

M. Helbig¹ · K. Kryzstoforski³ · J. Kucharski³ · M. Poppek³ · T. Kroll¹ · S. Helbig¹ · A. May¹ · W. Gstoettner¹ · J. Kozak²

¹ Zentrum für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Universitätsklinikum Frankfurt am Main

² Aesculap AG & Co. KG, Tuttlingen

³ Abteilung Experimentelle Mechanik und biomedizinische Technik, Technische Universität Wrocław

Navigationsunterstützte Weichteilsonographie für den Kopf-Hals-Bereich

Die Anatomie des Halses mit ihren in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander liegenden Strukturen stellt die HNO-Chirurgie vor eine besondere Herausforderung. Schon lange besteht daher der Wunsch zur Verbesserung der Visualisierung bei invasiven Maßnahmen zur Orientierung und zur Differenzierung von pathologischem und gesundem Gewebe.

Etablierte bildgebende Verfahren sind die Computertomographie (CT) und die Magnetresonanztomographie (MRT). Diese Verfahren werden in der Regel vor einer invasiven Maßnahme durchgeführt und stellen immer nur den momentanen Status im Augenblick der Untersuchung dar. Veränderungen des Situs, die während einer invasiven Maßnahme auftreten, kommen dabei nicht zur Darstellung. Die intraoperative Bildgebung, beispielsweise mittels CT oder MRT [2, 24], ist nur in sehr wenigen Zentren verfügbar und darüber hinaus kosten- und zeit-aufwendig.

Zur intraoperativen Orientierung werden seit einigen Jahren in der HNO-Heilkunde, speziell im Bereich der vorderen Schädelbasis und der Nasennebenhöhlenchirurgie [3, 6, 7, 8, 21, 25, 26, 29] und im Bereich der lateralen Schädelbasis [4, 20, 29], Navigationssysteme eingesetzt. Grundlage dafür bilden Datensätze, die bei einer CT- bzw. MRT-Untersuchung gewonnen wurden [5, 8, 13, 17, 28]. Zuverlässig ist diese Art der Navigation allerdings nur in unmittelbarer Nachbarschaft

knöcherner Strukturen, die als Landmarken dienen. Bei Eingriffen im Weichteilgewebe fernab von solchen Landmarken wird die Navigation aufgrund des „Weichteilshifts“ [30] ungenau.

Eine Alternative bietet hier die Sonographie. Ihr Einsatz als Instrument zur Darstellung von pathologischen Befunden und von anatomischen Lagebeziehungen ist im Kopf-Hals-Bereich seit vielen Jahren nicht mehr wegzudenken. Die Vorteile sind hinlänglich bekannt: Es handelt sich um ein weit verbreitetes, kostengünstiges Verfahren mit hohem Auflösungsvermögen und guter Tiefendarstellung bei fehlender Strahlenbelastung. Als „dynamisches Verfahren“ ist die unmittelbare Darstellung von Veränderungen des Situs während der invasiven Maßnahme möglich. Somit findet das Verfahren sowohl bei der Diagnostik (bei Biopsien bzw. Punktionen) als auch als Hilfsmittel im Rahmen therapeutischer Maßnahmen, beispielsweise beim Aufsuchen suspekter Zielstrukturen, bei der intraoperativen Orientierung oder bei der intraoperativen Definition von adäquaten Resektionsgrenzen seinen Einsatz [10, 15, 16, 19, 27]. Das ist gerade im Zusammenhang mit organ- und funktionserhaltenden Eingriffen von besonderer Bedeutung. Hier soll, bei angestrebter höchstmöglicher Übersichtlichkeit, das Risiko einer Verletzung der umgebenden Strukturen vermieden werden. Das größte Problem, welches sich im Rahmen der inva-

siven diagnostischen bzw. intraoperativen Sonographie ergibt, ist die adäquate Darstellung von chirurgischen Instrumenten. Diese kommen nur adäquat zur Darstellung, wenn sie sich exakt in der Ebene des 2-dimensionalen Ultraschallbilds befinden (▣ **Abb. 1**).

Abhilfe bietet eine Methode, die wir im Folgenden als navigationsunterstützte Weichteilsonographie bezeichnen: Ein Prototyp für den Einsatz im Kopf-Hals-Bereich wurde entwickelt und am Modell durch 11 Probanden getestet. Das System beruht auf folgenden Besonderheiten:

- Ein navigierter Ultraschallkopf und ein navigiertes chirurgisches Instrument werden verwendet.
- Die Lagebeziehung des navigierten chirurgischen Instruments (3-dimensionaler Datensatz) wird in Echtzeit in den 2-dimensionalen Datensatz des Ultraschallbilds integriert. Ein Navigationsverfahren ermöglicht es, gezielt das Instrument in die Ultraschallebene hineinzubewegen und eine dargestellte Zielstruktur exakt anzusteuern.

