

Aus der Chirurgischen Klinik, Campus Charité Mitte | Campus Virchow-Klinikum,
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

Dissertation

XR in der Chirurgie

Spatial und *embodied computing* in der digitalen Chirurgie:
Funktionsweise, Anwendungsfelder, Darstellungsprinzipien

XR in Surgery

Spatial and embodied computing in digital surgery:
Technology, Application, Design

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum medicinalium (Dr. rer. medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von
Moritz Queisner
aus Berlin

Datum der Promotion: 18. Dezember 2020

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Abstrakt (deutsch)	5
Abstract (English)	5
1. Einleitung	6
1.1 Ausgangssituation	6
1.2 Fragestellung	8
1.3 Methodik & Vorgehen	13
2. Fallstudie <i>Mixed Reality: spatial und embodied computing</i> in der Viszeralchirurgie	15
2.1 Ausgangssituation: Synthese von Bildgebung und Intervention	15
2.2 Fragestellung und Methodik	19
2.3 Forschungsstand	20
2.4 Untersuchung	30
2.5 Ergebnisse & Anwendungen	44
a) Interaktion & Ergonomie	45
b) Gestaltungsstrategien	49
c) Anwendungsbezogenes Bildwissen	52
3. Fallstudie <i>Virtual Reality: virtuelle Hospitation</i> in der chirurgischen Aus- und Weiterbildung	56
3.1 Ausgangssituation	56
3.2 Fragestellung und Methodik	62
3.3 Forschungsstand	65
3.4 Untersuchung	72
3.5 Ergebnisse & Anwendungen	81
a) Ich-Perspektive	83
b) Interaktion im realen Raum und Maßstab	86
c) Realismus	87
4. Diskussion & Ausblick	91
Literaturverzeichnis	94
Eidesstattliche Versicherung	99
Publikationsliste	100
Lebenslauf	102
Danksagung	102

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1, a) *Mixed reality* Brille *HoloLens* mit transparentem Display (Sauer, 2018), b) *Virtual reality* Brille *Vive* mit opakem Display (Queisner, 2018).

Abb. 2, a) Klassisches Schnittbild, b) Aus einzelnen Schichten berechnetes 3D-Modell der Leber ermöglicht eine bessere Lokalisierung der Ausbreitung des Tumors (grün) und Überschneidungen mit gesundem Gewebe (Sauer, Queisner, 2018).

Abb. 3, Darstellungsprinzip der Überlagerung von Bild (blau) und Operationsgebiet (schwarz) in einer *mixed reality* Brille aus der Perspektive von Chirurg*innen (Euler, Queisner, CC BY-NC 4.0).

Abb. 4, Ivan Sutherland, *head-mounted* Display (um 1967, Boston, Harvard University, Mountain View, CA, Computer History Museum, 2016).

Abb. 5, a) Mit einem *head-up* Display soll dem chirurgischen Personal Vitalparameter ins Sichtfeld angezeigt werden, b) Die Aufmerksamkeit soll so vom externen Monitor auf die Patient*innen verlagert werden (*Philips Healthcare*, 2013).

Abb. 6, Die weithin rezipierte Konzeptstudie „*The Future of Search*“ stellte erste Ansätze zur Darstellung raumbezogener Informationen auf transparenten Bildschirmen vor (Mac Funamizu, 2013).

Abb. 7, Die Überlagerung von Planbild und Sichtfeld verbessert in der industriellen Produktion die Hand-Auge-Koordination (*Microsoft*, 2019).

Abb. 8, Die Darstellung über dem Operationsgebiet soll das räumliche Verständnis komplexer anatomischer Strukturen verbessern (*Philips Healthcare, Microsoft*, 2019).

Abb. 9, Bereits 2017 erprobte die Charité – Universitätsmedizin Berlin die Positionierung der Bildgebung über dem Operationsgebiet (Sauer, Queisner, 2017).

Abb. 10, In der laparoskopischen Chirurgie muss von der Bildschirmdarstellung links im Bild auf die Lage und das Volumen der Anatomie der Patientin rechts im Bild geschlossen werden (Queisner, Euler, CC BY-NC 4.0).

Abb. 11, a) & b) Darstellungsoptionen anatomischer Strukturen mit einer *mixed reality* Brille, (Queisner, Pogorzelskiy, Sauer, CC BY-NC 4.0).

Abb. 12, a) Berührungslose Interaktion ermöglicht die Bildmanipulation, ohne den sterilen Bereich zu verlassen b) Die Darstellung bewegt sich bei einem Wegschauen oder Positionswechsel des chirurgischen Personals nicht mit, sondern bleibt wie ein reales Objekt im Raum stehen (Sauer, Queisner, 2018).

Abb. 13, Darstellungskonzept zur Einblendung des intraoperativen Ultraschallbildes (Pogorzelskiy, Queisner, Sauer, 2019, CC BY-NC 4.0).

Abb. 14, Patientenspezifischer Prototyp zur Erprobung unterschiedlicher Darstellungsstrategien am Beispiel eines offenen Eingriffs an der Leber (Moosburner, 2018, CC BY-NC 4.0).

Abb. 15, a) & b) Unterschiedliche Helligkeitsstufen ermöglichen das Wechseln zwischen virtueller und realer Anatomie (Pogorzelskiy, Queisner, Remde, Sauer, CC BY-NC 4.0).

Abb. 16, Umrisslinien zeigen die Ausdehnung eines Tumors (Pogorzelskiy, Queisner, Remde, Sauer, CC BY-NC 4.0).

Abb. 17, Darstellungskonzept zur Darstellung einer Schnittebene mithilfe von Umrisslinien (Pogorzelskiy, Queisner, Sauer, CC BY-NC 4.0).

Abb. 18, Unterschiedliche Graustufen vermitteln Volumen und Tiefe (Pogorzelskiy, Queisner, Sauer, CC BY-NC 4.0).

Abb. 19, Topografische Hilfslinien auf der sichtbaren Oberfläche erleichtern durch das Raster die Wahrnehmung darunter liegender Strukturen (Pogorzelskiy, Queisner, Remde, Sauer, CC BY-NC 4.0).

Abb. 20, Die fehlende Maskierung der Darstellung verringert den Tiefeneindruck deutlich (Pogorzelskiy, Queisner, Remde, Sauer, CC BY-NC 4.0).

Abb. 21, Konzeptstudien zu a) *HoloLens* (*Microsoft*) und b) *Magic Leap 1* (*Magic Leap*) zeigen neue Anzeigekonzepte, bei denen alle relevanten Informationen im Sichtfeld der Akteure angezeigt werden sollen. Andere Bildschirme sollen hingegen aus dem Operationssaal verschwinden.

Abb. 22, Die blaue Einfärbung der Gefäße ist vor den ebenfalls blauen Abdeckungen nicht ausreichend kontrastreich (Sauer, Queisner, 2017).

Abb. 23, Robotische Operationssysteme wie das *Da-Vinci*-System verfügen zwar über Lautsprecher und Mikrofone, mit denen die Kommunikation innerhalb des Teams verbessert werden kann. Ein anleitendes Lernen wird durch diese Anordnung jedoch erschwert und kann in der Regel nur über eine weitere Konsole realisiert werden (Queisner, 2020)

Abb. 24, Beispiel für die VR-basierte Vermittlung von implizitem Wissen (*tacit knowledge*) (*FundamentalVR*, 2020).

Tab. 1, Vergleich der wichtigsten verfügbaren Anwendungen zur Aufnahme volumetrischer Videos außerhalb aufwändiger Produktionsstudios.

Abb. 26, a) Darstellung der volumetrischen Daten als Punktwolke (*point cloud*), b) Darstellung in einer geschlossenen Polygonstruktur (*mesh*) (Queisner, Sauer, Pogorzelskiy, Remde, 2019).

Abb. 27, Fotogrammetrie-Modell eines Operationssaals am Campus Charité Mitte, Charité - Universitätsmedizin Berlin (Queisner, Sauer, Pogorzelskiy, Remde, 2019).

Abb. 28, Detail mit Darstellung des *wire-frame* Modells (Queisner, Sauer, Pogorzelskiy, Remde, 2019).

Abb. 29, Installation eines Aufnahmemoduls, bestehend aus Tiefensensor und Videokamera, Charité - Universitätsmedizin Berlin (Queisner, 2018).

Abb. 30: Steuerung der Aufnahmemodule von einem zentralen Server außerhalb des Operationssaals, Charité - Universitätsmedizin Berlin (Queisner, 2018).

Abb. 31: Schematische Anordnung der volumetrischen Szene mit drei Aufnahme-Modulen und Server (Remde, Queisner, 2018).

Abb. 32, Vereinfachte Darstellung des Produktionsablaufs für volumetrische Videos. (Queisner, Pogorzelskiy, Remde, Sauer, 2019).

Abb. 33, Schematische Darstellung der Fusion von Textur und *mesh* (Queisner, Pogorzelskiy, Remde, Sauer, 2019).

Abb. 34, Detaillierte der Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte. a) Aufnahme von Tiefen- und Farbinformationen, b) Umwandlung der Punktwolke in ein *mesh*, c) Reduzierung von Artefakten, d) Mesh mit fusionierter Textur (Queisner, Pogorzelskiy, Remde, Sauer, 2019).

Abb. 35, a) & b) *Points of interest* bieten zusätzliche Metadaten, etwa zur Bedienung von Geräten oder zur Anzeige des sterilen Bereichs (Queisner, Pogorzelskiy, Remde, Sauer, 2019).

Abb. 36, Mithilfe der Controller kann durch die einzelnen Sequenzen der Operation navigiert werden (Queisner, Pogorzelskiy, Remde, Sauer, 2019).

Abb. 37, Unterschied zwischen 360° Video (a) und volumetrischem Video (b). Volumetrisches Video berücksichtigt die Bewegung, Größe und Position von Benutzer*innen; 360° Videos ermöglichen nur Drehbewegungen von einer festen Position aus (Pogorzelskiy, Queisner, Sauer, 2019).

Abb. 38, Die Änderung der Betrachtungsposition offenbart Bereiche, die durch die Sensoren nicht erfasst werden. Für einen erweiterten Bildraum muss die Anzahl der Sensoren erhöht werden (Queisner, Sauer, Pogorzelskiy, Remde, 2019).

Abstrakt (deutsch)

Die Arbeit untersucht die Anwendungsfelder, Darstellungsprinzipien und Funktionsweise von *extended reality* in der chirurgischen Praxis. Anhand zweier Fallstudien zu *mixed* und *virtual reality* werden die Einsatzorte und Praktiken von *head-mounted* Displays sowie das erforderliche Anwendungswissen herausgearbeitet. An den Beispielen der Einblendung anatomischer Darstellungen ins Sichtfeld des chirurgischen Personals sowie der volumetrischen Darstellung chirurgischer Arbeitsabläufe in einer virtuellen Trainingsumgebung werden zwei konkrete Anwendungsszenarien für den Einsatz von *extended reality* in der chirurgischen Praxis entwickelt. Darauf aufbauend werden die Chancen und Risiken evaluiert, die sich insgesamt für chirurgische Handlungen und Entscheidungen im Bezug auf die Wahrnehmung, Interpretation und Gestaltung von Bildern der *extended reality* ergeben.

Abstract (English)

The work investigates the technology, application and design of extended reality in surgical practice. Based on two case studies on mixed and virtual reality, it analyses use of head-mounted displays as well as the required applied knowledge. Using the examples of superimposing anatomical images onto the field of vision of surgical staff and the volumetric representation of surgical workflows in a virtual training environment, two concrete application scenarios for the use of extended reality in surgical practice are developed. Based on these scenarios, the chances and risks are evaluated, which result overall for surgical acting and decision making in terms of perception, interpretation and design of images of extended reality.

1. Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die gegenwärtige Chirurgie steht vor der Herausforderung, ein zunehmend komplexes Gefüge bildgebender Verfahren und visueller Darstellungen in die Vorbereitung und Durchführung von Operationen zu integrieren. Digitale Bildgebung ist dabei ein grundlegender Bestandteil der täglichen Routine und Praxis: von der Diagnostik und Planung über die Wissensorganisation und -akkumulation bis in den Operationssaal hinein bildet sie heute die zentrale Wissens-, Entscheidungs- und Handlungsschnittstelle in der chirurgischen Praxis.

Mit der sogenannten **zweiten Welle der Digitalisierung**¹, die oft auch als **Industrie 4.0** bezeichnet wird,² vollzieht sich derzeit ein Paradigmenwechsel, der weitreichende Auswirkungen auf die etablierte Bildpraxis der Chirurgie hat. Ähnlich weitreichend, wie der Übergang von analogen elektronischen Werkzeugen zu digitalen Medientechnologien seit den 1970er Jahren die chirurgische Bildpraxis grundlegend veränderte, steht die Chirurgie heute vor einer neuen Generation digitaler Bildwerkzeuge, die das chirurgische Handlungsspektrum nicht mehr nur erweitern, sondern weit über die Bildgebung hinaus auch selbst in Prozesse eingreifen und diese vermitteln und steuern. Dies beruht auf einer neuen Generation von Sensoren, die in Verbindung mit entsprechenden Softwareanwendungen grundlegend neue Strategien zur Herstellung, Verarbeitung und Übertragung digitaler Bilder ermöglichen. Relevant ist zudem die nahezu unmittelbare zeitliche Verfügbarkeit von Bilddaten durch entsprechende Übertragungs- und Visualisierungstechnologien.

Die Interaktion zwischen chirurgischem Personal und Computern wird zunehmend durch Sensoren und autonome Algorithmen erweitert, unterstützt und kontrolliert. Dabei werden auch chirurgische Interventionen im Operationssaal inzwischen auch digital erfasst und ausgewertet. Der Medienwissenschaftler Alan Shapiro führt diese neue Generation digitaler Medientechnologien zuallererst auf "Fortschritte beim maschinellen Lernen, dem sogenannten

¹ Altmaier P. "Die Zweite Welle Der Digitalisierung Ist Europas Chance". *Handelsblatt*, October 28, 2019. <https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-die-zweite-welle-der-digitalisierung-ist-europas-chance/25160092.html>. [Zugriff: 1.3.2020]

² Schwab K. *Vierte industrielle Revolution*. Pantheon Verlag, 2017.

Deep Learning und bei neuronalen Netzwerken” zurück³. In Kombination mit der immer schnelleren Berechenbarkeit großer Datenmengen (*Big Data*) befördert das, was heute verallgemeinernd als künstliche Intelligenz bezeichnet wird, eine neue Generation digitaler Anwendungen, mit denen sich neue Möglichkeiten der Analyse von Bildern und der Interaktion mit ihnen verbinden. Während *Deep Learning* und neuronale Netzwerke bereits in den 1980er Jahren große Erwartungen geschürt haben, ermöglicht die Rechenleistung moderner Computer heute den Durchbruch auch außerhalb der Labore.

Ein solcher Durchbruch ist insbesondere im Umgang mit Bildern in der Chirurgie zu beobachten: **Bildgebende Verfahren, wie thermografische und elektromagnetische ebenso wie Röntgenstrahlen- oder Ultraschallverfahren stellen heute nicht mehr nur Sichtbarkeit jenseits des durch den Menschen visuell Wahrnehmbaren her, sondern sie agieren zunehmend in Kooperation mit Menschen und werden damit zur Bedingung chirurgischer Handlungen und Entscheidungen.** Dies trifft auf die Bildgebung in besonderem Maße zu und zeigt sich deutlich am Einsatz und der Funktionsweise digitaler Bilder innerhalb der chirurgischen Handlungskette. Bedingt durch die jüngere Technikentwicklung werden digitale Bilder heute zunehmend in mobile, sensorgesteuerte und augmentierende Visualisierungssysteme integriert und drei- oder vierdimensional dargestellt. Anstatt hauptsächlich als vor- und nachgelagerte Mittel der Diagnostik, Planung und Überwachung zu fungieren, ist die Produktion und Rezeption (radiologischer) Bildgebung und (chirurgischer) Intervention in der Praxis nicht mehr voneinander getrennt, sondern bildbasierte Arbeitsabläufe rücken mit der Digitalisierung enger zusammen.

Bei der bildgeführten Chirurgie werden die umfassenden Folgen dieser technologischen Aufrüstung besonders deutlich – hier haben sich die Fragen an die Bilder vervielfacht. Während die grundlegenden Interessen am Bild gleich bleiben (Bestätigung oder Widerlegung einer Diagnose, Lokalisation und Bestimmung des Ausmaßes der Erkrankung, Planung der Interventionen, Verlaufskontrolle), hat sich der Umfang der Bildarbeit mit den technischen Möglichkeiten deutlich erweitert. Operationen werden inzwischen in einem solchen Maße durch Echtzeit-Visualisierungen unterstützt, dass Bildschirmdarstellungen als die primären

³ Shaprio A. “Roadmap Künstliches Leben. Auf Dem Weg Zu Dialogischer Künstlicher Intelligenz”. *Schnittstellen* 33 (2019).

Referenzobjekte zunehmend an die Stelle realer Körper rücken, etwa in der roboterassistierten Chirurgie.^{4,5} Die Körper von Patient*innen sind heute in umfassende multimediale und multimodale Bildapparate eingespannt, die durch Schnittstellen, mechatronische und logistische Elemente laufend weiter ausgedehnt werden. Assistenzfunktionen, visuelle Steuerungsschnittstellen und intelligente Algorithmen antizipieren Entscheidungen und ermöglichen neue Formen der Darstellung und Navigation.

Die Chirurgie steht angesichts der Automatisierung, Intelligenz und Integriertheit, die heute mit medizinischen Bildgebungsprozessen verbunden werden, mehr denn je vor der Herausforderung, visuelle Werkzeuge und Schnittstellen so zu gestalten, dass sie den Zugriff des chirurgischen Personals auf Patient*innen sinnvoll anleiten und unterstützen. Dabei ergeben sich insbesondere Herausforderungen für das chirurgische Sehen und Handeln im Bezug auf die Wahrnehmung, Interpretation und Gestaltung von Bildern, die handlungsanleitend und sogar lebensentscheidend werden. Mit der Einbettung intelligenter Algorithmen in chirurgische Bildprozesse stellt sich deshalb nicht nur die Frage, inwieweit diese Technologien funktionieren und ob sie effizient sind, sondern auch, wie die *Blackbox* einer zunehmend intelligenten und automatisierten Bildarbeit letztlich beherrschbar ist und nachvollziehbar bleibt.

1.2 Fragestellung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Anwendungsfelder, Darstellungsprinzipien und Funktionsweise einer noch jungen Visualisierungs- und Darstellungsweise, der sogenannten *extended reality* (XR). *Extended reality* Technologien werden dem Feld des sogenannten *spatial* und *embodied computing* zugerechnet. Die grundlegende Eigenschaft von *spatial* und *embodied computing* besteht darin, dass sie das unmittelbare Umfeld und die Position von Nutzer*innen kontinuierlich und in nahezu Echtzeit räumlich erfasst. Damit können Bilddaten direkt auf die Position des Körpers und seine Lageveränderung im Raum bezogen werden, was im Vergleich zu etablierten Eingabe- und Steuerungsmedien, wie etwa der Maus und der Tastatur, neue Interaktionsmöglichkeiten mit digitalen Anwendungen eröffnet.

⁴ Sauer IM, Queisner M, Pogorzelskiy M, Pratschke J. "Operieren im digitalen Raum – Mixed Reality in der Chirurgie". In *Die Zukunft der Medizin*, edited by Erwin Böttinger, Jasper zu Putlitz, 71–83, Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 2019.

⁵ Queisner M. "Bildoperationen. Das Problem der Mensch-Maschine Interaktion bei bildgeführten Interventionen". In *Techniken des Leibes*, edited by Goppelsröder F, Sternagel J, 77–86, Velbrück Verlag, 2016.

Im Unterschied zu Lokalisierungstechnologien, die den Ort der Mediennutzung in die Mediennutzung einbeziehen, verorten die Techniken des *embodied* und *spatial computing* die Nutzer*innen nicht nur, sondern sie registrieren auch die topologische Qualität der räumlichen Umgebung. Sie können so relative Lagebeziehungen von Objekten und Personen im Raum erfassen, wie etwa die räumliche Ausrichtung von Nutzer*innen im Verhältnis zu einem Objekt. Im Vergleich zu Lokalisierungstechnologien, wie dem *global positioning system* (GPS), das die Koordinaten, bzw. die Position eines Sensors erfasst – etwa bei der Anpassung der Kartenansicht auf dem Smartphone – und damit das Paradigma des *mobile computing* einleiteten, verknüpfen die Vermessungstechnologien des *embodied* und *spatial computing* nun die physische Umwelt mit digitalen Daten und machen damit die analoge Umgebung von Nutzer*innen digital berechenbar. Entsprechende Technologien finden inzwischen immer weitere Verbreitung, etwa in Assistenzsystemen selbstfahrender Autos, in Gesichtserkennungssystemen von Smartphones oder in Robotersystemen für die industrielle Fertigung.

Für die Chirurgie sind diese Entwicklungen in zweierlei Hinsicht bedeutsam. Erstens ist die moderne **Chirurgie eine Disziplin, die maßgeblich auf der räumlichen Vermessung des Körpers und ihrer Visualisierung basiert** und zweitens ist einer der **Grundzüge chirurgischen Sehens und Handelns das Schließen vom Bild auf den Körper bzw. auf räumliche Zusammenhänge**. Diese beiden Aspekte – die Raumvermessung und die Verknüpfung von Bild und Umgebung – sind die beiden grundlegenden Innovationen des *embodied* und *spatial computing*. Und eben hier liegt ein Problem der chirurgischen Praxis, nämlich **die räumliche und zeitliche Trennung von Bild und Körper**. Bildgebung und Operationsgebiet können in der Regel nur nebeneinander oder nacheinander betrachtet werden. Hinzu kommt, dass Volumen in der Regel nur zweidimensional dargestellt werden, etwa im Falle von Schnittbildern oder des von Videoendoskopen erzeugten Bildmaterials. Während die in der Chirurgie genutzten Bildgebungsmethoden – wie wir sie kennen – Darstellung und Dargestelltes also voneinander trennen, können die Technologien des *embodied* und *spatial computing* nun Raum, Körper und Handlung untrennbar mit dem Bild verknüpfen.

Die vorliegende Arbeit analysiert das Potenzial und die Auswirkungen dieses Prinzips für die chirurgische Praxis am Beispiel von *extended reality* Anwendungen. **Die Techniken des *embodied* und *spatial computing* bilden die Grundlage für *extended reality* Anwendungen, die das Spektrum zwischen virtueller, augmentierter und gemischter Realität umfassen (VR, AR, MR).**

Mithilfe entsprechender Sensoren sind XR-Anwendungen dazu in der Lage, Bild und Sichtfeld in Echtzeit miteinander zu synchronisieren. Die Bilder der *extended reality* (XR) Technologien funktionieren also im Gegensatz zu klassischen Bildschirmdarstellungen nur abhängig von der Position und vom Sichtfeld der Betrachtung. Sie müssen Ort und Dynamik integrieren, da aufgrund der Anpassung ans Sichtfeld der Betrachter*innen der Körper selbst zum Eingabemedium der Steuerung wird.

Inzwischen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte zur Nutzung von *extended reality* Technologien, deren Gemeinsamkeit darin besteht, dass die dargestellten Bilder im Gegensatz zu klassischen Bildschirmdarstellungen **abhängig von Position und Blickrichtung der Betrachtung** sind. Insbesondere sogenannte *head-mounted* Displays versprechen raumbezogene Daten auf neue Weise zu operationalisieren und zu materialisieren, wie etwa *HoloLens* (Microsoft, Redmond, Washington, Vereinigte Staaten) oder *Index* (Valve, Bellevue, Washington, Vereinigte Staaten, **Abb. 1, a & b**). *Head-mounted* Displays verfügen entweder über einen augennahen Bildschirm oder projizieren Bilder direkt auf die Netzhaut der Nutzer*innen. Die Besonderheit ist dabei, dass ein Trackingsystem die Bilder an die Blickrichtung der Benutzer*innen anpasst, indem es den Körper und die Umgebung der Benutzer*innen registriert. Anhand von Referenzpunkten, die in der Regel über eine Infrarotprojektion erfasst werden, kann das System auch Bewegungen erfassen und das Bild in (nahezu) Echtzeit anpassen.

Die daraus resultierende raumzeitliche Verzahnung von Bild, Körper und Handlung impliziert ein grundlegend anderes Konzept der Arbeit mit dem Bild. Sie ermöglicht neue Formen der Interaktion mit digitalen Bildern und Prozessen, deren Auswirkungen auf die chirurgische Praxis in der vorliegenden Arbeit vorgestellt und diskutiert werden. Während in anderen Branchen, wie der Architektur, der Fernwartung von Maschinen oder der industriellen Fertigung bereits erste kommerzielle Lösungen existieren, soll geklärt werden, welche Anwendungsszenarien in der Chirurgie vielversprechend sind und unter welchen Bedingungen sie umgesetzt werden können.



a)



b)

Abb. 1, a) Mixed reality Brille HoloLens mit transparentem Display, b) Virtual reality Brille Vive mit opakem Display.

Welche Probleme diese neuen Bildgebungs- und Messverfahren der *extended reality* Technologien aber in der Chirurgie lösen sollen, ist trotz zuletzt stark wachsenden Investitionen der Medizintechnik in XR-Technologien⁶ nach wie vor kaum systematisch erschlossen und erfordert eine intensiverte Grundlagenforschung. Zwar zeichnen sich in der Chirurgie

⁶ Bloxham K. *XR Industry Insight Report*. VR Intelligence, 2019.

vielversprechende Anwendungsszenarien ab, etwa in der Patientenkommunikation, der chirurgischen Planung oder in der Aus- und Weiterbildung. Gemessen an den hohen Erwartungen sind aber bisher erst wenige überzeugende Anwendungen in der Praxis verfügbar. Der Gesundheitssektor steht noch am Anfang der Entwicklung. Nach wie vor ist nicht ausreichend geklärt, was die neuen Technologien leisten können und was nicht. Eine Nutzbarmachung und Integration dieser neuen sensorbasierten Bildgebungs- und Messverfahren für die chirurgische Praxis erfordert daher zuallererst die systematische Beschreibung der konkreten Einsatzorte, Praktiken und des erforderlichen Wissens im Umgang mit den neuen Technologien.

Die vorliegende Arbeit soll dafür grundlegende inhaltliche und methodische Ansatzpunkte liefern. Den Ausgangspunkt bildet dabei die Annahme, dass die Lokalisierungs- und Vermessungstechnologien des *embodied* und *spatial computing* nicht nur in technischer Hinsicht eine Herausforderung für die Wissenschaften darstellen, sondern auch neue Ansätze zur Handhabung und zur Gestaltung der neuen Schnittstellen und Bildformate erfordern. Hier liegt bisher ein Defizit in der Forschung: während technische Lösungen für *extended reality* Technologien in der Chirurgie bereits erschlossen werden, sind die Anwendungsfelder und -situationen bis auf wenige Ausnahmen ebenso wenig systematisch erfasst worden, wie die Gestaltung der entsprechenden Bildformate und das notwendige visuelle Anwendungswissen.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt deshalb auf der Untersuchung der **Anwendungsfelder**, **Darstellungsprinzipien** und **Funktionsweise** von *extended reality* in der chirurgischen Praxis. Mit dem Ziel, konkrete Vorschläge für die Nutzbarmachung und Integration von *extended reality* in der Chirurgie zu artikulieren, leitet sich daraus ein Arbeitsprogramm ab, das die folgenden Leitfragen umfasst:

- a) **Welche chirurgischen Arbeitsschritte und Handlungsabläufe können durch XR-basierte Anzeigesysteme verbessert werden? Dies betrifft die Identifikation konkreter Anwendungskontexte und Einsatzorte.**
- b) **Wie müssen Handlungsschnittstellen und -prozesse gestaltet sein, um XR-basierte Anzeigesysteme handhabbar und damit alltagstauglich zu machen? Dies betrifft die Definition von Gestaltungskriterien und Darstellungsprinzipien, um Körper und Objekte in ihrer Materialität und Räumlichkeit besser erfahrbar zu machen.**

- c) **Über welches Wissen muss das chirurgische Personal verfügen, um XR-basierte Praktiken erfolgreich in Ihre Arbeitsabläufe zu integrieren? Dies betrifft die Evaluation von Veränderungen der zugrunde liegenden Praktiken, insbesondere chirurgischer Sehweisen und Arbeitsabläufe.**

Eine Integration XR-basierter Anzeige- und Interaktionssysteme in die klinische Infrastruktur muss also erstens die Situationen aufzeigen, in denen sie sinnvoll verwendet werden können (Anwendungsszenarien), zweitens die Darstellungsweisen digitaler Bilder im medizinischen Arbeitsablauf identifizieren (Gestaltung) sowie drittens die Art und Weise ihrer Benutzung klären (Praktiken). Nur, wenn diese Fragestellungen die technischen Herausforderungen flankieren, kann geklärt werden, ob und inwieweit *extended reality* Technologien jenes neue Paradigma bildbasierter Praktiken sein können, als welches sie uns derzeit von Industrie und Forschung gleichermaßen dargestellt werden.

1.3 Methodik & Vorgehen

Der Hauptteil der vorliegenden Arbeit untersucht die drei Aspekte – Anwendungsfelder, Darstellungsprinzipien und Funktionsweise – anhand **je einer Fallstudie zu *mixed reality* und *virtual reality***. Dies sind aktuell die beiden wichtigsten Bereiche von *extended reality* Technologien, deren Forschungsstand zunächst vorgestellt werden, um dann anhand konkreter Anwendungsbeispiele ihr Potenzial für die chirurgische Praxis aufzuzeigen, aktuelle Defizite zu diskutieren und praktische Lösungsvorschläge zu machen. Die Anwendungsbeispiele basieren in beiden Fallstudien auf einem entwickelten **Prototyp**, mit dem die Fragestellungen praxisnah erarbeitet werden. Auf der Grundlage der Evaluation der Prototypen werden aus den Fallstudien im Anschluss **weitergehende Entwicklungstendenzen** abgeleitet, die zeigen sollen, wie *extended reality* Technologien die Interaktion mit medizinischer Bildgebung verändern und welche neuen Handlungsmöglichkeiten und -probleme sich daraus ergeben. Dabei soll über die exemplarischen Fallstudien hinaus dargelegt werden, welche grundsätzlichen Anpassungen chirurgischer Sehweisen und Arbeitsabläufe für den erfolgreichen Einsatz von *extended reality* Technologien in der Praxis erforderlich sind.

