

Chirurgie 2025 · 96:3–10  
<https://doi.org/10.1007/s00104-024-02214-7>  
 Angenommen: 25. November 2024  
 Online publiziert: 23. Dezember 2024  
 © The Author(s), under exclusive licence to Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024

Redaktion  
 D. Weyhe, Oldenburg



# Von der Bildgebung zur Interaktion mit 3D-Modellen: technische Aspekte

Andrea Schenk<sup>1,2</sup> · Alexander Kluge<sup>3</sup> · Sirko Pelzl<sup>4</sup> · Gabriel Zachmann<sup>5</sup> · Rainer Malaka<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Digitale Medizin MEVIS, Bremen, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Medizinische Hochschule Hannover, Hannover, Deutschland

<sup>3</sup> Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Pius-Hospital Oldenburg, Oldenburg, Deutschland

<sup>4</sup> apoQlar GmbH, Hamburg, Deutschland

<sup>5</sup> Technologiezentrum Informatik und Informationstechnik (TZI), Universität Bremen, Bremen, Deutschland

## In diesem Beitrag

- **Datenqualität**  
 Bilddaten · Bildaquisition · Kontrastmitteltiming · DICOM-Daten
- **Generierung und Darstellung von 3D-Modellen**
- **Augmented Reality**
- **Virtual Reality**
- **Interaktion**

## Zusammenfassung

Augmented und Virtual Reality (AR bzw. VR) werden bereits in einigen medizinischen Bereichen angewendet bzw. erprobt. Dem breiten Einsatz stehen allerdings noch uneinheitliche und für Personen, die nicht mit aktuellen Entwicklungen vertraut sind, oftmals verwirrende Begriffsdefinitionen entgegen. Außerdem sind die technischen Grundlagen und Anforderungen für die Verwendung häufig zu wenig bekannt. Daher soll dieser Übersichtsartikel die wichtigsten Begrifflichkeiten erläutern und den aktuellen technischen Stand darlegen, indem er einen Bogen spannt von den Anforderungen bei der medizinischen Bildgebung, über 3D-Modelle und die verschiedenen Arten der Visualisierung bis hin zu den Möglichkeiten der Interaktion in VR und AR. Dies soll dabei helfen, dass Entwickler und Anwender zukünftig eine gemeinsame Sprache sprechen und die Potenziale digitaler assistiver Technologien voll ausgeschöpft werden können.

### Schlüsselwörter

Segmentierung · Augmented Reality · Virtual Reality · Immersion · Assistive Technologien

**Augmented und Virtual Reality (AR und VR) werden zunehmend in der Medizin eingesetzt, doch uneinheitliche Terminologie und unbekannte technische Anforderungen hindern eine breitere Nutzung. Dieser Artikel soll wichtige Konzepte klären, aktuelle Technologien von medizinischer Bildgebung bis hin zur Interaktion erläutern und die Möglichkeiten von VR und AR aufzeigen.**

Körpers angewiesen [3]. Dies können sonographische, magnetresonanztomographische (MRT-) oder computertomographische (CT-)Bilder sein. Sie ermöglichen beispielsweise die Detektion und Charakterisierung von Brüchen oder Tumoren und theoretisch auch die Weiterverarbeitung der Daten zur Segmentierung und Klassifikation. Praktisch ist Ultraschall durch die hohe Untersucherabhängigkeit und die nur relative Abhängigkeit des Bildkontrastes vom Gewebe sowie die nur mit Zusatzhardware bei der Untersuchung aufwendig zu erreichende geometrische Kodierung sehr limitiert. Die MRT bietet Schnittbilder in beliebigen Raumebenen mit wählbarem Gewebekontrast. Auch hier ist die Bildintensität (Helligkeit) aber nicht absolut und kann nicht ohne Zusat-

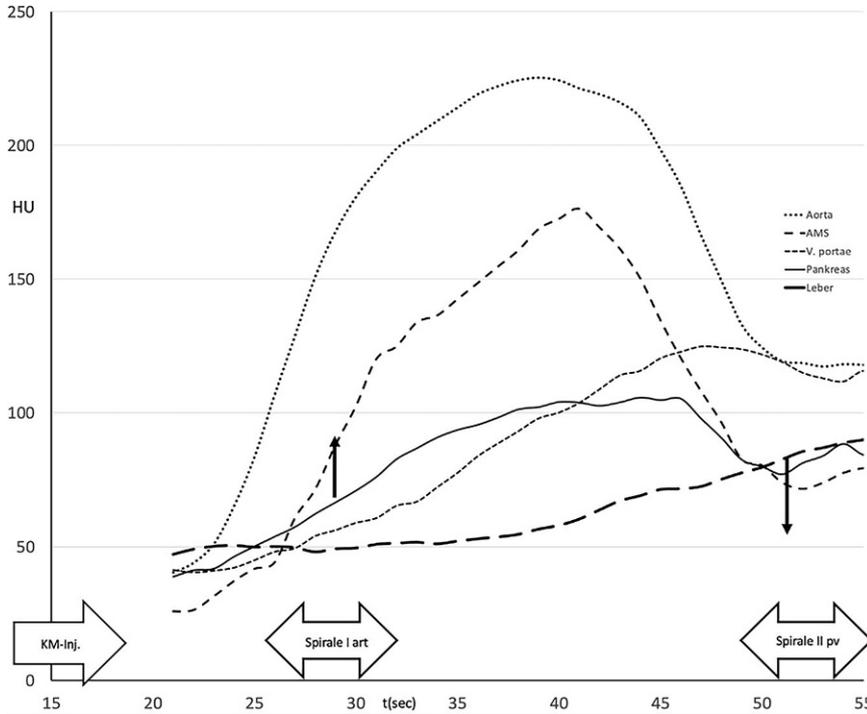
## Datenqualität

### Bilddaten

Die hier aufgeführten assistiven Technologien sind auf DICOM-Daten (Digital Imaging and Communications in Medicine) basierte Bilder des menschlichen



QR-Code scannen & Beitrag online lesen



**Abb. 1** ▲ Anfluten eines Kontrastmittelbolus (Pfeil *KM-Inj.*) und Kontrastmittelkonzentration als Dichte/Helligkeit (Hounsfield-Einheiten, HU) in verschiedenen Kompartimenten des Oberbauchs über die Zeit. Die erste Bildaufnahme „Spirale I art“ erlaubt, die A. mesenterica superior (AMS) sowie hypervaskularisierte Tumoren zu detektieren (Pfeil ↑), die zweite Akquisition Spirale II erlaubt, hypovaskularisierte Tumoren und Metastasen gegen das inzwischen kontrastrierte Pankreas- und Leberparenchym zu erkennen (Pfeil ↓). *KM-Inj.*, Kontrastmittelinjektion, *art* arteriell, *pv* portalvenös

zwischen der Software zur Segmentierung herangezogen werden. Die CT hingegen erlaubt durch die Kalibrierung der Bildhelligkeit und eine geeichte Korrelation von Gewebe und Helligkeit im Bild (Hounsfield-Einheiten) eine simple Segmentierung anhand der Gewebdichte. Computertomographie arbeitet mit Röntgenstrahlen und geht zwangsläufig mit Strahlenbelastung einher. Deshalb sollte ein Patient aktuell nicht für assistive Technologien einer zusätzlichen CT-Untersuchung nach der diagnostischen CT ausgesetzt werden, die diagnostische CT sollte die für die Softwareweiterverarbeitung notwendigen Anforderungen miterfüllen.

