

CAOS in der Knieendoprothetik

W. Siebert, S. Mai, P. F. Heeckt

Die Implantation einer Kniegelenksendoprothese ist heutzutage bei destruierenden Gelenkerkrankungen nach Ausschöpfung der übrigen zur Verfügung stehenden Therapiemöglichkeiten eine gängige Behandlungsmethode. Trotz moderner Implantationsinstrumentarien und optimiertem Endoprothesendesign ist die Implantatlage auch bei gewissenhaftester Operationsplanung und genauester Durchführung nicht immer zufriedenstellend. Erhebliche postoperative Abweichungen der mechanischen Achse, der Rotation sowie der mediolateralen und ventrodorsalen Neigung werden in der Literatur beschrieben [1, 11, 18, 25].

Allein bei der Auswahl des Insertionspunktes des femoralen intramedullären Führungsstabes können Achsabweichungen bis zu $8,3^\circ$ resultieren [16]. Sowohl die Länge des Führungsstabes als auch das Ausmaß der Femurkrümmung haben weiteren Einfluss auf die spätere Implantatlage.

Bei Nachuntersuchungen fanden Jeffery und Mitarbeiter bei 115 Patienten eine Abweichung der mechanischen Achse von mehr als 3° in 32% der Fälle [11]. Tew berichtete über eine Abweichung von mehr als 5° in 34% und mehr als 9° in 7% von insgesamt 428 nachuntersuchten Patienten [25]. Stern und Insall beschrieben Abweichungen von 6° varus bis 16° valgus und in der Sagittalebene am Femur von -3° bis $+40^\circ$ Flexion sowie 84° bis 95° an der Tibia bei 289 Patienten [24]. Es besteht allgemeine Übereinstimmung, dass Achsabweichungen und ungenaue Implantatpositionierung zu frühzeitiger Lockerung von Knieendoprothesen führen [4, 5, 13, 21]. Achsabweichungen von mehr als 3° bzw. ein Verlauf der so genannten „Maquet-Linie“ außerhalb des mittleren Drittels der Knieendoprothese gelten als die häufigste Ursache für frühzeitiges Versagen [7, 10, 20]. Insbesondere zementfreie Systeme haben teilweise eine unbefriedigend hohe Lockerungsrate [3].

In Anbetracht dieser Daten erscheint eine Optimierung der Knieprothesenimplantation

durch bereits aus Hüftendoprothetik, Kreuzbandersatz und Wirbelsäulenchirurgie bekannte CAOS (Computer-Assisted Orthopedic Surgery)-Techniken sinnvoll zu sein [6, 8, 9, 17]. Klinisch einsetzbare Techniken wurden sowohl für Navigations- als auch Robotersysteme entwickelt. Um eine längere Haltbarkeit von Knieendoprothesen zu erzielen muss bei beiden Systemen das angestrebte Ziel sein, standardisiert und reproduzierbar die mechanische Achse in allen Ebenen zuverlässig wiederherzustellen und die Endoprothesenkomponenten bezüglich Rotation und Neigung frontal wie sagittal exakt auszurichten. Weiterhin sollte die Patella in ihrem Gleitlager zentral laufen und die Bandführung ausbalanciert sein. In der Folge werden Technik und Ergebnisse der in unserer Klinik verwendeten Navigations- und Robotersysteme zur Knieprothesenimplantation vorgestellt.

Roboterassistierte Knieprothesenimplantation

Eine Totalendoprothese des Kniegelenks (Knie-TEP) kann derzeit mit Hilfe von zwei kommerziell erhältlichen Robotersystemen (Robodoc, ISS, Sacramento und CASPAR, U.R.S.-ortho, Rastatt) durchgeführt werden. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf das CASPAR-System, welches seit 1999 in unserer Klinik eingesetzt wird.

Operationstechnik

Drei Schritte sind bei der Knie-TEP mit dem CASPAR-System wichtig und sollen daher besonders beschrieben werden.

■ **1. Pin-Setzung.** Zur späteren intraoperativen Lagererkennung durch den Roboter (Registrierung) müssen die zu operierenden Knochen-

anteile vor Anfertigung des Planungs-CTs mit Schrauben (Pins) markiert werden. Es wird jeweils ein femoraler und ein tibialer Pin benötigt. Beide Pins haben unterschiedliche, der jeweiligen Knochenstruktur angepasste, selbstschneidende Gewinde. Die Pins werden femoral von ventral und tibial von ventromedial so platziert, dass die Inzisionen möglichst im Bereich des späteren Zugangs zu liegen kommen. Um absolute Stabilität der Schrauben zu gewährleisten werden die Schrauben bikortikal eingebracht. Die Haut wird über den Pins wieder verschlossen, sodass die eigentliche Operation wahlweise am gleichen oder am darauffolgenden Tag ausgeführt werden kann.

■ **2. CT-basierte Planung.** Nach dem Setzen der Pins wird ein Planungs-CT des betroffenen Beins angefertigt. Hierbei werden der Hüftkopf, beide Pins und das Knie- und Sprunggelenk abgebildet. Um die Qualität des CTs besonders bezüglich Verwackelungen während der Aufnahme nachzuweisen wird ein Kalibrierungsstab am Bein angelegt.

Die CT-Daten werden sodann auf die PC-basierte Planungsstation übertragen. Jetzt kann die Qualität des CTs und die Lage der Pins überprüft werden. Danach werden die anatomischen Merkmale des Patienten festgehalten. Die mechanische und anatomische Achse werden getrennt für Femur und Tibia in der Frontal-, Sagittal- und Transversalebene bestimmt. Weitere Bezugsgrößen sind die Gelenklinie, der so genannte „epicondylar twist“ (Winkel zwischen Epicondylarlinie und dorsaler Condylarlinie) [14], die Rotation der Tibia in sich selbst (Winkel zwischen dorsaler Begrenzung des Tibiakopfes und der Sprunggelenklinie) und das Verhältnis von hinterer Tibiabegrenzung zur dorsalen Condylarlinie. Nach Abschluss der Planung werden alle Veränderungen dieser Winkel einschließlich eventueller Translationen angezeigt.

