

Planung und Simulation

Komplexe Umstellungsosteotomien bei digitaler Radiographie der unteren Extremitäten

Korrekturosteotomien an der unteren Extremität sind in der Regel Wahleingriffe, mit dem Ziel, ein anatomisches Realignement der mechanischen Achsen und Winkel zu erreichen. Eine Wiederherstellung physiologischer biomechanischer Gelenkbelastung verhindert die Ausbildung oder reduziert die Dynamik der Arthrose. Operationsverfahren mit hohem präventivem Anspruch bedürfen einer sorgfältigen präoperativen Planung und Simulation sowie einer exakten Technik zur operativen Realisierung. Hierzu ist die Erstellung eines Korrekturplanes und einer Korrekturzeichnung zu fordern.

Mit zunehmender Verbreitung der digitalen Radiographie verliert der Operateur in vielen Fällen seine Planungsgrundlage, die standardisierte Ganzbeinaufnahme. Papiausdrucke der digitalen Radiographie sind in der Regel qualitativ zur primären Planung ungeeignet und eine Analogisierung auf Röntgenfilm als Routineverfahren umständlich und kostspielig. Eine digitale Planungssoftware mit allen Möglichkeiten der Korrekturplanung und Achssimulation ist erforderlich, um dem Qualitätsanspruch einer Umstellungsosteotomie der Extremitäten gerecht zu werden. Hierzu wurde 1997 das vom Gelenkzentrum Wiesbaden mitgestaltete PC-basierte Planungsprogramm Osteotomiemodul II entwickelt und kontinuierlich verbessert sowie den aktuellen Bedürfnissen der Operateure und den gängigen Betriebs-/PACS-Systemen angepasst. Das Osteotomiemodul II ist ein für den Bereich orthopädische Chirurgie und Achskorrektur optimiertes CAD System. Als Planungsgrundlage dient die digitale standardisierte Ganzbein-Standaufnahme (GBS). Ein Bilddatenaustausch ist in alle aktuelle Bild- und DICOM-Formate als Import und Export ebenso möglich, wie die direkte Verknüpfung mit der elektronischen Patientenakte. Ein 1:1-Ausdruck der Planungszeichnung und



Prof. Dr. Bruno Gladbach,
Gelenkzentrum Wiesbaden



Dr. Etienne Heijens,
Gelenkzentrum Wiesbaden

Simulation kann intraoperativ zu Realisierung des Planungszieles erstellt werden. Der Zeitbedarf zur Planung und Simulation von komplexen Mehrfachosteotomien an einer Extremität wird durch das Osteotomiemodul II erheblich verkürzt. Integrierte Automatismen visualisieren unmittelbar die resultierenden Effekte, welche durch eine Verlagerung der Korrekturachse (Axis of Correction of Angulation, ACA) entstehen können. Hierdurch kann auch bei komplexen Korrekturen schnell die individuell bestmögliche Osteotomie-lage, mit Berücksichtigung der biomechanischen Veränderungen der Achsverläufe und Gelenkwinkel an Hüfte, Knie und OSG ermittelt werden. Im Hinblick auf die Simulationsvielfalt, bei gleichzeitiger Zeitersparnis sowie den komfortablen Dokumentations- und Archivierungsmöglichkeiten elektronischer Planungszeichnungen, ist das Osteotomiemodul II der herkömmlichen Zeichenplanung überlegen und für die elektive, präventive orthopädische Chirurgie der Korrekturosteotomien sehr zu empfehlen.

Vorweg

Eine Fehlstellungsanalyse zur Planung von Korrekturosteotomien muss alle qualitativen Fehlstellungs-komponenten erfassen und quantifizieren. Als Einzelkomponenten der Fehlstellung können Angulations-, Translations-, und Torsionsdeformitäten isoliert oder in Kombination vorliegen. Eine Extremitätenverkürzung, -über-

länge wird als longitudinale Deformität betrachtet. Die Planung von Korrekturosteotomien an der unteren Extremität muss somit alle diese Einzelkomponenten der Fehlstellung berücksichtigen. Zur strukturierten Fehlstellungsanalyse hat sich der Malalignment-Test von Dror Paley als Standard durchgesetzt. Der Malalignment-Test analysiert die Lagebeziehungen der Gelenkflächen einer Extremität und die Lage der Belastungszentren der Gelenkflächen zueinander. Bei einem normalen Bein liegen die Belastungszentren der Gelenkflächen in der frontalen Ebene linear auf einer Verbindungslinie zwischen Hüftkopffzentrum und Sprunggelenksmitte. Die distale Gelenkfläche des Femur bildet zur mechanischen Belastungsachse einen Winkel von 86°-89° und korrespondierend beträgt der mediale proximale Winkel der Tibiagelenkfläche zur proximalen mechanischen Achse der Tibia ebenfalls 86°-89°.

