

F. Gebhard¹ · C. Riepl¹ · P. Richter¹ · A. Liebold² · H. Gorki² · R. Wirtz³ · R. König³ ·
 F. Wilde⁴ · A. Schramm⁴ · M. Kraus⁵

¹ Zentrum für Chirurgie, Klinik für Unfall-, Hand-, Plastische und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum Ulm

² Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie, Universitätsklinikum Ulm

³ Klinik für Neurochirurgie, Universitätsklinikum Ulm

⁴ Klinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie, Bundeswehrkrankenhaus Ulm

⁵ Klinik für diagnostische und interventionelle Radiologie, Universitätsklinikum Ulm

Der Hybridoperationssaal

Zentrum intraoperativer Bildgebung

Die intraoperative Bildgebung erlebte seit ihrer Einführung vor knapp 60 Jahren einen steten Wandel. Von einfachen zweidimensionalen Bildverstärkern ging der Trend der vergangenen Jahre zu motorisierten C-Bögen, die CT-artige Datensätze im Operationssaal (OP) erstellen können. Damit wurde den Operateuren ein neues Kontrollinstrument an die Hand gegeben.

Aktuell steht eine neue Ära des Einsatzes moderner bildgebender Verfahren und deren Vernetzung mit anderen wesentlichen Bestandteilen des OP bevor: durch die Kombination moderner Flachbilddetektoren, dem Einsatz von Industrierobotern und der Einbeziehung moderner OP-Tischtechnik in Verbindung mit einem Navigationssystem werden Einsatzgebiet und bisherige Limitationen deutlich erweitert.

Bildverstärker werden zur direkten intraoperativen Darstellung seit den 1960er Jahren des letzten Jahrhunderts angewandt. Verschiedene Fachdisziplinen bedienen sich dieser Technik. Neben unfallchirurgischen und orthopädischen Indikationen wie z. B. in der Frakturversorgung oder der Wirbelsäulenchirurgie werden intraoperativ akquirierte Bilder in der Neurochirurgie, der Kardiologie, der Angiologie und der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie eingesetzt.

➤ **Eine Revolution der intraoperativen Bildgebung brachte die Einführung von motorisierten Systemen, die dreidimensionale (3D-), CT-ähnliche Bilddatensätze erzeugen können.**

Diese Angio-Bildverstärker wurden initial in der Herz- und Gefäßchirurgie eingesetzt und finden seit Ende der 1990er

Jahre mehr und mehr Einzug in den unfallchirurgischen OP [21].

Hybrid-OP – Begriffsbestimmung

Der Begriff Hybrid-OP beschreibt einen Arbeitsplatz, an dem verschiedene interventionelle und operative Eingriffe durchgeführt werden können. Damit wird die oftmals noch praktizierte strikte Trennung verschiedener Fachbereiche räumlich aufgehoben. Ein Hybrid-OP muss so eingerichtet sein, dass er den Anforderungen der ihn nutzenden Abteilungen vollständig gerecht wird. Neben offenen Operationen muss die Möglichkeit minimal-invasiver Prozeduren gegeben sein. Dies stellt besondere Anforderungen an die zum Einsatz kommende Technik. ■ **Abb. 1** zeigt zwei Grundrisse möglicher Hybrid-OP-Konfiguration.

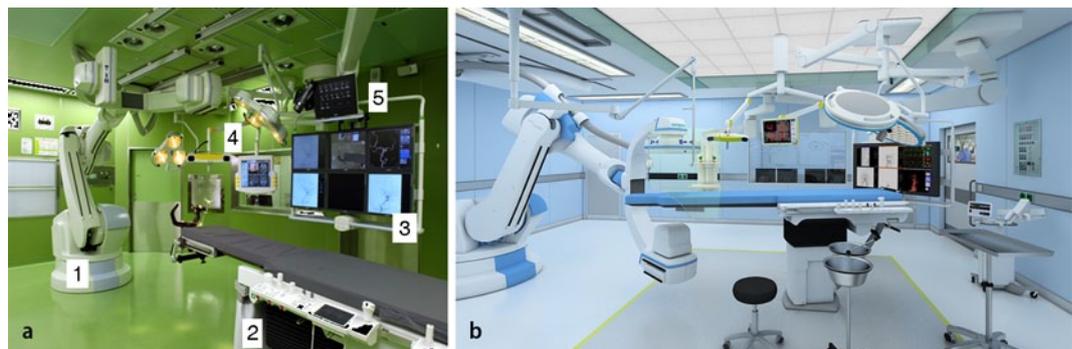


Abb. 1 ▲ a, b Typische Bestandteile eines Hybrid-OPs sind die Bildgebungseinheit (1 Artis Zeego®, Siemens, Erlangen, Deutschland), ein OP-Tisch (2), eine zentrale Bedieneinheit mit mehreren Monitoreinheiten (3), ein Navigationssystem (4) sowie zusätzliche Monitoreinheiten und Bildübertragungsmöglichkeiten (5). (Mit freundl. Genehmigung der Firma BrainLab)

Tab. 1 Übersicht über typische und optionale Vorrichtungen in einem Hybrid-OP

Typische technische Einrichtungen	Optionale Ausrüstung
Bildgebungseinheit	Navigationsmodul
Operationstisch	Endoskopieeinheit
Beleuchtung	Elektrokauter
Anästhesiologischer Arbeitsplatz	Defibrillator
Herz-Lungen-Maschine	„Cell Saver“
Instrumententische	Bewegliche Monitorsysteme (mit PACS-Anbindung)
Belüftungsvorrichtung	

Technische Voraussetzungen

Es gibt keine generelle Aussage, wie ein Hybrid-OP eingerichtet werden muss. Dennoch sind bestimmte technische Erfordernisse einzuhalten, um allen Anforderungen gerecht zu werden. Wesentlicher Kern des OPs ist die Vernetzung aller erforderlichen Einrichtungen, also des OP-Tisches, der Bildgebungseinheit, des Klinikinformationssystems und der Navigationsinstrumente. **Tab. 1** gibt einen Überblick über die erforderlichen und optionalen technischen Installationen.

Bildgebung

Prinzipiell stehen zwei verschiedene Installationsoptionen zur Verfügung: mobile und fest installierte Systeme. Bei der Entscheidung, welche Anschaffung getätigt wird, spielt der Schwerpunkt der Ausrichtung des Saales eine entscheidende Rolle. Mobile Geräte haben den großen Vorteil, dass sie prinzipiell auch in anderen Sälen eingesetzt werden können (**Abb. 2a**). Der große Nachteil liegt in der geringeren Röhrenleistung (2–25 kW vs. Empfehlung: 80–100 kW) und der niedrigeren Bildwiederholfrequenz (25 f/s 50 Hz vs. Empfehlung 30 f/s 50 Hz) im Vergleich zu stationären Geräten, die insbesondere in herzchirurgischen und angiologisch-interventionellen Verfahren, bei denen die Visualisierung dünner Drähte in zentralen Körpergefäßen erforderlich ist, stellenweise als nicht zureichend beurteilt werden [7]. Eine weitere Limitation mobiler Geräte stellt die Überhit-

zung wegen geringerer Kühlkapazität im Vergleich zu ihren stationär montierten Konkurrenten dar.

Fest montierte Geräte können prinzipiell an der Decke oder am Boden montiert werden. Bei der Deckenmontage müssen hygienische Überlegungen angestellt werden, stark bewegliche Teile unmittelbar über dem Operationssitus können in Hybrid-OPs, die auch für offene Eingriffe konzipiert sind, die Sterilität beeinträchtigen. Zudem werden laminare Belüftungseinheiten beeinträchtigt. Ihr Vorteil liegt in der hohen Bewegungsfreiheit, die oft eine Verschiebung des OP-Tisches überflüssig macht. Außerdem kann bei 3D-Anwendungen der Scan von beiden Seiten des Patienten durchgeführt werden. Fest am Boden installierte Einheiten erlauben dies wegen der starren Bodensäule oft nicht. Zudem sind Tischverschiebungen häufiger erforderlich und eine Seite des OPs wird zu einem bestimmten Anteil vom System beansprucht. Dafür kann der bodenmontierte C-Bogen leichter in eine Parkposition überführt werden ohne Kollision mit den übrigen Deckenmontagen zu befürchten.

Die dritte und jüngste Methode ist die Montage des C-Bogens auf einem robotisierten Arm, welcher aus seiner Ruheposition automatisch an den Tisch bewegt wird und mit dem OP-Tisch verbunden ist um Kollisionen zu vermeiden (**Abb. 2b**). Dieser C-Bogen ist so flexibel wie deckengebundene Systeme, obwohl er am Boden montiert wird. Die verbesserte Reichweite ist bedingt durch den Einsatz des Bogens auf einem Industrieroboter. Ein weiterer essentieller Vorteil ist die Bedienbarkeit durch den Operateur selbst.

Als Bildverstärkereinheit bieten sich neue Flachdetektoren an, die einen wesentlich größeren Bildausschnitt auf einmal erfassen können und eine optimierte Bildqualität erlauben.

In einem modernen Hybrid-OP kann auf 3D-Bildgebung nicht mehr verzichtet werden.

Diese Bedingung kann von allen vorgenannten Systemen erfüllt werden. Durch den Einsatz eines robotisierten Systems kann bei der Ausführung eines 3D-Scans

wertvolle Zeit gespart werden, da diese Systeme bei der Geschwindigkeit der Bildakquisition alle anderen genannten weit übertreffen.

OP-Tisch

Heutige OP-Tische bieten eine Vielzahl an Konfigurationsmöglichkeiten und wurden für verschiedenste Anwendungen konzipiert. Für die Besonderheiten eines Hybrid-OPs müssen an den Tisch besondere Ansprüche gerichtet werden. Da neben konventionellen Eingriffen besonders in diesem Saal die intraoperative Bildgebung Kern der interventionellen und operativen Eingriffe darstellt, muss der Tisch so integriert werden, dass eine Artefaktbildung auf ein Minimum reduziert wird. Durch die Nutzung des Saales durch verschiedene Disziplinen, die unterschiedliche Anforderungen an die Lagerung des Patienten stellen, muss der Tisch zudem höchste Flexibilität gewähren. Daher eignen sich für den Einsatz in diesem speziellen OP vorwiegend modularer OP-Tische, die größtmögliche Flexibilität ermöglichen. Zur Artefaktreduktion können Teile des Tisches aus Karbon angefertigt werden.