Ziel der **Fallstudie “*Mixed reality: spatial und embodied computing in der Viszeralchirurgie*”** ist es, die intraoperativen Situationen zu bestimmen, in denen *mixed reality* in der Leberchirurgie sinnvoll eingesetzt werden kann, Gestaltungsprinzipien für die Annotation und Überlagerung

anatomischer Strukturen mit präoperativer Bildgebung herauszuarbeiten sowie das für den Umgang mit *mixed reality* erforderliche praktische Bildwissen zu erschließen.

Die **Fallstudie “*Virtual Reality: virtuelle Hospitation in der chirurgischen Aus- und Weiterbildung*”** stellt ein Konzept für die videobasierte Simulation chirurgischer Arbeitsabläufe vor. Dieses Konzept besteht aus einem technischen Workflow zur volumetrischen Aufnahme chirurgischer Eingriffe im Operationssaal sowie deren Darstellung in einem virtuellen Operationssaal. Dieser sogenannte *VolumetricOR* ist als neue Methode für den Wissensaustausch konzipiert und hat das Ziel, das Wissen über Arbeitsabläufe und -kontexte der chirurgischen Gesundheitsberufe im Operationssaal, wie zum Beispiel Chirurg*innen, Anästhesist*innen und operationstechnischen Assistent*innen, zu verbessern und zu fördern. In einer fotorealistischen *virtual reality* Umgebung können die Benutzer*innen chirurgische Arbeitsprozesse stereoskopisch, in realer Skalierung und aus beliebiger Perspektive hospitationsähnlich nachvollziehen.

2. Fallstudie *Mixed Reality: spatial und embodied computing* in der Viszeralchirurgie

2.1 Ausgangssituation: Synthese von Bildgebung und Intervention

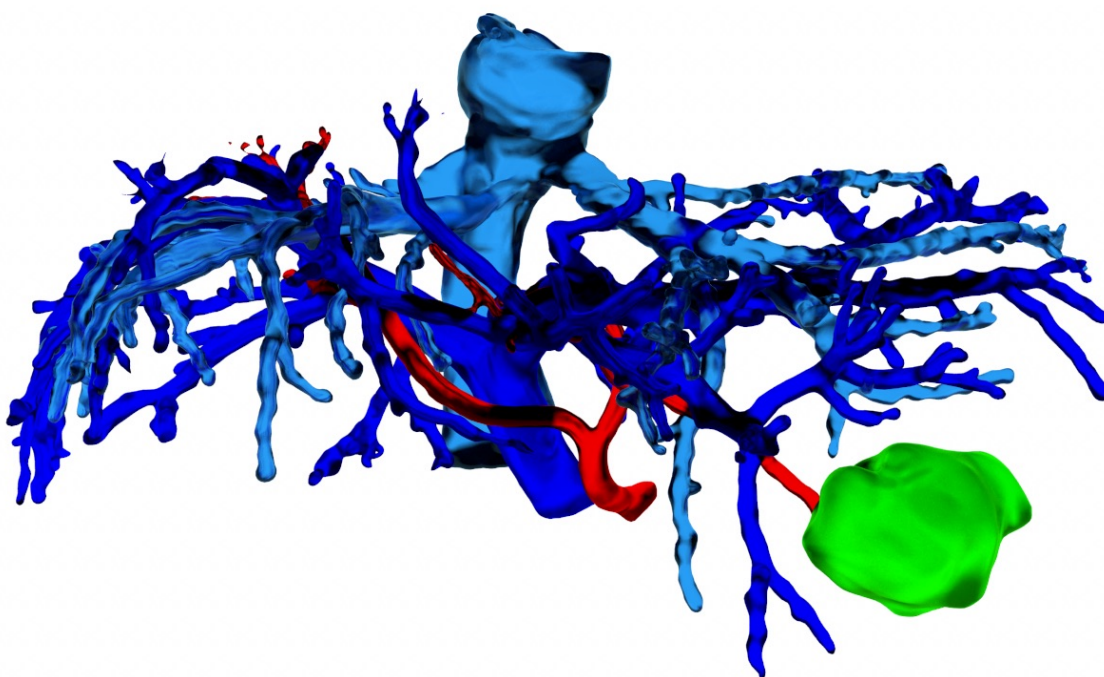
Chirurgisches Handeln – also die Planung und eigentliche Durchführung einer Operation – basiert maßgeblich auf Kenntnissen der individuellen Anatomie, der Pathologie und – in Kooperation mit den betreuenden Anästhesist*innen – der Physiologie während des operativen Eingriffs. Ein erfolgreicher chirurgischer Eingriff erfordert die **genaue Kenntnis der Lagebeziehung krankhafter Veränderungen**, zum Beispiel eines bösartigen Tumors, zu relevanten, erhaltenswerten Organstrukturen. Komplexe Operationen werden daher auf Basis der Computertomografie (CT) oder der Magnetresonanztomografie (MRT) geplant. CT und MRT stellen die Teile des Körpers jedoch schichtweise als sogenannte Schnittbilder dar. In der Planungsphase und im Rahmen der eigentlichen Operation müssen sich die behandelnden Ärzt*innen diese **zweidimensionalen Schnittbilder bisher räumlich vorstellen, um sie während des Eingriffs auf die Anatomie des Patienten zu beziehen**. Das chirurgische Personal wechselt (*“scrollt”*) dabei in der Regel mit der Maus zwischen den einzelnen CT- oder MRT-Schichten, um die entsprechenden Volumen und Verläufe mental zu rekonstruieren. Diese räumliche Vorstellung wird während des Eingriffes zusätzlich durch die Darstellung der zweidimensionalen CT- und MRT-Bilder auf Wandbildschirmen im Operationssaal unterstützt. Die Überführung von zweidimensionaler Bildgebung auf die dreidimensionalen anatomischen Strukturen von Patient*innen erfordert sowohl in der Planung, als auch während des Eingriffs ein komplexes Raumverständnis, dessen zugrundeliegende Sehschule einen wichtigen Bestandteil der chirurgischen Ausbildung darstellt.

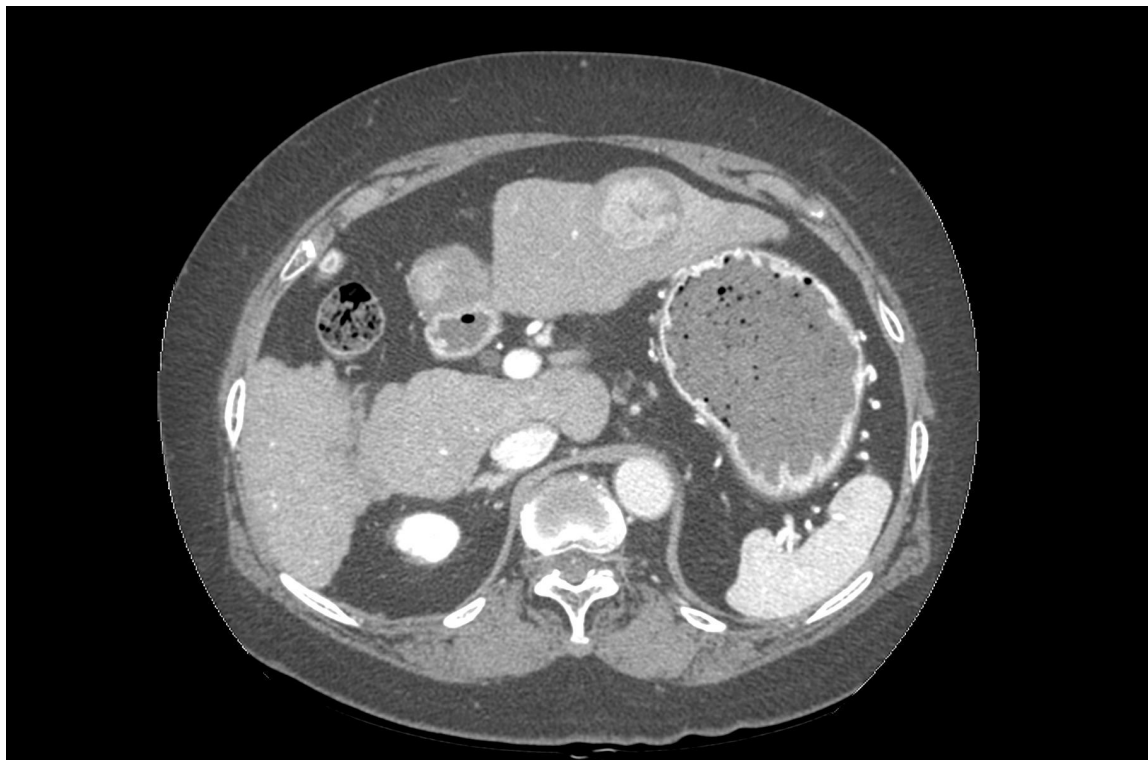
Die Handlungsmöglichkeiten der chirurgischen Praxis werden also grundsätzlich von der Sichtbarmachung des Körpers definiert. Erst wenn Sichtbarkeit im Operationsgebiet durch die entsprechende Visualisierung und Präparierung des Patientenkörpers gewährleistet ist, kann ein operativer Eingriff gelingen. Besonders in der Chirurgie haben sich die Techniken des Zeigens und der Sichtbarmachung im Zuge der Einbindung von Echtzeitbildgebung und robotischen Applikationen in die Handlungsroutinen und -abläufe im Operationssaal zuletzt grundlegend verändert. In der radiologischen Praxis existieren inzwischen eine Reihe neuer Möglichkeiten, um räumliche Strukturen zu vermitteln. Dabei sollen beispielsweise stereoskopische Visualisierungstechniken (etwa 3D-Bildschirme oder *virtual reality* Systeme), 3D-Drucktechniken

(Stereolithografie oder Extrusionsdruck) sowie Projektionstechniken (etwa holografische Verfahren) die Differenzen zwischen Bild und Körper in Zukunft minimieren.

Die stereoskopische Darstellung in *virtual* und *mixed reality* Anwendungen, mit 3D-gedruckten Modellen aber auch bei herkömmlichen 3D Darstellungen auf dem Bildschirm in den bereits etablierten Softwareanwendungen, wie z.B. *syngo.via* (Siemens, Berlin, Deutschland), *MeVis* (MeVis Medical Solutions, Bremen, Deutschland), *Ziosoft* (Ziosoft, Tokyo, Japan), *OsiriX* (Pixmeo, Bernex, Schweiz) oder *3D Slicer* (The Slicer Community) bieten auf der Basis von Schnittbildern alternative Zugänge zu anatomische Strukturen, die bisher vorwiegend in der Diagnostik und Planung zum Einsatz kommen. Chirurgische Planungssoftware ermöglicht es in zunehmendem Maße, die Schnittbildgebung in 3D-Modelle zu übersetzen. Dies erlaubt eine gezielte Analyse der Lagebeziehung anatomischer Strukturen, etwa zwischen Tumor und Risikostrukturen (**Abb. 2, a & b**). Diese Art der Darstellung ersetzt zwar keineswegs das klassische Schnittbild, jedoch können Körpervolumen in größerer Analogie zur tatsächlichen Anatomie dargestellt werden – die Differenz zwischen Körper und Bildgebung wird verkleinert.

a)





b)

Abb. 2, a) Klassisches Schnittbild, **b)** aus einzelnen Schichten berechnetes 3D-Modell der Leber ermöglicht eine bessere Lokalisierung der Ausbreitung des Tumors (grün) und Überschneidungen mit gesundem Gewebe.

Parallel zu den zunehmend verbreiteten, dreidimensionalen – jedoch in der Regel nicht stereoskopischen – Visualisierungen auf klassischen 2D-Bildschirmen, ermöglicht eine zunehmend avancierte Sensorik in Verbindung mit der entsprechenden Rechenleistung nicht nur die Nutzung von 3D Bildgebung in die Diagnostik, sondern auch in den Operationssaal. In der Neurochirurgie werden bereits seit langem entsprechende Ortungssysteme genutzt, um Instrumente auf der Basis von 3D Darstellungen zu lokalisieren und die Navigation zu verbessern. Während anatomische Strukturen dabei aber in der Regel weiterhin auf einem vom Operationsgebiet separierten Monitor dargestellt werden, kann eine neue Generation von Sensoren inzwischen räumliche Situationen kontinuierlich registrieren und in Echtzeit an das Operationsgebiet anpassen. **Neben der Darstellungsform ändert sich hier auch der Darstellungsort und die Darstellungssituation.** Mithilfe von am Kopf getragenen transparenten Bildschirmen, sogenannten *head-mounted Displays* (HMD) können Chirurg*innen die Bildgebung und Operationsgebiet räumlich miteinander synchronisieren. Das Personal schaut dabei nicht mehr auf einen statischen Monitor, sondern bekommt die Bildgebung adaptiv und stereoskopisch eingeblendet (**Abb. 3**). Es kann so für den Eingriff relevante anatomische Strukturen und handlungsrelevante Informationen drei- bzw. vierdimensional ins eigene

Sichtfeld einblenden und raumkonsistent bewerten. Mit diesen Möglichkeiten instantaner Bildherstellung, -verarbeitung und -übertragung, die zur Lagebestimmung von Strukturen oder zur Überwachung von Eingriffen in Echtzeit eingesetzt werden können, ergeben sich neue Möglichkeiten für die chirurgische Praxis.

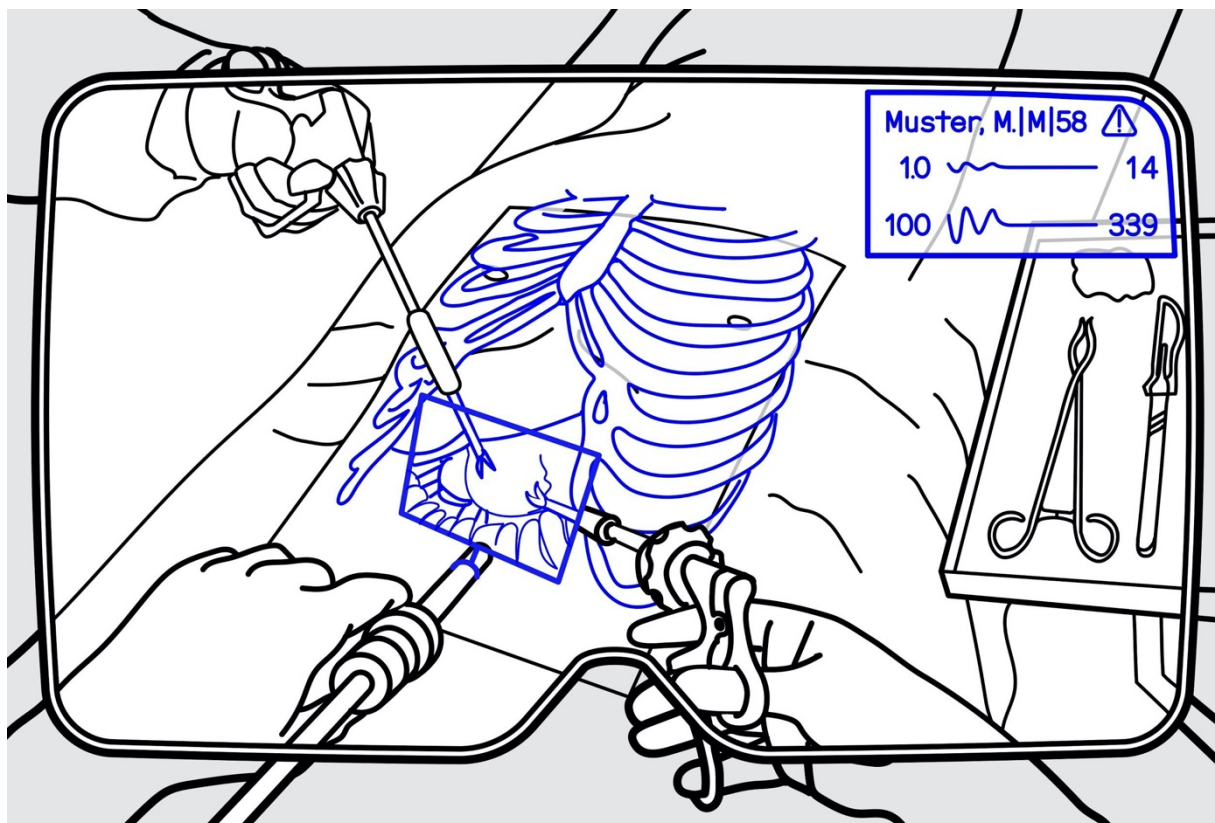


Abb. 3. Darstellungsprinzip der Überlagerung von Bild (blau) und Operationsgebiet (schwarz) in einer *mixed reality* Brille aus der Perspektive von Chirurg*innen.

Die ortsbezogene Einbindung von Bildern ins Sichtfeld des Betrachters hebt die räumliche Trennung von Bildschirmdarstellung und Operationsgebiet auf: Im Gegensatz zu klassischen Bildschirmdarstellungen im Operationssaal, die unabhängig von Position und Blickrichtung sind, versprechen *mixed reality* Darstellungen eine maßgebliche Reduzierung des Abstraktionsschritts von der präoperativen Bildgebung zur realen anatomischen Struktur. Bisher können etwa eine CT-basierte Darstellung der Leber und die reale Leber im Operationssaal nur nebeneinander oder nacheinander betrachtet werden. Dafür muss die Aufmerksamkeit kontinuierlich zwischen Bildschirm und Patient hin und her wechseln. Dabei muss ein komplexes Gefüge von Bildschirmen, Bildtechniken und Bildinformationen in den Arbeitsablauf integriert werden. Mit dem Einsatz von *mixed reality* Techniken verbindet sich das Versprechen,

das Bildinformationen an einem zentralen Ort, nämlich im Sichtfeld des chirurgischen Personals zusammengeführt werden. Virtuelle und physische Anatomie sollen in Echtzeit räumlich miteinander synchronisiert werden, sodass Position und Maßstab miteinander übereinstimmen. Das ist ein grundlegend neuer Ansatz in der intraoperativen Bildgebung, denn diese Bilder sind im Gegensatz zu klassischen Bildschirmdarstellungen abhängig von der Position und von der Blickrichtung der Betrachtung. Diese adaptive Darstellung zum Operationsgebiet stehen für ein neues Feld in der bildgeführten Chirurgie, in der körper- und raumbezogene Daten die chirurgische Handlung in der Therapie gezielt anleiten.

2.2 Fragestellung und Methodik

Die Darstellungen der *mixed reality* stehen für eine neue Bildpraxis, die daran zu messen ist, wie sie chirurgisches Sehen und Handeln im operativen Prozess ermöglicht oder erschwert. Gerade, weil *mixed reality* Brillen zunehmend als zentrale Schnittstelle thematisiert werden, in der in Zukunft alle relevanten Informationsflüsse im Operationssaal zusammenlaufen sollen,⁷ stellt sich umso dringlicher die Frage nach der Identifikation entsprechender Anwendungskontexte und Einsatzorte, der ihnen zugrunde liegenden Praktiken der Handhabung der Brillen sowie der Gestaltungskonzepte und Techniken zur Darstellung anatomischer Strukturen. Mit dem Ziel, die Akteure in der klinischen Praxis und in der medizintechnischen Entwicklung gleichermaßen dafür zu sensibilisieren, wie *mixed reality* chirurgische Arbeitsabläufe verändert und verbessern kann, wird zunächst der grundlegende Wandel bildschirmbasierter Praktiken im Operationssaal in den Blick genommen. An die Darstellung des Forschungsstands schließt sich die Beschreibung der operativen Rahmenbedingungen für den Einsatz von *mixed reality* in der Chirurgie an, für die mögliche Anwendungssituationen beschrieben werden, welche mit existierenden Bildpraktiken im Operationssaal verglichen werden. Um den Nutzen dieser neuen Bildpraxis im Operationssaal für die identifizierten Anwendungssituationen zu prüfen, adressiert die vorliegende Fallstudie drei grundlegende Fragen:

a) Wie verändern MR-basierte Anzeigesysteme chirurgischen Arbeitsschritte und Handlungsabläufe? Hier wird insbesondere der Mehrwert von *mixed reality* in Diagnostik, Planung und Therapie herausgearbeitet. Dies betrifft vor allem die Interaktion mit dem Bild. Der Fokus liegt

⁷ Sielhorst T, Feuerstein M, and Navab N. "Advanced Medical Displays: A Literature Review of Augmented Reality". *Journal of Display Technology* 4, no. 4 (December 2008): 451–67.

dabei auf dem **iterativen Zusammenspiel von Strukturen und Prozessen vor und hinter dem Bildschirm, also auf den operativen Bedingungen transparenter Bilder**. Wie verändern *mixed reality* Brillen die Anordnungen und Nutzung medizinischer Bildschirme? Wie beeinflussen sie die räumliche Orientierung und die Navigation der Instrumente durch Chirurg*innen? Inwieweit beeinflussen sie die Routine und den Arbeitsablauf des chirurgischen Personals?

b) Wie müssen Handlungsschnittstellen und -prozesse gestaltet sein, um MR-basierte Anzeigesysteme handhabbar und damit alltagstauglich zu machen? Hier werden konkrete Lösungsvorschläge gemacht, wie *mixed reality* Darstellungen in Designs übersetzt werden können, die ihre besondere Dynamik unterstützen. Dies betrifft insbesondere den Vergleich unterschiedlicher Gestaltungsprinzipien, um zu zeigen, wie relevante Strukturen besser erkannt und somit schneller und sicherer operiert werden können. Dazu gehören visuelle Parameter wie Farbe, Kontrast, Textur, Kontur, Beleuchtung und Transparenz zur Darstellung anatomischer Strukturen sowie die Anforderungen an die Interaktion zur Manipulation dieser Bilder, wie z.B. Segmentierung, Platzierung, Drehung, Skalierung oder Hervorhebung. Zur Untersuchung dieser Aspekte wurde ein prototypischer Patientenkörper nachgebaut, mit dem die unterschiedlichen Darstellungsstrategien praxisnah erprobt werden können.

c) Über welches Wissen müssen chirurgisches Personal und Entwickler*innen verfügen, um MR-basierte Praktiken erfolgreich in Arbeitsabläufe zu integrieren? Die 4D-Visualisierung anatomischer Strukturen fordert nicht nur die Sensorik (Ortung bzw. *tracking*, Verfolgung bzw. *tracing*) maximal heraus, sondern auch die kognitiven und intellektuellen Fähigkeiten der Nutzer*innen. Dies betrifft insbesondere die Frage, wie sich das Sehen und die Interpretation von Bildern verändern muss, wenn Körperräume und -volumen anders dargestellt werden.

2.3 Forschungsstand

Das technische Funktionsprinzip von *mixed reality* basiert darauf, dass Licht auf einen halbtransparenten Schirm – einen sogenannten *combiner* – projiziert wird, der es auf die Netzhaut umlenkt und gleichzeitig Licht jenseits des Bildschirms durchlässt. So entsteht ein teilweise transparentes Bild, welches das Sichtfeld nicht komplett verdeckt. Diese Grundidee dieser Darstellungsweise existiert seit vielen Jahrzehnten auf Basis unterschiedlicher technischer Lösungen,⁸ die hier im Einzelnen nicht diskutiert werden sollen. Ivan Sutherlands Experimente

⁸ Ausführlich dazu: Woodrow B. ed., *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. CRC Press, 2015.

mit transparenten Displays in den späten 1960er Jahren stellen sicherlich den prominentesten frühen Versuch dar, Bild und Raum in Echtzeit zu korrelieren. Zusammen mit seinem Schüler Bob Sproull konstruierte Sutherland ein am Kopf getragenes Display, das ein einfaches Drahtgittermodell (*wire-frame model*) auf ein binokulares Display projizierte. Sutherlands optisches System bestand aus zwei Kathodenstrahlröhren, die jeweils vor den Augen der Benutzer*innen platziert wurden (**Abb. 4**). Da das Display aus halb versilberten Spiegeln bestand, konnten Benutzer*innen gleichzeitig Bilder auf den Kathodenstrahlröhren und aus ihrer Umgebung sehen. Die Perspektive des *wire-frame* Modells passt sich der Kopfposition von Benutzer*innen an. Verändern Betrachter*innen die Perspektive durch eine Kopfbewegung, dreht sich die Darstellung in Bezug auf das Raumkoordinatensystem.⁹

Sutherland hatte bereits damals eine klare Vorstellung von den Funktionen dieser bildschirmbasierten Darstellungsweise. So sollten Bilder entweder "körperlos" im Raum schweben oder mit Karten, Schreibtischoberflächen, Wänden oder den Tasten einer Schreibmaschine zusammenzufallen.¹⁰ In "*The Ultimate Display*" von 1968, das bemerkenswerterweise der Erfindung des Personal Computers vorausgeht, konstatiert Sutherland: "the user [...] of today's visual displays can easily make solid objects transparent – he can see through matter! The kinesthetic display [...] will lead not only to new methods of controlling machines but also to interesting understandings of the mechanisms of vision".¹¹

⁹ Sutherland IE. "A Head-Mounted Three Dimensional Display". In *Proceedings of the December 9-11 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I on - AFIPS 68 (Fall, Part I)*. ACM Press, 1968, 758.

¹⁰ ebd.: 759.

¹¹ Sutherland IE. "The Ultimate Display". In *Information Processing: Proceedings of International Federation for Information Processing Congress*. Macmillan and Co., 1965, 508.



Abb. 4, Ivan Sutherland, *head-mounted Display.*, um 1967.

Sutherlands Experimente identifizierten das Darstellungsprinzip der Überlagerung wie keine andere Arbeit zuvor und schufen damit die technische und konzeptuelle Grundlage von *mixed reality* als Bildpraxis. Sutherland betonte bereits damals, dass die wichtigste **Qualität dieser Darstellungsweise darin bestehe, sichtbare Strukturen, räumlich zu überlagern und zu erweitern**.¹² Das mag aus heutiger Sicht offensichtlich klingen, doch es ist umso erstaunlicher, dass die Mehrheit der heutigen Anwendungsfälle dieses grundlegende Funktionsmerkmal nicht berücksichtigt. Dies lässt sich vor allem auf die technische Komplexität der dafür erforderlichen Registrierung der räumlichen Umgebung zurückführen, die auch heute noch die technischen Möglichkeiten maximal herausfordert. Zu einer (von vielen) Aktualisierungen von Sutherlands Idee trug insbesondere *Googles* (Mountain View, Kalifornien, Vereinigte Staaten) Konzept *Project Glass* im Jahr 2013 bei. Obwohl es sich dabei nicht um ein *mixed reality* Display handelte, sondern um ein sogenanntes *head-up* Display, das Nutzer*innen zwar ortsbezogene anzeigt, die Darstellungen aber nur an den Ort, nicht aber den topografischen Raum der Benutzer*innen anpasst. So konnte das chirurgische Personal im Operationssaal etwa Vitaldaten direkt im eigenen Sichtfeld betrachten, ohne den Blick auf einen externen Monitor abwenden zu müssen **(Abb. 5, a & b)**.

Obwohl sich das Konzept aufgrund der Darstellungsqualität und der komplizierten Interaktion im Operationssaal nicht durchsetzte, löste es mit seinem ortsbezogenen Darstellungskonzept eine breite Debatte über die **Adaptivität von Bild, Raum und Handlung** aus. Eine der populärsten Positionen in dieser Debatte war die weithin wahrgenommene Konzeptstudie *The Future of Search* von Mac Funamizu, ebenfalls aus dem Jahr 2013.¹³ Funamizu machte die Integration der Position des Bildschirms zum zentralen Element der Interaktion mit transparenten Displays. Die Überlagerung einer Szene oder eines Objekts mit einem transparenten Display, so Funamizus zentraler Gedanke, soll es Nutzer*innen in Zukunft ermöglichen, ausgehend von ihrer Blickposition räumlich zu navigieren und räumlich relevante Daten anzuzeigen **(Abb. 6)**.

¹² Sutherland IE. "The Ultimate Display". In *Information Processing: Proceedings of International Federation for Information Processing Congress*. Macmillan and Co., 1965.

¹³ Funamizu M. 'The Future of Search', <https://petit invention.wordpress.com/2008/02/10/Future-of-Internet-Search-Mobile-Version>. 2008.



a)



b)

Abb. 5, a) Mit einem *head-up* Display soll dem chirurgischen Personal Vitalparameter ins Sichtfeld angezeigt werden, **b)** Die Aufmerksamkeit soll so vom externen Monitor auf die Patient*innen verlagert werden.



Abb. 6, Die weithin rezipierte Konzeptstudie „The Future of Search“ stellte erste Ansätze zur Darstellung raumbezogener Informationen auf transparenten Bildschirmen vor.

Erst mit der Vorstellung der *mixed reality* Brille *HoloLens* (Microsoft) erreichte das Prinzip transparenter Displaytechnologien einen entscheidenden Durchbruch. Auch wenn das dahinterliegende Konzept der räumlichen Synchronisierung von virtuellen und realen Umgebungen noch am Anfang steht, ist inzwischen eine Verbreitung und ein Entwicklungsstand erreicht, der eine Verwendung in den unterschiedlichsten Branchen nahelegt. In ersten kommerziellen Anwendungen wird *mixed reality* bereits eingesetzt, etwa im Maschinenbau oder der Fernwartung. Im Flugzeugbau können beispielsweise einzelne Arbeitsschritte so dargestellt werden, dass sich Planungsbild und Sichtfeld räumlich überlagern (Abb. 7). Dadurch entfällt im Montagevorgang der Blick auf Anweisungen auf einem externen Bildschirm. Diese Form der computerassistierten Anleitung ist auch für die chirurgische Praxis denkbar.

