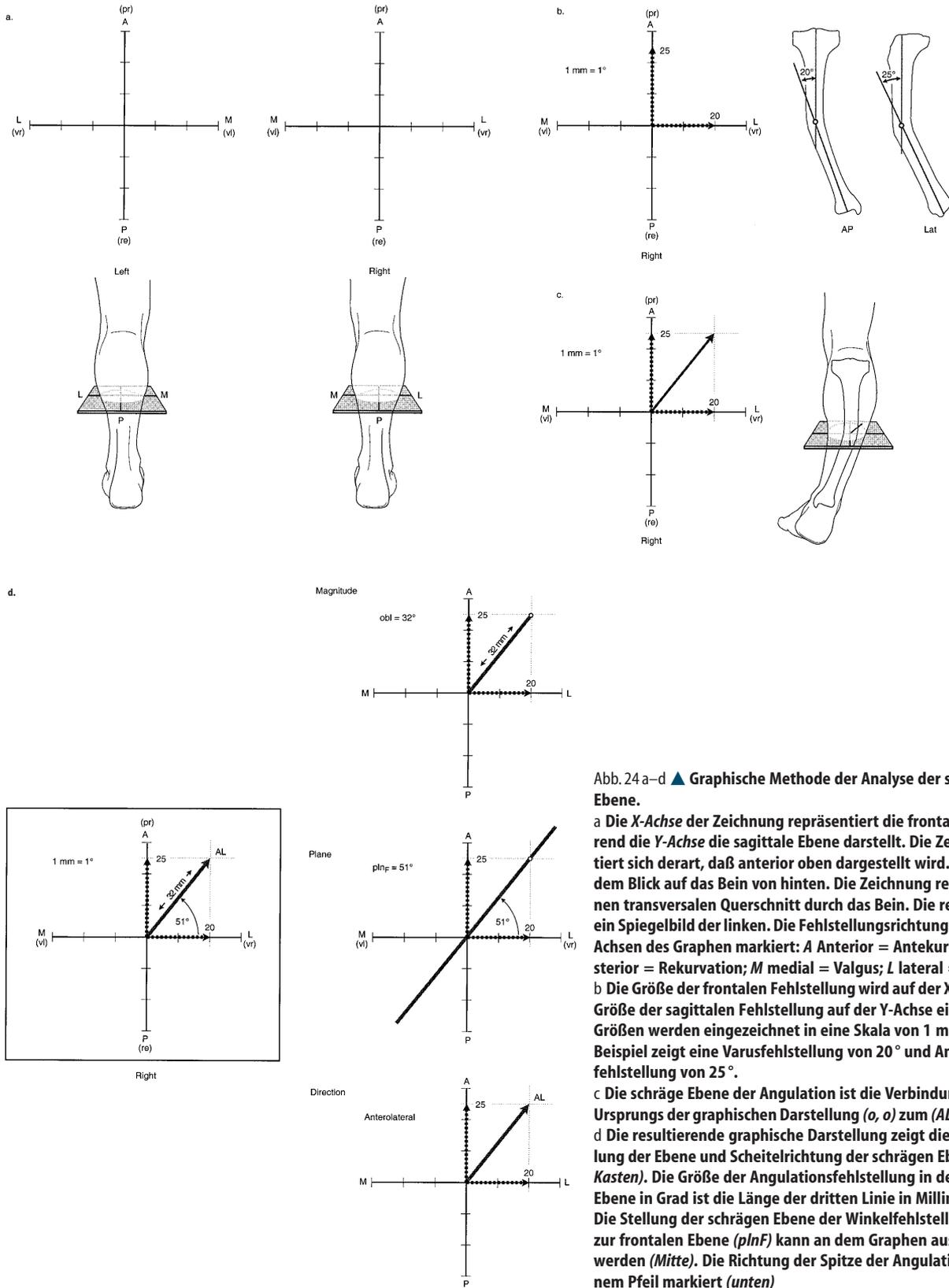


Abb. 24 a–d ▲ Graphische Methode der Analyse der schrägen Ebene.