Im nächsten Schritt werden Implantattyp und Implantatgröße aus der Computerdatenbank ausgewählt und virtuell platziert. Es muss nun entschieden werden, wie viel Außenrotation femoral und tibial nötig sind, um ein zentrales Gleiten der Patella zu gewährleisten. Es besteht die Möglichkeit, die Gelenklinie und den dorsalen Slope anatomisch oder klassisch zu legen. Ein ungewolltes „Notching“ kann damit sicher vermieden werden. Es ist beeindruckend, wie sich die Änderung eines einzelnen Parameters auf alle anderen Parameter einschließlich der

mechanischen Achse auswirkt. Da man dreidimensional durch das CT „scrollen“ kann, erkennt man schnell den exakten Sitz aller Bereiche der Endoprothese, was dazu führt, dass man wählerisch bezüglich des Implantats und der angebotenen Größen wird (Abb. 1). Das System gibt weiterhin einen Hinweis auf die Veränderung der „extension gaps“ und „flexion gaps“ sowie der zu erwartenden Bandspannung.

Nach virtueller Platzierung der Implantate müssen noch die Fräsbereiche festgelegt werden, um unnötiges Leerfräsen zu vermeiden und die Weichteile zu schonen. Ein abschließender Überblick über die Planung wird ausgedruckt und die Daten mit einer Transferkarte auf den Roboter übertragen.

■ **3. Roboterassistierte Implantation.** Über einen klassischen medianen Zugang (in dem die Inzisionen für die Pins liegen) gehen wir medial parapatellar in die Kniegelenkhöhle ein. Das Bein wird in einer speziellen Halterung unter Einbringen je einer Schanz'schen Schraube mit zentralem selbstschneidendem Gewinde in Femur und Tibia fixiert. Der spezielle Rahmen enthält auch Vorrichtungen zur Fixierung von Haken und Hebeln. Unerwünschte Knochenbewegungen werden durch reflektierende „Rigid bodies“ an den Schanz'schen Schrauben und an der Halterung von einer Infrarotkamera zuverlässig registriert (Abb. 2). Falls die Bewegung den Toleranzbereich übersteigt wird das Robotersystem sofort gestoppt. Zur Registrierung der Knochenlage werden nun die Pins in Femur und Tibia mittels eines Messfühlers vom Roboter abgetastet und das Ergebnis mit den gespeicherten CT-Daten verglichen. Wenn die Daten übereinstimmen kann der Roboter mit der Fräsung der femoralen und tibialen Komponente beginnen. Die Fräsungen werden mit verschiedenen Fräsköpfen unter ständiger Wasserkühlung mit integriertem Spritzschutz durchgeführt. Nach Entfernung der Haltevorrichtung und der Pins erfolgt die Balancierung der Weichteile und das Einsetzen der Endoprothesenteile in herkömmlicher Technik.

Material und Methoden

Die Entwicklung der Knie-TEP-Applikation für das CASPAR-System erfolgte unter klinischer Leitung unserer Klinik. Seit 1999 wurde das System

