

Orthopäde 2021 · 50:378–386
<https://doi.org/10.1007/s00132-021-04103-x>
 Angenommen: 12. März 2021
 Online publiziert: 12. April 2021
 © Der/die Autor(en) 2021



Florian B. Imhoff¹ · Sandro F. Fucentese¹ · Jörg Harrer² · Thomas Tischer³

¹ Orthopädie, Universitätsklinik Balgrist, Zürich, Schweiz

² Abteilung für Orthopädie und Unfallchirurgie, Helmut-G.-Walther-Klinikum, Lichtenfels, Deutschland

³ Sektion Sportorthopädie, Orthopädische Klinik und Poliklinik, Universitätsmedizin Rostock, Rostock, Deutschland

Einfluss von Achsdeformitäten und deren Korrektur auf die Arthroseentstehung und -progression

Die Gonarthrose des jungen Patienten stellt nach wie vor ein schwerwiegendes Problem dar. Die endoprothetische Versorgung ist aufgrund höherer Revisionsraten und eingeschränkter Funktion hier nur bedingt geeignet. Daher ist dem Gelenkerhalt höchste Aufmerksamkeit zu schenken. Die Beachtung der Beinachse und ggf. auch die Korrektur ist ein wichtiger Pfeiler der Therapie. Neben der Auswirkung der Beinachse auf die Gelenkbelastung kam in den letzten Jahren auch immer mehr die Bedeutung der Beinachse für die Gelenkstabilität in den Fokus. Das Ziel dieses Reviews ist es, einen Überblick über den Einfluss von kniegelenksnahen Achsdeformitäten und deren Korrektur auf die Gonarthroseentstehung und -progression zu geben.

Achsdeformitäten und deren Einfluss auf Arthrose

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Studien, die den grundsätzlichen Zusammenhang von frontaler Achsabweichung und späterer unikompartimenteller Gonarthrose aufzeigen. So waren in einer Untersuchung von über 5000 Knien bei bestehender radiologischer tibiofemorale Arthrose nur 18 % neutral, jedoch 82 % mit klinischer deutlicher Achsabweichung ausgerichtet. Zudem war der Faktor Übergewicht

wesentlich für das Vorhandensein (Inzidenz) einer Gonarthrose [1]. Eine weitere Studie um die Gruppe von Leesa Sharma (Chicago, USA) zeigte, dass Kniegelenke ohne Knorpelschäden infolge der chronischen Belastung durch Varusalignment ein hohes Risiko für einen späteren Knorpelverlust hatten. Nach statistischer Justierung an Alter, Geschlecht, Body-Mass-Index und lateraler Laxität hatten Varusknie eine 3,5fache erhöhte Wahrscheinlichkeit für die Entwicklung eines medialen Knorpelverlusts im Vergleich zu einem Knie ohne Varusdeformität [2]. In Bezug auf die Progression einer bestehenden unikompartimentellen Gonarthrose durch Varusalignment ist die Wahrscheinlichkeit bei einem Ausgangswert Kellgren-Lawrence (KL) Grad 2 innerhalb einer 18-monatigen Beobachtung um das 4fache erhöht; bei KL Grad 3 sogar um das 10fache [3]. Zudem wurde beschrieben, dass die Gruppe mit beidseits über 5° Achsabweichung (Varus oder Valgus) eine signifikante Verschlechterung der gemessenen Gelenksfunktion über den Beobachtungszeitraum aufzeigte [4]. Auch wenn das Durchschnittsalter in diesen Studien 64 Jahre (BMI 30,3 kg/m²) betrug und kein Bezug auf Vorverletzungen genommen wurde, so zeigt es zum einen die Grundlage der mechanischen Überlastung, und zum anderen, dass ein bereits (arthrotisch) verändertes Knie eine zunehmende Progression erfährt.

Bei jungen Patienten ist somit noch nicht die alleinige Achsdeviation ein Grund für die Gonarthrose, sondern vielmehr traumatische (z. B. ligamentäre Instabilitäten) oder iatrogene Veränderungen der fokalen Druckverteilung. In einer großen Follow-Up-Studie wurde festgestellt, dass die Hälfte der Knien, bei denen im jungen Erwachsenenalter eine Menishektomie durchgeführt wurde, 21 Jahre später radiologische Zeichen der (unikompartimentellen) Arthrose aufwiesen (gegenüber 7 % in Knien ohne Menishektomie) (Odds-Ratio für die Arthroseentwicklung: 14,0) [5]. Die Kombination einer Gelenksverletzung und einer Achsdeviation führt unweigerlich, je nach Ausmaß und Ko-

Abkürzungen

ΔCM	Unterschied zwischen medialer und lateraler Knorpelsituation
BMI	Body-Mass-Index
DFO	Distale femorale Osteotomie
HTO	Hohe tibiale Osteotomie
JLCA	„Joint-line conversion angle“
mLDFW	Mechanischer lateraler distaler Femurwinkel
MPTW	Medialer proximaler Tibiawinkel
PF	Patellofemorale
TT-TG	„Tibial tuberosity-trochlear groove“
VKB	Vorderes Kreuzband

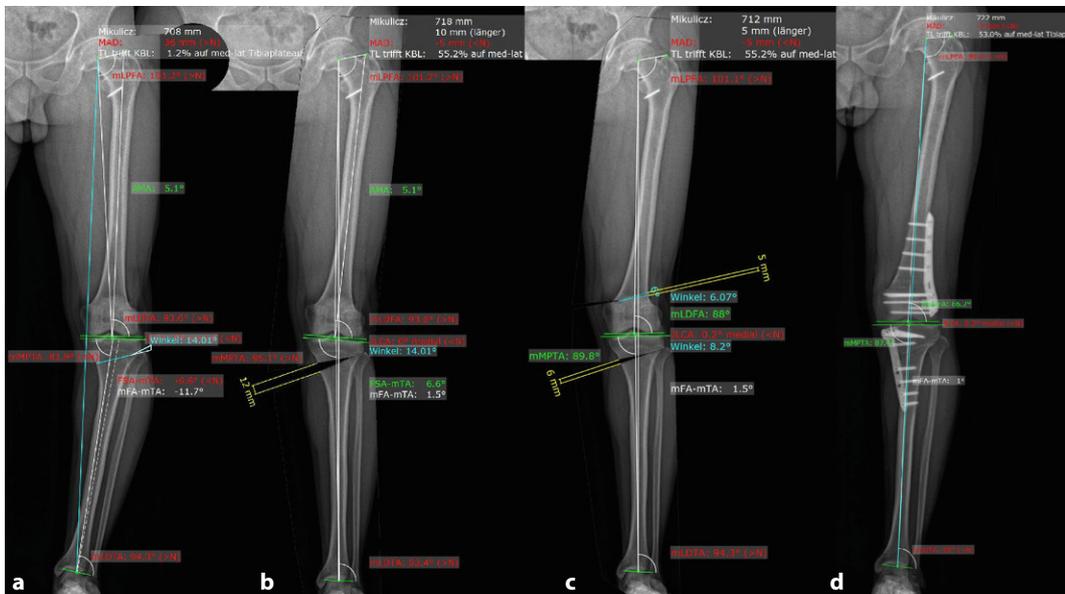


Abb. 1 ▲ 28-jähriger Patient mit symptomatischer medialer Kniegelenksüberlastung. **a** Varus = 12°, mechanischer lateraler distaler Femurwinkel (mLDFW) = 93,6°, medialer proximaler Tibiawinkel (MPTW) = 81,9°; **b** Simulation einer isolierten Korrektur tibial auf 55 % mediolaterale Belastung (1,5° Valgus) entspräche einem postoperativen MPTW von 95,1°; **c** Simulation einer femoralen und tibialen Korrektur als Doppelstockosteotomie (1. femoral lateral „closed-wedge“, 2. tibial medial „open-wedge“) mit physiologischen gelenksnahen Winkel; **d** postoperative Analyse mit 1° Valgus und normwertigen mLDFW und MPTW. (Mit freundl. Genehmigung, © Klinik für Orthopädie, Universitätsklinik Balgrist, Zürich, alle Rechte vorbehalten)

morbiditäten wie z. B. Adipositas, schon nach wenigen Jahren zur Entwicklung der Gonarthrose beim jungen Patienten.

