

Qualitätssteigerung in der präoperativen Planung und intraoperativen Umsetzung durch die Verwendung von computerassistierten Systemen und Operationsrobotern – eine experimentelle Untersuchung

J. Jerosch¹, Ch. v. Hasselbach³, T. Filler², E. Peuker², M. Rahgozar¹ und A. Lahmer⁴

¹ Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

² Institut für Anatomie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

³ Arthro-Klinik, Essen

⁴ BG-Unfallklinik, Frankfurt/Main

Increase of quality in preoperative planning and intraoperative handling by the use of computer-assisted surgery and a surgical robot – an experimental study

Summary. 14 human femurs were scanned by CAT and 3D reconstructed. In every specimen digital documentation of CCD and antetorsion (AT) angle was performed. With a special software package (Orthodoc) virtual preoperative planning for implantation of a cementless total hip alloplasty was undertaken. The specimens were randomised into two groups, one of which had manual and the other one robot implantation of the femoral component. After implantation all specimens were evaluated again by CAT and CCT and AT angle were documented again. The preoperative CCD angle was 126.7° (SD = 4.0) in the manual group and 127.8° (SD = 4.3) in the robodoc group. Postoperatively the angle averaged 131.9° (SD = 0.8) in the manual group and 133.2° (SD = 1.9) in the robodoc group. Significant differences were found for the AT angle in both groups. The preoperative AT angle in the manual group was 31.3° (SD = 8.8), decreasing to 20.5° (SD = 9.5) after implantation. In the robodoc group this angle was 30.9° (SD = 8.0) before and 31.3° (SD = 8.7) after implantation. The difference between pre- and postoperative AT angle averaged 10.8° (SD = 6.4) in the manual group and only 0.4° (SD = 0.9) in the robodoc-group. *Conclusion:* With the technique used, preoperative planning in hip alloarthroplasty is much more accurate than with the conventional technique with plain X-ray. The virtual preoperative planning can be transferred to the intraoperative setting with high precision. These factors may lead to an increase in outcome quality.

Key words: Computer-assisted orthopaedic surgery – Pre-operative planning – Total hip replacement surgery.

Zusammenfassung. Von 14 humanen Femura wurden anhand von CT-Daten dreidimensionale Rekonstruktionen durchgeführt. An jedem Präparat erfolgte die digitale Dokumentation des Centrum-Collum-Diaphy-

sen(CCD)- und Antetorsionswinkels (AT). Mit Hilfe eines speziellen Operationsplanungsprogramms wurde für jeden Femur eine virtuelle Operationsplanung für die Implantation einer zementfreien Hüftendoprothese durchgeführt. Die so ermittelten Endoprothesen wurden – nach randomisierter Zuweisung von je 7 Femura zu den Gruppen standardisiert manuelle bzw. roboterassistierte Implantation – eingebracht. Anschließend wurden alle Präparate wiederum computertomographisch erfasst und unter Verwendung eines artefaktunterdrückenden Algorithmus dreidimensional rekonstruiert. Die präoperativ dokumentierten Parameter wurden anschließend erneut ermittelt. Der Mittelwert der CCD-Winkel betrug präoperativ in der manuellen Gruppe 126,7° (SD = 4,0) und in der Robotergruppe 127,8° (SD = 4,3). Postoperativ änderte er sich in der 1. Gruppe im Mittel auf 131,9° (SD = 0,8) und in der 2. Gruppe auf 133,2° (SD = 1,9). Signifikante Unterschiede ergaben sich beim AT-Winkel. Dieser betrug in der manuellen Gruppe präoperativ 31,3° (SD = 8,8) und lag postoperativ lediglich noch bei 20,5° (SD = 9,5). In der Robotergruppe lag dieser Winkel vor der Implantation bei 30,9° (SD = 8,0) und nach der Implantation bei 31,3° (SD = 8,7). Die Betragsdifferenz zwischen prä- und postoperativem AT-Winkel betrug in der manuellen Gruppe 10,8° (SD = 6,4) und in der Robotergruppe 0,4° (SD = 0,9; $p = 0,01$). *Fazit:* Mit der verwendeten Technologie ist eine weitaus exaktere Berechnung möglich als mit den bisherigen, allein auf Röntgenbildern basierenden Operationsplanungen. Die virtuelle Operationsplanung läßt sich mit Hilfe von Robotersystemen mit hoher Präzision umsetzen. Die verwendete Technik scheint in der Lage zu sein, eine Verbesserung in der Prozeß- und Ergebnisqualität mit sich zu bringen.