Ein vollständiger CT- oder MRT-Bildgebungsdatensatz besteht schlussendlich aus zahlreichen 2D-Bildern, die in mehreren Schichten aufgenommen wurden. Sie sind die Grundlage der digitalen Weiterverarbeitung.

### Bildaquisition

Computertomographische Untersuchungen liefern immer in Körperlängsachse fortschreitende Spiralen. Die minimale Dicke der einzelnen Spirale ist durch die Einblendung des Röntgenstrahles, die Kollimation, vorgegeben, die die minimale Dicke der daraus berechneten Querschnittsbilder des Körpers bestimmt. Bei klinisch üblichen Kollimationen von 0,6 mm sind Bilder von mindestens 0,75 mm Dicke, bei 1,25-mm-Kollimation z. B. 1,5, 2 oder 3 mm Dicke möglich. Mit dünneren Schichten für eine genauere Darstellung steigt das Bildrauschen umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Schichtdicke [1, 2]. Mehr empfangene Röntgenquanten in der dünneren Schicht könnten das durch eine Erhöhung des Röhrenstroms ausgleichen. Eine Halbierung der Schichtdicke hätte für gleiches Signal-zu-Rauschen etwa die doppelte Strahlenbelastung zur Folge. Gleichzeitig dauern Spiralen mit geringer Kollimation für mögliche Atemhaltephasen des Patienten und gezielte

Gewebskontrastierung oft zu lang. Diese Faktoren führen zu in der diagnostischen Radiologie des Körperstamms gebräuchlichen Schichtdicken von 1,5–3 mm.

### Kontrastmitteltiming

Hier werden die Anforderungen am Beispiel der Pankreaschirurgie beschrieben. Ein guter Weichteilkontrast in der CT erfordert die intravenöse Gabe von Kontrastmittel, um parenchymatöse Organe gegeneinander und von umgebenden Strukturen, im Abdomen beispielsweise dem Darm, abgrenzen zu können. Für die Gefäßdarstellung zu diagnostischen Zwecken muss lediglich die Relation eines eventuellen Tumors zu arteriellen Gefäßen wegen einer möglichen Infiltration beurteilt werden können, während die genaue Topographie sowie Normvarianten normalerweise für den Radiologen wenig relevant sind. Anders bei geplanten Segmentierungen, die im Rahmen der Operationsplanung z. B. der Leberchirurgie für den Viszeralchirurgen von großer Bedeutung sind. Ein intravenöser Kontrastmittelbolus passiert die verschiedenen Gefäßkompartimente (im Abdomen arteriell, portalvenös, venös) mit Anreicherung der parenchymatösen Organe etwa in der portalvenösen Phase. Möchte man verschiedene Gefäßkompartimente jeweils optimal darstellen, gelingt das nicht in einer Spirale, es werden zwei speziell getimte Spiralen in der arteriellen und in der portalvenösen Phase erforderlich. ■ **Abb. 1** illustriert das am Beispiel des Pankreas.

### DICOM-Daten

Medizinische Bilddaten bestehen aus dem eigentlichen Bild als Bitmap und aus Metadaten, die in vielen dutzend Feldern die Bilder beschreiben, dem DICOM-Header. Diese Metadaten sind mit Standards zur Organisation der Informationen und Vorschriften zum Datenaustausch im internationalen DICOM-Standard festgelegt. Neben administrativen Daten (Patientendaten, durchführende Organisation, Zuweiser) und Geräteparametern (Hersteller, Modell, Software, Kalibrierung) werden Untersuchungsdaten und Bildinformationen gespeichert (Zeitpunkte von Untersuchungsplanung, -durchführung, Bildbe-

rechnung etc.). Besonders wichtig sind im aktuellen Zusammenhang die Hierarchie der Bilder und die Bildgeometrie. Es wird für jede Bildschicht und jedes Bildpixel die Lage im Raum relativ zu einem Bezugspunkt definiert. Erst diese Informationen erlauben die sekundäre Weiterverarbeitung beispielsweise mit Rekonstruktionen in anderen Raumrichtungen und die Segmentierung. Radiologische Bilder ohne diesen Header sind vergleichbar einem Haufen ungeordneter Postkarten. Für jedwede Weiterverarbeitung ist deshalb der Austausch im DICOM-Format unabdingbare Voraussetzung.

### Generierung und Darstellung von 3D-Modellen

Radiologische Schnittbilder der Computertomographie und Magnetresonanztomographie liefern ein präzises Abbild der anatomischen und pathologischen Strukturen. Sie sind aber als zweidimensionale Bilder für assistive Technologien in der Chirurgie nur begrenzt direkt nutzbar. Von den Bilddaten abgeleitete 3D-Modelle bieten den Vorteil einer besseren räumlichen Vorstellung, die es unter anderem ermöglicht, Lagebeziehungen innerhalb und außerhalb von Organen sowie Abstände zu Risikostrukturen schneller zu verstehen und abzuschätzen. Gleichzeitig erlaubt ein 3D-Modell die Reduktion auf relevante Objekte und den Transfer in die operative Situation oder in ein Trainingsszenario. Darüber hinaus sind solche Modelle Voraussetzung für den 3D-Druck und werden zunehmend auch in der Patientenaufklärung eingesetzt, da sie einfacher zu verstehen sind als radiologische Bilddaten.