Die von der chirurgischen Praxis gestellten hohen Erwartungen werden jedoch bisher zumeist noch nicht erfüllt. Der Anstieg des Investitionsvolumens¹⁴ in *mixed reality* Technologien resultiert zwar unter anderem in einer steigenden Anzahl verfügbarer Geräte und Anwendungen. Ein Durchbruch der Technologie in der Chirurgie ist trotz positiver Markterwartungen, zunehmender Förderungs- und Vernetzungsinitiativen aus Industrie und Forschung¹⁵ und einer rasch wachsenden Anzahl von Machbarkeitsstudien bisher jedoch noch nicht zu beobachten. Dies ist insbesondere auf technische Defizite und Schwierigkeiten in der Handhabung der Geräte zurückzuführen.^{16,17} Neben unzureichender Rechenleistung, Akkulaufzeit, Sichtfeldgröße, Positionsberechnung und Bildqualität der Geräte¹⁸ fehlen insbesondere noch überzeugende, skalierbare Anwendungsszenarien.

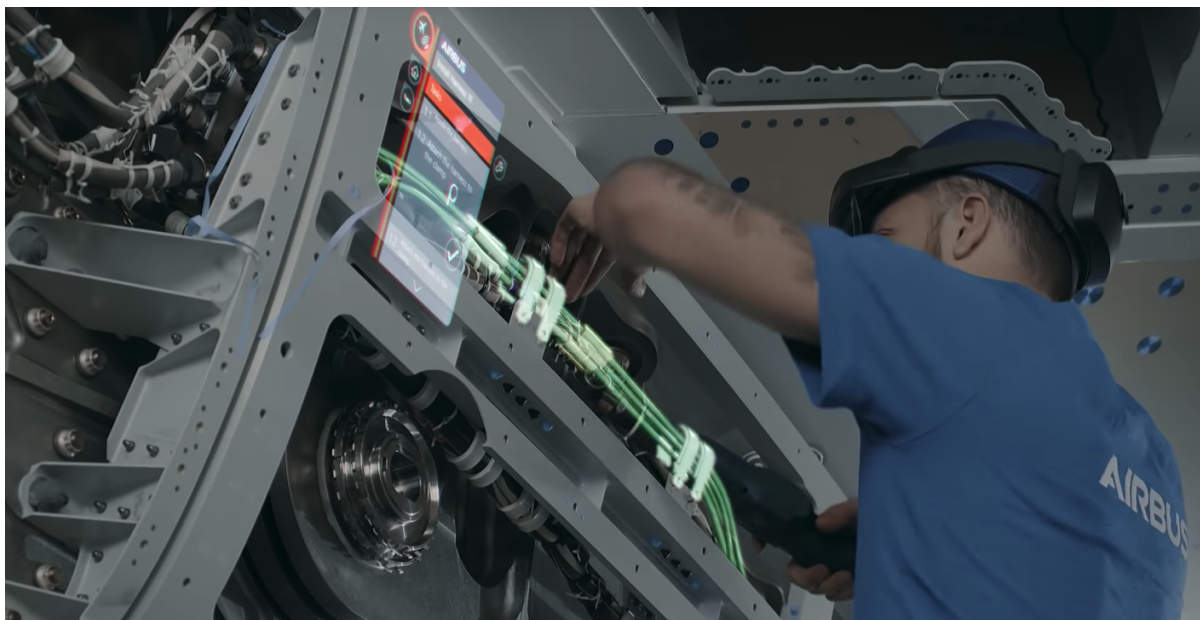


Abb. 7. Die Überlagerung von Planbild und Sichtfeld verbessert in der industriellen Produktion die Hand-Auge-Koordination.

¹⁴ DigiCapital. "AR/VR-Investments". 2020. <https://digi-capital.com/news/2017/11/1-Billion-Ar-Vr-Investment-in-q4-2-5-Billion-This-Year-so-Far>.

¹⁵ Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik. „Extended Reality for All – Moving the European XR Industry Forward”. 2005. http://xr4all.eu/wp-content/uploads/xr4all_d4.1_landscapereport_hhi_v1.o_public-1.pdf.

¹⁶ Mahmoud N, Grasa ÓG, Nicolau SA, Doignon C, Soler L, Marescaux J, and Montiel JM. "On-Patient See-through Augmented Reality Based on Visual SLAM." *Int J Comput Assist Radiol Surg* 12 (2017): 1–11.

¹⁷ Marescaux J, and Diana M. "Next Step in Minimally Invasive Surgery: Hybrid Image-Guided Surgery." *J Pediatr Surg* 50 (2015): 30–36.

¹⁸ Khor WS, Baker B, Amin K, Chan A, Patel K, and Wong J. "Augmented and Virtual Reality in Surgery-the Digital Surgical Environment: Applications, Limitations and Legal Pitfalls." *Ann Transl Med* 4 (2016): 1–10.

Dennoch ist der Einsatz von *extended reality* für den Operationssaal keine neue Idee und wird bereits seit mehreren Jahrzehnten untersucht.¹⁹ Mit der Verfügbarkeit von leistungsfähigeren, teilweise autonom einsetzbaren *mixed reality* Brillen (z.B. *Microsoft HoloLens* oder *Magic Leap*) wurden jedoch in den letzten Jahren deutlich mehr und in der Summe vielversprechendere technische Lösungsansätze in der Chirurgie erarbeitet und teilweise bereits klinisch evaluiert.^{20,21} Dabei standen Annotationen und Bildüberlagerungen bei Mikroskopie-gestützten Eingriffen in der Neurochirurgie.^{22,23} sowie bei laparoskopischen Eingriffen in der Viszeralchirurgie^{24, 25, 26, 27} im Vordergrund. *Mixed reality* Anwendungen in der offenen Bauchchirurgie basieren hingegen nach wie vor zumeist auf konventionellen Bildschirmtechnologien und -anordnungen, auch hier wird das besondere Potenzial von *mixed reality* aber immer wieder herausgestellt.^{28,29}

Für die Bildbetrachtung außerhalb des Operationssaals, insbesondere in der Planung, existieren ebenfalls bereits erste kommerzielle Anwendungen. So bieten Unternehmen wie *TeraRecon* (Foster City, CA, USA), *BrainLab* (München, Deutschland), *Medical Holodeck* (Zürich, Schweiz) oder *apoQlar* (Hamburg, Deutschland) Lösungen für die Darstellung anatomischer Strukturen mit *mixed reality* Brillen an. Bisher beschränken sich diese Darstellungen hauptsächlich auf die Generierung und Anzeige dreidimensionaler Bilddaten, mit denen die Planung komplexer

¹⁹ Vávra P, Roman J, Zonča P, Ihnát P, Němec M, Kumar J, Habib N, and El-Gendi A. "Recent Development of Augmented Reality in Surgery: A Review." *J Healthc Eng* 2017 (2017): 4574172.

²⁰ Qian L, Barthel A, Johnson A, Osgood G, Kazanzides P, Navab N, and Fuerst B. "Comparison of Optical See-through Head-Mounted Displays for Surgical Interventions with Object-Anchored 2D-Display." *Int J Comput Assist Radiol Surg* 12 (2017): 901–10.

²¹ Tepper OM, Rudy HL, Lefkowitz A, Weimer KA, Marks SM, Stern CS, and Garfein ES. "Mixed Reality with HoloLens: Where Virtual Reality Meets Augmented Reality in the Operating Room." *Plast Reconstr Surg* 140 (2017): 1066–70.

²² Guha D, Alotaibi NM, Nguyen N, Gupta S, McFaul C, and VXD Yang. "Augmented Reality in Neurosurgery: A Review of Current Concepts and Emerging Applications." *Can J Neurol Sci* 44 (2017): 235–45.

²³ Meola A, Cutolo F, Carbone M, Cagnazzo F, Ferrari M, and Ferrari V. "Augmented Reality in Neurosurgery: a Systematic Review." *Neurosurg Rev* 40 (2017): 537–48.

²⁴ Bernhardt S, Nicolau SA, Soler L, and Doignon C. "The Status of Augmented Reality in Laparoscopic Surgery as of 2016." *Med Image Anal* 37 (2017): 66–90.

²⁵ Paulus CJ, Haouchine N, Kong SH, Soares RV, Cazier D, and Cotin S. "Handling Topological Changes during Elastic Registration : Application to Augmented Reality in Laparoscopic Surgery." *Int J Comput Assist Radiol Surg* 12 (2017): 461–70.

²⁶ Pessaux P, Diana M, Soler L, Piardi T, Mutter D, and Marescaux J. "Towards Cybernetic Surgery: Robotic and Augmented Reality-Assisted Liver Segmentectomy." *Langenbecks Arch Surg* 400 (2015): 381–85.

²⁷ Kong SH, Haouchine N, Soares R, Klymchenko A, Andreiuk B, Marques B, Shabat G. "Robust Augmented Reality Registration Method for Localization of Solid Organs' Tumors Using CT-Derived Virtual Biomechanical Model and Fluorescent Fiducials." *Surg Endosc* 31 (2017): 2863–71.

²⁸ Okamoto T, Onda S, Matsumoto M, Gocho T, Futagawa Y, Fujioka S, Yanaga K, Suzuki N, and Hattori A. "Utility of Augmented Reality System in Hepatobiliary Surgery." *J Hepatobiliary Pancreat Sci* 20 (2013): 249–53.

²⁹ Ntourakis D, Memeo R, Soler L, Marescaux J, Mutter D, and Pessaux P. "Augmented Reality Guidance for the Resection of Missing Colorectal Liver Metastases: An Initial Experience." *World J Surg* 40 (2016): 419–26.

anatomischer Strukturen verbessert werden soll. Die Integration dieser Bilder in die Arbeitsabläufe im Operationssaal ist bisher nur in begrenztem Umfang möglich und ihre Benutzung im Operationssaal bisher nur im Rahmen von Pilotprojekten demonstriert worden. So zeigte etwa *Microsoft* in Zusammenarbeit mit *Philips Healthcare* (*Philips Medical Systems*, Hamburg, Deutschland) 2019 eine Konzeptstudie mit der *mixed reality* Brille *HoloLens 2* für minimal invasive Eingriffe (**Abb. 8**).³⁰



Abb. 8. Die Darstellung über dem Operationsgebiet soll das räumliche Verständnis komplexer anatomischer Strukturen verbessern.

Während damit zumindest erste Anwendungsgebiete skizziert sind, in denen *mixed reality* im Operationssaal sinnvoll eingesetzt werden kann, ist die Analyse der grundlegenden Funktionsweise MR-basierter Anzeigesysteme im Operationssaal bisher noch kaum Gegenstand systematischer Forschung. Zwar wächst die Anzahl von Studien, die das Potenzial im Hinblick darauf untersuchen, chirurgische Eingriffe sicherer, schneller und effektiver durchzuführen, jedoch steht hier in der Regel die Entwicklung individueller technischer Lösungen und

³⁰ Philips & Microsoft, "HoloLens 2: Could Augmented Reality Change the Face of Image Guided Therapy?". <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/standard/news/articles/2019/20190313-philips-and-microsoft-hololens-2-could-augmented-reality-change-the-face-of-image-guided-therapy.html>, 2019. [Zugriff: 1.3.2020]

Machbarkeitsstudien im Vordergrund, weshalb die Resultate im Hinblick für die Verwendung im Operationssaal über den Status von Prototypen und Demonstratoren oft nicht hinausgehen.

Im Rahmen von Vorarbeiten zur vorliegenden Arbeit erarbeiteten Sauer, Queisner et al. einen Workflow für die Darstellung von *Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)* Daten der patientenspezifische relevanten Leberanatomie in *mixed reality* Brillen.³¹ Durch die Überführung der zweidimensionalen Schnittbilder in dreidimensionale Modelle konnte eine plastischere Darstellung der anatomischen Strukturen erreicht werden. Diese Darstellung kann flexibel im sterilen Operationsgebiet positioniert werden (**Abb. 9**). Für die Resektion von Lebertumoren ermöglicht die dreidimensionale Darstellung der wurzelartig verzweigten Lebervenen, der Leberarterie, der Gallenwege sowie der zu entfernenden Tumoren im Vergleich zu 2D-Schnittbildern eine einfachere, sicherere und schnellere Orientierung. Auf diese Weise können Chirurg*innen präoperative Bilder besser in ihren Arbeitsablauf integrieren. Sie können das Bild während des Eingriffs bewegen, skalieren oder drehen, etwa um es an die Ausrichtung und Position der anatomischen Strukturen anzupassen. Dies erleichtert die Durchführung der Resektionen.

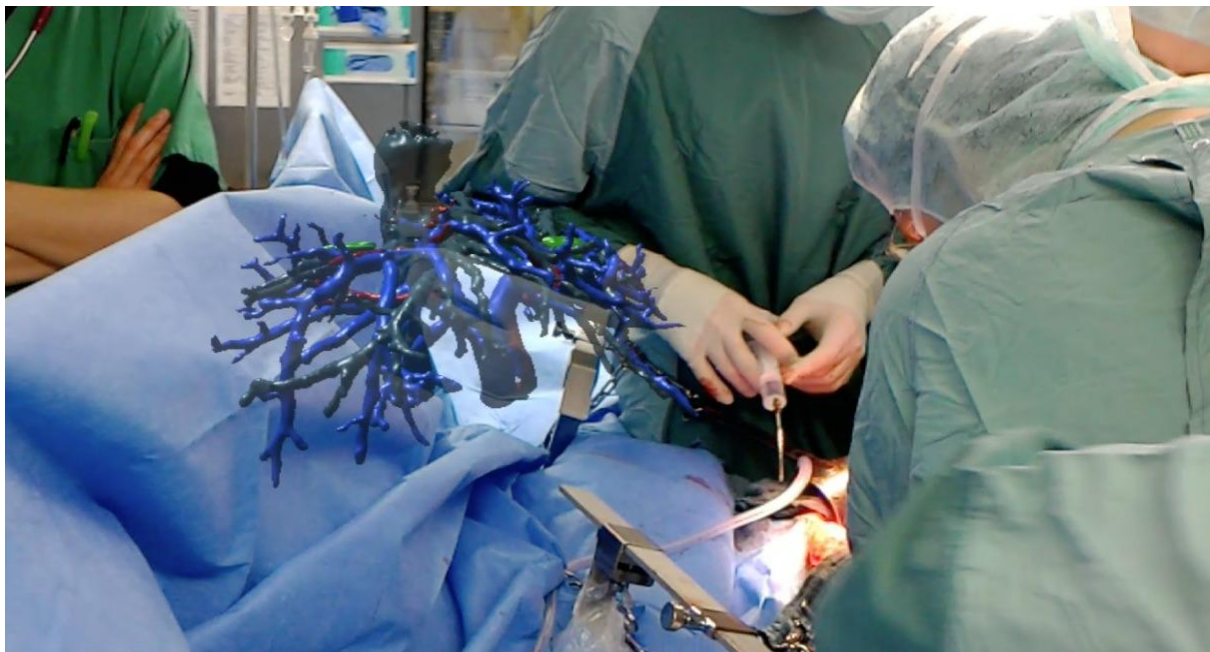


Abb. 9. Bereits 2017 erprobte die Charité – Universitätsmedizin Berlin die Positionierung der Bildgebung über dem Operationsgebiet.

³¹ Sauer IM, Queisner M, Tang P, Moosburner S, Hoepfner O, Horner R, Lohmann R, and Pratschke J. "Mixed Reality in Visceral Surgery: Development of a Suitable Workflow and Evaluation of Intraoperative Use-Cases." *Ann Surg* 266 (2017): 706–12.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass zwar eine wachsende Anzahl von Fallstudien vorliegt. Jedoch wurden, bis auf wenige Ausnahmen,^{32,33,34} kaum übergreifende Ansätze verfolgt, die auf eine nachhaltige Etablierung der Technologie abzielen. Dieses Defizit betrifft die Einbindung der Systeme in die IT-Infrastruktur der Klinik und die damit verbundene Entwicklung von Standards, die Formulierung konkreter Anwendungssituationen, sowie die Gestaltungsaspekte, Benutzer*innenschnittstelle (*user interface*) und Interaktionsweisen, die nur von einem Bruchteil der vorliegenden Arbeiten überhaupt thematisiert werden.³⁵

2.4 Untersuchung

Abb. 10 zeigt die Standardanordnung eines laparoskopischen Eingriffs im Operationssaal. Diese chirurgische Anordnung bestimmt und strukturiert den Zugang von Chirurg*innen zum Körper der Patient*innen anders als die konventionelle offene Chirurgie. Das Operationsgebiet ist räumlich vom laparoskopischen Bildschirm getrennt – das Videobild des Endoskops wird auf dem unteren Bildschirm auf der linken Seite angezeigt. Während des chirurgischen Eingriffs ist die **Aufmerksamkeit der Chirurg*innen verteilt**: einerseits fällt der Blick auf den Monitor, auf dem das Operationsgebiet und die eingeführten Instrumente angezeigt werden, andererseits muss die Aufmerksamkeit immer wieder auf den Körper der Patient*innen gerichtet werden, über dem die Hände die Instrumente führen.

Dementsprechend müssen Chirurg*innen die visuellen Informationen, die das Bild liefert, kognitiv mit dem Körper des Patienten in Beziehung setzen, eine Fähigkeit, die ein hohes Maß an visueller Kompetenz erfordert. Beispielsweise muss die vertikale Ausrichtung des Bildes auf dem Bildschirm kognitiv mit der horizontalen Ausrichtung des Körpers auf dem Operationstisch angeglichen werden; oder es muss die Position eines Instruments, wie es auf dem Bildschirm angezeigt wird, mit den Bewegungen der Hände korreliert werden während zwischen links und rechts, oben und unten unterschieden werden muss; oder die fehlende Tiefenwahrnehmung

³² Chen X, Xu L, Wang Y, Wang H, Wang F, Zeng X, Wang Q, and Egger J. “Development of a Surgical Navigation System Based on Augmented Reality Using an Optical See-through Head-Mounted Display”. *J Biomed Inform* 55 (2015): 124–31.

³³ Kersten-Oertel M, Jannin P, and Collins DL. “The State of the Art of Visualization in Mixed Reality Image Guided Surgery.”. *Comput Med Imaging Graph* 37 (2013): 98–112.

³⁴ Bernhardt S, Nicolau SA, Soler L, and Doignon C. “The Status of Augmented Reality in Laparoscopic Surgery as of 2016.” *Med Image Anal* 37 (2017): 66–90.

³⁵ Kersten-Oertel M, Jannin P, and Collins DL. “The State of the Art of Visualization in Mixed Reality Image Guided Surgery.”. *Comput Med Imaging Graph* 37 (2013): 98–112.

muss in einem zweidimensionalen Bild durch Erfahrungswissen und Taktilität überbrückt werden. **Die Handhabung der Kamera und Werkzeuge im speziell dafür präparierten Körper sowie die Orientierung innerhalb des Operationsgebiets auf der Basis eines externen, räumlich separierten Bildschirms erfordern eine komplexe Koordination.**

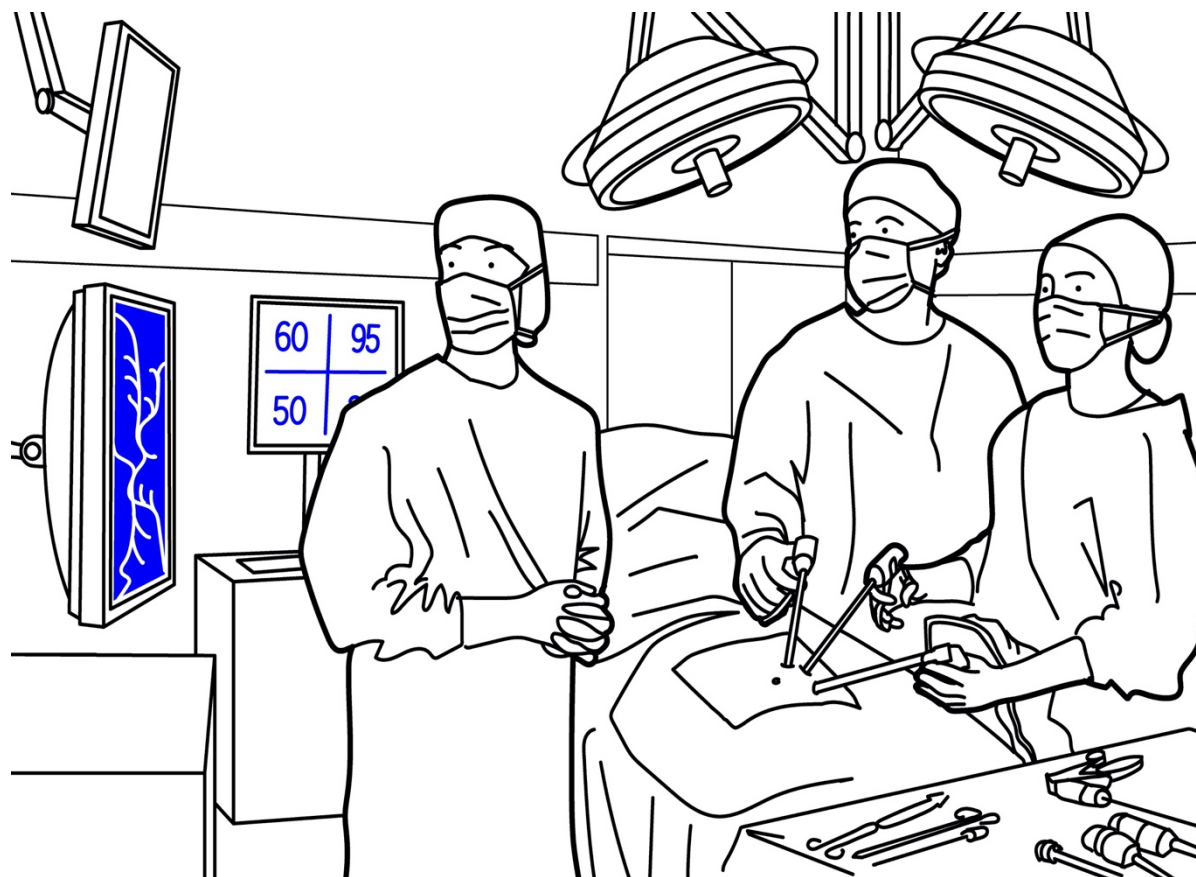


Abb. 10. In der laparoskopischen Chirurgie muss von der Bildschirmdarstellung links im Bild auf die Lage und das Volumen der Anatomie der Patientin rechts im Bild geschlossen werden.

Dies verdeutlicht ein grundlegendes Problem in der chirurgischen Praxis: **Die Betrachtung von Bildschirm und Operationsgebiet ist nur zeitlich nacheinander und räumlich nebeneinander möglich.** Die Perspektive und die Skalierung intraoperativer Darstellungen sowie die Position und Ausrichtung von Bildschirmen müssen kognitiv auf das Operationsgebiet appliziert werden. Unterschiedlich perspektivierte Darstellungen müssen ebenso in den jeweiligen Arbeitsablauf integriert werden, wie die räumliche Anordnung von Bildschirmen und die dadurch entstehenden Blickwechsel zwischen Bild und Operationsgebiet. Was ohnehin schon eine komplexe Abstraktionsleistung ist, nämlich die kognitive Überbrückung der Differenz zwischen Bildschirm und Operationsgebiet, wirkt sich in der Praxis nachteilig auf die chirurgische Koordination von

Hand und Auge aus; die Führung von Instrumenten sowie die Orientierung im Operationsgebiet werden durch die unzureichende Anpassung von Bild und Handlung erschwert.³⁶

Dieses Darstellungsprinzip steht beispielhaft für eine Reihe chirurgischer Praktiken, bei denen Bilder zugleich zur maßgeblichen und oftmals einzigen Handlungs- und Entscheidungsgrundlage werden – von der klassischen Ultraschall-Untersuchung bis hin zu roboterassistierten Eingriffen. Aber auch bei konventionellen, offenen viszeralchirurgischen Eingriffen stellt sich dieses Problem: auch hier sind anatomische Kenntnisse und die Berücksichtigung bestimmter intraoperativer (patho-)physiologischer Veränderungen während des operativen Eingriffs unerlässlich. Die Leberchirurgie ist aufgrund der Komplexität der anatomischen Struktur in besonderem Maße auf das exakte Verständnis von Lagebeziehungen angewiesen.

So bestimmt beispielsweise bei der Leberteileresektion die Lagebeziehung pathologischer Veränderungen (z.B. eines malignen Tumors) zu den im Lebergewebe wurzelartig verzweigten Gefäßen sowie zum Gallenwegsystem den Umfang der chirurgischen Intervention. Auch hier wird deshalb kontinuierlich auf externe Bildschirmdarstellungen der präoperativen Bildgebung zurück- gegriffen. Während des Eingriffs wird das Lebergewebe zusätzlich schrittweise mittels Ultraschall disseziert, Gefäße und Gallengänge werden individuell unterbunden. Hier ist eine genaue Orientierung bezüglich der Schnittebene die Bedingung um den Eingriff für Patientinnen und Patienten komplikationslos durchzuführen. Diese Orientierung basiert bisher auf der Erinnerung an die präoperative Planung, die durch Schnittbilddarstellungen (CT, MRT) auf Wandbildschirmen oder intraoperative Ultraschall-Untersuchungen ergänzt wird.

Mixed reality Darstellungen können Bildgebung und Operationsgebiet räumlich miteinander in Beziehung setzen, um Bildgebung effizienter in Diagnosen und Handlungen zu übersetzen.

Gerade in der Leberchirurgie ist eine solche situationsadaptierte Einbindung handlungsrelevanter Informationen durch die Visualisierung in einer *mixed reality* Brille besonders relevant.

Das chirurgische Personal muss sich so nicht vom Operationsgebiet abwenden und behält dennoch im Bedarfsfall die Bildgebung kontinuierlich im Blick. Der entscheidende

Unterschied im Vergleich zu Darstellungen auf externen Monitoren besteht darin, dass sich hier

³⁶ Veelen MA van, Jakimowicz JJ, and Kazemier G. "Improved Physical Ergonomics of Laparoscopic Surgery". *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies* 13, no. 3 (January 2004): 161–66.

das Bild an das Sichtfeld anpasst und nicht umgekehrt die Lagebeziehung von Patient*in und Monitor die Sichtweise und Körperhaltung des chirurgischen Personals bestimmt.

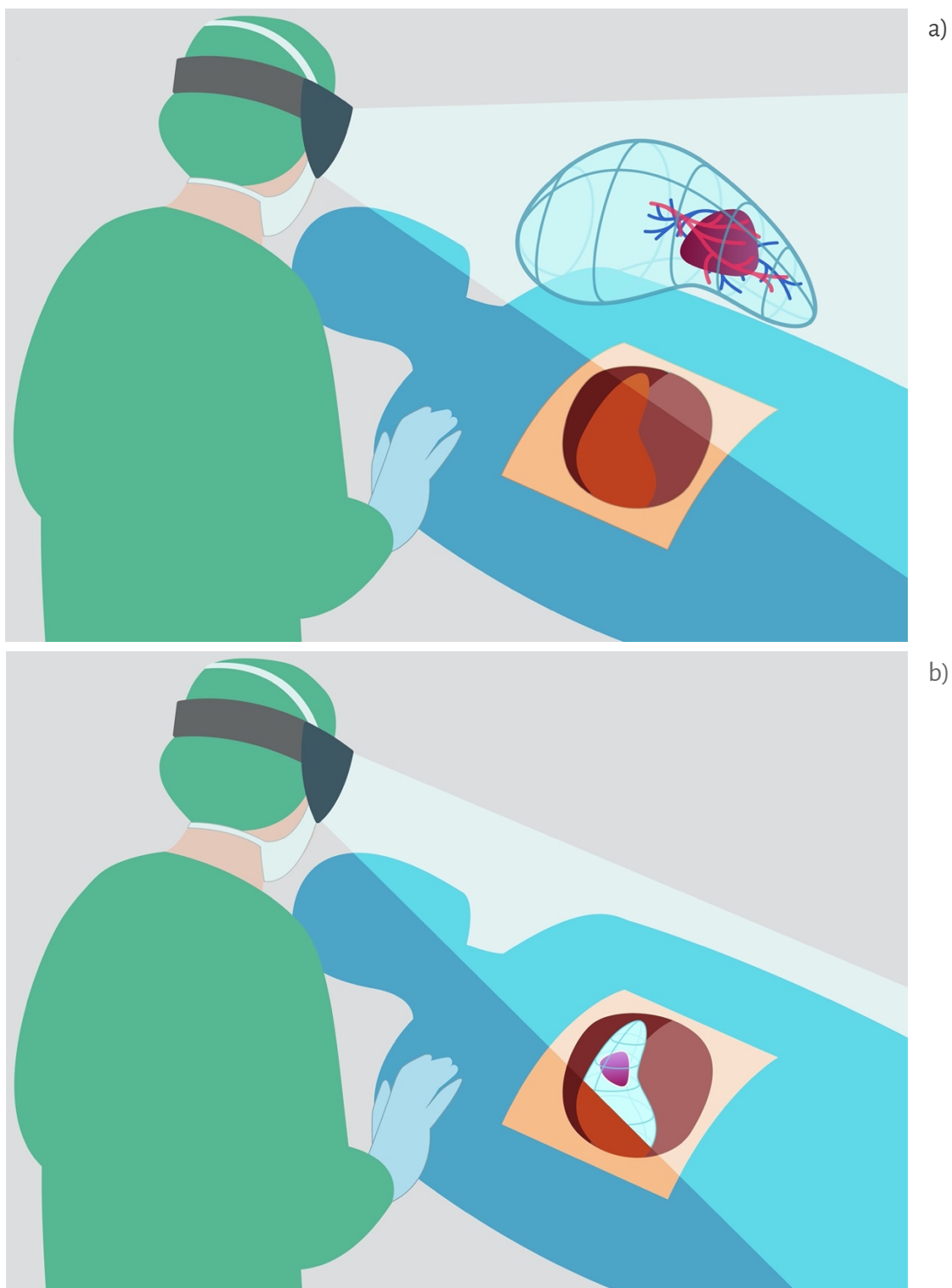
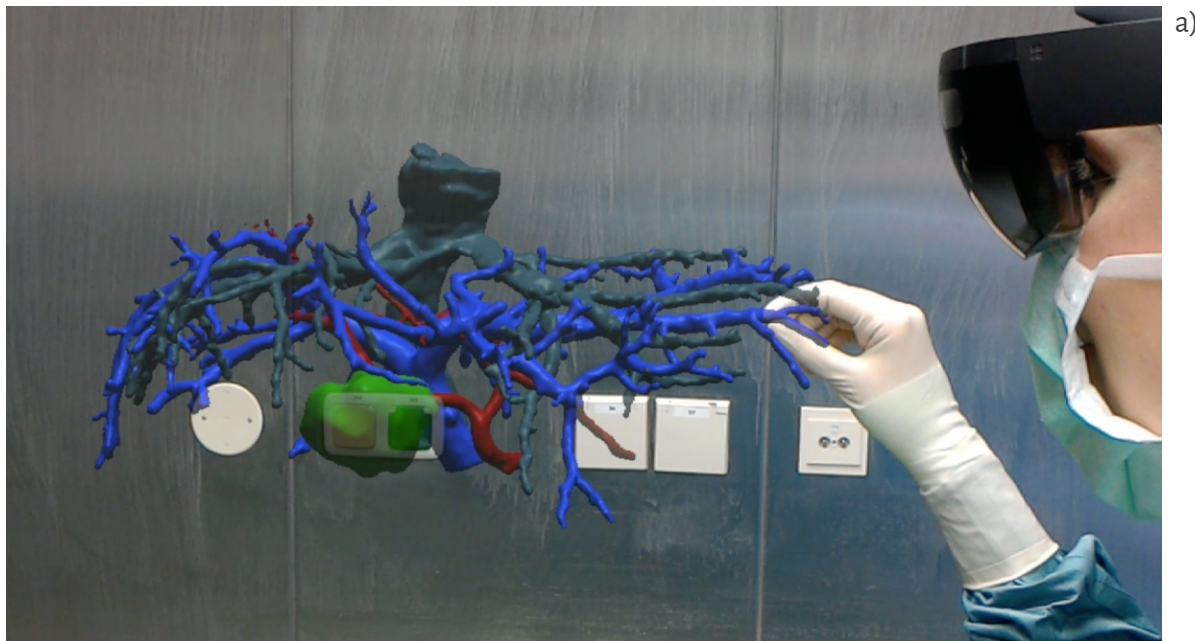


Abb. 11, a) & b) Darstellungsoptionen anatomischer Strukturen mit einer *mixed reality* Brille.