Schlüsselwörter: Computerassistierte Operation – präoperative Planung – Hüftendoprothetik.

Zur Qualitätssteigerung und Erhöhung der Präzision wurden in letzter Zeit im operativen Fachgebiet in un-

terschiedlichen Bereichen rechnergestützte Verfahren entwickelt und eingesetzt [1]. Kennzeichen dieser für den Operationsbereich neuen Techniken ist die bildgesteuerte Operation. Hierbei wird anhand präoperativ gewonnener Bilddaten eine für den Patienten individuelle Operationsplanung durchgeführt, der operative Eingriff oder Teilschritte davon an einem virtuellen Modell simuliert oder sogar der Operateur intraoperativ angeleitet. Für diesen letzten Schritt ist es notwendig, das Planungskoodinatensystem exakt auf das Patientenkoordinatensystem auf dem Operationstisch umzusetzen. Die intraoperative Steuerung erfolgt dann entweder passiv durch Anleitung des Operateurs anhand der präoperativen Planung oder sogar aktiv, indem ein halbautomatisches Gerät unter Aufsicht des Chirurgen einzelne Operationsschritte übernimmt.

Ein besonderer Entwicklungszweig sind hier computergesteuerte Operationsroboter, welche im Bereich der Neurochirurgie bereits eine gewisse Akzeptanz erfahren haben. Die Entwicklung derartiger Systeme in der Gelenkchirurgie begann 1986 durch die Zusammenarbeit des Thomas J. Watson-Untersuchungszentrums der Firma IBM (IBM Scientific Center) und der Davis-Universität in Kalifornien. Zur Optimierung der Implantation von Hüftalloarthroplastiken wurde von der Firma ISS (Integrated Surgical Systems, Sacramento, USA) ein neuartiges Planungs- und Operationssystem entwickelt [2, 7, 8, 10]. Primäres Ziel war hierbei die Erzielung eines größtmöglichen Knochen-Prothesen-Kontakts. Der Langzeiterfolg eines alloplastischen Hüftgelenkersatzes hängt neben dem Knochen-Prothesen-Kontakt und weiteren Faktoren unter anderem jedoch auch von der exakten physiologischen Ausrichtung der Prothese im Knochen, bezogen auf AT und CCD-Winkel (Varus- oder Valgusfehlstellungen) ab.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Möglichkeiten der rechnergestützten präoperativen Planung sowie die intraoperative Umsetzung dieser Planungsvorgaben durch einen Operationsroboter in einem experimentellen Versuchsaufbau zu überprüfen.

Material und Methodik

Von 14 humanen unfixierten Femura mit leichten bis mittelgradigen degenerativen Veränderungen wurden CT-Studien angefertigt. Diese CT-Daten wurden digitalisiert und mit Hilfe eines speziellen Operationsplanungssystems (Orthodoc, ISS, Sacramento) dreidimensional rekonstruiert. Für die präoperative Planung im Orthodoc-System wurden initial in jedem Präparat 2 Orientierungspins jeweils am Condylus medialis sowie anterior des Trochanter major eingebracht. Diese Markierungspins ermöglichen eine exakte Vermessung des Femur. Die anschließenden CT-Untersuchungen der so präparierten Femura begannen mit CT-Schnitten an der Oberseite des Femurkopfes mit einem geringen Tischvorschub von 3 mm bis hin zum Trochanter minor, um eine genaue Darstellung der knöchernen sowie corticospongiosen Strukturen zu erreichen. Eine noch höhere Auflösung wurde im Bereich des proximalen Orientierungspins verwendet (2-mm-Tischvorschub). Unterhalb des Trochanter minor wurde ein größerer Tischvorschub (6 mm) gewählt. Im Condylusbereich wurden nochmals Schnitte mit 2-mm-Tischvorschub gefahren, um den distalen Markierungspins exakt zu vermessen.