Voraussetzung für die Generierung von 3D-Modellen ist die Segmentierung aller darzustellenden Objekte, d. h. die Abgrenzung der relevanten anatomischen und pathologischen Strukturen von den restlichen Bilddaten. Während dieser Schritt früher durch manuelles Einzeichnen der Konturen des Zielobjektes auf jeder Bildschicht erfolgte, wurden in den letzten Jahren etablierte Verfahren der Bildverarbeitung, die auf Grauwerten, Bereichswachstumsverfahren oder komplexeren Methoden beruhen, zunehmend durch Algorithmen der künstlichen Intelligenz (KI) abgelöst. Auf dem Gebiet der medizinischen Bild-

verarbeitung werden dabei vor allem tiefe neuronale Netze („deep neural networks“) und insbesondere das U-Net eingesetzt [4]. Im Bereich der Viszeralchirurgie erreichen z. B. die KI-Verfahren zur Segmentierung der Leber in CT- und MRT-Daten Genauigkeitswerte von über 95 % übereinstimmendem Volumen mit klinischen Referenzannotationen [5, 6]. Während Deep-Learning-basierte Lebersegmentierungen bereits in kommerziellen Medizinprodukten verfügbar sind, ist die KI-basierte Segmentierung von Läsionen und Gefäßen noch Gegenstand aktueller Forschung, insbesondere für MRT-Daten [7]. Ein populäres, frei verfügbares Tool für die Segmentierung einer Vielzahl anatomischer Objekte ist der TotalSegmentator, der auf dem nnU-Net beruht [8].

Bei der Nutzung automatischer Verfahren und insbesondere bei neuronalen Netzen, die auf zum Teil sehr homogenen Studiendaten und nicht auf Routinedaten trainiert wurden, müssen die Ergebnisse auf den Schichtbildern kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden. Dies ist besonders relevant für Tumoren oder wenn Abstände zu Risikostrukturen gering und wichtig für die Therapieentscheidung sind. Für die Korrekturtools werden dann in der Regel wieder manuelle und etablierte Methoden der Bildverarbeitung eingesetzt.

Um ein 3D-Modell zu generieren, werden die schichtweisen Konturen gestapelt und über Verfahren wie Marching Cubes [9] zu einer polygonalen Oberfläche zusammengesetzt. Diese Modelloberfläche kann volumenerhaltend (!) geglättet und weiter optimiert werden, um ein möglichst realistisches 3D-Modell des Organs oder der darzustellenden Struktur zu erzeugen.

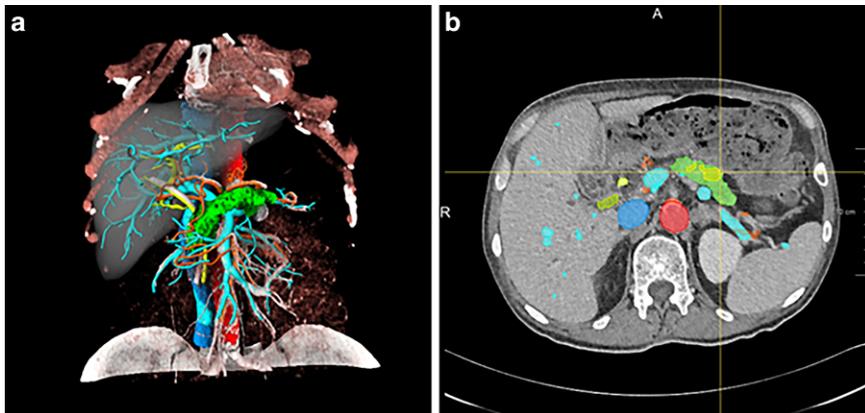
#### » Voraussetzung für 3D-Modelle ist die Segmentierung aller darzustellenden Objekte

Für die Darstellung der resultierenden 3D-Modelle kann die Oberfläche gefärbt und mit Texturen, die z. B. einen Krankheitsgrad wie Zirrhose wiedergeben, versehen werden [10]. Aber auch Abstände zu Risikostrukturen oder funktionelle Informationen lassen sich auf den Oberflächen farblich kodieren. Neben der Darstellung der Modelle als reine Oberflächenmodelle spielt das sog. direkte Volumenrende-

ring in der Visualisierung eine wichtige Rolle. Bei der bekannten Methode des Raycastings werden Strahlen aus der jeweiligen Blickrichtung durch das 3D-Volumen der radiologischen Originaldaten geschickt. Abhängig von den Grauwerten auf diesem Strahl und einer Transferfunktion wird der jeweilige Bildpunkt unterschiedlich hell, farbig und semitransparent dargestellt. Mit aktuellen Methoden lassen sich sehr realistische Darstellungen inklusive physikalisch plausibler Beleuchtung und Schatten erzeugen. Besonders eindrucksvoll und populär ist hierbei das auf Path-Tracing basierende Cinematic-Rendering von Siemens [11]. Eine ähnliche realistische Darstellung erlaubt das AVIS-Rendering-Verfahren [12], welches speziell für den Einsatz in Mixed-Reality-Anwendungen entwickelt wurde und durch Approximationen eine besonders schnelle Bilderzeugung erlaubt. Dies ist notwendig, um die benötigten Stereobilder (eines für jedes Auge) mit der hohen nötigen Bildfrequenz (mehr als 60 Bilder pro Sekunde) erzeugen zu können. Das direkte Volumenrendering lässt sich auch mit Oberflächenmodellen kombinieren, sodass die Hervorhebung wichtiger Strukturen in einer anatomisch realistischen Umgebung möglich ist (▣ Abb. 2). Beim Vorliegen aller Optionen kann die dreidimensionale Darstellung an den jeweiligen Anwendungszweck, die umgebenden Lichtverhältnisse und Vorlieben der Nutzenden angepasst werden.

### Augmented Reality

Augmented Reality (AR) bezeichnet eine Technologie, die virtuelle Informationen in Echtzeit in die physische Welt einblendet, um die Wahrnehmung und Interaktion des Nutzers mit seiner Umgebung zu erweitern. AR positioniert sich auf dem Virtualitäts-Realitäts-Kontinuum nach Milgram und Kishino zwischen der realen Umgebung und der erweiterten Virtualität und stellt eine Mischform dar, in der digitale und physische Informationen koexistieren und interagieren (▣ Abb. 3; [13]). Diese Integration erfolgt durch die Verwendung von Geräten wie Smartphones, Tablets, Head-Mounted Displays (HMDs) oder Smart Glasses. Die integrierten Sensoren und Kameras der HMDs