Auch beim OP-Tisch kann zwischen mobilen und fest montierten Tischen differenziert werden. Insbesondere die Kombination und Integration aller Bestandteile des OPs erfordern einen fest installierten Tisch. Die Vernetzung der bildgebenden Einheit mit der Steuerung des OP-Tisches erlaubt die sichere und zeitsparende Bildakquise.

Computernavigation

Computernavigierte Systeme sind für bestimmte Eingriffe im Bereich der Neurochirurgie, hier insbesondere der Tumorchirurgie, der Kardiochirurgie, der Kieferchirurgie und der Orthopädie und Unfallchirurgie untersucht worden und können die anwendenden Chirurgen auf diverse Arten unterstützen [1, 12, 18, 22]. Wesentlicher Nachteil bisheriger Navigationslösungen ist die Setup-Zeit dieser Systeme, die oftmals aus separater Kamera, einer Workstation mit Monitoren und zugehörigem C-Bogen bestehen [2]. Diese müssen für jede Operation eigens im

Hier steht eine Anzeige.



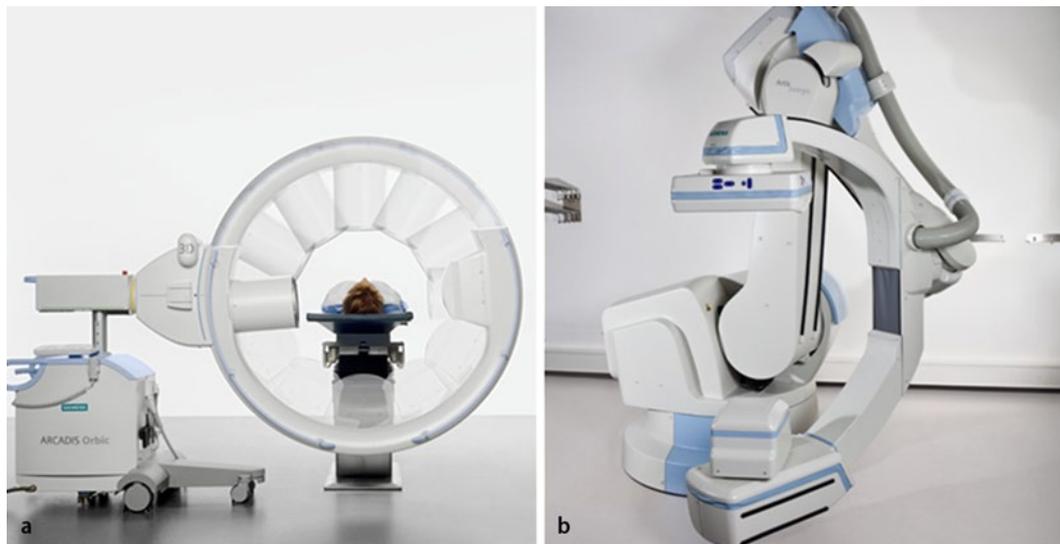


Abb. 2 ▲ **a** Mobile C-Bögen (Arcadis Orbic 3D®, Siemens, Erlangen, Deutschland) können in mehreren Sälen eingesetzt werden und weisen daher eine hohe Flexibilität auf. Sie sind bisher die am häufigsten eingesetzten Bilderzeuger im OP. **b** Fest montierte C-Bögen (Artis Zeego®, Siemens, Erlangen, Deutschland) sind ortsgebunden. In Kombination mit einem robotisierten C-Arm ist der Einsatz dieser Geräte zeitsparend, durch einen eingebauten Kollisionsschutz sicher und für alle Fachdisziplinen geeignet. (Mit freundl. Genehmigung der Fa. Siemens)

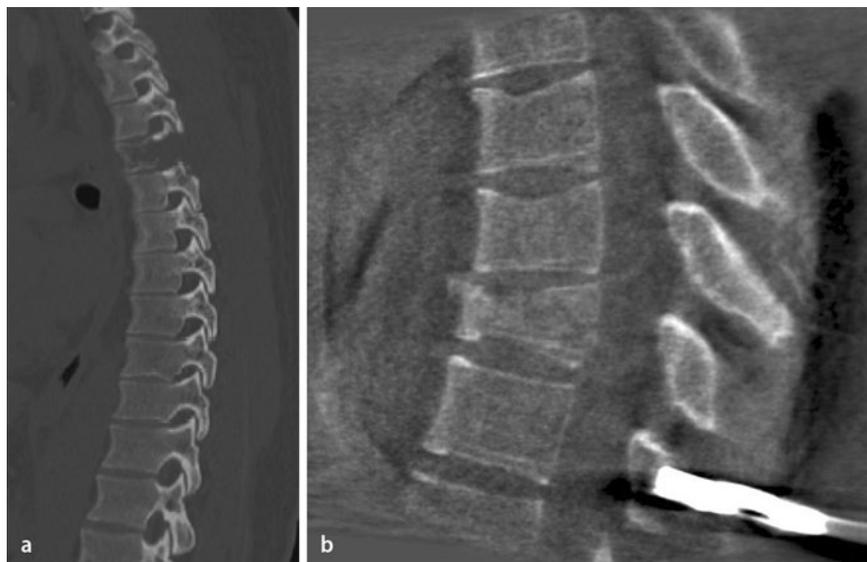


Abb. 3 ▲ Das Bildvolumen, das im OP mit einem Scan abgebildet werden kann, ist bei der neuen Flachdetektorgeneration (**a**) deutlich größer, als es bei herkömmlichen 3D-Bildverstärkern (**b**) bislang möglich ist. Damit entsteht eine Zeitersparnis und in vielen Bereichen, zum Beispiel bei komplexen Beckenverletzungen, die Möglichkeit der Navigation in einem kompletten Datensatz der jeweiligen anatomischen Region

jeweiligen OP aufgebaut, verbunden und hochgefahren werden. In einem Hybrid-OP, der mit einem Navigationssystem ausgestattet werden soll, entfallen alle derartigen zeitraubenden Vorgänge. Die Kamerasysteme können wiederum fest an der Wand oder der Decke installiert werden, auch eine mobile Kamera kann integriert werden. Der zusätzliche Wagen

mit Workstation und Monitoreinheit, der das eigentliche System darstellt, kann bei Neubauten in einem separaten, zentralen Rechnerraum untergebracht werden, damit wird wertvoller OP-Raum gespart. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist der Verzicht auf Kabelstränge, die heutzutage oftmals den gesamten OP nach Anschluss aller Systeme durchziehen und auch aus

sicherheitstechnischen Aspekten als bedenklich einzuordnen sind.

Weitere technische Erfordernisse

Ein wesentlicher Vorteil bei der Einrichtung einer derartigen operativen Einheit ist die Vereinfachung der Steuerung und Bedienung der voran genannten Komponenten durch den verantwortlichen Chirurgen. In einem separaten Technikraum können alle erforderlichen Recheneinheiten untergebracht werden, um die Flächen des Saales frei zu halten von überbordender Technik. Verschiedene Hersteller bieten integrative Steuerungslösungen an, die z. B. über einen zentralen Monitor bedient werden können. Dieser kann wand- oder deckengebunden installiert werden um größtmögliche Flexibilität für alle denkbaren Anwendungen zu erlangen. Auch Bilder aus dem PACS („picture archiving and communication system“) der Klinik oder präoperative Planungen können dort abgebildet werden.

Durch die optimierte Steuerung des C-Bogens, der zudem mit dem OP-Tisch verbunden ist und damit Kollisionen praktisch ausschließt, kann der Chirurg nun selbst die Position zur Bildakquise bestimmen, ohne auf technisches oder pflegerisches Personal zurückgreifen zu müssen. Optimale Einstellungen werden vom

System memoriert und sind auf Knopfdruck wieder einstellbar.

Über ein zweites Monitorsystem können die Bilder des Systems oder aber auch Endoskopieaufnahmen von weiteren Personen im OP (z. B. Assistenten) betrachtet werden, ohne dabei die perfekte Arbeitsposition verlassen zu müssen. Auch Aufzeichnungen zur Dokumentation oder zu Lehrzwecken können so Übertragen und gespeichert werden.

Einsatzmöglichkeiten in Orthopädie und Unfallchirurgie

Navigationsgestützte Beckenchirurgie

Aufgrund der robotisch unterstützten 3D-Bildgebung mit einem deutlich vergrößerten Bildausschnitt kann ein komplettes menschliches Becken einschließlich umgebender Weichteile abgebildet werden. Auf diese Weise ist es erstmals möglich, navigationsgestützte Verfahren für eine komplexe Beckenverletzung mit Beteiligung mehrerer Beckenanteile einzusetzen. Die aktuelle Verwendung navigationsgestützter Verfahren in diesem Bereich fokussiert sich auf die Einbringung einer Schraube über das Sakroiliakalgelenk bei Instabilität im hinteren Beckenring [2, 27], diese eingeschränkte Anwendung kann damit in der Zukunft deutlich erweitert werden.

Durch die Einführung von Navigationsverfahren in der Beckenchirurgie wird der Trend zu minimal-invasiven Techniken auch in der anatomisch komplexen Beckenregion fortgeführt werden können. Nach Erhebung des initialen Scans können je nach Bedarf stets weitere bildgebende Schritte integriert werden, um die operative Sicherheit zu erhöhen und Komplikationen zu minimieren. Des Weiteren erlauben integrative Anwendungen auch die Integration präoperativer Bildgebung, zum Beispiel durch Bildfusion, um die Abbildungsqualität intraoperativ weiter zu erhöhen.