Material und Methoden

Komponenten

Der Prototyp zur navigierten Echtzeit-Sonographie für den Kopf-Hals-Bereich beinhaltet folgende Systemkomponenten (▣ **Abb. 2**):

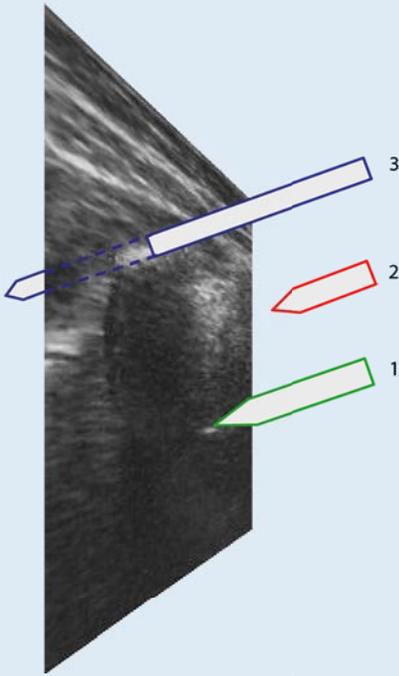


Abb. 1 ▲ Problematik: Im 2-dimensionalen Ultraschallbild ist die Instrumentenspitze nur dann exakt darstellbar, wenn diese sich genau in der Ultraschallebene befindet (1). Die Instrumentenspitze ist nicht zu sehen, wenn sie sich vor (2) oder hinter (3) der Ultraschallebene befindet. Im letztgenannten Fall ist dann lediglich ein Teil des Instruments, nicht aber dessen Spitze sichtbar



Abb. 2 ◀ Systemkomponenten der Navigationsnavigation: Ultraschallgerät mit navigiertem Schallkopf (links), navigiertes Zeigeelement (Mitte) und PC mit entsprechend entwickelter Software (Mitte) und Polaris-Koordinatengeber (rechts)

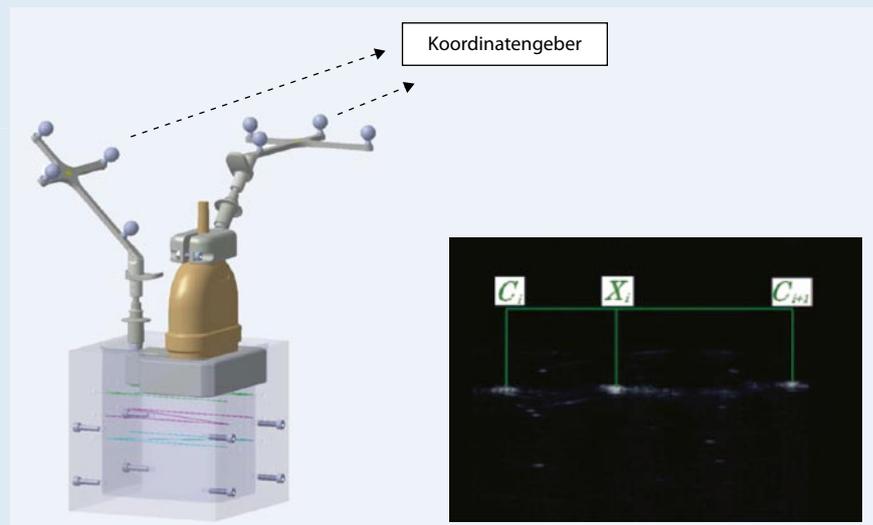


Abb. 3 ▲ Kalibrierung. Links Kalibrierkörper mit 3 „N-Strukturen“ und mit dem zu kalibrierenden Ultraschallkopf. Rechts Das Ultraschallbild zeigt 3 der „N-förmig“ angeordneten Fäden des Kalibrierungskörpers. Die Lage des Ultraschallkopfes zum Kalibrierungskörper lässt sich über die Abstände der Punkte mit Hilfe eines Kontursuch-Algorithmus bestimmen

- konventionelles 2-dimensionales Ultraschallgerät mit navigiertem Ultraschallkopf und passivem Sender („rigid body“),
- navigiertes Instrument (Pointer) mit passivem Sender,
- PC und Software,
- Koordinatengeber.

