

M. Arand · E. Hartwig · D. Hebold · L. Kinzl · F. Gebhard

Abteilung für Unfallchirurgie, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum Ulm

Präzisionsanalyse navigationsgestützt implantierter thorakaler und lumbaler Pedikelschrauben

Eine prospektive klinische Studie

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden prospektiven Studie war die Überprüfung der Präzision navigiert und konventionell eingebrachter Pedikelschrauben. Die Anwendung des Navigationssystems bedurfte intraoperativ einen zusätzlichen Zeitaufwand von durchschnittlich 8,4 min für die Referenzierung je Wirbelkörper. Zur Beurteilung der Ergebnisse wurde eine korrekte Schraubenlage definiert als rein intraossäre Lage. Jede mediale oder laterale Perforation der pedikulären Kortikalis wurde als Fehlfrage gewertet.

In der CT-Kontrolle zeigte sich eine vollständige intrapedikuläre Implantatlage bei 36 von 45 thorakalen (80%) und bei 22 von 27 navigationsgestützt eingebrachten lumbalen (81%) Pedikelschrauben. Die konventionelle Besetzung der Pedikel ergab im gleichen Zeitraum eine zentrale Platzierung thorakal bei 27 von 34 (79%) und lumbal bei 43 von 52 (83%) Schrauben. Eine radikuläre Begleitsymptomatik fand sich bei keinem der Patienten nach navigationsgestützter oder konventioneller Implantation. Die Analyse der beiden in der Studie verwendeten Implantatsysteme hinsichtlich der Präzision bei der Implantation zeigte im navigierten Kollektiv eine zentrale Lage der Schrauben des Druckplattenfixateur in 67% und des USS in 90% der Patienten, in der nicht navigierten Gruppe war die Verteilung ausgeglichen.

Die anfängliche Benutzung des Navigationssystems führte, bevorzugt durch Fehler in der Referenzierung, zu einer erhöhten Inzidenz an Schraubenfehlagen. Im ersten

1/2 Jahr der klinischen Anwendung des Systems lagen 72% der Implantate korrekt im Pedikel, im zweiten 1/2 Jahr 80%.

Durch die vorliegende Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der computergestützten Freihandnavigation in der Initialphase zur einer mit dem konventionellen Verfahren vergleichbaren Präzision von Implantatplatzierungen an der Wirbelsäule führt. Zu berücksichtigen ist allerdings eine Lernkurve für das Verfahren und eine Eignung des verwendeten Implantatsystems für die computerassistierte Anwendung, sodass mit zunehmender Erfahrung in dieser Technik von einer Reduktion der Fehlplatzierungen ausgegangen werden darf.

Schlüsselwörter

Computerassistierte Chirurgie · Navigation · Computertomographie · Pedikelschraube · Wirbelsäule

Seit der Verbreitung der transpedikulären Verankerungstechnik über dorsale Zugangswege durch Roy Camille [12] hat sich dieses Verfahren in der Stabilisierung von thorakalen und lumbalen Frakturen durchgesetzt. Das korrekte Einbringen der Schrauben ohne Perforation des Pedikels ist anspruchsvoll und bedarf anatomischer Kenntnisse und einer subtilen Implantationstechnik. Hierbei spielt

insbesondere eine korrekte Identifikation des Eintrittspunktes der Pedikelschraube sowie die richtige Neigung des Schraubenkanals sowohl in der Sagittal-, als auch in der Transversalebene eine wesentliche Rolle. Die konventionelle Implantationstechnik erfolgt bildwandlergestützt unter Durchleuchtung im seitlichen und a.-p.-Strahlengang. Durch Wegschwenken des C-Arms aus der Mittellinie von etwa 5–20° ist eine bessere Visualisierung des Pedikels in seiner typischen Tränenstruktur gegeben.

Im Rahmen von CT-kontrollierten Studien konnte bei konventioneller Implantationstechnik eine erhebliche Rate an Fehlplatzierungen mit Perforation des Pedikelkortex *in vitro* [2, 18] und *in vivo* [4] nachgewiesen werden. Klinische Beobachtungen zeigten eine neurologische Komplikationsrate nach Pedikelschraubenimplantation von bis zu 7% [19]. Diese Daten wurden für die LWS erhoben, wo ohnehin ein großer Pedikeldurchmesser vorliegt. Im Bereich der BWS ist von einer noch höheren Quote an Fehltagen der transpedikulären Implantate auszugehen, da hier ein erheblich kleinerer Pedikelquerschnitt vorliegt [15, 20].