a Die *X-Achse* der Zeichnung repräsentiert die frontale Ebene, während die *Y-Achse* die sagittale Ebene darstellt. Die Zeichnung orientiert sich derart, daß anterior oben dargestellt wird. Das entspricht dem Blick auf das Bein von hinten. Die Zeichnung repräsentiert einen transversalen Querschnitt durch das Bein. Die rechte Seite ist ein Spiegelbild der linken. Die Fehlstellungsrichtungen sind auf den Achsen des Graphen markiert: *A* Anterior = Antekurvations; *P* posterior = Rekurvations; *M* medial = Valgus; *L* lateral = Varus.

b Die Größe der frontalen Fehlstellung wird auf der *X-Achse* und die Größe der sagittalen Fehlstellung auf der *Y-Achse* eingetragen. Die Größen werden eingezeichnet in eine Skala von  $1\text{ mm} = 1^\circ$ . Das Beispiel zeigt eine Varusfehlstellung von  $20^\circ$  und Antekurvationsfehlstellung von  $25^\circ$ .

c Die schräge Ebene der Angulation ist die Verbindungslinie des Ursprungs der graphischen Darstellung (*o, o*) zum (*AL*) =  $(20^\circ, 25^\circ)$ .  
 d Die resultierende graphische Darstellung zeigt die Größe, Stellung der Ebene und Scheitelrichtung der schrägen Ebene auf (*linker Kasten*). Die Größe der Angulationsfehlstellung in der schrägen Ebene in Grad ist die Länge der dritten Linie in Millimetern (*oben*). Die Stellung der schrägen Ebene der Winkelfehlstellung bezüglich zur frontalen Ebene der Winkelfehlstellung kann an dem Graphen ausgemessen werden (*Mitte*). Die Richtung der Spitze der Angulation ist mit einem Pfeil markiert (*unten*)

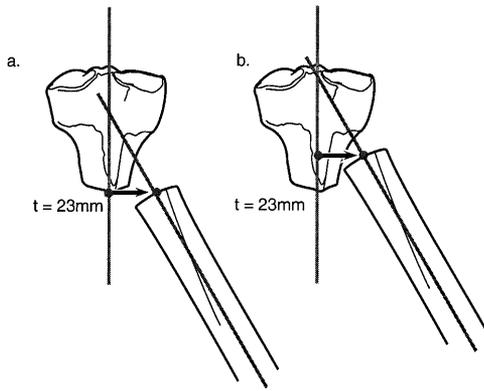


Abb. 25 a, b ◀ **Messung der Größe der Translation bei bestehender Angulationsfehlstellung.**

a Die Translation (t) wird gemessen als senkrechter Abstand der proximalen Achsachse zur distalen Achsachse in Höhe des proximalen Femurs des distalen Segments.

b Verkürzung der Extremität entlang der proximalen Achsachse verändert nicht den Wert der gemessenen Translation

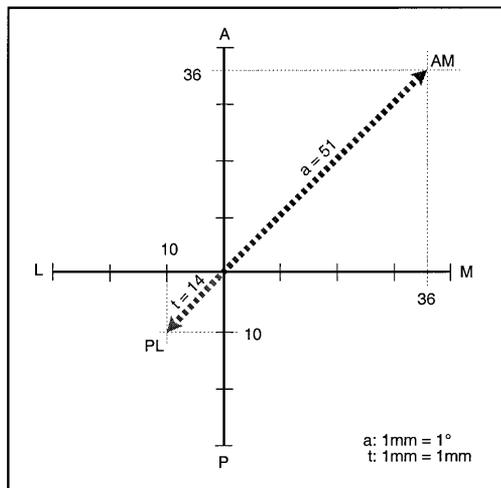
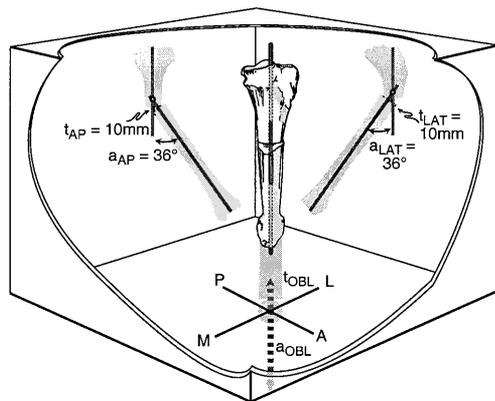


