

# Navigationssysteme in der Unfallchirurgie – ein Überblick

■ N. Suhm, P. Messmer, A. L. Jakob, P. Regazzoni

## Zusammenfassung

Die Einführung bildgeführter Operationstechniken bedeutet in den operativen Disziplinen unter anderem aufgrund der Minimierung des Zugangs-traumas einen therapeutischen Fortschritt. Chirurgische Navigationssysteme ermöglichen kontinuierliche intraoperative Bildführung, basierend auf gespeicherten Bilddaten: Die räumliche Beziehung zwischen chirurgischen Instrumenten und interessierendem anatomischen Objekt wird dargestellt. Registrierungsgebundene Navigationsverfahren erzeugen diese Darstellung anhand von präoperativ erzeugten CT-Bilddaten. Vor einem Einsatz des Navigationssystems müssen diese Bilddaten mit der aktuellen Patienten-anatomie korreliert werden. Diesen Vorgang bezeichnet man als Registrierung. Registrierungs-freie Systeme arbeiten dagegen mit intraoperativ erzeugten CT- oder Fluoroskopie-

bilddaten und können daher unmittelbar nach der Bilderzeugung – ohne Registrierung – eingesetzt werden. Allerdings verlangt dieses Prinzip die Verfügbarkeit des bildgebenden Verfahrens im OP. Klinisch werden chirurgische Navigationssysteme in der Chirurgie des Bewegungsapparates gegenwärtig für die Insertion von Pedikelschrauben, für Osteosynthesen bei instabilen Beckenringfrakturen, in der Endoprothetik und bei Osteosynthesen von Extremitätenfrakturen eingesetzt. Zukünftige Entwicklungen müssen vor allem die Benutzerfreundlichkeit berücksichtigen. Empfehlungen für die indikationsabhängige Auswahl des Verfahrens müssen aufgrund klinischer Erfahrungen erarbeitet werden. Im Routinebetrieb erfordern chirurgische Navigationssysteme kein zusätzliches Personal, jedoch ist die Zusammenarbeit mit der radiologischen Abteilung unabdingbar.

## Einleitung

Bildgeführte Operationstechniken finden in verschiedenen chirurgischen Disziplinen zunehmende Verbreitung. Wesentliches Prinzip des *bildgeführten Operierens* ist das Ersetzen der direkten Sicht auf das Operationsfeld durch eine indirekte Darstellung auf einem Bildschirm. Dadurch ist es möglich, auf eine – für die direkte Sicht notwendige – große chirurgische Freilegung und den damit verbundenen Schaden an gesundem Gewebe zu verzichten. Statt dessen genügen perkutane Zugänge, um die Instrumente und Implantate zu platzieren.

Dadurch werden die Eingriffe *weniger invasiv, bildgeführte Chirurgie ist minimal-invasive Chirurgie.*

Bezüglich der Bildgebung kann man unterscheiden zwischen *Oberflächendarstellungsverfahren*, deren Prototyp die Endoskopie ist, und *Volumendarstellungsverfahren*, wie z. B. der klassischen Durchleuchtung, Computertomographie (CT) und Magnetresonanztomographie (MRT). Oberflächendarstellungsverfahren zeigen nur die Oberfläche des Zielobjektes und erfordern die Anwesenheit des bildgebenden Prinzips am Zielort. Volumenbildung in den Projektions- und Tomographie-Varianten erlaubt den Blick hinter exponierte Oberflächen.

Intraoperative Bildgebung wird bei der Bildführung in unterschiedlichem Aus-

maß benützt. Hierfür wird bei bildgeführten Eingriffen am knöchernen Skelett vor allem der Röntgenbildverstärker in seiner Ausführung als C-Bogen eingesetzt. Dieses Vorgehen ist jedoch mit Nachteilen verbunden, insbesondere wenn mit der Durchleuchtung die räumliche Beziehung zwischen mehreren Objekten dargestellt werden soll:

- Planen, zweidimensionalen Projektionen fehlt die Tiefeninformation. Daher muss zur Darstellung der räumlichen Beziehung zwischen mehreren Objekten die Abbildung in zwei nicht parallelen Projektionen gleichzeitig erfolgen. Ein C-Bogen muss die beiden Projektionen nacheinander liefern, was mit Ungenauigkeiten verbunden ist. Oder es muss mit zwei Geräten simultan durchleuchtet werden.
- Die Zentralprojektion bedingt eine Verzeichnung, so dass sich quantitative Angaben aus dem Fluoroskopiebild nur mit großen Einschränkungen gewinnen lassen.
- Der positionierte C-Bogen bedeutet beschränkten Raum für nötige Manipulationen an der verletzten Extremität z. B. bei der Frakturreposition.
- Beschränkte Bildqualität bei der Durchleuchtung großer Körpervolumina z. B. am Becken und an der Wirbelsäule.
- Strahlenbelastung für Patient und OP Team, insbesondere bei der Darstellung von dynamischen Prozessen mit der sogenannten „Life Fluoroskopie“ [6].