**Abb. 2** ▲ Visualisierungsoptionen computertomographischer (CT-)Daten mit und ohne Segmentierung. **a** 3D-Oberflächenmodelle der Portalvene (türkis), Leberarterie (orange) und Gallengänge (hellgrün) in Kombination mit einem Volume-Rending, in dem über automatisch generierte Masken weitere anatomische Strukturen farbig hervorgehoben sind (grün Pankreas, grau Leber, rot Aorta). **b** Überlagerung einer CT-Schicht mit segmentierten und automatisch identifizierten Strukturen

nutzen dabei fortschrittliche Algorithmen, um virtuelle Inhalte präzise über die reale Welt zu legen. Im Gegensatz zur virtuellen Realität (VR), die vollständig immersive, computergenerierte Umgebungen schafft, ergänzt AR somit die physische Welt durch zusätzliche virtuelle Informationen. Das technische Set-up besteht in diesem Fall aus der Hardware – den HMDs wie z. B. der Microsoft HoloLens (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) oder Magic Leap (Magic Leap Inc., Plantation, FL, USA) – und einer entsprechenden Software wie die VSI HoloMedicine®. HMDs wie die Microsoft HoloLens oder Magic Leap bieten eine freihändige Gesten- und Sprachsteuerung zur Bedienung der Software. Eine stabile und schnelle Internetverbindung ist erforderlich, insbesondere wenn das AR-System Cloud-basierte Dienste nutzt. Eine Mindestbandbreite von 100 Mbps wird empfohlen, um eine reibungslose Datenübertragung und Vermeidung von Verzögerungen sicherzustellen. Die Netzwerklatenz sollte so niedrig wie möglich sein, idealerweise unter 20 ms, um eine Echtzeitinteraktion mit dem AR-System zu ermöglichen. 5G-Netzwerke bieten mit ihren hohen Datenübertragungsgeschwindigkeiten eine nahezu sofortige Übertragung großer Datenmengen, sodass sich damit weitere Anwendungsfelder wie die AR-Unterstützung sowie medizintechnische Anwendungen wie Laparoskopie, Robotik erschließen lassen. Weiterhin durch die technischen Möglichkeiten von 5G lassen sich ortsunabhängige inter-

disziplinäre chirurgische Anwendungen realisieren.

Cloud-Computing-Dienste bieten die notwendige Rechenleistung und Datenspeicherung, um komplexe Berechnungen durchzuführen und große Datenmengen zu speichern. Dabei gilt es, die Einhaltung von Datenschutzstandards wie die Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) und Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA) zur Gewährleistung der Sicherheit, Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit sensibler patientenspezifischer Daten zu gewährleisten. Durch die Kombination aus robusten technischen Maßnahmen und umfassenden organisatorischen Prozessen wie die Implementierung von Verschlüsselung, strikten Zugangskontrollen, kontinuierlicher Überwachung, regelmäßigen Backups sowie durch klare Richtlinien und Verträge kann die Sicherheit und der Schutz von Patientendaten in Cloud-Systemen effektiv gewährleistet werden. Diese Maßnahmen tragen ebenso dazu bei, dass sowohl die gesetzlichen Anforderungen erfüllt als auch das Vertrauen der Patienten in den Umgang mit ihren sensiblen Gesundheitsdaten gestärkt wird.

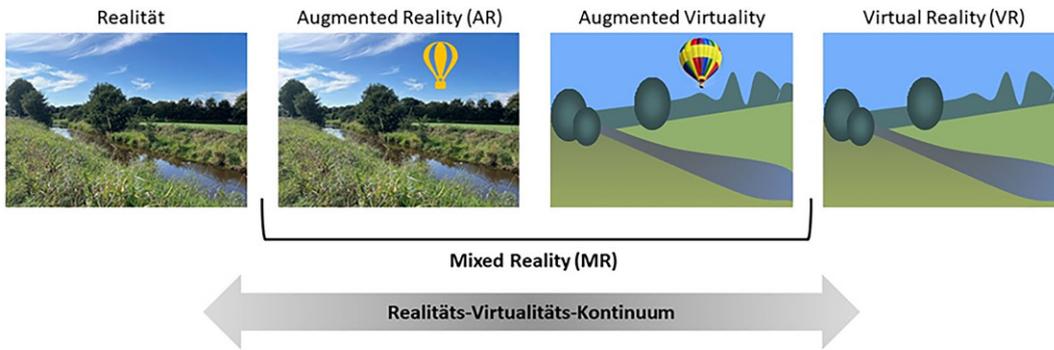
» Das virtuelle CT/MRT-Hologramm wird über die AR-Brille direkt vor dem Auge des Nutzers projiziert

Besonders die Visualisierung patientenindividueller 3D-Organmodelle z. B. als 3D-

Hologramme, die Planung von Operationen und dazu die Möglichkeiten einer intraoperativen Unterstützung, haben das Potenzial, die Patientensicherheit zu erhöhen.

Operateure müssen sich aus den als Schichtbilder vorliegenden MRTs oder CTs ein eigenes 3D-Modell kognitiv rekonstruieren, was eine umfassende Ausbildung und mehrjährige Erfahrung erfordert [14]. Mittels des 3D-Volume-Rending der VSI HoloMedicine® kann aus dem gesamten 2D-Dataset ein dreidimensionales computergeneriertes virtuelles Hologramm erzeugt werden. Das virtuelle Hologramm des CT/MRT kann dann mithilfe von AR-Brillen direkt vor dem Auge des Nutzers projiziert werden. Darüber hinaus können mittels photorealistischer 3D-Renderings (z. B. Cinematic Rendering von Siemens oder AVIS) und entsprechender Transferfunktionen bestimmte anatomische Strukturen, Organe oder auch Knochen hervorgehoben bzw. ausgeblendet werden. Damit bieten AR-Anwendungen direkt verfügbare 3D-Visualisierungen sowie verbesserte Tiefeninformationen, die das Verständnis der patientenindividuellen Anatomie und die präoperative Planung erleichtern, um chirurgische Eingriffe zu unterstützen. Der Torso kann nicht nur als vollständiges Hologramm dargestellt werden, sondern mithilfe manueller oder (semi-)automatischer Segmentierung können relevante Organe, Gefäßstrukturen und Pathologien separat visualisiert werden. Damit werden komplexe Pathologien auf wesentliche Strukturmerkmale reduziert dargestellt und somit eine verbesserte dreidimensionale Vorstellung der Tumorlokalisation, der Gefäß- sowie umgebenden anatomischen Strukturen generiert. In gleicher Weise kann AR in der medizinischen Aus- und Weiterbildung medizinischen Personals oder auch in der Patientenaufklärung eingesetzt werden, indem es die Visualisierung komplexer anatomischer Zusammenhänge und Pathologien in einer interaktiven und realitätsnahen Weise ermöglicht.

Darüber hinaus bieten AR-Operationsplanungstools Chirurgen mittels der holographischen 3D-Visualisierung und der Gestensteuerung eine sichere, intuitive und virtuelle Erprobungsmöglichkeit,



**Abb. 3** ◀ Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum nach Milgram und Kishino 1994 [13]. (Zeichnung mit freundlicher Genehmigung von Esther Maier, Universität Oldenburg; Fesselballon: Pixabay)

um patientenspezifische Operationsschritte zu planen und auszuprobieren. Mit diesen Operationsplanungstools können beispielsweise die Tumoren vermessen und Volumina oder das Restlebertumoren präoperativ bestimmt werden [15].