Dr. M. Arand

Abteilung für Unfallchirurgie,
Hand- und Wiederherstellungschirurgie,
Universitätsklinikum Ulm,
Steinhövelstraße 9, 89075 Ulm,
E-Mail: markus.arand@medizin.uni-ulm.de

Accuracy of pedicle screw placement of computer-aided techniques. A prospective clinical trial

Abstract

A prospective clinical trial was performed to study the accuracy of pedicle screw placement of consecutive computer-aided and conventional techniques. Concerning the clinical performance of the navigation system, the average time of matching has been 8,4 minutes per vertebrae. For evaluation of the results, only complete intraosseous placement of the pedicle screw has been defined as correct position. Any medial or lateral perforation of the cortical structure of the pedicle was recorded as malplacement.

In the CT-controlled patients complete intrapedicular placement of the screw was obtained in 36 of 45 thoracic (80%) and in 22 of 27 navigated lumbar (81%) pedicles. In the conventional cohort group 27 of 34 (79%) thoracic and 43 of 52 (83%) lumbar screws were completely in. No radicular neurologic damage, caused by a malplaced transpedicular screw has been observed in both groups.

In the presented study is shown, that the application of the computer-assisted freehand navigation can improve results concerning the precision of spinal screw placement. Although, the spinal navigator has to consider a learning curve for the clinical inauguration of the system and the qualification of the implant system for computer-assisted application.

Keywords

Computer aided surgery · Navigation · Computertomography · Pedicle screw · Spine



Abb. 1 ◀ Transversalschnitt von navigiert eingebrachten Pedikelschrauben Th7 (Druckplattenfixateur) mit lateraler Perforation der linken Pedikelschraube unter Gewindetiefe

In den vergangenen Jahren sind zur Verbesserung der Präzision bei operativen Interventionen, induziert durch die Stereotaxie in der Neurochirurgie, Systeme entwickelt worden, mit denen eine rahmenlose Freihandnavigation auf der Basis eines präoperativ hergestellten CT's durchgeführt werden kann [10, 17]. Bei dieser Technik wird durch intraoperative Referenzierung das präoperativ erstellte „virtuelle CT-Bild“ mit dem intraoperativen „reellen Bild“ - dem Patient - in Übereinstimmung gebracht.

Unter der Voraussetzung eines intakten navigierten Festkörpers ohne Formveränderung nach der durchgeführten präoperativen Computertomographie kann mit einem aufgebrauchten Referenzierungskörper eine Online-Visualisierung von Instrumenten im präoperativ erhobenen CT-Datensatz erfolgen. Erste experimentelle [6] und klinische Studien [1, 14] haben gezeigt, dass sich durch die Anwendung der CT-gestützten Navigation eine Verminderung der Schraubenfehlplatzierungsrate lumbal erreichen lässt, thorakal sind die Entwicklungen ebenfalls vielversprechend [1].

Ziel der vorliegenden prospektiven Studie war die Analyse der Präzision konventionell und navigiert eingebrachter Pedikelschrauben im eigenen Krankengut anhand postoperativer CT-Kontrollen. Über die klinischen Erfahrungen der navigationsgestützten Pedikelschraubeninsertion im Bereich der BWS und LWS wird berichtet.

Material und Methode

Seit Juli 1999 wird ein Navigationssystem auf optoelektronischer Basis (SurgiGATE, Medivision, Oberdorf, Schweiz)

verwendet. Die navigierbaren Datensätze wurden auf einem 4-Spulen-Spiral-CT (MX 8000, Marconi) gewonnen.

Insgesamt 80 Pedikelschrauben wurden bei 21 Patienten zur computer-assistierten Implantation geplant, 72 davon konnten navigationsgestützt eingebracht werden. Im Bereich der BWS wurden je 2 Pedikelschrauben in den Wirbeln Th3, Th7 und Th8 gesetzt, 5 in Th11, je 6 in Th4 und Th6, 9 in Th10 und 13 in Th12 (n=45). An der LWS erfolgte die Implantation von 6 Pedikelschrauben in L3, 8 in L2 und 13 in L1 (n=27).