Chirurgische Navigationssysteme erlauben kontinuierliche intraoperative Bildführung basierend auf gespeicherten Datensätzen: die räumliche Beziehung zwischen chirurgischem Instrument und anatomischem Objekt wird dargestellt.

Die leistungsfähigen bildgebenden Verfahren (CT, MRT) standen bislang im Operationsaal nicht zur Verfügung. Die Navigationstechnik erlaubt es, zeitlich und räumlich getrennt vom Eingriff gewon-

nene Bilddaten für bildgeführte Eingriffe einzusetzen. Damit werden hochpräzise CT- und MRT-Bilddaten für die intraoperative Bildführung nutzbar. Auf Basis dieser gespeicherten Bilddaten ist eine präoperative Planung möglich. Intraoperativ lassen sich Planung (Soll-Zustand) und aktuelle Situation (Ist-Zustand) gegenüberstellen. Daneben wird mit der Navigation das Spektrum moderner Bildverarbeitung auch intraoperativ verfügbar, wie z.B. Rekonstruktionen in beliebigen Schnittebenen und zweier- oder dreidimensionale Rekonstruktionen. Bei der chirurgischen Navigation übernimmt der Computer die Aufgabe der kontinuierlichen Aktualisierung der Darstellung.

Bei der chirurgischen Navigation handelt es sich damit um eine Methode der *Computer Assistierte Chirurgie (CAS)* [1].

Die Entwicklung der chirurgischen Navigation hat ihren Ausgang in der Neurochirurgie genommen [4].

Bereits mit der Stereotaxie [7] als Vorgänger der heutigen Freihandnavigationstechnik war es möglich, Biopsien von Raumforderungen auch aus tiefliegenden Hirnarealen zu gewinnen. In der Neurochirurgie gehört seit dem Aufkommen der Computertomografie in den 70er Jahren die Anfertigung eines präoperativen CT-Bilddatensatzes zum Standardvorgehen. Daher basierten die ersten chirurgischen Navigationssysteme – angepasst an die Anforderungen in der Neurochirurgie – auf einem CT-Datensatz.

Die Anwendung der Navigationstechnik außerhalb der Neurochirurgie war damit bislang auf solche anatomische Regionen und Situationen beschränkt, bei denen die Anfertigung einer präoperativen Computertomografie gerechtfertigt ist (z.B. Wirbelsäule, Becken). Durch das Einbinden weiterer Verfahren der Volumenbildgebung (MRT, Fluoroskopie) in das Konzept der chirurgischen Navigation konnte das Indikationsspektrum für die Navigationstechnik ausgeweitet werden.

### Begriffe und technische Grundlagen der Navigation

Im folgenden Abschnitt sollen Begriffe und Verfahren erläutert werden, die bei der chirurgischen Navigation häufig eingesetzt werden.

### Instrumentenreferenzen

arbeiten als Sender, werden am chirurgischen Instrument befestigt und erlauben dessen Ortung im OP mittels eines Digitalisiergerätes als Empfänger. Die Instrumentenreferenzen müssen an das Digitalisiergerät angepasste aktive oder passive Erkennungselemente tragen z.B. Ultraschallmitter, Reflektoren oder elektromagnetische Spulen. Die meisten Navigationssysteme benutzen heutzutage optische Digitalisiergeräte und angepasste Leuchtdioden (LED) zur Markierung der Instrumentenreferenzen. Die Beziehung zwischen Instrumentenreferenz und Instrumentengeometrie wird mit einer Kalibration bestimmt, so dass z.B. der Abstand zwischen Instrumentenspitze und Instrumentenreferenz dem Navigationssystem bekannt ist.

