

P. U. Lohnstein^{1,2} · J. Schipper² · A. Berlis^{3,4} · W. Maier^{1,4}

¹ Hals-Nasen-Ohren-Klinik, Universitätsklinikum Freiburg, Freiburg i. Br.

² Hals-Nasen-Ohren-Klinik, Universitätsklinikum Düsseldorf

³ Sektion Neuroradiologie, Neurozentrum, Universitätsklinikum Freiburg

⁴ Zentrum für Schädelbasis- und kraniofaziale Chirurgie, Universitätsklinikum Freiburg

Sonographisch unterstützte computerassistierte Chirurgie (SACAS) in der Orbitachirurgie

Bei der computerassistierten Chirurgie (CAS) der Orbita ist, vergleichbar mit der intrakraniellen Chirurgie, das Phänomen des Gewebeshift („brain shift“) zu berücksichtigen [3]: Die Kompressibilität und Dehnbarkeit des periorbitalen Fettgewebes sowie die nach anterior hin geöffnete trichterförmige knöcherne Schale der Orbita erlaubt im Zentimeterbereich jederzeit ein Ausweichen der Weichteilstrukturen, lediglich begrenzt durch das Lidbändchen. Zur Identifikation und Abgrenzung von peri- oder retrobulbären Weichteiltumoren mit Hilfe der CAS ist somit eine intraoperative Bildgebung oder alternativ eine Reevaluation des präoperativen Datensatzes erforderlich.

Die Durchführung einer intraoperativen Schichtbildgebung mit einem speziellen CT oder MR für den Operationsaal ist aus Sicht des Strahlenschutzes sowohl für Röntgenstrahlung als auch für elektromagnetische Strahlung apparativ und räumlich aufwendig [2] und wird daher nur in wenigen Zentren durchgeführt. Außerdem bietet sie lediglich eine Momentaufnahme, die mit Fortschreiten der Operation bezüglich der Aktualität hinfällig wird. Wesentlich günstiger und intraoperativ praktikabler ist die Reevaluation eines präoperativen CT- oder MR-Datensatzes mit Hilfe der Sonographie [14, 15]. Die Technik der intraoperativen Kombination aktueller Sonographie mit präoperativ angefertigtem CT oder MR in der CAS wurde initial für die Neuro-

chirurgie entwickelt, um das Problem des „brain shift“ zu lösen [5, 10]. Diese Technologie lässt sich auch auf die Orbitachirurgie übertragen. Anhand eines Patientenkollektivs mit intra- und periorbitalen Tumoren haben wir als erste Arbeitsgruppe national und international die Möglichkeit von „sonography aided computer assisted surgery“ (SACAS) in der Orbitachirurgie untersucht.

Patienten und Methoden

Patienten. Wir behandelten 5 Patienten mit frontobasalen Schädelbasistumoren mit Affektion der Orbita (■ Tab. 1). In einem Fall handelte es sich um einen Patienten mit einem bilateral multipel nach intraorbital metastasierten neuroendokrinen Karzinom, das wir in seitentrennten Eingriffen über eine laterale und transkonjunktivale Orbitotomie resezierten. Zwei Patienten litten an einem Plattenepithelkarzinom von innerer Nase, Siebbeinzellen und Kieferhöhle mit Invasion in die Orbita und wurden über einen Midface-degloving-Zugang operiert. Bei einer Patientin mit metastasierendem Mammakarzinom wurde bei progredientem Exophthalmus mit Visusminderung und Verdacht auf Orbitaspitzenmetastase die Histologie transnasal endoskopisch gesichert, um die Indikation zur palliativen Radiatio zu stellen. Bei einer Patientin lag ein intraorbitales Hämangiolympangiom vor, das aufgrund einer akuten Einblutung zu Erblindung und Exophthal-

mus geführt hatte und über einen transfazialen Zugang reseziert wurde.

Bildgebung. Bei allen Patienten wurden präoperativ hochauflösende (Schichtdicke: 1 mm) 3D-CT- und bei 2 Patienten zusätzlich MR-Datensätze von Orbita, Nasennebenhöhlen und Rhinobasis erstellt. In allen Fällen erfassten die Datensätze die Konturen des Mittelgesichts kranial einschließlich der Stirn, kaudal mindestens bis zum oberen Alveolarkamm. Die Untersuchungen wurden an einem MR-Vision-Gerät (Fa. Siemens, Erlangen; 1,5 T) sowie an einem GE-CT (ProSpeed SX Power, Fa. General Electric Medical Systems, Milwaukee/WI, USA) bzw. Siemens-Sensation-Multislice-CT (16-Zeiler) durchgeführt. Im MR fertigten wir eine kontrastmittelunterstützte T1-Sequenz (MPRAGE) mit 1 mm Schichtdicke an. Die CT-Untersuchungen führten wir in Abhängigkeit des verwendeten BrainLAB-Systems in CT-Spiraltechnik mit einer Schichtdicke und einem Schichtabstand von 1 mm durch. Bei allen Patienten erhoben wir einen präoperativen sonographischen Orbitastatus mit einem B-scan-Ultraschallgerät (Siemens Sonoline G50) unter Verwendung eines Real-time-Konvexschallkopfes, der zwischen mehreren Frequenzen umgeschaltet werden kann und intraoperativ mit der Frequenz 7,5 MHz betrieben wurde.

Navigation. Die computergestützte Navigation nahmen wir mit einem opto-

elektronischen System vor (Vector Vision 2, Fa. BrainLab, Heimstetten) [4]. Hierzu wurden die CT-/MR-Datensätze über das klinikeigene Intranet auf die Planungsstation des Navigationssystems übertragen und das Bildmaterial mittels des Computersystems iPlan präoperativ fusioniert, analysiert und bearbeitet. Dies implizierte die farbliche Segmentierung der Tumorstrukturen und des Augapfels sowie ggf. des Sehnervs und der Augenmuskeln. Am Operationstag wurden die bearbeiteten Datensätze auf die Mobilstation des Navigationssystems übertragen und das Ultraschallgerät über den Videoausgang an die Mobilstation angekoppelt, sodass das Bild in einen Quadranten des Navigationsbildschirmes eingespielt werden konnte.