Bei allen Patienten wurde eine exakte präoperative Protokollierung der Zeiten für den Datentransfer und die

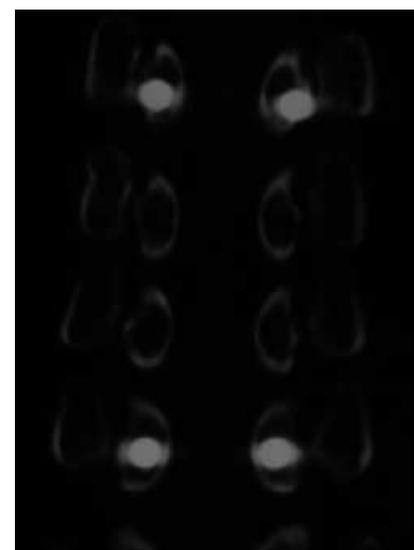


Abb. 2 ▲ Frontalschnitt durch die Pedikelregion des selben Patienten. Es findet sich eine Perforation der beiden oberen navigierten Pedikelschrauben unter Gewindetiefe nach lateral, obgleich die rechte Schraube im Transversalschnitt keine Perforation zeigt



Abb.3 ◀ **Sagittalschnitt durch die beiden rechten navigierten Pedikelschrauben Th12 und L2 (USS) mit kaudaler Perforation der kranialen Schraube unter Gewindetiefe**

Operationsplanung durchgeführt. Intraoperativ wurden erfasst: die Operationsdauer, die Dauer des Matchings des zu instrumentierenden Wirbels und die Implantationsdauer der Pedikelschrauben. Des Weiteren wurde die Benutzerfreundlichkeit des Systems und die subjektive Einschätzung des Operateurs dokumentiert. Bei der computerassistierten Implantationstechnik erfolgte zunächst die navigierte Eröffnung der Schraubeneintrittsstelle durch einen Pfriem („pedicle awl“) und anschließend das navigationsgestützte Aufreißen des Pedikels durch die Pedikelale („pedicle probe“). Das Einbringen der Schrauben in den Pedikel erfolgte, wie auch in der konventionellen Technik, ausschließlich ohne Navigationsunterstützung. Bei der Durchführung der Wirbelsäuleneingriffe waren 3 erfahrene Operateure beteiligt.

Bei der computerassistierten Technik wurden insgesamt 42 Schrauben vom Druckplattenfixateur (Litos, Hamburg) und 30 USS-Schrauben (Schanz-Schrauben, Synthes, Umkirch) eingesetzt. Die verwendeten Titanschrauben für die transpedikuläre Verankerung mit dem Druckplattenfixateur hatten einen Außengewindedurchmesser von 5,4 mm und einen Schraubenkerndurchmesser von 4,4 mm. Die Schanz-Schrauben des USS wurden in 2 verschiedenen Versionen verwendet, lumbal die 6,2 mm Schraube mit einem Außengewindedurchmesser von 6,2 mm und einem Schraubenkerndurchmesser von 5,5 mm in Pedikelhöhe sowie thorakal die 5 mm Schraube mit einem Außengewindedurchmesser von 5 mm und einem Schraubenkerndurchmesser von 4,6 mm in Pedikelhöhe.

Diesem Kollektiv gegenübergestellt wird ein im gleichen Zeitraum und durch die gleichen Operateure behandeltes konsekutives Krankengut, bei dem die Implantation von 86 Pedikelschrauben auf konventionelle Weise unter Durchleuchtung erfolgte.

Konventionell wurden im Bereich der BWS 2 Pedikelschrauben in Th2 implantiert, je 4 in Th5, Th10 und Th11 sowie 20 in Th12 (n=34). An der LWS erfolgte die Implantation von 2 Pedikelschrauben in L5, 6 in L4, 12 in L3, 20 in L2 und 14 in L1 (n=52).

Die Technik der konventionellen Schraubenimplantation wird in unserem Hause durch bildwandlersgestütztes Aufsuchen der Implantationsstelle mit Einbringen eines Pfriems (Durchleuchtung in der a.-p.-Ebene) vorgenommen. Anschließend wird nach Positionierung aller Pfriems der C-Arm in die seitliche Durchleuchtungsebene geschwenkt und in oszillierender Technik bei Verwendung des Druckplattenfixateurs ein 3,2 mm Bohrer in den Pedikel eingebracht. Bei Stabilisationen mit dem USS

erfolgt das direkte Einbringen der selbstschneidenden Schanz-Schrauben.

Durch konventionelle Technik wurden 72 Schrauben des Druckplattenfixateur und 14 USS-Schrauben implantiert, die verwendeten Implantate entsprachen denen des navigierten Verfahrens.

Postoperativ wurde bei allen Patienten eine Verifizierung der Pedikelschraubenlage in transversaler (Abb. 1), frontaler (Abb. 2) und sagittaler (Abb. 3) Schnittbildtechnik (CT) vorgenommen. Zur Reduktion der metallbedingten Artefakte, erfolgte bei allen CT-Datensätzen eine rechnerische Glättung, sodass unter Berücksichtigung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Bildebenen eine exakte Beurteilung der Schraubenlage in Relation zum Pedikel ermöglicht wurde.