Abb. 26 ◀ **Die Angulations- und Translationsfehlstellungen sind beide in der gleichen schrägen Ebene. Angulation und Translation sind beide sowohl auf der a.-p.- als auch auf der seitlichen Röntgenaufnahme zu sehen. CORA ist in gleicher Höhe sowohl auf der a.-p.- als auch auf der seitlichen Aufnahme. Das indiziert, daß sie in der gleichen Ebene liegen. Die Abbildung stellt mittels der graphischen Methode die Ebene der Angulation und Translation dar. Beide sind in der gleichen Ebene, aber in unterschiedlichen Richtungen**

stellungen. Wenn z.B. die Größe einer fixierten Beugedeformität (fixed flexion deformity, FFD) des Kniegelenks gleich ist mit dem Betrag einer Antekurvation des distalen Femurs oder der proximalen Tibia, wie mit dem PDFA oder dem PPTA gemessen, dann liegt der FFD eine Knochenfehlstellung und keine Kniebeugekontraktur zu Grunde. Wenn allerdings PDFA und PPTA normal sind, dann ist die Gelenkkontraktur Ursache der FFD. Gelenkkontrakturen

sollten nicht durch Knochenkorrekturosteotomien und Knochenfehlstellungen sollten nicht durch Weichteileingriffe korrigiert werden (Abb. 23). Ohne Malorientation-Test kann zwischen diesen Ursachen nicht genau unterschieden werden. Ebenso ist der Malorientation-Test in der sagittalen Ebene nützlich, um bei einer Kniegelenküberstreckung zu bestimmen, ob eine Kniegelenklaxizität oder eine knöcherner Deformität zugrunde liegt.

Die wahre Ebene der Angulation ist häufig nicht in der frontalen oder sagittalen Ebene. Eine Angulation, die in beiden, sowohl in der frontalen wie in der sagittalen Ebene auftritt, ist eine Angulation in schräger Ebene (oblique plane angulation). Die wahre Ebene dieser Angulation kann mit einer trigonometrischen Formel berechnet werden oder annähernd mit einer einfachen Graphik erfolgen. Zeichne die Angulation der frontalen Ebene auf die X-Achse und die Angulation der sagittalen Ebene auf die Y-Achse, so daß 1 mm 1° beträgt. Die Länge der Linie zu dem X-Y-Punkt ist die Größe der Deformität in der schrägen Ebene und der Winkel zwischen der X-Achse zu dieser Linie ist die Stellung der schrägen Ebene zur frontalen Ebene. Die Richtung dieser Linie mit einem Pfeil zum X-Y-Punkt ist die Richtung des Apex der Angulation in der schrägen Ebene (z. B. anteromedial gegenüber posterolateral kann 2 verschiedene Richtungen in der gleichen Ebene sein) (Abb. 24).

Eine Translationsdeformität kann ebenso in der anatomischen wie in der schrägen Ebene vorliegen. Die graphische Methode kann in gleicher Weise verwendet werden, indem der Betrag der gemessenen Translation, die auf den a.-p.- und seitlichen Röntgenaufnahmen gemessen wurde, aufgetragen wird (1 mm Translation entspricht 1 mm in der graphischen Darstellung).

Translationsfehlstellungen gehen häufig mit Angulationsfehlstellungen nach Frakturen des Femurs oder der Tibia einher. Die Translation kann hierbei vermessen werden als senkrechter Abstand vom Ende des proximalen Fragments zum distalen Fragment (Abb. 25). Solange die Translation in gleicher Höhe auf a.-p.- und seitlichen Röntgenbildern gemessen wird, bleibt die Analyse der schrägen Ebene gültig. Die Stellung der Ebene der Translation kann verglichen werden mit der Ebene der Angulation. Wenn Angulation und Translation in der selben Ebene liegen, dann liegt auch CORA in der gleichen Höhe, sowohl in der a.-p.- als auch in der seitlichen Aufnahme (Abb. 26). Öffnende und zuklappende Keilosteotomie in Höhe von CORA korrigiert dann beides, sowohl Angulation wie auch Translation. Wird alternativ die Osteotomie in Höhe der originären Fraktur durchgeführt, so benötigen beide Knochen-

