

J. Wurm<sup>1</sup> · K. Bumm<sup>1</sup> · H. Steinhart<sup>1</sup> · M. Vogele<sup>2</sup> · H. G. Schaaf<sup>3</sup> · C. Nimsky<sup>4</sup>  
R. Bale<sup>5</sup> · J. Zenk<sup>1</sup> · H. Iro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohren-Kranke der Universität Erlangen-Nürnberg

<sup>2</sup> Medical Intelligence GmbH, Schwabmünchen

<sup>3</sup> PolyDiagnost GmbH, Pfaffenhofen

<sup>4</sup> Neurochirurgische Klinik der Universität Erlangen-Nürnberg

<sup>5</sup> SIP-Lab, Universitätsklinik für Radiodiagnostik, Innsbruck

# Entwicklung eines aktiven Robotersystems für die multimodale Chirurgie der Nasennebenhöhlen

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind verschiedene Robotersysteme im klinischen Einsatz oder Gegenstand der medizinischen Forschung [5]. Dabei muss zwischen Robotersystemen im engeren Sinne und Telemanipulatoren unterschieden werden. Telemanipulatoren setzen Bewegungen des Operateurs nach dem Master-Slave-Prinzip um. Diese Bewegungen werden über eine Bedienungskonsole auf speziell entwickelte, in den Thorax oder die Bauchhöhle des Patienten eingeführte Instrumente übertragen. Telemanipulatoren ermöglichen dadurch einerseits chirurgische Eingriffe über minimal-invasive Zugangswege, andererseits eine Reduzierung des Handtremors des Chirurgen. Ein Beispiel für den klinischen Einsatz stellt das „daVinci“<sup>TM</sup>-System in der Herzchirurgie dar. Darüber hinaus werden Telemanipulatoren auch als Endoskopführungssysteme – hier gesteuert über einen Joystick – beispielweise in der Neuroendoskopie verwendet.

Echte Roboter hingegen führen nach vorheriger Programmierung einzelne Schritte operativer Eingriffe vollautomatisiert und selbständig durch. Anhand von präoperativ gewonnenen Bilddaten des Patienten können mit Hilfe der integrierten Software die durchzuführenden operativen Schritte geplant, simuliert und schließlich ausgeführt werden.

Ein Beispiel für den routinemäßigen klinischen Einsatz ist das „ROBODOC“<sup>®</sup>-System auf dem Gebiet der Hüft- und Kniegelenkendoprothetik. Vorrangiges Ziel für die Verwendung von Telemanipulatoren und Robotern ist die Erhöhung der Präzision und Reproduzierbarkeit chirurgischer Eingriffe. Auf dem Gebiet der Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde haben Plinkert et al. und Federspil et al. ein Robotersystem zur Durchführung von Fräsarbeiten an der lateralen Schädelbasis vorgestellt. Das System wurde zur Erstellung eines Implantatlagers für ein Kochleaimplantat eingesetzt. Die Autoren berichteten über exzellente Ergebnisse im Hinblick auf Präzision und Reproduzierbarkeit bei der Bearbeitung von Knochenoberflächen des Mastoids [4, 11, 12].

Ein aktives Robotersystem für die vollautomatisierte Chirurgie der NNH ist bisher nicht beschrieben. Die Entwicklung der endoskopischen NNH-Chirurgie hat die funktionellen Ergebnisse in den letzten 20 Jahren deutlich verbessert. Schwere Komplikationen sind selten, haben häufig jedoch fatale Folgen für den Patienten. Verletzungen des Sehnerven oder der A. carotis interna können zu Erblindungen bzw. zu lebensbedrohlichen Blutungen führen. Aufgrund der engen anatomischen Beziehungen treten diese Verletzungen v. a. bei

Eingriffen der Keilbeinhöhle mit blinder Perforation der Vorderwand auf.

Weniger schwerwiegend, jedoch häufiger, sind Verletzungen der Aa. ethmoidales mit Einblutungen in die Orbita und Perforationen der Dura mit nachfolgenden Liquoristeln. Die Inzidenz schwerwiegender Komplikationen liegt bei ca. 0,1%; die Inzidenz leichterer Komplikationen bei bis zu 10% [7, 9, 13, 14].

Mit dieser Arbeit stellen wir das Robotersystem „A 73“ mit seinen neuartigen Instrumenten vor, das speziell für die Anforderungen der endoskopischen NNH-Chirurgie entwickelt wurde. In diesem Zusammenhang werden die Ergebnisse einer vollautomatisierten endoskopischen Eröffnung der Keilbeinhöhle durch das Robotersystem an 5 anatomischen Präparaten dargestellt. Dabei kombiniert das System neben der vollautomatisierten Chirurgie sowohl die Eigenschaften eines Telemanipulationsmodus als auch die Vorteile der Computernavigation.