Komplexe Wirbelsäulenchirurgie

Aufgrund des dargestellten Visualisierungsvolumens ist es erstmals möglich,

Unfallchirurg 2012 · 115:107–120 DOI 10.1007/s00113-011-2118-3
© Springer-Verlag 2012

F. Gebhard · C. Riepl · P. Richter · A. Liebold · H. Gorki · R. Wirtz · R. König · F. Wilde · A. Schramm · M. Kraus

Der Hybridoperationssaal. Zentrum intraoperativer Bildgebung

Zusammenfassung

Der Hybridoperationssaal (-OP) erfüllt Anforderungen, die verschiedenen hoch spezialisierten Fachbereichen gerecht werden müssen. Neben kardiochirurgischen Eingriffen und interventionellen Gefäßoperationen können in ihm offene Eingriffe aus dem Bereich der Orthopädie und Unfallchirurgie, der Neurochirurgie und der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie durchgeführt werden. Dies gelingt durch die Verbindung modernster technischer Vorrichtungen, die perfekt aufeinander abgestimmt sind. Von der Planung eines Eingriffs über die Dokumentation bis hin zur Umsetzung des Planes auch mit computernavigierter Unterstützung greift alles ineinander und schont somit Zeit und per-

sonelle Ressourcen. Neue Technologien können einfacher integriert und auf ihren klinischen Nutzen hin untersucht werden. Modernste intraoperative Bildgebungsverfahren eröffnen neue Möglichkeiten der minimal-invasiven Chirurgie und der postoperativen Kontrolle mit unmittelbarer Revisionsmöglichkeit. Der Hybrid-OP stellt ein wirtschaftlich sinnvolles Konzept neuer Bildgebung im OP dar.

Schlüsselwörter

Hybridoperationssaal · Intraoperative Bildgebung · Computernavigation · Dreidimensionale Bildgebung · Robotisierter C-Bogen

The hybrid operating room. Home of high-end intraoperative imaging

Abstract

A hybrid operating room must serve the medical needs of different highly specialized disciplines. It integrates interventional techniques for cardiovascular procedures and allows operations in the field of orthopaedic surgery, neurosurgery and maxillofacial surgery. The integration of all steps such as planning, documentation and the procedure itself saves time and precious resources. The best available imaging devices and user interfaces reduce the need for extensive personnel in

the OR and facilitate new minimally invasive procedures. The immediate possibility of postoperative control images in CT-like quality enables the surgeon to react to problems during the same procedure without the need for later revision.

Keywords

Hybrid operating room · Intraoperative imaging · Computer navigation · Three-dimensional imaging · Robotic C-arm

längere Wirbelsäulenabschnitte in einem Datensatz abzubilden (■ **Abb. 3**).

Insbesondere bei multiplen Frakturen oder Läsionen im Bereich der zervikalen und thorakalen Wirbelsäule bieten sich hier neue Möglichkeiten. Bisher war es aufgrund des geringen Bildvolumens vorhandener Systeme oftmals nur möglich, eine navigierte Stabilisierung in einem Wirbelsäulensegment vorzunehmen. Für weitere Segmente muss bislang ein weiterer Scan durchgeführt werden, was wiederum Zeit in Anspruch nimmt und zudem die doppelte Strahlenbelastung darstellt.

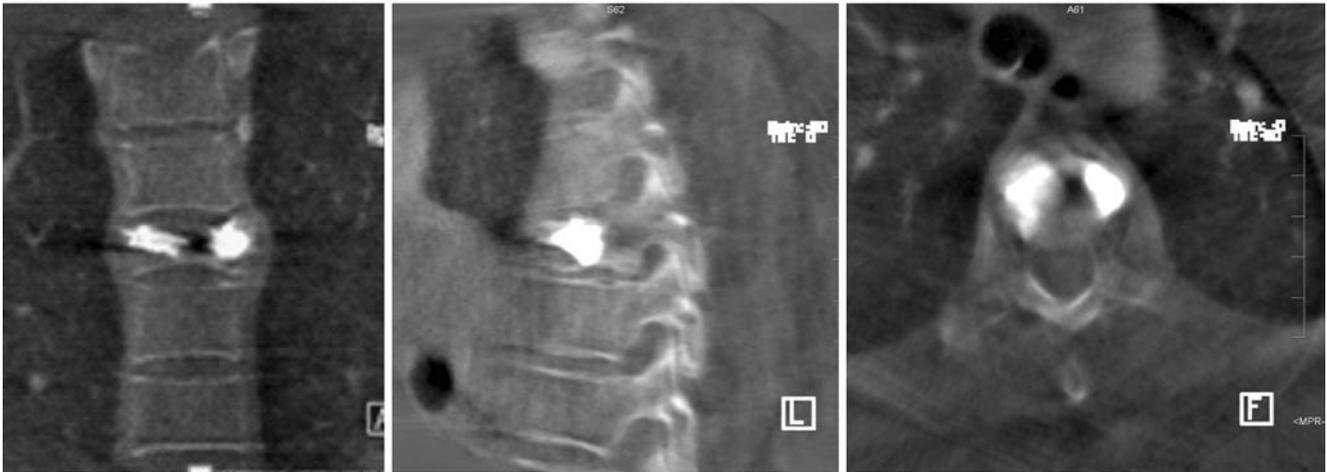
Die Verbesserung der intraoperativen Bildgebung erlaubt eine optimierte postoperative Kontrolle in verschiedenen Bereichen der Wirbelsäulenchirurgie. Ne-

ben der Lagekontrolle der Pedikelschrauben ist auch die Kontrolle nach Kyphoplastien in nahezu CT-Qualität möglich (■ **Abb. 4**). Weitere Anwendungen im Bereich der Neurochirurgie sind bei verbesserter Bildqualität z. B. bei minimal-invasiven Dekompressionseingriffen zu erwarten [3].

Navigationsgestützte Tumorresektionen

Im Bereich der Orthopädie und Unfallchirurgie besteht derzeit eine erhebliche Diskrepanz zwischen der präoperativen Bildgebung im Rahmen des Tumorstagings und der intraoperativ zur Verfügung stehenden Bildgebung zur Resektion

3D-Scan



Spiral CT

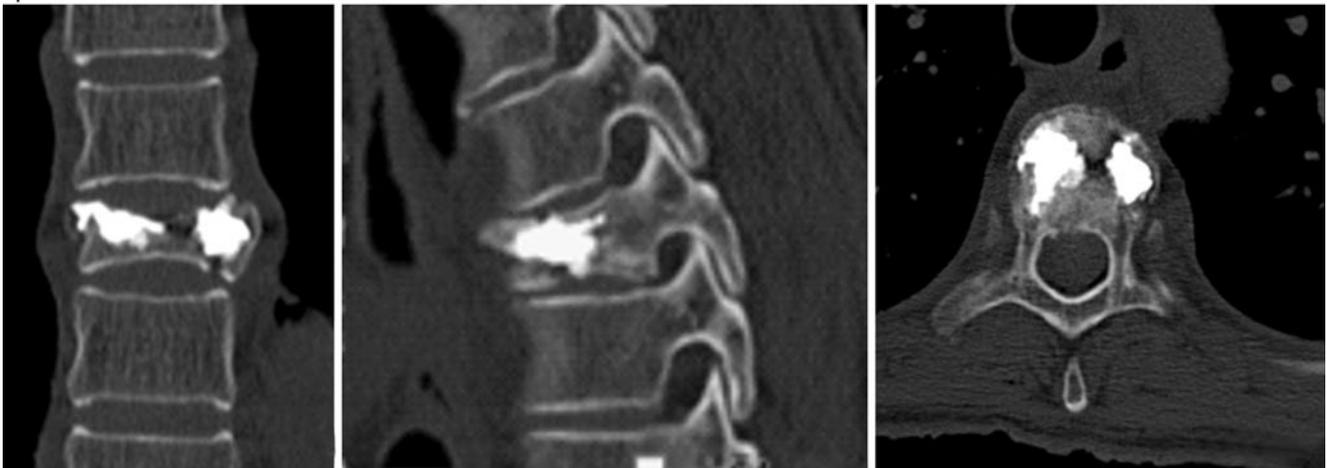


Abb. 4 ▲ Schon die Qualität bisheriger 3D-Bildverstärker (**oben**) ist bei bestimmten Anwendungen mit einem CT (**unten**) vergleichbar. Die neuen C-Bögen können den nach wie vor bestehenden Abstand vermutlich noch weiter reduzieren und erlauben damit neue Dimensionen der intraoperativen Kontrolle

des Tumors. Tumorgöße und Tumorausdehnung können sowohl im Knochen- wie auch im Weichteilfenster in Computertomographie (CT) oder Magnetresonanztomographie (MRT) definiert werden. PET-CT-Verfahren (Positronenemissionscomputertomographie) bieten die Möglichkeit einer genauen Korrelation zwischen Weichteilkomponente und Knochenausdehnung des Tumors. Diese Bilder konnten jedoch bis jetzt nicht intraoperativ zu Navigationszwecken verwendet werden, geschweige denn im OP selbst generiert werden.

Neue, leistungsstarke Systeme ermöglichen eine Bildfusionierung „on the fly“, also im OP oder einem vernetzten System. Neben einer erheblichen Zeitersparnis für diverse Planungs- und Vorbereitungs-schritte kann sich der Operateur

nun über Navigationslösungen intraoperativ stets der Einhaltung präoperativ festgelegter Resektionsgrenzen versichern.

Einsatzmöglichkeiten in der Neurochirurgie

Der Wert der intraoperativen Angiographie bei neurovaskulären Eingriffen scheint auf der Hand zu liegen:

- Zerebrale Aneurysmen: in 5–7,3% der Aneurysmaoperationen (Clipping, **Abb. 5**) kann es unerwartet zum inkompletten Aneurysmaverschluss mit konsekutiv persistierendem Blutungsrisiko bzw. in 3–9% der Fälle zum Verschluss der aneurysmatragenden Arterie oder eines ihrer Äste (**Abb. 6**) mit konsekutivem Schlaganfall kommen [24].

- Zerebrale AV-Malformationen (AVM): Obgleich resektabel kann in bis zu 15% der AVM-Operationen unerkannt ein AVM-Residuum verbleiben, welches das Blutungsrisiko des Patienten gegenüber dem Risiko des natürlichen Verlaufs sogar erhöhen kann (**Abb. 7**).

Doch obgleich der Vorteil der intraoperativen Angiographie nahe liegend erscheint, hat sich diese in den meisten neurochirurgischen Kliniken nicht durchsetzen können, da ausgewiesene DSA-Anlagen in den meisten neurochirurgischen OPs nicht zur Verfügung standen, die Verwendung von angiographiefähigen C-Bögen allerdings beträchtliche Nachteile aufwies: schlechte Bildqualität, niedrige Auflösung, keine 3D-Bildgebung [9].