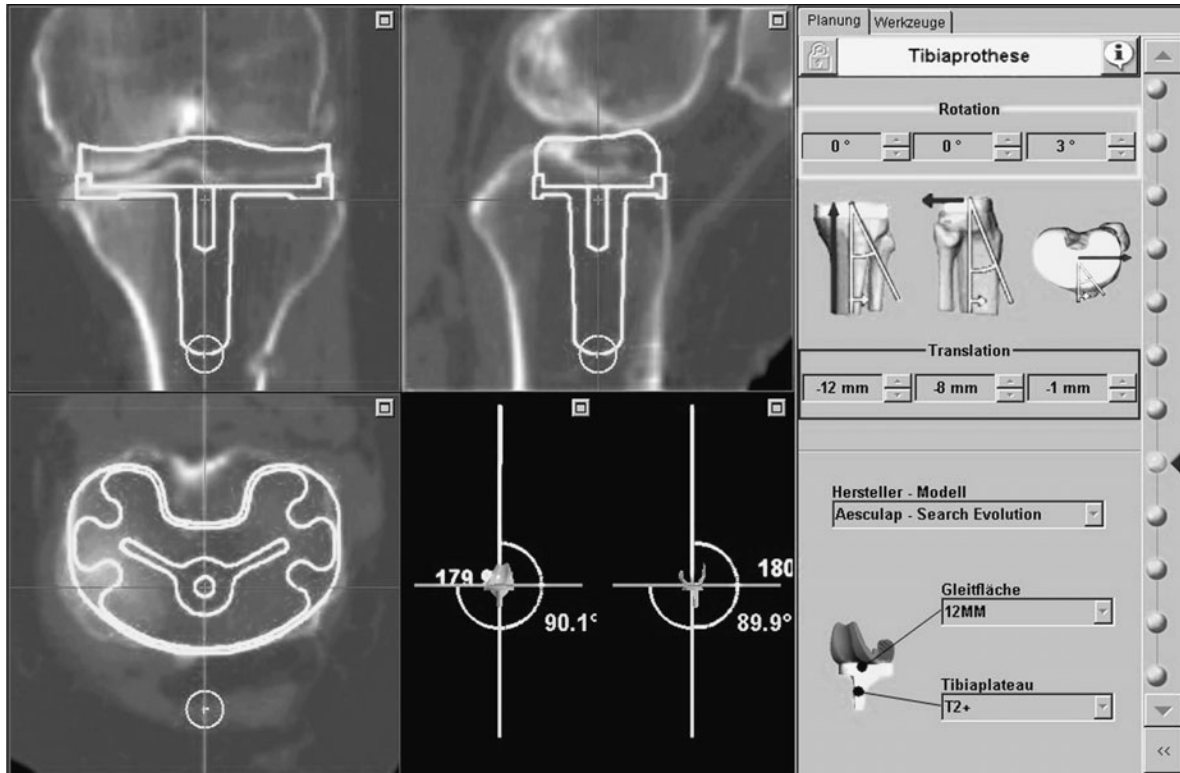


Abb. 1. Dreidimensionale Planung Tibiaendoprothese

zunächst an künstlichen, dann an humanen Knochen erprobt und das Verfahren standardisiert. Am 27. 3. 2000 wurde in unserer Klinik die erste roboterassistierte Knie-TEP problemlos implantiert. Bis August 2001 wurden im Rahmen einer klinischen Studie 70 roboterassistierte Knieendoprothesen bei 69 Patienten (48 Frauen, 21 Männer), mit einem Durchschnittsalter von 66 Jahren (46–87 Jahre) eingesetzt. Eine Patientin, die beidseitig unter erheblichen Arthrosebeschwerden litt, erhielt eine beidseitige roboterassistierte Knie-TEP in einer Sitzung. Als Kontrollgruppe diente eine Gruppe von 52 Patienten (40 Frauen, 12 Männer) die im gleichen Zeitraum mit der traditionellen Technik operiert wurden. Die Indikation war in allen Fällen eine idiopathische Gonarthrose (Abb. 3). In der Robotergruppe wurde das LC Search Evolution Kniesystem (Aesculap, Tuttlingen) eingesetzt. Zu Beginn stand nur dieses Implantat für das Robotersystem CASPAR zur Verfügung. In der traditionellen Gruppe wurde das NexGen Kniesystem (Zimmer Inc., Warsaw, IN, USA) verwendet.

Ziel der Studie war es, etwaige Komplikationen der roboterassistierten Technik zu erkennen und einen Nachweis der Präzision und Repro-

duzierbarkeit zu führen. Hierzu wurden bei allen Patienten prä- und postoperativ Ganzbeinaufnahmen im Stehen angefertigt und die mechanische Achse vermessen. Der postoperativ erreichte Ist-Wert der mechanischen Achse wurde jeweils mit dem präoperativen Soll-Wert verglichen. Zur weiteren Beurteilung wurden in regelmäßigen Intervallen von allen Patienten der KSS (Knee Society Score) und der HSS (Hospital for Special Surgery Score) erhoben.

Ergebnisse

■ Allgemeine Beobachtungen und Komplikationen.

Die Operationsdauer für die ersten 70 mit dem Roboter operierten Patienten betrug im Mittel 135 Minuten (80–220). Nach einer deutlichen Lernkurve des gesamten Op-Teams betragen die Operationszeiten jetzt regelmäßig ca. 2 Stunden.

Auffällig war in der frühpostoperativen Phase eine geringere Weichteilschwellung und eine bessere Beweglichkeit in der Robotergruppe gegenüber herkömmlich operierten Patienten. Um die volle Beweglichkeit wieder herzustellen, wurde



Abb. 2. Operationsroboter CASPAR, Op-Aufbau mit passiven Navigationsmarkern

bei 7 Patienten in der Robotergruppe und bei 2 Patienten in der Kontrollgruppe eine Narkosemobilisation des Kniegelenks durchgeführt. Bei Entlassung konnten alle Patienten das Knie voll strecken und mindestens 90° beugen.

Durch den Einsatz des Roboters wurden in keinem Fall schwere Komplikationen verursacht. Bei einem Patienten trat ein mechanisches Problem an einem Pin auf, wodurch die Registrierung verfälscht wurde und eine geringe Fehlfräsung des Femurs resultierte, die manuell ausgeglichen werden konnte. Infolge von Osteoporose lockerte sich ein Pin an der Tibia, sodass die Operation manuell beendet wurde.

Drei Patienten hatten Zeichen einer oberflächlichen Wundinfektion im Bereich der Pineintrittsstellen, die sich unter konservativen Maßnahmen rasch zurückbildeten, einmal musste revidiert werden. Es sind ausschließlich Patienten, bei denen die Schrauben über einen separaten Schnitt eingebracht wurden. Die Technik wurde später dahingehend verändert, dass die Inzisionen im Bereich des Op-Zugangs lagen. Es entstand eine Hautnekrose bei einer Patientin mit einer Adipositas permagna. An den Eintrittsstellen der Schanz'schen Schrauben traten zu keiner Zeit Beschwerden auf. Bei einem Patienten trat ein halbes Jahr postoperativ ein Spätinfekt auf, der mit einmaliger Spülung und Antibiose ausheilte. Bei der Jahreskontrolle war er beschwerdefrei bei reizlosen Verhältnissen.

Unter einer tiefen Beinvenenthrombose litten zwei Patienten.



Abb. 3. Gonarthrose, präoperatives Bild – Operationsergebnis mit korrektem Sitz des Implantates

Femorotibialer Winkel	CASPAR (70 P)	Manuell OKK (52 P)
0 – 2 °	97,2 %	69 %
3 °	2,8 %	
> 3 °	--	31 %
Standardabweichung	1 °	2,2 °
Mittlere Abweichung geplante/erreichte Achse	0,8 °	2,6 °

Abb. 4. Auswertung der mechanischen Beinachse. Vergleich Roboter assistiert und manuell

■ **Messung der mechanischen Achse.** Die mechanische Kniegelenksachse wurde in der Regel auf einen tibiofemorale Winkel von 0° geplant. Lediglich bei einem Patienten in der Robotergruppe mit einer Varusdeformität von 20° wurde ein Varuswinkel von 3,7° geplant, um eine übermäßige Knochenresektion zu vermeiden und eine ausreichende Bandspannung zu erhalten. Der Vergleich zwischen präoperativ geplanter Achse und postoperativem Ergebnis zeigte eine mittlere Abweichung von 0,8° (0–3°) in der Robotergruppe und von 2,6° (0–7°) in der Kontrollgruppe. Die Verteilung der Varus- und Valgusabweichungen vom geplanten Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Unterschied zwischen beiden Gruppen war signifikant ($p < 0,0001$).

■ **Funktionsscore/Assessment.** Die Nachuntersuchungen nach 3, 6 und 12 Monaten zeigten radiologisch in keiner Gruppe sichtbare Veränderungen der Implantatlage. Die Werte des Knee Society Scores (KSS) waren in beiden Gruppen vergleichbar ohne signifikante Unterschiede (Abb. 5 a, b).