## Material und Methode

### Technische Daten und Steuerungselemente

Grundelement des Systems ist der Industrieroboter RV1a der Fa. Mitsubishi Elec-



Abb. 1 ▲ Gesamtsetup des Robotersystems „A 73“

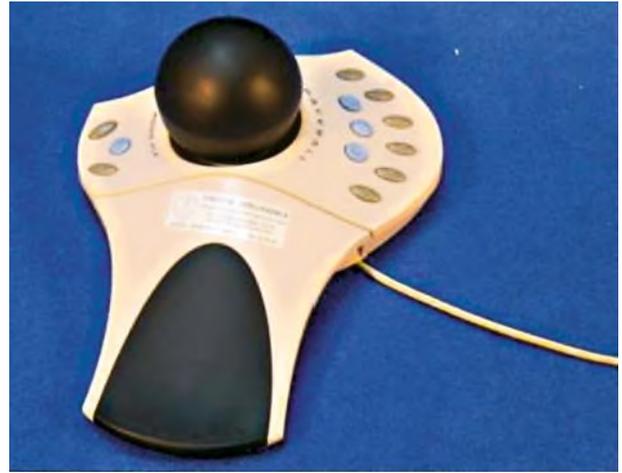


Abb. 2 ▲ Steuerungselemente (6D-Joystick)



Abb. 3 ◀ Steuerungselemente (Kraftmomentensensor)



Abb. 4 ▲ Neuroptik T 30 mit integrierter Fräse

tric mit Controller CR1-571. Es handelt sich um einen Knickachsenroboter mit 6 Freiheitsgraden, einer Höhe von 90 cm und einem Gesamtgewicht von 19 kg. Der Roboterarm hat eine Reichweite von 418 mm. Die Instrumentenhalterung kann mit einem Gewicht von 1,5 kg bestückt werden. Das System erlaubt eine maximale Manövriergeschwindigkeit von bis zu 2100 mm/s mit einer Wiederholungsgenauigkeit von 0,02 mm. Der mechanische Widerstand ist gering und für alle Achsen identisch.

Das System wurde als „Stand-alone-Konzept“ entwickelt. Roboter und Steuerungselemente sind auf einem beweglichen Unterbau angebracht. Über einen hydraulischen Hubarm kann die Arbeitshöhe des Roboters der Höhe des Opera-

tionstisches stufenlos angepasst werden. Der Kopf des Patienten wird in einer speziellen Halterung gelagert. Die Position dieser Halterung kann über Hebelarme nahezu beliebig in ihrer Position verändert und fest am Roboter fixiert werden. Die Spitze des Arbeitsarmes wurde so konzipiert, dass über entsprechende Adapter der Einsatz verschiedener chirurgischer Instrumente möglich ist.

Für die Planung und Durchführung der operativen Arbeitsschritte wurde eine PC-basierte Software mit bedienungsfreundlicher Oberfläche neu entwickelt. Dadurch ist der RV1a umfassend programmierbar und flexibel einsetzbar. Ein integrierter RC-Proxy-Server (Roboter-Controller-Proxy-Server) mit 10-MB-Ethernet-Netzwerk und TCP-Anwendungs-

schnittstelle koordiniert einerseits die Planungs- und Navigationssoftware, andererseits auch die Referenzierung und Kalibrierung des Patienten und der Operationsinstrumente. Darüber hinaus ermöglicht der RC-Proxy-Server die Steuerung des Roboters auch über einen 6D-Joystick (SpaceBall, Fa. 3Dconnexion, Seefeld). Somit können operative Schritte sowohl vollautomatisiert, als auch in einem Telemanipulationsmodus durchgeführt werden (■ Abb. 1).

Ein integrierter Kraftmomentensensor am Ende des Arbeitsarmes erlaubt eine aktive Kontrolle des Systems. Auftretende und applizierte Kräfte sind durch diesen Sensor sehr empfindlich messbar. Werden zuvor festgelegte Grenzwerte überschritten, führt dies zum Abbruch des Arbeits-

J. Wurm · K. Bumm · H. Steinhart · M. Vogele · H. G. Schaaf · C. Nimsky · R. Bale · J. Zenk  
H. Iro

## Entwicklung eines aktiven Robotersystems für die multimodale Chirurgie der Nasennebenhöhlen

### Zusammenfassung

**Hintergrund.** Schwere Komplikationen der endoskopischen Chirurgie der Nasennebenhöhlen (NNH) haben häufig fatale Folgen für die Patienten. Verletzungen des N. opticus oder der A. carotis interna treten v. a. bei Perforationen der Keilbeinhöhlenvorderwand auf.

**Material und Methoden.** Das Robotersystem „A 73“ wurde mit einem 4-Kanal-Mikroendoskop und speziellen Instrumenten nach vorheriger Programmierung vollautomatisiert zur Eröffnung der Keilbeinhöhlenvorderwand bei 5 anatomischen Präparaten eingesetzt.

**Ergebnisse.** In allen Fällen konnte die Keilbeinhöhlenvorderwand ohne Verletzung benachbarter Strukturen durch den Roboter vollautomatisiert eröffnet werden. Der

Zugang wurde anschließend über den Telemanipulationsmodus endoskopisch kontrolliert auf den gewünschten Durchmesser erweitert. Die Analyse des Transformationsfehlers und der intraoperativen Genauigkeit ergab Werte im Submillimeterbereich.