Kniegelenksnahe Korrekturosteotomie

Aufgrund der oben dargestellten Ausführungen hat die mechanische Belastungsachse in der frontalen Ebene für die Diagnostik, Planung und Therapieausrichtung die entscheidende Bedeutung. Sie ist definiert als Verbindungslinie zwischen dem Zentrum des Hüftkopfes und dem Sprunggelenkszentrum. Der mechanische femorotibiale Winkel gibt vereinfacht die Gradzahl des mechanischen Varus/Valgus wieder und ist somit unabhängig von der Patientengröße ein geeigneter Vergleichsparameter.

Planung der knöchernen Korrektur

Kniegelenksnahe Osteotomien haben das primäre Ziel einen Teil des Gelenkes zu entlasten, um der Progression einer Arthrose entgegenzuwirken. Die Umverteilung der Last wird bei medialer oder lateraler Gelenksüberlastung im frontalen Ganzbeinröntgen bestimmt und

korrigiert. Auf Basis der mechanischen femorotibialen Achse, des mechanischen lateralen distalen Femurwinkels (mLDFW), des medialen proximalen Tibiawinkels (MPTW) und der Gelenklinienwinkel („joint-line conversion angle“ [JLCA]) wird eine Deformitätsanalyse dokumentiert [6]. Das Konzept, dass ein Varus immer tibial bedingt und ein Valgus femoral bedingt ist, ist heute klar verlassen [7]. Eine essenzielle präoperative Überlegung ist die postoperative Zielgröße der mechanischen Achse.

Schon 1974 empfahlen Insall et al. eine anatomische femorotibiale Achse von 5–10° Valgus als anzustrebende Zielachse einer kniegelenksnahen Valgisationsosteotomie, dies entspricht – je nach Anatomie – einer mechanischen Achse von ca. 1° Varus bis 4° Valgus [8]. Im Jahr 1979 beschrieben Fujisawa et al. jedoch die besten Ergebnisse nach valgusierender Umstellungsosteotomie, wenn die postoperative Traglinie bei 62 % des mediolateralen Tibiaplateaus („Fujisawa-Punkt“) lag, was einer mechanischen Achse von etwa 3° Valgus entspricht [9]. Methodisch bestehen bei beiden Arbeiten jedoch einige Schwächen.

In den letzten Jahren wurde zunehmend versucht, die Zielachse der Korrektur zu individualisieren: Jakob et al. beschrieb eine Anpassung der Zielachse je nach Restweite des medialen Gelenkspaltes im Röntgen-Ganzbein (bei 2/3 residuellem Knorpel wird auf 10–15 %, bei 1/3 auf 20–25 % und bei vollständigem Knorpelverlust auf 30–35 % geplant) [10]. Ein ähnliches Konzept wurde von Strecker et al. 2009 beschrieben, mit individueller Anpassung der geplanten Zielachse an die intraoperativ im Rahmen der simultanen Arthroskopie gefundenen Knorpelreserven (Unterschied zwischen medialer und lateraler Knorpelsituation als ΔCM): Angestrebt wurde die Verlagerung der Beinachse in die Mitte des lateralen Kompartiments (5° Valgus) bei $\Delta\text{CM} = \text{IV}^\circ$, auf den Fujisawa-Punkt (3,3° Valgus) bei $\Delta\text{CM} = \text{III}^\circ$ und auf die halbe Distanz zum Fujisawa-Punkt (1,7° Valgus) bei $\Delta\text{CM} = \text{II}^\circ$ [11].

Beide Konzepte bergen allerdings ein erhebliches Risiko der Überkorrektur! Wird bei einem quasi aufgebrauchten medialen Kompartiment sogar noch weiter als über den Fujisawa-Punkt korrigiert, kann durch das mediale Aufklappen des Gelenkspaltes bei noch relativ

verlängertem Innenband bei Vollbelastung zusätzlicher Valgus entstehen und somit können Beinachsen von 8° Valgus und mehr resultieren. Ebenso droht bei lateraler ligamentärer Instabilität (Überdehnung des Außenbandes mit aufgeklapptem lateralem Kompartiment) eine valgische Überkorrektur. Daher muss bei einem erhöhten Gelenkslinienwinkel ab etwa 3–4° (JLCA) grundsätzlich eine eventuell bestehende Bandinstabilität und damit eine potenzielle Überkorrektur durch die additiven Valgusmomente nach Überschreiten des Kippunktes von Varus zu Valgus berücksichtigt und in die Planung miteinbezogen werden. Feucht et al. schlugen 2014 ein weiteres Konzept einer individualisierten Zielachse vor, bei dem die drei Zielkorridore von je 5% je nach vorliegender Pathologie zwischen 50 und 65% (was ca. 0–3,5° Valgus entspricht) liegen [12].

In Bezug auf eine varisierende Korrektur bei Valgusdeformität gibt es sehr wenig Evidenz. Die angestrebte postoperative Achse wird bei alleiniger Valgusfehlstellung ohne Knorpelschäden mit einem Ziel von 0°, bei valgischer Arthrose etwas medial der medialen Eminentia intercondylaris angegeben (1–1,5°). Hier sind im Grundsatz ebenfalls Überkorrekturen (>3° Varus) wesentlich zu vermeiden und eventuell bestehende Bandinsuffizienzen analog zu beachten.

Einstellen der Gelenklinie

Besonderes Augenmerk gilt in den letzten Jahren zudem der Wahrung oder Herstellung einer weitgehend normalen Ausrichtung der Gelenklinien und -winkel des Kniegelenkes. Es gilt bei der Korrekturplanung die Normwerte der kniegeleknahen Winkel nach Paley [13] zu beachten und neu geschaffene Deformität (z. B. MPTW >93°) zu vermeiden.

Mehrere aktuelle Studien zeigen, dass die klinischen Ergebnisse („patient related outcome scores“) und das Überleben der Osteotomie (Endpunkt = Konversion zur Prothese) abhängig vom Gelenkswinkel (JLCA) sind. Durch eine isolierte Osteotomie an Tibia oder Femur kann eine übermäßige Schrägstellung der Gelenklinie entstehen. Eine zu schräge tibiale Gelenksfläche von über 95° MPTW führt

Orthopäde 2021 · 50:378–386 <https://doi.org/10.1007/s00132-021-04103-x>
© Der/die Autor(en) 2021

F. B. Imhoff · S. F. Fucentese · J. Harrer · T. Tischer

Einfluss von Achsdeformitäten und deren Korrektur auf die Arthroseentstehung und -progression

Zusammenfassung

Die Beachtung der Beinachse und die Möglichkeiten zur deren Korrektur stellen beim jungen Patienten mit Arthrose ein Grundpfeiler der Therapie dar. Die Kombination einer Gelenksverletzung und einer Achsdeviation führt unweigerlich, je nach Ausmaß und Komorbiditäten, schon nach wenigen Jahren zur fortschreitenden Gonarthrose. Neben der genauen Deformitätenanalyse zur Osteotomieplanung, gilt es, Normbereiche der entsprechenden Winkel zu kennen und eine Zielgröße zur Achskorrektur festzulegen. Aus dem Repertoire der verschiedenen kniegeleknahen Osteotomien sind dann die

Nebeneffekte in Bezug auf patellofemorales Maltracking, ligamentäres Balancing und die Beinlänge abzuschätzen. Gerade im Hinblick auf mögliche (und wahrscheinliche) Folgeoperationen beim jungen Patienten müssen neue knöcherne Deformitäten oder ligamentäre Insuffizienzen, welche potenziell bei Überkorrektur entstehen, unbedingt vermieden werden.