Die Röntgenauswertung erfolgte unabhängig und nicht wissentlich, mit welcher Technik die Pedikelschraubenimplantation vorgenommen wurde. Zur Definition der jeweiligen Schraubenlage wurde eingeteilt in:

- | | |
|----------|--|
| Gruppe A | zentrale Schraubenlage ohne Perforation, |
| Gruppe B | laterale, mediale, kraniale und kaudale Pedikelperforation geringer als Gewindetiefe und |
| Gruppe C | Perforation des Pedikels größer als Gewindetiefe, hier wurde weiterhin eine Distanzmessung durchgeführt mit Beschreibung der maximalen Fehldistanz zum Pedikelkortex selbst. |

Als korrekt platziert eingestuft wurden nur Schrauben aus der Gruppe A, Schrauben aus der Gruppe B und C wurden als fehlplatziert gewertet.

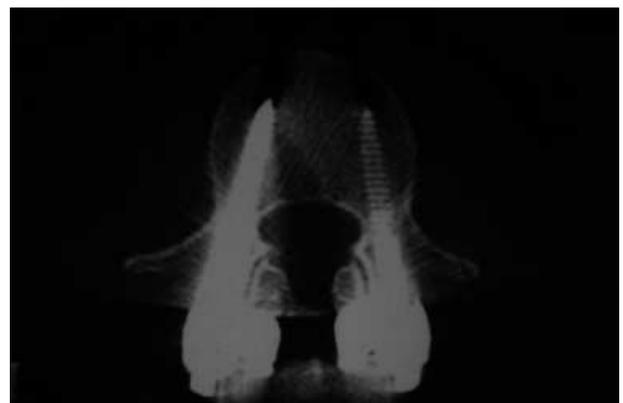


Abb.4 ▶ **Transversalschnitt von navigiert eingebrachten Pedikelschrauben lumbal mit zentraler Schraubenlage (USS)**

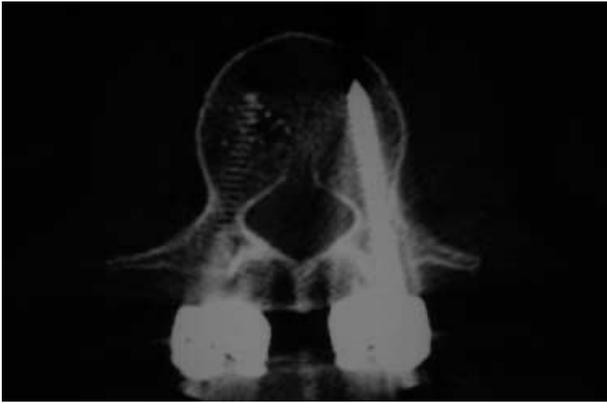


Abb. 5 ◀ **Transversalschnitt von navigiert eingebrachten Pedikelschrauben lumbal mit zentraler Schraubenlage (USS)**

Ergebnisse

Computerassistierte Schraubenplatzierung

Von 80 Pedikelschrauben, welche zur navigationsgestützten Implantation vorgesehen waren, konnten 72 (90%) computerassistent eingbracht werden.

Bei 4 Patienten und 8 Pedikeln lagen die Gründe im Verfahrenswechsel in erster Linie in einem nicht durchführbaren Matching oder einer sog. Verifikation, die dem anatomischen Situs nicht entsprach. Der Eingriff wurde für die jeweiligen Wirbel konventionell bildwandlergestützt fortgesetzt. Seltener waren Probleme im Datentransfer und der Hardware die Ursache.

Der Zeitbedarf der spinalen Navigation für den Datentransfer betrug 10–15 min (Durchschnitt=13 min) und für die präoperative Planung 15–90 min (Durchschnitt=35 min). Das intraoperative Matching der navigierten Wirbel dauerte zwischen 2 und 35 min, durchschnittlich 8,4 min.

Die gesamte Operationsdauer (Hautschnitt-Hautnaht) betrug beim computerassistenten Verfahren durchschnittlich 105 min und beim konventionellen Vorgehen 92 min.

Die Performance des Navigationssystems wurde durch die Erstellung der präoperativen Planung, bei der eine bessere Einschätzung des Frakturtyps und der später intraoperativen Situation erfolgen konnte, als auch bei der intraoperativen Anwendung als vorteilhaft bewertet.

Bei den navigationsgestützt eingebrachten thorakalen (n=45, Abb. 1, 2, 3) und lumbalen (n=27, Abb. 4, 5) Pedikelschrauben ergab sich eine zentrale Lage (Gruppe A) thorakal in 36 (80%) und lumbal in 22 (81%) der Implantate.