**Fazit.** Mit einem neu entwickelten Robotersystem gelingt die vollautomatisierte Eröffnung der Keilbeinhöhle präzise und reproduzierbar. Der geschaffene Zugang lässt sich über einen Telemanipulationsmodus erweitern.

### Schlüsselwörter

Robotik · Computerassistierte Chirurgie · Nasennebenhöhlenchirurgie · Keilbeinhöhle · Telemanipulationsmodus

## Development of an active robot system for multi-modal paranasal sinus surgery

### Abstract

**Background.** Severe complications in endoscopic paranasal sinus surgery are rare, however, when they occur they are often fatal. Injuries to the optic nerve or the internal carotid artery mostly occur after penetration of the sphenoid sinus' anterior wall.

**Methods.** We present the robot system „A 73“ with its newly designed 4-canal-microendoscope and special instruments that meets the demands of endoscopic paranasal sinus surgery. A fully automated perforation of the sphenoid sinus' anterior wall was performed in five cadaveric specimens.

**Results.** The sphenoid sinus' anterior wall could be perforated without damaging the surrounding structures in all cases. Subse-

quently, the approach was enlarged to the desired diameter using telemanipulation mode. The analysis of both the transformation error and intraoperative accuracy showed values in the submillimeter range.

**Conclusions.** Using a newly developed robotic system, a fully automated perforation of the sphenoid sinus' anterior wall was performed precisely and reproducibly. This approach can be enlarged in a telemanipulation mode.

### Keywords

Robotics · Computer-assisted surgery · Paranasal sinus surgery · Sphenoid sinus · Telemanipulation mode

quently, the approach was enlarged to the desired diameter using telemanipulation mode. The analysis of both the transformation error and intraoperative accuracy showed values in the submillimeter range. **Fazit.** Mit einem neu entwickelten Robotersystem gelingt die vollautomatisierte Eröffnung der Keilbeinhöhle präzise und reproduzierbar. Der geschaffene Zugang lässt sich über einen Telemanipulationsmodus erweitern. **Schlüsselwörter** Robotik · Computerassistierte Chirurgie · Nasennebenhöhlenchirurgie · Keilbeinhöhle · Telemanipulationsmodus

## Instrumente

Für die Anforderungen der robotischen NNH-Chirurgie wurden ein spezielles Mikroendoskop und Bohrer verschiedener Ausführungen völlig neu entwickelt. Die Gesamtlänge des Endoskops (Neuroptik T 30°, PolyDiagnost GmbH, Pfaffenhofen) beträgt 226 mm. In den Schaft wurden 4 Arbeitskanäle feinmechanisch eingearbeitet, die mit einer Optik, einem Bohrer sowie einer Saug-Spül-Vorrichtung bestückt werden können. Diese Saug-Spül-Vorrichtung erlaubt eine ausreichende Kühlung des Bohrerkopfes der während des Fräsens von feinen Knochenlamellen der NNH auftretenden geringen Hitzeentwicklung. Ferner wird dadurch die intraoperative Reinigung des Endoskops während des Fräsvorgangs erreicht.

Die verwendete Optik hat eine Auflösung von 30.000 Pixel, eine Blickrichtung von 0° und ein Sichtfeld von 105°. Der Gesamtdurchmesser des Endoskops beträgt 5 mm. Die Arbeitskanäle für den Bohrer sowie die Saug-Spül-Vorrichtung haben einen Durchmesser von 2,25 mm bzw. je 1,1 mm (**Abb. 4**).

Für die Bohrer selbst wurden zylindrische und sphärische Formen mit Durchmessern von 2 und 3 mm gewählt. Das distale Ende der Fräsen ist auf einer Länge von 15 mm durch eine zusätzliche Metallummantelung versteift, um unerwünschte Bewegungen der Bohrerspitze zu vermeiden. Alle Bohrer können als „Vorderlader“ in das Endoskop eingeführt werden. Damit ist die Verwendung von Bohrköpfen gewährleistet, deren Durchmesser den des Arbeitskanals übersteigt. Um das Gewicht am Roboterarm zu minimieren, wurde zwischen Endoskop und Motor ein Verlängerungsstück eingesetzt, durch das die Position des Bohrers zusätzlich verändert werden kann. Der Motor leistet bei stufenloser Regelung bis zu 40.000 Umdrehungen/min. Ferner sind ein Rechts- und Linkslauf möglich. Über einen Adapter aus Leichtmetall wird das Endoskop am Roboterarm fixiert (**Abb. 5**).