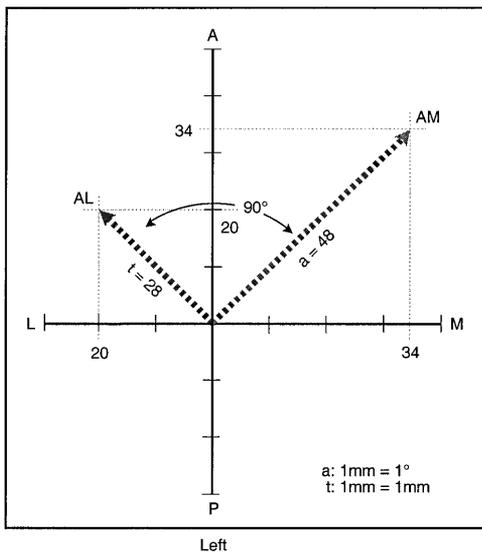
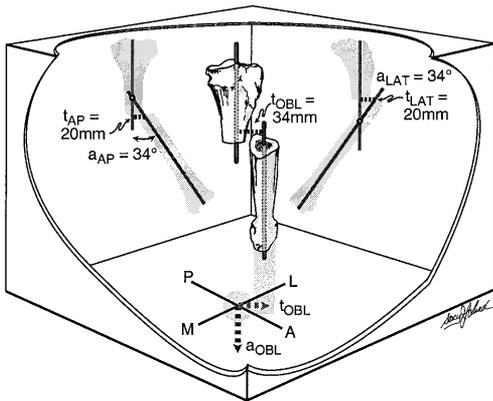


Abb.27 ◀ **Angulation und Translation sind in unterschiedlichen schrägen Ebenen. Sowohl die a.-p.- als auch seitliche Aufnahme haben eine ähnliche Angulation und Translation wie in Abb. 26. Der Unterschied dieser Aufnahme ist die anteriore gegenüber der posterioren Translation auf der seitlichen Aufnahme. CORA ist proximal der Fraktur auf dem a.-p.-Bild und distal auf dem Seitbild. CORA in verschiedenen Höhen ist das kennzeichnende Merkmal, daß Angulation und Translation sich in unterschiedlichen Ebenen befinden. Die graphische Darstellung zeigt, daß die Ebenen der Angulation und Translation 90° voneinander entfernt liegen (Abkürzungen s. Abb. 24)**

mente sowohl eine Angulation als auch eine Translation, um eine volle Wiederherstellung der Achsen zu erzielen. Die häufigste posttraumatische Deformität ist Angulation und Translation in unterschiedlichen Ebenen (Abb. 27).

Angulation und Translation können nicht alleine durch Angulation korrigiert werden, da sich CORA in einer unterschiedlichen Höhe in der frontalen bzw. sagittalen Ebene befindet. Die Korrektur der Angulation allein führt zu einer verbleibenden Translation und umgekehrt. Wenn die Translationsdeformität akzeptabel ist, kann allein durch Angulation korrigiert werden. Alternativ kann an der Osteotomiestelle anguliert und in einer unterschiedlichen Ebene transliert werden. Eine Alternative besteht in der Durchführung zweier Osteotomien. Jeweils eine in Höhe des CORA mit Angulation (und keine Translation), in jeder Höhe in 2 unterschiedlichen Ebenen.

Angulations- und Rotationsfehlstellungen können aufgelöst werden in eine einzelne Achse der Korrektur für Angulation und Rotation (Abb. 28). Da die Achse der Angulation in der transversen (horizontalen) Ebene und die Achse der Translation senkrecht (vertikal) zur transversen Ebene liegt, ist die Achse von Angulation und Rotation zur transversen Ebene geneigt. Je größer das Ausmaß der Rotation bezüglich zur Angulation, desto vertikaler ist die Achse der Korrektur geneigt. Je größer das Ausmaß der Angulation bezüglich zur Rotation, desto geringer vertikal ist die Achse in bezug zur transversen Ebene geneigt. Eine Osteotomie senkrecht zur geneigten Achse der Korrektur wird gleichzeitig die Angulation und auch die Rotation bei Beibehaltung des Knochenkontaktes korrigieren (Abb. 29). Während dieses Prinzip gültig ist und auch erfolgreich angewendet wird, ist es gewöhnlich einfacher, eine öffnende oder zuklappende Keilosteotomie mit Rotation als separates Manöver durchzuführen.