Angulationsfehlstellungen werden durch den Schnittpunkt der jeweiligen mechanischen Gelenkbelastungsachsen ermittelt und der Schnittpunkt der Achsen wird als Zentrum der Deformität bzw. im weiteren als neutrales „Center of Rotation of Angulation“ (n-CORA) bezeichnet. Bei manchen Fehlstellungen lässt sich kein n-CORA ermitteln, weil die gelenkbezogenen Belastungsachsen einen parallelen Verlauf zeigen oder das n-CORA proximal oder distal außerhalb des Skelettabschnittes liegt. Solche Fehlstellungen können jedoch ebenso exakt definiert

und quantifiziert werden. Die herkömmliche Methode der Deformitätenanalyse und Korrekturplanung erfolgt durch Abzeichnen der Knochenumrisse mit anschließender Achsanalyse auf der Papierzeichnung. Zur Simulation der geplanten Osteotomie, wird die Zeichnung zerschnitten und in Korrekturstellung zusammengefügt. Ergeben sich hierbei notwendige Änderungen oder unerwartete oder unerwünschte Ergebnisse, ist eine komplette Neuzeichnung erforderlich. Je nach Art der Fehlstellung, ist diese Planungsstrategie hochgradig zeintensiv. Mit zunehmender Verbreitung der digitalen Radiographie, ist diese „klassische“ Korrekturplanung kaum noch möglich, da die Röntgenbilder nur auf Bildschirmen zu betrachten sind. Es besteht somit eine große Notwendigkeit, digitale Planungssoftware bereit zu stellen, die den Operateur wieder „handlungsfähig“ macht, ohne ihn in seiner medizinischen Entscheidungsfindung einzuzengen. Hierzu verwendet das Gelenkzentrum Wiesbaden, seit 1996, in der Klinik verschiedene Planungssysteme auf Personal- Computern. Das System wurde erstmals 2001 vorgestellt und kontinuierlich verbessert sowie hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit aktualisiert. Die jetzt vorliegende Softwarelösung integriert die moderne Analytik des Malalignment der unteren Extremität und erlaubt Achskorrekturen und Simulationen unter Berücksichtigung der „klassischen“ Korrekturqualitäten ad angulum, ad translatum und ad longitudinem. Ebenso sind Korrektursimulationen mit nachfolgender Verlängerung über Distraktionsmagnägel planbar.

Material und Methode

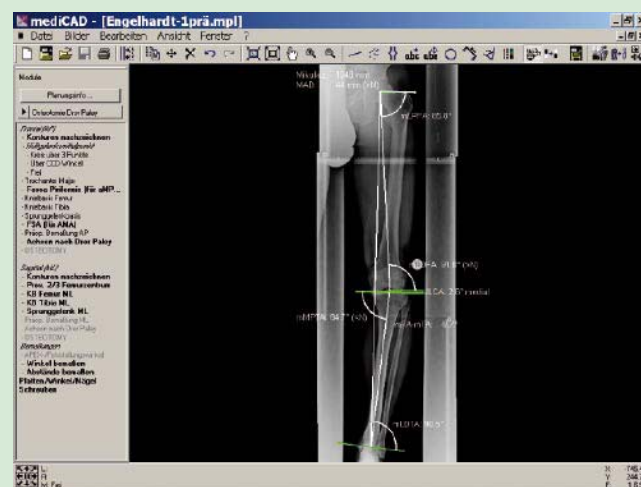
Grundlage der Achsanalyse an der unteren Extremität, ist die Ganzbeinstandaufnahme (GBS) in standardisierter Form mit einem Film/Detektor Focusabstand von 3 m. Die Erst- und die Abschlussaufnahme nach Korrektur sollte aus forensischen Gründen beide Beine