Abb. 5 ▲ **a** Inkomplett geclipptes Aneurysma der A. communicans anterior. **b** Versorgung des Aneurysmarestes durch Coilembolisation. **c** 3D-Darstellung des vollständig durch Clipping und zusätzliches Coiling ausgeschalteten Aneurysmas

Durch die Verwirklichung des Konzepts eines zentralen, interdisziplinär genutzten Hybrid-OPs kann speziell in der Behandlung neurovaskulärer Erkrankungen eine einzigartige Technik genutzt werden. Durch den Einsatz eines 3D-fähigen C-Bogens kann die Perfusion des Hirngewebes und die Flussverhältnisse in komplexen neurovaskulären Pathologien untersucht werden. Durch die Kopplung an ein modernes Navigationssystem, automatisiertes Datenmanagement und automatisierter Patientenregistrierung für die Navigation bietet der Hybrid-OP insbesondere für navigierte neurovaskuläre Eingriffe erhebliche Vorteile (■ **Abb. 8**).

Zusätzlich bietet der Hybrid-OP die Möglichkeit Patienten mit komplexen Gefäßerkrankungen in einem Eingriff kombiniert mikrochirurgisch und endovaskulär versorgen zu können [17].

Einsatzmöglichkeiten in der Herzchirurgie

Herzklappenoperationen

Die minimal-invasive Implantation einer sich entfaltenden Klappenprothese über die Herzspitze oder über eine geeignete periphere Arterie, in der Regel die A. femoralis, hat sich seit der Erstimplantation durch Cribier et al. 2002 [8] zu einem etablierten Therapieverfahren für Patienten entwickelt, bei denen eine

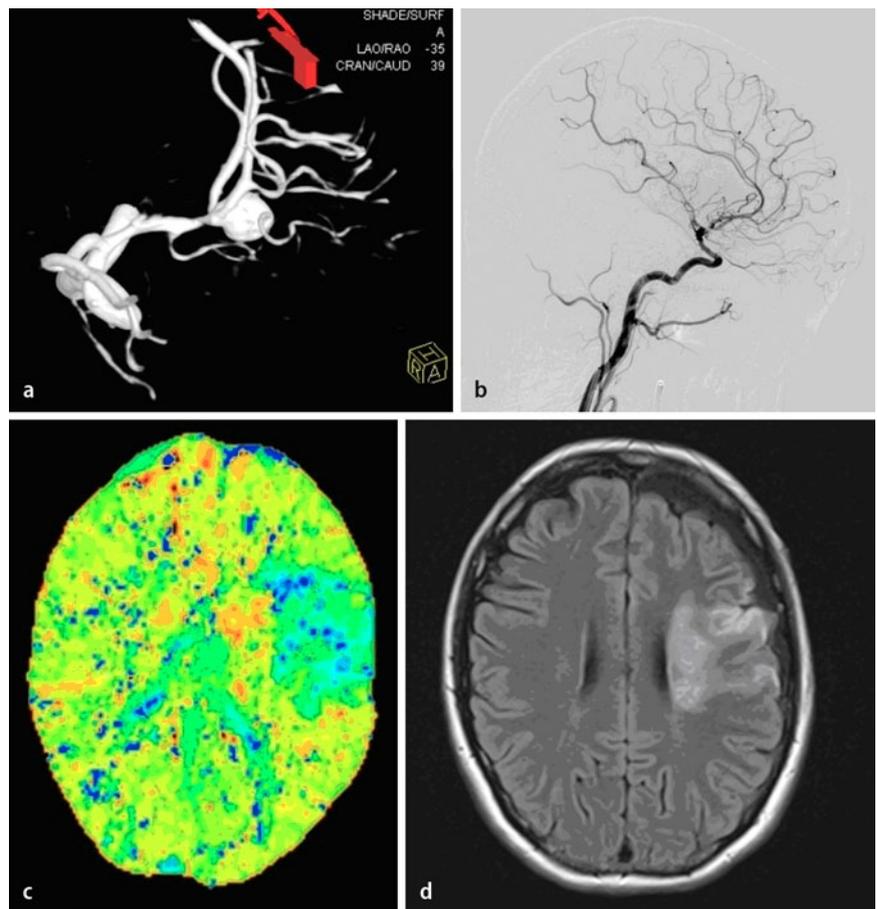


Abb. 6 ▲ A. -cerebri-media-Aneurysma links: **a** 3D-Angiographie präoperativ mit Darstellung des Aneurysmas, beginnender Vasospasmus im M1-Segment. **b** Postoperative Angiographie mit Nachweis eines durch den Clip bedingten Verschlusses des Truncus superior. **c** Perfusions-CT mit Nachweis eines Perfusionsdefizits im Stromgebiet der ACM links. **d** MRT (Flair-Sequenz) mit Nachweis des resultierenden Infarktes nach 6 Monaten

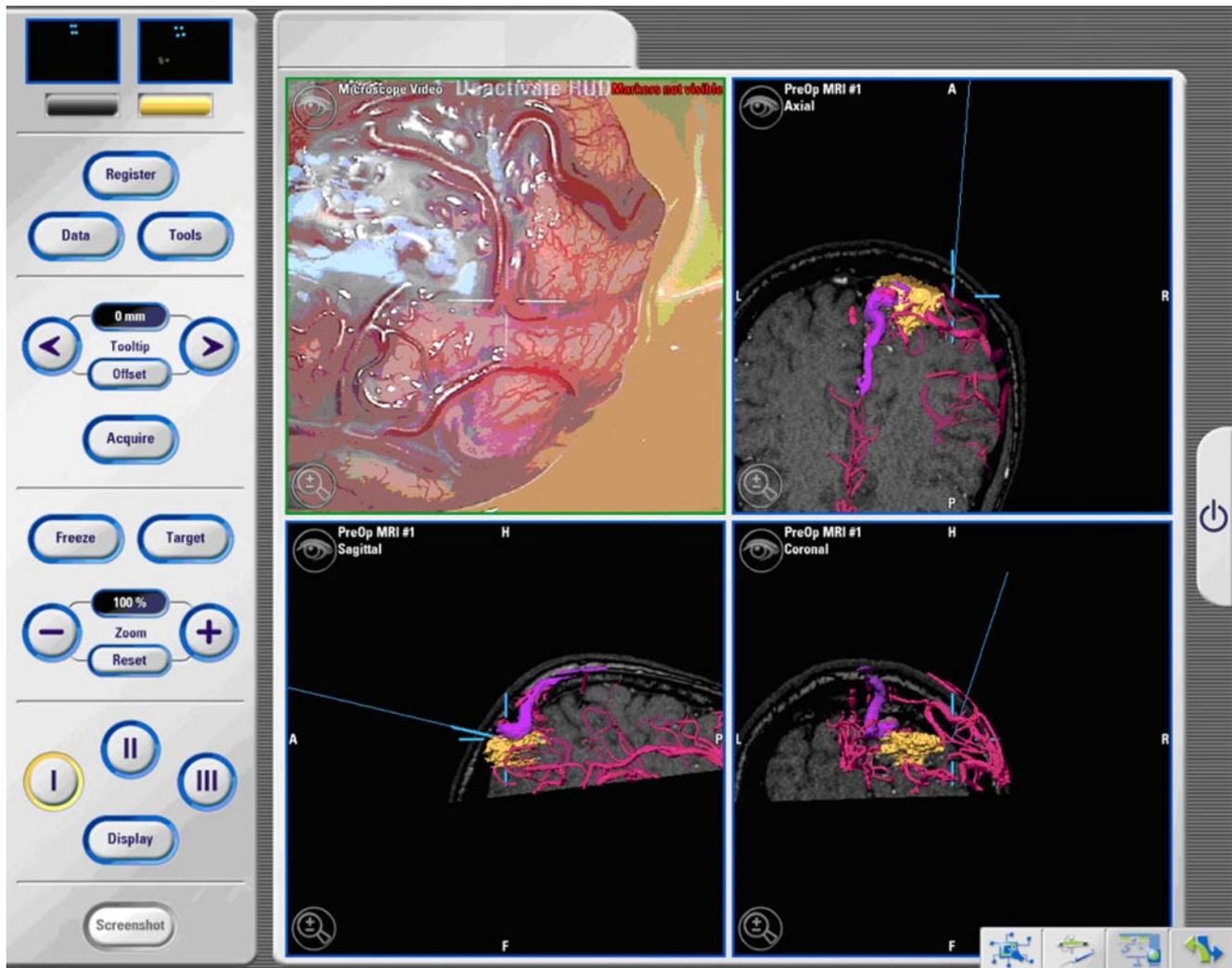


Abb. 7 ▲ Neuronavigierte Resektion einer okzipitalen AVM (Navigationsbildschirm)

Standardoperation am Herzen bisher abgelehnt oder nur mit hohem Risiko (präoperativ eingeschätzte Letalität ca. >15%) durchgeführt wurde (▣ Abb. 8). Aktuell ist die hochauflösende röntgenologische Echtzeitdarstellung der Standard zur visuellen Kontrolle der Prozedur. Begleitende Koronarintervention, Schrittmacher-/ICD-Implantation und andere kardiale Therapien mit Notwendigkeit zur Fluoroskopie sind im Hybrid-OP möglich. Die zu bevorzugende Kombination mit einem OP ergibt sich a priori beim transapikalen interkostalen Zugang über eine ca. 5 cm lange Hautinzision als chirurgischen Eingriff. Auch akute Komplikationen wie Blutungen des arteriellen Zugangs, von der Herzspitze, Katheterperforationen, tachykarde Herzrhythmusstörungen, akute Myokardischämien oder

klappenspezifische Probleme (z. B. signifikantes paravalvuläres Leck, Dislokation) können nur unter optimalen räumlichen Bedingungen erfolgreich chirurgisch behandelt werden.