Zusammenfassend hat die Planung von Deformitätenkorrekturen ihre Grundlage in Basisprinzipien. Diese Prinzipien sind unabhängig von der Art der Fixation oder der verwendeten Osteotomie. Das bessere Verstehen dieser Prinzipien sollte zu weniger Fehlern und größerer Genauigkeit in der Deformitätenkorrektur führen.

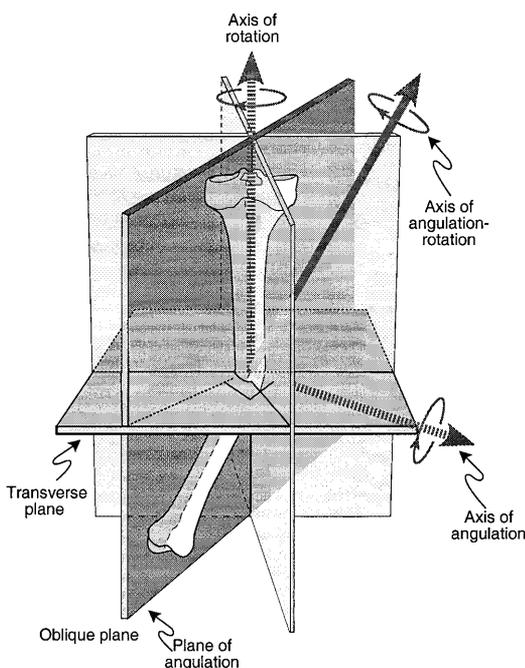


Abb. 28 ◀ **Die Achse der Angulationsfehlstellung ist in der transversen Ebene. Die Achse der Rotationsdeformität ist vertikal (axial); z. B. senkrecht zur transversen Ebene. Die Achsen von Angulation und Rotation können zu einer einzelnen Achse mit longitudinal geneigter Stellung zusammengefügt werden**