Eine Besonderheit der AR-Operationsplanung ist, dass mehrere Teilnehmer ortsunabhängig als Avatare gleichzeitig mit dem 3D-Organmodell interagieren können oder der Planungsprozess gestreamt werden kann. Diese Multi-User-Kollaboration ermöglicht es, dem Operationsteam, die virtuelle 3D-Bildgebung gemeinsam zu betrachten, zu analysieren und die Operationsplanung abzustimmen. Dieser Ansatz eignet sich auch für zukünftige telemedizinische Konzepte, wie „Holokonferenzen“, insbesondere im Rahmen von Indikations- oder Tumorboardbesprechungen.

## Virtual Reality

Virtuelle Realität (VR) stellt auf dem sog. Milgram-Kontinuum das eine Ende eines Spektrums von erweiterten Realitäten dar (das andere Ende ist die echte Realität, s. **Abb. 3**; [13]). Dies bedeutet, dass bei einer vollständigen Erreichung dieser Seite des Kontinuums *alle Sinne* des Menschen durch eine computergenerierte und -simulierte Welt perfekt stimuliert würden und somit auch die echte Realität völlig ausgeblendet würde. In der Praxis wird dies nicht erreicht, was aber für eine sinnvolle Anwendung der VR nicht notwendig ist.

Zur Erzeugung einer virtuellen Welt existiert eine Reihe von Technologien, die als Schnittstelle zwischen dem Menschen und der Computersimulation dient und möglichst mehrere Sinne abdecken soll. Der wichtigste ist der visuelle Sinn, der üblicherweise durch sog. Head Mounted Displays (HMD) bzw. sog. VR-Headsets bedient

wird. Gleichzeitig sollten idealerweise auch die anderen Sinne durch die Simulation bedient werden, z. B. das Hören (hierzu sind üblicherweise Kopfhörer an den Headsets montiert) oder auch der Berührungssinn. Für letzteren gibt es eine Reihe von Geräten, die z. B. Kräfte an den Menschen zurückgeben können, wenn diese virtuelle Objekte berühren. Auch für die übrigen Sinne werden Technologien erforscht, die aber noch relativ weit von einem in der Praxis verwendbaren Reifegrad entfernt sind.

Ein großer Vorteil der VR-Headsets besteht darin, dass sie es ermöglichen, dem Benutzer ein Bild zu generieren, das perspektivisch und stereoskopisch korrekt ist, sodass man eine korrekte Tiefenwahrnehmung der virtuellen Welt bekommt. Darüber hinaus ist der Benutzer frei beweglich (aktuell sind erste Headsets auf dem Markt, die auch kabellos funktionieren), sodass ein Rundumblick und eine freie Bewegung durch die virtuelle Welt ermöglicht werden. Und schließlich sind in modernen HMDs auch Tracking-Sensoren verbaut, die es ermöglichen, die Blickrichtung des Benutzers zu erkennen, und diese z. B. für die Analyse des Trainingserfolges auszuwerten [16].

Bei der Einordnung der Qualität einer computergenerierten, virtuellen Realität spielen drei Faktoren eine wichtige Rolle:

1. der Grad der Immersion („immersion“),
2. der Grad der Wiedergabetreue („fidelity“) und schließlich
3. der Grad der Präsenz („presence“).

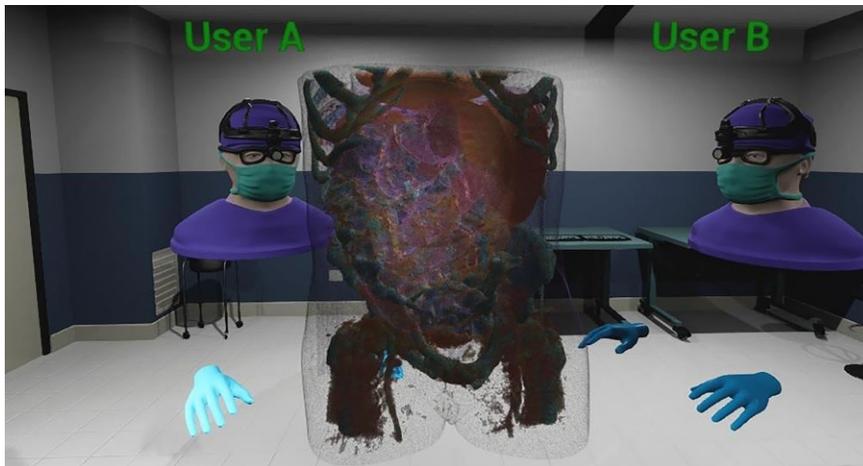
Mit Immersion bezeichnet man die Anzahl der menschlichen Sinne, die durch den Computer und die entsprechenden Interface-Technologien mit Sinneseindrücken versorgt werden. Mit Fidelity bezeichnet man den Grad der Wiedergabetreue; die-

se setzt sich wiederum aus vielen Faktoren zusammen, z. B. aus dem Realismus des Bildes und den computergenerierten Geräuschen oder auch wie hoch etwaige Latenzen zwischen den Bewegungen des Benutzers bis zur Änderung des Bildes im Display sind. Und schließlich bezeichnet man mit Presence den Grad des Gefühls der Benutzer, sich selbst mit dem eigenen Körper in einer anderen Welt als der Realität zu befinden. Letzteres ist somit immer eine Illusion, da Benutzer rational und kognitiv jederzeit wissen, dass die ihnen vorgespiegelte Welt nicht real ist. Dennoch entsteht, bei einer hohen Immersion und einer hohen Fidelity, das Gefühl, sich in einer anderen Welt zu befinden. Dies ist ein durchaus erwünschter Effekt und trägt dazu bei, dass z. B. Trainingseffekte stärker sind, als wenn das Gefühl der Präsenz nicht vorhanden wäre [17].

Das Potenzial virtueller Realität ist für eine medizinische Anwendung generell sehr hoch und kann in sehr vielen Bereichen sinnvoll sein. Für einige Anwendungen hat VR inzwischen einen ausreichenden Reifegrad erreicht, für andere Anwendungen gibt es noch erheblichen Forschungsbedarf, z. B. bei Telepräsenz oder für patientenspezifische 3D-Simulationen. Für beide Fälle sollen im Folgenden einige Beispiele erläutert werden.