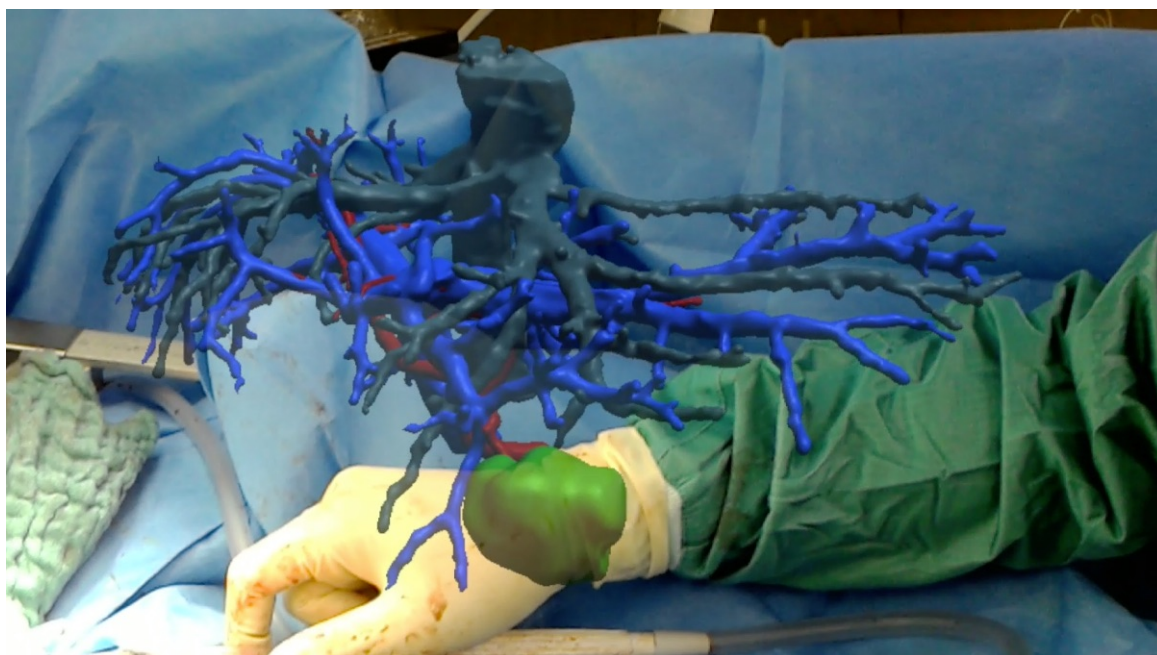
Grundsätzlich lassen sich zwei unterschiedliche Darstellungsstrategien unterscheiden: Entweder wird das **3D Modell an einer entsprechenden Stelle im Raum positioniert**, an der es dann raumstabil bleibt, unabhängig von der Position der Chirurg*innen. Oder es wird so **auf die anatomischen Strukturen montiert (“gemappt”)**, dass sich die Position kontinuierlich an die Lageveränderung des Gewebes anpasst (**Abb. 11, a & b**). Ein Überblick dieser beiden Darstellungsprinzipien gewährt das zugehörige Projektvideo “*Adaptive Anatomy – Design Principles for Medical Mixed Reality*”.³⁷

Wird das 3D-Modell frei im Raum platziert, etwa unmittelbar neben dem Operationsgebiet, kann das chirurgische Personal die präoperative Bildgebung, ohne sich abwenden zu müssen mit dem Operationsgebiet abgleichen. Die dreidimensionalen Objekte können je nach Bedarf mithilfe von Sprach- und Gestensteuerung berührungslos positioniert, rotiert und skaliert werden, ohne den sterilen Bereich zu verlassen (**Abb. 12, a & b**). Einmal platziert, bleiben die Objekte an ihrer Position, sodass eine Skalierung oder Drehung einfach durch eine entsprechende Kopfbewegung vollzogen werden kann. Die **flexible Positionierung der 3D-Modelle innerhalb des Sichtfeldes** verbessert die **Ergonomie**, da die Bilder direkt in den Arbeitsablauf integriert werden können, ohne dass die Aufmerksamkeit auf einen entfernten Monitor gerichtet werden muss, der nicht der räumlichen Orientierung und Position der Patient*innen entspricht. **Ohne wesentliche Beeinträchtigung der Sicht auf das Operationsgebiet können Chirurg*innen durch einfaches Hochblicken die 3D-Rekonstruktion der individuellen anatomischen Strukturen betrachten und sich orientieren.** Die Nutzung der *mixed reality* Brille *HoloLens* funktioniert trotz der für solche Systeme potenziell widrigen Bedingungen (helle Beleuchtung des Operationsgebiets, reflektierende Wände aus Glas und Stahl im Operationssaal) bereits in der frühen Entwicklungsphase weitgehend fehlerfrei.

³⁷ Queisner M, Pogorzelskiy P, Remde C, Sauer IM. “Adaptive Anatomy – Design Principles for Medical Mixed Reality.” <https://youtu.be/6xxAuOuYuC8>.



a)



b)

Abb. 12, a) Berührungslose Interaktion ermöglicht die Bildmanipulation, ohne den sterilen Bereich zu verlassen **b)** Die Darstellung bewegt sich bei einem Wegschauen oder Positionswechsel des chirurgischen Personals nicht mit, sondern bleibt wie ein reales Objekt im Raum stehen.

Die zweite Möglichkeit ist **die direkte Montage bzw., das Mapping der computergenerierten dreidimensionalen Darstellungen auf die relevanten anatomischen Strukturen (Abb. 10, b)**. Hier wird die präoperative Bildgebung nicht auf einer parallelen Wahrnehmungs- und Darstellungsebene angeordnet, sondern **überlagert die realen anatomischen Strukturen**. Mit der heutigen Rechenleistung und entsprechenden Sensoren zur räumlichen Erfassung lässt sich dieses Konzept heute in der Praxis einsetzen. *Mixed reality* Brillen wie *HoloLens* ermöglichen

inzwischen die Anpassung der Darstellungen an die physische Umgebung. So können *mixed reality* Darstellung ohne die Verwendung externer Marker auch an bewegte Objekte angepasst werden. Dies lässt sich am Beispiel von intraoperativen Ultraschallbildern zeigen: **Anstatt der Darstellung auf einem externen Monitor lassen sich die Bilder unterhalb des Schallkopfes platzieren, sodass die Position und Skalierung mit der tatsächlichen Anatomie übereinstimmen (Abb. 13)**. Hier ergeben sich allerdings nicht nur Vorteile, sondern auch neue Wahrnehmungsprobleme: Erstens erschwert ein vertikal zu Betrachter*innen ausgerichteter Schallkopf aufgrund des Neigungswinkels den Blick auf das Bild. Und zweitens ist bei einem Mapping auf den Körper eine Skalierung der Darstellung zwar möglich, widerspricht aber der Darstellungslogik, da Körper und Bildausschnitt dann nicht mehr übereinstimmen. Eine Lösung bietet hier die **Option einen zusätzlichen virtuellen Bildschirm ins Sichtfeld einblenden**, sodass die Darstellung am Schallkopf vor allem die Orientierung und Raumvorstellung unterstützt, Details jedoch auf der separierten Ansicht besser sichtbar sind.

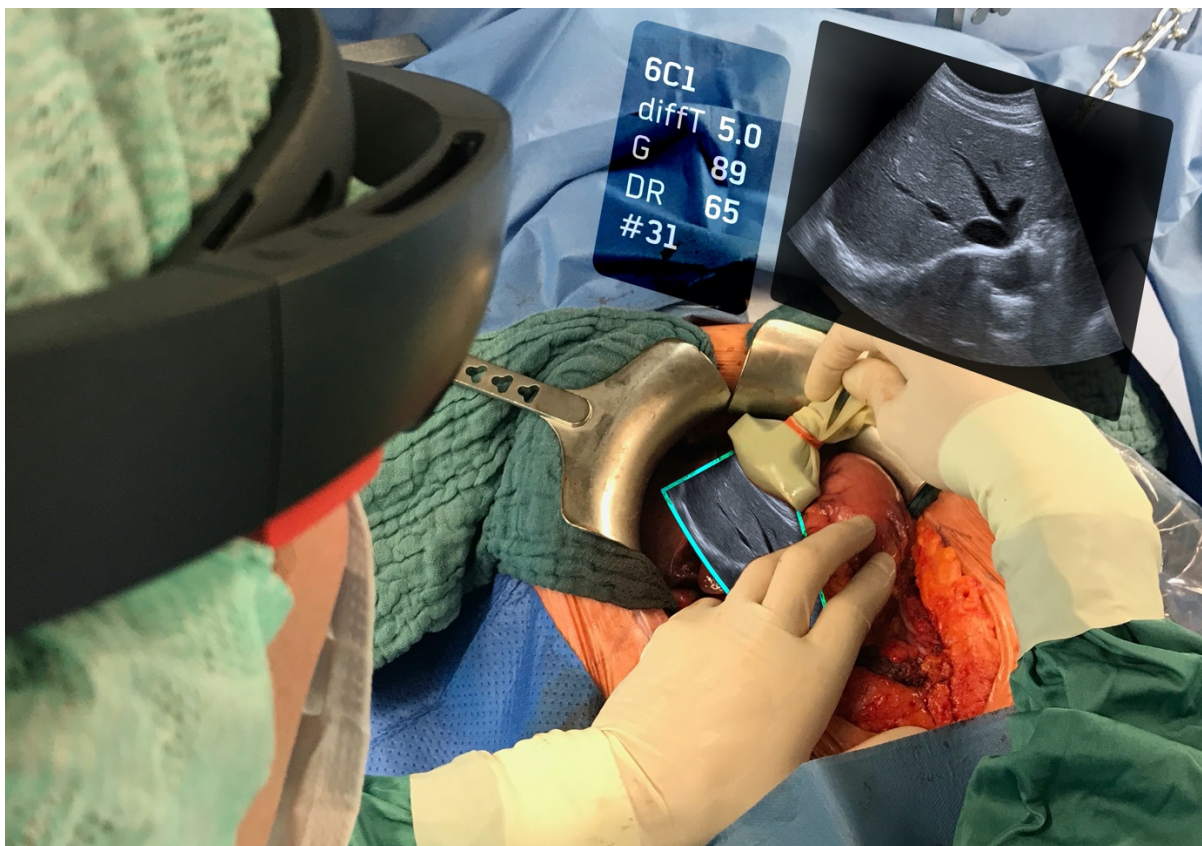


Abb. 13, Darstellungskonzept zur Einblendung des intraoperativen Ultraschallbildes.

Die grundlegende Herausforderung für diese Art der Darstellung besteht darin, Bild und Körper kontinuierlich miteinander zu verknüpfen. Dies ist in technischer Hinsicht ein

komplexes Unterfangen, weil die Anatomie der zu behandelnden Patient*innen in Echtzeit registriert werden muss, um sie mit der präoperativen Bildgebung zu synchronisieren. Dies ist besonders dann schwierig, wenn weiches Gewebe während des Eingriffs bewegt und deformiert wird. **Die präoperativen Datensätze müssen dann an die durch die Intervention erfolgende Volumen- und Lageveränderung des Gewebes angepasst werden.** Selbst unter den Bedingungen der Echtzeit-Datenverarbeitung erfordern diese Darstellungen eine permanente Verschaltung zwischen tatsächlicher Anatomie, präoperativer Bildgebung und dem chirurgischen Sichtfeld. Die Genauigkeit der Darstellung für die Überlagerung anatomischer Strukturen im Operationsaal reicht dafür noch nicht aus, um erlaubt die im chirurgischen Bereich notwendige Feinheit noch nicht, auch wenn hier bereits erste vielversprechende Ansätze vorliegen.³⁸ Die Überlagerung von prä- und intraoperativer Bildgebung mit dem Operationsgebiet könnte es jedoch in Zukunft erlauben, die chirurgische Eingriffsregion mit größerer Präzision anzusteuern, was insbesondere bei komplexen Eingriffen von Vorteil wäre.

Neben den technischen Herausforderungen der Raumerfassung stellt sich vor allem die **Frage nach den Wahrnehmungs- und Darstellungsproblemen der Überlagerung.** Erste systematische Überlegungen hierzu haben Bichlmeier³⁹ und Bernhardt⁴⁰ angestellt. Als wichtigstes Problem identifizieren sie die Tiefenwahrnehmung. Das gleichzeitige Betrachten anatomischer Strukturen und präoperativen Daten stellt das chirurgische Personal vor eine neue Herausforderung bei der Bildinterpretation, da die Ansicht der Oberfläche freiliegender anatomischer Strukturen mit der Darstellung der darunter liegenden Anatomie räumlich zusammenfällt. Die Kombination dieser beiden Bildmodalitäten, Fläche und Tiefe, erfordert nicht nur eine neue Sehpraxis, sondern auch entsprechende Darstellungsstrategien.

Um unterschiedliche Darstellungsstrategien zu evaluieren, wurde ein plastischer Patientenkörper nachgebaut, bei dem ein leberchirurgischer Eingriff simuliert werden kann (**Abb. 14**). Der

³⁸ Chauvet P, Collins T, Debize C, Bartoli A, Canis M, and Bourdel N. "Augmented Reality in a Tumor Resection Model". *Journal of Minimally Invasive Gynecology* 23, no. 7 (November 2016).

³⁹ Bichlmeier C, Sielhorst T, Heining SM, Navab N, 2007. "Improving depth perception in medical AR." In *Bildverarbeitung für die Medizin*, edited by Horsch A, Deserno TM, Handels H, Meinzer HP, Tolxdorff T, 217–221, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.

⁴⁰ Bernhardt S, Nicolau SA, Soler L, and Doignon C. "The Status of Augmented Reality in Laparoscopic Surgery as of 2016." *Med Image Anal* 37 (2017): 66–90.

Torso wurde auf der Grundlage patientenspezifischer CT-Daten rekonstruiert, die in ein 3D-Modell überführt wurden, das anschließend in Zusammenarbeit mit der Firma *HumanX* (Wildau, Deutschland) in Silikon gegossen wurden. Bei der Materialauswahl wurde besonders darauf geachtet, dass die Druckempfindlichkeit der eines echten Körpers entspricht. Die Leber ist aus dem Torso herausnehmbar und in separate Segmente strukturiert, sodass die Simulation verschiedener Zustände vor und nach der Resektion des Organs ermöglicht wird. Anhand des maßstabsgetreuen Modells können die präoperativen Daten des Patienten mit dem Modell fusioniert werden. Durch die *mixed reality* Brille *HoloLens* können so unterschiedliche Darstellungsparameter erprobt, die für die Überlagerung anatomischer Strukturen die ärztliche Sicht unterstützen können.



Abb. 14, Patientenspezifischer Prototyp zur Erprobung unterschiedlicher Darstellungsstrategien am Beispiel eines offenen Eingriffs an der Leber.

Helligkeit/Transparenz: Unterschiedliche Abstufungen der Transparenz ermöglichen ein graduelles Hervorheben oder Ausblenden zwischen Darstellung und realer Anatomie. Durch die Erhöhung der Helligkeit steigt die Opazität der Darstellung. Das chirurgische Personal kann sich durch dieses Changieren zwischen Transparenz und Opazität etwa über den Verlauf von Gefäßen oder der Position eines Tumors vergewissern (**Abb.15, a & b**).

a)



b)



Abb. 15, a) & b) Unterschiedliche Helligkeitsstufen ermöglichen das Wechseln zwischen virtueller und realer Anatomie.

Konturierung: Eine wichtige Funktion bei der Überlagerung ist die Lokalisierung nicht sichtbarer Strukturen. Dazu muss die tiefer liegende Anatomie sichtbar gemacht werden, ohne den Blick auf die Oberfläche der realen Anatomie einzuschränken. Die Konturierung der Umrise mit einer kontrastierten Linie ermöglicht es, die Position und Ausdehnung z.B. eines Tumors zu bestimmen, ohne dabei die reale Anatomie zu verdecken (**Abb. 16**). Der Vorteil dieser minimalen Darstellungsvariante ist ein weitgehend artefaktfreies Operationsgebiet, bei dem das Bild auch während der Intervention kaum die Sicht beeinträchtigt, sodass beispielsweise Schnittebenen das chirurgische Arbeiten anleiten können (**Abb. 17**). Der Nachteil ist jedoch, dass Umrisslinien keine Tiefeninformationen bieten, was die Lagebestimmung deutlich erschwert.



Abb. 16, Umrisslinien zeigen die Ausdehnung eines Tumors.

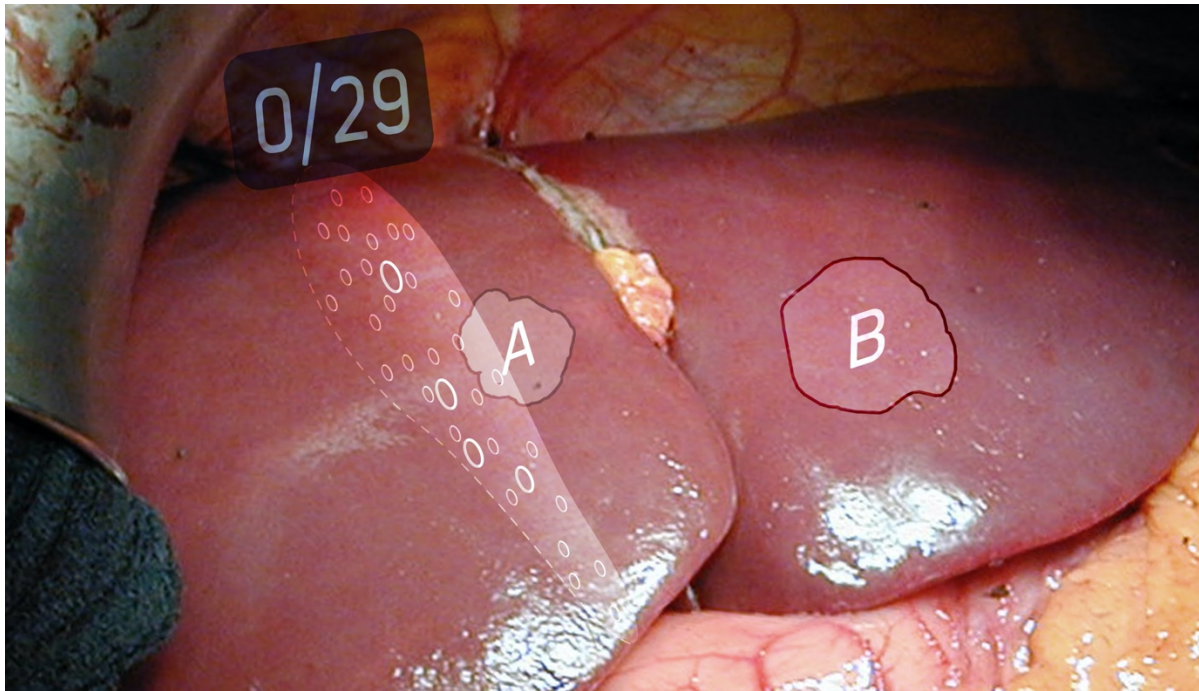


Abb. 17, Darstellungskonzept zur Darstellung einer Schnittebene mithilfe von Umrisslinien.

Farbe/Kontrast/Schattierung: Die Überlagerung anatomischer Strukturen durch flächige Einfärbungen der dargestellten anatomischen Strukturen verdeckt zwar die reale Anatomie, ermöglicht jedoch im Kombination mit einer Schattierung eine bessere Tiefenwahrnehmung als einfache Umrisslinien, die zwar die Ausdehnung, nicht aber das Volumen des dargestellten Gewebes zeigen (**Abb. 18**). Mithilfe von Kontrasten lassen sich die Übergänge zwischen einzelnen Gewebestrukturen deutlich machen. So kann etwa Objekten mit zunehmender Entfernung ein höherer Grauwert zugewiesen werden, was den Tiefeneindruck verbessert.



Abb. 18, Unterschiedliche Graustufen vermitteln Volumen und Tiefe.

Topografische Hilfslinien: Ein wichtiger Aspekt bei der Tiefenwahrnehmung ist das Verhältnis von Tiefenraum und Oberfläche. Damit die Darstellung nicht so wirkt, als Schweben sie über der realen Anatomie, muss sie kontinuierlich zur sichtbaren Oberfläche der realen Anatomie in Beziehung gesetzt werden. Nur so kann die relative Lage z.B. eines dargestellten Tumors bestimmt werden. Die gleichzeitige Fokussierung von Bild und Körper ist aber in der Praxis zumeist schwierig. Ein topografisches Gitternetz, das die sichtbare Oberfläche der realen Anatomie überlagert, kann hier den Tiefeneindruck verbessern, da es Tiefenraum und Oberfläche miteinander in Beziehung setzt (**Abb. 19**). Der verbesserte Tiefeneindruck entsteht hier erstens, weil das Gitternetz die darunter liegende Darstellung des Tumors überlagert und zweitens, weil die Gitternetzlinien durch die einzelnen Höhenlinien das Erfassen der Tiefe vereinfachen und so einen gemeinsamen Bildraum erzeugen.



Abb. 19, Topografische Hilfslinien auf der sichtbaren Oberfläche erleichtern durch das Raster die Wahrnehmung darunter liegender Strukturen.

Maskierung: Ein bisher wenig beachteter Aspekt ist die Maskierung der dargestellten anatomischen Strukturen. Gerade in der offenen Chirurgie unterstützt die Maskierung die kognitive Verknüpfung von Bild und Körper. Entspricht die Überlagerung hingegen nicht den Grundprinzipien der Perspektive (näher liegende Objekte verdecken dahinterliegende Objekte), wirkt die Darstellung so, als würden die anatomischen Strukturen oberhalb der realen Anatomie liegen. Die fehlende Maskierung außerhalb des Operationsgebiets verringert den Tiefeneindruck daher deutlich (**Abb. 20**). Ein virtuelles Fenster verbessert die Einbettung in die Szene deutlich. Bisher ist eine solche Maskierung nur händisch umsetzbar. Mit entsprechenden Bilderkennungsalgorithmen ließe sich eine Maskierung jedoch mit moderatem Aufwand umsetzen.

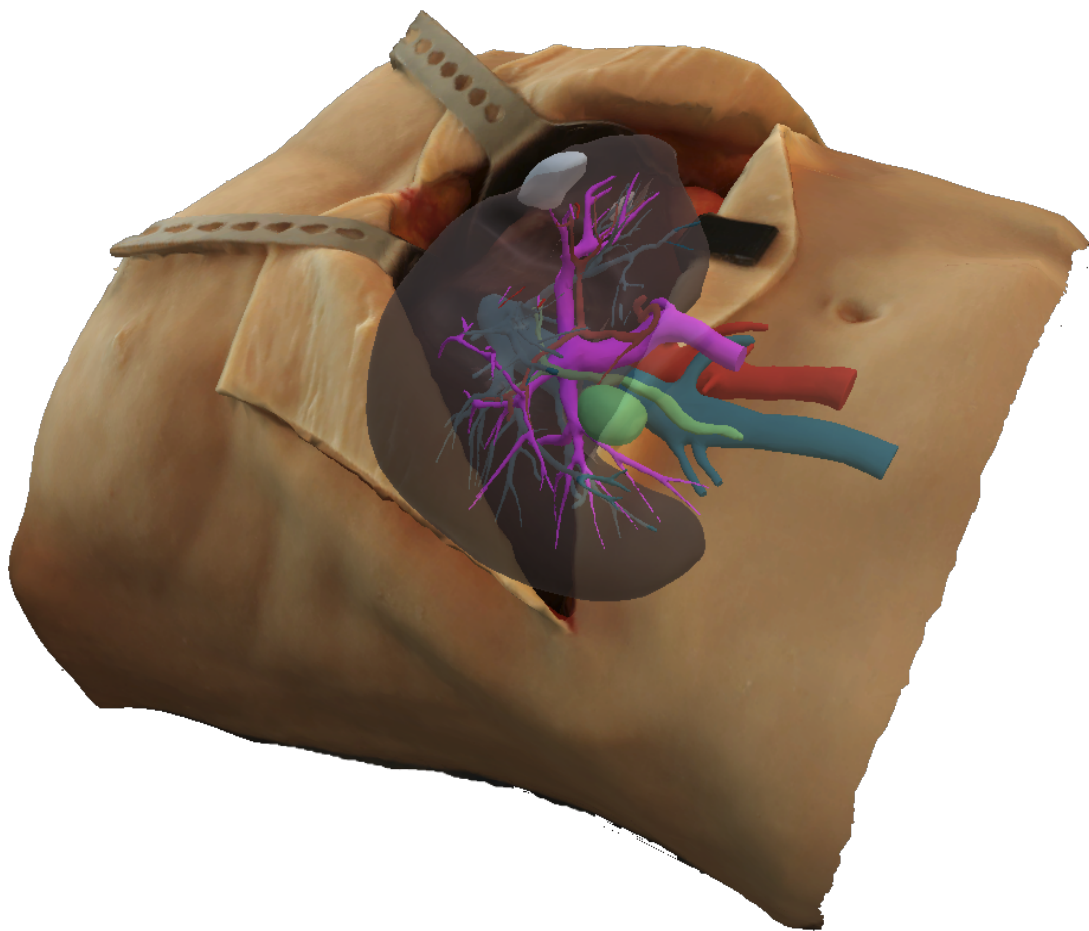


Abb. 20, Die fehlende Maskierung der Darstellung verringert den Tiefeneindruck deutlich.

2.5 Ergebnisse & Anwendungen

Als Bildgebungsverfahren sind *extended reality* Technologien mehr als bloßes

Darstellungsmedium. Sie zeigen nicht nur, sondern sie modifizieren aktiv die sichtbare

Umwelt. Als Ergebnis der Arbeit mit dem Prototyp können drei Ebenen unterschieden werden, die für die **Handhabung und Gestaltung von *mixed reality* Anwendungen** von grundlegender Bedeutung sind: die operative Ebene, die ästhetische Ebene und die epistemische Ebene. Auf der Grundlage dieser drei Ebenen lassen sich übergeordnete Konsequenzen für die chirurgische Praxis ableiten, die anhand des erarbeiteten Prototyps exemplarisch aufgezeigt wurden. Dies sind a) die **Interaktion und Ergonomie (operative Ebene)**, b) die **Gestaltungsprinzipien (ästhetische Ebene)** sowie c) das **anwendungsbezogene Wissen, welches zur Handhabung dieser Technologien erforderlich ist (epistemische Ebene)**.

a) Interaktion & Ergonomie

Die Nutzung von *mixed reality* Brillen kann die ergonomischen Schwierigkeiten überwinden, die aus der Differenz zwischen Darstellung und Operationsgebiet resultieren. Selbst wenn Chirurg*innen in der Lage sind die ergonomischen Nachteile klassischer Bildschirmarrangements kognitiv zu kompensieren, wirkt sich der Wechsel zwischen Bild und Arbeitsraum insgesamt negativ auf die Ergonomie aus. Der Wechsel der Aufmerksamkeit zwischen Bildschirm und Operationsfeld erfordert von Chirurg*innen die kognitive Integration unterschiedlicher Perspektiven und Darstellungsweisen in ihre jeweiligen Arbeitsabläufe. Die **Trennung zwischen Bildschirm und das Operationsgebiet wird durch *mixed reality* Darstellungen aufgehoben.**

Dies wird dadurch ermöglicht, dass Bildinformationen raumkonsistent, dreidimensional und stereoskopisch im Sichtfeld von Chirurg*innen angezeigt werden können. Raumkonsistenz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine Veränderung der Blickposition die lokale Position der Darstellung nicht verändert und die Skalierung sich ans Sichtfeld anpasst. Diese Verknüpfung von Sensorik und Motorik ermöglicht eine immersive Darstellung handlungs- und körperbezogener Informationen im realen Maßstab (z.B. durch die Darstellung komplexer Gefäßstrukturen in der Leberchirurgie). Der Blick fokussiert ausschließlich das unmittelbare Operationsgebiet. Ein kontinuierliches Changieren des Blicks zwischen Operationsgebiet und externen Monitoren entfällt. Räumlich entsprechen diese Bilder im Gegensatz zu den etablierten Formaten intraoperativer Bildgebung der Ausrichtung und dem Volumen des Operationsgebiets.