auf einem Film/Bild darstellen. Nur so sind Seitenvergleichende Winkel- und Längenmaße beweisend dokumentiert. Die GBS erfolgt im anterior-posterior Strahlengang mit Knie in frontaler Ebene. Als Referenz dient die Patella, welche sich exakt zentriert auf die distalen Femurkondylen abbilden muss. Knie und Hüfte befinden sich hierbei in neutraler Extension. Eine Ein- oder Auswärtsdrehung des Fußes wird registriert, aber zur Aufnahme nicht korrigiert. Des Weiteren sind seitliche Aufnahmen vom Femur, mit Hüfte und Knie sowie Unterschenkel mit Knie und oberem Sprunggelenk, auf einem Film erforderlich. Ergeben sich in der sagittalen Ebene ebenfalls pathologische Achsverhältnisse, müssen zusätzliche Aufnahmen in schräger Ebene erfolgen. Die Projektion dieser Ebene kann grafisch oder rechnerisch ermittelt werden. Die Planung der Korrekturosteotomie erfolgt in der Ebene der Fehlstellung. Im Softwarerelease vom Mai 2000, ist der Algorhythmus zur Bestimmung und Quantifikation der wahren Fehlstellungsebene bereits integriert worden, und im Update 2007 konnte die Simulation von Achskorrekturen und Verlängerung über Nagelsysteme eingebunden werden. Die verwendete Hardware besteht aus einem herkömmlichen PC mit Pentium III Prozessor mit Integration in das PACS-System Stark sowie Anbindung an die Praxissoftware Medisar. Das digitale Radiographiesystem besteht aus Speicherfolien, deren spezielle Kassetten für die GBS in einem Wandstativ verankert werden. Das Osteotomiemodul II der Firma Hectec stellt die eigentliche Software zur Achsanalyse und Planung der Korrekturosteotomien dar. Es handelt sich hierbei um ein CAD basiertes und auf Menuesteuerung ausgelegtes Programm auf Windows Oberfläche (XP, NT, Vista). Die Prinzipien der modernen Achsanalyse und Korrekturplanung – unter Berücksichtigung der Sekundäreffekte bei Drehpunktverschiebung – sowie die Möglichkeit zur Verlagerung der Osteotomiehöhe, ist vollständig in-

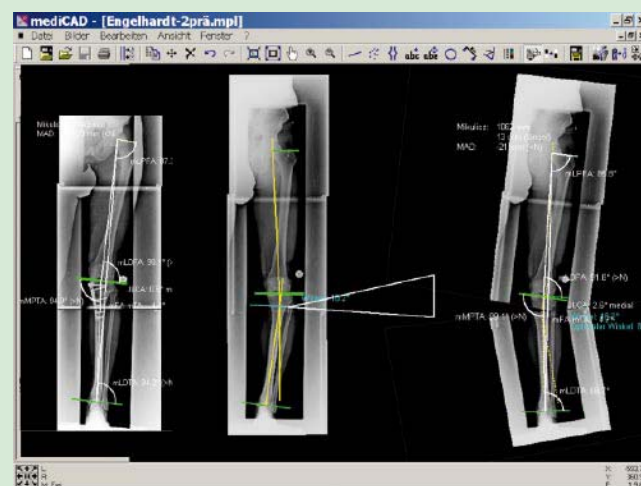
Anwendungsbeispiel 1

Varusgonarthrose mit bevorzugt tibialen Masseverlust und einem mechanischen proximalen Tibiawinkel von 85°, lateralem distalem Femurwinkel von 92° und intraartikulärer Angulation der Gelenkflächen zueinander von 2,5°. Die mechanische Achse des Beines (Mikulicz-Linie) verläuft an der medialen Kante des Tibiaplateaus und ist 44 mm aus der Kniebasis dezentriert.

Geplant und simuliert ist eine Überkorrektur der mechanischen Belastungsachse des Beines an den Übergang des tuberculum intercondylare laterale in die Gelenkflächenhorizontale. Entsprechend des Fujisawa-Points 3. Im gleichen Bild ist rechts die Korrektursimulation mit postoperativer Achsanalyse zu erkennen. Links ist die korrekte Ausführung der Korrekturosteotomie mit opening wedge Osteotomie und Winkelstabiler Plattenosteosynthese abgebildet. Die mechanische Belastungsachse wurde entsprechend Fujisawa-Point 3 20 mm lateral der Kniegelenkmitte platziert.