Schlüsselwörter

Kniegelenk · Bein · Bänder · Osteotomie · Gonarthrose

The influence of axial deformities and their correction on the development and progression of osteoarthritis

Abstract

A cornerstone in the treatment of osteoarthritis in young patients is the evaluation and correction of the leg axis. The combination of a joint injury (meniscus, cartilage, ligament) and an axis deviation inevitably, depending on its extent and the patient's comorbidities such as obesity, leads to progressive osteoarthritis of the knee after a few years. In addition to the precise deformity analysis for osteotomy planning, it is important to know the normal ranges of the corresponding angles and to define a target value for axis correction. Reflecting the repertoire of different osteotomy options around the knee

(open vs. closed, tibial vs. femoral, medial vs. lateral), the side effects in relation to patellofemoral maltracking, ligamentary balancing and leg length should then be assessed. Especially with regard to possible (and probable) prosthetic operations at some time in the future of young patients, new bony deformities or ligamentous insufficiencies, which potentially arise from overcorrection, must be avoided.

Keywords

Knee joint · Leg · Ligaments · Osteotomy · Osteoarthritis

zu erhöhten Scherkräften und schlechterer Druckverteilung [14–16]. Eine neue Studie zum mittelfristigen Outcome nach HTO konnte zudem zeigen, dass ein postoperativer Winkel des Tibiaplateaus zum Boden von über >4°, hinsichtlich klinischer Scores schlechter ist und dass sogar nachteilige Effekte ab einem Winkel von 6° bestehen [17]. In einer Analyse von über 300 Varusbeinen (mechanische Varusachse) konnte gezeigt werden, dass, wenn eine leichte tibiale Überkorrektur bis 95° akzeptiert wird, dennoch nur 57% mit einer isolierten HTO hätten korrigiert werden können, während 33% eine Doppelstockosteotomie bräuchten (Abb. 1; [18]).

Das Ziel der Umstellung beim jungen Patienten muss sein, die Gelenklinie in einem „physiologischen Aspekt“ zu halten. Die Doppelstockosteotomie bietet eine gute, wenn auch chirurgisch aufwändigere Möglichkeit, gerade (physiologische) Gelenklinien beizubehalten [19, 20]. Probleme hierbei sind einerseits die erhöhte chirurgische Schwierigkeit und die längere Operationszeit mit entsprechend erhöhten Komplikationsmöglichkeiten sowie andererseits die Mehrkosten. Allerdings ist eine femoral zuklappende Osteotomie früh belastbar und eine nur wenig öffnende tibiale Korrektur ebenfalls mit schnellerer Durchbauung und geringerem

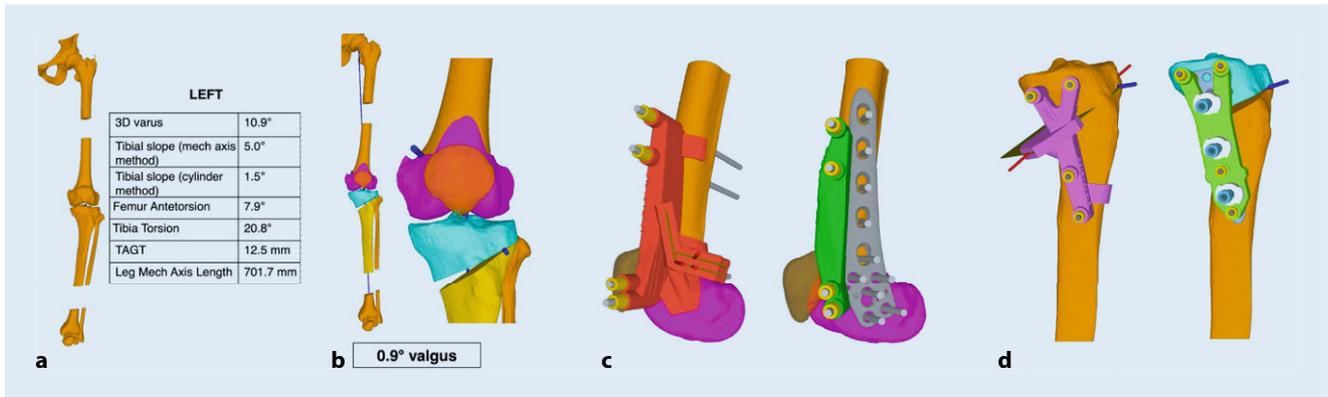


Abb. 2 ▲ Patient aus **Abb. 1**: **a** 3D-Winkelanalyse (Balgrist CARD, Zentrum für 3D-Operationsplanung und 3D-Druck); **b** Simulation femorale und tibiale Korrektur nach Angaben aus 2D-Planung des belasteten Ganzbeinröntgens; **c** individualisierte Schnittführung für distal-femorale „closed-wedge“ Korrektur und Plattenlage (Guides: Fa. Medacta, Castel San Pietro, Schweiz); **d** Schnittführung und Repositionsguide für „high tibial open-wedge“ Korrektur und Plattenlage (Platten: Tomofix, Fa. Synthes, Zuchwil, Schweiz). (Mit freundl. Genehmigung, © Klinik für Orthopädie, Universitätsklinik Balgrist, Zürich, alle Rechte vorbehalten)

Risiko der Hinge-Fraktur zu sehen und wird daher von den Patienten sehr gut vertragen. Die Einhaltung einer „physiologischen“ Gelenklinie und Vermeidung einer neuen Deformität ist im Hinblick auf mögliche Folgeoperationen, wie z. B. prothetische Versorgung, äußerst wichtig. Hinzu kommt die Veränderung der Beinlänge, welche je nach Osteotomieart (z. B. isolierte „open-wedge“ HTO mit 10° Korrektur) über 1 cm betragen kann, was ebenfalls durch eine Doppelstockosteotomie, wie in **Abb. 1** gezeigt, ausgeglichen gehalten werden kann. Auch wenn die Beinlänge und Beckenstellung im Rahmen der Kniepathologie oft sekundär ist, so ist dieser Punkt insbesondere in die (schriftliche) Aufklärung des Patienten mit aufzunehmen!

» Eine präoperative Deformitätenanalyse und entsprechende Korrekturszenarien sind extrem wichtig

Daher sind eine präoperative Deformitätenanalyse und entsprechende Korrekturszenarien mit Zielwerten (mechanische Belastung, mechanische Achse, Grad der Arthrose, femorotibialer Gelenkwinkel, Beinlängenveränderung) extrem wichtig. Neuere Analyseverfahren wie die 3D-Analyse nach CT-Schnittbildgebung in Kombination mit einem

belasteten frontalen Röntgenbild ermöglichen genaueste Winkelberechnungen, Korrekturszenarien und individuelle 3D-gedruckte Schnittblöcke (**Abb. 2**).