Intraoperatives Vorgehen. Die Patientenregistrierung führten wir mittels eines am Patientenkopf befestigten Sterns („patient tracker“) mit 3 Reflektorkugeln durch. Die Referenzierung an die CT-/MR-Datensätze erfolgte mit dem berührungsfreien Laserabtastungssystem Z-touch. Das mit der Navigationseinheit konnektierte Ultraschallgerät wurde über einen speziell an den Schallkopf adaptierten Aufsatz mit 3 Reflektoren optoelektronisch registriert. Die Kalibrierung des Schallkopfes nahmen wir nach steriler Abdeckung von Patient und Schallkopf mit einem registrierten und steril abgedeckten Phantom vor, das über ultraschallreflektierende Metalldrähte in definierter Anordnung verfügt (■ **Abb. 1**). Die Kalibrierung erfolgt, indem die im B-mode-Ultraschallbild nach Aufbringen sterilen Ultraschallgels angezeigte reale Position der Drähte mit den voreingestellten Kalibrationspunkten an der mobilen Navigationseinheit manuell in Übereinstimmung gebracht wird.

Zur Visualisierung der durch den Operationsfortschritt modifizierten Gewebetopographie führten wir zu Operationsbeginn sowie in regelmäßigen Abständen intraoperativ die Real-time-Sonographie durch, die mit dem statischen Bildmaterial der präoperativ aufbereiteten CT-/MR-Datensätze fusioniert werden konnte. Die navigiert-fusionierte Sonographie wurde hinsichtlich der Gewebeverschiebung der Leit- und Zielstrukturen herangezogen, wobei deren Quantifizierung anhand

P. U. Lohnstein · J. Schipper · A. Berlis · W. Maier

Sonographisch unterstützte computerassistierte Chirurgie (SACAS) in der Orbitachirurgie

Zusammenfassung

Hintergrund. Die Anwendung computerassistierter Verfahren in der Orbitachirurgie wird durch den intraoperativen Gewebeshift der intraorbitalen Strukturen erschwert, da dieser vom präoperativ erstellten CT-/MR-Datensatz nicht dargestellt werden kann.

Methoden. Bei 5 Patienten mit Orbitaaffektion durch frontobasale Tumoren setzten wir nach präoperativer Anfertigung von CT- und/oder MR-Datensätzen die intraoperative Sonographie unter Ankopplung des Ultraschallgeräts an das Navigationssystem ein.

Ergebnisse. Kalibrierung, Registrierung und Referenzierung der Sonographie verliefen unproblematisch. Intraoperativ konnten besonders die Strukturen im vorderen und mittleren Orbitadrittel sowie deren Gewebeshift sonographisch sehr gut beurteilt werden.

Schlussfolgerung. Die Anwendung der navigierten Sonographie erlaubt intraopera-

tiv eine mehrfache Reevaluierung präoperativ erstellter CT-/MR-Datensätze. Die Fusion der intraoperativen Sonographie mit der präoperativen Bildgebung visualisiert den Gewebeshift und erleichtert die Identifikation anatomischer Strukturen und die räumliche Orientierung des Operateurs. Dies scheint eine gesteigerte operative Radikalität bei zugleich höherer Gewebeprotektion zu erlauben. Die Anwendung eines nicht kalibrierten Ultraschallsystems parallel zur Navigation kann aufgrund der anatomischen Komplexität diese Anforderungen nicht erfüllen.

Schlüsselwörter

Computerassistierte Chirurgie · Intraoperative Sonographie · Navigation · Orbitatumoren · Schädelbasis

Sonography aided computer assisted surgery (SACAS) in orbital surgery

Abstract

Background. The application of computer assisted procedures in orbital surgery is made more difficult by the intraoperative tissue shift in intraorbital structures, since this intraoperative dislocation cannot be imaged in preoperative CT/MR datasets.

Methods. After preoperative recording of CT and/or MR datasets in five patients with orbita affected by frontobasal tumors, we used intraoperative sonography by coupling the ultrasound unit to the navigation system.

Results. Registration, referencing and calibration of the ultrasound system proceeded without any difficulties. Intraoperatively, the structures of the anterior and middle thirds of the orbita and their tissue shift could be particularly well evaluated sonographically.

Conclusion. The use of navigated sonography enables repeated intraoperative re-eval-

uation of preoperative CT/MR datasets. The fusion of intraoperative sonography with preoperative imaging visualizes the tissue shift and facilitates the identification of anatomical structures and the spatial orientation of the surgeon. This appears to allow both increased operative radicality and greater tissue protection. In our opinion, the intraoperative parallel application of a non-calibrated ultrasound system and an only CT/MRT based navigation system cannot fulfill these requirements because of anatomical complexity.

Keywords

Computer assisted surgery · Intraoperative sonography · Navigation · Orbital tumor · Skull base

Tab. 1 Patienten, bei denen die sonographisch unterstützte CAS in der Orbitachirurgie angewandt wurde					
Patient Nr.	Alter [Jahre]	Geschlecht	Diagnose	TNM-Stadium	Operativer Zugangsweg
1	24	m.	Neuroendokrines mediastinales Karzinom	T3N2M1 (Orbitae)	Laterale Orbitotomie und transkonjunktival
2	91	w.	Rezidiv eines Nasennebenhöhlenkarzinoms links	rT3N0M0	„Midface degloving“
3	60	w.	Orbitametastase links eines Mammakarzinoms	TxNxM1 (Orbita)	Transnasal-transethmoidale Biopsie
4	65	w.	Nasennebenhöhlenkarzinom links	T3N0M0	„Midface degloving“
5	53	w.	Hämangiolymphangiom der linken Orbita mit Amaurose	Entfällt	Transfazial-medial



Abb. 1 ▲ Kalibrierung der Ultraschallsonde mittels eines Phantoms, welches über Kupferdrähte in definierter Anzahl und Position eingebettet in Silikon verfügt

eines in das Bildfenster integrierten Millimeterlineals erfolgte. Zudem kontrollierten wir intraoperativ dargestellte Landmarken zur Qualitätssicherung, um einen Abfall der Genauigkeit des Navigationssystems, beispielsweise durch Dislokation des Navigationssterns, zu erkennen. Hierzu wurde nach Aufsetzen des Pointers auf eine Landmarke die Distanz zwischen den Koordinaten ihrer realen Position am Patienten und ihrer virtuellen Position im Datensatz in allen 3 Dimensionen berechnet und wie von Arapakis et al. [1] beschrieben der kürzeste Abstand berechnet, welcher der Ungenauigkeit entspricht.