## » Insbesondere für das Training motorischer Fähigkeiten bietet VR ein hohes Potenzial

Schon jetzt lassen sich zahlreiche Schritte einer Operation sinnvoll mithilfe virtueller Realität simulieren und damit trainieren. Das Ziel dabei ist es nicht, die bislang vorherrschenden Trainingsmethoden zu ersetzen, sondern das Training angehender Ärzte und Chirurgen schon früher begin-



**Abb. 4** ▲ 3D-Visualisierung eines computertomographischen Datensatzes in Virtual Reality. Besondere Herausforderung hierbei ist die Garantie der Echtzeitfähigkeit. Besonderer Vorteil ist die Immersion und Präsenz, die dem Betrachter ein besseres und intuitiveres Verständnis der dreidimensionalen Strukturen und Relationen ermöglicht. (Aus [24])

nen zu können, sodass diese mit mehr Vorwissen und einem höheren Fähigkeitslevel in die Ausbildung am Patienten gehen können. So können z. B. Abläufe in einer realistischen Weise eingeübt werden, es können aber auch motorische Fähigkeiten trainiert werden. Insbesondere für letztere bietet VR in Verbindung mit geeigneten Force-Feedback-Geräten ein hohes Potenzial, da bei den motorischen Fähigkeiten die Übung und das haptische Gefühl eine wichtige Rolle spielen und eine Demonstration bzw. das Lehren relativ schwierig ist. Hier konnten in den vergangenen Jahren einige Erfolge erzielt werden, z. B. in der Zahnmedizin und der Orthopädie [18, 19].

Aus Sicht der Forschung hat das Training mithilfe von VR schon einen relativ hohen Reifegrad erreicht, auch wenn noch eine Reihe offener Forschungsfragen bestehen bleibt. Darüber hinaus jedoch besteht noch erheblicher Forschungsbedarf in der Kopplung von VR und KI. Dies würde das Potenzial bieten, dem auszubildenden Arzt nicht nur visuelles oder motorisches Feedback zu geben, sondern darüber hinaus Verbesserungsvorschläge oder auch eine Evaluierung seines Lernfortschritts zu machen. Erste Schritte in dieser Richtung wurden u. a. von Kaluschke et al. [16] und Yin et al. [20] unternommen.

Ein anderes Anwendungsfeld ist die Anatomie, die sich mithilfe von virtueller Realität sehr gut stereoskopisch in 3D visualisieren lässt. Inzwischen sind auch

Systeme verfügbar, die verschiedene Varianten derselben anatomischen Strukturen einblenden können. Langfristig lässt sich dies mit interaktiven Aufgaben kombinieren, sodass damit ein zusätzliches Lehrangebot geschaffen werden kann. Erste Studien konnten die Effektivität dieser Art der Anatomieausbildung zeigen [21, 22]; gleichzeitig sehen wir hier noch sehr viel Potenzial für weitere Entwicklungen [23].

Auch für die Visualisierung von 3D-Patientendaten (CT oder MRT) bietet virtuelle Realität eine Reihe von Vorteilen (▣ Abb. 4). Durch die räumlich korrekte, realitätsnahe Darstellung wird es Chirurgen ermöglicht, schneller die räumliche Struktur zu erfassen und somit zu besseren Entscheidungen zu kommen [24].

Alle oben genannten Anwendungsbeispiele lassen sich darüber hinaus für mehrere User gleichzeitig erweitern. Dies bietet z. B. im Falle der Anatomie die Möglichkeit, dass sich mehrere Studenten gleichzeitig mit anatomischen Fragestellungen befassen können [23]. Im Falle des Trainings bietet eine Multi-User-Anwendung die Möglichkeit, dass sich ein Dozent oder erfahrener Kollege in die virtuelle Welt dazuschaltet und dem angehenden Chirurgen direkt in der virtuellen Umgebung Hilfestellung gibt. Falls das System auch Force Feedback enthält (mittels geeigneter Gerätetechnologie) kann ein Lehrer bzw. erfahrener Kollege dem Studenten quasi die Hand führen [25]. Im Falle der Visualisierung von 3D-Daten können mehrere User

denselben Datensatz gleichzeitig aus verschiedenen Perspektiven (oder derselben) stereoskopisch korrekt betrachten, Chirurgen können gemeinsam darüber beraten und dies auch über große Entfernungen hinweg.

Eine spezielle und besonders herausfordernde Variante solcher Multi-User-Anwendungen könnte in Zukunft die Telepräsenz im Operationssaal sein [26]. Bei dieser Vision ist das Ziel, Kollegen aus der Entfernung in einer laufenden Operation mithilfe virtueller Realität so zuzuschalten, dass diese beratend dem Chirurgen vor Ort zur Seite stehen können. Dies könnte zahlreiche Vorteile z. B. für ländliche Regionen oder Entwicklungsländer bieten. Der technologische Ansatz zur Erreichung dieses Ziels wäre, dass der Arzt im Operationssaal ein AR-Headset trägt, wohingegen der Arzt in der Entfernung ein VR-Headset benutzt, und im Operationssaal Tracking-Technologien eingebaut sind, wie z. B. Kameras zur Erfassung von Tiefenbildern bzw. der realen 3D-Geometrie vor Ort. Dies würde es ermöglichen, dass der entfernte Kollege das Gefühl bekommt, im Operationssaal vor Ort zu sein, während der Chirurg vor Ort den entfernten Kollegen scheinbar im Operationssaal, z. B. gegenüber vom Operationstisch sieht.

## Interaktion

Im Zentrum der hier genannten bildgebenden Techniken und Methoden zur Visualisierung medizinischer Daten stehen immer Menschen. Sowohl als Patienten als auch als medizinisches Personal. Insbesondere liegt die Verantwortung für Entscheidungen und die Durchführung von Interventionen bei den Menschen, die diese durchführen. Deshalb ist es notwendig, dass Chirurgen bestmöglich bei ihren Entscheidungen unterstützt werden [27]. Es reicht nicht, möglichst viel künstliche Intelligenz in Computersystemen zu integrieren. Vielmehr müssen Chirurgen befähigt werden, möglichst gut in einer konkreten Situation alle relevanten Faktoren zu verstehen, um im Sinne der Patienten schnell und präzise die richtige Entscheidung zu treffen. Hierfür ist die geeignete Interaktion mit den medizinischen Daten von elementarer Bedeutung. Wie können zum richtigen Zeitpunkt die wesentlichen

Daten in geeigneter Weise zur Verfügung gestellt werden?

Dabei sind drei Szenarien besonders wichtig:

- Training,
- präoperative Planung und
- intraoperative Interaktion [28].

Bildgebung, AR und VR können ihr Potenzial nur dann entfalten, wenn die Nutzer sie effizient und effektiv handhaben können. Methoden des menschenzentrierten Designs berücksichtigen relevante menschliche Faktoren wie z. B. Aufmerksamkeit, Vorwissen, Aufgaben und Kontext.

Der menschliche Körper ist dreidimensional mit komplexen individuellen Strukturen. Chirurgische Interventionen erfordern einen Fokus der Aufmerksamkeit und die Navigation im menschlichen Körper ist keine triviale Aufgabe. Für intraoperative Situationen können heute vielfältige Methoden genutzt werden, allerdings werden Navigationshinweise oft auf Monitoren dargestellt, die außerhalb des Operationsbereichs montiert sind. Dies erfordert einen ständigen Wechsel der Aufmerksamkeit vom Situs zum Monitor. Die kognitive Last kann z. B. durch Interaktionstechniken gesenkt werden, die relevante Information auf den Operationsinstrumenten anzeigen [29] oder durch druckbare Foliendisplays, die auf den Situs aufgelegt werden [30].