Im navigierten Patientengut wurde eine Pedikelperforation um weniger als Gewindetiefe (Gruppe B) bei 4 Schrauben thorakal und 2 Schrauben lumbal festgestellt, bei 6 thorakalen (Abb. 6) und 2 lumbalen Perforationen über Gewindetiefe (Gruppe C) wurde thorakal eine Fehllage von 4–12 mm (Durchschnitt=7 mm) und lumbal von 4 und 7 mm evaluiert. Segmental neurologisch zuordenbare Begleitverletzungen wurden bei keinem Patienten diagnostiziert.

Untersucht wurde weiterhin der Einfluss des navigationsgestützt angewendeten Implantats auf die Präzision der Lage der Pedikelschrauben. Von 42 transpedikulären Schrauben des Druckplattenfixateurs befanden sich 28 (67%) zentral im Pedikel (Gruppe A), 6 Schrauben zeigten eine Perforation unter (Gruppe B) und 8 über Gewindetiefe (Gruppe C). Von 30 computerassistent eingebrachten Schrauben des USS fanden sich 27 (90%) rein intraossär (Gruppe A), 3 Schrauben zeigten eine Perforation unter Gewindetiefe (Gruppe B). Es

fand sich beim USS keine Schraube aus der Gruppe C, d. h. einer Perforation über Gewindetiefe.

Um abzuschätzen, inwiefern die zunehmende Erfahrung bei der Anwendung der Navigation zu einer eventuellen Verbesserung der Ergebnisse führen kann, wurde das computergestützt behandelte Kollektiv nach Operationsdatum in 2 Behandlungsintervalle per Stichtag am 31.12.1999 aufgeteilt, in das erste und zweite 1/2 Jahr nach Inbetriebnahme des Navigationssystems (Tabelle 1). Es zeigte sich, dass im ersten 1/2 Jahr der Anwendung von 32 navigierten Pedikelschrauben 23 (72%) zentral im Pedikel lagen (Gruppe A), 3 perforierten unter (Gruppe B) und 6 über Gewindetiefe (Gruppe C). Im zweiten 1/2 Jahr lagen von 40 transpedikulären Schrauben 35 (88%) zentral (Gruppe A), bei 3 Schrauben fand sich eine Perforation unter (Gruppe B) und bei 2 über Gewindetiefe (Gruppe C).

Bei der Untersuchung der Pedikelweiten der navigierten Gruppe zeigte sich, dass thorakal ein Durchmesser von durchschnittlich 7 mm und lumbal 7,1 mm vorlag. Bei 2 Patienten war ein geringerer Pedikelquerdurchmesser als Außengewindedurchmesser der Schraube zu beobachten, es ergab sich bei diesen Patienten eine als Fehllage gewertete Schraubenposition. In 6 Pedikeln entsprach der Außengewindedurchmesser der Pedikelweite.

Konventionelle Schraubenplatzierung

Die konventionelle bildwandlergestützte Implantationstechnik der Pedikel-

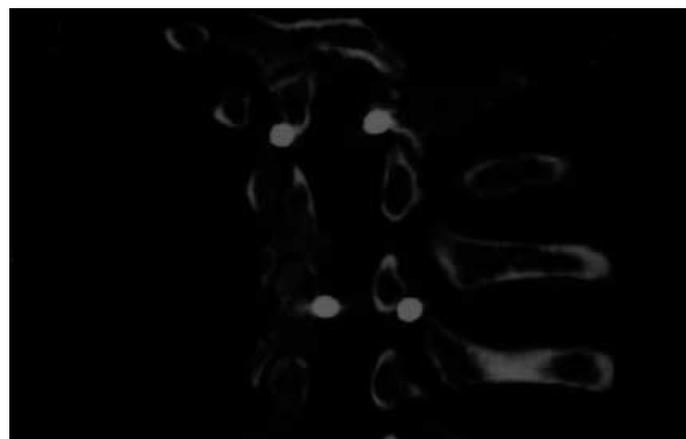


Abb. 6 ▲ **Pedikelperforation über Gewindedurchmesser im Bereich der BWS (systemischer Fehler bei nicht korrektem Matching)**

Tabelle 1

Präzision der navigierten und konventionell implantierten Pedikelschrauben im ersten und zweiten Halbjahr (Hj)

	Navigation		Konventionell	
	1. Hj.	2. Hj.	1. Hj.	2. Hj.
Gruppe A	23	35	34	36
Gruppe B	3	3	6	7
Gruppe C	6	2	1	2

Gruppe A: zentrale und rein intraosäre Lage, Gruppe B: Perforation unterhalb Gewindetiefe, Gruppe C: Perforation über Gewindetiefe

schrauben im gleichen Zeitraum zeigte bei 34 eingebrachten Schrauben im thorakalen und 52 Schrauben im lumbalen Bereich bei 27 Schrauben thorakal (79%) und bei 43 Schrauben lumbal (83%) eine korrekte und zentrale Lage ohne Pedikelperforation (Gruppe A).