Koronarrevaskularisation

Die herzchirurgische Versorgung des R. interventricularis anterior mit der A. thoracica interna ist die derzeit beste langfristige Revaskularisationsmöglichkeit. Als isolierte Therapiemaßnahme ist die Operation in reduziert invasiver Technik über eine linkslaterale Minithorakotomie mit sehr geringem Operationsrisiko verbunden [13]. Bei einer koronaren Mehrgefäßerkrankung mit Beteiligung des R. interventricularis anterior könnte die Hybridisierung der Therapie daher

in Zukunft neben reduzierter Invasivität zu weniger perioperativen Komplikationen bei vergleichbarem Langzeitergebnis führen. Erste Erfahrungen mit dieser Strategie ergaben, verglichen mit einer Gruppe von chirurgischen Patienten, die über Sternotomie in Off-pump-Technik behandelt wurden, eine signifikant kürzere Intubationsdauer, Krankenhausverweildauer und Blutverlust bei vergleichbaren 6-Monate-Offenheitsraten der Transplantate bzw. interventionell therapierten Koronarien [20].

Reduziert invasive Revaskularisationsstrategien umfassen, neben der Vermeidung der Herz-Lungen-Maschine, minierte extrasternale Zugänge oder total endoskopische Verfahren. Letztere werden derzeit nur mit Hilfe von roboterassistierter Technik durchgeführt, sind mit

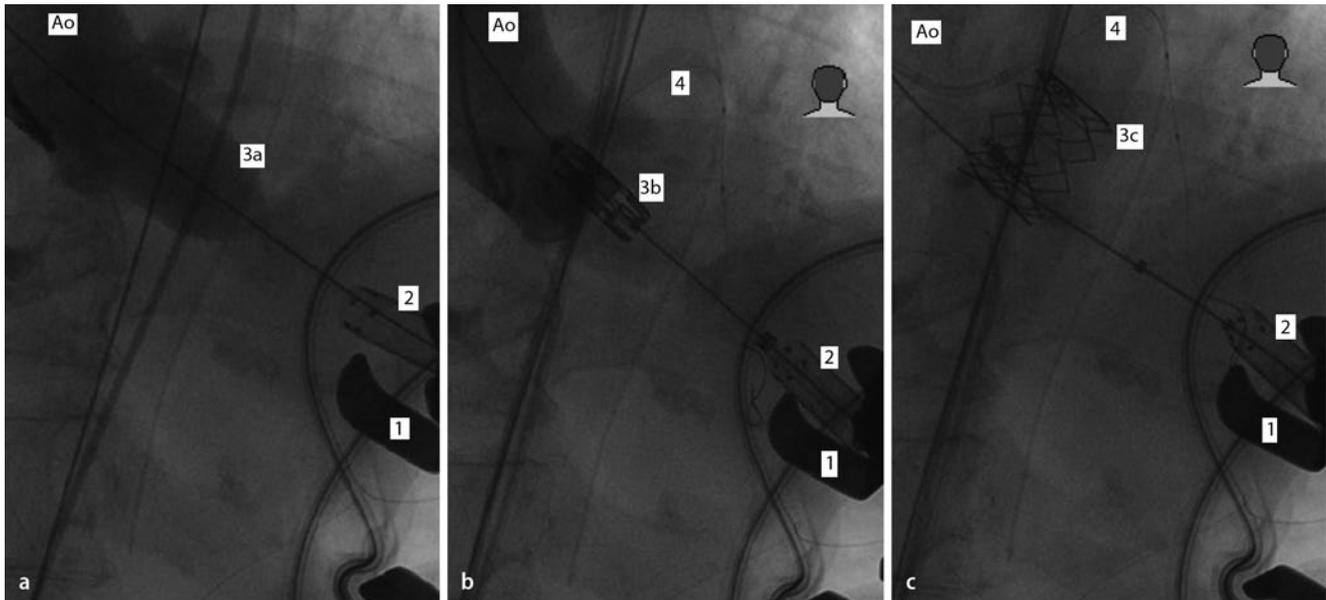


Abb. 8 ▲ Transapikale Aortenklappenimplantation: **a** Ballonvalvuloplastie zur Dilatation der Aortenklappenstenose. **b** Positionieren der gefalteten Aortenklappenprothese (Edwards-Sapien). **c** Aortenklappe entfaltet, im Kalk selbsthaltend verankert (Ao Aorta ascendens, 1 Rippenspreizer im 5. Interkostalraum links, 2 transapikal eingeführte, im linken Ventrikel liegende Schleuse, 3a gefüllter Ballon zur Aortenklappendehnung, 3b gefaltete, transapikal eingeführte Aortenklappenprothese, 3c Aortenklappenprothese entfaltet, 4 Katheter in der linken Herzkranzarterie als „Platzhalter“, da in diesem Fall der Klappenkalk während der Valvuloplastie sehr nah an das linke Ostium gedrückt wurde)

Einführung von 3D-Endoskopen und adaptierten Instrumenten jedoch auch manuell denkbar [23].

Aortenbogenchirurgie

Die operative Behandlung von Dissektionen und Aneurysmata der ascendierenden Aorta (Typ A nach Stanford), insbesondere bei Beteiligung des Aortenbogens, hat trotz verbesserter Operationstechniken immer noch ein erhebliches Risiko für zentral neurologische und distal aortale Komplikationen. Bei Ausdehnung der Erkrankung auf die descendierende Aorta waren bis vor wenigen Jahren zudem oft weitere gestaffelte Operationen mit jeweils hohem Risiko notwendig. In den letzten Jahren sind, insbesondere bei Vorliegen eines chronischen Aneurysma, zunehmend Segmente der thorakalen descendierenden Aorta interventionell mit Stentprothesen erfolgreich und mit vorteilhaftem Risikoprofil versorgt worden („thoracic endovascular aortic repair“, TEVAR) [25].

Während Erkrankungen der ascendierenden Aorta, insbesondere bedingt durch die häufige Beteiligung der Aortenklappe und der Abgänge der Koronar-

arterien auch weiterhin chirurgisch zu versorgen sein werden, gibt es für den Bereich des Aortenbogens bereits mehrere Hybridverfahren, die in Kombination mit dem chirurgischen Eingriff an der ascendierenden Aorta/Aortenklappe in gleicher Sitzung die Versorgung des Aortenbogens und/oder distaler Aortenanteile mit Stentprothesen ermöglicht. Der interventionelle Anteil der Prozedur und die Ergebniskontrolle, gegebenenfalls mit sofortiger Korrektur, sind am sichersten mit entsprechender Röntgentechnik im OP möglich. Die Hybridtherapie der Aortenbogenerkrankung reduziert das chirurgische Operationsrisiko bei gleichzeitig umfassenderer Behandlungsmöglichkeit durch simultane Versorgung angrenzender Aortensegmente [5].

Rhythmustherapie

Die Implantation transvenöser Schrittmacher/Defibrillatoren mit Elektroden rechtsatrial und -ventrikulär sowie linksventrikulär ist ein etabliertes Verfahren zur Resynchronisationstherapie bei schwer eingeschränkter linksventrikulärer Pumpfunktion mit Linksschenkelblock. Die linksventrikuläre Sondenlage

ist dabei an das venöse Gefäßnetz gebunden, das nicht immer eine Positionierung in der optimalen Myokardregion erlaubt. Die chirurgische epikardiale Sondenimplantation in minimal-invasiver Technik mit präoperativ bestimmter Zielposition kann in ausgewählten Fällen bei Verkürzung der Implantationsprozedur auch zu einer funktionell besseren Resynchronisation des linken und rechten Ventrikels führen, erfordert jedoch die Durchführung der Gesamtprozedur im Hybrid-OP mit seiner modernen Bildgebung [19].

Einsatzmöglichkeiten in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie

Minimal-invasive Eingriffe und Biopsien

Navigationsgestützte Biopsien waren die ersten Anwendungen der computerassistierten Chirurgie im Kopf-Hals-Bereich. Sie sind inzwischen weit verbreitet und gelten als die Domäne der rahmenlosen Stereotaxie. Bei Rezidivausschlüssen und Tumorverlaufskontrollen nach Durchführung einer adjuvanten Strahlentherapie ist aufgrund der veränderten Anatomie eine