Ergebnisse

Präoperative Vorbereitung

Anhand der präoperativen Sonographie der Orbita konnten wir bei allen Patienten den Orbitainhalt darstellen. Die intraorbitalen Organe waren in Abhängigkeit von ihrer Größe und Tiefe mit unterschiedlicher Genauigkeit abgrenzbar. So

bildeten sich der Bulbus und anteriore Tumoren stets deutlich ab, hingegen war die Darstellung der Orbitaspitze schwierig.

Die präoperative Aufarbeitung der Bilddaten und das Einzeichnen der anatomischen Strukturen wurden in allen Fällen problemlos durchgeführt. Der Zeitaufwand hierfür bewegte sich in einem Rahmen von 30–50 min je Patient und war davon abhängig, ob die Analyse und Konturierung ausschließlich anhand eines CT oder anhand eines mit dem CT fusionierten MR vorgenommen wurde. Im letzteren Fall bewegte sich der Aufwand im oberen Bereich.

So dauert allein die CT-/MR-Bildfusion an der Planungsstation etwa 5–10 min, da auch nach automatisierter Fusionierung eine manuelle Plausibilitätskontrolle im Rahmen der Qualitätssicherung durchgeführt werden muss. Hinzu kommt, dass im Vergleich zum CT bei den MR-Datensätzen durch die bessere Weichteildarstellung mehr Strukturen für die Konturierung herangezogen werden können. Im CT kann der Augapfel leicht differenziert und konturiert werden, jedoch ist die Abgrenzung im Orbitafett liegender Tumoren gegenüber dem Sehnerven und den Augenmuskeln schwierig. Deren sichere Konturierung war nur im MRT möglich. Je größer die Tumoren sind, desto mehr Schichten müssen bearbeitet werden, was einen zeitlichen Umfang von bis zu 10 min je Struktur bedingt.

Registrierung und Kalibrierung

Über ein Videokabel konnten wir in allen Fällen die Ankopplung des Ultraschallgeräts an die Mobilstation erreichen. Wir verwendeten bei allen Patienten eine Vierfachaufteilung des Navigationsbildschirmes und spielten das Real-time-Ultraschallbild fehlerfrei in einen Qua-

dranten ein. Da die Registrierung mittels des am Patientenkopf mit einer Schraube fixierten Sterns erfolgte, konnten wir die Fixierung in einer Mayfield-Klemme vermeiden. Dies gestattete intraoperativ eine hohe Mobilität des Kopfes und somit eine optimale Einstellung des Zugangs zur Orbita.

Nach der Referenzierung nahmen wir primär eine interne und externe Genauigkeitsprüfung vor. Die vom Navigationssystem errechnete interne Abweichung („root mean square error“, RMSE) wurde in allen Fällen im höchsten Genauigkeitsbereich (<1,5 mm) angegeben. Auch die externe Genauigkeit, die an bekannten Landmarken überprüft wurde, ergab bei allen Patienten eine Abweichung von ≤ 1 mm.

Die Kalibrierung des Ultraschallkopfes unter sterilen Bedingungen war mit einem zeitlichen Aufwand von 10–25 min verbunden. Nach Fixation des Registrierungsaufsatzes mit einer Rändelschraube musste intraoperativ stets darauf geachtet werden, dass aufgrund der zwischen Schallkopf und Schraube liegenden Abdeckfolie keine Lockerung auftrat. Nach erfolgreicher Kalibrierung überprüften wir die Genauigkeit des navigierten Ultraschalls am Patienten, indem wir die korrekte Einspielung der am CT/MR konturierten anatomischen Orbitastrukturen anhand des Bulbus auf Übereinstimmung mit dem Real-time-Bild auf dem Navigationsbildschirm kontrollierten. Hier zeigte sich eine Abweichung von maximal 2 mm (■ **Abb. 2**). Weiterhin evaluierten wir intraoperativ regelmäßig die Genauigkeit mit dem Pointer an knöchernen Strukturen und beobachteten in keinem Fall eine Abweichung >2 mm.

Intraoperativer Ablauf

In 4 Fällen konnten wir den Tumor gut im Ultraschallbild visualisieren und durch die präoperative Konturierung die räumliche Lage der Leitstrukturen zum Tumor bestimmen. Bei einer Patientin (Fall 3) war die sonographische Darstellung des in der Orbitaspitze gelegenen Tumors problematisch. Der Verlauf des Gewebeshifts wurde mittels des navigierten Ultraschallbildes dokumentiert und in ein Verhältnis zum Operationssitus gestellt. Dabei sahen wir eine Verschiebung des intraorbitalen Weichgewebes ausweislich des eingeblendeten Lineals bis zu etwa 1 cm. Im Folgenden wird der Ablauf bei den einzelnen Patienten geschildert.

Fall 1: Orbitotomie/ transkonjunktivaler Zugang (interdisziplinär)

Die 3 intraorbitalen Metastasen können sehr gut sonographisch differenziert werden, es besteht Übereinstimmung von Sonographie und CAS (Abb. 2). Intraoperativ lässt sich durch den Ultraschall der Gewebeshift hervorragend darstellen (Abb. 3). Durch die Dynamik der Sonographie lassen sich operationsbedingt verlagerte Strukturen kontinuierlich verfolgen und die Ro-Resektion des Tumors unter Schonung dargestellter anatomischer Strukturen erreichen.