### Tracking

bezeichnet den Prozess der räumlichen Verfolgung von chirurgischen Instrumenten in Echtzeit mittels des Digitalisiergerätes. Voraussetzung für eine kontinuierliche und genaue Positionsbestimmung ist die ungestörte Verbindung zwischen den Elementen der Instrumentenreferenz und dem Digitalisiergerät. Bei Verwendung einer optischen Digitalisierereinrichtung ist ständiger Sichtkontakt zwischen den LED und dem Digitalisiergerät notwendig. Das Digitalisiergerät überträgt die Positionsinformation in Form von Raumkoordinaten an das Navigationssystem. Werden mehrere Instrumentenreferenzen gleichzeitig verfolgt, wird zusätzlich das Instrument identifiziert. Bei der *externen Kalibration* wird für ein Bildgebungsgerät (zum Beispiel das CT oder den C-Bogen) eine mathematische Beziehung zwischen dem abgebildeten Volumen – ausgedrückt in Raumkoordinaten des Digitalisiergerätes – und den zugehörigen Bildpunkten im Bilddatensatz aufgestellt. Die externe Kalibration muss einmalig vor Verwendung der bildgebenden Einheit mit dem Navigationssystem durchgeführt werden und das Ergebnis lässt sich nicht auf andere Geräte übertragen.

### Registrierung

bezeichnet die Wiederherstellung eines mathematischen Zusammenhangs zwischen der im gespeicherten Bilddatensatz abgebildeten Patienten-anatomie und der aktuellen Patienten-anatomie. Voraussetzung für eine exakte Registrierung ist, dass es zwischen Bilderzeugung und Re-

gistrierung nicht zu relevanten Veränderungen der Patienten-anatomie gekommen ist.

### Landmarken

sind ausgezeichnete Punkte, die am Patienten und im Bilddatensatz gut identifizierbar sind und in einer festen räumlichen Beziehung zum anatomischen Objekt stehen.

### Dynamische Referenzbasen (DRB)

bestehen aus aktiven oder passiven Erkennungselementen und werden am anatomischen Objekt befestigt. Dadurch kann das Digitalisiergerät Position und Orientierung des anatomischen Objektes im OP bestimmen und Relativbewegungen zwischen Objekt und dem Digitalisiergerät sind möglich, ohne dass die zuvor berechneten Raumkoordinaten ihre Gültigkeit verlieren.

Für den Einsatz eines chirurgischen Navigationssystems müssen drei Probleme gelöst werden:

1. Korrelation zwischen aktueller Patienten- und gespeicherter Bildanatomie muss hergestellt werden.
2. Positionsbestimmung der chirurgischen Instrumente (Tracking) im OP und
3. Simulierte Anzeige der Instrumentenposition innerhalb der Bild- und damit Patienten-anatomie

Um die medizinische Bildinformation zu interpretieren ist anatomisches Wissen erforderlich. Das Navigationssystem benutzt die medizinische Bildinformation für die Darstellung auf dem Bildschirm. Die Software des Navigationssystems verarbeitet nur mathematische Koordinaten, z.B. Raumkoordinaten. Es ist also erforderlich, die Bildinformation in die mathematische Sprache der Koordinaten zu übersetzen, damit sie vom Navigationssystem benutzt werden kann. Dafür kann z.B. die Bildinformation der Bildpunkte mit Raumpunkten verknüpft werden, die durch Raumkoordinaten beschreibbar sind. Eine korrekte Zuordnung bedeutet, dass jeder Bildpunkt des Bilddatensatzes mit dem zugehörigen Raumpunkt im Patienten korreliert wird (Aufgabe eins). Dies ist die intellektuelle Aufgabe, die vor der Navigation zu lösen ist!

Das Navigationssystem vergleicht nur noch Raumkoordinaten miteinander. Das bedeutet wiederum, dass auf der Ebene Navigationssystem keinerlei Kontrolle darüber erfolgt, ob das Dargestellte

sinnvoll ist. Die Verantwortung dafür liegt beim Chirurgen, der die Navigationstechnik einsetzt.

In einem Modell besteht das Bildvolumen aus Würfeln mit der Bildinformation jedes Bildpunktes als Inhalt. Die Anordnung der einzelnen Würfel unterschiedlichen Inhalts ist durch die abgebildete Anatomie bestimmt. Das Patientenvolumen besteht aus Würfeln mit der aktuellen Patienten-anatomie als Inhalt. Die Anordnung dieser Einzelwürfel ist durch die Patienten-anatomie bestimmt. Befindet sich der Patient im OP in Sichtweite des Digitalisiergerätes, so können jedem Würfel im Patientenvolumen dessen Raumkoordinaten aus der Sicht des Digitalisiergerätes als Adresse gegeben werden. Jedem Würfel im Bilddatensatz wird der korrespondierende Würfel im Patientenvolumen zugeordnet. Als Ergebnis erhält man einen Bilddatensatz, dessen Bildpunkte mit den erzeugenden Raumvolumina im Patienten korreliert und deren Lage im Raum eindeutig beschreibbar sind. Aufgabe zwei wird mit Hilfe der *Instrumentenreferenzen* durch das *Tracking* gelöst (siehe **Abb. 1, 2, 5**).