Abb.5 ▲ Entwickelte Zylinderfräsen und Rosenbohrer

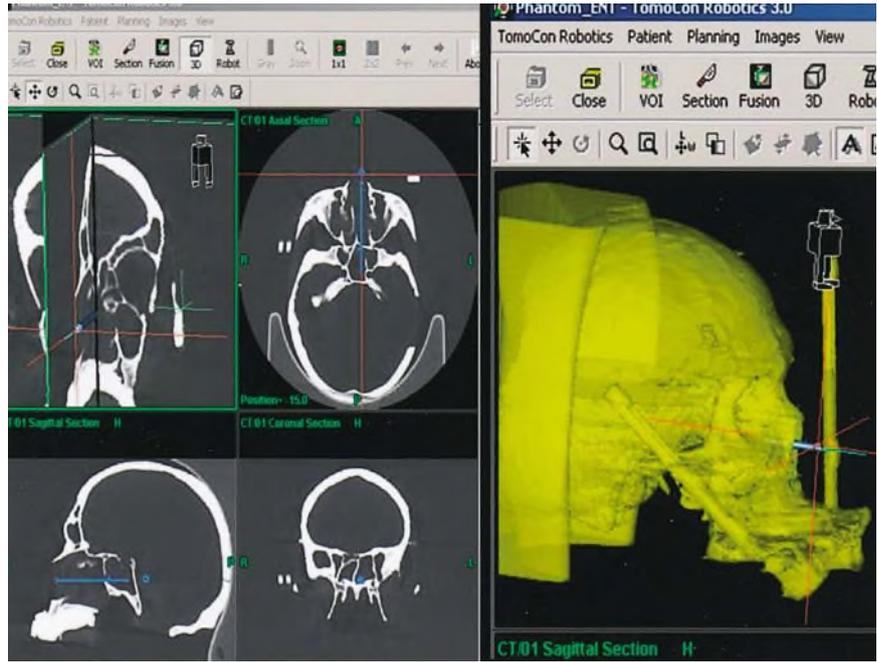


Abb.6 ▲ Geplante Trajektorie für die Eröffnung der Keilbeinhöhle

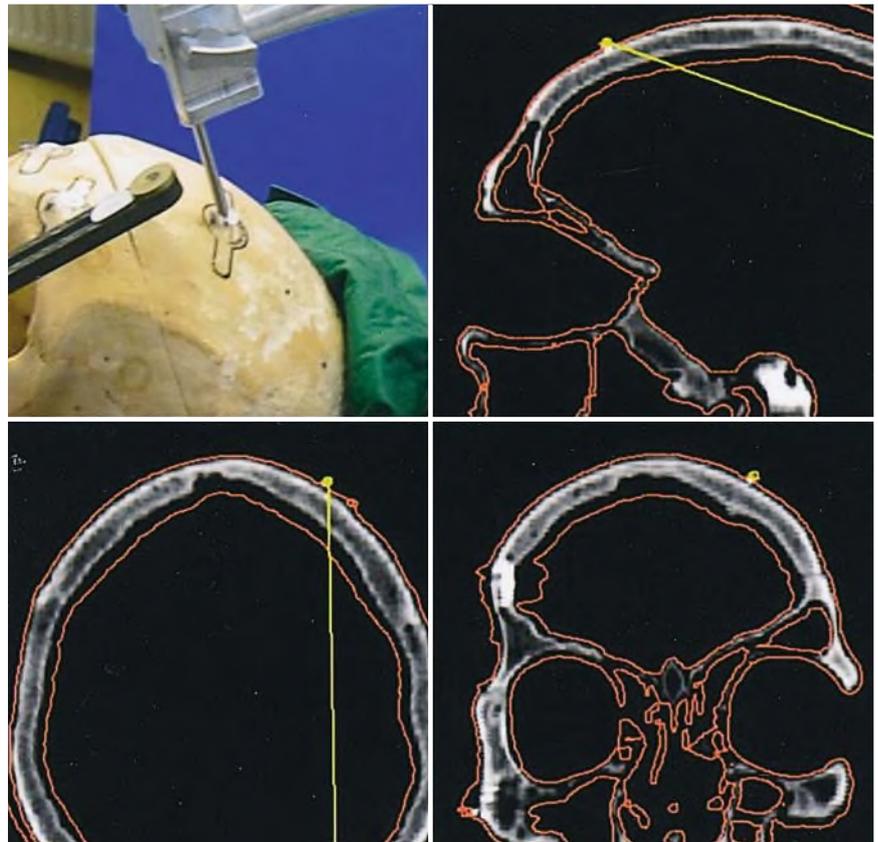


Abb.7 ► Genauigkeitsanalyse (intraoperative Genauigkeit)

## Arbeitsablauf

Als 1. Schritt der präoperativen Planung ist zunächst die Erstellung eines herkömmlichen CT- oder MRT-Datensatzes not-

wendig. Dazu wird ein Mundstück in die Mundhöhle des anatomischen Präparats eingeführt und mit Hilfe einer härtenden Plastilinmasse ein Abdruck des Oberkiefers angefertigt. Dadurch ist gewährleistet,

dass sich das anatomische Präparat nicht relativ gegen das Mundstück verschieben kann. Das Mundstück selbst wird fest mit einer Rahmenkonstruktion verbunden, auf der nicht verschiebliche Referenz-

Tabelle 1

Genauigkeitsanalyse (RMS-Werte)					
	Registrierung der Kopfposition mit nichtinvasivem Referenzierungsrahmen				
Registrierung	1	2	3	4	5
RMS-Messpunkt 1 [mm]	0,7	0,86	0,21	1,2	0,76
RMS-Messpunkt 2 [mm]	0,96	0,45	0,5	0,58	1,3
RMS-Messpunkt 3 [mm]	0,52	0,7	0,71	0,92	0,85
Mittlere Abweichung [mm]	0,73	0,67	0,47	0,90	0,97

RMS: Root Mean Square

zierungspunkte angebracht sind (VBH-Mouthpiece, modifiziertes HEADFIX™-System, Fa. Medical Intelligence GmbH, Schwabmünchen). Mit diesem Aufbau kann nun der Bilddatensatz erstellt werden. Die Speicherung der Bilddaten erfolgt im DICOM-Format.