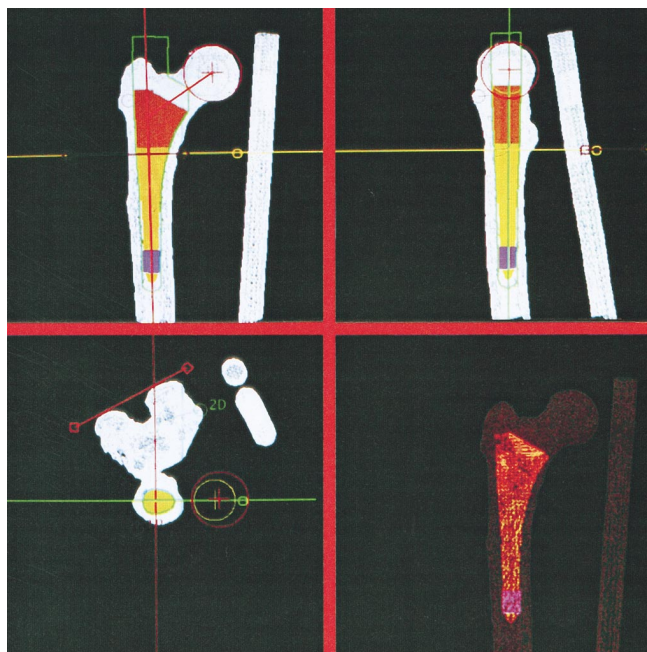


Abb. 1. Messung des CCD- und des AT-Winkels an der 3D-Rekonstruktion

Die so ermittelten CT-Daten wurden über einen Datenträger auf das Orthodoc-System übertragen. Aus diesen zweidimensionalen CT-Daten wurde eine 3D-Bildmatrix berechnet, welche auf einem hochauflösenden Grafikmonitor in 4 Fenstern dargestellt werden kann. Von jedem Femur wurden mittels digitaler Analyse CCD- und AT-Winkel, Kopfdurchmesser, Rotationszentrum, Halslänge und Schaftdurchmesser bestimmt (Abb. 1). Mit Hilfe eines speziellen Operationsplanungsprogramms wurde für jeden Femur eine virtuelle Operationsplanung für die Implantation einer zementfreien Hüftendoprothese (Precision Osteolock®, Howmedica) durchgeführt. Hierbei kann nach Auswahl des Prothesentyps und der Prothesengröße das ausgewählte Implantat virtuell dreidimensional bewegt und optimal platziert werden. Dieser Schritt der Operationsplanung nimmt 20–30 min in Anspruch. Der CCD-Winkel beim Osteolock®-Hüftsystem beträgt 135° bei den Standard-schäften und 132° bei den Schäften der X-Größen.

Anschließend wurden die Gruppen randomisiert in 2 Gruppen aufgeteilt. In einer Gruppe wurden die anhand der Operationsplanung ermittelten Femura manuell eingebracht (Gruppe: manuell). In der 2. Gruppen erfolgte die Implantation mit Hilfe eines Operationsroboters (Gruppe: Robodoc). Die CT-Daten und die Prothesenfräsdaten für die Robodoc-Gruppe wurde auf ein Datenband übertragen, welches zur Operation in den Rechner des Operationsroboters geladen wurde und damit den Fräsvorgang steuerte. Alle Knochen wurden zunächst in gleicher Weise standardisiert proximal osteotomiert. Die Aufbereitung der Knochenhöhle und Implantation der Prothesen erfolgte unter Aufsicht von Produktspezialisten der Firmen Howmedica und ISS. Die manuell durchgeführten Operationen wurden durch erfahrene Chirurgen nach den Implantationsrichtlinien der Firma Howmedica vollzogen. Nach Einbringen des Datenbands in den Operationsrechner des Robodoc®-Systems sowie den übrigen notwendigen Vorbereitungen (Selbsttest, Befestigung des Proximal-clamp-Fixator, Anbringung der Bone-motion-Monitor-Einrichtung) wurde der roboterkontrollierte Fräsvorgang des Prothesenlagers durchgeführt. Anschließend wurden die vorgegebenen Prothesen eingebracht.