Ultraschallgerät und navigierter Ultraschallkopf

Verwendet wird ein konventionelles US-System (Echo Blaster 128 EXT-1Z, Fa. Telemed, Litauen) mit dem 9-MHz-Linear-schallkopf und einem 40-mm-Schallfenster. Der Ultraschallkopf ist für die Navigation mit einer Schnittstelle zum Sender ausgestattet. Durch die fest installierte Halterung ist deren Position unverän-

derbar. Somit ist lediglich eine einmalige Kalibrierung erforderlich; auf die ermittelten Daten kann dann jederzeit zurückgegriffen werden.

Navigiertes Instrument

Als Instrument dient ein Zeigeelement (Pointer), das ebenfalls mit einer Schnittstelle zum Sender ausgestattet ist. Somit lässt sich die Spitze des Instruments ebenfalls kalibrieren.

PC und Software

Als Hardware-Komponente wird ein DELL Latitude D620 mit folgenden Systemvoraussetzungen verwendet: Intel Core Duo T2300E, 1,66 GHz, 1 GB RAM, MS Windows XP. Grafikkarte: NVIDIA Quadro NVS 100 M; MS Visual Studio

C++. Für den Kalibrierungsvorgang der Instrumente und die praktische Anwendung wurde eigens eine Software entwickelt.

Koordinatengeber

Als Koordinatengeber dient das Polaris-System (Fa. Northern Digital Inc., Kanada). Die Systemgenauigkeit beim Auffinden eines Punkts im Raum beträgt für dieses System 0,24 mm.

Kalibrierung des Systems und Ermittlung der Zielgenauigkeit

Die Kalibrierung wird durchgeführt, um das 2-dimensionale Ultraschallbild des navigierten Schallkopfes mit den Koordinaten der Navigation abzugleichen. Als

HNO 2008 DOI 10.1007/s00106-008-1801-3
© Springer Medizin Verlag 2008

M. Helbig · K. Krysztoforowski · J. Kucharski · M. Popek · T. Kroll · S. Helbig · A. May · W. Gstoettner · J. Kozak

Navigationenunterstützte Weichteilsonographie für den Kopf-Hals-Bereich

Zusammenfassung

Hintergrund. Die Anwendung herkömmlicher CT-/MRT-unterstützter Navigationsverfahren sind bei Weichteileingriffen im Kopf-Hals-Bereich aufgrund des Gewebeshifts unzureichend. Ferner lassen sich hierbei Veränderungen, die sich im Rahmen invasiver Maßnahmen ergeben, nicht darstellen.

Methoden. Ein Navigationssystem für die Sonographie im Weichteilbereich unter Verwendung eines navigierten Ultraschallkopfes und eines navigierten chirurgischen Instruments wurde entwickelt, wobei auf eine zusätzliche Bildgebung mittels CT oder MRT verzichtet werden kann.

Ergebnisse. Die Systemabweichung (3-dimensionale Fehler) des entwickelten Prototypen lag unter 1 mm. Bei der praktischen Anwendung im Modellversuch zeigte sich die gute Handhabung des Systems. Die Ori-

entierung und die Zielannäherung des chirurgischen Instruments an die sonographisch dargestellte Zielstruktur erfolgten rasch und zielsicher.

Schlussfolgerung. Das Navigationsverfahren erfordert keine vorherige Bildgebung mittels CT oder MRT. Unter Verwendung des navigierten Ultraschallkopfes lassen sich Veränderungen des Situs, die sich bei der Ultraschalluntersuchung ergeben, in Echtzeit darstellen. Dieses Navigationsverfahren eignet sich besonders für invasive Maßnahmen im Weichteilbereich.

Schlüsselwörter

Navigationenunterstützte Sonographie · Echtzeitdarstellung · Minimal-invasive Weichteilnavigation · Prototyp · Systemabweichung

Navigation-assisted sonography for soft tissues in the head and neck region

Abstract

Background. In soft tissue surgery of the head and neck region tissue shifts limit the usefulness of conventional CT/MRI-based navigation procedures. Furthermore, changes caused by invasive measures cannot be visualized.

Methods. A novel navigation device for sonography of soft tissues was developed. This consists of a navigated ultrasound scanner, a navigated surgical instrument, and a personal computer with custom-made software. Its use makes an additional visualization by means of CT or MRI dispensable.