Diese Darstellungsweise hat das Potenzial eine effizientere Orientierung und Navigation zu ermöglichen und durch die ununterbrochene Fokussierung auf das Operationsgebiet die Koordination von Hand und Auge zu verbessern. Im Vergleich mit klassischen Arrangements von Eingabegeräten und Bildschirmen, deren Positionierung ergonomische Blickachsen oftmals erschwert,^{41,42} können *mixed reality* Darstellungen den Handlungsablauf besser strukturieren⁴³ und sorgen so für einen flüssigen Arbeitsablauf. Sielhorst et al. zeigen, dass die Verschmelzung

⁴¹ Sielhorst T, Feuerstein M, and Navab N. "Advanced Medical Displays: A Literature Review of Augmented Reality". *Journal of Display Technology* 4, no. 4 (December 2008): 451–67.

⁴² Hinterwaldner I. "Zur Fabrikation operativer Bilder in der Chirurgie." In *The picture's image: wissenschaftliche Visualisierung als Komposit*, edited by Hinterwaldner I, Buschhaus M, 206–22. München: Fink, 2006, 206–22.

⁴³ Wasen K, and Brierley M. "The Visual Touch Regime: Real-Time 3D Image-Guided Robotic Surgery and 4D and 5D Scientific Illustration at Work". In *SpringerBriefs in Health Care Management and Economics*, 21–51. Berlin Heidelberg: Springer, 2012, 21–51.

von Beobachtung und Darstellung die Propriozeption verbessern kann und die Koordination von Bild und Arbeitsraum erleichtert wird, da räumliche Orientierung und Ausrichtung kongruent zueinander sind.⁴⁴ Folglich können anatomische Zusammenhänge erfasst werden, die sonst übersehen werden könnten oder zumindest nicht offensichtlich sind. Dies ist besonders dann nützlich, wenn die funktionellen Gewebeinformationen direkt mit der realen Ansicht in Beziehung gesetzt werden können.

Der Anwendungsbereich der Bildgebung setzt sich damit bis weit in den Behandlungsprozess hinein fort. **Dies ermöglicht Chirurg*innen neue Ansichten auf das Operationsgebiet. Sie können Informationen im gleichen Bild sehen, die sie sonst nur separat, also auf unterschiedlichen Bildschirmen, zu sehen sind.** Sielhorst, Feuerstein und Navab stellen dazu in einer Studie über medizinische Displays fest: "Currently, each imaging device introduces another display into the operating room thus the staff spends valuable time on finding a useful arrangement of the displays. A single display integrating all data could solve this issue. Each imaging device also introduces its own interaction hardware and graphical user interface. A unified system could replace the inefficient multitude of interaction systems."⁴⁵ Diese Vision eines integrierten visuellen Cockpits bildet eine zentrale Vision von *mixed reality*, was die aktuellen Konzeptstudien der beiden größten Unternehmen der Branche, *Microsoft* und *Magic Leap*, zeigen (**Abb. 21, a & b**). Darin stehen insbesondere ergonomische Überlegungen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit des chirurgischen Personals im Mittelpunkt. Neben der Anzeige anatomischer Informationen stellen auch das Erlernen von Arbeitsabläufen, wie etwa die Bedienung von Geräten sowie die chirurgische Planung ein weiteres potenzielles Einsatzgebiet dar. b)

⁴⁴ Sielhorst T, Feuerstein M, and Navab N. "Advanced Medical Displays: A Literature Review of Augmented Reality". *Journal of Display Technology* 4, no. 4 (December 2008): 451–67.

⁴⁵ ebd.: 459.



a)



b)

Abb. 21, Konzeptstudien von **a) HoloLens (Microsoft)** und **b) Magic Leap 1 (Magic Leap)** zeigen neue Anzeigekonzepte, bei denen alle relevanten Informationen im Sichtfeld der Akteure angezeigt werden sollen. Andere Bildschirme sollen hingegen aus dem Operationssaal verschwinden.

Was die Hochglanzbilder der Marketingabteilungen allerdings nicht zeigen: Die Interaktion mit *mixed reality* Brillen führt zu etlichen nach wie vor ungelösten Problemen in der Handhabung. Die visuelle Anordnung von Informationen in einer zentralen Benutzer*innenschnittstelle ist entgegen der Versprechungen der Industrie weit davon entfernt, intuitiv oder gar effizienter zu sein. Sie konfrontiert Chirurg*innen mit einer neuen Form des visuellen Zugangs, der die herkömmliche Unterscheidung zwischen Körper und Bild ebenso infrage stellt, wie die etablierten Methoden der Kooperation innerhalb des Teams. Daraus ergeben sich nicht nur neue Handlungsmöglichkeiten, sondern auch Handlungsdefizite.

Das **Dilemma dieser Darstellungsweise** besteht darin, dass chirurgisches **Personal nicht in der Lage ist, die individuelle Ansicht miteinander zu teilen**. Da *mixed reality* Darstellungen immer an die Perspektive der Betrachter*innen gebunden sind, wird die Kommunikation innerhalb des Teams erschwert, da sich das Team nicht auf den gleichen Darstellungsort der Informationen beziehen kann. Selbst wenn die Darstellungen für andere Betrachter*innen durch Rotation entsprechend angepasst werden, damit sie derselben Perspektive entspricht, bleibt die eigene Sicht doch immer an den Betrachter*innenstandpunkt gebunden. Dies ist ein entscheidender Vorteil externer Monitore im Operationssaal. Sie bieten für das gesamte Team die Möglichkeit auf identische visuelle Informationen zurückzugreifen. Die permanente räumliche und zeitliche Korrelation zwischen den Positionen der einzelnen Benutzer*innen, des Bildschirms und des Operationsgebiets verdeutlicht zudem die technologische und praktische Komplexität dieser neuen Bildpraxis.

Benutzer*innen von *Mixed reality* Brillen müssen jedoch nicht nur die durch das Tragen der Brille entstehenden Handlungsbeschränkungen kompensieren. Ebenso müssen die Anforderungen der Infektionskontrolle erfüllt werden. Zudem werden mit den neuen Darstellungsmöglichkeiten auch die Ansprüche an die Interaktion komplexer, vor allem im Hinblick auf die Steuerung der entsprechenden Interfaces. Zwar sind berührungslose Gesten gerade für den sterilen Bereich des Operationssaals eine zukunftsweisende Lösung,⁴⁶ jedoch ist damit bisher keine besonders feingliedrige Manipulation und Kontrolle der Darstellungsmodalitäten möglich

⁴⁶ Ohara K, Dastur N, Carrell T, Gonzalez G, Sellen A, Penney G, Varnavas A. "Touchless Interaction in Surgery". *Communications of the ACM* 57, no. 1 (January 2014): 70–77.

– und zwar gerade, weil kein haptisches Feedback möglich ist.⁴⁷ Bei neueren Generationen der Brillen erweist sich immerhin die gestenbasierte Steuerung als weniger umständlich und ungenau. Die Sprachsteuerung der Geräte ist allerdings nach wie vor zu zeitaufwändig für die zeitkritischen Arbeitsabläufe im Operationssaal.

b) Gestaltungsstrategien

Im Hinblick auf die erforderlichen Gestaltungsprinzipien können drei Aspekte identifiziert werden, die bei der Konzeption von Mixed Reality Darstellungen berücksichtigt werden sollten: **die Position des Bildschirms, die Perspektive der Benutzer*innen und die Augmentierung von Objekten**. Auf diese drei Aspekte wird nachfolgend eingegangen:

Mixed reality Darstellungen "funktionieren" nur unter Einbeziehung der Bildschirmposition, das heißt, wenn sie selbst situiert, also an ihrer räumlichen Umgebung orientiert sind. Dieses erste Gestaltungsprinzip impliziert, dass die Darstellung immer zu einer Szene oder einem Objekt in ein räumliches Verhältnis gesetzt werden muss. Dies mag zunächst trivial klingen, denn jeder Bildschirm ist selbstverständlich immer in einem räumlichen Kontext eingebettet, zum Beispiel wenn chirurgisches Personal einen mobilen Monitorarm im Operationssaal positioniert, um das Bild eines Videoendoskops näher ans Operationsgebiet zu bewegen. Die Gestaltung transparenter Bildschirme muss sich jedoch auf ein Objekt oder eine Szene beziehen, die sich hinter dem Bildschirm befindet. Im Gegensatz zu herkömmlichen Bildschirm-anordnungen ist das Gezeigte hier abhängig von dem, was durch den Bildschirm gesehen wird. Eine effektive Darstellung muss es Benutzer*innen demnach ermöglichen, das Bild auf dem Display in Relation zur dahinterliegenden Szene zu betrachten.

Dies wirkt sich sowohl auf einer symbolischen als auch auf einer ästhetischen Ebene aus. So müssen erstens etwa Lichtverhältnisse, Kontraste oder Farben in die Gestaltung einbezogen werden, etwa wenn ein 3D-Modell mit blauen Gefäßdarstellungen vor dem Hintergrund des ebenfalls blauen sterilen Abdeckungsmaterials um das Operationsgebiet dargestellt wird (**Abb. 22**). Und es müssen zweitens die angezeigten Modelle so platziert werden, dass sie sich in ihrer räumlichen Logik nicht mit anderen Strukturen überschneiden, etwa sollten sie nicht innerhalb von realen Objekten im Raum positioniert werden, da dies ihre die Wahrnehmung als Teil der

⁴⁷ Morrison C, Culmer P, Mentis H, and Pincus T. "Vision-Based Body Tracking: Turning Kinect into a Clinical Tool". *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, December 2014, 1–5.

natürlichen Umwelt beeinträchtigt. Zudem sollten die Darstellungen in der Praxis idealerweise so platziert werden, dass sie keine relevanten Gebiete überlagern, die gleichzeitig sichtbar sein sollen.

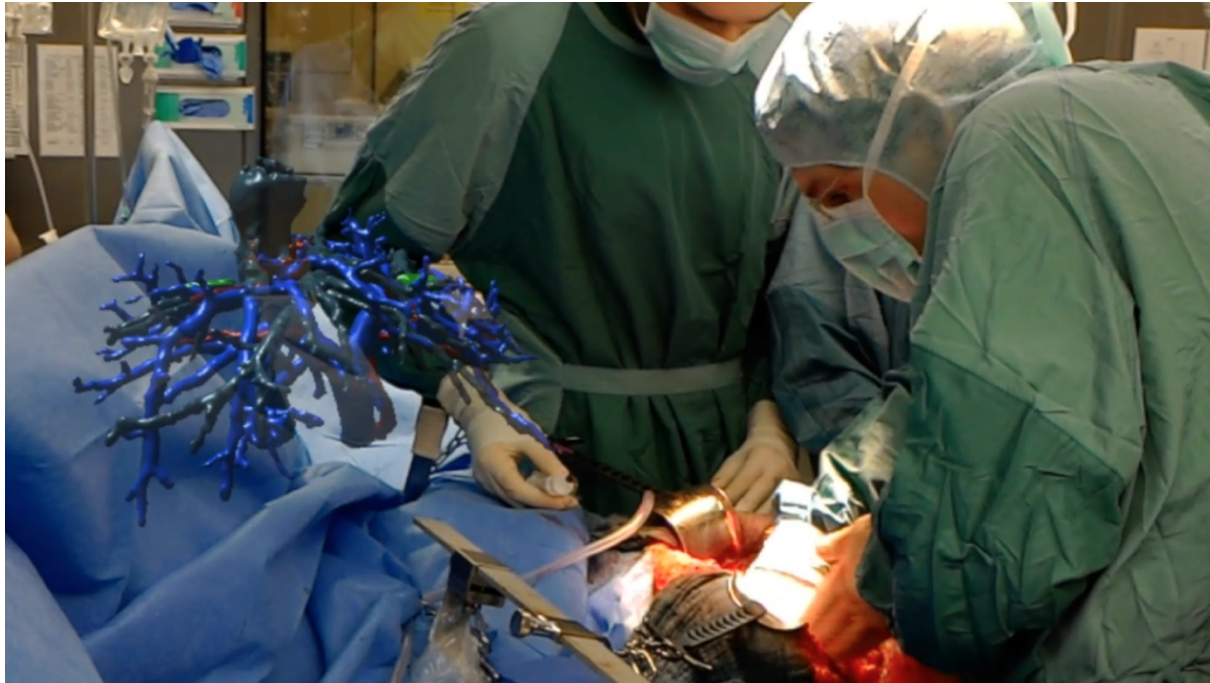


Abb. 22. Die blaue Einfärbung der Gefäße ist vor den ebenfalls blauen Abdeckungen nicht ausreichend kontrastreich.

Das zweite wichtige Gestaltungsprinzip lautet, dass ***mixed reality* Darstellungen an den Standpunkt der Betrachter*innen angepasst sein müssen. Neben der Korrelation von Bildschirm und Objekt müssen sich Darstellungen und Interaktionselemente (etwa Fenster, Navigationselemente oder Metadaten) an die Perspektive der einzelnen Benutzer*innen anpassen.** Diese Anpassung bietet gegenüber klassischen Bildschirmdarstellungen den Vorteil, dass die Bildinformationen für das chirurgische Personal fortlaufend verfügbar sind, auch wenn sie die Position oder Perspektive wechseln. Konkret ergeben sich hier zwei unterschiedliche Gestaltungsoptionen: Entweder wird die Darstellung bei einem Wechsel der Position am gleichen Ort angezeigt, das heißt, sie bewegt sich nicht mit, etwa wenn ein 3D-Modell unmittelbar über dem Operationsgebiet als zusätzliche Orientierungshilfe dient. Mit dieser Art der Darstellung kann so interagiert werden, als wäre sie tatsächlich an dieser Stelle im Raum platziert (auch dabei passt sich das Bild allerdings fortwährend an die Perspektive an). So kann etwa eine Skalierung der Darstellung durch die natürliche Annäherung des Auges ebenso natürlich erfolgen, wie die Bewegung um das Objekt herum eine Rotation der Ansicht

ermöglicht. Dafür sind keine weiteren Eingabegeräte oder Gesten erforderlich, was im Operationssaal einen signifikanten Vorteil darstellt. Die zweite Option ist, dass sich die Darstellung sinnvoll mitbewegt, wenn sie nicht notwendigerweise ortsbezogen ist. Dies ist etwa dann hilfreich, wenn sich das chirurgische Personal abwendet oder die Position ändert und die Bildinformationen dennoch im Blick behalten soll. So kann etwa die Anzeige von Vitaldaten oder Metainformationen im richtigen Moment aus- und wieder eingeblendet werden oder entsprechend rotiert werden, wenn die Körperhaltung geändert wird, etwa um Lesbarkeit zu gewährleisten. Denkbar sind hier auch ortsbezogene Ein- und Ausblendungen.

Das dritte Gestaltungsprinzip lautet, dass ***mixed reality* Darstellungen immer Bezüge zum Realraum herstellen müssen**. Das Potenzial transparenter Bildschirme besteht darin, dass sie eine Verknüpfung zwischen der Darstellung und räumlichen Strukturen ermöglichen. Diese Verknüpfung kann einen hohen Grad der Bezugnahme besitzen, etwa im Fall der direkten Überlagerung anatomischer Strukturen mit präoperativen Bildern. Oder sie kann das Gezeigte annotieren, etwa durch entsprechende grafische Strukturen, wie Pfeile oder Linien, die Metadaten anzeigen, etwa eine Schnittführung. Schließlich fällt auch eine schwache Verknüpfung noch unter den Begriff der *mixed reality*, etwa dann, wenn das präoperative Bild neben dem Operationsgebiet platziert wird oder wenn eine Wand oder andere Fläche im Raum als Projektionsfläche genutzt wird.

Mixed reality Darstellungen ohne jeglichen Raumbezug haben hingegen nur dann einen qualitativen Mehrwert, wenn mit anderen Personen im Raum interagiert werden muss. Dies ist beispielsweise für die chirurgische Planung ein relevanter Aspekt. Ansonsten sind andere mediale Formen der Darstellungen in der Regel besser geeignet, um räumliche Ausdehnung abzubilden. Insbesondere ***virtual reality* Anwendungen bieten hier bei einem vergleichbaren Raumeindruck eine deutlich bessere Bildqualität und effizientere Interaktionsmöglichkeiten, erschweren jedoch die Kommunikation maßgeblich, da sie keinen visuellen Kontakt mit der Umgebung zulassen**. Gerade im Hinblick auf diesem Aspekt besteht noch viel Verbesserungspotenzial: nach wie vor basieren viele Anwendungskonzepte noch immer auf der Übertragung etablierter medialer Formate in die Darstellungslogik von *mixed reality*, ohne dass der individuelle räumliche Kontext in die Gestaltungskonzepte einbezogen wird.

c) Anwendungsbezogenes Bildwissen

Wenn der Blick auf das Operationsgebiet Teil eines zunehmend komplexen sozio-technologischen Gefüges wird, das durch die neuen Darstellungs- und Visualisierungstechniken vermittelt und angeleitet wird, dann erfordert die Durchführung von Operationen auch eine neue Art von Bildkompetenz. Die Verschaltung von Echtzeit-Darstellung, transparenten Displays und bildbasierter Interaktion verlangt in der chirurgischen Praxis neben analytischer Wahrnehmung und Interpretation ein prospektives Handlungs- und Körperwissen, das die Folgen bestimmter Bild- und Medienoperationen antizipiert. Wenn virtuelle und reale Anatomie miteinander überlagert werden, anstatt auf einem separaten Display dargestellt zu werden, unterscheidet sich diese Kompetenz maßgeblich von den traditionell erlernten Sehschulen und Interpretationsweisen der chirurgischen Praxis. Eine Implementierung von *mixed reality* Darstellungen in die chirurgische Praxis kann deshalb erst dann erfolgreich sein, wenn das dafür erforderliche Bildwissen einen festen Bestandteil der ärztlichen Kompetenz darstellt. Dafür muss ein entsprechendes Curriculum für ein anwendungsorientiertes Bildwissen etabliert werden, dass systematisch in die chirurgische Lehre und Ausbildung integriert wird.

Dies gilt insbesondere für die Überlagerung von Operationsgebiet und Darstellung sowie der damit verbundenen kognitiven Belastung. **Diese neuen Anschauungssituation der Überlagerung konfrontieren Chirurg*innen mit einer neuen Bildpraxis: Die Schwierigkeit besteht hier nicht darin, die Differenz zwischen Körper und Bild zu eliminieren bzw. kognitiv zu überbrücken, wie es sonst in der Bildgebung normalerweise der Fall ist, sondern sie besteht gerade in der praktischen Kenntnis der Unterscheidung zwischen Körper und Bild.** Die Schwierigkeit für Chirurg*innen liegt hier nicht in der Beseitigung oder der mentalen Überbrückung der Unterscheidung zwischen Bildgebung und Operationsgebiet, sondern vielmehr in der praktischen Kenntnis ihrer Unterscheidung in der intraoperativen Situation. Dabei tritt aber nun die Schwierigkeit auf, dass die **Überlagerung in der Regel einen Tiefenraum zeigt, von dem im Operationsgebiet nur die Oberfläche zu sehen ist.** Auch hier müssen daher zwei unterschiedliche Bildmodalitäten, nämlich **Tiefe und Fläche**, kognitiv synthetisiert werden. Die Synchronisierung zwischen Körper und Bild stellt demnach nicht nur für die Medizintechnik eine zentrale Herausforderung dar, sondern sie zudem erst dann erfolgreich in die Praxis umgesetzt werden, wenn die entsprechenden Sehgewohnheiten erlernt werden.

Dieser Unterschied in den Betrachtungsmodalitäten zwischen paralleler Anordnung und Überlagerung wird in der chirurgischen Praxis bisher kaum hinterfragt. Im Gegenteil wird das Wissen über den Umgang mit den Formen des visuellen Zugriffs auf den Körper und das Bild oftmals für austauschbar gehalten. Während das Erkennen in und das Interpretieren von Bildern in Studien über medizinischen Bildgebrauch umfassend diskutiert wird, existiert im Hinblick auf **die visuelle Arbeit mit und in Bildern** nach wie vor ein Wissensdefizit, wie Helena Mentis gezeigt hat: “learning how to identify where to look next, [...] and where the object they want is located in reference to where they are now are just a few of the visual abilities a new surgeon must acquire before being deemed proficient in this new method of surgery.”⁴⁸

Während die Bildinterpretation als eine grundlegende Fähigkeit in der medizinischen Praxis angesehen wird, ist ein oft übersehener Aspekt der chirurgischen Ausbildung die Fähigkeit, den Körper durch unterschiedliche Bildgebungsmechanismen zu sehen.⁴⁹ Mentis hat immer wieder darauf hingewiesen, dass die Fähigkeit, das Operationsgebiet zu sehen erst durch die entsprechende Bildmanipulation erzeugt wird und dass diese Form der Bildarbeit in der chirurgischen Aus- und Weiterbildung kaum systematisch trainiert wird. Stattdessen konzentriert sich das Training mit Simulationen vorwiegend auf das Erlernen von implizitem Wissen (*tacit knowledge*), wie etwa die Fertigkeiten im Umgang mit Instrumenten und der Manipulation von Objekten mit diesen Instrumenten.⁵⁰ Mentis zufolge erfordert die Fähigkeit zur Interaktion mit Bildern in einer intraoperativen Umgebung daher “weitere Arbeit bei der Wahrnehmung und Umsetzung der präsentierten Informationen” um beispielsweise zu lernen, “wie man erkennt, wo man als Nächstes hinschauen muss, [...] und wo sich das gewünschte Objekt in Bezug auf den Ort befindet, an dem sie sich die [Chirurg*innen] gerade befinden.”⁵¹

Das Sehen und Interagieren mit den neuen intraoperativen bildschirmbasierten Technologien der *mixed reality* ist demnach nicht nur eine Frage der Beherrschung der Technik, sondern ebenso eine Frage der Kompetenz im Umgang mit Bildern, die ein entsprechendes Wissen und Training erfordert. Ein visuelles Handlungswissen muss vor allem zwei Aspekte adressieren: erstens die Vermittlung der Funktionsweise und Handlungsprinzipien von *mixed*

⁴⁸ Mentis H, Chellali A, and Schwaitzberg S. “Learning to See the Body”. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI 14*. ACM Press, 2014.

⁴⁹ ebd.: 2113.

⁵⁰ ebd.: 2114.

⁵¹ ebd.: 2115. [Übersetzung: Moritz Queisner]

reality (z.B. im Hinblick auf die Wirksamkeit der Anordnung von Bildschirmen oder die gestenbasierte Steuerung) sowie zweitens die Bestimmung der sozialen, ethischen und rechtlichen Konsequenzen für die ärztliche Praxis, Anwender*innen und die Patienten*innen. Dieser zweite Aspekt wird aufgrund des zunehmenden Eingreifens von Algorithmen in der chirurgischen Praxis weiter an Bedeutung gewinnen. Gerade in der chirurgischen Praxis sind die Darstellungen der *mixed reality* auf eine Unterscheidbarkeit zwischen Realität und Virtualität angewiesen. Mit der zunehmenden Abhängigkeit von "intelligenten" Algorithmen zur Erkennung und Darstellung anatomischer Strukturen muss computergestütztes Eingreifen für Nutzer*innen und Patient*innen gleichermaßen nachvollziehbar bleiben.

Wenn jedoch die konventionelle Unterscheidung zwischen Bild und Realität von einer hybriden und synthetischen Form der Sicht auf das Operationsgebiet ersetzt wird, ist dies nicht mehr gewährleistet. Bilder fungieren nun nicht mehr als Beobachtung zweiter Ordnung, sondern greifen direkt ins Blickfeld der Benutzer*innen ein. Das dafür erforderliche „Verständnis“ der Technologie von den räumlichen Strukturen im Operationsgebiet steht für eine neue Stufe der Mensch-Maschine Kooperation, in der chirurgische Bildgebung und Visualisierungsmethoden in den Arbeitsprozess eingreifen und somit chirurgische Wissen- und Entscheidungsprozesse direkt beeinflussen.

Trotz der Vorteile, die *mixed reality* Darstellungen in der chirurgischen Praxis bieten, ist eine Ablösung des Schnittbildes, wie es PR-Abteilungen immer wieder gerne versprechen, deshalb nicht zu erwarten. **Die 3D-Modelle der *mixed reality* können den Blick auf das Schnittbild bisher allenfalls ergänzen.** Dies lässt sich insbesondere darauf zurückführen, dass sich die Anatomie während invasiver Eingriffe unter der chirurgischen Manipulation verändert. Somit verlieren die präoperativ erhobenen Daten in der konkreten chirurgischen Situation schnell ihre Genauigkeit. Zudem ermöglichen 3D-Modelle nicht in jeder Hinsicht eine größere Konkretion als die zweidimensionalen Schnittbilder, etwa wenn es darum geht, einzelne Gewebeschichten zu differenzieren. **Das konventionelle radiologische Sehmodell zweidimensionaler Schnittbilder bleibt weiterhin die Referenz.**

Allerdings beginnen sich in der Chirurgie vielversprechende Anwendungsszenarien abzuzeichnen, zunächst für die Navigation von Instrumenten und bei der Planung besonders komplexer Eingriffe, die eine genaue Kenntnis der Anatomie voraussetzen, etwa in der

Leberchirurgie. Hier sind technische Lösungen bereits heute umsetzbar, sodass Chirurg*innen visuell umfassender unterstützt werden könnten. Bisher erfordert die Portierung anatomischer Modelle in *mixed reality* Brillen jedoch noch einen erheblichen Zeitaufwand bei der Aufbereitung der 3D-Modelle, der zudem parallel zu den etablierten Darstellungsweisen betrieben werden muss. Zwar bieten immer mehr Hersteller*innen inzwischen in den Arbeitsablauf integrierte Lösungen zur Umwandlung von Schnittbildern in 3D-Modelle an. Jedoch muss hier in der Regel noch händisch nachbearbeitet und justiert werden. Im Operationssaal ist der Einsatz von *mixed reality* Darstellungen daher momentan nur als unterstützende Modalität denkbar, um Arbeitsabläufe anzuleiten und die Orientierung zu verbessern. So könnten *mixed reality* Brillen während chirurgischer Eingriffe etwa virtuelle Konsultationen durch Spezialist*innen ermöglichen. Mithilfe der Gestensteuerung könnten sie anatomische Strukturen während der Operation markieren und die Operation nicht nur sprachlich, sondern auch visuell anleiten.

3. Fallstudie *Virtual Reality*: virtuelle Hospitation in der chirurgischen Aus- und Weiterbildung

3.1 Ausgangssituation

Gut ausgebildete Fachkräfte bilden das Fundament ökonomisch gesunder und wettbewerbsfähiger Unternehmen. Jedoch zeichnet sich seit einigen Jahren eine zunehmende Verschärfung in der wirtschaftlichen Nachwuchssicherung ab.⁵² Viele chirurgische Kliniken in Deutschland leiden unter einem akuten Mangel an qualifizierten Bewerber*innen. Dies betrifft insbesondere die Gesundheitsberufe im Operationssaal.⁵³ Zusätzlich wird die Nachfrage nach Fachkräften in den kommenden Jahren durch den demografischen Wandel weiter steigen. Im Gesundheitsbereich sind Kliniken schon jetzt auf Quereinsteiger*innen und externe Honorarkräfte angewiesen, um den Tagesbetrieb im Operationssaal aufrechtzuerhalten.⁵⁴ Diese personellen Engpässe sind schwer kalkulierbar und stellen ein wirtschaftliches Risiko dar. Sie wirken sich aber auch auf die Qualität der Gesundheitsversorgung aus.

Kliniken müssen die chirurgische Ausbildung deshalb attraktiver machen und die Weiterbildung effizienter gestalten, um den Fachkräftemangel zu kompensieren. Neben der Aufwertung der allgemeinen ökonomischen und sozialen Rahmenbedingungen der Berufe wird dabei aus betrieblicher Sicht auch der Einsatz neuer Medienformate zur Wissensvermittlung immer wichtiger. Gerade angesichts komplexer werdender Gerätschaften und Handlungsabläufe, etwa durch den erhöhten Einsatz automatisierter Technik und digitaler Prozesse, wie etwa Operationsrobotern, müssen klinische Ausbildungsbetriebe individuelle und skalierbare Lern- und Trainingsinhalte bereitstellen, die Fachkräften das notwendige Wissen zugänglich machen und die zugleich auf die Anforderungen des technologischen Wandels reagieren können.

In der Chirurgie erfolgt das Erlernen von Fähigkeiten und der Austausch von Erfahrungen heute großteils durch die Beobachtung während der Assistenzzeit, bei Hospitationen oder durch die Präsentation von Videos, zum Beispiel auf Konferenzen oder online. Diese

⁵² M Anding M. "Fachkräftemangel: Zur Lösung Eines Greifbaren Problems in Digitalen Zeiten". *Wirtschaftsinformatik & Management* 10, no. 1 (February 2018): 14–21.

⁵³ Schneider NK, Masthoff M, Gosheger G, Schopow N, Theil JC, Marschall B, and Zehrfeld J. "Generation Y in der Chirurgie. Der Konkurrenzkampf um Talente in Zeiten des Nachwuchsmangels". *Der Chirurg*, February 2020.

⁵⁴ Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Berufsbildungsbericht*, 2019.