Die Planungssoftware des Systems errechnet aus den gewonnenen Bilddaten dreidimensionale Rekonstruktionen und ein Volumenmodell, die auf der Bildschirmoberfläche dargestellt werden. Im nächsten Schritt erfolgt die Referenzierung mit Hilfe der oben beschriebenen Rahmenkonstruktion, um die relative Position des Roboters zum Präparat zu bestimmen. Dazu werden Mundstück und Referenzierungsrahmen erneut am anatomischen Präparat angebracht. Die Lagerung des anatomischen Präparats auf einem Vakuumkissen erhöht zusätzlich die Sicherheit gegenüber Relativbewegungen. Nach erfolgter Registrierung wird der Referenzierungsrahmen für den weiteren Fortgang der Operation nicht mehr benötigt. Die technischen Daten des verwendeten Instrumentes (Länge, Dicke etc.) sind in die Planungssoftware integriert, sodass dieses vom System erkannt und eingeeicht werden kann.

Auf der Bildschirmoberfläche können nun graphisch direkt im Bilddatensatz Ausgangs- und Endpunkt einer Trajektorie durch die Planungssoftware in jeder Schnittebene bestimmt werden. Der Verlauf der Trajektorie wird dabei in den dazu komplementären Schichten gleichzeitig dargestellt. Per Mausklick steuert der Roboter mit angekoppeltem Instrument aus einer beliebigen Position den zuvor festgelegten Ausgangspunkt einer Trajektorie an. Ein weiterer Mausklick löst schließlich

den Fräsvorgang aus. Nach Erreichen des zuvor festgelegten Endpunktes wird der Fräsvorgang vom System automatisch beendet. Der Fortgang der Arbeitsschritte lässt sich auf der Bildschirmoberfläche der Planungssoftware und über das Mikroskop in Echtzeit mitverfolgen. Der integrierte 6D-Joystick ermöglicht darüber hinaus eine weitere telemanipulatorische Bearbeitung des geschaffenen Zugangs zur Keilbeinhöhle. Die Steuerungselemente des Systems erlauben dabei feine Bohrvorschübe in Schritten von 0,01 mm (■ **Abb. 6**).

### Genauigkeitsanalysen

Bei der Berechnung der allgemeinen Systemgenauigkeit sind 2 Fehlerquellen zu berücksichtigen: eine fehlerhafte Registrierung (Transformationsfehler) und intraoperative Relativbewegungen des anatomischen Präparats.

Zur Bestimmung des Transformationsfehler wurden 9 fest am Referenzierungsrahmen angebrachte Markierungen verwendet. Durch die Konstruktion des Referenzierungsrahmens projizieren sich diese Markierungen sowohl auf das vordere Nasennebenhöhlensystem als auch auf die Keilbeinhöhlenvorderwand und die angrenzende Schädelbasis. Alle Markierungen wurden mit der Roboterspitze einzeln angefahren. Als Referenzpunkte dienten die jeweils tiefsten Einsenkungen der Markierungspunkte. Diese waren in allen Schnittebenen (axial, koronar, sagittal) auf der Bedienungsfläche der Navigationssoftware erkennbar. Die Korrelation zwischen Bild- und Roboterkoordinaten ergab den Transformationsfehler für jede Ebene. Daraus ließen

sich die RMS-Werte (Root Mean Square) berechnen.

Die intraoperative Genauigkeit wurde anhand von 30 über das Präparat verteilte anatomische Landmarken sowie 5 zusätzlich angebrachte CT-Marker in Form von aufklebbaren Metallkugeln mit 1 mm Durchmesser bestimmt. Unter anderem wurde ein CT-Marker in die zuvor sagittal eröffnete Keilbeinhöhle selbst eingebracht. Hier erfolgte dann der Vergleich der „realen“ mit der „virtuellen“ Position der Roboterspitze in allen 3 Bildebenen. Auf diese Weise wurden sowohl intraoperative als auch postoperative Messwerte gewonnen.

### Operationen am anatomischen Präparat

An 5 anatomischen Präparaten wurden sowohl vollautomatisierte als auch telemanipulatorische Operationen durchgeführt. Der experimentelle Aufbau gestaltete sich wie unter realen Operationsbedingungen. Alle präoperativ notwendigen Maßnahmen erfolgten in Übereinstimmung mit dem oben beschriebenen Ablauf. Nach Fixierung, Referenzierung und Kalibrierung wurden die operativen Schritte mit Hilfe der Steuerungssoftware gestartet. Ausgehend von der Startposition wurde der präoperativ geplante Pfad unter kontrollierter Geschwindigkeit zunächst vollautomatisiert abgefahren und die Vorderwand der Keilbeinhöhle eröffnet. In einem 2. Schritt erfolgte dann die telemanipulatorische Erweiterung des Zugangs.