Results. The system deviation (three-dimensional error) of this newly developed prototype was less than 1 mm. The practical appli-

cation in a model setup showed good handling properties of the system. Orientation and approach of the surgical instrument to the sonographically visualized target structure were rapid and accurate.

Conclusion. This new navigation system does not require additional CT or MRI images. The navigated ultrasound probe shows tissue changes in real time. This navigation system is especially suitable for invasive procedures in soft tissues

Keywords

Navigation-assisted sonography · Real time visualization · Minimally invasive soft tissue navigation · Prototype · System deviation

videoptischer Infrarot-Koordinatengeber wurde das Polaris-System verwendet. Der Kalibrierungsvorgang (Abb. 3) basiert auf der Verwendung eines mit passiven Sendern versehenen Kalibrierungskörpers, bestehend aus 9 Fäden, die in 3 unterschiedlichen Ebenen N-förmig angeordnet sind. Die exakte Lage der Fäden war zuvor mit einer UMM-850-Koordinatenmessmaschine (Fa. Zeiss, Jena) ermittelt worden. Die exakte Position des Kalibrierungskörpers und des Schallkopfes wurden dann an den Koordinatengeber übermittelt. Die Fäden des Kalibrierungskörpers waren im Ultraschallbild sichtbar. Über die Abstände der Punkte zueinander ließ sich die Lage des Ultraschallkopfes zum Kalibrierungskörper mit Hilfe eines speziell entwickelten Kontursuchalgorithmus exakt bestimmen.

Zur Genauigkeitsbestimmung der Ultraschallnavigation wurden die Kalibrierungsdaten überprüft. Dazu wurde ein Kreuz-Phantom (Metallplatte mit 2 gekreuzten Linien) verwendet. Dieses befand sich im Koordinatensystem eines wassergefüllten Behälters. Der navigierte Ultraschallkopf wurde an einer beweglichen Halterung schrittweise an den Kreuzungspunkt der Linien herangeführt, bis der Schnittpunkt exakt erreicht war (Abb. 4). Die Erkennung der Umrisse und die Berechnung des Punktareals erfolgten mit Hilfe eines speziell entwickelten Algorithmus. Als Koordinatengeber diente ebenfalls das Polaris-System. Zur Verifizierung wurden die ermittelten Werte mit den Ergebnissen aus dem Feinmessraum verglichen. Das beschriebene Verfahren erfolgte einmalig, da die Halterung für den Sender fest und unveränderbar an den Ultraschallkopf installiert war. Bei späteren Anwendungen wurde auf die ermittelten und abgespeicherten Daten zurückgegriffen.

Visualisierung und praktische Anwendung

Das 2-dimensionale Ultraschallbild wird in Echtzeit auf dem Bildschirm digitalisiert dargestellt. Zuerst wird die Zielstruktur markiert (grüner Kreis). Ab jetzt wird dieser Markierung mit der Hilfe eines eigens entwickelten Umriss-such-Algorithmus nachgegangen: Verschiebt sich die

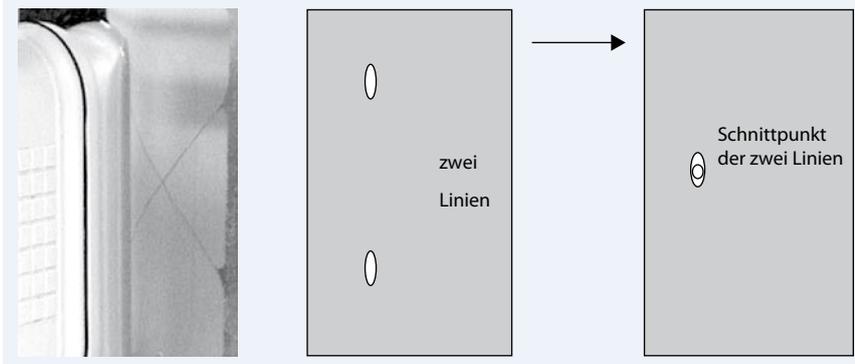


Abb. 4 ▲ Ermittlung der Zielgenauigkeit. Der Ultraschallkopf wurde schrittweise an den Schnittpunkt der Linien des Kreuzphantoms herangeführt (*linkes Bild*). Auf dem mittleren Bild liegt die Ultraschallebene noch nicht im Kreuzungsbereich der beiden Linien, im *rechten Bild* wurde der Schnittpunkt exakt erreicht