Methoden sind ein wesentlicher **Bestandteil der lebenslangen chirurgischen Ausbildung und sind für die Qualität der Versorgung nach wie vor wichtig**. Insbesondere die Teilnahme an operativen Eingriffen bildet einen zentralen Bestandteil der chirurgischen Ausbildung. Sowohl die Möglichkeiten der teilnehmenden Beobachtung als auch diejenigen des assistierten Eingreifens zur Erprobung chirurgischer Arbeitsabläufe am Patienten sind jedoch begrenzt und außerhalb des Operationssaals kaum skalierbar. Hier ist die Lücke zwischen Theorie und Praxis besonders groß. Vor diesem Hintergrund etabliert sich eine zunehmende Anzahl von digitalen Formaten zur Simulation von Arbeitsabläufen im Operationssaal, mit denen die Möglichkeiten der digitalen Aus- und Weiterbildung in der Chirurgie erweitert werden soll. In erster Linie teilen Simulationen komplexe operative Aufgaben in verständliche und messbare Fertigkeiten auf, um die Geschicklichkeit im Umgang mit Instrumenten⁵⁵ zu verbessern und um Wissen über Arbeitsabläufe und potenzielle Risiken zu kommunizieren, ohne dabei die Sicherheit von Patient*innen zu gefährden. **Ein grundsätzlicher Vorteil der Simulation besteht darin, dass sie ein kontrolliertes Umfeld bietet, das ein strukturiertes Feedback und die Beurteilung der Fähigkeiten ermöglicht.**⁵⁶

In der Forschung wird der Aufstieg digitaler Simulationstechniken oftmals in einen historischen Zusammenhang mit dem Niedergang des Lehrer-Schüler-Modells (*apprenticeship model*) der chirurgischen Facharztausbildung^{57,58} gesetzt, das William Stewart Halsted am Johns Hopkins Hospital in Baltimore im späten 19. Jahrhundert entwickelte.⁵⁹ Halsted etablierte mit seinem Trainingsansatz "*see one, do one, teach one*" einen subjektiven sowie zeit- und fallabhängigen Wissenstransfer zwischen Assistent*innen und betreuenden Chirurg*innen. Diese Art der Ausbildung innerhalb des Operationssaals stößt jedoch im täglichen Klinikbetrieb zunehmend an ihre Grenzen. Dies lässt sich insbesondere auf die veränderten wirtschaftlichen, sozialen und regulatorischen Bedingungen in der chirurgischen Praxis zurückführen.⁶⁰ Auf wirtschaftlicher

⁵⁵ Polavarapu HV, Kulaylat AN, Sun S, and Hamed OH. "100 Years of Surgical Education: The Past, Present, and Future." *Bull Am Coll Surg* 98 (2013): 22–27.

⁵⁶ Kotsis SV, and Chung KC. "Application of the See One, Do One, Teach One Concept in Surgical Training." *Plast Reconstr Surg* 131 (2013): 1194–1201.

⁵⁷ Nataraja RM, Webb N, and Lopez PJ. "Simulation in Paediatric Urology and Surgery, Part 2: An Overview of Simulation Modalities and Their Applications." *J Pediatr Urol* 14 (2018): 125–31.

⁵⁸ Shaharan S, and Neary P. "Evaluation of Surgical Training in the Era of Simulation." *World J Gastrointest Endosc* 6 (2014): 436–47.

⁵⁹ Halsted, WS. The Training of the Surgeon. *Johns Hopkins Bulletin*. 1904; 15:267–275.

⁶⁰ ebd.

Ebene hat der Druck zur Produktivitätssteigerung die Operationszeit kontinuierlich verkürzt.⁶¹ Die Umsetzung von Arbeitszeitregulierungen hat die Ressourcen für den zeitaufwändigen Prozess des Wissenstransfers im Operationssaal während der Ausbildung zugleich immer weiter verringert.⁶²

Angesichts der damit zunehmend begrenzten Verfügbarkeit und Skalierbarkeit der Möglichkeiten der teilnehmenden Beobachtung und der assistierten Intervention, die Ärzt*innen und Auszubildenden helfen, chirurgische Fertigkeiten und Arbeitsabläufe im Operationssaal zu erlernen und zu verbessern, scheint der Operationssaal nicht mehr die ideale Umgebung für den Wissenstransfer an medizinisches Fachpersonal zu sein.⁶³ Gerade für den Erwerb grundlegender technischer Fertigkeiten ist die Zeit im Operationssaal inzwischen oftmals zu wertvoll geworden.⁶⁴ In der Konsequenz werden Assistenzärzt*innen deshalb in der Praxis oft zu bloßen Beobachter*innen degradiert.⁶⁵

Diese Einschränkungen werden durch die Verbreitung bildgestützter und computergestützter Verfahren noch weiter verstärkt, da diese die Möglichkeiten des anleitenden Lernens an Patient*innen, etwa bei der Führung von Instrumenten, physisch einschränken und somit weniger Raum für die Zusammenarbeit lassen. Insbesondere bei robotergestützten Verfahren verlagern sich die Aufmerksamkeit und der Fokus leitender Chirurg*innen vom Operationstisch auf Computerterminals, die den Wissensaustausch noch weiter erschweren, da sie in der Regel keine gemeinsame Sicht auf eine Situation ermöglichen (**Abb. 23**). Insgesamt haben diese Entwicklungen einen tiefgreifenden Einfluss auf die Qualität der Ausbildung und die Effizienz der chirurgischen Versorgung.

⁶¹ Patel P, Hiten RH, and Bijen P. "Virtual Reality Surgical Simulation in Training". *Expert Review of Anticancer Therapy* 12, no. 4 (April 2012): 417–20.

⁶² Hopmans, CJ, Hoed PT, van der Laan L, van der Harst E, van der Elst M, Mannaerts GH, Dawson I, Timman R, Wijnhoven BP, and Jzermans JN. "Impact of the European Working Time Directive (EWTD) on the Operative Experience of Surgery Residents." *Surgery* 157 (2015): 634–41.

⁶³ Robison RA, Liu CY, and Apuzzo MLJ. "Man Mind, and Machine: The Past and Future of Virtual Reality Simulation in Neurologic Surgery". *World Neurosurgery* 76, no. 5 (November 2011): 419–30.

⁶⁴ Polavarapu HV, Kulaylat AN, Sun S, and Hamed OH. "100 Years of Surgical Education: The Past, Present, and Future." *Bull Am Coll Surg* 98 (2013): 22–27.

⁶⁵ Ludmerer KM. *Time to Heal: American Medical Education from the Turn of the Century to the Era of Managed Care*. Oxford University Press, 2005.



Abb. 23, Robotische Operationssysteme wie das Da-Vinci-System verfügen zwar über Lautsprecher und Mikrofone, mit denen die Kommunikation innerhalb des Teams verbessert werden kann. Ein anleitendes Lernen wird durch diese Anordnung jedoch erschwert und kann in der Regel nur über eine weitere Konsole realisiert werden.

Die existierenden Formate der Simulation chirurgischer Eingriffe, etwa an menschlichen Körperspenden oder Tieren können das praxisorientierte Lernen jedoch nur bis zu einem gewissen Grad abdecken und sind nur bedingt dazu geeignet die Defizite im Operationssaal zu kompensieren. Etablierte Simulationsformate sind nicht nur kostenintensiv, arbeitsaufwändig und begrenzt wiederholbar, sondern sie bergen oftmals auch erhebliche ethische Probleme und transportieren prozessbasiertes Wissen bei weitem nicht so authentisch, wie reale chirurgische Eingriffe. Studierende und Auszubildende ebenso wie Fachpersonal in der Weiterbildung stehen deshalb vor dem Problem, erworbenes theoretisches Wissen praxisorientiert anzuwenden und

einzuüben. Diese Ausgangssituation des Erlernens chirurgischer Arbeitsabläufe durch teilnehmende Beobachtung in Kombination mit der begrenzten Möglichkeit der aktiven Wissensakkumulation führt zu der Annahme, dass sich die Lernkurve während der Ausbildung zunächst flach entwickelt und erst während mit der eigentlichen Arbeitserfahrung ansteigt. Diese Lernkurve sollen Simulationen grundsätzlich abflachen, in dem sie ein Probehandeln vor dem eigentlichen Eingriff in möglichst authentischer Umgebung ermöglichen.

Neben den gut etablierten Simulationsmethoden, die auf Puppen, Rollenspielen oder Körperspenden beruhen, haben die digitale Simulationen zuletzt eine Vielzahl neuer Formate hervorgebracht, die das Spektrum der Kompetenzvermittlung erweitern. Diese neuen digitalen Medienformate versprechen eine effektivere Verknüpfung zwischen theoretischen (z.B. Seminare, Videos) und praktischen (z.B. Hospitationen, Rollenspiele) Lern- und Ausbildungsformen und sollen es dem chirurgischen Personal ermöglichen, sich auf neue Weise praktische Fertigkeiten und Kenntnisse außerhalb des Operationssaals anzueignen. Vor allem *augmented* oder *virtual reality* Anwendungen treten mit dem Versprechen an, wichtige Fertigkeiten und Arbeitsabläufe authentischer zu vermitteln, als klassische Simulationsformate.⁶⁶ Insbesondere der Bereich der Simulation in *virtual reality* ermöglicht es Auszubildenden oder Assistenzärzt*innen auf eine immersive Art und Weise klinische Kompetenz durch das Erleben von Arbeitssituationen zu entwickeln.

Gerade für chirurgische Gesundheitsberufe, deren Arbeitsabläufe maßgeblich von der Kooperation des Teams abhängen, fehlen bisher effektive Kommunikationsstrategien, um Arbeitssituationen praxisorientiert zu vermitteln.⁶⁷ Dies ist darauf zurückzuführen, dass Arbeitsabläufe und -kontexte im Operationssaal ohne physische Präsenz nicht ohne Weiteres reproduziert werden können sind. Im chirurgischen Umfeld ist insbesondere die Zugänglichkeit zu Arbeitssituation oftmals sehr eingeschränkt, etwa aufgrund von Hygienebedingungen und Persönlichkeitsrechten. Für diese eingeschränkten Anwendungssituationen setzen klinische Ausbildungsbetriebe verstärkt auf den Einsatz von *virtual reality*, um dem Personal einen authentischen Eindruck der Arbeitsabläufe und -kontexte zu vermitteln.

⁶⁶ Gutiérrez, F, J Pierce, VM Vergara, R Coulter, L Saland, TP Caudell, TE Goldsmith, and DC Alverson. "The Effect of Degree of Immersion upon Learning Performance in Virtual Reality Simulations for Medical Education." *Stud Health Technol Inform* 125 (2007): 155–60.

⁶⁷ Green J, Wyllie A, and Jackson D. "Virtual Worlds: A New Frontier for Nurse Education?" *Collegian* 21 (2014): 135–41.

Heute gilt es als weithin anerkannt, dass virtuelle Trainingsumgebungen die Leistung des chirurgischen Personals verbessern können.^{68,69,70,71,72} Dies trifft insbesondere auf den Vergleich mit den etablierten Formen des videobasierten Lernens zu.^{73,74} Die meisten digitalen Simulationen sind jedoch nicht in der Lage und auch nicht dafür ausgelegt, den von Halsted praktizierten fallbezogenen und prozessbezogenen Wissenstransfer zu reproduzieren, sondern sie zielen in der Regel auf einzelne Arbeitsschritte eines Verfahrens ab, um die psychomotorischen Fähigkeiten, wie etwa die Hand-Augen-Koordination, zu verbessern. Dementsprechend vermitteln VR-basierte Simulationsformate in der Regel kaum Prozesswissen, sondern vor allem ein implizites Wissen (*tacit knowledge*). Beim *virtual reality* Training der Firma *FundamentalVR* (London, Vereinigtes Königreich) werden etwa die auf das Gewebe einwirkenden mechanischen Kräfte bei einer Bewegung durch einen sogenannten haptischen Arm simuliert (**Abb. 24**).⁷⁵

Diese weit verbreitete Art des VR-basiertes Kompetenzerwerbs dient vor allem dem Erwerb einzelner spezifischer Fähigkeiten und weniger dem Verständnis der Gesamtsituation im Sinne des Konzepts von Halsted.⁷⁶ Eine realistische und praxisnahe Simulation des gesamten Arbeitsablaufs einschließlich der Arbeitsumgebungen des Operationssaals ist trotz avancierter computergrafischer Szenarien in *virtual reality* Umgebungen bisher noch nicht möglich. Hier liegt noch ein blinder Fleck im Trend der zunehmenden Virtualisierung chirurgischer Aus- und Weiterbildung, der den Ausgangspunkt für die vorliegende Fallstudie bildet.

⁶⁸ Sachdeva AK., Bell RH, Britt LD, Tarpley JL, Blair PG, and Tarpley MJ. "National Efforts to Reform Residency Education in Surgery". *Academic Medicine* 82, no. 12 (December 2007): 1200–1210.

⁶⁹ Seymour NE. "VR to OR: A Review of the Evidence That Virtual Reality Simulation Improves Operating Room Performance". *World Journal of Surgery* 32, no. 2 (December 2007): 182–88.

⁷⁰ Minhua M, Lakhmi CJ, and Anderson P, eds. *Virtual Augmented Reality and Serious Games for Healthcare 1*. Berlin & Heidelberg: Springer, 2014.

⁷¹ Zobel B, Werning S, Berkemeier L, and Thomas O. "Augmented- und Virtual-Reality-Technologien zur Digitalisierung der Aus- und Weiterbildung. Überblick, Klassifikation und Vergleich". In *Digitalisierung in der Aus- und Weiterbildung*, 20–34. Berlin Heidelberg: Springer, 2018.

⁷² Chan S, Conti F, Salisbury K, and Blevins NH. "Virtual Reality Simulation in Neurosurgery". *Neurosurgery* 72 (January 2013): A154–A164.

⁷³ Alaker M, Wynn GR, and Arulampalam T. "Virtual Reality Training in Laparoscopic Surgery: A Systematic Review & Meta-Analysis". *International Journal of Surgery* 29 (May 2016): 85–94.

⁷⁴ P Vitish-Sharma P, Knowles J, and Patel B. "Acquisition of Fundamental Laparoscopic Skills: Is a Box Really as Good as a Virtual Reality Trainer?". *International Journal of Surgery* 9, no. 8 (2011): 659–61.

⁷⁵ Prentice R. "The Anatomy of a Surgical Simulation". *Social Studies of Science* 35, no. 6 (December 2005): 837–66.

⁷⁶ Gallagher AG, Ritter EM, Champion H, Higgins G, Fried MP, Moses G, Smith CD, and Satava RM. "Virtual Reality Simulation for the Operating Room". *Annals of Surgery* 241, no. 2 (February 2005): 364–72.



Abb. 24, Beispiel für die VR-basierte Vermittlung von implizitem Wissen (*tacit knowledge*).

3.2 Fragestellung und Methodik

Der Operationssaal ist eine komplexe und informationsreiche Arbeitsumgebung, in der Teammitglieder mit unterschiedlichen disziplinären Hintergründen eng zusammenarbeiten müssen. Das im Operationsteam verteilte Wissen und die individuelle Erfahrung sind außerhalb der realen Arbeitssituationen oftmals nur schwer zu vermitteln. Im Gesundheitsbereich erfordern eine Reihe von Tätigkeiten zudem einen hohen Grad an Teamfähigkeit, sowie starke Belastbarkeit und Widerstandsfähigkeit. So ist bei operativen Eingriffen das Bewegen und Interagieren mit der räumlichen Umgebung besonders relevant, etwa wenn unterschiedliche Arbeitspositionen, spezielle Handgriffe, Stresssituationen oder instrumentelle Anordnungen nachvollzogen werden müssen. Gerade das Training von Belastungssituationen im Operationssaal, etwa von operationstechnischen Assistent*innen, ist mit herkömmlichen Simulationsformaten, wie Rollenspielen, kaum reproduzierbar.

Die vorliegende Fallstudie adressiert dieses Defizit: auf der Grundlage eines eigens dafür entwickelten Prototyps soll gezeigt werden, wie die Reproduktion und Vermittlung chirurgischer Arbeitsprozesse und -kontexte im Operationssaal in virtuellen Simulationen ein prozess- und kontextbezogenes Erfahrungswissen für chirurgische Gesundheitsberufe

generieren kann. Dazu werden die grundlegenden Darstellungs-, Vermittlungs- und Interaktionsformen für die VR-basierte Simulation chirurgischer Arbeitsabläufe diskutiert, sowie die ihnen zugrunde liegenden Bildtechniken identifiziert. Das Ziel ist es erstens zu zeigen, **in welchen chirurgischen Anwendungskontexten und Arbeitssituationen *virtual reality* als Instrument zur Wissensvermittlung eingesetzt werden kann** (z.B. für das Einüben instrumenteller Anordnungen oder die Kooperation des Personals für spezielle Arbeitsabläufe). Zweitens soll gezeigt werden, **wie virtuelle Umgebungen gestaltet sein müssen, um die Qualität und Effektivität in der digitalen Bildung zu ermöglichen.** Dies betrifft insbesondere den Einsatz und die Kombination computeranimierter und videobasierter Darstellungsmodalitäten sowie die Interaktion mit und in virtuellen Lernumgebungen.

Den Untersuchungsgegenstand der Arbeit bildet eine prototypische Anwendung für die Aus- und Weiterbildung von chirurgischem Personal, die im Rahmen einer interdisziplinären Forschungsk Kooperation zwischen Chirurgie, Design und Medienwissenschaft an der Chirurgischen Klinik, Experimentelle Chirurgie der Charité – Universitätsmedizin Berlin und dem Exzellenzcluster *Bild Wissen Gestaltung. Ein interdisziplinäres Labor* an der Humboldt-Universität zu Berlin entwickelt wurde. Dieser Prototyp ist eine *virtual reality* Anwendung, die für die Verwendung mit der *virtual reality* Brille *Vive* (HTC Inc., New Taipei, Taiwan) optimiert ist, aber mit allen Geräten kompatibel ist, welche die *SteamVR* Plattform unterstützen (Valve Corporation, Bellevue, USA). Die Anwendung mit dem Titel *VolumetricOR* soll den Prototyp für einen virtuellen Klassenraum bilden, in dem die komplexe Interaktion und interprofessionelle Zusammenarbeit von chirurgischen Gesundheitsberufen, insbesondere von Chirurgen*innen, Anästhesist*innen und chirurgischen Assistent*innen nachvollzogen werden kann. Sie bietet eine verständliche Einführung in die Simulationsformate der *virtual reality* und ermöglicht es Benutzern*innen, Sequenzen einer Lebendnierenspende Operation zu erkunden. Der Quellcode der Anwendung, die damit verbundenen Forschungsdaten und die abspielbare Anwendung sind unter der Creative Commons Lizenz *Attribution-NonCommercial 4.0 International* (CC BY-NC 4.0) lizenziert und können über den edoc-Server der Humboldt-Universität zu Berlin abgerufen werden.⁷⁷

⁷⁷ Queisner M, Pogorzelskiy P, Remde C, Sauer IM. „VolumetricOR“, 2020. <https://doi.org/10.18452/20470>.

VolumetricOR basiert auf dem fotogrammetrisch rekonstruierten 3D-Modell eines Operationssaals in der Charité – Universitätsmedizin Berlin. Fotogrammetrie ist ein Bildvermessungsverfahren, bei dem die räumliche Lage von Objekten aus den Koordinaten sich überschneidender Bildpunkte rekonstruiert wird. Nutzer*innen können das Modell mit einer *virtual reality* Brille in realistischer Skalierung begehen sowie – mithilfe der Controller – Objekte identifizieren und Metadaten abrufen. Zentral die Darstellung von Handlungen und Abläufen ist jedoch die zeitkritische Visualisierung chirurgischer Eingriffe. Um in *virtual reality* nativ nutzbar zu sein, müssen Videoaufnahmen daher die Anforderung erfüllen, aus beliebiger Perspektive sichtbar zu sein. Die dafür erforderliche sogenannte volumetrische Videotechnik ermöglicht es, konkrete Arbeitssituationen im Operationssaal räumlich zu erfassen. Neben Videokameras kommen dabei Sensoren zum Einsatz, die es ermöglichen Tiefeninformationen zu registrieren. So kann der Operationssaal und der chirurgische Arbeitsablauf nicht nur stereoskopisch, sondern auch volumetrisch erfasst werden.

Volumetrisches Video ist ein neues Bildformat, das 3D-Bilder nicht nur als statische Raumdarstellungen erfasst, sondern auch die Möglichkeit bietet, zeitbasierte Szenen dreidimensional zu erfassen und sie ähnlich wie zweidimensionale Videos abzuspielen. Diese Methode zur Aufzeichnung chirurgischer Eingriffe bildet einen neuen Ansatz zur Erfassung und Darstellung von Raum, der über die traditionellen Formate der videobasierten Aufzeichnung und Demonstration chirurgischer Arbeitskontexte hinausgeht. Das Vorgehen unterscheidet sich aber ebenfalls grundlegend von neueren Videoformaten wie 360° Videos, die eine Szene zwar hochauflösend und dreidimensional abbilden können, diese jedoch ausschließlich aus der Kameraperspektive zeigen. Im Gegensatz zu animierten Simulationen, die ausschließlich auf computergenerierten Darstellungen basieren, sind volumetrische Rekonstruktionen lichtbasierte Daten, sodass sie das tatsächliche Geschehen im Operationssaal registrieren. Die Besonderheit dabei ist, dass an jedem Ort im Raum zu jedem Zeitpunkt eine Bildinformation vorliegt.

Dieses Verfahren bildet die Grundlage für das hier erarbeitete Konzept zur Vermittlung chirurgischer Arbeitsprozess und -kontexte im Operationssaal in einer *virtual reality* Brille. Die Verlagerung des Erwerbs von prozessbasiertem Wissen aus dem Operationssaal in eine virtuelle Lernumgebung, so die These, könnte die Präsenzzeit vor Ort zwar nicht ersetzen, aber verkürzen und ergänzen. Insbesondere in den chirurgischen Gesundheitsberufen, in denen das Erlernen

von Handlungsabläufen im Rahmen komplexer Herstellungs- oder Interaktionsprozesse nur mit entsprechendem Aufwand praxisnah trainiert werden kann, kann die Möglichkeit einer virtuellen Hospitation die Qualität der Aus- und Weiterbildung steigern. Chirurgisches Personal kann sich so ein prozess- und kontextbezogenes Wissen aneignen, das in realen Situationen sicherer eingesetzt werden kann, etwa indem emotional belastende und stressige Situationen vorab durchgespielt werden können. Zudem können theoretisches Wissen und praktische Erfahrung enger miteinander zu verknüpft werden und so die existierende Lücke zwischen realem und virtuellem Operationssaal schließen, da nicht nur einzelne Arbeitsschritte reproduziert werden, sondern der gesamten chirurgischen Arbeitsablauf erfassbar und nachvollziehbar wird.

VolumetricOR soll es Kliniken in Zukunft ermöglichen, spezifische Arbeitsabläufe aus beliebiger Perspektive erfahrbar, nachvollziehbar und reproduzierbar zu machen. Dabei wurde besonderen Wert darauf gelegt, dass keine kostenintensive Hardware und Software erforderlich ist und keine umfangreiche Nachbearbeitung der Daten erforderlich ist. Der Prototyp *VolumetricOR* erhebt nicht den Anspruch, eine marktreife Lösung zu bieten, sondern soll den Akteuren in der chirurgischen Praxis und der Gesundheitswirtschaft das Potenzial der prozessbasierten volumetrischen Simulation für die chirurgische Ausbildung demonstrieren und ihr Potenzial für die klinische Ausbildung aufzeigen. Langfristiges Ziel des Projektvorhabens ist die Weiterentwicklung des Konzepts zu einem marktfähigen Produkt, mit dem reale Arbeitsprozesse im klinischen Kontext volumetrisch erfassbar gemacht werden können und in klinikspezifischen virtuellen Umgebungen betrachtet werden können, die zur Aus- und Weiterbildung von chirurgischem Personal eingesetzt werden können.

3.3 Forschungsstand

Sowohl für Krankenhäuser, als auch für Arbeitgeber aus zahlreichen weiteren Branchen, wie Energie- und Bauwirtschaft, Verkehr und Logistik sowie Chemie oder Elektroindustrie sind videobasierte Lernumgebungen inzwischen ein fester Bestandteil der Aus- und Weiterbildung. Gleichzeitig äußern Ausbildungsbetriebe und -einrichtungen Bedarf nach interaktiven Lernlösungen, in denen Nutzer*innen nicht nur zuschauen, sondern tatsächlich zu Teilnehmer*innen einer Szene werden. Dies ist jedoch mit videobasierten Formaten bisher kaum umsetzbar. Das Bewegen innerhalb einer Szene, das Wechseln von Positionen oder das Interagieren mit im Raum platzierten Metadaten ist der computeranimierten Simulation

vorbehalten. Damit wird ein offensichtliches Bedürfnis der Marktteilnehmer*innen noch nicht bedient. Der Bedarf an interaktiven Lernlösungen für die individuellen Arbeitsabläufe und Arbeitstechniken vor Ort wird aufgrund der technologischen Produktvielfalt und immer schnelleren Innovationszyklen in den kommenden Jahren voraussichtlich weiter steigen. Die Möglichkeit, spezifische chirurgische Eingriffe vorab aktiv zu durchlaufen und nicht nur theoretisch zu verinnerlichen, könnte die Produktivität und Qualität der Versorgung im Operationssaal deutlich steigern.

Die Forschung und Entwicklung zu dreidimensionaler Raumerfassung, insbesondere zu volumetrischen Aufnahmeverfahren und zu Lichtfeldern,⁷⁸ steht noch am Anfang, hat aber in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht, sodass sich ein neues **lichtbasiertes räumliches Bewegtbildformat** durchaus abzeichnet. In Kombination mit zunehmend verbreiteten Abspielgeräten für *virtual reality* Inhalte ergeben sich für die Simulation chirurgischer Abläufe neue Skalierungsmöglichkeiten. Während die Effektivität von *virtual reality* für Trainingszwecke und Wissensakkumulation Gegenstand aktueller klinischer Studien ist, sind die Kriterien für die volumetrische Erfassung realer Umgebungen bisher kaum Gegenstand systematischer Untersuchungen. Volumetrische Aufnahmetechniken kommen in der Aus- und Weiterbildung für die Darstellung von Lerninhalten bisher noch kaum zum Einsatz. Dies liegt vor allem daran, dass bisher kaum kostengünstige und agil einsetzbare Verfahren zur Verfügung stehen, die eine ausreichende Qualität liefern. **Aktuelle technische Lösungen für die Aufzeichnung von volumetrischen Videos erfordern bisher die aufwändige und teure Rekonstruktion von Aufnahmesituationen in speziellen Filmstudios, deren technisches Setup teuer ist und aufgrund des Raumbedarfs nicht für den Einsatz im Operationssaal geeignet ist. Studio-basierte Aufnahmen ermöglichen zwar eine wesentlich bessere Qualität, jedoch keine Aufnahme im Realkontext der chirurgischen Ausbildung.**

Videobasierte Inhalte für *virtual reality* Simulationen werden bisher vorwiegend mithilfe von 360° Kamerasystemen erstellt. Diese mit mehreren kreisförmig nach außen zeigend arrangierten Kameras ausgestatteten Systeme ermöglichen die kostengünstige Aufnahme einer Szene aus einer festen Kameraposition. Trotz des anhaltenden Erfolgs der 360° Videotechnik

⁷⁸ Lichtfeldkameras messen neben der Helligkeit eines Bildpunkts auch die Richtung der Lichtstrahlen. Aus diesen Daten lässt sich Rauminformationen berechnen, mit denen das Bild z.B. im Nachhinein fokussiert werden kann.

werden aber bereits jetzt die Grenzen des Einsatzspektrums immer deutlicher: **360° Videos ermöglichen keine Abweichung vom Betrachtungsstandpunkt, das heißt die Nutzung ist auf die Perspektive der durch die Kamera aufgezeichneten Umgebung beschränkt.** So sind 360° Videos beispielsweise nicht in der Lage die Darstellung an die Körpergröße einer Person anzupassen, was das Gefühl der Präsenz in der virtuellen Umgebung verringert, da Körper und Bild voneinander abweichen. Die wichtigste Innovation neuerer *virtual reality* Systeme bleibt damit ungenutzt, nämlich die exakte Verortung der Nutzer*innen im Raum und die dadurch ermöglichte Anpassung des Bildes an die Perspektive. Ein Bewegen durch den virtuellen Raum ist somit nicht möglich. 360° Videos erlauben lediglich die Änderung des Blickwinkels von einem festen Standpunkt (sogenannte *three degrees of freedom*).

Virtual reality Systeme sind hingegen in der Lage, Bilder in Echtzeit an den Standpunkt der Betrachtung anzupassen (sogenannte *six degrees of freedom*). Sie erweitern damit die Seherfahrung herkömmlicher 360° Videos um eine wesentliche Dimension: Durch die räumliche Erfassung ermöglichen sie es Nutzer*innen sich frei in der Szene zu bewegen und die aufgenommenen Inhalte aus beliebiger Perspektive zu betrachten. So können Arbeitsabläufe aus individueller Perspektive sowie in realer Skalierung und Tiefe dargestellt werden. Damit wird auch das Problem der Körpergrößenskalierung gelöst. **Diese "native" virtual reality, die Position und Bewegung der Betrachter*innen einbezieht, erfordert allerdings auch das vorliegenden entsprechender Anwendungen zur Aufnahme und Darstellung volumetrischer Daten, die dieses Format bedienen können.**

Neben kleineren Projekten unabhängigen Entwickler*innen setzt inzwischen eine wachsende Anzahl von Unternehmen auf die Nutzung von speziellen Studios für die Aufnahme realistischer volumetrischer Videos für virtuelle Inhalte. Die Mehrzahl der Projekte nutzt dafür fotogrammetrische Verfahren. Ein solches Verfahren besteht in der Regel aus einer großen Anzahl hochwertiger, fest installierter digitaler Kamerasysteme mit Spiegelreflexkameras (*digital single-lens reflex*) Kameras. Jede Kamera löst synchron aus und ein Supercomputer generiert anschließend aus diesem Datensatz ein 3D-Modell. Die dafür eingesetzten Fotogrammetrie-Algorithmen benötigen für ihre Berechnungen eine Vielzahl von Sensoren mit sehr hoher Rechenleistung. Dies erfordert einen hohen Materialaufwand mit entsprechend großem Raumbedarf, was dieses Verfahren für den Einsatz im klinischen Kontext weitgehend ausschließt. Ein solcher Aufbau ist ausschließlich in eigens dafür hergerichteten Studios

realisierbar, deren Ausstattung und Produktionsablauf mit hohen Kosten verbunden sind. Unternehmen wie *Microsoft Captures Studios*, *Intel Volumetric Capture* oder *8i* geben Preise zwischen 5000€ und 25000€ pro aufgenommene Minute an. Auch in Deutschland existieren inzwischen Aufnahmestudios, etwa die Firma *Volucap* in Babelsberg. Die vergleichsweise hohen Kosten machen die Technologie insbesondere für Film- und Werbeproduktionen interessant und werden bisher nicht zur Simulation von Arbeitsumgebungen genutzt. Der hohe Personal- und Materialaufwand im Studio lässt eine Verbesserung des Preis-Leistungs-Verhältnisses in Zukunft nur in geringem Umfang erwarten.