Um Aufgabe drei zu lösen ist es von Bedeutung, dass auch die Instrumentenposition in Raumkoordinaten des Digitalisiergerätes ausgedrückt wird. Instrumentenposition und Raumpunkt im Patient werden im gleichen Koordinatensystem ausgedrückt und ihre räumliche Beziehung ist somit bekannt. Andererseits ist jedem Raumpunkt im Patienten ein Bildpunkt zugeordnet: Die räumliche Beziehung zwischen chirurgischem Instrument und Bildpunkt kann auf dem Bildschirm dargestellt werden.

Anhand des Vorgehens bei Aufgabe eins lassen sich registrierungsgebundene und registrierungsfreie chirurgische Navigationsverfahren unterscheiden.

#### Registrierungsgebundene Navigation

Bei der registrierungsgebundenen Navigation erfolgt die Bildgebung typischerweise in einem eigenen, räumlich und zeitlich vom operativen Eingriff getrennten Schritt.

In der Wirbelsäulen Chirurgie wird zum Beispiel der Wirbelkörper als anatomisches Objekt mit einem CT präoperativ dargestellt. Vor dem Beginn der Navigation ist im OP durch die Registrierung (siehe oben) die im gespeicherten Bilddatensatz dargestellte Patienten-anatomie mit der aktuellen Patientenana-



**Abb.1** Raum für die registrierungsfreie Navigation auf Basis von CT-Bilddaten. Rechts im Bild die Gantry des CT und der ange-koppelte CT-Tisch. Über dem CT-Tisch an der Decke fix montiert befindet sich die Infrarot-kamera.

tomie und den zugehörigen Raumpunkten im Patienten zu korrelieren.

Konkret wird bei der Registrierung für Punkte am anatomischen Objekt das sogenannte *Point-Pair-Matching* durchgeführt. Anatomisch markante Punkte werden mit einem referenzierten Instrument aufgesucht und die Position vom Digitalisiergerät erfasst. Gleichzeitig wird im Bilddatensatz der Bildpunkt markiert, auf dem der ausgezeichnete anatomische Punkt abgebildet ist. Ist das so beschriebene *Point-Pair-Matching* für die Mindestzahl von drei Punktepaaren durchgeführt worden, kann die gesuchte Korrelation zwischen Bilddatensatz und Patientenvolumen für alle Punkte beschrieben werden.

Sollen für das Point-Pair-Matching künstliche Landmarken (stereotaktischer Ring, Fiducial Marker) verwendet werden, so müssen diese in einem vorbereitenden Schritt vor der Bildgebung unverrückbar mit dem interessierenden anatomischen Objekt verbunden werden. Das erfordert unter Umständen einen zusätzlichen Eingriff. Andernfalls müssen als erster Schritt im OP die anatomischen Landmarken (siehe oben) zugänglich gemacht werden. Als natürliche Landmarken dienen zum Beispiel an der Wirbelsäule Dorn- und Querfortsätze des interessierenden Wirbelkörpers. Durch die chirurgische Freilegung verliert man einen Teil des durch minimalinvasive Zugänge beim bildgeführten Eingriff erzielten Vorteils.

Häufig wird zur Steigerung der Genauigkeit eine redundante Anzahl von Punktepaaren verwendet. Vor Beginn des bildgeführten Eingriffs wird die berechnete Korrelation einer Plausibilitätsanalyse unterzogen. Liegen die errechneten Ungenauigkeiten über definierten Toleranzgrenzen, muss das Registrierungsverfahren wiederholt werden.

Andernfalls kann mit dem navigierten Eingriff begonnen werden. Das Digitalisiergerät erfasst die Position einer Pedikelahle, die z.B. durch eine Stichinzision hindurch an die Oberfläche des Wirbelkörpers herangeführt wurde. Aufgrund der durchgeführten Registrierung wird dem Raumpunkt im Patienten, an dem sich die Spitze der Pedikelahle befindet, ein Bildpunkt im präoperativen CT-Bilddatensatz zugewiesen. Diejenige CT-Schicht, die diesen Bildpunkt enthält, wird auf dem Computerbildschirm des Navigationssystems dargestellt. An dem berechneten Bildpunkt wird eine simulierte Projektion der Pedikelahle eingeblendet, die deren Lage und Position relativ zum Wirbelkörper veranschaulicht (visualisiert). Bei Bewegungen des Instruments wird die Einblendung ständig aktualisiert: Erfolgt die Bewegung in der Bildebene der CT-Schicht, so bewegt sich die simulierte Projektion scheinbar in dieser CT-Schicht. Erfolgt die Bewegung des Instrumentes senkrecht zu den Bildebenen des CT, wird vom Navigationssystem für die simulierte Projektion eine andere Schicht im CT-Datensatz berechnet und diese neue Schicht auf dem Computerbildschirm dargestellt.