Im Rahmen der konventionellen Implantationstechnik zeigten sich bei 7 Schrauben thorakal und bei 9 Schrauben lumbal Pedikelperforationen bzw. Fehllagen. Bei 5 thorakalen und 8 lumbalen Pedikeln betrug die Perforation weniger als Gewindetiefe (Gruppe B), Fehldistanzen von über Gewindetiefe (Gruppe C) bestanden thorakal in 2 Fällen mit 3 und 4 mm, lumbal in einem Fall mit 4 mm.

Eine neurologische Kompromittierung, bedingt durch die Fehlschraubelage, konnte nach Aktenlage bei keinem Patienten evaluiert werden.

Die Analyse nach Schraubentypen und nach Zeitpunkt der Implantation im ersten oder zweiten Halbjahr (Tabelle 1) ergab eine ausgeglichene Verteilung der korrekt positionierten transpedikulären Schrauben.

Die Pedikelweite der konventionell behandelten Patienten betrug thorakal durchschnittlich 7,6 mm und lumbal 8,2 mm, in 2 Fällen lag ein, gegenüber der Pedikelschraube kleinerer Durchmesser der Bogenwurzel vor, was entsprechend der navigierten Gruppe ebenfalls als Fehllage gewertet wurde. In 3 Fällen entsprach der Außengewindedurchmesser der Schraube der Pedikelweite.

Eine statistische Signifikanz in der Präzision von Pedikelschrauben zwischen konventioneller und navigationsgestützter Implantationstechnik konnte nicht nachgewiesen werden.

Diskussion

Im eigenen konsekutiven Krankengut wurde die Präzision der transpedikulären Schraubenplatzierung analysiert und ein Vergleich zwischen konventionellem bildwandlergestütztem Verfahren und der navigierten Technik im Rahmen einer prospektiven Studie durch postoperative CT-Kontrolle durchgeführt.

Untersuchungen über die Präzision implantierter Pedikelschrauben erfolgten CT-kontrolliert [8, 9, 14], basierend auf konventionellen Röntgenaufnahmen [6, 18], auf Kernspintomographien [1, 21] und durch Dissektion des Schraubenkanals in vitro [11].

Die Inzidenz an fehlplatzierten Pedikelschrauben nach konventioneller Implantation liegt bei unseren eigenen Patienten niedriger, als in der Literatur berichtet [5, 13, 16, 18]. Wir führen das auf die hohe Inzidenz an Wirbelsäuleneingriffen sowie auf die Standardisierung des konventionellen Vorgehens in unserer Abteilung zurück.

Im Gegensatz zu anderen klinischen Studien [1, 8, 9] konnte in unserem Kollektiv in der initialen Anwendungsphase keine Verbesserung der Rate an Fehlplatzierungen durch den Einsatz eines CT-gestützten Navigationssystems gezeigt werden. Eine Reduktion der Distanz der Fehlplatzierungen [1] konnte ebenfalls nicht nachgewiesen werden.

Verschiedene Ursachen kommen für die relativ hohe und bisher in der Literatur nicht angegebene Inzidenz der dezentrierten Lage von 21% der navigiert implantierten Pedikelschrauben in Frage:

- Alle mit in die Studie aufgenommenen Patienten wurden mit einem

postoperativen Spiral-CT inklusive sagittaler und frontaler Rekonstruktionen nachuntersucht, in der Literatur erfolgte die Kontrolle der Schraubelage hingegen zum Teil mit konventionellen Röntgenaufnahmen [6] oder MRI [1] mit falsch negativen Ergebnissen.