Schlussfolgerungen

Durch den Einsatz des CASPAR-Systems lassen sich sehr gute Operationsergebnisse erzielen insbesondere bezüglich der Implantatlage. Ein wesentlicher Bestandteil ist die exakte präoperative Planung, bei der alle Achsen und Winkel, Rotationen und Kippungen berücksichtigt werden. Diese Planung, die in Ruhe am Rechner durchgeführt werden kann, wird dann während der Operation zuverlässig und präzise umgesetzt. Intra- oder extramedulläre Orientierungshilfen, die auch bei sorgfältiger Handhabung eine gewisse Ungenauigkeit beinhalten, entfallen komplett.

Durch die genaue Festlegung der Fräsbahn und der Fräsart besteht eine hohe Sicherheit

bezüglich der Verletzungsgefahr von Weichteilen, insbesondere der Seitenbänder, Gefäße und Nerven, die beim Sägen mit den herkömmlichen oszillierenden Sägeblättern durchaus in Mitleidenschaft gezogen werden können. Der Knochenblock, in den das hintere Kreuzband einstrahlt, kann sicher erhalten werden. Aufgrund der Frästechnik sind die Fräsflächen absolut plan, sodass die Implantate perfekt sitzen, was gerade bei zementfreien Systemen Voraussetzung ist. Der Knochenverlust kann auf ein Mindestmaß reduziert werden. Sollte die Fräsung aus irgendeinem Grunde abgebrochen werden müssen, kann jederzeit auf die manuelle Methode umgestiegen werden, wobei am Femur bereits die erste Fräsung zum Anlegen der Schablone verwendet werden kann.

Schwierigkeiten können sich ergeben bei sehr straffen Verhältnissen im Bereich des Quadriceps und der Patellarsehne, da die Patella zur Fräsung des vorluxierten Tibiaplateaus ausreichend nach lateral weggehalten werden muss. Hierzu könnte ausnahmsweise ein Quadriceps snip-Zugang erforderlich werden.

Die ipsilaterale Hüfte muss eine Beugung von ca. 50° erlauben, um das Bein in der Halterung zu stabilisieren. Bei der Handhabung dieses inzwischen bereits deutlich verbesserten Halteapparates ist durchaus noch Zeit im Op-Ablauf einzusparen, sodass wir hoffen, mit der Operationsdauer bald regelmäßig im Bereich der üblichen Op-Zeiten für Knie-TEPs zu liegen.

Ausblick für die Robotik

Im Vergleich mit der traditionellen Technik erfordert der Einsatz eines Roboters derzeit noch einen höheren zeitlichen und finanziellen Aufwand. Eine deutliche Zeitersparnis und Komfortsteigerung für den Patienten ließen sich bei pinfreier Registrierung erreichen. An dieser Technik wird derzeit mit Nachdruck gearbeitet. Auf jeden Fall darf eine pinfreie Technik nicht auf Kosten der Präzision gehen. Derzeit kann auf das Planungs-CT noch nicht verzichtet werden; denkbare Alternativen für die Zukunft bieten sich an in der 3-D-Bildwandlertechnik, NMR oder Sonographie. Der erhöhte finanzielle Aufwand ist zu rechtfertigen, wenn die Langzeitergebnisse wie gehofft durch die gesteigerte Präzision eine Verlängerung der Standzeit ergeben.