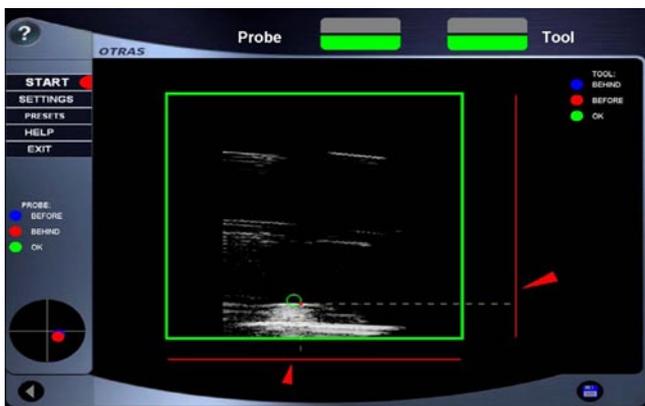


Abb. 5 ◀ Visualisierung. Ultraschallbild mit durch *grünen Kreis* gekennzeichnete Zielstruktur. Die farbkoordinierten, *rot eingefärbten* Navigationshilfen (*Farbbalken, Pfeile, Punkt*) zeigen den Abstand zur Zielstruktur und die Richtung an, in die das chirurgische Instrument geführt werden muss

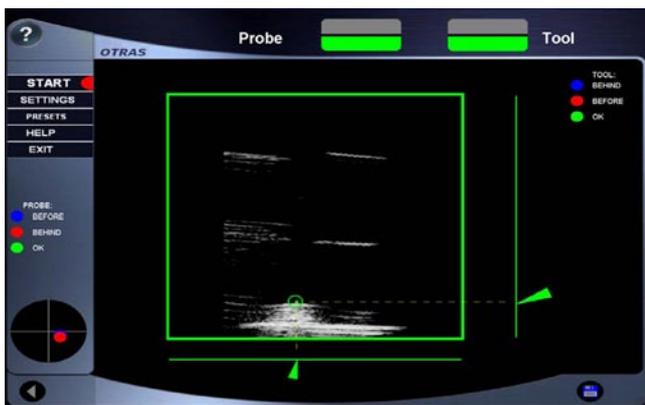


Abb. 6 ◀ Visualisierung. Erfolgreiche Ansteuerung des Instruments an die Zielstruktur; erkennbar an den jetzt *grün eingefärbten* Navigationshilfen auf dem Display

markierte Struktur auf dem Ultraschallbild, bewegt sich der grün markierte „Zielbereich“ ebenfalls. Das navigierte chirurgische Instrument lässt sich in 6 Freiheitsgraden durch das Navigationssystem verfolgen. Somit ist die Position der Instrumentenspitze im Raum und dessen Beziehung zur Ultraschallebene in allen 3 Dimensionen jederzeit bekannt und wird auf dem Bildschirm angezeigt: Dabei symbolisiert der Abstand zwischen der Pfeilspitze und dem Farbbalken (zu erkennen rechts und unterhalb des Ultraschallbilds

auf dem Display) die Entfernung der navigierten Instrumentenspitze zur Ultraschallebene.

Die 3. Dimension wird durch einen Farbpunkt angegeben. Folgende Farbkodierung wird verwendet: Rot: die Instrumentenspitze befindet sich „vor“ der Ultraschallebene; blau: die Instrumentenspitze befindet sich „hinter“ der Ultraschallebene; grün: die Instrumentenspitze befindet sich exakt in der Ultraschallebene. Die Ausrichtung der Pfeile zeigt zusätzlich die Richtung an, in die das Instru-

ment geführt werden muss, um die Zielstruktur zu erreichen (■ **Abb. 5**). Wird die Zielstruktur exakt mit dem Instrument angesteuert, befinden sich die Pfeilspitzen auf den Farbbalken und der Punkt auf der Zielstruktur. Alle Navigationshilfen sind dann grün eingefärbt (■ **Abb. 6**).

Die Handhabung des Navigationssystems wurde durch 11 Probanden (8 Hals-Nasen-Ohren-Chirurgen, teilweise mit wenig, teilweise mit mehrjähriger Ultraschallerfahrung) und 3 Studenten (ohne Ultraschallerfahrung) in vitro untersucht: In einem Wasserbehälter wurde eine Zielstruktur (Metallkugel mit 3 mm Durchmesser) verdeckt installiert, so dass der Untersucher die Zielstruktur nicht sehen konnte. Der Untersucher hält in einer Hand den navigierten Ultraschallkopf und in der anderen Hand das navigierte Instrument. In unserem Versuchsaufbau wurde die Metallkugel und das navigierte Instrument an einen Stromkreis angeschlossen. Sobald die Instrumentenspitze die Kugel berührte, wurde zur Bestätigung, dass die navigierte Zielansteuerung erfolgreich war, ein Lichtsignal angezeigt. Die Ansteuerung der Zielstruktur durch die Probanden erfolgte jeweils 15-mal hintereinander.