Nach der Prothesenimplantation wurden alle Präparate wiederum computertomographisch erfasst und unter Verwendung eines artefaktunterdrückenden Algorithmus dreidimensional rekonstruiert. Der Tischvorschub entlang der Prothese wurde hierbei jedoch feiner (1 mm) gewählt, um das Prothesenlager exakt beurtei-

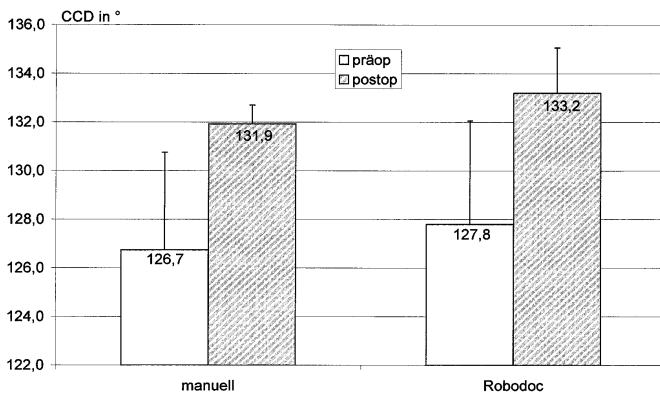


Abb. 2. Prä- und postoperativer CCD-Winkel

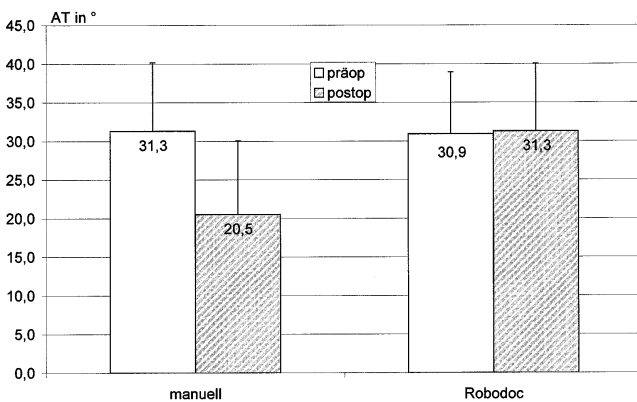


Abb. 3. Prä- und postoperativer AT-Winkel

len zu können. Die Daten wurden auf dem Orthodoc-System geladen, und es erfolgte erneut die Berechnung der präoperativ bereits dokumentierten Parameter. Hierbei wurde besonderer Wert auf den CCD-, den AT-Winkel sowie die Halslänge gelegt.

Die statistische Auswertung erfolgte mit SPSS 7.5. Signifikanzen wurden mit dem Wilcoxon-Test geprüft.

Ergebnisse

Der Mittelwert der CCD-Winkel betrug präoperativ in der manuellen Gruppe $126,7^\circ$ ($SD = 4,0$) und in der Robotergruppe $127,8^\circ$ ($SD = 4,3$). Postoperativ änderte er sich in der 1. Gruppe im Mittel auf $131,9^\circ$ ($SD = 0,8$) und in der 2. Gruppe auf $133,2^\circ$ ($SD = 1,9$). Bei einem vorgegebenen CCD-Winkel der zementfreien Prothese wurde der postoperative Winkel naturgemäß von dem Prothesendesign vorgegeben. Kleine Abweichungen im Varus- oder Valgussinne führten nicht zu einer signifikanten Differenz (Abb. 2).