Fall 2 und Fall 4: Midface-degloving-Zugang

Der Tumor ist sonographisch transorbital gut abgrenzbar. Die Sonographie erfolgt ausschließlich transorbital, da der Zugangsweg keine Einführung des Schallkopfaufsatzes erlaubt. Eine Schonung des gesunden Orbitainhaltes ist durch zielorientierte Präparation und genaue transorbitale Lokalisation des Tumors während der vollständigen Resektion möglich (Abb. 4).

Fall 3: transnasale Biopsie

Aufgrund der Limitierung der Eindringtiefe des navigierten Ultraschalls und reflexionsbedingter Artefakte in der Orbitaspitze ist initial der Tumor schwierig zu identifizieren und keine eindeutige sonographische Darstellung in der Orbitaspitze möglich. Da der Tumor transnasal

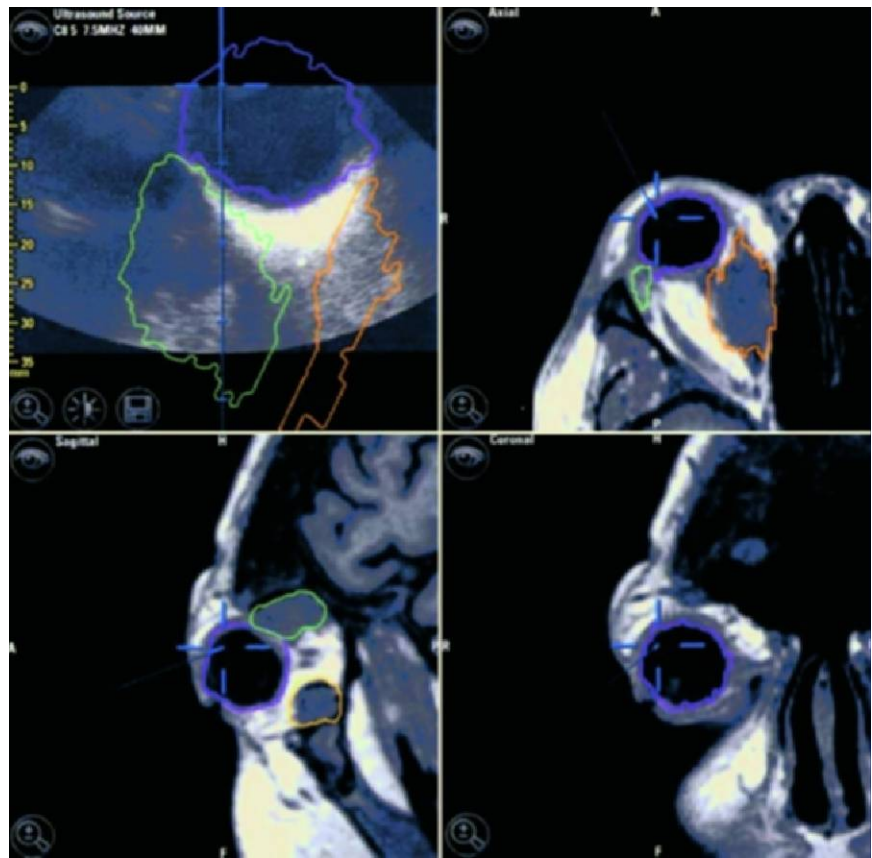


Abb. 2 ▲ Darstellung intraorbitaler Tumoren mittels Sonographie und MR zu Beginn eines Eingriffs (Patient 1). Wir kennzeichneten die Zielobjekte (3 Tumoren: grün, gelb, rot) und wichtige anatomische Landmarken (Bulbus: violett) mittels unterschiedlich farbiger Konturen im MR. Zu Operationsbeginn besteht eine nahezu vollständige Übereinstimmung der sonographischen Befunde mit der Navigation mittels präoperativ vorgenommenem Navigations-MR. Das blaue Fadenkreuz markiert die virtuelle Spitze des Ultraschallkopfes

operiert wird, ist auch intraoperativ keine weitere Annäherung des Schallkopfes an das Zielobjekt möglich.

Fall 5: transfazialer Zugang

Die sonographische Darstellung des Bulbus und die Navigation sind exakt möglich. Jedoch ist die Abgrenzung des diffus infiltrativen Tumors im CT schwierig, weshalb eine präoperative Konturierung des Tumors unterbleibt. Es wurden lediglich Bulbus und Lamina papyracea markiert. Intraoperativ ist der Tumor jedoch sonographisch darstellbar. Die navigierte Sonographie erlaubte es, den Gewebeshift von Bulbus und Tumor darzustellen (Abb. 5). Der simultane Einsatz des Pointers erleichtert die Orientierung. Da sich der Tumor im CT nicht abgrenzen lässt, erweist sich die navigierte Sonographie dieser Strukturen intraoperativ als besonders wichtig, um dem Operateur bei massiv veränderten anatomischen Verhältnissen ein organschonendes Vor-

gehen zu ermöglichen. Eine Ro-Resektion war aufgrund der diffusen Durchsetzung des Gewebes nicht möglich.