Ergebnisse

Zur Ermittlung der Zielgenauigkeit wurden die mit Hilfe der Ultraschall-Navigation ermittelten Punkte mit Messungen an der UMM-850-Koordinaten-Messmaschine für 9 Ultraschallbildsektoren ermittelt. Die Messreihen für alle Sektoren wurden 10-mal wiederholt. Es ergaben sich folgende X-, Y-, und Z-Abweichungen: $x=0,31\pm 0,28$; $y=0,21\pm 0,15$; $z=-0,53\pm 0,14$ mm.

Das entspricht einer euklidischen Distanz von $0,64\pm 0,34$ mm.

Im Modellversuch wurde die praktische Anwendung des Systems durch 11 Probanden in 15 aufeinander folgenden Testansätzen erprobt, wobei die ersten 5 Versuche als Test- bzw. Trainingsphase anzusehen sind, weil keiner der Probanden zuvor Erfahrung mit der Handhabung des Systems hatte. Nach erfolgter Trainingsphase zeigte sich bei allen Probanden eine gute Akzeptanz des Systems. Die Zielansteuerung mit dem navigierten

Instrument erfolgte jeweils rasch und zielsicher (■ Abb. 7).

Diskussion

Wir entwickelten einen Prototyp, welcher die navigationsunterstützte Weichteilsonographie für den Kopf-Hals-Bereich ermöglicht. Der Ultraschallkopf und das chirurgische Instrument sind navigiert. Die Zielstruktur wird sonographisch dargestellt und markiert. Die Lagebeziehung des navigierten chirurgischen Instruments (3-dimensionaler Datensatz) wird in Echtzeit in den 2-dimensionalen Datensatz des Ultraschallbilds integriert. Navigationshilfen auf dem Display ermöglichen eine rasche Ansteuerung des Instruments an die Zielstruktur.

Der Hersteller des Ultraschallgeräts spezifiziert dessen Genauigkeit mit 0,3 mm (lateral) und 0,3 mm (axial) für die vorgegebene Frequenz von 9 MHz. Die Ergebnisse hinsichtlich der „Systemabweichungen“ unter Verwendung des vorgestellten Prototypen übertrifft mit einem 3-dimensionalen mittleren Fehler von 0,64 mm hinsichtlich der Genauigkeit die Ergebnisse anderer navigierter Methoden und erklärt sich unserer Meinung nach mit der präzisen Kalibrieremethode.

Die Handhabung des Systems wurde von 11 Probanden in jeweils 15 Versuchsansätzen geprüft. Nach einer Trainingsphase zeigte sich bei allen Anwendern eine gute Akzeptanz des Systems. Stets erfolgte die Annäherung des navigierten Instruments an die Zielstruktur anhand der gut verständlichen Navigationshilfen rasch und zielsicher, unabhängig davon, wie viel praktische Erfahrung die Probanden zuvor mit Ultraschalluntersuchungen hatten.

Das beschriebene Verfahren bietet (insbesondere in Hinblick auf eine mögliche spätere Anwendung in vivo) folgende Vorteile: Anders als bei gängigen Navigationsverfahren, beispielsweise in der schädelbasisnahen Chirurgie [1, 9, 14, 23], kann auf das Anbringen eines fixierten Referenzsenders am Körper des Patienten verzichtet werden. Sinn eines solchen Referenzsenders, welcher in unmittelbarer Nähe zum Operationssitus angebracht wird, ist es, eine sichere Navigation auch dann