Vollkommen unterschiedlich stellte sich jedoch die Situation beim AT-Winkel dar. Hier ergaben sich signifikante Unterschiede. Dieser betrug in der manuellen Gruppe präoperativ $31,3^\circ$ ($SD = 8,8$) und lag postoperativ lediglich noch bei $20,5^\circ$ ($SD = 9,5$). Es war somit eine deutliche Tendenz zur Reduktion dieses Winkels zu erkennen. Die Spannweite der postoperativen AT-Winkel reichte von $9,5^\circ$ bis $36,5^\circ$. In der Robotergruppe lag dieser Winkel vor der Implantation mit $30,9^\circ$ ($SD = 8,0$) in

einem vergleichbaren Bereich wie bei der manuellen Gruppe. Nach der Implantation wurde der mittlere AT-Winkel mit $31,3^\circ$ ($SD = 8,7$) dokumentiert (Abb. 3). Die Betragsdifferenzen zwischen prä- und postoperativem AT-Winkel betragen in der manuellen Gruppe $10,8^\circ$ ($SD = 6,4$), in der Robotergruppe hingegen nur $0,4^\circ$ ($SD = 0,9$). Dieser Unterschied ist signifikant auf einem Niveau von $p < 0,01$.

Die Halslänge betrug vor der Implantation der manuell eingebrachten Gruppe $57,7$ mm und in der Robodoc-Gruppe $58,6$ mm. Postoperativ änderte sich die Halslänge in der 1. Gruppe auf $63,3$ mm und in der 2. Gruppe auf $63,3$ mm. In beiden Gruppen änderte sich die Halslänge signifikant ($p < 0,05$). Die Abweichung lag in der manuellen Gruppe zwischen prä- und postoperativ bei $7,9$ mm und bei der Robodoc-Gruppe bei $5,4$ mm. Dieser Unterschied erreichte jedoch kein signifikantes Niveau.

Diskussion

Die Ergebnisqualität nach alloplastischem Hüftgelenkersatz hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Neben Patientenalter zum Zeitpunkt der Implantation, Patientenaktivität mit dem endoprothetischen Gelenkersatz [9] sowie tribologischer Qualität der Gleitpaarung [6] hat die Implantationsgeometrie einen wichtigen Einfluß auf die Standzeit des Implantats. Eine von der Norm abweichende Positionierung des Prothesenschafts wird für einen verzögerten knöchernen Einbau mit nachfolgender Gefahr einer aseptischen Lockerung verantwortlich gemacht. Verschiedene Autoren berichten bei der postoperativen Röntgenkontrolle in bis zu 20% der Fälle über Varusfehlstellungen des Prothesenschafts; eine Valgusfehlstellung wird zwischen 1 und 2% beschrieben [11, 12].

Während über Varus- und Valgusfehlstellungen verschiedentlich berichtet wurde, wird bislang jedoch nur wenig auf postoperative Auffälligkeiten der Prothesen-AT eingegangen. Eine Aussage hierzu findet sich allenfalls bei instabilen Endoprothesen mit anteriorer Luxationstendenz [3]. Aber auch bei fehlender Luxationstendenz wird eine postoperative Änderung der AT einen Einfluß auf die Gelenkbiomechanik haben. Dieses ist besonders bedingt durch die kleinen Hüftrotatoren sowie die mehr horizontal verlaufenden Anteile der Glutäalmuskulatur, die bei kurzer Muskelgesamtlänge bereits durch kleine Änderungen der Position des Trochanter major im Raum eine erhebliche prozentuale Längenänderung der kontraktiven Elemente erfahren. Dieses wird zwangsläufig zu einer muskulären Fehlbelastung führen [5].

Die vorliegende Untersuchung zeigt u. E. unter dem Blickwinkel der Qualitätssicherung somit mehrere bemerkenswerte Ergebnisse. Unter dem Gesichtspunkt der Prozeßqualität ist die Möglichkeit einer exakten dreidimensionalen präoperativen Planung ein besonders erwähnenswerter Faktor. Bisherige Operationsplanungen am zweidimensionalen Röntgenbild mit Schablone oder Zeichnung können weder die Präzision der

rechnergestützten Planung noch die dreidimensionale Erfassung des Problems gewährleisten. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Untersuchung von Effenberger et al. [4], in welcher festgestellt wurde, daß nur in 47 % der Fälle in Deutschland eine Operationsplanung mit Zeichnung und in 53 % eine Planung mit Schablone erfolgt, ist das hier geschilderte Vorgehen im Sinne der Prozeßqualität sicherlich ebenso von Vorteil, da ohne Planung die Operation gar nicht vorgenommen werden kann. Zum anderen läßt sich postoperativ stets ein optimaler Vergleich und damit eine Qualitätskontrolle vornehmen.