Diskussion

Der Einsatz von Navigationssystemen in der Orbitachirurgie wurde bereits von Schlöndorff in frühen Phasen der Anwendung der CAS in der Kopf-Hals-Chirurgie angeregt [11] und mittlerweile bis hin zur originalgetreuen Orbitarekonstruktion ausgebaut [19]. Ähnlich wie bei intrakraniellen Operationen kommt es nach Eröffnung des intraorbitalen Raumes durch jede Manipulation zu einer Verschiebung der Weichteile. So wird die Anwendung der Navigation, welche die präoperativen Verhältnisse in der Orbita abbildet, erschwert. Da diese nicht mehr die realen räumlichen Beziehungen wiedergibt, kann sie den Operateur bei unkritischer Anwendung sogar fehlleiten und das Aufsuchen der Zielstrukturen unter

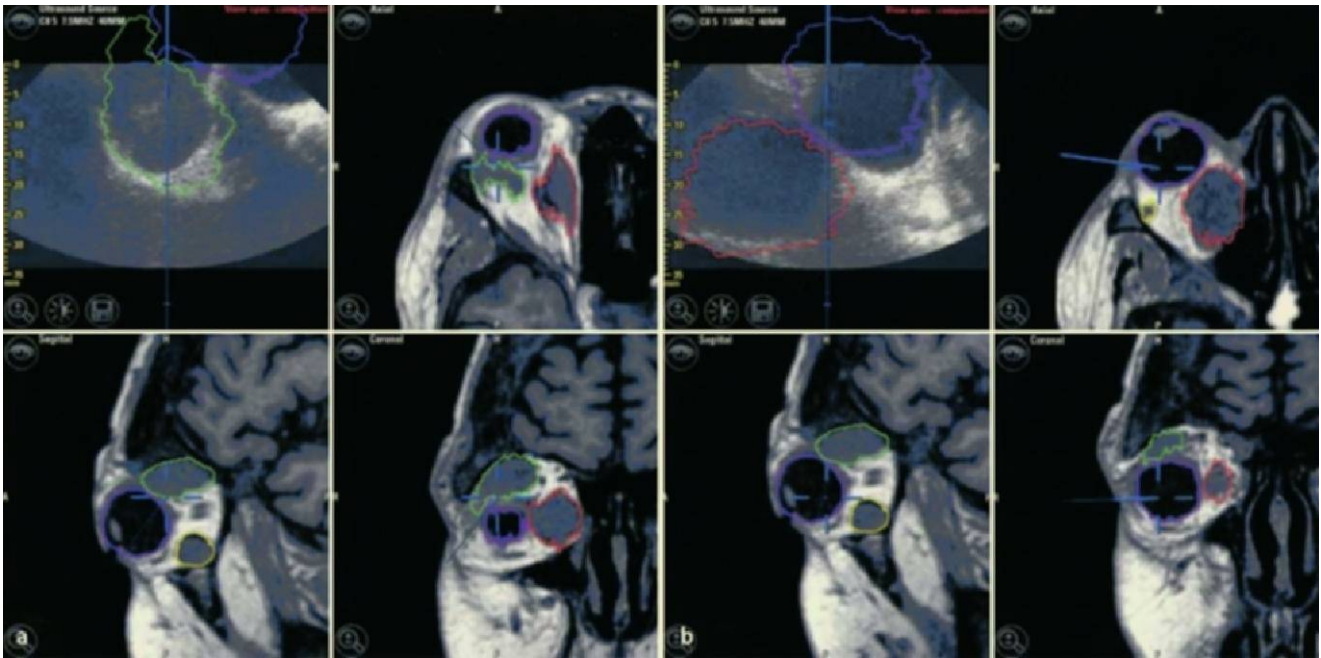


Abb. 3 ▲ Der intraoperative Gewebeshift mit fortschreitender Präparation wird deutlich und durch den Ultraschall dargestellt (Patient 1). **a** Nach Resektion eines Abschnitts des grün markierten kranio-lateralen Tumors werden die noch zu resezierenden Residuen und ihre Beziehung zum verlagerten Bulbus deutlich. **b** Der rot markierte mediale Tumor lässt sich durch die präoperative Konturierung zuordnen. Dies erlaubt die gezielte und kontrollierte Verlagerung des Bulbus, um den Tumor vollständig unter Erhalt der Sehfunktion zu resezieren

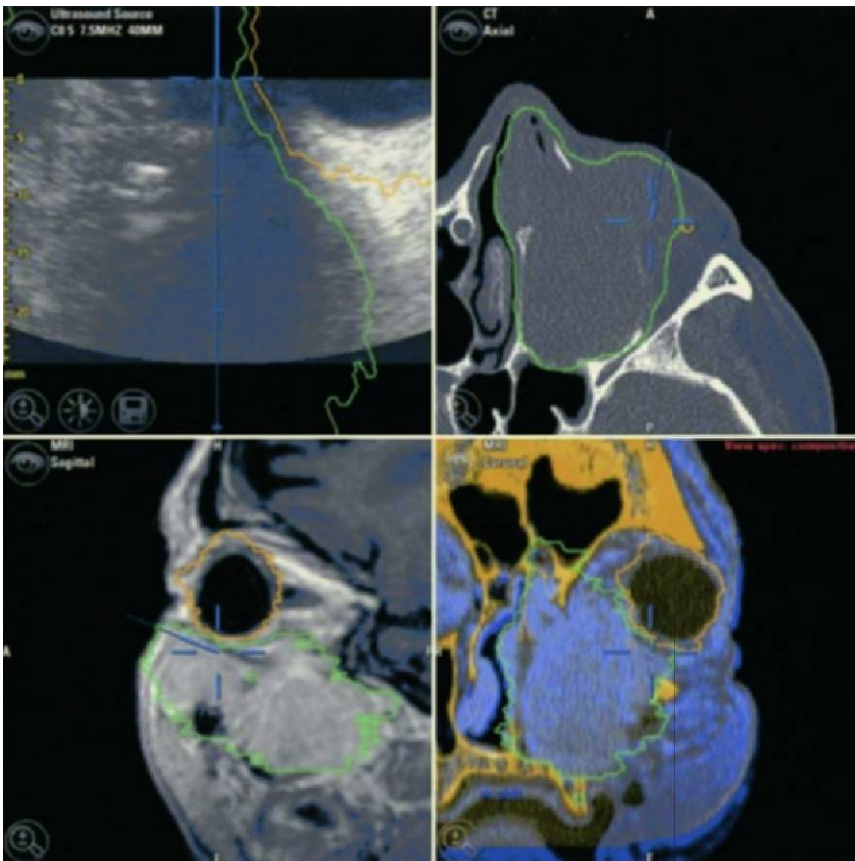


Abb. 4 ▲ Nasennebenhöhlenkarzinom (Patientin 2). Die Darstellung mit fusioniertem CT/MR und navigierter B-mode-Sonographie gestattet die intraorbitale Visualisierung der Tumorgrenzen und ihrer Nachbarschaftsbeziehungen. Die Abb. zeigt intraoperativ nach bereits vollzogener Teilresektion des Tumors den Gewebeshift des Bulbus (die ursprüngliche Position ist gelb konturiert) und seine Abgrenzung zu den noch zu resezierenden Tumorresiduen (grün konturiert)

Schonung der funktionell relevanten Organe erschweren.