In der Planung und der Ausbildung ist die VR eine geeignete Interaktionstechnik, um Operationen zu planen und Eingriffe zu simulieren [31]. Mit geeigneten Interaktionstechniken kann die Planung in VR große Vorteile bieten und das räumliche Verständnis verbessern. Insbesondere hilft es, individuelle anatomische Varianten besser zu erkennen und zu berücksichtigen. Chirurgen berichten auch, dass VR die Identifikation relevanter chirurgischer Details verbessert. Somit haben diese Interaktionsverfahren das Potenzial, chirurgische Interaktionen zu verbessern und damit auch die Gesundheit der Patienten zu fördern.

» Der 3D-Druck ermöglicht die Herstellung haptischer Artefakte aus 3D-Daten

Ein weiterer Aspekt bei der Interaktion ist die Einbindung menschlicher Sinne. Haptik

ist in vielen Fällen im wörtlichen Sinn zum Begreifen ein relevanter Sinn. Mit 3D-Druck ist es möglich, aus 3D-Daten haptische Artefakte zu erstellen, die insbesondere in der Ausbildung nützlich sein können, Sachverhalte besser zu verstehen [32]. Haptische Interfaces können aber auch als Controller für VR-Interaktionen genutzt werden. So kann z. B. der 3D-Druck einer Leber als Controller für ein VR-Setup dienen [33]. Damit erhält der Chirurg ein begreifbares Artefakt, das er in der Hand halten kann und in das er durch die VR-Brille hineinschauen kann. Dabei muss der 3D-Druck nicht notwendigerweise die gleiche Größe haben wie die tatsächliche Leber.

Diese Übersicht gibt einen Einblick in einige aktuelle Entwicklungen, die vor allem für die Viszeralchirurgie untersucht wurden. In anderen chirurgischen Kontexten bestehen andere Anforderungen und die Lösungen, die dafür notwendig sind, müssen entsprechend auch anders gestaltet werden. Die Gestaltung menschenzentrierter Interaktionstechniken stellt eine große Herausforderung dar, da sie die Vielfalt unterschiedlicher menschlicher Faktoren, Situationen und Kontexte berücksichtigen muss, um Menschen die richtigen Informationen zur richtigen Zeit in geeigneter Weise zur Verfügung zu stellen.

#### Fazit für die Praxis

- Diagnostische Untersuchungsprotokolle, insbesondere die Kontrastmittelgabe müssen anwendungsspezifisch angepasst werden.
- Schichtdicken um 1,5 mm haben sich in unseren Projekten wie auch in unserer klinischen Routine für die anschließende Bildsegmentierung als besonders geeignet erwiesen.
- 3D-Modelle bieten für die Chirurgie durch ihre Klarheit und einfache Begreifbarkeit Vorteile gegenüber radiologischen Schnittbildern. Es sollte jedoch immer die korrekte Segmentierung der dargestellten Informationen und insbesondere die von Risikostrukturen überprüft werden.
- Methoden der künstlichen Intelligenz vereinfachen und beschleunigen den Prozess der Generierung von 3D-Modellen, sodass diese zunehmend in der klinischen Routine verfügbar sein werden.
- Der Einsatz von Augmented Reality (AR) bietet ein hohes Potenzial in der zukünftigen klinischen Anwendungsroutine insbesondere für die Bereiche Lehre, Operationsplanung, intraoperative Unterstützung

zung sowie für Multi-User-Kollaboration oder Patientenaufklärung.

- Durch die Weiterentwicklung von AR werden sich zukünftig weitere Anwendungsfelder der AR-unterstützten offenen, laparoskopischen und robotischen Chirurgie oder auch interdisziplinäre chirurgische Anwendungen erschließen lassen.

#### Korrespondenzadresse

**Andrea Schenk**

Fraunhofer-Institut für Digitale Medizin MEVIS  
Max-von-Laue-Str. 2, 28359 Bremen,  
Deutschland  
andrea.schenk@mevis.fraunhofer.de

#### Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** S. Pelz: CEO apoQlar GmbH. A. Schenk, A. Kluge, G. Zachmann und R. Malaka geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autor/-innen keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

#### Literatur

1. Huda W (2002) Dose and image quality in CT. *Pediatr Radiol* 32(10):709–713
2. Goldman LW (2007) Principles of CT: radiation dose and image quality. *J Nucl Med Technol* 35(4):213–225
3. Bidgood WD, Horii SC (1992) Introduction to the ACR-NEMA DICOM standard. *Radiographics* 12:345–355
4. Ronneberger O, Fischer P, Brox T (2015) U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *Medical image computing and computer-assisted intervention—MICCAI 2015: 18th international conference Munich, October 5–9, 2015. proceedings, part III* 18. Springer, Germany, 5234–241
5. Bilic P, Christ P, Li HB et al (2023) The liver tumor segmentation benchmark (LiTS). *Med Image Anal* 84:102680. <https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102680>
6. Chlebus G, Meine H, Thoduka S, Abolmaali N, van Ginneken B, Hahn HK, Schenk A (2019) Reducing inter-observer variability and interaction time of MR liver volumetry by combining automatic CNN-based liver segmentation and manual corrections. *PLoS ONE* 14(5):e217228. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217228>
7. Hänsch A, Chlebus G, Meine H, Thielke F, Kock F, Paulus T, Abolmaali N, Schenk A (2022) Improving automatic liver tumor segmentation in late-phase MRI using multi-model training and 3D convolutional neural networks. *Sci Rep* 12:12262. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16388-9>
8. Wasserthal J, Breit HC, Meyer MT, Pradella M, Hinck D, Sauter AW, Heye T, Boll DT, Cyriac J, Yang S, Bach M, Segeroth M (2023) TotalSegmentator: robust segmentation of 104 anatomic structures in CT images. *Radiol Artif Intell* 5(5):e230024. <https://doi.org/10.1148/ryai.230024>