Eigenheiten der distalen femoralen Korrektur

Im Rahmen der Deformitätenanalyse und Osteotomieplanung muss beachtet werden, dass die distale femorale Osteotomie (DFO) aus biomechanischer Sicht ein Kompartiment nur in extensionsnahen Bewegungen essenziell entlastet [21]. Entsprechend dem Extensions- und Flexionsbalancing in der Prothetik, liegt bei der DFO eine reine frontale Achskorrektur vor. Knorpelschäden im Bereich der dorsalen Kondyle werden somit durch eine tibiale Korrektur wesentlich besser in der Dynamik (Flexion über 30°) entlastet. Eine HTO wirkt sich sowohl auf den Flexions- als auch auf den Extensionsspalt aus, da sie die Tibiahöhe und theoretisch die tibiofemorale Mechanik während des gesamten Bewegungsbogens verändert [22]. Insbesondere wenn klinisch auffällt, dass ein Valgusknie auch in Flexion weiter in den Valgus abtaucht (Dysplasie der lateralen femoralen Kondyle), so ist eine tibiale („mediale closed-wedge“) varisierende Korrektur konzeptionell sinnvoller. Des Weiteren beeinflusst die DFO das patellofemorale Tracking deutlich stärker als die HTO. Dies kommt insbesondere

beim Valgusknie mit lateraler Arthrose und oft simultanen patellofemorale (PF) Beschwerden zum Tragen, da sich der Q-Winkel effektiv verändert, während die Patellahöhe gleichbleibt [23].

Besonderheiten des patellofemorale Gleitlagers

Die Patellahöhe wird maßgeblich von der Osteotomietechnik (auf- oder zu klappend, supra- oder infratuberositär) im Bereich der HTO beeinflusst. Bei bestehender patellofemorale Arthrose oder Patella baja ist die klassische aufsteigende supratuberositäre mediale „open-wedge“ HTO kritisch zu sehen, da durch weitere Distalisierung der Patella im Gleitlager mit resultierender Erhöhung des Anpressdruckes eine patellofemorale Arthrose begünstigt oder verstärkt werden kann. Daher bietet sich in solchen Fällen eine absteigende Tuberositasosteotomie an [24] oder, wenn das zu operierende Bein länger ist und keine zusätzliche Verlängerung gewünscht ist, eine früher übliche supratuberositäre laterale „closedwedge“ HTO [25].

Gerade bei der Valgusgonarthrose lässt sich, wie oben erwähnt, oft ein laterales PF-Maltracking durch die Korrektur der Achse und damit des Quadrizepsvektors zentrieren. Klinische Studien zeigen mittlerweile klar den positiven Effekt der Achskorrektur bei Patienten mit patellofemorale Instabi-

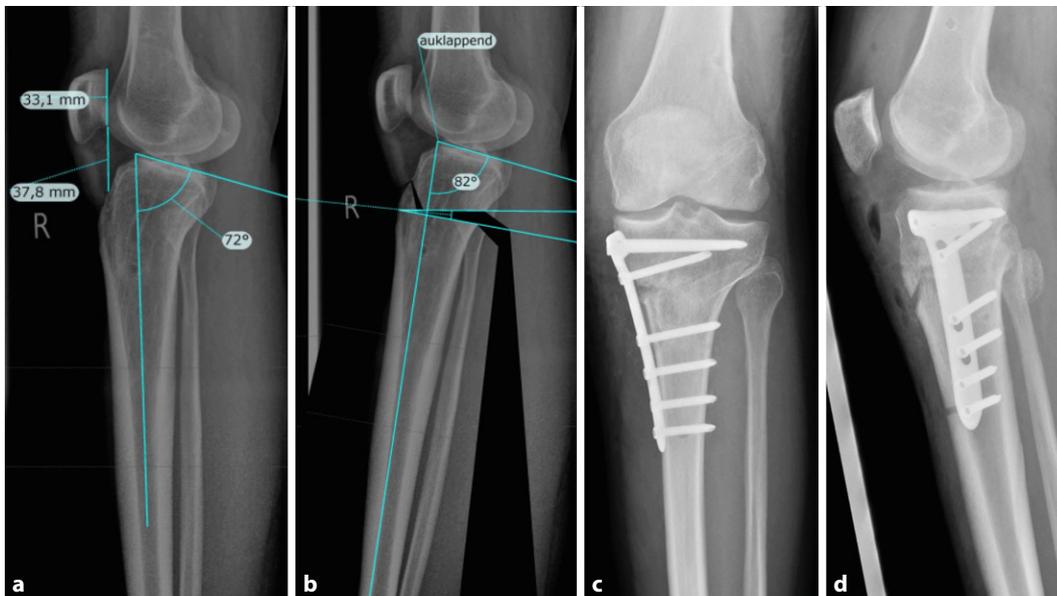


Abb. 3 ◀ 28-jähriger Patient mit Ruptur der Plastik des vorderen Kreuzbands nach Bagateltrauma mit erneuter Instabilität und medialer Chondromalazie Grad 3. **a** Posteriorer tibialer Slope von 18° und Varus von 4,5°; **b** Planung der Osteotomie, posteromedial auflappend mit Extension um 12° und Valgisation um 5°; **c** und **d** Osteotomie fixiert mit Tomofix-Platte medialseitig. (Mit freundl. Genehmigung, © Abteilung für Orthopädie und Unfallchirurgie, Helmut-G.-Walther-Klinikum, Lichtenfels, alle Rechte vorbehalten.)

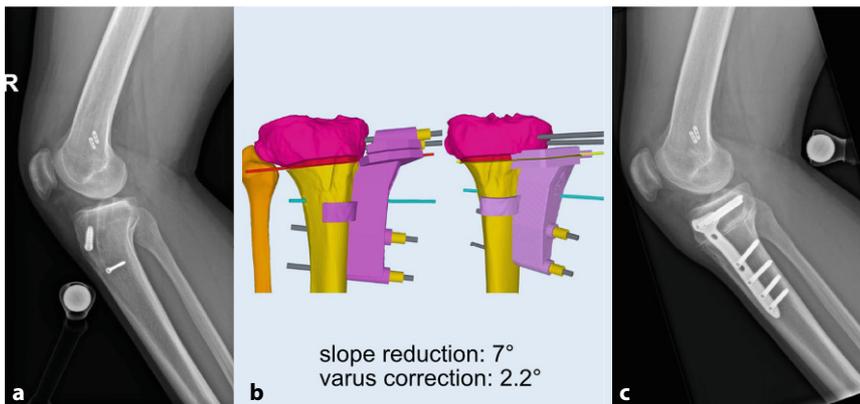


Abb. 4 ▲ 19-jähriger Patient mit erneuter VKB-Instabilität (VKB: vorderes Kreuzband) nach bereits 2fachen VKB-Rekonstruktionen. **a** Slope 12°, Varus 2,2°; **b** präoperative Planung zur dreidimensionalen Korrektur mittels Schnittblock zur Korrektur auf postoperativ 5° Slope und 0° frontale Achse, Cutting-Guide mit größtem Keil anterolateral gelegen und Hinge posteromedial; **c** „closed-wedge“ HTO (hohe tibiale Umstellungsosteotomie) von anteromedial gesägt und fixiert mit Tomofix-Platte. (Mit freundl. Genehmigung, © Klinik für Orthopädie, Universitätsklinik Balgrist, Zürich, alle Rechte vorbehalten)

lität mittels Varisierung bei valgischer Beinachse [26]. Dies konnte auch in einer Kohorte mit höherem Durchschnittsalter (50±14 Jahre; Mittelwert ± Standardabweichung) und bereits degenerativ verändertem patellofemoralem Gleitlager gezeigt werden [27].