Die intraoperative Sonographie wird in der HNO-Heilkunde erfolgreich zur Lokalisation kleiner, nicht palpabler Raumforderungen wie der Punktion von Parotiszysten, und der Grobnadelbiopsie eingesetzt [7, 18]. In der Neurochirurgie ist die Anwendung sonographischer intraoperativer Verfahren weiter verbreitet, da hier der „brain shift“ die Lokalisation tiefer gelegener Hirntumoren erschwert und auch die navigierte CAS dadurch limitiert ist [6, 16].

Die Sonographie als Real-time-Verfahren bildet die Gewebe aktuell ab, sodass der Operateur den Shift visualisieren und sein Vorgehen anpassen kann. Bei isolierter Anwendung ist der Ultraschall allerdings durch physikalische Eigenschaften wie Reflexion an Knochen und Luft sowie je nach Gewebekonsistenz und Echogenität potenziell reduzierte Abgrenzbarkeit limitiert [17]. Dies bedeutet einen Informationsverlust gegenüber modernen Schnittbildverfahren. Ein 3D-Ultraschall, der den Nachteil der Zweidimensionalität aufheben könnte, ist unpraktikabel, da er einen hohen Zeitaufwand erfordert.

Beim Einsatz der Sonographie getrennt von der CT-/MR-Navigation sind beide Verfahren nicht miteinander asso-

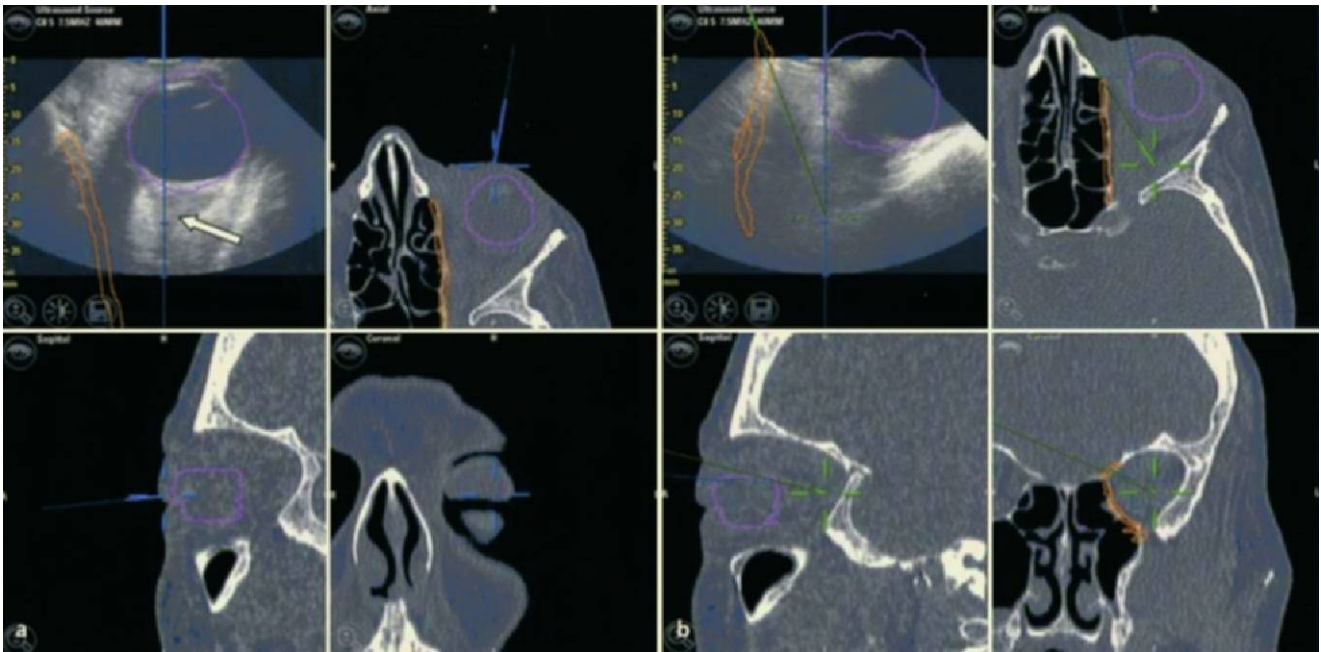


Abb. 5 ▲ Hämangiolympfangiom (Patientin 5). **a** Zu Operationsbeginn ist bei guter Übereinstimmung von Navigations-CT und Sonographie der Bulbus gut vom Tumor (*Pfeil*) abgrenzbar. Die knöcherne Grenze zum Siebbein (*orange markiert*) ist an ihrer kompletten Schallauslöschung erkennbar. **b** Simultaner Einsatz des auf die präoperative CT bezogenen Pointers zum navigierten B-Scan. Während der Ultraschall die Abgrenzung des Tumors vom Bulbus unter Darstellung des Gewebeshifts wiedergibt, gestattet die CT-Navigation räumliche Orientierung im knöchernen Rahmen der Orbita

ziert, sodass der Operateur die Informationen gedanklich miteinander und mit dem Anblick des Operationssitus verbinden muss. Diese intraoperative Abstrahierung ist schwierig, zumal zwei- und dreidimensionale Aspekte zusammengeführt werden müssen und die Sonographie keinen Bezug zu den präoperativ erstellten CT-/MR-Datensätzen erlaubt. Dies ist in Anbetracht der komplexen Anatomie der Orbita problematisch und birgt Fehlerquellen.