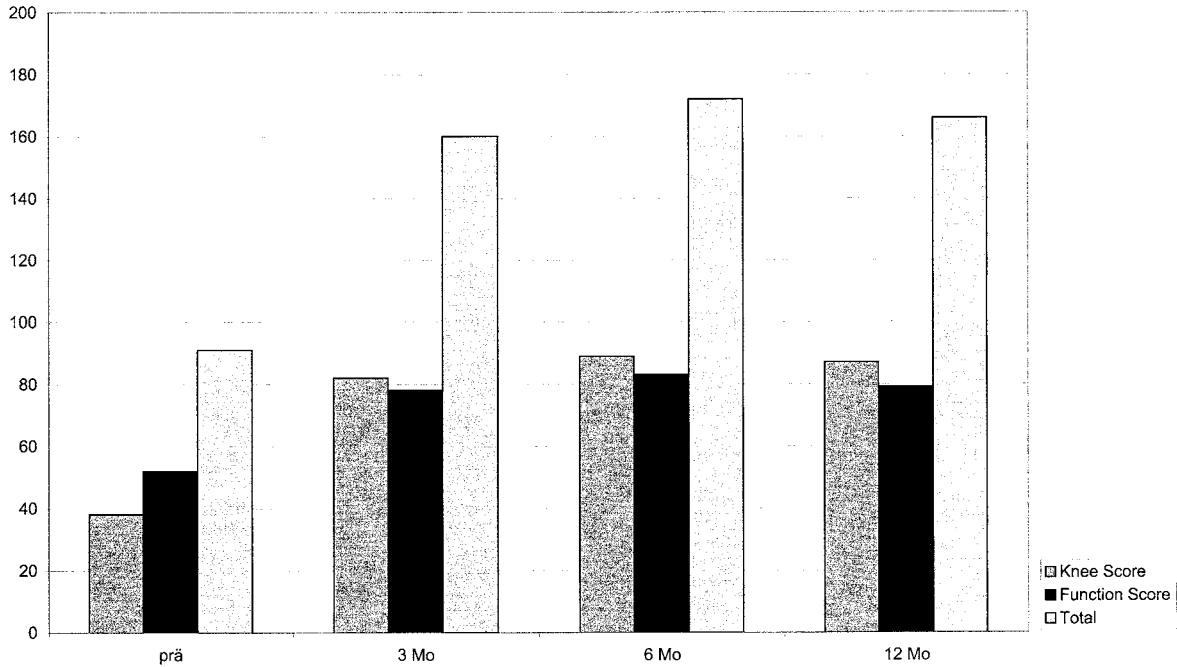


Abb. 5a. Knee Society Score CASPAR-Gruppe

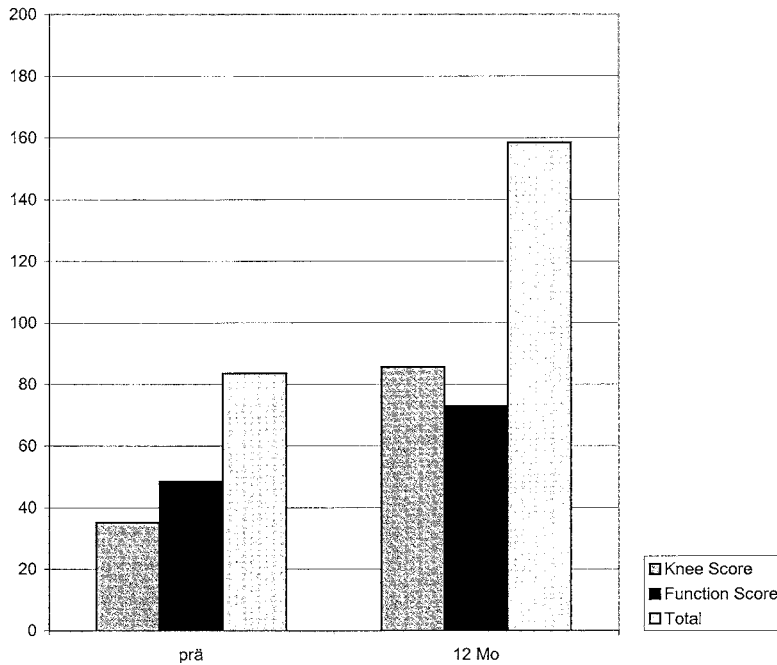


Abb. 5b. Knee Society Score Manuelle Gruppe

Durch die Möglichkeit der dreidimensionalen Planung unter Berücksichtigung aller Winkel und Achsen erkennt man jetzt schon deutlich die Unzulänglichkeiten bestehender Endoprothesensysteme. Man ist geneigt, sich aus mehreren Systemen das individuell für den jeweiligen

Patienten geeignetste Implantat auszusuchen bzw. die Systeme zu verbessern, damit sie mit der Präzision der Planung und ihrer Umsetzung bei der Implantation Schritt halten können. In den Vordergrund rückt bei zementfreien Implantaten erneut die Diskussion über die Ober-

flächenbeschichtung: Hydroxylapatit oder Porous coated. Diese Unterschiede müssen in prospektiven, zuverlässigen Studien evtl. einschließlich Migrationsmessungen unter Einschluss der Radiostereometrischen Analyse (RSA) eruiert werden.

Für die Zukunft stellen wir uns weiterhin vor, dass Operations-Roboter mit Navigationssystemen kombiniert werden, um die Vorzüge aller computerassistierten Systeme auszuschöpfen und einen perfekten Sitz der Implantate bei idealen Bandverhältnissen zu erreichen. Durch den Einsatz präziser Robotertechnik wären auch minimal invasive Operationszugänge bei der Kniegelenksprothetik denkbar. So ließen sich z. B. einseitig oder beidseitig unicondyläre Schlittenprothesen über minimale Hautinzisionen einbringen, da ein breites Freilegen des Operationsfeldes wie bei der herkömmlichen Technik nicht notwendig ist.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass sich die roboterassistierte Knieendoprothetik noch am Anfang einer vielversprechenden Entwicklung befindet. Die Technik ermöglicht schon heute eine reproduzierbar präzisere Implantation durch die Möglichkeit der präoperativen dreidimensionalen Planung und der exakten Umsetzung dieser Planung durch den Roboter. Ob sich diese Vorteile langfristig für den Patienten auszahlen, werden Langzeitstudien ergeben.

Navigationssysteme

Über Navigationssysteme in der Knieendoprothetik haben in diesem Buch R. Mielke aus Sendenhorst für das Orthopilot-System und K.P. Günther aus Ulm für das NavitracTM-System bereits berichtet. Wir haben selbst auch Erfahrungen mit dem Orthopilot-System, das in dem Beitrag von Mielke umfassend dargestellt ist und verzichten deshalb hier auf die Darstellung unserer Erfahrungen mit dem Orthopilot-System.

Wie für die Robotik ist auch für die Navigation die Verbesserung der Implantationsqualität und der Operationsplanung das entscheidende Argument, um einen derartigen Einsatz mit erhöhtem technischen Aufwand und durchaus auch verlängerter Operationszeit zu erwägen. Wie in der Einleitung ausgeführt, lässt es sich ja zeigen, dass frühzeitiges Implantatversagen direkt mit der Implantationsqualität korreliert. Es sind also alle Bemühungen um eine optimale

Implantation der Knieendoprothesen äußerst sinnvoll, und hierzu können natürlich Navigationssysteme allein, aber auch in Kombination mit Fräsrobotern sicherlich in der Zukunft hilfreich eingesetzt werden und verbesserte Ergebnisse erbringen.

F. Picard hat eine sinnvolle Einteilung für computerassistierte Kniechirurgie [23] hinsichtlich Robotik und Navigation auf dem CAOS-Kongress in Davos 07. bis 10. Februar 2001 vorgeschlagen:

1. Robotersysteme

- 1.1 Aktive Robotersysteme
- 1.2 Semi-aktive Robotersysteme
- 1.3 Passive Robotersysteme

2. Navigationssysteme

- 2.1 Systeme zur präoperativen Planung mit dreidimensionalen CT- oder MRI-Daten
 - 2.1.1 Systeme, die patientenspezifische Daten einsetzen
 - 2.1.2 Systeme, die allgemeine, nichtpatientenspezifische Daten für die Modellgenerierung verwenden
- 2.2 Navigationssysteme zur intraoperativen Planung und Navigation
 - 2.2.1 Intraoperative Systeme, die durch intraoperative Bildgebung, insbesondere durch Röntgen-/Bildwandlerdaten, unterstützt werden
 - 2.2.2 Kinematische Systeme, die durch intraoperative Digitalisierung, teils mit Oberflächen-Erfassung, ein Bild von der Patienten-anatomie aufbauen.

Die Stereotaxie in der Neurochirurgie muss als direkter Vorläufer unterschiedlichster Navigationssysteme verstanden werden. Die ersten chirurgischen Navigationssysteme basierten auf CT-gesteuerten Datensätzen und erforderten eine präoperative Computertomographie. Kinematische und intraoperative Techniken mit Oberflächenmatching sowie der Abgleich mit Bildwandler-Techniken entwickelten sich zeitlich danach später, um die Methodik zu vereinfachen und kostengünstiger zu gestalten.