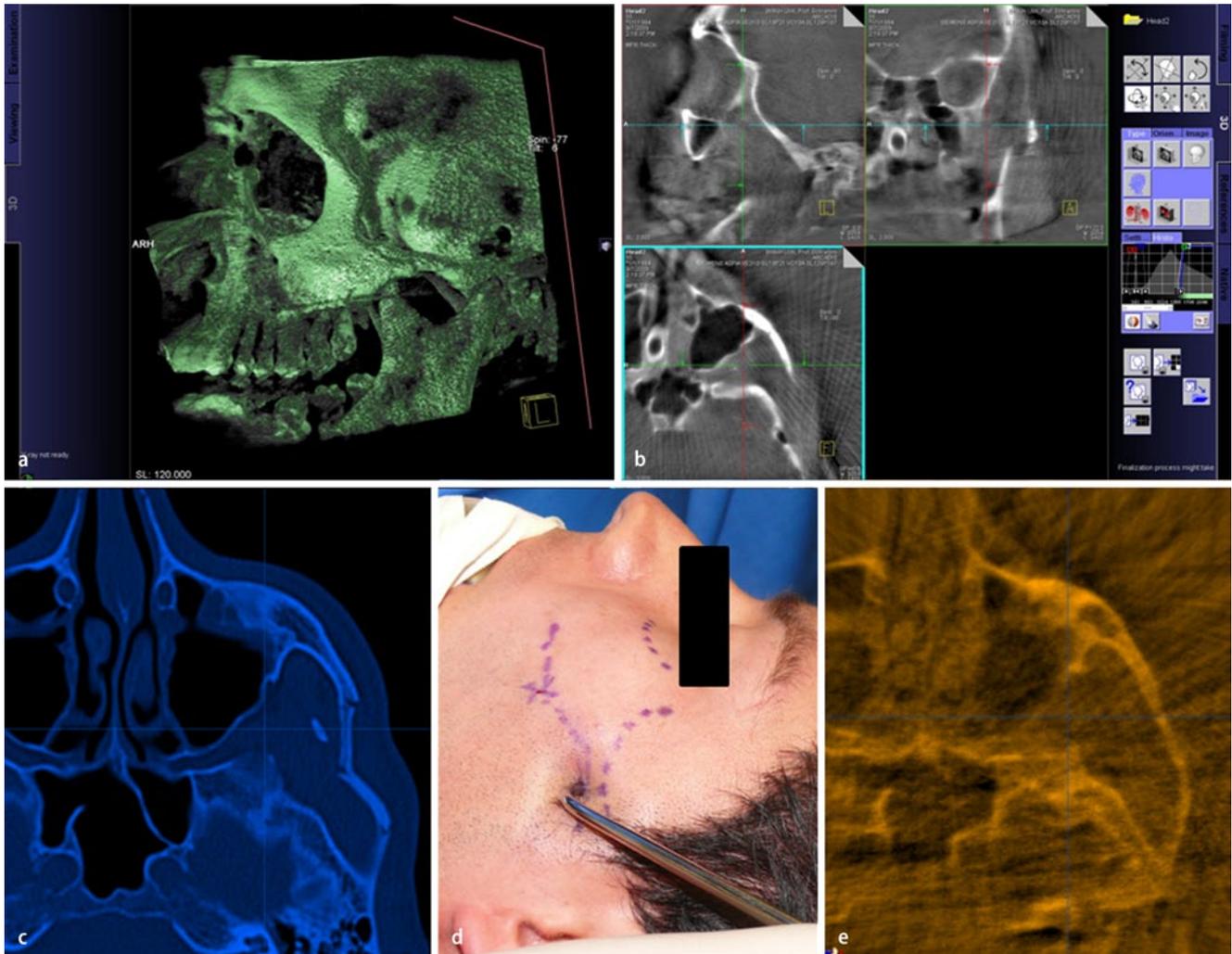


Abb. 9 ▲ Intraoperative Bildgebung (digitale Volumentomographie mit dem 3D-C-Bogen). **a, b** Die multiplanare Datensatzdarstellung ermöglicht intraoperativ die genaue Analyse des Repositionsergebnisses bei einer lateralen Mittelgesichtsfraktur und die Beurteilung der Versorgungsnotwendigkeit der Orbitawände nach Reposition des Jochbeins und des Jochbogens. Diese intraoperative Kontrolle ist insbesondere bei geschlossener Hakenzugreposition einer einfachen Jochbeinfraktur oder einer isolierten Jochbogenfraktur indiziert. **c** Das präoperative CT zeigt eine Impressionsfraktur des linken Jochbogens. **d** Hakenzugreposition nach transkutaner Stichinzision. Die knöchernen Konturen des Jochbeins und des Jochbogens sowie die Positionen für die Stichinzisionen zur Hakenzugreposition sind markiert. **e** Nach Hakenzugreposition zeigt die intraoperative Bildgebung (digitale Volumentomographie mit dem 3D-C-Bogen) die anatomisch korrekte Stellung der Knochenfragmente im Bereich des Jochbogens

rein visuelle Orientierung am Operationsitus oftmals unzureichend. Der Vorteil der intraoperativen Navigation liegt hier in der Kombination von pointerbasierter, endoskopisch gestützter und mikroskopischer Therapie. Der Zugangsweg und zu erhaltende vitale Strukturen können präoperativ markiert und intraoperativ visualisiert werden. Indikationen für den Einsatz der navigationsgestützten Chirurgie bestehen bei Biopsien im voroperierten oder vorbehandelten Situs, bei multiplen Biopsien mit der Notwendigkeit der objektivierbaren Zuordnung von Biopsat

und Entnahmestelle und bei der Dekompression des Sehnervens.

Primärrekonstruktionen des Gesichtsschädels

Bei der operativen Reposition und Osteosynthese von Frakturen des Gesichtsschädels kann aufgrund der nur kurzen Datensatzerhebungszeit eine intraoperative Bildgebung mit einem 3D-C-Bogen (intraoperative Volumentomographie) zur Stellungskontrolle vor Wundverschluss auch in der klinischen Routine er-

folgen. Bei lateralen Mittelgesichtsfrakturen lassen sich hiermit Fehlpositionierungen des Jochbeins und des Jochbogens vermeiden, insbesondere bei minimal-invasiven, transkutanen Hakenzugrepositionen (■ **Abb. 9**). Unnötige Orbitaexplorationen bei Orbitabodenbeteiligung aufgrund intraoperativer Bildgebung nach Jochbeinreposition lassen sich so verhindern. Auch eine Zweitoperation aufgrund insuffizienter Reposition z. B. nach intraoralen endoskopisch assistierten Versorgungen von Unterkiefergelenkfortsatzfrakturen wird hierdurch vermieden (■ **Abb. 10**).

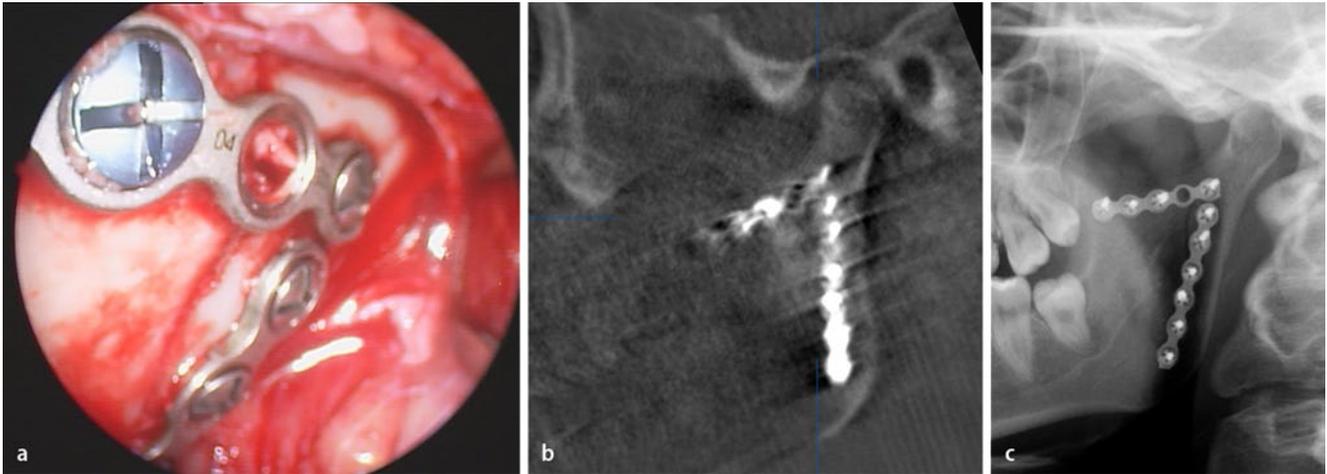


Abb. 10 ▲ Intraoperative Bildgebung bei intraoraler, endoskopisch assistierter Versorgung von Unterkiefergelenkfortsatzfrakturen. **a** Bild des Endoskopiemonitors nach intraoraler Reposition und Osteosynthese des Unterkiefergelenkfortsatzes. **b** Die intraoperative Bildgebung (digitale Volumentomographie mit dem 3D-C-Bogen) zeigt die anatomisch korrekte Stellung der Knochenfragmente im Bereich des Gelenkfortsatzes. **c** Postoperative Röntgenkontrolle (Panoramaschichtaufnahme)

Die Sofortversorgung von Gesichtschädelfrakturen, insbesondere bei Beteiligung des nasoorbitoethmoidalen Komplexes ist der Sekundärversorgung im Hinblick auf funktionelle Wiederherstellung überlegen und sollte daher primäres Ziel der Therapie darstellen [11]. Der limitierte Zugang zur Periorbitalregion macht jedoch eine intraoperative Visualisierung notwendig, um Teilschritte des rekonstruktiven Vorgehens kontrollieren zu können und so die aufeinander abgestimmten Teilrekonstruktionen detailgetreu vornehmen zu können. Die intraoperative CT bietet hier die Möglichkeit einer intraoperativen Darstellung. Gänzlich ohne Strahlenbelastung und ohne Unterbrechung des Eingriffs ist die intraoperative Stellungskontrolle bei Orbita- und Mittelgesichtsrekonstruktionen durch den Einsatz der intraoperativen Navigation möglich. Zu jeder Phase des operativen Eingriffs ist eine detailgetreue direkte oder indirekte Visualisierung der knöchernen und bedingt auch der weichgewebigen Strukturen möglich (■ **Abb. 11**).

Bei isolierten Frakturen der Orbitawände (mediale Wand oder Orbitaboden) ist eine verzögerte Sofortversorgung die Regel, da diese Frakturen bei der Erstversorgung oft dem Untersucher entgehen oder bei Ausbleiben von funktionellen Einschränkungen (Doppelbilder, Sensibilitätsstörungen im Ausbreitungsgebiet des N. infraorbitalis) häufig übersehen oder ihre Therapiebedürftigkeit unterschätzt

wird. Insbesondere bei Orbitawandfrakturen mit Beteiligung des Übergangs von Orbitaboden zu medialer Wand oder bei vollständigem Orbitabodenabriss ist die limitierte Sicht bei Verwendung des zu favorisierenden transkonjunktivalen Zugangs oft ein Grund für das Fehlpositionieren der Rekonstruktionsmaterialien.

» Bei isolierten Frakturen der Orbitawände ist eine verzögerte Sofortversorgung die Regel

Eine notwendige Sekundärkorrektur hat bedingt durch die begleitenden Weichteilveränderungen und die zentralen Ausgleichsvorgänge entscheidende Nachteile gegenüber der anatomisch korrekten Primärrekonstruktion (Doppelbilder werden in der Sehrinde ausgeglichen und können nach Sekundärkorrekturen persistieren). Bei diesen Frakturmustern ist daher eine intraoperative Visualisierung erforderlich, um derartige Fehlstellungen zu vermeiden und die Zahl der notwendigen Sekundärrekonstruktionen deutlich zu verringern. Alloplastische Materialien wie z. B. Titangitter werden die Anwendung autologer Knochentransplantate aufgrund besserer Vorhersagbarkeit und fehlender Entnahmemorbidität mehr und mehr verdrängen. Bei ausgedehnten Zerknirschungen des Gesichtsschädels erreicht die voxelbasierte Datenverarbei-

tung eine anschauliche Darstellung der Frakturmuster in 2D- und 3D-Form. Bei beidseitigen oder zentralen Trümmerungen oder Defektbildungen sind freie Segmentierungen zur Simulation der Idealrekonstruktion notwendig. Mithilfe von voxelbasierter Planung und intraoperativer Navigation kann auch bei ausgedehnten Orbitawandfrakturen und sogar panfazialen Frakturen auf den Koronarschnitt verzichtet werden, wenn der nasoorbitoethmoidale Komplex nicht mehrfach frakturiert ist oder der mediale Lidwinkel refixiert werden muss.