Neurophysiologische Monitoringverfahren können intraorbital nur die Affferenz wiedergeben [7], liefern jedoch keine räumlich-orientierenden Informationen und sind in diesem Zusammenhang daher wenig hilfreich. Sinnvoll ist es, die Vorteile intraoperativen Ultraschalls mit denen hochauflösender CT- und MR-Technologien, repräsentiert durch präoperative CAS-Datensätze, zu verbinden. Auch dies wurde initial in der Neurochirurgie eingeführt [10, 12, 13, 15].

Nach unserer Erfahrung ist die Anwendung und Benutzung des intraoperativen navigierten Ultraschalls unproblematisch. Die Ankopplung des Ultraschallgeräts an die Mobilstation des Navigationsgeräts verlief stets fehlerfrei. Die Kalibrierung war am Operationstag der aufwendigste Anteil am Initialisierungsprozess.

Sie wurde durch uns vor jeder Operation neu vorgenommen, was sinnvoll ist, um keine potenziellen systemisch induzierten Kalibrierungsfehler vorangegangener Eingriffe fortzuschreiben. Dies verlängert die Narkosezeit, da die Kalibrierung unter sterilen Bedingungen nach Abdecken des Patienten und des Schallkopfes vorgenommen werden muss. Bei der Kalibrierung des Schallkopfes ergab sich eine deutliche Lernkurve. Insgesamt stellte sich der Ablauf der Kalibrierung als unkompliziert dar, erforderte jedoch die Anwesenheit zweier mit dem System vertrauter Mitarbeiter an der sterilen Ultraschallsonde und am Touchscreen des VectorVision.

Da der Siemens-Schallkopf nicht sterilisiert werden kann, muss zwischen ihm und den Navigationsaufsatz eine Abdeckfolie positioniert werden, die eine potenzielle Fehlerquelle darstellt. Die Rändelschraube muss mit hohem Druck angepresst werden, um ein Verrutschen zu vermeiden. Kommt es dennoch zur Verschiebung, muss intraoperativ rekaliert werden. Die Verfahrensschritte sind relativ einfach, sodass sich nach wenigen Fällen Routine einstellte. Durch diese kurze und deutliche Lernkurve konnten wir sowohl den Zeitaufwand als auch das Auftreten von Ungenauigkeiten im Kalibrierungsverfahren reduzieren. Gerade bei lange

dauernden Eingriffen kann man den zusätzlichen intraoperativen Aufwand von zuletzt 10 min als gering betrachten.

Die Einspielung des Ultraschallbildes in den Navigationsbildschirm ist insofern mit einer Bildfusion verbunden, als die präoperativ am CT-/MR-Datensatz vorgenommenen Konturierungen in das Ultraschallbild eingespielt werden. Hier ergab sich zu Operationsbeginn eine fast vollständige Übereinstimmung, was die korrekte Referenzierung und Kalibrierung belegt. Die Segmentierung und Konturierung an CT-MR-fusionierten Datensätzen erwies sich – wie auch bei der klassischen CAS [9, 12, 13] – als äußerst hilfreich. Durch die intraoperativ wiederholte Anwendung der Sonographie in kurzen Abständen gelang es, den operationsbedingten Gewebeshift zu visualisieren und die markierten Strukturen konsequent zu verfolgen. Die Position des Schallkopfes wird durch das System automatisch in die 3 vom CT/MR belegten Quadranten des Bildschirms (axial, koronar, sagittal) eingeblendet. So kann der Chirurg die Relationen dreidimensional und im Verhältnis zu den knöchernen Begrenzungen der Orbita erkennen. Dies wird durch die wie bei jeder Navigation gegebene Möglichkeit einer Anwendung navigierter Instrumente (Pointer, Sauger) ergänzt.

Die sonographische Abbildung des Bulbus war in allen Fällen eindeutig, ebenso die Darstellung ventral oder im mittleren Orbitadrittel liegender Tumoren. Schwierig war es hingegen, Raumforderungen im hinteren Drittel eindeutig im Ultraschall zu identifizieren. Dies führen wir auf mehrere Ursachen zurück. Zum einen limitiert die Orbita als konisch sich auf engem Raum verengender knöcherner Trichter die Möglichkeiten, den Schallkopf tiefer einzuführen. Auch engt dies das sonographische „Gesichtsfeld“ ein und erzeugt Knochenreflexe. Zudem ist die Eindringtiefe durch die werksseitig vorgegebene Beschränkung der navigierten Sonographie auf 7,5 MHz und der Kalibrierungstiefe auf 4 cm begrenzt. Insoweit ist bei isolierten Orbitaspitzenprozessen der intraoperative navigierte Ultraschall nur begrenzt als hilfreich einzustufen. In diesen Fällen besteht sein Vorteil darin, dass man unter dem Gesichtspunkt der komplexen Anatomie zumindest bis zur Eindringtiefe von 4 cm kontrolliert präparieren kann.

Bei den anderen Patienten mit CT-/MR-tomographisch abgrenzbaren Tumoren gelang stets die sonographische Abgrenzung der Tumoren gegenüber Bulbus und intraorbitalem Gewebe. Unsere Beobachtungen bestätigen die Feststellung neurochirurgischer Arbeitsgruppen, wonach je nach Gewebetyp der Ultraschall gegenüber dem CT oder dem MR gleichwertig, überlegen oder unterlegen sein kann [17]. So ist die Abgrenzung der Augenmuskeln und des N. opticus insbesondere im MR hervorragend, weshalb dieses auch zur präoperativen Konturierung besonders geeignet ist. Karzinome oder Metastasen bilden sich intraoperativ sonographisch gut ab, sofern sie nicht in der Tiefe des Orbitatrichters liegen.