Zu einer umfassenden Deformitätenanalyse bei zusätzlicher PF-Arthrose gehört daher auch die Bestimmung der Torsion und des TT-TG („tibial tuberosity–trochlear groove“)-Abstandes. Eine aktuelle Studie mit MRT- und CT-Datensätzen konnte einen positiven Zusammenhang von femoraler Torsion und patellofemoraler Arthrose darlegen. Eine

femorale Antetorsion von über 20° zeigte höhergradige Knorpeldegeneration im Bereich der lateralen Retropatellarfläche versus medial, was in Kombination mit einem Valgusalignment noch verstärkt wurde [28]. Dahingehend kann ein vorderer Knieschmerz nach valgisierender HTO insbesondere bei Frauen mit generell etwas höherer femoralen Antetorsion hypothetisch auf eine Dekompensation des patellofemoralen Trackings hinweisen. Allerdings gibt es hierzu noch keine validen klinischen Daten.

Osteotomie bei Bandinsuffizienzen

Achsdeformitäten haben nicht nur einen direkten Einfluss auf die Gelenkbelastung, sondern auch einen Einfluss auf die ligamentäre Belastung und Stabilität des Kniegelenkes und können damit indirekt zur Arthroseprogression beitragen¹ [29].

In biomechanischen Studien konnte gezeigt werden, dass das koronare Alignment einen wichtigen Einfluss auf die Spannung des vorderen Kreuzbandes (VKB) besitzt [30, 31]. Ein Varus-Thrust führt zu erhöhter Belastung des VKB. Gleichzeitig führt allerdings auch ein deutlicher Valgus zu einer erhöhten Belastung des VKB. Das koronare Alignment hat zudem einen wichtigen Einfluss auf die Seitenbandstabilität und sollte zwingend bei allen Seitenbandinstabilitäten berücksichtigt und ggf. therapiert werden [32].

In Kadaverstudien konnte zudem gezeigt werden, dass der posteriore tibiale Slope einen wichtigen Einfluss auf die sagittale Stabilität des Kniegelenkes hat [33, 34]. Inzwischen ist eindeutig belegt, dass ein erhöhter tibialer Slope ein Risikofaktor für eine Verletzung bzw. Re-Instabilität nach VKB-Rekonstruktion ist (■ **Abb. 3**). Das gleiche gilt umgekehrt bei erniedrigtem Slope auch für Verlet-

¹ siehe hierzu auch Artikel „Instabilitätsarthrose: Stellenwert der Bandrekonstruktion bei bestehender Arthrose“ in diesem Heft.

zungen des hinteren Kreuzbandes [35]. Zudem zeigen biomechanische Daten, dass bei einem VKB-insuffizienten Kniegelenk eine alleinige Korrektur des Varus zu einer erhöhten tibialen Translation führt und daher eine kombinierte Slopereduktion als dreidimensionale Korrekturosteotomie angestrebt werden sollte (▣ Abb. 3 und 4; [36]).

Zusammenfassend zeigt sich in den Grundlagenstudien, dass Achsdeformitäten sowohl in koronarer als auch sagittaler Ebene einen wichtigen Faktor für die Stabilität des Kniegelenkes sowie das Versagen von Bandplastiken darstellen und durch knöcherne Korrekturen wesentlich beeinflusst werden können.

Ausmaß der Achskorrektur beim jungen Arthroseknie

Berücksichtigt man die Ergebnisse aus den biomechanischen sowie klinischen Studien empfehlen die Autoren im Konsensus folgendes Konzept:

Ab wann ist die Indikation zur Achskorrektur beim jungen Patienten gegeben?

- symptomatische unikompartimentelle Überlastung ab 5° mechanische Achsfehlstellung
- vorhandene mediolaterale ligamentäre Insuffizienz bereits ab 3° mechanische Achsfehlstellung
- unikompartimentelle Knorpel- und/oder Meniskuschirurgie ab 2–3° mechanische Achsfehlstellung – *Beachte:* Ein Korrekturwinkel um mindestens 4° ist nötig um eine relevante Belastungsverschiebung zu erzielen [37].
- patellofemorales Maltracking und Valgusdeformität ab 3–4°
- bei Kindern mit offenen Wachstumsfugen und asymptomatischer Achsfehlstellung kann ab 5° eine Epiphysiodese erwogen werden.
- bei Erwachsenen mit asymptomatischer Achsdeviation über 8° kann bei entsprechendem Wunsch eine prophylaktische Achskorrektur erwogen werden (keine medizinische/orthopädische Indikation).

Angestrebte mechanische Zielachse bei Varusdeformität beim jungen Patienten:

- ohne relevante Arthrose wird eine 0–0,5° Valgusachse angestrebt, entsprechend ca. 50–53 % der mediolateralen tibialen Belastung
- bei chronischer degenerativer Innenmeniskuspathologie, mittelgradiger bis hochgradiger Arthrose wird eine Zielachse von 1,5–2,5° Valgus angestrebt, entsprechend ca. 55–60 % mediolaterale tibiale Belastung – Bei geringgradiger Arthrose bzw. nicht bestehender Instabilität wird diese durch Belastung optimal bei 2° Valgus verbleiben; bei höhergradiger Arthrose mit hohem JLCA und evtl. bestehender seitlicher Instabilität ist trotz zusätzlich entstehendem Valgusmoment keine relevante Überkorrektur zu erwarten.
- tibiale Zielgelenkwinkel von über 93° MPTW gilt es zu vermeiden

Angestrebte mechanische Zielachse bei Valgusdeformität beim jungen Patienten:

- ohne relevante Arthrose wird eine 0° Achse angestrebt
- bei lateraler Arthrose sollte die Korrektur 1–1,5° Varus nicht übersteigen
- patellofemorales Tracking beachten

Outcome nach Osteotomie

In einer systematischen Übersichtsarbeit von 7087 tibialen Osteotomien zeigten sich im mittleren Follow-Up von über 10 Jahren Überlebensraten nach 5, 10, 15 und 20 Jahren von 86–100 %, 64–97,6 %, 44–93,2 % bzw. 46–85,1 %. Zusammengefasst wurde das „optimale“ Korrekturergebnis mit 0,6–4° Valgus bei vorbestehenden Varuspathologien angegeben [38]. Risikofaktoren für ein Versagen waren v. a. höheres Alter, Bluthochdruck, andere Komorbiditäten und weibliches Geschlecht. Eine begleitende Knorpeltherapie kann das arthroskopische und histologische Outcome verbessern, jedoch ist bislang kein vorteilhafter Effekt auf das klinische oder radiologische Outcome belegt [39, 40]. Zudem zeigten sich neben guten Outcome-Scores wesentliche Verbesserungen im

Gangbild (mechanische Tragachse und Knieadduktionsmoment) 5 Jahre nach Intervention [41].

Bezüglich der distalen femoralen Osteotomie werden ebenfalls in einzelnen Studien sehr gute Langzeitergebnisse, respektive Standzeiten bis zur operativen Konversion, angegeben: 10 Jahre (90 %), 15 Jahre (79 %), 20 Jahre (21,5 %) [42]. Eine weitere aktuelle Studie zeigt eine 89%-Überlebensrate der DFO bei lateraler Arthrose nach 10 Jahren, wobei der präoperative Mikulicz-Punkt in Prozentwerten bei 78,7 % (SD 19,1 %) (= valgus) und postoperativ bei 35,9 % (SD 14,8 %) (= varus) lag [43].