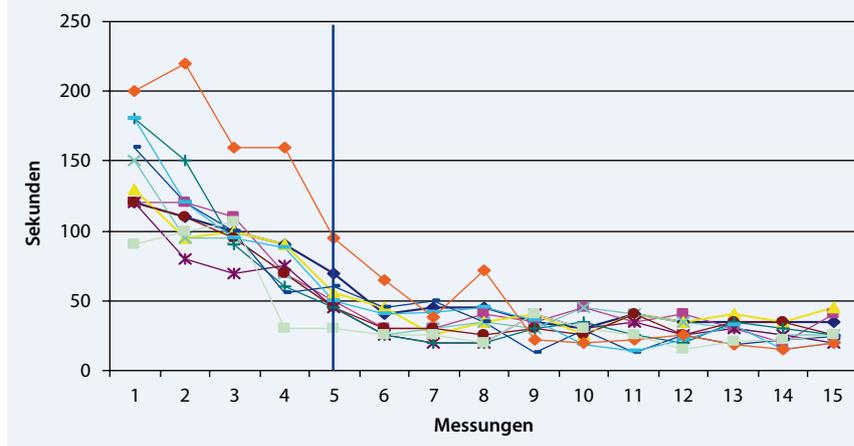


Abb. 7 ▲ Das System wurde durch 11 Probanden in 15 Versuchsansätzen getestet. Die Messungen 1–5 sind als Trainingsphase zu betrachten. Ab dem 6. Versuchsansatz konnte die Zielstruktur durch alle Probanden sicher und schnell angesteuert werden

zu gewährleisten, wenn entweder der Koordinatengeber oder die Lage des Patientenkörpers verändert wird.

Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene System kommt ohne einen Referenzsender aus. Die Methode scheint somit besonders für invasive Maßnahmen im Weichteilbereich des Halses geeignet, da in dessen unmittelbarer Nachbarschaft keine anatomischen knöchernen Strukturen liegen, welche eine einfache Fixierung eines Referenzsenders zulassen. Veränderungen des Situs, die sich beispielsweise während einer invasiven Maßnahme ergeben, sind bei der vorgestellten Methode sofort in der Ultraschallbildgebung sichtbar. Anders als bei sonstigen sonographischen Navigationsverfahren im Kopf-Hals-Bereich [11, 12, 18, 22], bei denen eine Fusion zwischen Navigationsdaten des CT oder MRT mit dem Ultraschall erfolgt, kann bei der von uns vorstellten Methode auf eine präoperative oder intraoperative Bildgebung (CT oder MRT), an der sich die Navigation orientiert, verzichtet werden.

Mit dem vorgestellten Prototypen für die navigationsunterstützte Weichteilsonographie im Kopf-Hals-Bereich steht ein sehr präzises und genaues Navigationsverfahren zur Verfügung. Geplant ist die praktische Anwendung in vivo. Als mögliche Anwendungsbereiche kommen gezielte Gewebeentnahmen zu diagnostischen Zwecken, aber auch der Einsatz im Rahmen therapeutischer Interventionen, wie beispielsweise die zielgerichtete Verabreichung von Therapeutika, in Frage

Fazit für die Praxis

Das System zur navigationsunterstützten Weichteilsonographie basiert auf der Verwendung eines navigierten Ultraschallkopfes und eines navigierten chirurgischen Instruments. Vorteile des Verfahrens sind zum einen, dass sich Veränderungen, die sich während einer invasiven Maßnahme ergeben, in Echtzeit darstellen lassen, und zum anderen, dass auf eine anderweitige Bildgebung (beispielsweise CT oder MRT) verzichtet werden kann. Somit eignet sich das Verfahren besonders für navigationsunterstützte minimal-invasive Maßnahmen im Bereich der Halsweichteile.

Korrespondenzadresse

Dr. M. Helbig



Zentrum für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Universitätsklinikum Frankfurt am Main
Theodor-Stern-Kai 7,
60590 Frankfurt am Main
Matthias.Helbig@kgu.de

Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

1. Bernays RL (2003) Intraoperative imaging in neurosurgery. MRI, CT, ultrasound. Introduction. Acta Neurochir Suppl 85: 1–3
2. Bootz F, Schulz T, Weber A et al. (2001) The use of open MRI in otorhinolaryngology: initial experience. Comput Aided Surg 6: 297–304