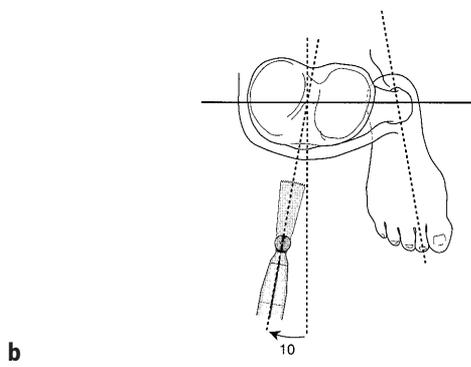
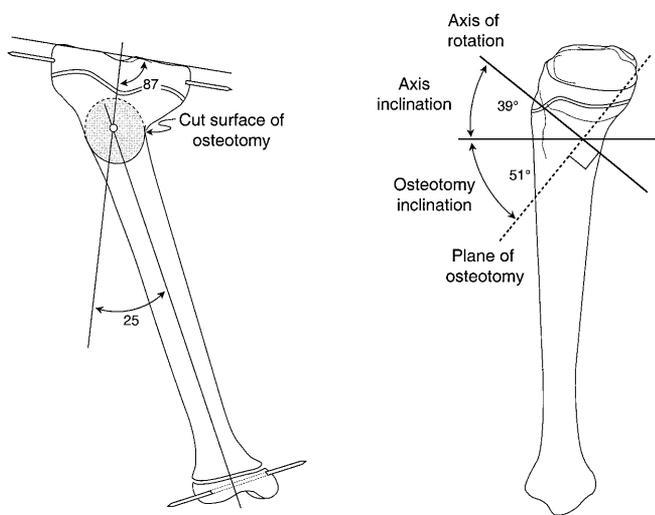
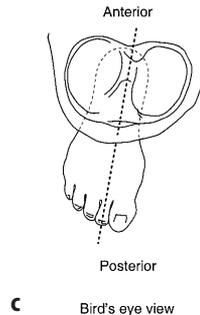
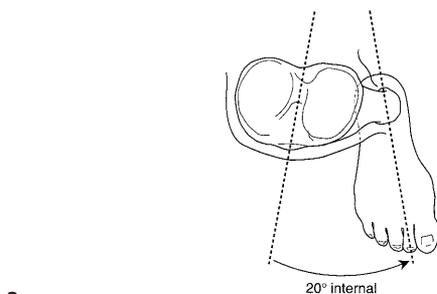
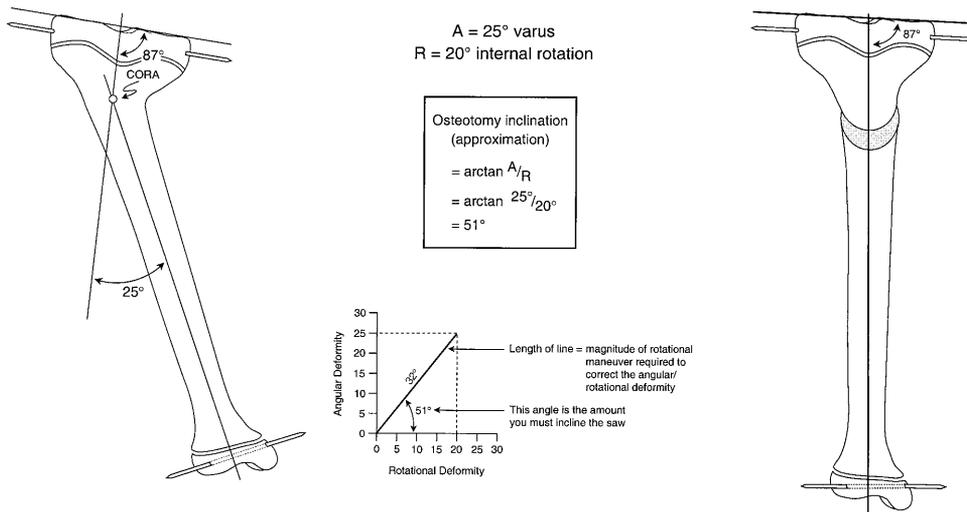


Abb. 29 ▲ **a** Methode nach Herzenberg: Rechte Tibia vara mit 25° Varus und 20° tibiale Innenrotationsfehlstellung. (Die Zahnstocher simulieren die Knie- und Sprunggelenkachse, die 20° voneinander liegen). Wir können die Achse des einzelnen Rotationswinkelkorrekturschnitts oder die aktuelle Ebene der Osteotomie berechnen (die immer senkrecht zu der anderen steht). Die dargestellte Formel zeigt Näherungswerte. Die graphische Methode ist sehr einfach, da sie keine trigonometrischen Berechnungen erfordert. In diesem Fall ist der Winkel der geneigten Osteotomie ungefähr 51° bezüglich der Horizontalen. Die „Länge“ der Linie (32°) ist der Betrag der Rotation, die der Knochen gedreht werden muß.

**b** Die geneigte Osteotomie zeigt einen 51° Winkel zur Horizontalen und die geneigte Achse, um die diese Osteotomie rotiert, ist senkrecht dazu oder 39° geneigt zur Horizontalen. Der Blick von oben stellt die initiale Ausrichtung dar. In diesem Fall startet der Schnitt senkrecht zum proximalen Tibiassegment und wird dann in der transversalen Ebene um 10° gedreht. Anschließend wird die Säge 51° nach unten gewinkelt.

**c** Nach Komplettierung der Osteotomie erfolgt die Rotation um die Achse (in diesem Fall 32°, wie durch die graphische Methode vorherbestimmt), die Tibia ist nun in allen Ebenen korrigiert. Die 25° Fehlstellung in frontaler Ebene und 20° Innenrotationsfehlstellung sind behoben