Bei komplexen Orbitawandfrakturen wird zunächst eine Autosegmentierung des CT-Datensatzes in anatomische und chirurgische Einheiten durchgeführt. Anschließend kann durch Freiverformung der Segmente (bilaterale Frakturen) oder durch Spiegelung der nicht betroffenen Gegenseite (unilaterale Frakturen) mit anschließender Ausrichtung der Segmentierung eine virtuelle Schablone zur Orbitarekonstruktion erstellt werden. Präformierte Titanimplantate können präoperativ virtuell inseriert und deren Passform überprüft werden. Die Größendimensionen dieser Implantate wurden aus hunderten von CT-Datensätzen unveränderter Orbita- und Periorbitalregionen ermittelt [15].

Intraoperativ erfolgt zunächst die Referenzierung des Navigationssystems entweder mit der Oberkieferschiene oder anhand der präoperativ inserierten Kalot-



Abb. 11 ▲ Navigationsgestützte posttraumatische Primärrekonstruktion des Mittelgesichts. **a** Virtuelle Planung und Erstellung der Schablone zur intraoperativen Navigation. **b** Intraoperative Navigation zur Stellungskontrolle der Jochbeinprominenzen. **c** 3D-Darstellung der CT nach komplexer Gesichtsschädelrekonstruktion

tenschrauben. Um ein ungestörtes operieren zu ermöglichen wird die Schiene anschließend entfernt und nur zur intraoperativen Rereferenzierung erneut eingesetzt. Rereferenzierungen sollten nach allen Manipulationen mit hochgradigen Erschütterungen des Operationsfeldes durchgeführt werden, wie z. B. Osteotomien oder Knochentransplantatentnahmen aus der Schädelkalotte.

Die Gesamtdauer der Rereferenzierung (1–3 pro Eingriff) beträgt bei diesen Eingriffen im Mittel 5–15 min. Die pointerbasierte Navigation im Anschluss an die Referenzierung umfasst die Stellungskontrolle der Jochbeinprominenz und der Jochbeinoberfläche nach Reposition und vor Osteosynthese und die Oberflächenabastung der inserierten Titangitter und/oder Knochentransplantate in der Orbita vor Fixierung. Auch die Projektion des Bulbus ist mit Hilfe der pointerbasierten Navigation bestimmbar, um Rückschlüsse auf Schwellungsverhalten und zu erwartende sagittale Bulbusprojektion im Seitenvergleich ziehen zu können.

Nach transkonjunktivaler Insertion des Titangitters wird die Position mittels intraoperativer Navigation überprüft. Die Pointerspitze liegt auf dem inserierten Titangitter und die Position der Pointerspitze in Relation zur virtuellen Rekonstruktionsschablone zeigt die aktuelle Stellung des Titangitters an. So können Position und Passform der Implantate intraoperativ kontrolliert und beliebig oft verändert werden. Abschließend erfolgt eine intraoperative Bildgebung mit einem 3D-

C-Bogen. Durch Datensatzfusion mit dem präoperativen Datensatz und der präoperativen Simulation lässt sich auch mit kleinen intraoperativen Bildausschnitten (Strahlenreduktion) eine millimetergenaue Validierung des Rekonstruktionsergebnisses nach der Orbitarekonstruktion mit einem anatomisch präformierten Titangitter erheben. So können auch ausgedehnte Rekonstruktionen von Orbitaboden und medialer Orbitawand, welche sonst eines Koronarschnittes bedurften, durch die kombinierte Anwendung anatomisch präformierter Implantate, der intraoperativen Navigation und der intraoperativen Bildgebung ohne sichtbare Narben durch einen ausschließlich transkonjunktivalen Zugang erfolgen (■ **Abb. 12**).

Erwartungen und ökonomischer Aspekt

Strahlendosisreduktion durch navigationsgestützte Operationsverfahren

Mehrere Publikationen diesbezüglich konnten nachweisen, dass navigationsgestützte Verfahren in der Lage sind, die Personendosis für das beteiligte Operationspersonal und den Patienten zu reduzieren [10, 16].

Insbesondere der Einsatz eines robotisierten Systems mit Flachdetektoreinheit lässt jedoch den direkten Rückschluss einer zusätzlichen Reduktion der Emission ionisierender Strahlung nicht zu. Dieser Aspekt muss im klinischen Um-

feld erneut überprüft werden. Verschiedene Optionen lassen jedoch hoffen, dass insbesondere durch ein erweitertes Bildvolumen und die Möglichkeit des Chirurgen, das Gerät selbst zu steuern eine weitere Reduktion der Strahlenbelastung möglich ist. Insbesondere auch die Memoryfunktion, die das Gerät stets an die als perfekt empfundene eingestellte Ausgangslage zurückkehren lässt, trägt wahrscheinlich zu einem einsparenden Effekt bei. Zudem ist dadurch eine Zeitersparnis zu erwarten, da das oft langwierige Aufsuchen der geeigneten C-Bogen-Perspektive wesentlich erleichtert wird.

Systemintegration

Integrierte und vernetzte Systeme können wertvolle Zeit für alle Beteiligten sparen. Die Möglichkeit des Zugriffs auf das Informationssystem der Klinik und auf das PACS reduziert die erforderliche Vorlaufzeit und stellt in kritischen Situationen schnell alle erforderlichen Informationen bereit. Präoperative Planungen können jederzeit abgerufen werden.

Durch die Bedienung aller Instrumente in der Hand des Operateurs entfallen Befehlsketten im OP, die stets Quelle potentieller Fehler sind und oft Reibungen zwischen den Berufsgruppen auslösen. Durch den integrierten Ansatz entfällt die zeitraubende Bereitstellung aller erforderlichen Geräte sowie deren Anschluss und Bereitstellung. Dadurch reduziert sich auch die Gefahr der Beschädigung der oft empfindlichen Maschi-

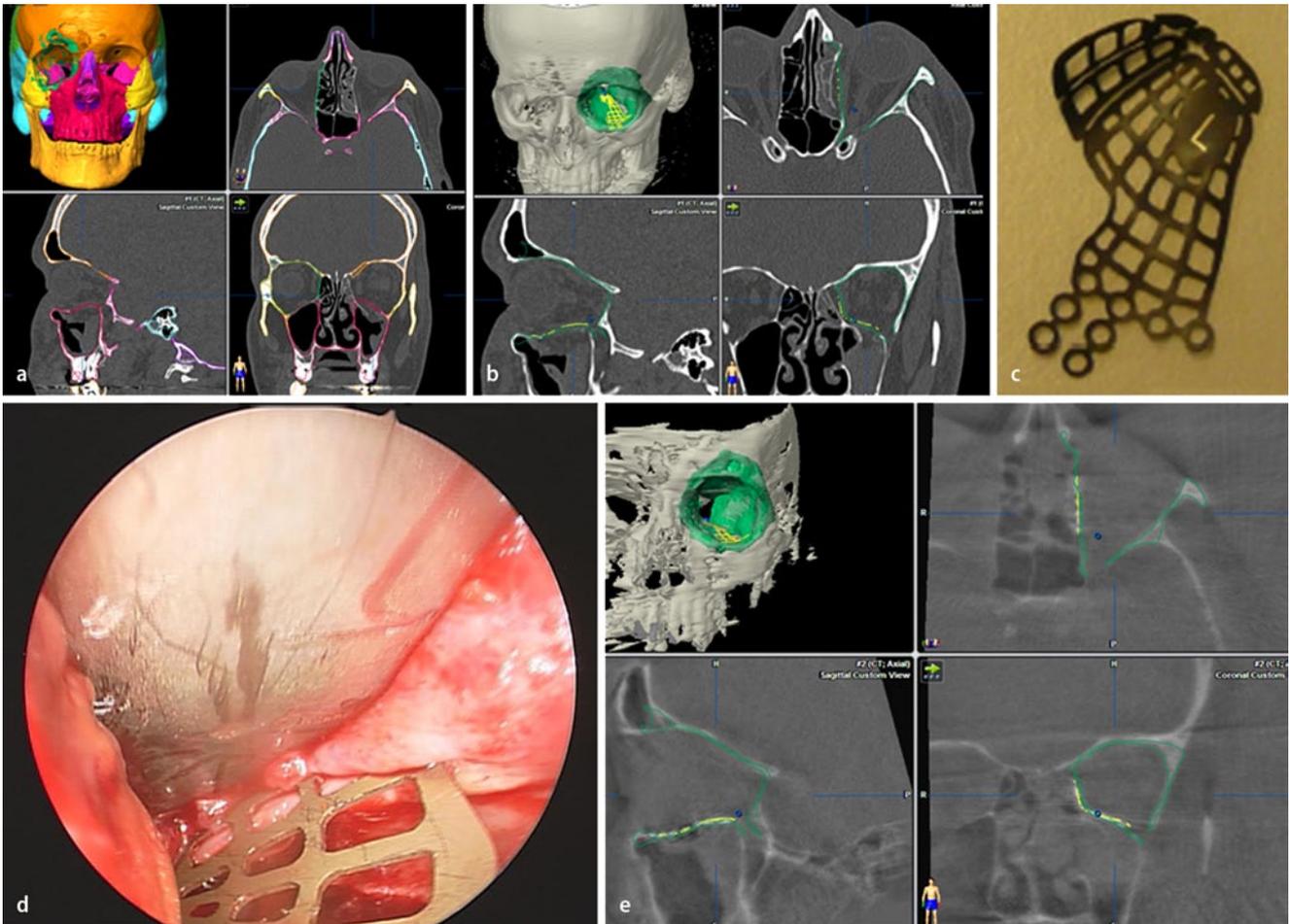


Abb. 12 ▲ Computerassistierte Primärrekonstruktion der linken Orbita mit einem anatomisch präformierten Implantat. **a** Virtuelle Planung und Erstellung der Schablone zur Orbitawandrekonstruktion durch Autosegmentierung der knöchernen anatomischen Regionen (*farbige Konturlinien*). **b** Virtuelle Rekonstruktion der Orbitawände durch Spiegelung der Segmentierung von der unverletzten Gegenseite (*grüne Konturlinien*) und virtuell inseriertes anatomisch vorgeformtes Orbitaimplantat (*gelbe Konturlinien*). Die virtuelle Insertion des anatomisch vorgeformten Titanimplantats (**c**) erlaubt die Überprüfung der Passform und die Größenauswahl des Orbitaimplantats. Die Positionierung des Implantates (*gelbe Konturlinien*) erfolgt gemäß der virtuellen Orbitarekonstruktion (*grüne Konturlinien*). **d** Endoskopische Darstellung des eingebrachten Titanimplantates im Bereich des Orbitabodens. **e** Intraoperativer CT-Datensatz nach Insertion und navigationsgestützter Positionierung des anatomisch präformierten Orbitaimplantats. Die Fusion mit dem präoperativen Datensatz ermöglicht die Visualisierung der virtuellen Orbitarekonstruktion (*grüne Konturlinien*) und der Idealposition des Implantats (*gelbe Konturlinien*) im intraoperativen Datensatz zur Ergebniskontrolle

nen bei häufigen Transportvorgängen mit verbundener Einsparung bei Reparaturen und verbesserter Bereitstellung der Geräte, die nicht mehr so häufig wegen Wartungsarbeiten ausfallen.