Die Weiterentwicklung von Tiefensensoren und Computerleistung ermöglicht inzwischen jedoch eine sich zügig verbessernde Aufnahmequalität bei sinkenden Kosten für die Verarbeitung und Wiedergabe von volumetrischen Videos. Die aktuelle Intensivierung der Forschung über 3D-Simulationen, etwa im Bereich der Fotogrammetrie trägt zusätzlich dazu bei, dass mehr Infrastrukturen zur Verarbeitung raumbasierter Daten zur Verfügung stehen. Damit ist der Einsatz kostengünstiger und raumsparender Technik außerhalb der etablierten hochpreisigen Produktionsstudios inzwischen möglich. Ein gut zu integrierendes Aufnahme-equipment dürfte gerade für die klinische Anwendung ein ausschlaggebendes Kriterium für den Einsatz der Technik darstellen und könnte zu einer Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von klinischen Ausbildungsbetrieben beitragen. Auf Nutzer*innenseite wird der Einsatz in der Aus- und Weiterbildungszwecke zudem von immer preiswerteren Endgeräten für die Darstellung in *virtual reality* Brillen weiter begünstigt, sodass die Investitionen in einem angemessenen Rahmen bleiben.

Komplettlösungen für die mobile Nutzung gibt es auf dem Markt jedoch noch nicht. Derzeit erfordert der Einsatz entsprechender Systeme noch besondere fachliche Expertise und ist nicht ohne Weiteres aus den laufenden Ressourcen und Kompetenzen der Kliniken umsetzbar. Zu den aktuell verfügbaren Anwendungen, die allerdings nicht auf klinische Anwendungsszenarien und Einsatzorte zugeschnitten sind, gehören aktuell *Depthkit* (*Similie Inc.*, Brooklyn, Vereinigte Staaten von Amerika), *Brekel Pro Pointcloud v3* (*Jasper Brekelmans*, Amsterdam, Niederlande), *EF Eve* (*EF Eve*, London, Vereinigtes Königreich) und *LiveScan3D* (*Kowalski, M.*; *Naruniec, J.*; *Daniluk, M.*, Warschau, Polen, **Tab. 1**). Diese Anwendungen bieten allesamt die Möglichkeit, volumetrische Videos aufzunehmen, ohne ein aufwändiges Studio-Setup vorauszusetzen. In der Regel sind eine Reihe handelsüblicher Kameras und Sensoren sowie entsprechend leistungsstarke

Computer die einzigen Anforderungen an die Hardware. Die Anwendungen sind aber noch im Entwicklungsstadium und stoßen erst langsam in den Bereich einer kommerziellen Verwendung vor.

Eigenschaft	Depthkit	Brekel Pro PC v3	EF Eve	LiveScan3D
Anzahl Sensoren	1	1–4	1–2	1–X
Hohe Videoqualität	Ja	Nein	Nein	Nein
Punktwolke	Nein	Ja	Nein	Ja
<i>mesh</i>	Ja	Nein	Ja	Nein
Fusioniertes <i>mesh</i>	Nein	Nein	Nein	Nein
Textur	Ja	Nein	Ja	Nein
Fusionierte Textur	Nein	Nein	Nein	Nein
Export von Einzel-Frames und animiertem <i>mesh</i>	Ja	Ja	Nein	Nein
Kompatibel mit Spiel-Engine (Nachbearbeitung)	Ja	Ja	Nein	Nein
Kosten	Mtl. \$39.99	Einmalig \$130	Mtl. \$39	Open-Source

Tab. 1, Vergleich der wichtigsten verfügbaren Anwendungen zur Aufnahme volumetrischer Videos außerhalb aufwändiger Produktionsstudios.

Grundsätzlich unterschieden sich die Anwendungen vor allem im Hinblick auf die Art und Weise der Bilddarstellung. Dabei ist das wichtigste Unterscheidungsmerkmal, ob die erfassten Daten als Punktwolke dargestellt werden (das heißt als Ansammlung einzelner Punkte) oder ob die Punkte zusätzlich in eine geschlossene Polygonstruktur überführt werden (ein sogenanntes *mesh*), die dann auch mit Farbwerten texturiert werden kann (**Abb. 26, a & b**). *Depthkit*, die am weitesten verbreitete Software unter den mobilen Anwendungen, bietet durch die Verwendung eines *mesh*s mit Textur eine hohe Videoqualität und durch die Bereitstellung zusätzlicher Plugins auch die Möglichkeit des Imports in Spiel-Engines für die Nachbearbeitung. Das Programm unterstützt allerdings nur den Einsatz eines einzigen Sensors, mit dem nur eine begrenzte Erfassung der Szene möglich ist. Bei einem Positionswechsel entstehen deshalb sogenannte "Schatten", das heißt Bereiche, die nicht vom Sensor erfasst werden, da sie durch andere Objekte oder Personen verdeckt sind.

Deshalb ist die Abbildung komplexer räumlicher Arbeitsabläufe, etwa innerhalb eines Operationssaals, zurzeit nur mit zusätzlichem Entwicklungsaufwand möglich. Vergleichbare Anwendungen, wie *Brekel Pro Pointcloud v3* oder *LiveScan3D* unterstützen zwar die Verwendung mehrerer Sensoren zur besseren räumlichen Abdeckung, exportieren aber nur die "rohen" Punktwolkendaten der Sensoren, ohne diese als *mesh* zu verarbeiten. Durch die Punktwolkendarstellung gehen die Details, der hochauflösenden Farbkamera verloren. Die Darstellung ist dadurch mit zusätzlichen Artefakten versehen. Anwendungen wie *EF Eve* ermöglichen hingegen den Einsatz von bis zu zwei Sensoren und der Darstellung mittels *mesh* und Textur. Bei dieser Software werden die Daten der einzelnen Sensoren jedoch getrennt dargestellt. Eine sogenannte Fusion, welche die Daten der einzelnen Sensoren synchronisiert, findet hier nicht statt, weshalb die Daten händisch miteinander verknüpft werden müssen.



a)



b)

Abb. 26, a) Darstellung der volumetrischen Daten als Punktwolke (*point cloud*), **b)** Darstellung in einer geschlossenen Polygonstruktur (*mesh*).

Insgesamt erfüllt zurzeit noch keine Anwendung die Bedingungen für den Einsatz im Operationssaal “*out of the box*”. Jedoch wird die Entwicklung zuletzt auch von großen Technologiekonzernen mit größeren Summen gefördert, allen voran die Firmen *Microsoft* und *Magic Leap*, die sich von den Aufnahmen Inhalte für ihre *mixed reality* Brillen *HoloLens* und *Magic Leap One* versprechen. Beschleunigt wird die Entwicklung außerdem von der zunehmenden Verbreitung sogenannter *time-of-flight* Sensoren in neueren Smartphones. Dabei handelt es sich um 3D-Kamerasysteme, die mittels eines Lichtpulses Distanzen messen und so in der Lage sind Tiefeninformationen zu generieren. Nicht zuletzt wird die Verknüpfung von Rauminformationen und Videodaten auch durch die Entwicklungen auf dem Gebiet des maschinellen Sehens (*computer vision*) vorangetrieben, etwa in den Bereichen des autonomen Fahrens oder der robotergestützten industriellen Fertigung. Diese branchenübergreifenden Entwicklungen deuten insgesamt darauf hin, dass die Verknüpfung von Visualisierungstechniken und Raumerfassung ihren Entwicklungsstatus in absehbarer Zeit verlassen wird und sich weiter etablieren kann. Die Erfassung volumetrischer Videos bleibt zwar ein vergleichsweise kleines Feld, das aufgrund der erforderlichen Anzahl von Sensoren nicht ohne weiteres skalierbar ist, jedoch sollten schon jetzt entsprechende chirurgische Bedürfnisse formuliert werden.

3.4 Untersuchung

Das **Konzept von VolumetricOR** basiert auf einem technischen Workflow, der aus drei Elementen besteht: **a) einer fotogrammetrischen Rekonstruktion eines Operationssaals an der Charité – Universitätsmedizin Berlin, Campus Charité Mitte, sowie b) volumetrischen Videosequenzen, die direkt im Operationssaal aufgenommen wurden und c) ortsbezogenen Metadaten, die eine digitale Ebene interaktiver Informationen innerhalb der Operationsszene hinzufügen.** Ein Überblick dieser drei Elemente gewährt das zugehörige Projektvideo “*Volumetric Operating Room – Virtual Reality Concept for Surgical Training*”.⁷⁹

a) Fotogrammetrie

Die Fotogrammetrie ist eine auf Fotografien basierende Methode der Bildmessung, bei der die räumliche Position von Objekten aus der Übereinstimmung überlappender Pixel aus einzelnen

⁷⁹ Queisner M, Pogorzelskiy P, Remde C, Sauer IM. “Adaptive Anatomy – Design Principles for Medical Mixed Reality”, 2020. <https://youtu.be/6xxAuOuYuC8>. [Zugriff: 1.3.2020]

Fotos des Operationssaals rekonstruiert wird. Die Fotos des Operationssaals werden mithilfe der Software *Metashape* (*Agisoft Inc.*, St. Petersburg, Russland.) in ein 3D-Modell umgewandelt und in die Spiel-Engine *Unreal Engine* (*Epic Games Inc.*, Cary, USA), eine Softwareentwicklungsumgebung zur Erstellung von Videospielen, importiert. Dort können einzelne Objekte optional nachmodelliert werden, um die Qualität zu verbessern. Die so erzeugte digitale Repräsentation eines Operationssaals dient als Schauplatz für die Anzeige der dort aufgenommenen volumetrischen Videosequenzen (**Abb. 27**) und zusätzlichen Metadaten (**Abb. 28**). Mit einer beliebigen *SteamVR*-kompatiblen *virtual reality* Brille, wie z.B. *Vive*, können Benutzer*innen das fotorealistische Modell im realen Maßstab und aus beliebiger Perspektive betrachten.



Abb. 27, Fotogrammetrie-Modell eines Operationssaals am Campus Charité Mitte, Charité - Universitätsmedizin Berlin.



Abb. 28, Detail mit Darstellung des *wire-frame* Modells.

b) Volumetrisches Video

Um die Situation so zu erfassen, dass jedem Punkt im dreidimensionalen Raum eine Bildinformation zugeordnet werden kann, wird das Geschehen im Operationssaal von mehreren Tiefensensoren erfasst, sogenannten RGBD-Kameras (Erfassung der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau sowie der Tiefeninformation [depth], *Kinect, Microsoft, Redmond, Vereinigte Staaten von Amerika* sowie *Realsense, Intel, Santa Clara, Vereinigte Staaten von Amerika*) deren Daten so miteinander fusioniert werden, dass sich die einzelnen Bildräume exakt überlagern. Zusätzlich erfassen Videokameras (*EOS 80D, Canon*) aus jeder Perspektive die Farbinformationen, die dann mit den Tiefeninformationen synchronisiert werden. Jede Aufnahmeeinheit kombiniert je einen Tiefensensor und eine Videokamera, die fest miteinander verbunden sind, um einen möglichst homogenen Bildraum zu ermöglichen (Abb. 29).



Abb. 29, Installation eines Aufnahmemoduls, bestehend aus Tiefensensor und Videokamera, Charité - Universitätsmedizin Berlin.

Die Aufnahmemodule registrieren Tiefeninformationen als Punktwolke und Farbinformationen als Textur. Jede einzelne Sensor-Kamera-Kombination ist an einen Mikrocomputer angeschlossen und kann mit der Software *TeamViewer* (*TeamViewer GmbH*, Göppingen, Deutschland) von einem Server auf einem zentralen Rechner außerhalb des Operationsaals gesteuert werden (**Abb. 30 & 31**). Ein weiterer Computer dient als Server, der die einzelnen Hardware-Module (*Clients*) kabellos verbindet und die Aufnahmen der Sensoren synchronisiert. Der Server dient zur Steuerung der Aufnahme (räumliche Synchronisation starten, Aufnahme Start/Stop).



Abb. 30: Steuerung der Aufnahmemodule von einem zentralen Server außerhalb des Operationsaals, Charité-Universitätsmedizin Berlin.



Abb. 31: Schematische Anordnung der volumetrischen Szene mit drei Aufnahme-Modulen und Server.

Die Aufzeichnung (*capturing*) und Verarbeitung (*post processing*) erfolgt mit zwei Softwaremodulen der Software *Depthkit* (**Abb. 32**). Die Aufnahmesoftware registriert die Daten der einzelnen Aufnahmeeinheiten. Die volumetrische Nachbearbeitungssoftware importiert die aufgezeichneten Daten aus der volumetrischen Aufnahmesoftware und verknüpft die Tiefeninformationen mit Farbwerten, der sogenannten Textur (die Textur ist eine Beschreibung für die Beschaffenheit der Oberflächen). Dazu werden die aufgenommenen Farbinformationen als Oberflächentexturen auf die Tiefeninformationen der Tiefensensoren gemappt (**Abb. 33**). Für diese sogenannte Bildfusion wird aus den von der RGBD-Kamera registrierten einzelnen Punkten eine sogenannte Punktwolke generiert, die in eine geschlossene Oberfläche aus Polygonen transformiert wird. Das Resultat ist ein *mesh*, eine geschlossene Oberfläche, auf die Farbinformationen als RGB-Bilder projiziert werden können. Ein optionaler Schritt ist die Optimierung der Bildqualität durch die Entfernung von Artefakten mit Hilfe der Software *3ds Max* (Autodesk Inc., San Rafael, USA) und *FFmpeg* (Fabrice Bellard), das sogenannte "Denoising". Anschließend werden die Daten jedes einzelnen Frames im Alembic-Format (Datenformat zum Austausch von geometrischen Daten) an die Spiel-Engine *Unreal Engine* exportiert, mit deren Hilfe die Videodaten zusammengefügt und in die photogrammetrische Szene integriert werden (**Abb. 34**).

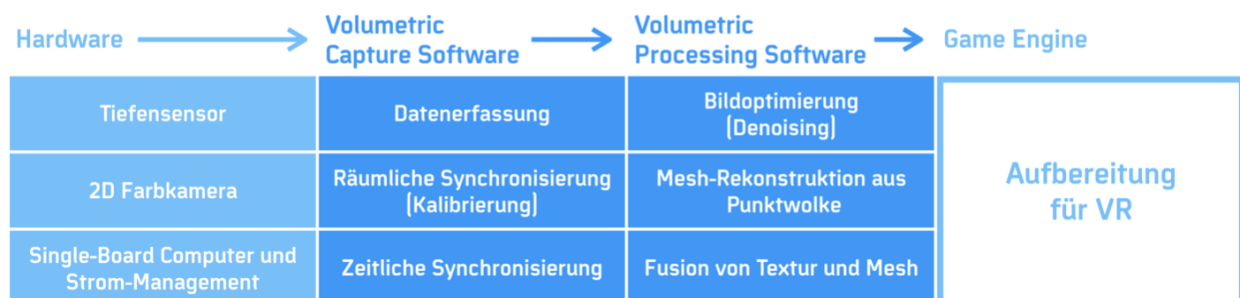


Abb. 32, Vereinfachte Darstellung des Produktionsablaufs für volumetrische Videos.

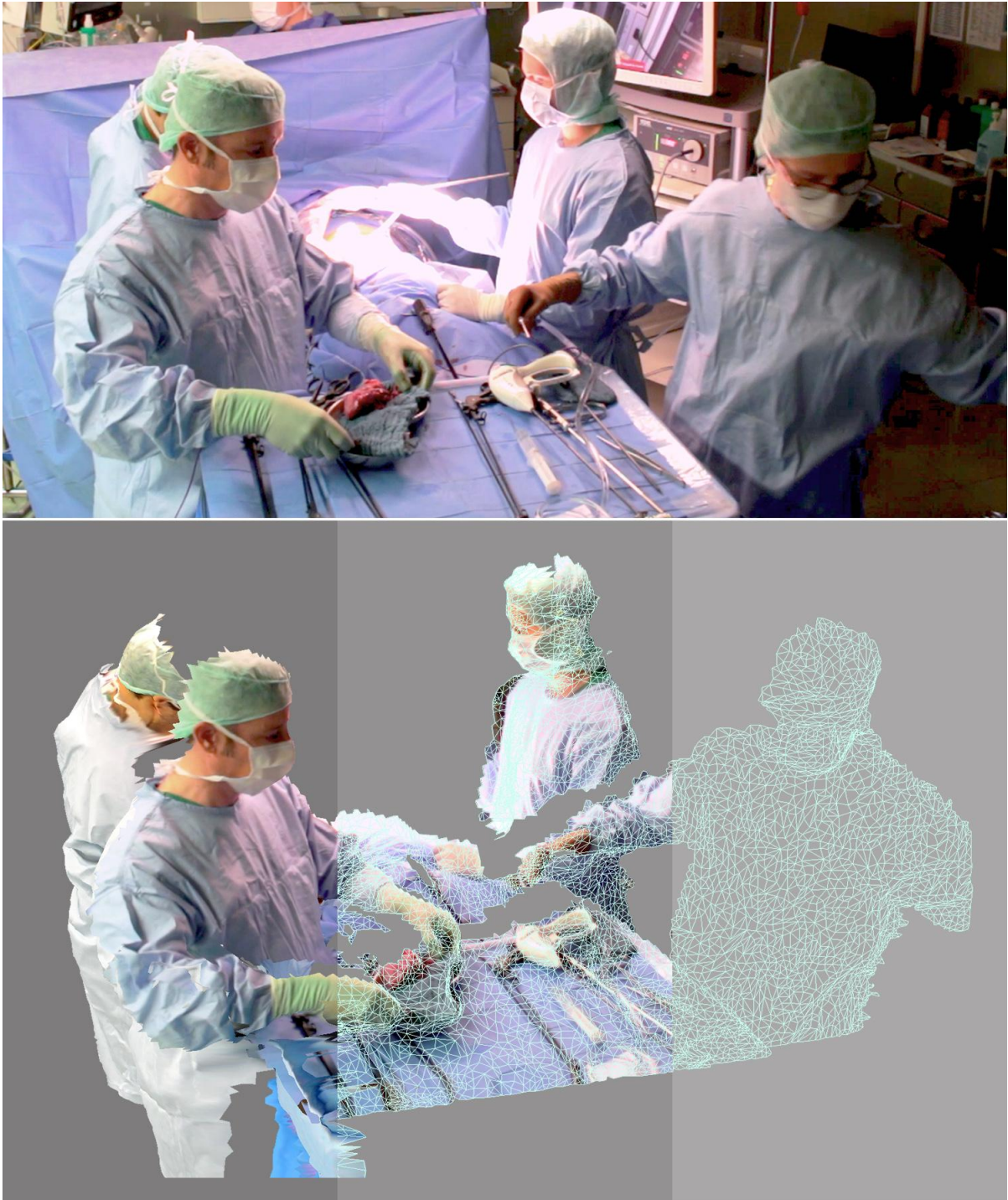


Abb. 33, Schematische Darstellung der Fusion von Textur und *mesh*.

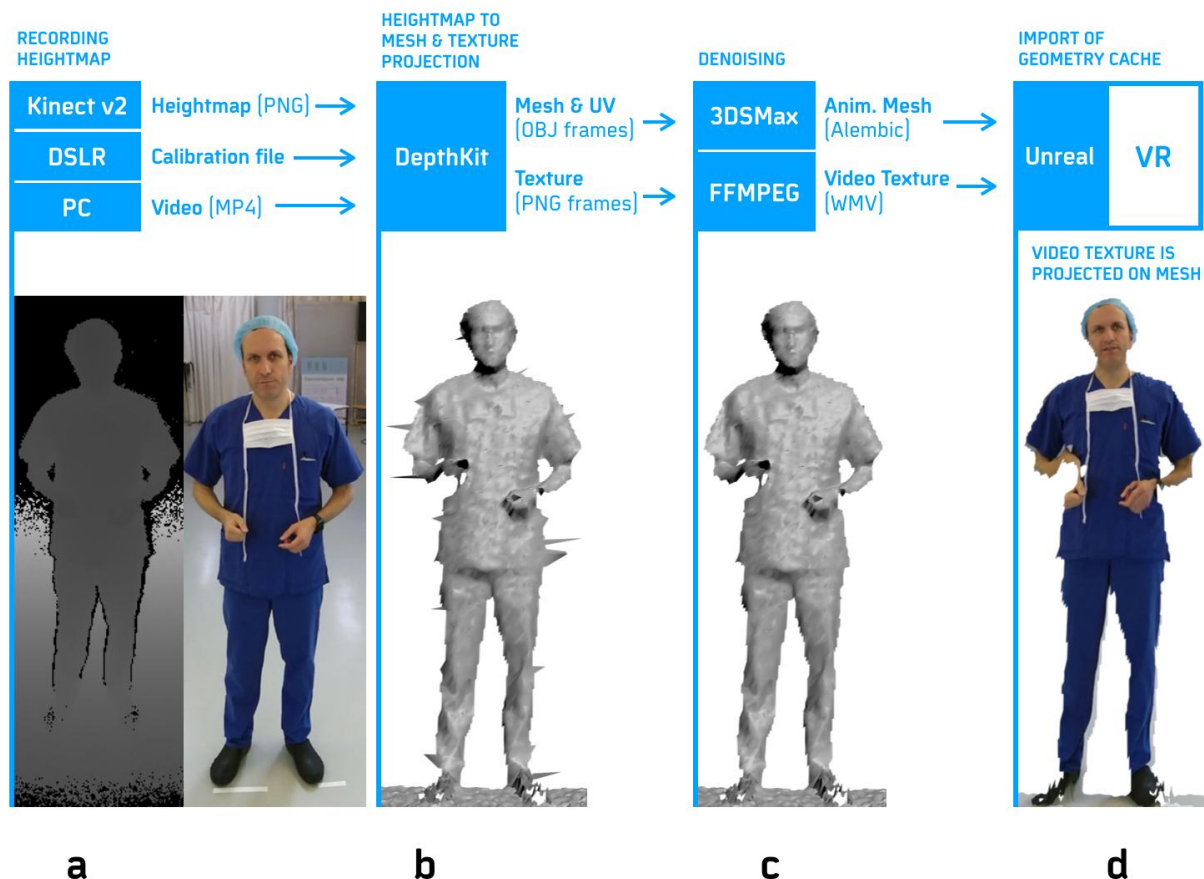


Abb. 34. Detaillierte der Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte. a) Aufnahme von Tiefen- und Farbinformationen, b) Umwandlung der Punktwolke in ein *mesh*, c) Reduzierung von Artefakten, d) *Mesh* mit fusionierter Textur.

c) Ortsbezogene Metadaten

Um mit der Szene interagieren zu können, können Benutzer*innen über eine zuschaltbare visuelle Ebene auf Metadaten und Kontextinformationen zugreifen und mithilfe der Controller der *virtual reality* Brille *Vive* interaktiv durch die Szene navigieren. Sie können einzelne Sequenzen der Operation auswählen, anhalten, wiederholen und zurückspulen (*explore* Modus, **Abb. 36**) sowie Objekte und Bereiche, wie z.B. den sterilen Bereich des Operationssaals identifizieren und über interaktive Textfelder, die sich an der Position des Benutzers orientieren, sogenannte *points of interest* auswählen, um zusätzliche Informationen, etwa über die Bedienung von Geräten abzurufen (*inspect* Modus, **Abb. 35, a & b**). Da sowohl die fotogrammetrische Rekonstruktion als auch das volumetrische Video als räumliche Daten vorliegen, lassen diese sich in *Unreal Engine* oder *Unity* importieren und modifizieren. Im Gegensatz zu herkömmlichen Videoformaten kann die Szene so mit 3D-Objekten ergänzt werden, um zusätzliche Lerninhalte zu erstellen, die sich an die individuellen Bedürfnisse der Kliniken und Benutzer*innen

anpassen. Auf diese Weise können sich Benutzer*innen etwa mit den Anordnungen von Instrumenten sowie mit anderen vorab definierten Lernobjekten der operationstechnischen Infrastruktur ortsbezogen vertraut machen.



Abb. 35, a) & b) *Points of interest* bieten zusätzliche Metadaten, etwa zur Bedienung von Geräten oder zur Anzeige des sterilen Bereichs.



Abb. 36, Mithilfe der *Controller* kann durch die einzelnen Sequenzen der Operation navigiert werden.

3.5 Ergebnisse & Anwendungen

Volumetrische Darstellungen machen chirurgische Arbeitsabläufe aus beliebiger Perspektive erfahrbar, nachvollziehbar und reproduzierbar. In Kombination mit der immersiven Darstellung in einer *virtual reality* Umgebung wertet diese Technik die Simulation von Arbeitssituationen in der Aus- und Weiterbildung qualitativ auf. Arbeitsumgebungen und -ablauf im Operationssaal können mit dem erarbeiteten Konzept in *virtual reality* Brillen fotorealistisch, in realer Skalierung und interaktiv für die Aus- und Weiterbildung simuliert werden. Mitarbeiter*innen können die digital erfasste Situation räumlich in *virtual reality* begehen und sich das Wissen über die einzelnen Abschnitte der Arbeitsabläufe aus ihrer individuellen Perspektive und in ihrem individuellen Tempo aneignen. Sie bekommen so nicht nur einen authentischen Einblick in konkrete Arbeitssituationen und -prozesse, sondern können auch kontextbezogenes Wissen ortsunabhängig und alltagsnah erlernen und trainieren, wie etwa instrumentelle Anordnungen, Laufwege, Positionen des chirurgischen Personals oder Kommunikationsverhalten.

Mit Blick auf die zunehmende Nachfrage von digitalen und individuell skalierbaren Weiterbildungsformaten ist die Bereitstellung von volumetrischen Simulationen der nächste logische Schritt für die Simulation von Arbeitssituationen in der beruflichen Aus- und

Weiterbildung. Im Vergleich zur klassischen Hospitation vor Ort lässt sich mithilfe volumetrischer Videos der Zugang zu Training und Wissensaneignung erheblich erweitern. Mithilfe volumetrischer Aufnahmetechniken können realitätsnahe Lernumgebungen geschaffen werden, in denen sich die Lernenden nicht nur durch Beobachtung, sondern als aktive Teilnehmer*innen anwendungs- und praxisbezogenes Wissen über komplexe Handlungsabläufe aneignen. So können Arbeitssituationen in der Aus- und Weiterbildung praxisnah erlebt werden und im Rahmen einer Simulation „durchgespielt“ werden, bevor sie im Operationssaal unter Realbedingungen funktionieren müssen. Dadurch können das Risiko für fehlerhaftes Handeln gemindert und Risiken für Patient*innen und medizinisches Personal effektiv reduziert werden. Gerade angesichts der zunehmend eingeschränkten Verfügbarkeit der Aus- und Weiterbildung im Operationssaal weitet dies außerdem die Professionalisierungsebenen für Fachkräfte aus und könnte somit in Zukunft ein wichtiges Instrument für die Aus- und Weiterbildung darstellen.

Aus betrieblicher Sicht stellt der Einsatz volumetrischer Trainingsvideos ein effektives Instrument zur Vermittlung von chirurgischen Arbeitsabläufen dar. Krankenhäuser und die daran angeschlossenen Bildungsträger, Personalabteilungen sowie Recruiting Abteilungen können ortsspezifische Inhalte auf der Grundlage ihrer jeweiligen individuellen klinischen Infrastruktur, ihrer Arbeitsabläufe und ihres Personals erstellen und müssen nicht auf standardisierte virtuelle Trainingsszenarien zurückgreifen. Das technische Verfahren bietet damit ein erhebliches Potenzial für das Lernen und Trainieren in all jenen chirurgischen Arbeitsbereiche, in denen Wissen über räumliche Zusammenhänge und den darin integrierten Arbeitsabläufen vermittelt werden soll.

Mit *VolumetricOR* steht ein prototypisches Konzept zur Verfügung, das eine skalierbare und kosteneffiziente sowie zeiteffektive Wissensvermittlung ermöglicht und das technische und methodische Spektrum betrieblicher Aus- und Weiterbildungsangebote erweitert. Im Hinblick auf den demografischen Wandel und einen steigenden Bedarf von Quereinsteiger*innen in der Gesundheitswirtschaft ist für diese Form der Wissensvermittlung zudem ein schnell wachsender Markt zu erwarten. Mit der Fähigkeit, die Leistung des Operationsteams quantitativ zu überprüfen, könnte *VolumetricOR* auch über die Aus- und Weiterbildung hinaus als Werkzeug zur Qualitätssicherung und -kontrolle fungieren, da Eingriffe als dreidimensionale geometrische Daten aufgezeichnet werden, die maschinell ausgelesen und bewertet werden könnten.