Selbst bei einer sonographisch schlecht abbildbaren Struktur kann man, wenn sie in der präoperativ durchgeführten CT-/MR-Bildgebung konturiert wurde, aus der Relation ihrer eingeblendeten Kontur zu sonographisch differenzierbarem Gewebe die Tendenz ihrer Verschiebung ablesen. Umgekehrt kann ein in der präoperativen Bildgebung wenig abgrenzbarer Tumor intraoperativ, wie das Beispiel des Hämangiolympangioms (Patientin 5) zeigt, in der Sonographie abgrenzbar sein, was die Resektion erleichtert.

So erfuhren wir die Unterstützung der Navigation durch Sonographie als äußerst hilfreich in der Identifikation der Tumoren und Schonung funktionell relevanter Strukturen und somit als sinnvolle Ergänzung zur bisher klassisch angewandten CAS mittels CT- und/oder MR-Datensätzen. Die Fallzahl der Patienten, die von uns mit Unterstützung durch diese Methode operiert wurden, ist bislang noch gering. Unsere Ergebnisse zeigen jedoch, dass der Ausbau des Verfahrens mit Fokus auf die HNO-Heilkunde und ihre anatomischen Gegebenheiten angestrebt werden sollte, um die intraoperativen diagnostischen Möglichkeiten und somit Genauigkeit und Gewebeschonung in der Tumorresektion zu fördern.

Fazit für die Praxis

Die intraoperative, an präoperativ erstellte CT- oder MR-Datensätze angekoppelte Sonographie stellt eine wertvolle Bereicherung der computerassistierten Orbitachirurgie dar. Sie erleichtert die Orientierung in der Orbita im Hinblick auf den intraoperativen Gewebeshift insbesondere im vorderen und mittleren Orbitadrittel. Dies ermöglicht durch Real-time-Darstellung der zu resezierenden und der funktionell relevanten intraorbitalen Weichteilstrukturen eine zielgerichtete und schonende Präparation.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. W. Maier
Hals-Nasen-Ohren-Klinik,
Universitätsklinikum Freiburg
Killianstraße 5, 79106 Freiburg i. Br.
maier@hno.ukl.uni-freiburg.de

Interessenkonflikt. Es besteht kein 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. Die Präsentation des Themas ist unabhängig und die Darstellung der Inhalte produktneutral.

Literatur

1. Arapakis I, Hubbe U, Maier W et al. (2004) LED-Autoregistrierung in der navigierten endonasalen Nasennebenhöhlenchirurgie. *Laryngorhinootologie* 83: 418–425
2. Bernays RL (2003) Intraoperative imaging in neurosurgery. MRI, CT, ultrasound. *Introduction. Acta Neurochir [Suppl]* 85: 1–3

3. Gronningsaeter A, Kleven A, Omedal S et al. (2000) SonoWand, an ultrasound-based neuronavigation system. *Neurosurg* 47: 1373–1380
4. Khan M, Ecke U, Mann WJ (2003) Der Einsatz eines optischen Navigationssystems in der Nasennebenhöhlenchirurgie. *HNO* 51: 209–215
5. Nagelhus Hernes TA, Omedal 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 Invas Neurosurg* 46: 129–137
6. Reinacher PC, van Velthoven V (2002) Intraoperative ultrasound imaging: practical applicability as a real-time navigation system. *Acta Neurochir [Suppl]* 85: 89–93
7. Ridder GJ, Technau-Ihling K, Boedeker CC (2005) Ultrasound-guided cutting needle biopsy in the diagnosis of head and neck masses *Laryngoscope* 115(2): 376–377
8. Schipper J, Ridder GJ, Arapakis I et al. (2004) Neuronavigation zur Funktionssicherung und -erhalt bei schädelbasischirurgischen Eingriffen? *HNO* 53: 897–907
9. Schipper J, Klenzner T, Berlis A et al. (2006) Objektivierung von Therapieergebnissen in der Schädelbasischirurgie durch virtuelle Modellanalyse. *HNO* 54: 677–683
10. Schlaier JR, Wariat J, Dorenbeck 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* 146: 271–277
11. Schlöndorff G, Mösges R, Meyer-Ebrecht D et al. (1989) CAS (Computer Assisted Surgery). Ein neuartiges Verfahren in der Kopf- und Halschirurgie. *HNO* 37: 187–190
12. Sure U, Alberti O, Petermeyer M et al. (2000) Advanced image-guided skull base surgery. *Surg Neurol* 53: 563–572
13. Sure U, Benes L, Riegel T et al. (2002) Image fusion for skull base neuronavigation. *Technical note. Neurol Medico Chir* 42: 458–461
14. Sure U, Benes L, Bozinov O et al. (2005) Intraoperative landmarking of vascular anatomy by integration of duplex and doppler ultrasonography in image-guided surgery. *Technical note. Surg Neurol* 63: 133–141
15. Unsgaard G, Omedal S, Muller T et al. (2002) Neuronavigation by intraoperative three-dimensional ultrasound: initial experience during brain tumor resection. *Neurosurg* 50: 804–812
16. Van Velthoven V (2002) Intraoperative ultrasound imaging: comparison of pathomorphological findings in US versus CT, MRI and intraoperative findings. *Acta Neurochir [Suppl]* 85: 95–99
17. Vougioukas VI, Hubbe U, Hochmuth A et al. (2003) Perspectives and limitations of image-guided neurosurgery in pediatric patients. *Childs Nerv Syst* 19: 783–791
18. Weerda H, Gehrking E (2000) Die (sonographisch kontrollierte) Feinnadelpunktionszytologie im Kopf-Hals-Bereich. *HNO* 48: 419–420
19. Zizelmann C, Schramm A, Schön R et al. (2005) Neue Möglichkeiten der computerassistierten präoperativen Planungschirurgie (CAPP) und der computerassistierten Chirurgie (CAS) in der rekonstruktiven funktionserhaltenden Orbitachirurgie. *HNO* 53: 428–438