Die berechnete Transformationsmatrix ist gültig, solange das registrierte anatomische Objekt und das Digitalisiergerät ihre räumliche Position relativ zueinander beibehalten. Andernfalls verlieren die berechneten Raumkoordinaten ihre Gültigkeit und das chirurgische Instrument wird an falscher Stelle ins Bild eingeblendet. Erfordert die Art des geplanten Eingriffes Bewegungen des interessierenden anatomischen Objekts nach der Registrierung, so muss eine DRB (siehe oben) eingesetzt werden. Damit lassen sich Relativbewegungen zwischen dem registrierten Volumen und dem Digitalisiergerät auf mathematische Art erfassen.

Die Raumkoordinaten, mit denen die Position des registrierten Patientenvolumens beschrieben wird, lassen sich dann aktualisieren. In letzter Zeit hat die registrierungsgebundene Navigation in Traumatologie und Orthopädie Verbreitung gefunden, wo sie für die Pedikelschraubeninsertion und Beckenosteotomien eingesetzt wird [5].

Vorteile der registrierungsgebundenen chirurgischen Navigation

- Hat die Registrierung z. B. durch Bewegung des Patienten beim Arbeiten ohne DRB ihre Gültigkeit verloren, kann die Registrierung wiederholt und der Eingriff ohne erneute Bildgebung fortgeführt werden.
- Durch die zeitliche und räumliche Trennung von Bildgebung und Eingriff lassen sich CT- und MRT-Bilddaten für die intraoperative Bildführung einsetzen, auch wenn die Tomografiegeräte im OP nicht zur Verfügung stehen.

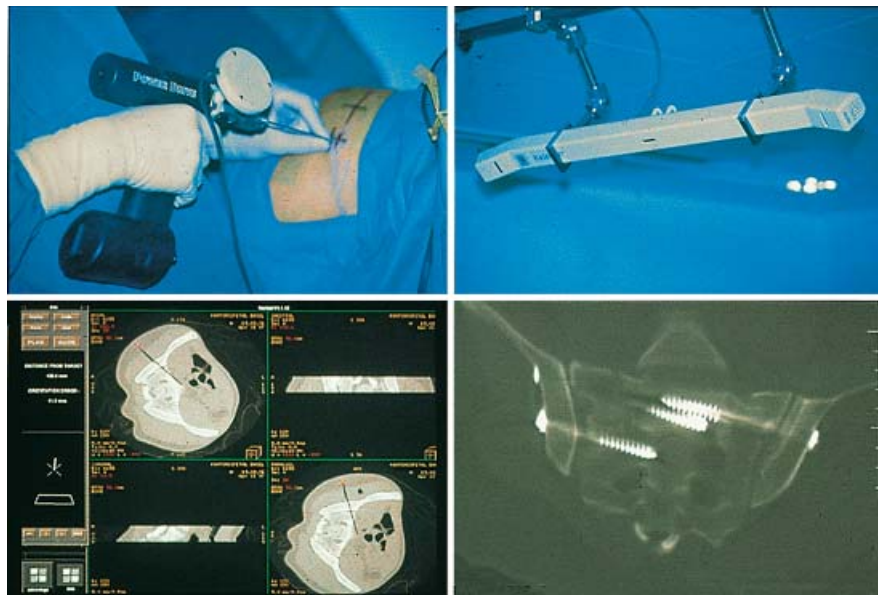
Nachteile der registrierungsgebundenen chirurgischen Navigation

- Der Registrierungsprozess ist fehleranfällig, seine Qualität beeinflusst die erzielbare Genauigkeit.
- Da die Registrierung intraoperativ durchgeführt werden muss, erfolgt diese stets unter einem gewissen Zeitdruck.
- Auf Nachteile durch die Verwendung von Landmarken wurde bereits hingewiesen.
- Bei Veränderung der relevanten Patientenanatomie im Rahmen des Eingriffes, z. B. aufgrund der Frakturposition, ist die Erstellung eines aktuellen Bilddatensatzes nicht möglich.

### Registrierungsfreie Navigation

Bei der registrierungsfreien Navigation erfolgt die Bildgebung typischerweise im OP unmittelbar vor dem Eingriff.