Varusgonarthrose mit bevorzugt tibialen Masseverlust



Simulierte Überkorrektur der mechanischen Belastungsachse des Beines

tegiert. Grundlage hierbei ist, dass eine Angulationsfehlstellung nur dann geometrisch korrekt korrigiert wird, wenn die Fehlstellung um n-CORA als Schnittpunkt der mechanischen Achsen ad angulum korrigiert wird. Eine Verlagerung der

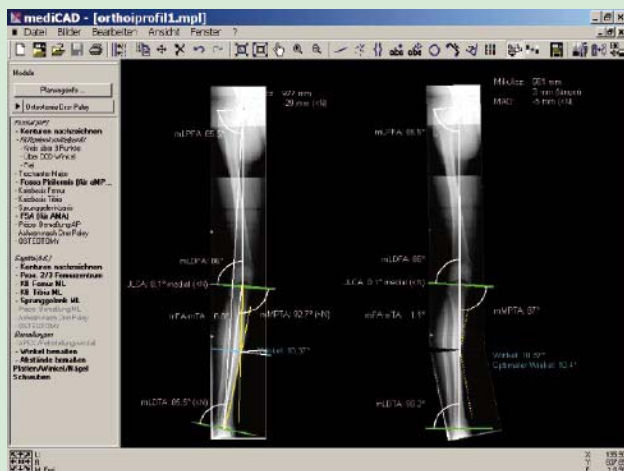
Axis of Correction of Angulation (ACA) aus n-CORA heraus geht immer mit sekundären Fehlern ad longitudinem und/oder ad latum einher.

Seit der Einführung des Osteotomiemoduls II im April 1999 wur-

Anwendungsbeispiel 2

Diaphysäre Tibia valga, Doppelosteotomie, Osteosynthese durch Marknagelung

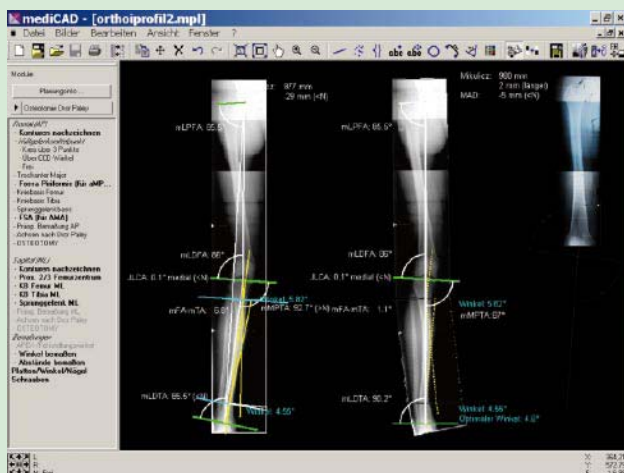
Wenn bei einer Deformitätenanalyse der Schnittpunkt der anatomischen Achse außerhalb des Knochens ermittelt wird, empfiehlt sich eine Doppelosteotomie zur Korrektur der Deformität. Eine Einfachosteotomie würde in einem solchen Falle zwar ebenfalls zum biomechanisch korrekten Ergebnis führen, jedoch verbleibt ein deutlicher anatomischer Achsknick, der bei geringem Weichteilmantel, wie an der Tibia, kosmetisch auffällig sein kann. Auch aus Gründen der verzögerten Knochenheilung, sind Korrekturosteotomien auf diaphysärer Ebene zu vermeiden. Hier ist eine solche diaphysäre Valgusdeformität dargestellt. Die Mikuliczlinie ist nach lateral verlagert und die gelenkbezogene Achsanalyse zeigt eine 10° betragende diaphysäre Valgusdeformität der Tibia. Eine Korrektur auf der Höhe der Fehlstellung – entsprechend der nebenstehenden Simulation – würde zum einen mit dem anatomischen Gesamteindruck eines Achsknickes und zum anderen mit einer verzögerten Knochenheilung, verbunden sein.