In der Kniechirurgie und bei der Implantation von Knieendoprothesen sind die verschiedensten Techniken im Moment noch parallel nebeneinander in der klinischen Erprobung und in der Weiterentwicklung. Durch CT und MRI steht uns eine große Flut von präoperativen Daten zur Verfügung, deren Übertragung in intraoperative Informationsquellen aber bisher

noch nicht vollständig gelöst ist. Hier haben die obengenannten Systeme, insbesondere natürlich auch die Navigation, begonnen in der orthopädischen Chirurgie Lücken zu schließen und Verbesserungen herbeizuführen [12].

Der Weg, im CT oder MRI zu operieren, hat sich bisher nicht zuletzt aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten und räumlichen Schwierigkeiten nicht durchgesetzt. Die Navigation und ggf. auch die Robotik oder die Kombination von Navigation und Robotik könnten hier eine einfache Handhabbarkeit der wertvollen Daten aus den dreidimensionalen Schnittbildverfahren ermöglichen.

Das hier in diesem Buch beschriebene Orthopilot-System als vergleichsweise einfaches Navigationssystem [15] verzichtet auf CT- und MRT-Daten, die präoperativ erhoben würden. Es bietet damit natürlich sowohl in zeitlicher Hinsicht als auch hinsichtlich der Belastung des Patienten und der Kosten eine relativ günstige Lösung. Andererseits bedeutet dieser Verzicht auf präoperativ erhobene 3-dimensionale Daten eine Einschränkung der präoperativen Planungsmöglichkeit.

Bei jedem Navigationssystem ist es notwendig, die Instrumente zu kalibrieren, eine Registrierung des Bilddatensatzes durchzuführen und eine Referenzierung anzuschließen. Ziel der Registrierung ist es, das tatsächlich zu operierende Knie und das virtuelle Knie in Übereinstimmung zu bringen, sodass mit Hilfe des Navigators dann operative Maßnahmen sicher gesteuert werden können.

Für die praktische Anwendung besteht kein wesentlicher Unterschied bei den verfügbaren Systemen, ob passive Markersysteme eingesetzt werden, die über keinerlei Kabel verfügen und dadurch auch intraoperativ leichter zu handhaben sind (Abb. 6) oder ob aktive optoelektronische Navigationssysteme eingesetzt werden, die alle Instrumente mit mehr oder weniger rigiden Kabeln verbunden haben (Abb. 7), womit sich verschiedenste Eingriffe navigieren lassen.

Von weiterer Bedeutung für die praktische Durchführung ist, ob präoperative CT-Daten eingesetzt werden müssen oder ob diese aufgrund der kinematischen Systeme oder einer intraoperativen Abgleichung mit Röntgen-/Bildwandlerdaten nicht erforderlich sind. Bei den rein intraoperativ eingesetzten Systemen ist, wie oben bereits ausgeführt, eine präoperative Planung natürlich mit diesen Daten nicht möglich.

Dies kann von Nachteil sein, insbesondere bei komplexen Aufgaben an der Wirbelsäule,



Abb. 6. BrainLab Vector Vision – Universalnavigationsgerät

vor allem der Halswirbelsäule. Andererseits ist der technische, finanzielle und zeitliche Aufwand deutlich geringer, wenn auf präoperative Datengewinnung durch CT oder Kernspin verzichtet werden kann.

Der intraoperative Abgleich bietet andererseits große Vorteile, da durch veränderte Lagerung, veränderte Oberflächenstrukturen nach operativen Maßnahmen und durch den Fortgang der Operation ein Zustand eingetreten sein kann, der mit den präoperativen Daten nur noch bedingt übereinstimmt.

Letzten Endes müssen die Systeme im weiteren Verlauf zeigen, was klinisch wirklich für eine Verbesserung der Ergebnisse erforderlich ist und eingesetzt werden muss. Eine Vielzahl von Studien wird dies in der Zukunft zeigen müssen. Bei allen Navigationssystemen ist es wünschenswert, wenn der Chirurg völlig frei bleibt in der Wahl der zu verwendenden Implantate und sich das System ausschließlich auf die Navigationstechnologie fokussiert.

Ein modularer Aufbau erscheint ebenso sinnvoll, um die raschen Veränderungen sowohl in Software- als auch Hardware-Bestandteilen einfach integrieren zu können und um auch andere Anwendungen am Bewegungsapparat nicht nur in der Knieendoprothetik, sondern auch bei der Kreuzbandchirurgie [2, 22], bei Hüft- und Wirbelsäulenproblemen und bei vielen anderen Fragestellungen mit dem gleichen System durchführen zu können.