Die Beziehung zwischen Bildpunkten und den zugehörigen Raumpunkten im abgebildeten Volumen ist bereits bei der Installation des Navigationssystems aufgrund der externen Kalibration (siehe oben) bekannt. Bei dieser Methode lassen sich die Raumpunkte des abgebildeten Volumens in Raumkoordinaten des Digitalisiergerätes beschreiben. Das abgebildete Volumen und das Patientenvolumen entsprechen sich zum Zeitpunkt der Bildgebung exakt. Somit hat man unmittelbar nach der Bildgebung einen Bilddatensatz mit den oben beschriebenen, für die chirurgische Navigation notwendigen Eigenschaften zur Verfügung. Daher kann unmittelbar nach der Bildgebung mit der Navigation begonnen werden. Um Bewegungen des Patienten zu erfassen kann



**Abb. 2** Material, Methode und Ergebnis einer navigierten hinteren Beckenringosteosynthese. Rechts oben die Infrarotkamera, mit der die Leuchtdioden an der Bohrmaschine (links oben) geortet werden. Darunter der Bildschirm des Navigationssystems mit der aktuellen CT-Schicht, einer koronaren und sagittalen Rekonstruktion. Aktuelle Position und Achse des Bohrers rot, geplante Position grün angezeigt. Rechts unten Abschluss CT nach dem Einbringen von drei Schrauben in das Kreuzbein.

auch bei diesem Verfahren eine DRB eingesetzt werden.

Vorteile der registrierungsfreien Navigation

- Eine Registrierung ist bei diesen Verfahren nicht erforderlich. Es kann unmittelbar nach der Bildgebung mit der Navigation begonnen werden. Dadurch wird der zusätzliche – durch den Einsatz der Navigationstechnik bedingte – Zeitaufwand bei den registrierungsfreien Navigationsverfahren reduziert.
- Herstellung der wichtigen Korrelation zwischen Bilddaten und Volumenkoordinaten mit der externen Kalibration durch einen Techniker unabhängig von einem operativen Eingriff und dem damit verbundenen Zeitdruck.
- Nach intraoperativer Veränderung der relevanten Patientenanatomie kann durch intraoperative Bildgebung ein aktueller Bilddatensatz erzeugt werden.

Nachteile der registrierungsfreien Navigation

- Die bildgebende Einheit muss im OP einsatzfähig sein.

### Eigene Erfahrungen

Das theoretisch vorgestellte Konzept der registrierungsfreien Navigation soll durch eigene Erfahrungen mit den in Basel eingesetzten Systemen illustriert werden.

### Registrierungsfreie Navigation auf der Basis von CT Bilddaten

Dieses Verfahren wurde durch die CAR-CAS (Computer Assisted Radiology Computer Assisted Surgery) Arbeitsgruppe am Kantonsspital Basel beschrieben und bis zur klinischen Anwendungsreife entwickelt [3]. Hierzu wurde einer der CT-Räume durch Einbau entsprechender Reinraumtechnik als OP ausgestattet. Daher können Bildgebung mit dem CT und chirurgischer Eingriff im gleichen Raum durchgeführt werden. Eine Infrarotkamera wurde als Digitalisiergerät zur Positionserfassung fix installiert (siehe **Abb. 1, 2**). Bei der externen Kalibration wird die Lage des CT-Nullpunktes und die Bildebene des CT mit einem Kalibrationsinstrument in Raumkoordinaten des Digitalisiergerätes gemessen. Somit ist für jede einzelne CT-Schicht die Beziehung zwischen Bilddaten und dem abgebildeten Raumvolumen bekannt.

Der Patient wird bereits vor der Bildaufnahme auf einer Vacuummatratze fixiert (siehe **Abb. 3**). Daher entsprechen sich das abgebildete Volumen und das Patientenvolumen, solange der Patient nach der Bildgebung nicht unkontrolliert bewegt wird. Für die anschließende Intervention wird der Patient aus der Gantry herausgehoben, was durch eine einfache, bekannte Translation zu beschreiben ist.



**Abb. 3** Patient in Links-Seitenlage, Kopf links, auf der Vacuummatratze fixiert und gelagert. Die sterile Abdeckung bezieht auch die CT-Gantry mit ein.

Dieser Verschiebung des abgebildeten Volumens wird durch Aktualisierung der Raumkoordinaten Rechnung getragen. Somit steht unmittelbar nach der Bildgebung ein CT Bilddatensatz mit den oben formulierten Eigenschaften zur Verfügung und es kann mit der Navigation begonnen werden, wenn nicht zuvor eine präoperative Planung erforderlich ist.

Ein Aktualisieren der Bildinformation ist bei diesem System jederzeit möglich. Da wir bei diesem System keine DRB einsetzen und die Position des abgebildeten Volumens über die Tischposition erfasst wird, bewirkt jede unbemerkte Verschiebung des Patienten gegenüber dem CT-



**Abb. 4** Patient in Links-Seitenlage, Kopf links nach navigierter, perkutaner Beckenringverschraubung. Man beachte die beiden parallelen, winzigen Hautinzisionen, die für die perkutane Osteosynthese ausreichen.