Diaphysäre Tibia valga, Doppelosteotomie, Osteosynthese durch Marknagelung

Planung als Doppelosteotomie der Tibia

Hierbei wird die jeweilige Osteotomiehöhe nach anatomischen Gesichtspunkten möglichst metaphysär gewählt. Auf Höhe der Osteotomie wird eine Hilfslinie eingezeichnet, die jeweils die mechanische Achse des proximalen und des distalen Fragmentes schneidet. Der Schnittpunkt stellt dann jeweils ein neues CORA mit dem jeweiligen Korrekturwinkel auf diesem Osteotomieniveau dar. In diesem Falle musste in der proximalen und distalen Osteotomie 5° variiert werden. Diese Feineinstellung der Osteotomien wurde intraoperativ durch einen unilateralen Fixateur externe realisiert, der bis zur statischen Verriegelung des Unterschenkelnagels, in gleicher Sitzung, belassen wurde. Die postoperative GBS zeigt eine zentral verlaufende mechanische Achse mit korrektem Realignment.



Planung als Doppelosteotomie der Tibia

den bis zum Dezember 2007 400 Korrekturplanungen durchgeführt. In 60 Fällen handelte es sich um Deformitäten, die mehr als eine Osteotomie an Femur oder Tibia erforderten. In 70 Fällen war eine komplexe Korrekturplanung in schräger Ebene erforderlich. Zur Osteosynthese kam mit 200 Fällen überwiegend der Fixateur externe zur Anwendung. Winkelstabile Plattensysteme wurden in 120 Fällen eingesetzt, in 80 Fällen erfolgte Marknagelung. Das geplante Osteosyntheseverfahren wurde in der präoperativen Planung und Simulation entsprechend berücksichtigt.

Die Menüstruktur des Osteotomiemodul II

Alle hier dargestellten Menüpunkte erlauben die komplette Steuerung des Osteotomiemodul II. Die wichtigsten Funktionen sind im Schriftmenue links dargestellt. Jede Gelenklinie und mechanische Gelenkachse ist durch anatomische Landmarken und Verbindungslinien definiert. Diese Landmarken werden in der Menüstruktur direkt abgefragt und erlauben so einen strukturell standardisierten Aufbau der Achsbestimmungen von proximal nach distal. Erst, wenn am importierten Röntgenbild alle Gelenklinien und Achsen eingetragen sind, werden die hier noch grau (gesperrten) hinterlegten Funktionen der Analyse und Korrekturfunktionen freigegeben.

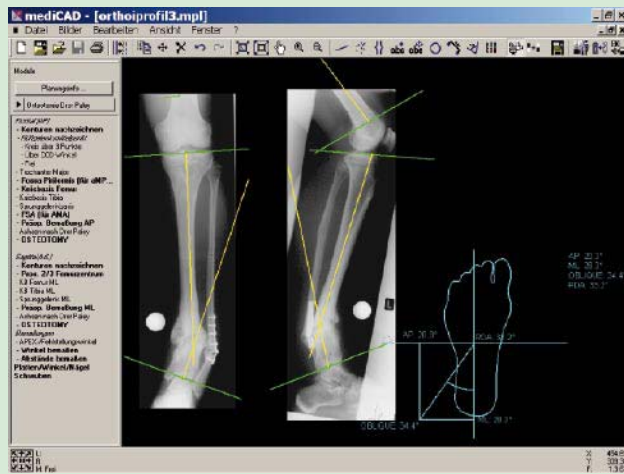
Diskussion

Operationen zur Begradigung von Deformitäten der unteren Extremität, sind im vorwiegend Wahleingriffe mit präventiver Zielsetzung. Eine verlagerte Mikulicz-Linie aus dem Kniegelenkszentrum, gilt als präarthrotische Deformität. Das Ziel achskorrigierender Operationen ist die Zentralisierung der mechanischen Achsen und Wiederherstellung physiologischer Gelenkwinkel. Durch moderne externe Fixateursysteme, ist eine gradgenaue Achskorrektur möglich geworden. Selbst bei