3. Cartellieri M, Vorbeck F, Kremser J (2001) Comparison of six three-dimensional navigation systems during sinus surgery. *Acta Otolaryngol* 121: 500–504
4. Caversaccio M, Langlotz F, Nolte LP, Häusler R (2007) Impact of a self-developed planning and self-constructed navigation system on skull base surgery: 10 years experience. *Acta Otolaryngol* 127: 403–407
5. Caversaccio M, Nolte LP, Häusler R (2002) Present state and future perspectives of computer aided surgery in the field of ENT and skull base. *Acta Otorhinolaryngol Belg* 56: 51–59; Review
6. Citardi MJ, Batra PS (2007) Intraoperative surgical navigation for endoscopic sinus surgery: rationale and indications. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg* 15: 23–27
7. Ecke U, Luebben B, Maurer J et al. (2003) Comparison of different computer-aided surgery systems in skull base surgery. *Skull Base* 13: 43–50
8. Heermann R, Mack KF, Issing PR et al. (2001) Schädelbasischirurgie mit einem optoelektrischen Navigationssystem. *HNO* 49: 1019–1025
9. Heiland M, Habermann CR, Schmelzle R (2004) Indications and limitations of intraoperative navigation in maxillofacial surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 62: 1059–1063
10. Helbig M, Helmke BM, Flechtenmacher C et al. (2005) Intraoperative endosonographisch gesteuerte Resektion von Zungenkarzinomen. *HNO* 53: 631–636
11. Hernes TA, Ommedal S, Lie T et al. (2003) Stereoscopic navigation-controlled display of preoperative MRI and intraoperative 3D ultrasound in planning and guidance of neurosurgery: new technology for minimally invasive image-guided surgery approaches. *Minim Invasive Neurosurg* 46: 129–137
12. Lohnstein PU, Schipper J, Berlis A, Maier W (2007) Sonographisch unterstützte computerassistierte Chirurgie (SACAS) in der Orbitachirurgie. *HNO* 55: 778–784
13. Majdani O, Leinung M, Heermann R (2006) Neue Entwicklungen der Navigationstechnologie. *HNO* 54: 829–832
14. Nijmeh AD, Goodger NM, Hawkes D et al. (2005) Image-guided navigation in oral and maxillofacial surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg* 43: 294–302; Review
15. Offergeld C, Schellong S, Hackert I et al. (2003) Farbduplexsonographisch-gesteuerter Laser zur Therapie von Hämangiomen und vaskulären Malformationen. *HNO* 51: 46–51
16. Pappas IP, Ryan P, Cossman P et al. (2005) Improved targeting device and computer navigation for accurate placement of brachytherapy needles. *Med Phys* 32: 1796–1801
17. Plinkert PK (2002) Robotik und Navigation. *HNO* 50: 796–799
18. Reinacher PC, Velthoven V van (2003) Intraoperative ultrasound imaging: practical applicability as a real-time navigation system. *Acta Neurochir Suppl* 85: 89–93
19. Ridder GJ, Technau-Ihling K, Boedeker CC (2005) Ultrasound-guided cutting needle biopsy in the diagnosis of head and neck masses. *Laryngoscope* 115: 376–377
20. Schipper J, Maier W, Arapakis I et al. (2004) Navigation as a tool to visualize bone-covered hidden structures in transfrontal approaches. *J Laryngol Otol* 118: 849–856
21. Schipper J, Maier W, Arapakis I et al. (2005) Informations-assistierte Chirurgie als ein transdisziplinäres Operationsverfahren. *Laryngorhinootologie* 84: 165–170
22. Schlaier JR, Wornat J, Dorenbeck U et al. (2004) Image fusion of MR images and real-time ultrasonography: evaluation of fusion accuracy combining two commercial instruments, a neuronavigation system and an ultrasound system. *Acta Neurochir (Wien)* 146: 271–276
23. Schramm A, Gellrich NC, Gutwald R et al. (2005) Indications for computer-assisted treatment of cranio-maxillofacial tumors. *Comput Aided Surg* 5: 343–352
24. Schulder M, Sernas TJ, Carmel PW (2003) Cranial surgery and navigation with a compact intraoperative MRI system. *Acta Neurochir Suppl* 85: 79–86
25. Stamm AM (2006) Transnasal endoscopy-assisted skull base surgery. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 196: 45–53; Review
26. Stelter K, Andratschke M, Leunig A, Hagedorn H (2006) Computer-assisted surgery of the paranasal sinuses: technical and clinical experience with 368 patients, using the Vector Vision Compact system. *J Laryngol Otol* 1026–1032
27. Stetter S, Jecker P, Mann WJ (2006) Intraoperative ultrasound in surgery of the parotid and the head-and-neck region. *Ultraschall Med* 27: 159–163
28. Stieve M, Schwab B, Haupt C et al. (2006) Intraoperative computed tomography in otorhinolaryngology. *Acta Otolaryngol* 126: 82–87
29. Strauss G, Koulechov K, Hofer M et al. (2007) The navigation-controlled drill in temporal bone surgery: a feasibility study. *Laryngoscope* 117: 434–441
30. Velthoven V van (2003) Intraoperative ultrasound imaging: comparison of pathomorphological findings in US versus CT, MRI and intraoperative findings. *Acta Neurochir Suppl* 85: 95–99