Tisch nach der Bildgewinnung einen Virtual-Real mismatch, d.h. es wird dem Chirurgen auf dem Bildschirm eine falsche Position für sein chirurgisches Instrument dargestellt. Seit 1993 haben wir das System für perkutane Verschraubungen des Ileosakralgelenks bei Beckenringfrakturen in mehr als 110 Fällen eingesetzt (siehe **Abb. 3, 4**).

*Registrierungsfreie Navigation auf der Basis von Fluoroskopiebilddaten*

Ein Verfahren für die registrierungsfreie Navigation auf der Basis von intraoperativ erzeugten Fluoroskopiebilddaten wurde beschrieben [2]. Wir setzen ein solches System (Surgigate®, Medivision, Oberdorf, Schweiz) im Rahmen definierter Behandlungsprotokolle bei der Marknagelosteosynthese von langen Röhrenknochen ein (siehe **Abb. 5**). Die Präzision der chirurgischen Aktion, die intraoperative Strahlenbelastung, der erforderliche Personaleinsatz und die Operationszeit werden dokumentiert, um eine objektive Bewertung des Systems vornehmen zu können. Bislang konnten wir die Methode bei mehr als 40 Marknagelosteosynthesen für die Definition des Eintrittspunktes, Frakturposition und distale Verriegelung einsetzen (siehe **Abb. 6, 7**).

Da dieses System auf der Basis von Fluoroskopiebilddaten arbeitet, die in jedem Unfall-OP erhältlich sind, darf erwartet werden, dass dieses Verfahren in der Traumatologie rasch eine weite Verbreitung finden wird. Gegenüber der herkömmlichen Durchleuchtung bietet dieses Verfahren Vorteile:

- räumliche Information durch simultane Anzeige in mehreren Projektionen (siehe **Abb. 6**)
- Reduktion der Strahlenbelastung durch Rückgriff auf gespeicherte Bilddaten.



**Abb. 5** Das Surgigate® Navigationssystem mit Computereinheit, Digitalisiergerät und chirurgischen Instrumenten mit daran befestigten Instrumentenreferenzen.

*Probleme beim Einsatz von Navigationssystemen*

Der Einsatz moderner Navigationstechnik bringt auch Probleme mit sich. Als erstes sei der hohe finanzielle Aufwand für die Anschaffung genannt. Nach unserer Erfahrung erfordert der klinische Einsatz der Navigationstechnik außerdem ein Mehr an Ressourcen, auch nach Durchlaufen der Lernphase. So muss z.B. für die Wartung sowie für Auf- und Abbau des Navigationssystems prä- und postoperativ speziell geschultes Personal zur Verfügung stehen. Die klinische Erfahrung beim Einsatz dieser Technik ist gegenwärtig noch gering und auf wenige Indikationen beschränkt.

**Ausblick**

Als vorrangiges Ziel soll in Zukunft untersucht werden, bei welchen Indikationen die Navigationstechnik mit Vorteil für Patient und OP-Team eingesetzt werden kann. Weiter soll in Zukunft eine räumliche Fusion von Bildgebung und OP stattfinden, indem mehrere bildgebende Verfahren in einem neuartigen Interventionsraum verfügbar gemacht werden, der gleichzeitig eine Operationsraumgebung bietet. Der Chirurg wählt je nach Verletzung das geeignete bildgebende Verfahren aus z.B. CT-Bildgebung für Becken und Wirbelsäulenverletzungen, Fluoroskopie für die Versorgung von Schaftfrakturen und MRT/MR-Angio zur Abklärung einer Mitbeteiligung von



**Abb. 6** Bildschirm des Surgigate® Systems beim Aufsuchen des Eintrittspunktes für den UFN in das proximale Femur. Links die gespeicherte AP Ansicht, rechts die gespeicherte axiale Projektion der Zielregion. Die aktuelle Position des Bohrdornes wird in beiden Ansichten simultan als roter Balken simuliert, die Längsachse ist als mögliche Bewegungsrichtung in Form einer Strichlinie weitergeführt. Die Anzeige wird bei Bewegungen kontinuierlich aktualisiert.



**Abb. 7** Distale Verriegelung eines Femurmarknagels mit dem Surgigate® Navigationssystem. Ganz rechts die Infrarotkamera. Diese ortet die an der Referenzbasis des Nagels und an der Bohrmaschine angebrachten Leuchtdioden. Das Ergebnis der Koordinatenberechnung wird auf dem Bildschirm dargestellt der gegenüber dem Operateur platziert ist. Die Bohrung wird unter kontinuierlicher visueller Kontrolle auf der Basis gespeicherter Bilddaten ausgeführt. Der C-Bogen ist in Abstand zum Patienten geparkt.