Korrekturen mit interner Osteosynthese, wie der fixateurassistierten Marknagelung, konnten wir in 11 von 12 Fällen eine postoperative Abweichung der mechanischen Achse im Vergleich zur präoperativen Zielvorgabe von unter 3° erreichen. Neben einer ausgefeilten Operationstechnik mit valider intraoperativer Kontrolle des Korrekturergebnisses, ist eine subtile präoperative Planung vor jedem achskorrigierenden Eingriff zu fordern. Prinzipiell kann hierfür eine exakte Planungszeichnung mit Achsanalyse und Korrektursimulation auf Folie ausreichend sein. Der zeitliche Aufwand solcher Planungszeichnungen, insbesondere bei komplexen und multiapikalen Fehlstellungen, ist jedoch nicht unerheblich. Aus diesem Grunde und zur einheitlichen standardisierten Dokumentation der Umstellungsplanungen und Simulationen, werden am Gelenkzentrum Wiesbaden seit 1996 verschiedene PC basierte Planungssysteme verwendet. Seit April 1999 wird hier ausschließlich das vorgestellte Osteotomiemodul II der Medi-CAD Software benutzt. Die hierin enthaltenen Automatismen beruhen auf dem gegenwärtigen wissenschaftlichen Stand der Achsanalyse und Korrekturplanung. Viele der PC-basierten Planungshilfen für Korrekturosteotomien benötigen als Grundlage eine Computertomographie mit 3d-Datensatz. Vorwiegend handelt es sich hierbei um Anwendungen aus der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. In der orthopädisch-rekonstruktiven Chirurgie finden PC basierte Planungshilfen vorwiegende Verwendung bei hüftgelenksnahen Osteotomien und der Endoprothetik. Auch hier werden ausschließlich computertomographische 3d-Datensätze verwendet. Die Notwendigkeit von dreidimensionalen Bilddaten ergibt sich – nach Erachten der Autoren – dort, wo komplexe anatomische Verhältnisse vorliegen, die in zweidimensionaler Röntgentechnik nur schwer korrekt darstellbar sind. Dies betrifft aus orthopädischer Sicht vor allem die acetabulären Korrekturo-

Anwendungsbeispiel 3

Fehlstellung in schräger Ebene, distale Tibia



Fehlstellung in schräger Ebene, distale Tibia

Apex bezeichnete Position, wird ebenfalls aus den Fehlstellungsdaten ap und seitlich automatisch berechnet und angezeigt. Des Weiteren ist es erforderlich zu wissen, zu welcher Bezugsebene (sagittal/frontal) der Apex um den angegebenen Betrag abweicht. Auch diese Information wird beschreibend in einem Datenfeld angegeben. Somit ergibt sich für das Anwendungsbeispiel folgende Beschreibung der Deformität:

- Fehlstellung ap: 20° Varus
- Fehlstellung ml (mediolateral): 28° Recurvatum
- Gesamtfehlstellung: 33°
- Der Apex der Fehlstellung liegt um 34° von hinten zur Außenseite des Beines gedreht.

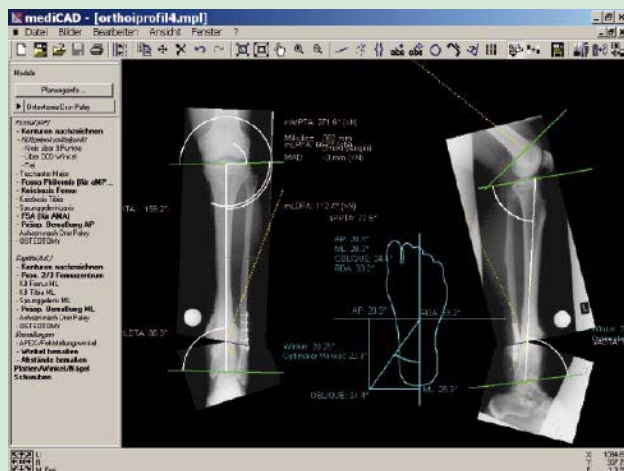
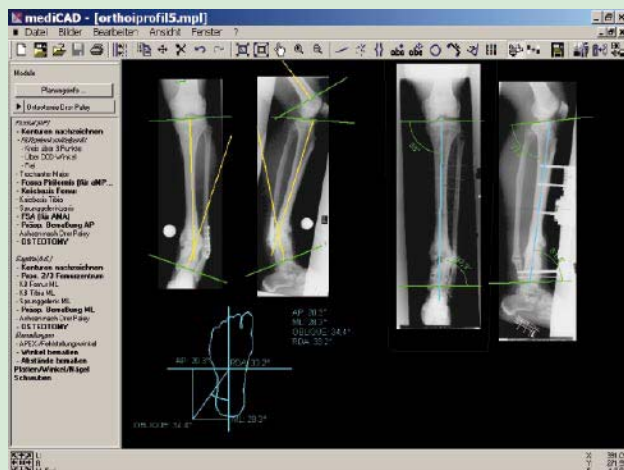