### Ergebnisse

**Genauigkeitsanalysen.** ■ **Tabelle 1** zeigt die RMS-Werte für 5 Marker des Referenzierungsrahmens. Der mittlere Transformationsfehler liegt in allen Fällen unter 1 mm, unabhängig von der Position des Markers. Signifikante Abweichungen unter den Messwerten traten nicht auf.

Intraoperativ wurde ebenfalls eine Genauigkeit von unter 1 mm erreicht. Eine weiter reichende Analyse wurde durch die Kapazität der CT-Bildauflösung limitiert. Diese Genauigkeit ließ sich für alle Landmarken auf der Oberfläche des anatomischen Präparats, innerhalb der NNH und

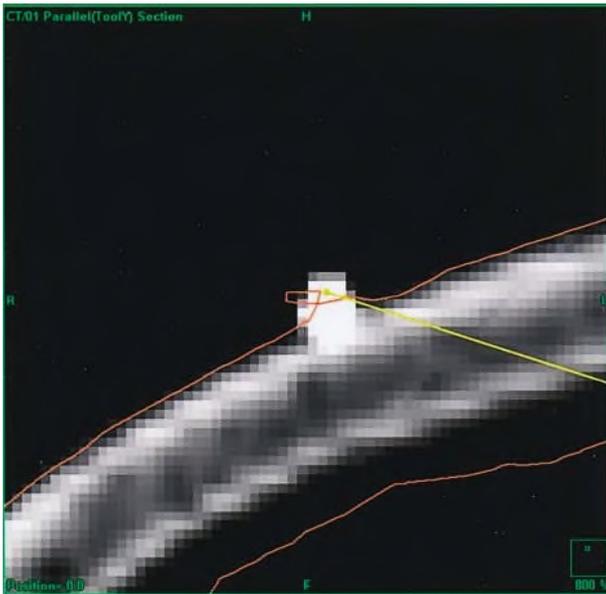


Abb.8 ▲ Intraoperative Genauigkeit (Detailaufnahme)

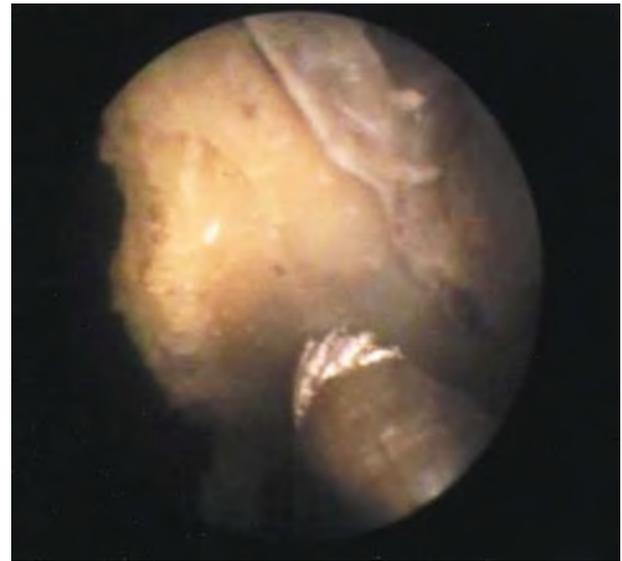


Abb.9 ▲ Intraoperatives Endoskopbild



Abb.10 ◀ Seitliche Darstellung der Keilbeinhöhle nach Eröffnung durch den Roboter

für alle CT-Marker reproduzieren. Insbesondere ergaben sich keine erhöhten Abweichungen bei den Genauigkeitsmessungen im Bereich der Keilbeinhöhle. Ferner kam es nicht zu Abweichungen zwischen den intraoperativ und postoperativ gewonnenen Messwerten (■ Abb. 7, 8).

**Operationen am anatomischen Präparat.** In allen Fällen gelang eine vollautomatisierte Eröffnung der Keilbeinhöhlenvor-

derwand durch den Roboter, ohne umgebende Strukturen zu verletzen. Unter der gewählten Arbeitsgeschwindigkeit kam es nicht zu unerwünschten Splitterungen des Knochens. Während des Bohrvorgangs traten Verbiegungen des Endoskopschafts nicht auf. Dabei wurde der zuvor festgelegte Pfad vom Roboter exakt abgefahren. Der Roboter stoppte in allen Fällen unmittelbar nachdem die Keilbeinhöhlenvorderwand perforiert war. Die Po-

sition der Bohrerspitze stimmte mit dem geplanten Endpunkt des Arbeitsschrittes überein.