9. Lorensen WE, Cline HHE (1987) Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *Comput Graph* 21(4):163–169. <https://doi.org/10.1145/37402.37422>
10. Kraft V, Schumann C, Salzmann D, Nopper H, Lück T, Weyhe D, Schenk A (2021) Towards realistic organ models for 3D printing and visualization. *Curr Dir Biomed Eng* 7(1):166–170. <https://doi.org/10.1515/cdbme-2021-1036>
11. <https://www.siemens-healthineers.com/de/digital-health-solutions/cinematic-rendering>. Zugegriffen: 12. Aug. 2024
12. Kraft V, Link F, Schenk A, Schumann C (2020) Adaptive illumination sampling for direct volume rendering. *Advances in computer graphics. Lecture Notes in Computer Science*, 5 107–118 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61864-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61864-3_10)
13. Milgram P, Kishino F (1994) A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Trans Inform Syst* 77:1321–1329
14. Reinschlüssel A, Münden T, Salzmann D et al (2022) Virtual reality for surgical planning – evaluation based on two liver tumor resections. *Front Surg*. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.821060>
15. Tang R, Ma L, Xiang C et al (2017) Augmented reality navigation in open surgery for hilar cholangiocarcinoma resection with hemihepatectomy using video-based in situ three-dimensional anatomical modeling: a case report. *Medicine* 96:e8083
16. Kaluschke M, Weller R, Yin MS, Hosp BW, Kulapichit F, Haddawy P, Suebnukarn S, Zachmann G (2024) Reflecting on excellence: VR simulation for learning indirect vision in complex Bi-manual tasks. *IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*.
17. Lorenz ML, Hoffmann A, Kaluschke M, Taha Z, Pillen N, Kusserow M, Perret J, Knopp S, Dettmann A, Klimant P, Zachmann G, Bullinger AC (2023) Perceived realism of Haptic rendering methods for bimanual high force tasks: original and replication study. *Nat Sci Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38201-x>
18. Kaluschke M, Weller R, Hammer N, Pelliccia L, Lorenz M, Zachmann G (2020) Realistic haptic feedback for material removal in medical simulations. *IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, Washington, D.C., 528–31
19. Kaluschke M, Yin MS, Haddawy P, Suebnukarn S, Zachmann G (2022) The impact of 3D stereopsis and hand-tool alignment on effectiveness of a VR-based simulator for dental training. *IEEE 10th International Conference on Healthcare Informatics (ICHI)*.
20. Yin MS, Haddawy P, Suebnukarn S, Kulapichit F, Rhiemora P, Jatuwat V, Uthaiattanachep N (2021) Formative feedback generation in a VR-based dental surgical skill training simulator. *J Biomed Inform* 114:103659
21. Gloy K, Weyhe P, Nerenz E, Kaluschke M, Uslar V, Zachmann G, Weyhe D (2021) Immersive anatomy Atlas: learning factual medical knowledge in a virtual reality environment. *Anatomical Sciences Education, American Association for Anatomy* <https://doi.org/10.1002/ase.2095>
22. Weyhe D, Uslar V, Weyhe F, Kaluschke M, Zachmann G (2018) Immersive anatomy atlas—empirical study investigating the usability of a virtual reality environment as a learning tool for anatomy. *Front Surg Visc Surg* 5:73. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2018.00073>
23. Almaree H, Fischer R, Weller R, Uslar V, Weyhe D, Zachmann G (2023) Collaborative VR anatomy atlas—investigating multi-user anatomy learning. *Springer LNCS on Virtual Reality and Mixed Reality*

## From imaging to interaction with 3D models: technical aspects

Augmented and virtual reality (AR and VR, respectively) are already being used or evaluated in some medical fields: however, the widespread application is still hampered by inconsistent and often confusing terminology, in particular for people who are not familiar with current developments. Additionally, the technical principles and requirements for its use are often insufficiently well known. This overview article therefore aims to clarify the most important terminology and presents the current technical state of the art, spanning from the requirements of medical imaging, through 3D models and the various forms of visualization to the interaction possibilities within VR and AR. This should help to facilitate a common language among developers and users and to ensure that the potentials offered by digital assistive technologies can be fully exploited in the future.

### Keywords

Segmentation · Augmented reality · Virtual reality · Immersion · Assistive technologies

- (EuroXR 2023). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-48495-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-48495-7_8)
24. Fischer R, Chang KC, Weller R, Zachmann G (2020) Volumetric medical data visualization for collaborative VR environments. *Springer LNCS on Virtual Reality and Augmented Reality, 17th EuroVR International Conference*.
25. Kaluschke M, Yin MS, Haddawy P, Srimaneekarn N, Saikaew P, Zachmann G (2021) A shared Haptic virtual environment for dental surgical skill training. *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 5347–352
26. Fischer R, Mühlenbrock A, Kulapichit F, Uslar VN, Weyhe D, Zachmann G (2022) Evaluation of point cloud streaming and rendering for VR-based telepresence in the OR. *Virtual Reality and Mixed Reality (EuroXR 2022)*, Springer LNCS, Bd. 13484, 589–110. ISBN 978-3-031-16234-3.
27. Malaka R, Dylla F, Freksa C, Barkowsky T, Herrlich M, Kikinis R (2017) Intelligent support for surgeons in the operating room. In: Nadin M (Hrsg) *Anticipation and medicine*. Springer, Cham [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45142-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45142-8_16)
28. Reinschlüssel AV, Muender T, Fischer R, Kraft V, Uslar VN, Weyhe D, Schenk A, Zachmann G, Döring T, Malaka R (2023) Versatile Immersive virtual and augmented tangible OR—using VR, AR and tangibles to support surgical practice. In: *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '23)*. Article 477. Association for Computing Machinery, New York, 51–5 <https://doi.org/10.1145/3544549.3583895>
29. Herrlich M, Tavakol P, Black D et al (2017) Instrument-mounted displays for reducing cognitive load during surgical navigation. *Int J CARS* 12:1599–1605. <https://doi.org/10.1007/s11548-017-1540-6>
30. Herrlich M, Reinschlüssel AV, Willems M, Langhorst N, Black D, Döring T, Rieder C, Kikinis R, Malaka R (2020) Put that needle there: customized flexible on-body thin-film displays for medical navigation. *Acm Trans Comput Healthc*. <https://doi.org/10.1145/3386307>
31. Reinschlüssel AV, Muender T, Salzmann D, Döring T, Malaka R, Weyhe D (2022) Virtual reality for surgical planning—evaluation based on two liver tumor resections. *Front Surg* 9:821060. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.821060>
32. Nopper H, Uslar V, Salzmann D, Santos UF, Lueck T, Schumann C, Karayagiz F, Malaka R (2022) Evaluating benefits of patient-specific 3D-printed phantom designs in visceral surgery. *Trans AMMM* 4:671
33. Reinschlüssel AV, Muender T, Döring T, Uslar VN, Lück T, Weyhe D, Schenk A, Malaka R (2021) A Study on the Size of Tangible Organ-shaped Controllers for Exploring Medical Data in VR. In: *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '21)*. Article 261. Association for Computing Machinery, New York, 51–7 <https://doi.org/10.1145/3411763.3451594>

**Hinweis des Verlags.** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.