Die Sensibilisierung für das dreidimensionale Problem des AT-Winkels scheint uns ebenso besonders erwähnenswert, da auf diesen Parameter bislang weder in der Literatur noch in der alltäglichen Praxis großer Wert gelegt wurde. Auch hier ist die computerassistierte Chirurgie eine Möglichkeit, unsere Ergebnisqualität zukünftig zu steigern.

Schlußfolgerung

Mit der verwendeten Technologie der dreidimensionalen Rekonstruktion ist eine weitaus exaktere Berechnung möglich als mit den bisherigen allein auf Röntgenbildern basierenden Operationsplanungen. Eine virtuelle präoperative Operationsplanung läßt sich mit Hilfe von Robotersystemen während des operativen Eingriffs mit hoher Präzision umsetzen. Dieses zeigt sich in der vorliegenden Untersuchung ganz besonders für die Wiederherstellung des AT-Winkels. Die verwendete Technik scheint in der Lage zu sein, eine Verbesserung in der Prozeß- und Ergebnisqualität mit sich zu bringen.

Wir danken Herrn Hoffmann (Firma ISS) und Herrn Fischer (Firma Howmedica) für die freundliche Unterstützung in der Vorbereitung und Durchführung der Studie. Gleichzeitig möchten wir uns bei den Firmen ISS und Howmedica für die großzügige Zur-

verfügungstellung der Implantate sowie Implantationsinstrumente bedanken.

Literatur

1. Baca I (1997) Roboterarm in der laparoskopischen Chirurgie. *Chirurg* 68: 837
2. Börner M, Bauer A, Lahmer A (1997) Rechnerunterstützter Robotereinsatz in der Hüftendoprothetik. *Orthopäde* 26: 251
3. Daly PJ, Morrey BF (1992) Operative correction of an unstable total hip arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am* 74: 1334
4. Effenberger H, Mechtler R, Munzinger U, Winter Th, Jerosch J (1998) Dokumentation und Qualitätssicherung in der Hüftendoprothetik. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 136 (im Druck)
5. Jerosch J, Steinbeck J, Stechmann J, Güth V (1997) Influence of a high hip center on abductor muscle function. *Arch Orthop Trauma Surg* 116: 385
6. Jerosch J, Fuchs S, Schmidt T (1998) Is Hylamer adequate for use in alloarthroplasties? *Arch Orthop Trauma Surg* 117: 79
7. Kazanzides P, Zuhars J, Mittelstadt B, Taylor RH (1992) Force Sensing and Control for a surgical ROBOT. *Proc IEEE Int Conference on Robotics and Automation*, Nice, France
8. Kazanzides P, Mittelstadt B, Musits B, Meyer C, et al (1995) An integrated system for cementless hip replacement robotics and medical imaging technology enhance precision surgery. *IEEE Trans Biomed Eng* 14: 18
9. Malchau H, Herberts P, Ahnfelt L (1993) Prognosis of total hip replacement in Sweden. Follow-up of 92,675 operations performed 1978–1990. *Acta Orthop Scand* 64: 497
10. Spencer EH (1996) The ROBODOC clinical trail: A robotic assistant for total hip arthroplasty. *Orthop Nurs* 15: 26
11. Stewen F, Schlegel KF (1987) Erfahrungen mit Lord-Totalendoprothesen. In: Refior HJ (Hrsg) *Zementfreie Implantation von Hüftgelenksendoprothesen: Standortbestimmung und Tendenzen*. Thieme, Stuttgart New York
12. Wixson R, Stulberg LSD, Mehlhoff M (1991) Total hip replacement with cemented, uncemented and hybrid prostheses. *J Bone Joint Surg Am* 73: 257

Prof. Dr. J. Jerosch
Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Albert-Schweitzer-Straße 33
D-48149 Münster