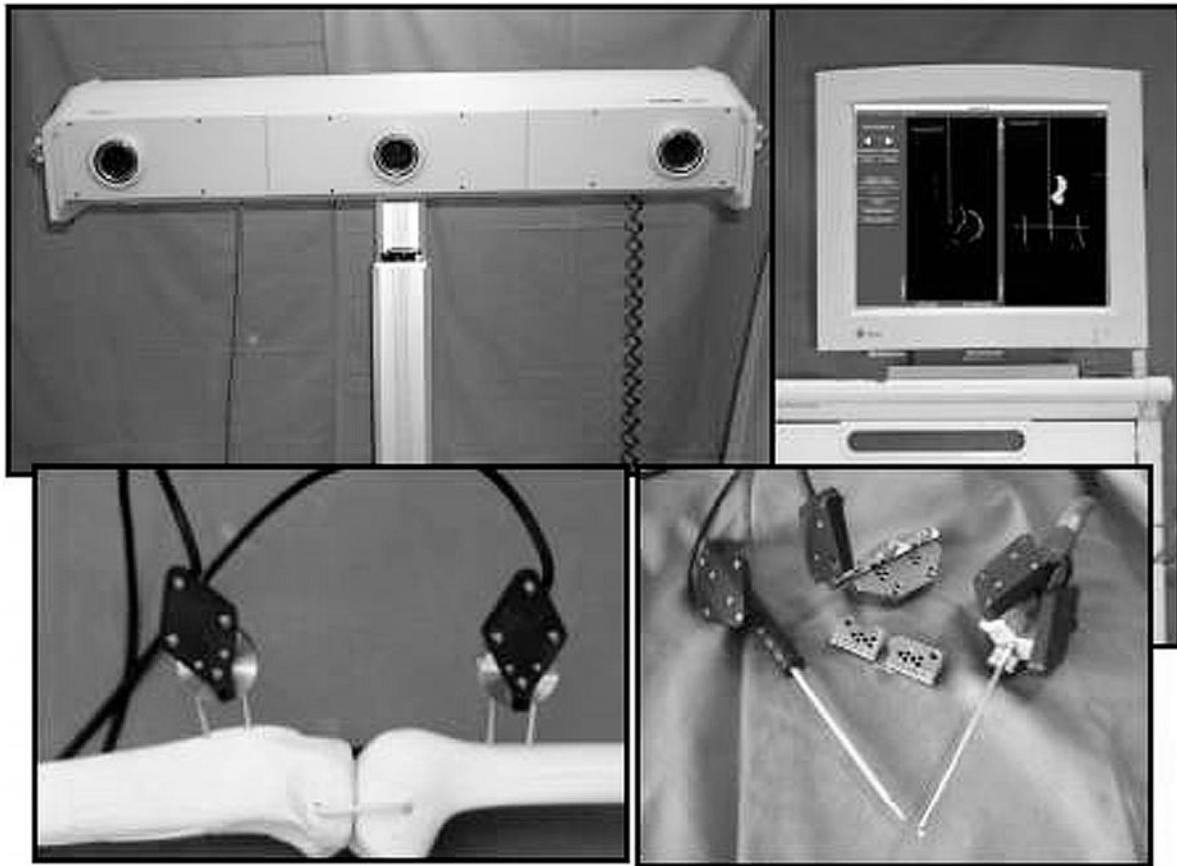


Abb. 7. Medivision Opto Trak Kamera, Light Emitting Diodes (LED) mit Kabeln, Computer, Instrumente mit Kabeln

Die Schulung des Op-Personals, der Umgang mit dem System und die Handhabung präoperativ und insbesondere im Operationssaal werden dadurch erheblich erleichtert. Dies sollte nicht zu gering eingeschätzt werden, da hier durchaus Motivationsprobleme bestehen können.

Inwieweit eine Touchscreen-Technologie, die der Operateur steril mit ablauforientierter Software selbst bedienen kann, vorteilhaft ist, muss auch die weitere Entwicklung zeigen. Aber oft ist es dadurch möglich, weiteres Personal im Op-Saal einzusparen.

Es erscheint insbesondere wichtig, das gewohnte Instrumentarium weiterverwenden zu können, es binnen kurzer Zeit einzulesen und – wenn möglich – doch mit passiven Markern nutzen zu können, damit der Umstand der vielen sich überkreuzenden Kabel oder die Anschaffung von teuren Spezialinstrumentarien vermieden werden kann.

Wenn eine intraoperative Bildwandlerkontrolle oder Datenergänzung wichtig, sinnvoll und wünschenswert erscheint, so sollte dies mit han-

delsüblichen Bildwandlern, die einen entsprechenden Registrierungsaufsatz erhalten, durchführbar sein. Die Kosten, die mit Navigation und Anschaffung eines Navigationssystems verbunden sind, könnten sonst ins nicht mehr Kalkulierbare wachsen.

Die Vergleichsstudie der intraoperativen Navigation zu konventionellen Operationsverfahren und zu der Robotik ist aufgrund der eingesetzten neuen Systeme erst angelaufen. Eingesetzt wird hier wie in der konventionellen Operationsmethodik das Zimmer-Nex-Gen-Knietotalendoprothesen-System. Sowohl eine CT-basierte dreidimensionale Planung als auch eine intraoperative Technik mit Oberflächenmatching und Bildwandler-technologie kommen zum Einsatz und werden vergleichend prospektiv untersucht.

Die angelegten Kriterien sind identisch zu denen, die bei der roboterassistierten Implantation von Knietotalendoprothesen eingesetzt wurden. Entsprechende Scores und Nachuntersuchungsprotokolle kommen zum Einsatz, sodass im weiteren Verlauf ein Vergleich der Ergebnisse und

des damit verbundenen Aufwandes und der Kosten möglich sein wird. Eine Aussage ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich.

Für das Robotersystem spricht die hohe Präzision durch Übertragung der präoperativen Planung in die operative Situation; für die Navigationssysteme sprechen zum jetzigen Zeitpunkt vor allem die Vielseitigkeit, die es erlaubt, Navigation bei Endoprothetik von Knie und Hüfte, in der Wirbelsäulenchirurgie, in der Traumatologie und in der allgemeinen Orthopädie, insbesondere auch in der Sportorthopädie mit dem selben System durchzuführen. Mit dem uns im Moment zur Verfügung stehenden BrainLab-System lässt sich sowohl die präoperative Planung oder die intraoperative Planung und Navigation durchführen, es können entsprechende Implantate aus der Implantatdatenbank optimal dazu ausgesucht werden, das Planungsergebnis wird in den operativen Situs übertragen, dreidimensionale Schneideblock-Positionierung und fortlaufende intraoperative Kontrollen versprechen eine hohe Präzision bei vertretbarem zeitlichen Mehraufwand zum jetzigen Zeitpunkt. Da der Operateur durch die Touchscreen-Technik selbst direkt die einzelnen Schritte am Bildschirm steuern kann, ist der personelle Aufwand identisch mit dem Aufwand bei einer sonst üblichen Knieendoprothesen-Implantation.

Inwieweit die Ergebnisse mit der intraoperativen Bildwandler-Registrierung ebenso gut sind wie wenn präoperative CT-Daten eingesetzt werden, müssen die prospektiven Studien zeigen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass ständige Verbesserungen der Qualität und die Qualitätskontrolle in der operativen Medizin und insbesondere in der orthopädischen Chirurgie uns dazu geführt haben, auch in der Knieendoprothetik computerassistierte Operationsmethoden einzusetzen, zu prüfen und zu perfektionieren. Die Entwicklung steht noch immer am Anfang, aber es ist absolut sicher, dass in der Vereinheitlichung und Verbesserung der intraoperativen Qualität die größten Potentiale für eine Verbesserung der Langzeithaltbarkeit von künstlichen Gelenken liegen [23]. Minimierung der intraoperativen Risiken, absolut präzise Funktion der neuen Implantate über einen möglichst langen Zeitraum bei vertretbarer Patientenmehrbelastung muss das Ziel sein, mit dem wir die neuen Systeme perfektionieren werden.