Mit Hilfe des 6D-Joysticks ließ sich der geschaffene Zugang durch den Bohrer in der Instrumentenachse reproduzierbar sondieren, ohne den benachbarten Knochen zu berühren oder zu verletzen. Nach vollautomatisierter Eröffnung der Keilbeinhöhlenvorderwand erfolgte dann die telemanipulatorische Er-

weiterung des Zugangs unter endoskopischer Kontrolle. Auch hier kam es nicht zur Verletzung von Nachbarstrukturen oder zu unerwünschten Knochensplittungen (■ **Abb. 9, 10**).

## Diskussion

Die Technik der Computernavigation wird bereits vielerorts in der Chirurgie der NNH und der vorderen Schädelbasis, aber auch an der lateralen Schädelbasis eingesetzt. Hauptgrund für deren Verwendung ist die Erhöhung der Sicherheit und Präzision bei operativen Eingriffen. Diese Systeme ermöglichen allerdings über die Planung und Kontrolle hinausgehend keine direkte Durchführung einzelner operativer Schritte.

Präzise chirurgische Präparationen sind jedoch dort erwünscht, wo wichtige anatomische Strukturen gefährdet werden können. Dies trifft beispielsweise auf die Eröffnung der Keilbeinhöhle zu, in deren unmittelbarer Nachbarschaft sich der N. opticus und die A. carotis interna befinden. Lebensbedrohliche Blutungen und Erblindungen nach manueller Perforation der Keilbeinhöhlenvordwand sind beschrieben [10].

Bisher klinisch eingesetzte Robotersysteme erscheinen uns für die Anwendung in der NNH-Chirurgie ungeeignet [15]. Größe, unzureichende Flexibilität und zu geringe Freiheitsgrade der Roboterbewegungen erfüllen nicht die notwendigen Anforderungen. Das hier vorgestellte Robotersystem wurde in seinen Eigenschaften diesen Anforderungen angepasst. Die geringe Größe und hohe Flexibilität, insbesondere aber das neu entwickelte Mikroendoskop ermöglichen operative Eingriffe über minimal-invasive Zugangswege. Ein konzeptionell ähnliches Endoskop wurde bereits im Rahmen der Stirnhöhlenchirurgie klinisch erfolgreich eingesetzt [8].

Für die robotische Chirurgie ist ein Höchstmaß sowohl an Referenzierungs- als auch an intraoperativer Genauigkeit gefordert. Die meisten handelsüblichen Navigationssysteme verwenden zur intraoperativen Navigation elastische Kopfbänder, aufsetzbare Kopfrahen, selbstklebende Patientenmarker oder Halterungen, die durch Schrauben an der Schädel-

kalotte fixiert werden. Die Patientenregistrierung erfolgt über Laserabtastung des Gesichts, anatomische Landmarken, oben genannte Patientenmarker oder automatisch.

Alle diese Systeme sind Fehlerquellen und Störeinflüssen unterworfen, die die Genauigkeit erheblich beeinflussen können [2, 3, 6]. Insbesondere elastische Kopfbänder, aufsetzbare Kopfrahen und selbstklebende Patientenmarker sind für robotische Chirurgie ungeeignet, da sie dislozieren oder sich gegen die Haut des Patienten verschieben können, ohne dass dies vom Operateur unmittelbar bemerkt wird. Halterungen, die durch Schrauben an der Schädelkalotte fixiert werden, erscheinen uns für die endoskopische Nasennebenhöhlenchirurgie zu invasiv.

Wir verwenden daher für die Registrierung und Navigation ein modifiziertes VBH-Mouthpiece [1]. Der angefertigte Zahnabdruck mit angeschlossener Vakuumpumpe ermöglicht einerseits eine nichtinvasive und zuverlässige Fixierung des Patientenkopfes, andererseits gewährleistet der Referenzierungsrahmen des Systems eine Genauigkeit im Submillimeterbereich sowohl an der vorderen und zentralen als auch an der lateralen Schädelbasis. Durch die Verteilung der Referenzierungspunkte traten insbesondere keine erhöhten Abweichungen im Bereich der Keilbeinhöhlenvordwand und an der angrenzenden Schädelbasis auf.

Der Referenzierungsrahmen kann nach erfolgter Registrierung entfernt werden und behindert dadurch die Zugangswege des Roboters nicht. Nachteilig wirkt sich der erhöhte Zeitaufwand bei der Anfertigung des Bilddatensatzes aus. Ferner kann das VBH-Mouthpiece nicht bei völlig zahnlosem Oberkiefer eingesetzt werden, da in diesen Fällen Relativbewegungen des Oberkiefers zum Abdruck auftreten können.

Zusätzlich zur Genauigkeit des Systems ist für den Einsatz eines Roboters zur vollautomatisierten Chirurgie der NNH ein Höchstmaß an Sicherheit gefordert. Derzeit sind ein integriertes Navigationssystem, ein Kraftmomentsensor sowie das Mikroendoskop Neuroptik T 30 zur intraoperativen Kontrolle in Echtzeit implementiert. Auf die Verwendung ei-

nes Temperatursensors wurde wegen der zu erwartenden geringen Hitzeentwicklung beim Fräsen sehr dünner Knochenlamellen des NNH-Systems in diesem Setup verzichtet.