- Fehlplatzierungen sind potentiell darauf zurückzuführen, dass die eigentliche Implantation der Pedikelschraube nicht navigationsgestützt erfolgte. Vor allem beim Druckplattenfixateur kann die Schraube einen von der navigierten Aufreibung des Lagers abweichenden Verlauf nehmen [8], wie dies jedoch auch bei der konventionellen Implantationstechnik möglich ist. Es konnte gezeigt werden, dass die Inzidenz der navigierten Fehlplatzierungen bei Schrauben des Druckplattenfixateurs wesentlich höher ist, als beim USS.
- In der vorliegenden Studie wurden konsekutiv die ersten computergesteuert behandelten Patienten erfasst. Im Rahmen der ersten Anwendungen des Navigationssystems ergaben sich Fehlerquellen, die im weiteren Verlauf ausgeräumt werden konnten, was in unserer Abteilung zu einer „learning curve“ geführt hat und im Rahmen der getrennten Auswertung zweier Halbjahre ersichtlich ist.

Auch andere Autoren berichten über Fehlpositionierungen von computerasistiert eingebrachten Pedikelschrauben mit einer Häufigkeit von 4,8% [21, MRI-kontrolliert], 4,6% [7, CT-kontrolliert], 4,3% [8, CT-kontrolliert] und 11,3% [14, CT-kontrolliert].

Theoretisch sollte die Fehlplatzierungsrate für die computerasistierten Chirurgie null betragen. In der Analyse unserer Ergebnisse („history mode“) zeigte sich bei 3 Patienten mit thorakalen Fehlimplantationen retrospektiv, dass keine korrekte Erfassung der Knochenoberfläche durch den Computers erfolgte („threshold“). Somit war es intraoperativ bei der Referenzierung („matching“) zu einer Verkippung des virtuellen, eingerechneten Wirbels gegenüber der realen Wirbellage gekommen, was zu einer systematischen Abweichung beider Pedikelschrauben eines Wirbels in die gleiche Richtung geführt hat. Auf die Möglichkeit dieser Fehlweisung wurde bereits hingewiesen [3].

Ebenso ist ein kompletter präoperativer Datensatz Voraussetzung zur präzisen Navigation, da durch Reduktion der Informationen auch eine erhöhte Inzidenz von Fehlplatzierungen zu erwarten ist [14].

Abgesehen von der Präzision der Schraubenplatzierung konnte auch in anderen klinischen Studien anfänglich in bis zu 32% der avisierten Pedikel nicht navigiert instrumentiert werden [8, 14].

Der intraoperative Zeitbedarf für die Navigation lag mit 8,4 min/Wirbel etwas höher als angegeben [8, 5,5 min].

Die exakte Analyse der uns vorliegenden Daten ergibt somit, dass

- in 8% (6 aus 72 Pedikel) bzw. in 75% aller Fehllagen über Gewindetiefe (6 aus 8 Pedikeln) die Ursache der navigierten Fehllage im „Matching“ lag, was einem „Handling“-Fehler des CAS-Systems entspricht,
- die computerassistierte Navigation ist derzeit nur sinnvoll einsetzbar in Verbindung mit dem dafür vorgesehenen Implantat (USS) und
- eine „Learning curve“ besteht, welcher durch intensive Aufklärung von system- und benutzerbedingten Fehlermöglichkeiten und Schulungen entgegenzuwirken ist.

Durch die vorliegende Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Präzision der implantierten Pedikelschrauben durch die computerassistierte intraoperative Freihandnavigation zumindest in der Anfangsphase der Anwendung nicht zwangsläufig zu gewährleisten ist. Im Rahmen einer konsequenten und dem System gegenüber kritischen Anwendung am Patienten wird sich diese Technik gegenüber dem konventionellen Verfahren zukünftig durchsetzen, da bei Beachtung möglicher Fehlerquellen auch eine weitere Reduktion von Pedikelperforationen eintreten wird. Zusätzlich ist von einer deutlichen Reduktion der intraoperativen Strahlenbelastung auszugehen, im Rahmen einer bisher nicht veröffentlichten prospektiven Erfassung der

Durchleuchtungszeiten in unserem Kollektiv ergibt sich derzeit eine Absenkung um etwa den Faktor 3 bei der CT-basierenden Navigation im Gegensatz zum konventionellen Vorgehen.

In wieweit die Präzision bei der Implantation von Pedikelschrauben mit anderen modalitätsbasierten Techniken der Navigation, wie zum Beispiel der Bildwandlernavigation, zu steigern ist, müssen zukünftige prospektive Studien zeigen. Zumindest ist bei diesen Techniken ein wesentlicher Faktor der Ungenauigkeit, das „Matching“ zwischen virtuellem und reellem Datensatz, ausgeschlossen.