Ob eine Kombination aus Navigation und Robotik dabei entsteht oder sich lediglich die

höhere Präzision der Navigationssysteme – in welcher Form auch immer – in der Zukunft durchsetzen wird, muss durch wissenschaftliche Untersuchungen und prospektive Studien herausgearbeitet und ggf. für unterschiedliche Fragestellungen auch unterschiedlich beantwortet werden. Mag im einen Fall die intraoperative Navigation mit Oberflächenmatching oder kinematischen Daten ausreichend sein, so ist vielleicht im anderen Fall eine präoperative dreidimensionale Planung auf Computertomographiebasierten Daten ebenso erforderlich wie die exakte intraoperative Fräsung durch einen Fräse-roboter. Die vielfältigen Möglichkeiten, die computerassistierte Operationstechniken uns heute bieten, werden sich ebenso vielfältige Anwendungen erobern.

Literatur

1. Aglietti P, Buzzi R (1988) Posteriorly stabilised total-condylar knee replacement. *J Bone Joint Surg* 70B:211–216
2. Bernsmann K, Rosenthal A, Sati M, Stäubli HU, Cassens J, Mentrey J, Wiese M (2001) Multicentererfahrungen mit einem System zur computerassistierten vorderen Kreuzbandrekonstruktion. *Orthopädische Praxis* 37(1):1–5
3. Duffy GP (1998) Cement versus cementless fixation in total knee arthroplasty. *Clinical Orthop Relat Res* 356:66–72
4. Ecker ML, Lotke PA, Sindsor RE, Cella JP (1987) Long-term results after total condylar knee arthroplasty. Significance of radiolucent lines. *Clin Orthop* 216:151–158
5. Feng EL, Stuhlberg SD, Wixon RL (1994) Progressive subluxation and polyethylene wear in total knee replacements with flat articular surfaces. *Clin Orthop* 299:60–71
6. Gebhard F, Kinzl L, Arand M (2000) Computerassistierte Chirurgie. *Unfallchirurg* 103:612–617
7. Goodfellow JW, O'Connor JJ (1986) Clinical results of the Oxford knee. *Clin Orthop* 205:21–24
8. Heeckt PF, Ruehl M, Buchhorn G et al (1999) Computer Assisted Surgical Planning and Robotics mit dem CASPAR-System. In: Jerosch J, Nicol K, Peikenkamp K (eds) *Rechnergestützte Verfahren in Orthopädie und Traumatologie*. Steinkopff, Darmstadt, pp 414–433
9. Howe RD, Matsuoka Y (1999) Robotics for surgery. *Annu Rev Biomed Eng* 1:211–240
10. Insall JN, Binzzir R, Soudry M, Mestriner LA (1985) Total knee arthroplasty. *Clin Orthop* 192:13–22
11. Jeffery RS, Morris RW, Denham RA (1991) Coronal alignment after total knee replacement. *J Bone Joint Surg* 73B:709–714

12. Langlotz F, Nolte LP (1999) Intraoperative Navigationssysteme. In: Jerosch J, Nicol K, Peikenkamp K (eds) *Rechnergestützte Verfahren in Orthopädie und Traumatologie*. Steinkopff, Darmstadt, pp 399–461
13. Laskin RS (1990) Total condylar knee replacement in patients who have rheumatoid arthritis. A ten year follow-up study. *J Bone Joint Surg* 72A:529–535
14. Malzer U, Schuler P (1998) Die Komponentenausrichtung beim Oberflächenersatz des Kniegelenkes. *Orthopädische Praxis* 3:141–146
15. Mielke RK, Clemens U, Jens JH, Kershally S (2001) Navigation in der Knieendoprothetik – vorläufige klinische Erfahrungen und prospektiv vergleichende Studie gegenüber konventioneller Implantationstechnik. *Z Orthop* 139:109–116
16. Nuo-Siebrecht N, Tanzer M, Bobynd JD (2000) Potential errors in axial alignment using intramedullary instrumentation for total knee arthroplasty. *J Arthroplasty* 15:228–230
17. Petermann J, Kober R, Heinze R, Frölich JJ, Heeckt PF, Gotzen L (2000) Computer-assisted planning and robot-assisted surgery in anterior cruciate ligament reconstruction. *Operat Techn Ortho* 10:50–55
18. Petersen TL, Engh GA (1988) Radiographic assessment of knee alignment after total knee arthroplasty. *J Arthroplasty* 3:67–72
19. Picard F, Leitner F, Raoult O, Saragaglia D (1999) Computer Assisted Total Knee Arthroplasty. In: Jerosch J, Nicol K, Peikenkamp K (eds) *Rechnergestützte Verfahren in Orthopädie und Traumatologie*. Steinkopff, Darmstadt, pp 461–471
20. Ranawat CS, Adjei OB (1988) Survivorship analysis and results of total condylar knee arthroplasty. *Clin Orthop* 323:168–173
21. Ritter M, Merbst WA, Keating EM, Faris PM (1991) Radiolucency at the bone-cement interface in total knee replacement. *J Bone Joint Surg* 76A:60–65
22. Sati M, Stäubli HU, Bourquin Y, Kunz M, Käsermann S, Nolte LP (2000) Clinical integration of computer-assisted technology for arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction. *Operat Techn Ortho* 10:40–49
23. Siebert W (2002) Heutiger Stellenwert der intraoperativen Navigation und der roboterassistierten Operationstechnik in Orthopädie und Traumatologie. In: Laubach E, Mau F, Mau Th (eds) *Medizin im 21. Jahrhundert*. Springer, Berlin, pp 305–322
24. Stern H, Insall JN (1992) Posterior stabilized Prosthesis. *J Bone Joint Surg* 74A:980–986
25. Tew M, Waugh W (1985) Tibiofemoral alignment and the results of knee replacement. *J Bone Joint Surg* 67B:551–556