Gefäßen und zur Beurteilung der assoziierten Weichteilschäden. Die Eingriffe können dann im Interventionsraum minimal invasiv unter Einsatz der Navigationstechnik vorgenommen werden. Idealerweise können die Informationen der verschiedenen bildgebenden Modalitäten fusioniert werden, d.h die „Sichtweise“ der interessierenden Region mit den diversen bildgebenden Verfahren (CT, MRI, Angio, Fluoroskopie) wird überlagert und auf dem Computerbildschirm dargestellt. Entsprechende Entwicklungen sind für die Neurochirurgie und die endonasale Sinuschirurgie in der HNO Heilkunde bereits im Gange, wo endoskopische und 3D-Bilddaten von CT und MRI überlagert werden können.

#### Interdisziplinäres Arbeiten

Bei dieser Konzentration moderner bildgebender Verfahren im OP ist interdisziplinäres Arbeiten unabdingbar.

Dies betrifft die Beteiligung des Radiologen an der intraoperativen Bildgebung und Auswertung, die Finanzierung/Anschaffung der kostspieligen Tomografiegeräte und auch deren Auslastung zu rein diagnostischen Zwecken in OP-freien Zeiten. Interventionell tätige Radiologen und minimal invasiv tätige Chirurgen müssen sich vertieftes Wissen aus dem entsprechenden „Nachbarfach“ aneignen (crossover knowledge).

#### Ziele

Die neuen chirurgischen Navigationstechniken und die damit einhergehende Technikintegration eröffnen auf der einen Seite faszinierende neue therapeutische Optionen. Auf der anderen Seite steht der Beweis der Nützlichkeit und Therapieverbesserung bei vielen dieser neuen Operationstechniken noch aus.

In einem Gesundheitswesen mit hohem Kosten- und Qualitätsbewusstsein werden sich diese Verfahren nur dann etablieren, wenn diese Punkte zuvor durch kontrollierte Behandlungsprotokolle positiv geklärt werden können.

#### Literatur

- DiGioia AM, Jaramaz B, Colgan BD. Computer assisted orthopaedic surgery. Image guided and robotic assistive technologies. Clin Orthop 1998; 8 – 16
- Hofstetter R, Slomczykowski M, Sati M, Nolte LP. Fluoroscopy as an imaging means for computer-assisted surgical navigation. Comput-Aided-Surg. 1999; 4(2): 65 – 76
- Jacob AL, Messmer P, Kaim A, Suhm N, Regazzoni P, Baumann B. A whole-body registration-free system for image-guided surgery and interventional radiology. Invest Radiol 2000; 35: 279 – 288
- Reinhardt HF, Horstmann GA, Gratzl O. Sonic Stereometry in Microsurgical Procedures for Deep-Seated Brain Tumors and Vascular Malformations. Neurosurgery 1993; 32: 51 – 57
- Schwarzenbach O, Berlemann U, Jost B, Visarius H, Arm E, Langlotz F, Nolte LP, Ozdoba C. Accuracy of computer assisted pedicle screw placement – An in vivo CT analysis. Spine 1997; 22 (4): 452 – 458

- Suhm N, Jacob AL, Zuna I, Roser HW, Regazzoni P, Messmer P. Strahlenexposition des Patienten durch intraoperative Bildgebung bei Marknagelosteosynthesen. Im Druck in Der Radiologe

- Voges J, Schröder R, Treuer H, Pastyr O, Schlegel W, Lorenz WJ, Sturm V. CT-guided and computer assisted stereotactic biopsy. Technique, results, indications. Acta-Neurochir 1993; 125 (1 – 4): 142 – 149

#### Dr. med. Dipl. phys. N. Suhm

Assistenzarzt

Departement Chirurgie, Kantonsspital

Spitalstrasse 21

4031 Basel

#### Dr. med. P. Messmer

1. Oberarzt Abteilung Traumatologie

Departement Chirurgie, Kantonsspital Basel

Spitalstrasse 21

4031 Basel

#### Dr. med. A. L. Jacob

Leitender Arzt Angioradiologie

Departement Radiologie, Kantonsspital Basel

Petersgraben 2 – 4

4031 Basel

#### Prof. Dr. med. P. Regazzoni

Leiter Abteilung Traumatologie

Departement Chirurgie, Kantonsspital Basel

Spitalstrasse 21

4031 Basel