Das Ergebnis nach HTO und zeitgleicher VKB-Ersatzbandplastik bei Patienten mit chronischer vorderer Instabilität und Varusstellung mit medialer Arthrose wurde von Marriott et al. mittels Ganganalyse und Scores aufgezeigt. Die Auswertung der präoperativen, 2-Jahres- und 5-Jahres-Daten zeigten eine klare Verbesserung der Gelenksbiomechanik (Gangbild) durch eine Abnahme der zuvor bestandenen Knieadduktions- und -flexionsmomente und anhaltend hohe Patientenzufriedenheit [44].

Komplikationen nach HTO

Ein wesentliches Problem nach Umstellung ist neben der Unterkorrektur (bis zu 62 %) die Überkorrektur (bis zu 16 %) der mechanischen Tragachse [45]. Die mechanische Überkorrektur nach HTO zeigte in der Studie von Briem et al. ein deutlich schlechteres Gangbild sowie, wenig überraschend, schlechtere Outcome-Scores [46]. Insgesamt zeigten die Daten der Regressionsanalyse bei Patienten mit medialer Arthrose ein schlechteres Ergebnis entweder bei einer unzureichenden oder einer übermäßigen Korrektur der Varusdeformität [46]. Neben der störenden Ästhetik beim übertriebenen Valgusbein ist vor allem der Stress auf das mediale Seitenband hervorzuheben [47]. Diese schmerz sensible Struktur bedingt aufgrund des ständigen Zuges eine andauernde Schmerzaffärenz. Zudem bedingt es eine zunehmende Insuffizienz des Innenbandes, sodass im weiteren Verlauf sogar höhergekoppelte Prothesensysteme verwendet werden



Abb. 5 ▲ **a** Überweisung einer extern durchgeführten hohen tibialen Umstellungsosteotomie bei einer 62-jährigen Patientin mit Überkorrektur auf ca. 8° Valgus bei medialer Arthrose; **b** bei medialem proximalem Tibiawinkel von 100° bestand aufgrund der Instabilität nach knöcherner Resektion keine Möglichkeit, einen bikondylären Oberflächenersatz zu implantieren; somit Implantation einer gekoppelten Prothese nötig. (Mit freundl. Genehmigung, © Sektion Sportorthopädie, Orthopädische Klinik und Poliklinik Rostock, alle Rechte vorbehalten)

müssen. Eine Patella baja sollte unbedingt vermieden werden, um nicht neue vordere Knieschmerzen zu generieren oder eine bestehende patellofemorale Chondromalazie zu aktivieren. Die distal auslaufende tibiale Osteotomie ist daher eine gute Option bei dieser Gefahr. Die besagten Probleme nach HTO können durch eine saubere präoperative Planung und entsprechend durchgeführte Chirurgie, falls möglich mit Hilfe von Navigation oder patientenspezifischen Schnittblöcken, besser kontrolliert werden.

Konversion zur Prothetik

Trotz des aufgezeigten Zeitgewinns und der Verzögerung der Arthroseprogression beim jungen Patienten wird im Rahmen der zunehmenden Lebenserwartung eine Konversion auf einen endoprothetischen Ersatz wahrscheinlicher werden. Die aktuelle Knieendoprothetik mit einer zementierten Prothese nach HTO zeigt eine hervorragende Langzeitbeständigkeit mit einer 10-jährigen Überlebensrate ohne aseptische Lockerung von 97% mit insgesamt zuverlässig verbesserten klinischen Scores im Langzeit-Follow-Up. Allerdings wird in diesem Beobachtungszeitraum eine Prävalenz von 4% Narkosemobilisationen und 3% Revision aufgrund einer ligamentären Instabilität angegeben, was nach Chambers et al. auf ein schwierigeres Balancing nach HTO zurückzuführen sein könnte [48]. Zudem ist die Infektrate von 1,4% versus 1,0% etwas höher, was auf die technisch anspruchsvollere Operation mit längerer Operationsdauer und höherem Blutverlust, sowie Zustand nach Voroperation zurückzuführen ist [49].

Eine (auf die Endoprothetik) vorausschauende Osteotomieplanung beinhaltet damit die klare Vermeidung von neuen Achsdeformitäten, wie oben ausführlich beschrieben. Eine laterale „closed-wedge“ HTO erschwert aufgrund des Impingements zwischen Schaft/Keil und des Missalignments der Kortikalis die Verankerung der tibialen Komponente, was historisch gesehen ein großes Problem war und zu einem gewissen Punkt den schlechten Daten nach Konversion von vor 20–30 Jahren zugrunde lag [49, 50]. Zudem können durch eine schräge Gelenklinie nach „überzogener“ Tibiakopf-Valgisationsosteotomie Balancing-Probleme entstehen, da die tibiale Resektion sehr varisch wird und hierbei Streck- und Beugespalt beeinflusst. Bei zuvor überkorrigiertem MPTW führt dies zu einem extrem schwierigen Weichteilrelease, um das Gelenk stabil zu bekommen und den Patellalauf korrekt einzustellen. Teils kann dies sogar die Implantation eines Oberflächenersatzes unmöglich und eine (teil)gekoppelte Prothese erforderlich machen (■ Abb. 5; [51]).

Eine bestehende HTO ist keine Kontraindikation für eine mediale unikompartimentelle Prothese, da mittelfristig gute bis sehr gute klinische Ergebnisse erzielt werden können, wenn präoperativ eine möglichst gerade (oder leicht varische) Achse besteht und postoperativ keine relevante neue Valgusachse durch die Prothese entsteht [52]. Allerdings sollte der Grund für das „Versagen“ der HTO (Unterkorrektur, ligamentäre Insuffizienz) vor einer unikompartimentellen Arthrose genauestens evaluiert werden. Die präoperative Vorbereitung beinhaltet erneut die Analyse der knöchernen Geometrie (präoperative mechanischen Achse, Angulierung/Konvergenz der Gelenkebenen = JLCA) sowie der medialen Bandlaxität und des Zustands des lateralen Kompartimentes.

Beim initialen Zugangsweg ist eine zu mediale Schnittführung zur HTO oder medialen DFO zu vermeiden, im Hinblick auf eine mögliche spätere Folgeoperation, wo die Exposition des Gelenkes dadurch deutlich erschwert sein kann. Eine nach exzessiver HTO entstandene Patella baja gilt in diesem Zusammenhang ebenfalls als technisches Problem, worauf schon primär geachtet werden sollte [53–55]. Zudem ist ein persistierender Knieschmerz in der Gruppe der Patienten nach HTO häufiger gefunden worden [56], sodass ein primärer Patellarückflächenersatz in dieser Patientenpopulation eher sinnvoll ist, um die Reoperationsrate niedriger zu halten [50]. Die Konversion von einer HTO zu einer Totalendoprothese ist keine Anfängeroperation und bedarf ebenfalls einer genauen präoperativen knöchernen und ligamentären Beurteilung.

Fazit für die Praxis

- Die Korrektur von Achsdeformitäten ist ein essenzieller Behandlungspfeiler der Gonarthrose beim jungen Patienten.
- Der mechanisch bedingte Einfluss von Achsdeformitäten ist evident und der Progression der Erkrankung kann somit entgegengewirkt werden.
- Die operative Korrektur benötigt eine umfassende präoperative Analyse und Zielgröße, sodass auch

für zukünftige operative Eingriffe (ligamentäre Rekonstruktion, prothetische Konversion) möglichst optimale Bedingungen bestehen bleiben.