Bei unvorhersehbaren Ereignissen (z. B. Abbrechen eines Bohrkopfes etc.) ist es dem Operateur möglich, den Fräsvorgang durch einen Notausschalter jederzeit zu stoppen. Für die Anwendung am Patienten soll der Roboter an ein redundantes externes Navigationssystem gekoppelt werden. Die Möglichkeit der intraoperativen Re-Referenzierung befindet sich in der Entwicklung.

Darüber hinaus sollen geeignete Softwareprogramme und Instrumente entwickelt werden, die zukünftig auch die Bearbeitung komplexer Fräsbahnen und Volumina etwa im Mastoid oder Siebbeinbereich erlauben.

## Fazit für die Praxis

**Mit dem Operationsroboter „A 73“ wird ein neues System vorgestellt, mit dem es gelungen ist, die Keilbeinhöhle am anatomischen Präparat vollautomatisiert präzise und reproduzierbar zu eröffnen. Über den integrierten Telemanipulationsmodus ist eine weitere feinmechanische Bearbeitung des geschaffenen Zugangsweges möglich. Zur Überwachung und Erhöhung der intraoperativen Sicherheit wurden ein Kraftmomentsensor, ein integriertes Navigationssystem und ein neuentwickeltes Mikroendoskop zur visuellen Kontrolle bereits implementiert. Um diese Technologie auch am Patienten einsetzen zu können, ist jedoch die Entwicklung einer Reihe weiterer Sicherheitskomponenten, wie z. B. ein externes redundantes Navigationssystem und eine intraoperative Re-Referenzierung, erforderlich.**

## Korrespondierender Autor

**Dr. J. Wurm**

Universitäts-HNO-Klinik,  
Waldstraße 1, 91054 Erlangen  
E-Mail:  
jochen.wurm@hno.imed.uni-erlangen.de

**Interessenkonflikt:** Der korrespondierende Autor versichert, dass keine Verbindungen mit einer Firma, deren Produkt in dem Artikel genannt ist, oder einer Firma, die ein Konkurrenzprodukt vertreibt, bestehen.

## Literatur

1. Bale RJ, Vogele M, Freysinger W, Gunkel AR, Martin A, Bumm K, Thumfart WF (1997) Minimally invasive head holder to improve the performance of frameless stereotactic surgery. *Laryngoscope* 107: 373–377
2. Ecke U, Khan M, Maurer J, Boor S, Mann WJ (2002) Intraoperative Navigation in der Chirurgie der Nasennebenhöhlen und der vorderen Schädelbasis. *HNO* 50: 928–934
3. Ecke U, Maurer J, Boor S, Khan M, Mann WJ (2003) Fehlerquellen der Navigation in der lateralen Schädelbasischirurgie. *HNO* 51: 386–393
4. Federspil PA, Geisthoff UW, Henrich D, Plinkert PK (2003) Development of the first force-controlled robot for otoneurosurgery. *Laryngoscope* 113: 465–471
5. Federspil PA, Stallkamp J, Plinkert PK (2001) Robotik. Eine neue Dimension in der HNO-Heilkunde? *HNO* 49: 505–513
6. Grevers G, Leunig A, Klemens A, Hagedorn H (2002) Computerassistierte Chirurgie der Nasennebenhöhlen – Technologie und klinische Erfahrungen mit dem Vector-Vision-Compact®-System an 102 Patienten *Laryngorhinootologie* 81: 476–483
7. Gross RD, Sheridan MF, Burgess LP (1997) Endoscopic sinus surgery complications in residency. *Laryngoscope* 107: 1080–1085
8. Iro H, Zenk J (2001) A new device for frontal sinus endoscopy: first clinical report. *Otolaryngol Head Neck Surg* 125: 613–616
9. Keerl R, Stankiewicz J, Weber R, Hosemann W, Draf W (1999) Surgical experience and complications during endonasal sinus surgery. *Laryngoscope* 109: 546–550
10. Kennedy DW, Shaman P, Han W, Selman H, Deems DA, Lanza DC (1994) Complications of ethmoidectomy: a survey of fellows of the American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery. *Otolaryngol Head Neck Surg* 111: 589–599
11. Plinkert PK, Federspil PA, Plinkert B, Henrich D (2002) Kraftbasierte lokale Navigation zur robotergestützten Implantatbetтанlage in der lateralen Schädelbasis. *HNO* 50: 233–239
12. Plinkert PK, Plinkert B, Hiller A, Stallkamp J (2001) Einsatz eines Roboters an der lateralen Schädelbasis. Evaluation einer robotergesteuerten Mastiidektomie am anatomischen Präparat. *HNO* 49: 514–522
13. Sogg A, Eichel B (1991) Ethmoid surgery complications and their avoidance. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 100: 722–724
14. Wigand ME, Hosemann WG (1991) Results of endoscopic surgery of the paranasal sinuses and anterior skull base. *J Otolaryngol* 20: 385–390
15. Zimmermann M, Krishnan R, Raabe A, Seifert V (2002) Robot-assisted navigated neuroendoscopy. *Neurosurgery* 51: 1446–1451