Ökonomische Aspekte

Die Einrichtung eines Hybrid-OPs ist in der Anschaffung kostspielig. In einigen Häusern kann evtl. durch die Verwendung vorhandener Geräte hier eine Einsparung möglich sein. Wesentlicher Faktor ist jedoch eine komplette Ausnutzung der sich bietenden Möglichkeiten. Dies

ist wesentlicher Bestandteil des interdisziplinären Ansatzes, bei dem dieses System von verschiedenen Fachabteilungen für hoch spezialisierte Eingriffe verwendet wird. Damit wird sichergestellt, dass tatsächlich nur Eingriffe stattfinden, deren Indikation die Anwendung derartiger Ressourcen rechtfertigt. Durch die damit zu erwartende hohe Auslastung des Saales und einem Indikationsspektrum in Bereichen, die Zentren vorbehalten sind, können hohe Anschaffungskosten begründet werden und die Mittel wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden. Ein weiterer wirtschaftlicher Vorteil ist das hohe Inte-

resse der Patienten an modernen, innovativen Operationstechniken und Interventionen, die Implementierung eines Hybrid-OPs kann damit in einem immer stärker umkämpften Markt auch als Aushängeschild eingesetzt werden.

Ein weiterer ökonomischer Vorteil moderner Bildgebung ist die Option der postoperativen Kontrolle in einer Bildqualität, die bisher nur außerhalb des OPs postoperativ zur Verfügung stand. Dadurch kann intraoperativ die Wahrscheinlichkeit sekundärer Revisionen aufgrund von Implantatfehlagen oder weiterer zu erkennender Probleme re-

duziert werden [4, 26]. Eine geringere Revisionsrate bringt neben den Vorteilen für den Patienten eine Kostenreduktion, dadurch können sich die Anschaffungen auf Dauer auch auf dieser Ebene rechnen [6, 14].

Schlussfolgerung

Der Hybrid-OP bietet die optimale Plattform für die Integration neuer, zukunftsweisender Technologien. Optimalerweise erlaubt er die Integration aller Schritte zur operativen Therapie, von der Planung, deren Daten in den OP und damit auch auf Navigationslösungen übertragen werden über die Navigation selbst bis hin zur postoperativen Dokumentation noch auf dem OP-Tisch. Damit entfallen bisherige zeitraubende Schritte zur Datenübertragung nicht kompatibler Systeme. Gleichzeitig findet eine lückenlose Dokumentation aller durchgeführten Schritte und Maßnahmen statt, ohne dass dabei ein erheblicher zeitlicher Mehraufwand entsteht.

Fazit für die Praxis

- Der Hybrid-OP erlaubt verschiedenen Fachdisziplinen die Durchführung hoch spezialisierter Eingriffe und integriert dabei die vorhandene Technik nahtlos. Damit lässt sich eine deutliche Zeitersparnis bei technikintensiven Anwendungen wie z. B. der Computernavigation erwarten.
- Die Optimierung der intraoperativen Bildgebung führt zu einer Steigerung der Sicherheit und Qualität bei komplexen minimal-invasiven Eingriffen mit der Option der unmittelbaren postoperativen Kontrolle und eventueller Korrekturmöglichkeit.
- Hohe Anschaffungskosten können durch einen fachübergreifenden Nutzungsplan durch optimale Auslastung und entsprechende Eingriffe amortisiert werden.
- Der klinische aber auch der ökonomische Nutzen müssen begleitend wissenschaftlich evaluiert werden, um langfristig die Etablierung derartiger Einrichtungen rechtfertigen zu können.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. F. Gebhard

Zentrum für Chirurgie, Klinik für Unfall-, Hand-, Plastische und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum Ulm
Steinhövelstraße 9, 89075 Ulm
florian.gebhard@uniklinik-ulm.de

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

Literatur

1. Arand M, Kinzl L, Gebhard F (2004) Computer-guidance in percutaneous screw stabilization of the iliosacral joint. *Clin Orthop Relat Res* (422):201–207
2. Atesok K, Schemitsch EH (2010) Computer-assisted trauma surgery. *J Am Acad Orthop Surg* 18:247–258
3. Baldauf J, Müller JU, Fleck S et al (2008) The value of intraoperative three dimensional fluoroscopy in anterior decompressive surgery of the cervical spine. *Zentralbl Neurochir* 69:30–34
4. Beck M, Moritz K, Gierer P et al (2009) Intraoperative control of pedicle screw position using three-dimensional fluoroscopy. A prospective study in thoracolumbar fractures. *Z Orthop Unfall* 147:37–42
5. Biasi L, Ali T, Ratnam LA et al (2009) A multicenter randomized trial of cryo stripping versus conventional stripping of the great saphenous vein. *J Vasc Surg* 49:288–295
6. Bischoff M, Hebecker A, Hartwig E, Gebhard F (2004) Cost effectiveness of intraoperative three-dimensional imaging with a mobile surgical C-arm. *Unfallchirurg* 107:712–715
7. Bonatti J, Vassiliades T, Nifong W et al (2007) How to build a cath-lab operating room. *Heart Surg Forum* 10:E344–E348
8. Cribier A, Eltchaninoff H, Bash A et al (2002) Percutaneous transcatheter implantation of an aortic valve prosthesis for calcific aortic stenosis: first human case description. *Circulation* 106:3006–3008
9. Ellis MJ, Kulkarni AV, Drake JM et al (2010) Intraoperative angiography during microsurgical removal of arteriovenous malformations in children. *J Neurosurg Pediatr* 6:435–443
10. Gebhard F, Kraus M, Schneider E et al (2003) Radiation dosage in orthopedics – a comparison of computer-assisted procedures. *Unfallchirurg* 106:492–497
11. Gellrich NC, Schramm A, Hammer B et al (2002) Computer-assisted secondary reconstruction of unilateral posttraumatic orbital deformity. *Plast Reconstr Surg* 110:1417–1429
12. Gnahm C, Hartung C, Friedl R et al (2009) Towards navigation on the heart surface during coronary artery bypass grafting. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 4:105–112
13. Holzhey DM, Jacobs S, Mochalski M et al (2007) Seven-year follow-up after minimally invasive direct coronary artery bypass: experience with more than 1300 patients. *Ann Thorac Surg* 83:108–114
14. Hufner T, Stubig T, Gosling T et al (2007) Cost-benefit analysis of intraoperative 3D imaging. *Unfallchirurg* 110:14–21
15. Kamer L, Noser H, Schramm A, Hammer B (2010) Orbital form analysis: problems with design and positioning of precontoured orbital implants: a serial study using post-processed clinical CT data in unaffected orbits. *Int J Oral Maxillofac Surg* 39:666–672
16. Kraus MD, Krischak G, Keppler P et al (2010) Can computer-assisted surgery reduce the effective dose for spinal fusion and sacroiliac screw insertion? *Clin Orthop Relat Res* 468:2419–2429
17. Ng PY, Huddle D, Gunel M, Awad IA (2000) Intraoperative endovascular treatment as an adjunct to microsurgical clipping of paraclinoid aneurysms. *J Neurosurg* 93:554–560
18. Paraskevopoulos D, Unterberg A, Metzner R et al (2010) Comparative study of application accuracy of two frameless neuronavigation systems: experimental error assessment quantifying registration methods and clinically influencing factors. *Neurosurg Rev* 34:217–228
19. Quigley RL (2011) A hybrid approach to cardiac resynchronization therapy. *Ann Thorac Cardiovasc Surg* 17:273–276
20. Reicher B, Poston RS, Mehra MR et al (2008) Simultaneous „hybrid“ percutaneous coronary intervention and minimally invasive surgical bypass grafting: feasibility, safety, and clinical outcomes. *Am Heart J* 155:661–667
21. Rock C, Linsenmaier U, Brandl R et al (2001) Introduction of a new mobile C-arm/CT combination equipment (ISO-C-3D). Initial results of 3-D sectional imaging. *Unfallchirurg* 104:827–833
22. Schramm A, Gellrich NC, Gutwald R et al (2000) Indications for computer-assisted treatment of cranio-maxillofacial tumors. *Comput Aided Surg* 5:343–352
23. Srivastava S, Gadasalli S, Agusala M et al (2006) Use of bilateral internal thoracic arteries in CABG through lateral thoracotomy with robotic assistance in 150 patients. *Ann Thorac Surg* 81:800–806
24. Tang G, Cawley CM, Dion JE, Barrow DL (2002) Intraoperative angiography during aneurysm surgery: a prospective evaluation of efficacy. *J Neurosurg* 96:993–999
25. Walsh SR, Tang TY, Sadat U et al (2008) Endovascular stenting versus open surgery for thoracic aortic disease: systematic review and meta-analysis of perioperative results. *J Vasc Surg* 47:1094–1098
26. Wich M, Spranger N, Ekkernkamp A (2004) Intraoperative imaging with the ISO C(3D). *Chirurg* 75:982–987
27. Zwingmann J, Konrad G, Kotter E et al (2009) Computer-navigated iliosacral screw insertion reduces malposition rate and radiation exposure. *Clin Orthop Relat Res* 467:1833–1838