Korrespondenzadresse

PD Dr. Florian B. Imhoff

Orthopädie, Universitätsklinik Balgrist
Forchstrasse 340, 8008 Zürich, Schweiz
florian.imhoff@balgrist.ch

Funding. Open access funding provided by University of Zurich

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. F.B. Imhoff, S.F. Fucentese, J. Harrer und T. Tischer geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

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

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

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

Literatur

1. Niu J, Zhang YQ, Torner J, Nevitt M, Lewis CE, Aliabadi P et al (2009) Is obesity a risk factor for progressive radiographic knee osteoarthritis? *Arthritis Rheum* 61(3):329–335
2. Sharma L, Chmiel JS, Almagor O, Felson D, Guermazi A, Roemer F et al (2013) The role of varus and valgus alignment in the MRI development of knee cartilage damage by MRI: the MOST study. *Ann Rheum Dis* 72(2):235–240
3. Cerejo R, Dunlop DD, Cahue S, Channin D, Song J, Sharma L (2002) The influence of alignment on risk of knee osteoarthritis progression according

- to baseline stage of disease. *Arthritis Rheum* 46(10):2632–2636
4. Sharma L, Song J, Felson DT, Cahue S, Shamiyeh E, Dunlop DD (2001) The role of knee alignment in disease progression and functional decline in knee osteoarthritis. *JAMA* 286(2):188–195
5. Roos H, Lauren M, Adalberth T, Roos EM, Jonsson K, Lohmander LS (1998) Knee osteoarthritis after meniscectomy: prevalence of radiographic changes after twenty-one years, compared with matched controls. *Arthritis Rheum* 41(4):687–693
6. Strecker W (2006) Planning analysis of knee-adjacent deformities. I. Frontal plane deformities. *Oper Orthop Traumatol* 18(3):259–272
7. Eberbach H, Mehl J, Feucht MJ, Bode G, Sudkamp NP, Niemeier P (2017) Geometry of the valgus knee: contradicting the dogma of a femoral-based deformity. *Am J Sports Med* 45(4):909–914
8. Insall J, Shoji H, Mayer V (1974) High tibial osteotomy. A five-year evaluation. *J Bone Joint Surg Am* 56(7):1397–1405
9. Fujisawa Y, Masuhara K, Shiomi S (1979) The effect of high tibial osteotomy on osteoarthritis of the knee. An arthroscopic study of 54 knee joints. *Orthop Clin North Am* 10(3):585–608
10. Jakob RP, Murphy SB (1992) Tibial osteotomy for varus gonarthrosis: indication, planning, and operative technique. *Instr Course Lect* 41:87–93
11. Strecker W, Dickschas J, Harrer J, Müller M (2009) Arthroscopy prior to osteotomy in cases of unicompartmental osteoarthritis. *Orthopade* 38(3):263–268
12. Feucht MJ, Minzlaff P, Saier T, Cotic M, Sudkamp NP, Niemeier P et al (2014) Degree of axis correction in valgus high tibial osteotomy: proposal of an individualised approach. *Int Orthop* 38(11):2273–2280
13. Paley D, Herzenberg JE, Tetsworth K, McKie J, Bhav A (1994) Deformity planning for frontal and sagittal plane corrective osteotomies. *Orthop Clin North Am* 25(3):425–465
14. Saragaglia D, Blaysat M, Inman D, Mercier N (2011) Outcome of opening wedge high tibial osteotomy augmented with a Biosorb® wedge and fixed with a plate and screws in 124 patients with a mean of ten years follow-up. *Int Orthop* 35(8):1151–1156
15. Nakayama H, Schroter S, Yamamoto C, Iseki T, Kanto R, Kurosaka K et al (2018) Large correction in opening wedge high tibial osteotomy with resultant joint-line obliquity induces excessive shear stress on the articular cartilage. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26(6):1873–1878
16. Goshima K, Sawaguchi T, Shigemoto K, Iwai S, Fujita K, Yamamoto Y (2019) Comparison of clinical and radiologic outcomes between normal and overcorrected medial proximal tibial angle groups after open-wedge high tibial osteotomy. *Arthroscopy* 35(10):2898–2908.e1
17. Song JH, Bin SI, Kim JM, Lee BS (2020) What is an acceptable limit of joint-line obliquity after medial open wedge high tibial osteotomy? Analysis based on midterm results. *Am J Sports Med* 48(12):3028–3035
18. Feucht MJ, Winkler PW, Mehl J, Bode G, Forkel P, Imhoff AB et al (2020) Isolated high tibial osteotomy is appropriate in less than two-thirds of varus knees if excessive overcorrection of the medial proximal tibial angle should be avoided. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06166-3>
19. Babis GC, An KN, Chao EY, Rand JA, Sim FH (2002) Double level osteotomy of the knee: a method to retain joint-line obliquity. *Clinical results*. *J Bone Joint Surg Am* 84(8):1380–1388
20. Schroter S, Nakayama H, Yoshiya S, Stockle U, Ateschrang A, Gruhn J (2019) Development of the double level osteotomy in severe varus osteoarthritis showed good outcome by preventing oblique joint line. *Arch Orthop Trauma Surg* 139(4):519–527
21. Wylie JD, Scheiderer B, Obopilwe E, Baldino JB, Pavano C, Macken C et al (2018) The effect of lateral opening wedge distal femoral varus osteotomy on tibiofemoral contact mechanics through knee flexion. *Am J Sports Med* 46(13):3237–3244
22. Amis AA (2013) Biomechanics of high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21(1):197–205
23. Flury A, Jud L, Hoch A, Camenzind RS, Fucentese SF (2021) Linear influence of distal femur osteotomy on the Q-angle: one degree of varization alters the Q-angle by one degree. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 29(2):540–545. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-05970-1>
24. Krause M, Drenck TC, Korthaus A, Preiss A, Frosch KH, Akoto R (2018) Patella height is not altered by descending medial open-wedge high tibial osteotomy (HTO) compared to ascending HTO. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26(6):1859–1866
25. Brouwer RW, Bierma-Zeinstra SM, van Koevringe AJ, Verhaar JA (2005) Patellar height and the inclination of the tibial plateau after high tibial osteotomy. The open versus the closed-wedge technique. *J Bone Joint Surg Br* 87(9):1227–1232
26. Frings J, Krause M, Akoto R, Wohlmuth P, Frosch KH (2018) Combined distal femoral osteotomy (DFO) in genu valgum leads to reliable patellar stabilization and an improvement in knee function. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26(12):3572–3581. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-5000-9>
27. Swarup I, Elattar O, Rozbruch SR (2017) Patellar instability treated with distal femoral osteotomy. *Knee* 24(3):608–614
28. Flury A, Hoch A, Andronic O, Fritz B, Imhoff FB, Fucentese SF (2020) Increased femoral antetorsion correlates with higher degrees of lateral retropatellar cartilage degeneration, further accentuated in genu valgum. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06223-x>
29. Tischer T, Paul J, Pape D, Hirschmann MT, Imhoff AB, Hinterwimmer S et al (2017) The impact of osseous malalignment and realignment procedures in knee ligament surgery: a systematic review of the clinical evidence. *Orthop J Sports Med* 5(3):2325967117697287
30. van de Pol GJ, Arnold MP, Verdonschot N, van Kampen A (2009) Varus alignment leads to increased forces in the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 37(3):481–487
31. Mehl J, Otto A, Kia C, Murphy M, Obopilwe E, Imhoff FB et al (2020) Osseous valgus alignment and posteromedial ligament complex deficiency lead to increased ACL graft forces. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. <https://doi.org/10.1007/s00167-019-05770-2>
32. Laprade RF, Engebretsen L, Johansen S, Wentorf FA, Kurtenbach C (2008) The effect of a proximal tibial medial opening wedge osteotomy on posterolateral knee instability: a biomechanical study. *Am J Sports Med* 36(5):956–960
33. Agneskirchner JD, Hurschler C, Stukenborg-Colsman C, Imhoff AB, Lobenhoffer P (2004) Effect of high tibial flexion osteotomy on cartilage pressure and joint kinematics: a biomechanical study in human cadaveric knees. Winner of the

Funktionsmedizin am Bewegungssystem. Teil 2



Erkrankungen des Bewegungssystems sind häufig. Die Mehrzahl der Patienten sucht aufgrund von Schmerzen einen Arzt auf. Die Beschwerden betreffen dabei nicht mehr nur vorwiegend den unteren Rückenbereich, sondern auch Nacken, Schulter, Ellbogen, Hand sowie andere Gelenke und Muskelpartien.