## Literatur

1. Chao EYS, Neluheni EVD, Hsu RWW, Paley D (1994) **Biomechanics of malalignment.** Orthop Clin North Am 25: 379–386
2. Cooke TRV, Li J, Scudmore RA (1994) **Radio-graphic assessment of boney contribution of knee deformity.** Orthop Clin North Am 25: 387–393
3. Hsu RWW, Hemeny S, Conventry MB, Chao EYS (1990) **Normal axial alignment of de lower extremities and load bearing distrubtion at the knee.** Clin Orthop 255: 215
4. Krackow KA (1983) **Approaches to planning lower extremity alignment for total knee arthroplasty about the knee.** Adv Orthop Surg 7: 69
5. Moreland JA, Bassett LW, Hankaer GJ (1987) **Radiographic analysis of the axial alignment of the lower extremity.** J Bone Joint Surg Am 69: 745
6. Paley D, Tetsworth KT (1991) **Percutaneous osteotomies. Osteotomie and Gigli saw techniques.** Orthop Clin North Am 22: 613–624
7. Paley D, Tetsworth KT (1992) **Preoperative planning of uniapical angular deformities.** Clin Orthop 280: 48–64
8. Paley D, Tetsworth KT (1992) **Preoperative planning of multiapical angular deformities.** Clin Orthop 280: 65–71
9. Paley D (1993) **Principles of deformity correction.** In: Chapman (ed) Operative orthopedics. Philadelphia, Lippincott, p 61
10. Paley D, Bhatnagar J, Herzenberg JE, Bhava A (1994) **New procedures for tightening knee collateral ligaments in conjunction with knee realignment osteotomy.** Orthop Clin North Am 25: 533–556
11. Paley D, Herzenberg JE, Tetsworth KT, McKie, Bhava A (1994) **Deformity planning for frontal an sagittal plane corrective osteotomies.** Orthop Clin North Am 25: 425–466
12. Paley D, Maar DC, Herzenberg JE (1994) **New concepts in high tibial osteotomy for medial compartment osteoarthritis.** Orthop Clin North Am 25: 483–498
13. Siffert RS (1982) **Intra-epiphyseal osteotomy for progressiva tibia vara. Case report an rationale of management.** J Pediatr Orthop 2: 81–85
14. Tetsworth KT, Paley D (1994) **Accuracy of correction of complex lower extremity deformities by the lisarov method.** Clin Orthop 310: 102–110

## Glossar

### Prinzipien der kniegelenknahen Deformitätenkorrektur

aADTA	(80°)	anatomical anterior distal tibial angle	anatomischer ventraler distaler Tibiawinkel
aLDFA	(81°)	anatomical lateral distal femoral angle	anatomischer lateraler distaler Femurwinkel
aPDFA	(83°)	anatomical posterior distal femoral angle	anatomischer distaler dorsaler Femurwinkel
APEX		apex	Scheitelpunkt
aPPTA	(81°)	anatomical posterior proximal tibial angle	anatomischer dorsaler proximaler Tibiawinkel
CORA		center of rotation of angulation	Ort des Scheitelpunktes der Angulation
JLCA	(0°)	joint line convergence angle	konvergierender Gelenkwinkel
LDTA	(89°)	lateral distal tibial angle	lateraler distaler Tibiawinkel
LPFA	(90°)	lateral proximal femoral angle	lateraler proximaler Femurwinkel
MAD		mechanical axis deviation	Entfernung vom Zentrum des Kniegelenkes zur mechanischen Achslinie
MAT		malalignment test	globaler mechanischer Fehlstellungstest
mLDFA	(88°)	mechanical lateral distal femoral angle	mechanischer lateraler distaler Femurwinkel
MNSA	(130°)	medial neck shaft angle	medialer Kopfhalswinkel (CCD-Winkel)
MPFA	(84°)	medial proximal femoral angle	medialer proximaler Femurwinkel
MPTA	(87°)	medial proximal tibial angle	medialer proximaler Tibiawinkel
focal dome		focal dome osteotomy	bogenförmige Osteotomie
ACA		axis of correction of angulation	Korrekturachse der Angulation
AMA		anatomical-mechanical angle	Winkel zwischen anatomischer und mechanischer Achse
JCD		joint center distance	Abstand der mechanischen Achse zum Kniezentrum
MOT		malorientation test	globaler anatomischer Fehlstellungstest
aJCD		anatomical joint center distance	anatomischer Gelenkzentrumabstand
aJED		anterior joint edge distance	anatomischer vorderer Gelenkeckabstand
JLW		joint line width	Gelenkbreite
FFD		fixed flexion contracture	Beugekontraktur