Abbildung der Gesamtfehlstellung in einer zusätzlichen Aufnahme



Progressive Pseudarthrosendistraktion in schräger Ebene ohne Osteotomie

Im Anwendungsbeispiel 3 ist eine distale Deformität der Tibia bei Pseudarthrose nach Fraktur dargestellt. Sowohl im anterior-posterioren Strahlengang als auch in seitlicher Projektion, lässt sich eine Angulationsfehlstellung analysieren. Durch die Verwendung der im Programm integrierten Normwinkel der sagittalen Ebene, lässt sich eine kombinierte Korrekturplanung und Simulation an den Standardebenen ap und seitlich durchführen. Hierbei wird automatisch der reelle Fehlstellungswinkel berechnet und das Gesamtausmaß der Fehlstellung angezeigt. Zur vollständigen Korrekturplanung ist jedoch nicht nur das Gesamtausmaß der Fehlstellung erforderlich, sondern auch die Lage des Fehlstellungswinkels im Raum. Diese mit

Mit diesen Angaben ist die Fehlstellung im Raum vollständig beschrieben – die Korrekturplanung erfolgt parallel an beiden Aufnahmen ap und seitlich. Alternativ kann eine zusätzliche Aufnahme erfolgen, die die errechnete Gesamtfehlstellung abbildet. Hierzu erfolgt der Strahlengang im rechten Winkel zur Ebene des Apex der Deformität. Eine Korrekturplanung an dieser Aufnahme kann jedoch nur die anatomischen Achsen berücksichtigen, da keine gelenkbezogenen Normwinkel in schräger Ebene existieren. Somit ist die Planung an der Aufnahme der Gesamtfehlstellung nur für diaphysäre Fehlstellungen mit ausreichender Länge des proximalen und distalen Fragmentes geeignet.

Bei Korrekturen mit externer Fixation ist die Planung ap und seitlich mit Berechnung der Apexlage und Gesamtfehlstellung ausreichend. Hierbei wird die Korrekturachse des Fixateurs im rechten Winkel zur Ebene des Apex der Fehlstellung platziert.

Die Korrektur kann progressiv oder akut erfolgen. In dem gezeigten Beispiel mit Pseudarthrosendistraktion in schräger Ebene ohne Osteotomie. Für weitergehende Hinweise in der Verwendung von unilateralen Fixateursystemen zur Deformitätenkorrektur wird auf entsprechende Literatur verwiesen.

steotomien des Hüftgelenkes. Bei der Rekonstruktion der mechanischen Achsen des Beines, ist dies in der Regel nicht erforderlich. Selbst bei Achsabweichungen in schräger Ebene, kann durch einfache trigonometrische Kalkulation und zweidimensionaler Röntgentechnik in aller Regel die wahre Fehlstellung ermittelt werden. Die Korrekturplanung und Simulation des Korrekturergebnisses, kann mit der vorgestellten Software auch in schräger Ebene exakt realisiert werden. Die Lage des Apex der Deformität in Bezug auf die frontale Ebene, wird ebenso quantifiziert angegeben, wie das Angulationsausmaß selbst. Außerdem geht in die Planungsanalyse der wichtige Faktor der Standbelastung der Extremität ein, da die GBS, im Gegensatz zur CT, im Stand ausgeführt wird. Hierdurch lassen sich ligamentäre Dysbalancen als Teilkomponenten der Gesamtfehlstellung ermitteln und in der operativen Planung entsprechend berücksichtigen. Das am Gelenkzentrum Wiesbaden verwendete Osteotomiemodul II hat seit der klinischen Einführung im April 1999 stets zuverlässig funktioniert. Der im Vergleich zur Handzeichnung erzielte Zeitgewinn ist spürbar. Durch die zentrale Archivierung auf Datenträgern, ist eine Steigerung der Dokumentations- und Archivierungsübersicht gegeben. Vergleiche von ähnlichen klinischen Fällen sind schnell und einfach möglich. Der bewusste Verzicht auf eine kostenintensive, dreidimensionale Computertomographie als Planungsgrundlage, lässt den Aufbau dieser Planungsstation kostengünstig, mit geringen infrastrukturellen Ansprüchen realisieren.

Literatur bei den Autoren.

- Kontakte:
Prof. Dr. Bruno Gladbach
Dr. Etienne Heijens
Gelenkzentrum Wiesbaden
Tel.: 0611/360170
Fax: 0611/3601717
Gladbach@Gelenkzentrum-Wiesbaden.de
www.gelenkzentrum-wiesbaden.de