Literatur

1. Amiot LP, Lang K, Putzier M, Zippel H, Labelle H (2000) Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screw installation in the thoracic, lumbar, and sacral spine. *Spine* 25: 606–614
2. Castro WH, Halm H, Jerosch J, Malms J, Steinbeck J, Blasius S (1996) Accuracy of pedicle screw placement in lumbar vertebrae. *Spine* 21: 1320–1324
3. Gebhard F, Kinzl L, Arand M (2000) Grenzen der CT-basierten Computernavigation in der Wirbelsäulen Chirurgie. *Unfallchirurg* 103: 696–701
4. Gertzbein SD, Robbins SE (1990) Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine* 15: 11–14
5. Jerosch J, Malms J, Castro WH, Wagner R, Wiesner L (1992) Lagekontrolle von Pedikelschrauben nach instrumentierter dorsaler Fusion der Lendenwirbelsäule. *Z Orthop* 130: 479–483
6. Kamimura M, Ebara S, Itoh H, Tateiwa Y, Kinoshita T, Takaoka K (1999) Accurate pedicle screw insertion under the control of a computer-assisted image guiding system: laboratory test and clinical study. *J Orthop Sci* 4: 197–206
7. Laine T, Lund T, Ylikoski M, Lohikoski J, Schlenzka D (2000) Accuracy of pedicle screw insertion with and without computer assistance: a randomised controlled clinical study in 100 consecutive patients. *E Spine* 9: 235–240
8. Laine T, Schlenzka D, Makitalo K, Tallroth K, Nolte LP, Visarius H (1997) Improved accuracy of pedicle screw insertion with computer-assisted surgery. A prospective clinical trial of 30 patients. *Spine* 22: 1254–1258
9. Merloz P, Tonetti J, Cinquin P, Lavallee S, Troccaz J, Pittet L (1998) Computer-assisted surgery: automated screw placement in the vertebral pedicle. *Chirurgie* 123: 482–490
10. Nolte LP, Visarius H, Arm E, Langlotz F, Schwarzenbach O, Zamorano L (1995) Computer-aided fixation of spinal implants. *J Image Guid Surg* 1: 88–93
11. Nolte LP, Zamorano LJ, Jiang Z, Wang Q, Langlotz F, Berlemann U (1995) Image-guided insertion of transpedicular screws. A laboratory set-up. *Spine* 20: 497–500
12. Roy-Camille R, Roy-Camille M, Demeulenaere D (1970) Osteosynthesis of dorsal, lumbar, and lumbosacral spine with metallic plates screwed into vertebral pedicles and articular apophyses. *Presse Med* 78: 1447–1448
13. Saillant G (1995) Complications de la visée pediculaire, echecs et complications de la chirurgie du rachis. Sauramps, Montpellier
14. Schwarzenbach O, Berlemann U, Jost B, Visarius H, Arm E, Langlotz F, Nolte LP, Ozdoba C (1997) Accuracy of computer-assisted pedicle screw placement. An in vivo computed tomography analysis. *Spine* 22: 452–458
15. Vaccaro AR, Rizzolo SJ, Allardyce TJ, Ramsey M, Salvo J, Balderston RA, Cotler JM (1995) Placement of pedicle screws in the thoracic spine. Part I: Morphometric analysis of the thoracic vertebrae. *J Bone Joint Surg* 77-A: 1193–1199
16. Vaccaro AR, Rizzolo SJ, Balderston RA, Allardyce TJ, Garfin SR, Dolinskas C, An HS (1995) Placement of pedicle screws in the thoracic spine. Part II: An anatomical and radiographic assessment. *J Bone Joint Surg* 77-A: 1200–1206
17. Visarius H, Gong J, Scheer C, Haralamb S, Nolte JP (1997) Man-machine interfaces in computer assisted surgery. *Comput Aided Surg* 2: 102–107
18. Weinstein JN, Spratt KF, Spengler D, Brick C, Reid S (1988) Spinal pedicle fixation: reliability and validity of roentgenogram-based assessment and surgical factors on successful screw placement [see comments]. *Spine* 13: 1012–1018
19. West JL, Bradford DS, Ogilvie JW (1991) Results of spinal arthrodesis with pedicle screw-plate fixation. *J Bone Joint Surg* 73-A: 1179–1184
20. Zindrick MR, Wiltse LL, Doornik A, Widell EH, Knight GW, Patwardhan AG, Thomas JC, Rothman SL, Fields BT (1987) Analysis of the morphometric characteristics of the thoracic and lumbar pedicles. *Spine* 12: 160–166
21. Zippel H, Putzier M, Lang K (2000) Computer-assistierte Wirbelsäulen Chirurgie. In: Reichel H, Zwipp H, Hein W (Hrsg.) *Wirbelsäulen Chirurgie. Standortbestimmung und Trends*. Steinkopff, Darmstadt, S 174–201