Ausgabe 1/2021 der Zeitschrift „Arthroscopie“ mit dem Schwerpunkt „**Funktionsmedizin am Bewegungssystem**“ gibt Ihnen eine detaillierte Übersicht zu folgenden Themen:

- Bedeutung von Funktionstests in der ambulanten und klinischen Physiotherapie
- Therapeutische Modifikation der Schnittstelle sensomotorisches System – Umwelt durch Schuheinlagen
- Funktionserkrankungen des Bewegungssystems

Suchen Sie noch mehr zum Thema?

Mit e.Med – den maßgeschneiderten Fortbildungsabos von Springer Medizin – haben Sie Zugriff auf alle Inhalte von SpringerMedizin.de. Sie können schnell und komfortabel in den für Sie relevanten Zeitschriften recherchieren und auf alle Inhalte im Volltext zugreifen.

Weitere Infos zu e.Med finden Sie auf springermedizin.de unter „Abos“

- AGA-DonJoy Award 2004. Arch Orthop Trauma Surg 124(9):575–584
34. Imhoff FB, Mehl J, Comer BJ, Obopilwe E, Cote MP, Feucht MJ et al (2019) Slope-reducing tibial osteotomy decreases ACL-graft forces and anterior tibial translation under axial load. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 27(10):3381–3389
 35. Giffin JR, Stabile KJ, Zantop T, Vogrin TM, Woo SL, Harner CD (2007) Importance of tibial slope for stability of the posterior cruciate ligament deficient knee. Am J Sports Med 35(9):1443–1449
 36. Imhoff FB, Comer B, Obopilwe E, Beitzel K, Arciero RA, Mehl JT (2021) Effect of slope and varus correction high tibial osteotomy in the ACL-deficient and ACL-reconstructed knee on kinematics and ACL graft force: a biomechanical analysis. Am J Sports Med 49(2):410–416. <https://doi.org/10.1177/0363546520976147>
 37. Willinger L, Lang JJ, von Deimling C, Diermeier T, Petersen W, Imhoff AB et al (2020) Varus alignment increases medial meniscus extrusion and peak contact pressure: a biomechanical study. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 28(4):1092–1098
 38. Ollivier B, Berger P, Depuydt C, Vandenneucker H (2020) Good long-term survival and patient-reported outcomes after high tibial osteotomy for medial compartment osteoarthritis. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06262-4>
 39. Pannell WC, Heidari KS, Mayer EN, Zimmerman K, Heckmann N, McKnight B et al (2019) High tibial osteotomy survivorship: a population-based study. Orthop J Sports Med 7(12):2325967119890693
 40. Yao RZ, Liu WQ, Sun LZ, Yu MD, Wang GL (2020) Effectiveness of high tibial osteotomy with or without other procedures for medial compartment osteoarthritis of knee: an update meta-analysis. J Knee Surg. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1700978>
 41. Birmingham TB, Moyer R, Leitch K, Chesworth B, Bryant D, Willits K et al (2017) Changes in biomechanical risk factors for knee osteoarthritis and their association with 5-year clinically important improvement after limb realignment surgery. Osteoarthritis Cartilage 25(12):1999–2006
 42. Sternheim A, Garbedian S, Backstein D (2011) Distal femoral varus osteotomy: unloading the lateral compartment: long-term follow-up of 45 medial closing wedge osteotomies. Orthopedics 34(9):e488–90
 43. Shivji FS, Foster A, Risebury MJ, Wilson AJ, Yassen SK (2021) Ten-year survival rate of 89% after distal femoral osteotomy surgery for lateral compartment osteoarthritis of the knee. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-05988-5>
 44. Marriott K, Birmingham TB, Kean CO, Hui C, Jenkyn TR, Giffin JR (2015) Five-year changes in gait biomechanics after concomitant high tibial osteotomy and ACL reconstruction in patients with medial knee osteoarthritis. Am J Sports Med 43(9):2277–2285
 45. Smith TO, Sexton D, Mitchell P, Hing CB (2011) Opening- or closing-wedged high tibial osteotomy: a meta-analysis of clinical and radiological outcomes. Knee 18(6):361–368
 46. Briem K, Ramsey DK, Newcomb W, Rudolph KS, Snyder-Mackler L (2007) Effects of the amount of valgus correction for medial compartment knee osteoarthritis on clinical outcome, knee kinetics and muscle co-contraction after opening wedge high tibial osteotomy. J Orthop Res 25(3):311–318
 47. Meding JB, Wing JT, Ritter MA (2011) Does high tibial osteotomy affect the success or survival of a total knee replacement? Clin Orthop Relat Res 469(7):1991–1994
 48. Chalmers BP, Limberg AK, Tibbo ME, Perry KI, Pagnano MW, Abdel MP (2019) Total knee arthroplasty after high tibial osteotomy results in excellent long-term survivorship and clinical outcomes. J Bone Joint Surg Am 101(11):970–978
 49. Haddad FS, Bentley G (2000) Total knee arthroplasty after high tibial osteotomy: a medium-term review. J Arthroplasty 15(5):597–603
 50. Kazakos KJ, Chatzipapas C, Verettas D, Galanis V, Xarchas KC, Psillakis I (2008) Mid-term results of total knee arthroplasty after high tibial osteotomy. Arch Orthop Trauma Surg 128(2):167–173
 51. Han JH, Yang JH, Bhandare NN, Suh DW, Lee JS, Chang YS et al (2016) Total knee arthroplasty after failed high tibial osteotomy: a systematic review of open versus closed wedge osteotomy. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 24(8):2567–2577
 52. Schlumberger M, Oremek U, Brielmaier M, Buntbroich U, Schuster P, Fink B (2020) Prior high tibial osteotomy is not a contraindication for medial unicompartmental knee arthroplasty. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06149-4>
 53. Nizard RS, Cardinne L, Bizot P, Witvoet J (1998) Total knee replacement after failed tibial osteotomy: results of a matched-pair study. J Arthroplasty 13(8):847–853
 54. Karabatsos B, Mahomed NN, Maistrelli GL (2002) Functional outcome of total knee arthroplasty after high tibial osteotomy. Can J Surg 45(2):116–119
 55. Efe T, Ahmed G, Heyse TJ, Boudriot U, Timmesfeld N, Fuchs-Winkelmann S et al (2011) Closing-wedge high tibial osteotomy: survival and risk factor analysis at long-term follow up. BMC Musculoskelet Disord 12:46
 56. Amendola L, Fosco M, Cenni E, Tigani D (2010) Knee joint arthroplasty after tibial osteotomy. Int Orthop 34(2):289–295