Die Identifikation entsprechender Anwendungskontexte und Einsatzorte, der ihnen zugrunde liegenden Praktiken, Gestaltungskonzepte und Bildtechniken sowie der Formen der Wissensvermittlung hat jedoch gerade erst begonnen. Im Vergleich zu anderen Formaten der Simulation und des traditionellen videobasierten Unterrichts bieten volumetrische Darstellungen in Kombination mit *virtual reality* Brillen drei wesentliche Vorteile, die nachfolgend diskutiert werden:

a) Ich-Perspektive

Mithilfe volumetrischer Aufnahmeverfahren kann das chirurgische Personal eine Operation aus beliebiger Perspektive nachvollziehen und so spezielle Tätigkeiten und Arbeitsabläufe interaktiv erlernen und trainieren. Die meisten anderen videobasierten Ausbildungskonzepte, wie etwa die Präsentation von herkömmlichen Videos auf Konferenzen oder chirurgischen Lernplattformen, zeigen in erster Linie das Operationsgebiet, um spezifische Fähigkeiten und Techniken zu präsentieren. *Virtual Reality* Umgebungen erweitern diese begrenzte Erfahrung der chirurgischen Situation erheblich. Sie unterscheiden sich aber auch grundlegend von konventionellen und auch von stereoskopischen Videoformaten wie 360° Videos, weil sie die Kombination von Translationsbewegungen (vorwärts und rückwärts, auf und ab, links und rechts) und Drehbewegungen (seitlich kippen, vorwärts und rückwärts, links und rechts) innerhalb der Szene ermöglichen (**Abb. 37 a & b**). Während Benutzer*innen bei einem 360° Video nur von einer festen Position aus nach links oder rechts sowie nach oben und unten schauen kann, ermöglicht die virtuelle Realität es Benutzer*innen, den eigenen Standpunkt zu variieren, da die Position kontinuierlich registriert wird. Volumetrische Videoformate zeigen sind dagegen nicht an die Kameraperspektive gebunden. Sie zeigen eine Szene aus jedem beliebigen Blickwinkel, sodass sich Benutzer*innen im virtuellen Operationssaal frei bewegen können. Benutzer*innen können so den Eingriff beispielsweise aus der Sicht einzelner Teammitglieder beobachten.

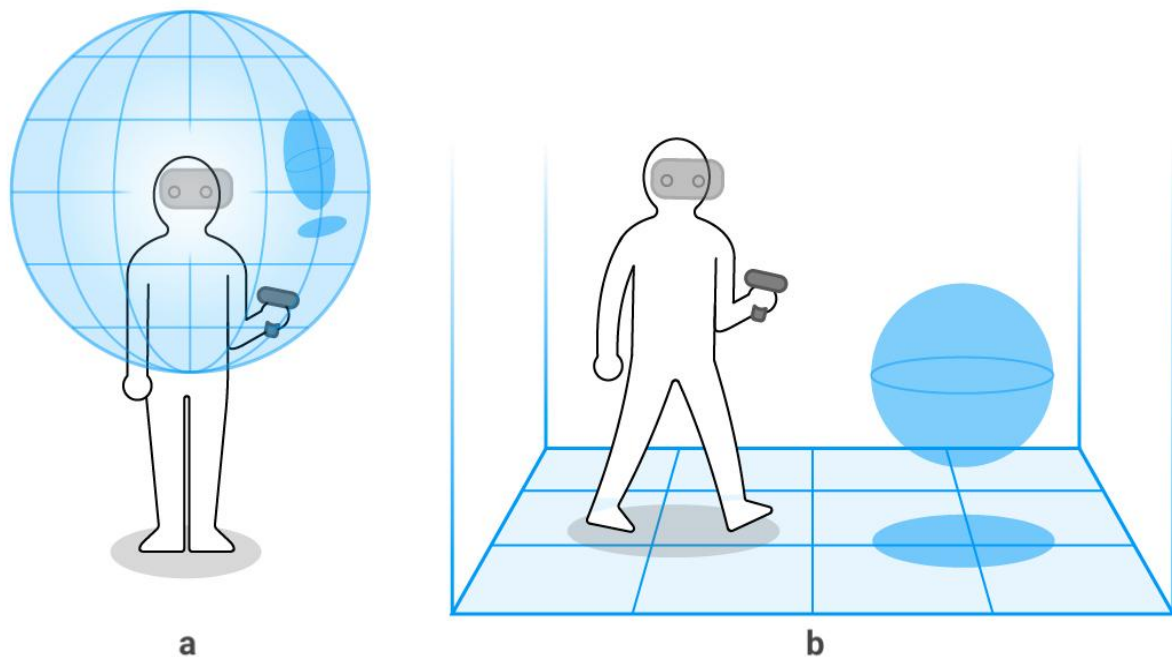


Abb. 37, Unterschied zwischen 360° Video (a) und volumetrischem Video (b). Volumetrisches Video berücksichtigt die Bewegung, Größe und Position von Benutzer*innen; 360° Videos ermöglichen nur Drehbewegungen von einer festen Position aus.

Ein solches immersives Lernen aus der Ich-Perspektive ermöglicht eine verkörperlichte Wissensvermittlung, die nicht mehr nur Teil einer Beobachtung ist. Dies ist darauf

zurückzuführen, dass sich Nutzer*innen in *virtual reality* Anwendungen als Teil der Szene wahrnehmen („von der Beobachtung zur Teilnahme“). Dabei wird auch die individuelle Körpergröße der Betrachter*innen einbezogen, ein Faktor, der das Gefühl von Präsenz innerhalb der Szene steigert. Vor allem aber steigert die Darstellung aus der Ich-Perspektive das authentische und interaktive Erleben von Arbeitssituationen maßgeblich,⁸⁰ da Benutzer*innen nicht an den Bildausschnitt der Kamera und die Narration bzw. die Bildauswahl des Videos gebunden sind. Techniken wie Schnitt, Zoom oder Frame existieren hier nicht bzw. folgen anderen Gesetzmäßigkeiten, wie etwa beim Teleportieren.

Volumetrische Videoformate ermöglichen somit die Umsetzung von Vermittlungsstrategien, bei denen nicht mehr die passive Bildschirmbetrachtung, sondern die aktiv involvierende Teilnahme den Rahmen der Lernerfahrung bildet. Beobachter*innen werden dabei zu Akteur*innen, deren

⁸⁰ Khor WS, Baker B, Amin K, Chan A, Patel K, and Wong J. “Augmented and Virtual Reality in Surgery: the Digital Surgical Environment: Applications Limitations and Legal Pitfalls”. *Annals of Translational Medicine* 4, no. 23 (December 2016): 454–54.

Körper selbst zum Steuerungsmedium der Situation werden. Diese verkörperte Form der Wissensvermittlung, ermöglicht es, sich Lerninhalte aktiv und mit dem Gefühl, als wäre man vor Ort, einzuprägen. Videobasierte *virtual reality* Darstellungen überwinden so die Limitierungen videobasierten Lernens, wie beispielsweise bildschirmbasierte *Online-Tutorials*. Sie vermitteln nicht nur einen authentischen Eindruck von konkreten Arbeitsumgebungen, sondern ermöglichen zudem eine effektivere Verknüpfung von theoretischem Fachwissen und praktischem Anwendungswissen, das darüber hinaus auch quantitativ messbar und damit überprüfbar wird.

Die Wiedergabe der gesamten Operationsszene bietet zudem mehr Kontextinformationen und räumliches Bewusstsein, was besonders hilfreich ist, um spezifische Arbeitsabläufe zu vermitteln. Auszubildende und Assistenzärzt*innen können so Routinen und Protokolle sowie die Interaktion der verschiedenen Berufsgruppen, die im Operationssaal zusammenarbeiten, besser nachvollziehen. Sie können etwa das chirurgische *Timeout* aus der Perspektive und Position jeder einzelnen Rolle erleben oder spezifische Manöver wie eine Notfall-Wiederbelebung aus der Perspektive leitender Chirurg*innen nachvollziehen. Dieser Ansatz bietet Vorteile gegenüber etablierten Formaten der prozessbasierten Simulation, da die Verknüpfung verkörperter Interaktion mit einer realistischen digitalen Darstellung des Operationssaals es Auszubildenden ermöglicht, sowohl kognitives Denken als auch das Verständnis des Arbeitsablaufs aus individuellen Perspektiven einzelner Teammitglieder zu erfahren. Auf diese Weise können sie die verschiedenen Entscheidungswege, welche die komplexe Zusammenarbeit des Operationsteams beeinflussen, besser nachvollziehen.⁸¹ Diese Aneignung von prozess- und kontextbezogenem Wissen vor dem tatsächlichen Eingriff, verkleinert die Lücke zwischen Simulation und Hospitation.

Die Darstellung aus der Ich-Perspektive in Verknüpfung mit *virtual reality* bietet eine Form der authentischen Teilhabe an chirurgischen Arbeitssituationen, für die zahlreiche weitere Anwendungsfelder denkbar sind: Beispielsweise lassen sich volumetrische Lerninhalte auch zur Patient*innenaufklärung, zur Verbesserung des Qualitätsmanagements in Krankenhäusern sowie für die Rekrutierung potenzieller Fachkräfte einsetzen. Mithilfe der *virtual reality* Brille

⁸¹ Pugh CM, Santacaterina S, DaRosa DA, and Clark RE. "Intra-Operative Decision Making: More than Meets the Eye". *Journal of Biomedical Informatics* 44, no. 3 (June 2011): 486–96.

könnte potenziellen Auszubildenden der Einblick in den Operationsaal ermöglicht werden. Diese könnten sich mit der Brille unmittelbar in die entsprechenden Rollen der Berufsprofile hineinversetzen, um die damit verbundenen Tätigkeiten aus nächster Nähe zu erleben, zum Beispiel auf Jobmessen und online.

b) Interaktion im realen Raum und Maßstab

Die etablierten Formate der videobasierten Aus- und Weiterbildung haben sich als einfache, aber dennoch günstige und nützliche Methoden erwiesen, um chirurgische Praktiken und Arbeitsabläufe auf einem Bildschirm zu demonstrieren. Sie ermöglichen zwar das Beobachten bestimmter Arbeitsschritte und können so spezifische Techniken vermitteln. Doch neben ihrer **Einschränkung auf einen festgelegten Bildausschnitt und die zweidimensionale Darstellung im verkleinerten Maßstab, erschweren Videos ein aktives Erlernen chirurgischer Techniken und Fertigkeiten, da Benutzern*innen nicht mit der Szene interagieren können**. Obwohl stereoskopische und auch 360° Grad Videotechnologien dem Seherlebnis eine räumliche Dimension hinzugefügt haben, die der Darstellung des chirurgischen Eingriffs Tiefe und Kontext verleiht, wirken sie flach, sobald Betrachter*innen von der festgelegten Kameraposition abweichen.

Volumetrische Darstellung beziehen hingegen die Größe, Position und Bewegung von Benutzer*innen ein. Dies erfordert nicht nur eine andere Videotechnik, sondern impliziert auch eine andere narrative Strategie, um Benutzer*innen innerhalb des Bildes anzuleiten. Die Möglichkeit, die chirurgische Szene nicht nur in stereoskopisch, sondern auch im realen Maßstab zu erleben, verändert die Art und Weise, wie Benutzer*innen durch den chirurgischen Arbeitsablauf navigieren. Personen und Objekte erscheinen in der gleichen Größe wie in einer realen Trainingsumgebung, d.h. in realer Skalierung und Tiefe. Mit dieser Verbindung von Sensorik und Motorik zeichnet sich eine zunehmende Konvergenz zwischen Virtualität und Physikalität ab. Auszubildenden können sich beispielsweise Objekten natürlich nähern, um sie zu vergrößern, anstatt einen manuellen Digitalzoom zu verwenden. Sie können außerdem Gesten und Handlungsabläufe selbst physisch nachahmen, anstatt diese nur zu beobachten. Diese verkörperte Interaktion mit der Lernumgebung erleichtert das konzeptuelle Verständnis

und die visuell-räumlichen Fähigkeiten.⁸² Sie schafft ein umfassendes Raumverständnis und kann den Übergang von der Lernumgebung in die klinische Umgebung erleichtern.⁸³

Die Fähigkeit, Handlungen physisch nachzuahmen, bevor sie im Operationsaal unter Realbedingungen durchgeführt werden müssen, kann die Zusammenarbeit zwischen einzelnen Teammitgliedern verbessern,⁸⁴ zum Beispiel beim Austausch von Instrumenten zwischen Chirurg*innen und operationstechnischen Assistent*innen. Auszubildende können sich so verhalten, als wären sie Teil der Szene, was ihnen die Möglichkeit gibt, erworbenes theoretisches Wissen praxisorientiert anzuwenden. Gesten werden nicht nur beobachtet, sondern Auszubildende werden aktiv in die Situation eingebunden.⁸⁵

Das Probehandeln innerhalb der virtuellen Realität ermöglicht eine effektivere Verknüpfung von theoretischem Fachwissen und praktischer Anwendung von Wissen und trägt dazu bei, Wissen in Können zu verwandeln. Insgesamt ließe sich auf dieser Grundlage eine neue Form des praxisorientierten Wissenstransfers etablieren, beispielsweise in Bezug auf das Erlernen instrumenteller Anordnungen oder der Erprobung neuer Geräte oder spezifischer Arbeitsabläufe. Diese Form der Interaktion im Realraum birgt ein besonderes Transfer- und Skalierungspotenzial in der praxisorientierten Lehre sowie in der Aus- und Weiterbildung, das Videos bisher nicht abdecken. Die Lern- und Trainingserfahrung wird *“vom Bildschirm in den Raum“* verlagert.

c) Realismus

Eine Hauptkritik an aktuellen *virtual reality* Simulationen ist ihre mangelnde Authentizität.⁸⁶ Insbesondere aufgrund ihrer computergrafisch erzeugten Bilder fehlt den meisten Lernszenarien der *virtual reality* eine realistische Darstellung der zu erlernenden

⁸² Bernardo A. “Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training”. *World Neurosurgery* 106 (October 2017): 1015–29.

⁸³ Khor WS, Baker B, Amin K, Chan A, Patel K, and Wong J. “Augmented and Virtual Reality in Surgery: the Digital Surgical Environment: Applications, Limitations and Legal Pitfalls”. *Annals of Translational Medicine* 4, no. 23 (December 2016): 454–54.

⁸⁴ Kleven NS, Prasolova-Forland E, Fominykh M, Hansen A, Rasmussen G, Sagberg LM, and Lindseth F. “Training Nurses and Educating the Public Using a Virtual Operating Room with Oculus Rift”. In *2014 International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM)*. IEEE, 2014.

⁸⁵ Kapralos B, Moussa F, and Dubrowski A. “An Overview of Virtual Simulation and Serious Gaming for Surgical Education and Training”. In *Studies in Computational Intelligence*, 289–306. Springer Berlin Heidelberg, 2014.

⁸⁶ Dongen KW, van der Wal WA, Borel Rinkes IHM, Schijven MP, and Broeders IAMJ. “Virtual Reality Training for Endoscopic Surgery: Voluntary or Obligatory?”. *Surgical Endoscopy* 22, no. 3 (August 2007): 664–67.

Aufgaben.^{87,88} Dies ist zwar kein wesentlicher Nachteil beim Training standardisierter Interventionen oder leicht wiederholbarer Aufgaben, beeinträchtigt aber das Verständnis von Faktoren wie Stress, Kontext, Teamarbeit oder Gesten erheblich. Insbesondere für das Erlernen von Arbeitsprozessen im Operationssaal, bei denen der Erfolg wesentlich von der komplexen Interaktion und Zusammenarbeit des Teams abhängt, sind computeranimierte Simulationen nicht das Mittel der Wahl.⁸⁹ Obwohl andere Simulationsmethoden, wie z.B. Rollenspiele, bestimmte Techniken und Lernaufgaben effektiv vermitteln können, bleibt die Erfahrung in der Regel von der realen Situation im Operationssaal getrennt. Deshalb sind die meisten aktuellen digitalen Simulationslösungen auf dem Markt in der Regel nicht für Teamarbeit oder für situationsbezogene Entscheidungen konzipiert.⁹⁰ Für prozessuales Wissen ist die Hospitation im Operationssaal nach wie vor das bevorzugte Mittel der Wahl, weil sie ein authentisches Erlebnis und ein besseres Kontextbewusstsein bietet.

Der Einsatz volumetrischer Videos hat gegenüber ausschließlich computeranimierten Simulationen den Vorteil, dass durch die **fotorealistische Darstellung** ein **authentisches Raumgefühl** bei den Nutzer*innen geschaffen wird. Beschäftigte können Abläufe einer Operation unter Realbedingungen authentisch miterleben. Verglichen mit der Ästhetik virtueller Trainingsszenen erhöht die videobasierte Simulation der tatsächlichen Arbeitsumgebungen die Identifikation mit der Lernumgebung und vermittelt bei Nutzer*innen ein Gefühl der Präsenz und Beteiligung an der Situation. Die **Übereinstimmung zwischen virtueller und realer Trainingsumgebung** vereinfacht den Transfer der gelernten Inhalte in die Praxis, da sich Nutzer*innen kognitiv und emotional in denselben Raum begeben. Das Verfahren bietet damit ein erhebliches Potenzial für die Ausbildung in Branchen, in denen Wissen über räumliche Zusammenhänge und den darin integrierten Arbeitsabläufen vermitteln werden soll.

⁸⁷ Huber T, Wunderling T, Paschold M, Lang H, Kneist W, and Hansen C. "Highly Immersive Virtual Reality Laparoscopy Simulation: Development and Future Aspects". *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 13, no. 2 (November 2017): 281–90.

⁸⁸ T Huber, A Kirschniak, and J Johannink, "[Survey of Training in Laparoscopic Skills in Germany].", *Zentralbl Chir* 142 (2017): 67–71.

⁸⁹ Huber T, Kirschniak A, and Johannink J. "[Survey of Training in Laparoscopic Skills in Germany]". *Zentralbl Chir* 142 (2017): 67–71.

⁹⁰ Kotsis SV, and Chung KC. "Application of the See One, Do One, Teach One Concept in Surgical Training.". *Plast Reconstr Surg* 131 (2013): 1194–1201.

Zugleich muss klar sein, dass sowohl die Forschung zu Techniken der volumetrischen Aufnahme als auch die Wahrnehmung und Interaktion in *virtual reality* Umgebungen nach wie vor am Anfang stehen. Trotz der anhaltenden Popularität von *virtual reality* und dem immer wieder betonten Anspruch erhöhter Realitätsnähe, ist die Technologie noch weit davon entfernt, den menschlichen Wahrnehmungsapparat authentisch zu simulieren. Die Integration weiterer Parameter der visuellen Wahrnehmung, wie Blickrichtung, Fokussierung oder Tiefenschärfe dürfte *virtual reality* Erfahrungen zwar in absehbarer Zeit weiter verbessern, die Branche wird hier aber noch viel Grundlagenforschung betreiben müssen.

Vor diesem Hintergrund dient der entwickelte Prototyp in erster Linie dazu, das Potenzial für videobasierte *virtual reality* Simulationen in der medizinischen Ausbildung zu demonstrieren und die damit verbundenen Chancen und Risiken zu kommunizieren. Gerade die Qualität volumetrischer Videos steht in der technischen Umsetzung noch vor großen Herausforderungen. Eine akzeptable fotorealistische Videoqualität lässt sich bisher nur in Studio-kontexten mit einer Vielzahl von Sensoren erzielen, die sich nur unter erheblichem Aufwand im OP reproduzieren lassen. Der minimale technische Aufbau des entwickelten Prototyps bietet hingegen noch keine ausreichende Videoqualität, um als Standard-Trainingswerkzeug eingesetzt zu werden. Während die fotogrammetrische Rekonstruktion von *VolumetricOR* bereits mit moderatem Aufwand eine fotorealistische Darstellung der chirurgischen Arbeitsumgebung bietet, die kaum von der Realität zu unterscheiden ist, muss die Videoqualität noch deutlich verbessert werden, um die Anforderung der Darstellung für chirurgische Lernszenarien zu erfüllen.

Im Gegensatz zur Aufnahme volumetrischer Videos in speziellen Studios gilt es bei der Entwicklung und im Produktionsablauf eines mobilen Aufnahmeverfahrens eine Vielzahl von Variablen zu kontrollieren. Dies betrifft insbesondere die Anordnung und Kalibrierung der Sensoren sowie die Ausleuchtung und die Beschaffenheit der Umgebung. Im Studio besteht der Vorteil, dass diese Faktoren allesamt planbar sind. Bei einem mobilen Setup muss die Software hingegen robust programmiert werden, um auf die wechselnden Umweltbedingungen zu reagieren. So können reflektierende, transparente und Infrarotlicht-absorbierende Oberflächen den auf Infrarotlicht-basierenden Tiefensensor stören und sich auf die Bildqualität auswirken. Die Rohdaten können verfälscht werden oder mit einer großen Anzahl von Artefakten versehen sein. So könnte etwa bei Aufnahmen in einem Operationssaal medizinisches Equipment, wie

zum Beispiel ein Infrarot-Koagulator, die Sensoren beeinträchtigen. Dieses Risiko kann durch die Entwicklung eines *denoising* Algorithmus zur Verbesserung der Datenqualität zwar reduziert werden. Dennoch wird hier Neuland betreten und die Effektivität des Systems in diesem Kontext muss durch an das Projekt anschließende Validierungsstudien weiter verbessert werden.

Eine weitere technische Herausforderung betrifft die Fusionierung der Daten der einzelnen Sensoren. Variable Abstände zwischen den Sensoren und die Verdeckung durch Objekte oder Personen können zur Reduzierung des Bildbereichs führen. Dies kann beim Betrachten eines operativen Eingriffs zu Leerräumen im Videobild führen (Abb. 38). Personen werden dann aus einer bestimmten Perspektive nicht vollständig dargestellt, bzw. Bildbereiche überlappen sich und produzieren störende Artefakte. Hierfür ist eine entsprechende Abdeckung des Aufnahmebereichs mit einer ausreichenden Anzahl von Sensoren erforderlich. Dies kann durch den Einsatz von Tiefensensoren der neuesten Generation deutlich verbessert werden, da die Sensoren kleiner geworden sind und zugleich die Auflösung deutlich höher geworden ist. Neuere Sensorsysteme, wie z.B. das *Kinect for Azure* System (Microsoft Corporation, Redmond, USA), ein *time-of-flight* Sensor, der über eine Multisensor-Kalibrierung und eine integrierte Grafikverarbeitung verfügt, lassen sich effizienter miteinander verknüpfen und verringern den Umfang der erforderlichen Hardware.

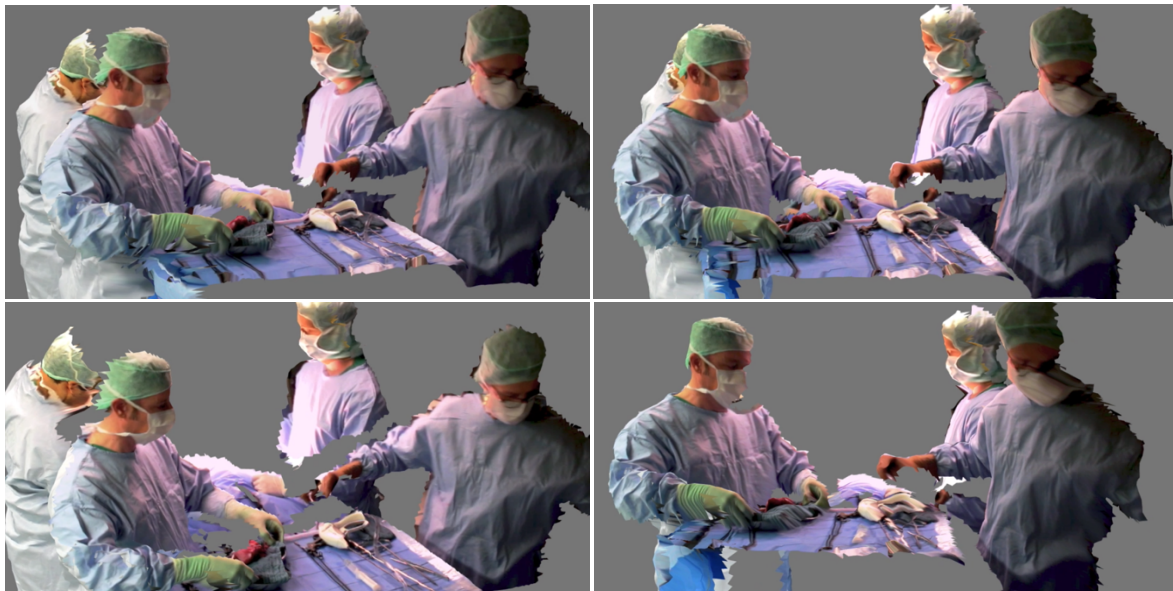


Abb. 38. Die Änderung der Betrachtungsposition offenbart Bereiche, die durch die Sensoren nicht erfasst werden. Für einen erweiterten Bildraum muss die Anzahl der Sensoren erhöht werden.

4. Diskussion & Ausblick

Die visuelle Erfassung und Rekonstruktion räumlicher Strukturen in Echtzeit fordert nicht allein die Technik der 4D-Bildgebung in einem Höchstmaß heraus, sondern sie erfordert auch seitens der Medizintechnik ein spezifisches Wissen über die Gestaltung und Handhabung der entsprechenden Schnittstellen und Bildformate von *extended reality* Technologien. Dieses Wissen muss für die chirurgische Praxis und Entwicklung erst noch systematisch erschlossen werden. Um in der Medizintechnik eine entsprechende Expertise aufzubauen, müssen vor allem Kompetenzen aus nicht-klinischen Entwicklungsbereichen importiert werden. Weil zunehmend Akteure, Anwendungen und Geräte von außerhalb der klassischen Medizintechnik in die Entwicklung chirurgischer Anwendungen vordringen, müssen hier explizit interdisziplinäre Ansätze verfolgt werden, um Medizin, Technologie und Gestaltung in Forschung und Entwicklung zusammenzuführen. Nur so können letztlich nachhaltige und auf die spezifischen Nutzeranforderungen im Operationssaal zugeschnittenen Lösungen gefunden und umgesetzt werden. Dazu muss es vor allem gelingen, das Wissen über die Funktionsweise von *extended reality* Technologien aus anderen Bereichen, etwa aus der Spielentwicklung, Computerwissenschaft, Design oder Mechatronik, möglichst nah an die Bedürfnisse der chirurgischen Praxis heranzuführen.

Dafür sind mehr Freiräume für Grundlagenforschung erforderlich, um neue Potenziale auszuloten. Dies erfordert neben experimentellen und nicht allein auf Versorgung ausgerichteten Förderformaten auch die Stärkung branchenübergreifender Kooperationen, die das Feld für neue und vor allem auch kleinere Akteure öffnet. An der Schnittstelle zwischen Forschung, Industrie und Praxis sollten vor allem innerhalb der Kliniken neue Experimentierräume geschaffen werden, welche die Erprobung und Präsentation der Technologien ermöglichen. Anhand von Prototypen und Konzeptstudien könnten so aus der Praxis heraus neue Lösungsansätze erarbeitet werden. Gestalter*innen und Computerwissenschaftler*innen könnten XR-Technologien und ihre Auswirkungen auf die Einsatzkontexte im direkten Austausch mit prospektiven Nutzer*innen und Nutzern sowie deren Anwendungsbedarf überprüfen, etwa im Hinblick auf die interaktive 3D-Simulation oder gestenbasierte Schnittstellen. Für den theoretischen Diskurs der digitalen Aus- und Weiterbildung könnte sich zudem die Möglichkeit eröffnen, diesen gemeinsam weiterzuentwickeln, das Methoden-

repertoire zu erweitern und Innovationen anzustoßen. Zudem könnte so die Einbindung von Auszubildenden und angehenden Praktiker*innen in die neueste Forschung gefördert werden.

Außerdem muss es ein zentrales Anliegen sein, XR-Anwendungen so in die klinische Infrastruktur zu integrieren, dass sie im Kontext existierender Arbeitsabläufe funktionieren und mit den etablierten technischen Schnittstellen kompatibel sind. Dazu gehört zuallererst die Definition der Anforderungen zur Sicherstellung der Verarbeitung, Speicherung und Übertragung von Daten zwischen den klinischen IT-Systemen und der entsprechenden Darstellungshardware und -software. Für die Speicherung und Übertragung der 3D-Modelle der *extended reality* müssen entsprechende Standards erst noch erarbeitet werden, um die Anbindung an existierende Standards zu gewährleisten. Dies betrifft insbesondere die Anpassung an bereits vorhandene Datenquellen und -standards in der IT-Infrastruktur, wie etwa KIS (Krankenhaus-Informationssystem), PACS (*Picture Archiving and Communication System*), RIS (Radiologie-Informationssystem) und LIS (Labor-Informationssystem), aber auch den Anschluss an bildgebende Geräte im Operationssaal und Vitaldatenmonitoring-Lösungen.

Dabei muss auch die EU-Datenschutz-Grundverordnung berücksichtigt werden. Zudem sollte eine Kompatibilität der Datenformate auch mit den standardisierten und proprietären Schnittstellen existierender Medizinprodukte und klinischen Datenverarbeitungssystemen von Anfang an angestrebt werden, etwa um 3D-Modelle mit Metainformationen anzureichern. Neben herstellerspezifischen proprietären Protokollen betrifft dies vor allem die Standards DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*), HL7 (*Health Level 7*) und FHIR (*Fast Healthcare Interoperable Resources*). Eine weitere Bedingung zur Nutzung im Operationssaal ist die Anbindung an bestehende klinische Tracking- bzw. Lokalisierungssysteme, mit der die Lokalisierung der *extended reality* Brillen fehlerfreier erfolgen könnte. Dafür sind aber auch seitens der Industrie weitere Anpassungen der Hardware erforderlich, die wiederum klar definierte Anwendungsszenarien mit entsprechendem Wertschöpfungspotenzial voraussetzen.

Abschließend bleibt zu bemerken, dass die Techniken des *spatial* und *embodied computing* langfristig weit über den Rahmen der Nutzung von *mixed* oder *virtual reality* Brillen hinaus im klinischen Umfeld Anwendung finden werden. Denkt man die Möglichkeiten der Raumerfassung in Echtzeit weiter, so ergibt sich nicht nur ein neuer bildbasierter Zugriff auf das Operationsgebiet. Es geht um weit mehr: technisch ist es bereits heute möglich ist, anatomische

Strukturen in Echtzeit in geometrische Formen zu überführen. Damit wird das gesamte Operationsgebiet in Echtzeit *computierbar* bzw. berechenbar. In der Konsequenz sind chirurgische Eingriffe nicht mehr nur auf der Basis menschlichen Erfahrungswissens durchführbar, sondern werden zu einem algorithmischen Problem. Damit wären nicht nur neue Ansichten möglich, wie sie in der vorliegenden Arbeit besprochen wurden, sondern es ergäbe sich im Zusammenhang mit KI-basierter Erkennung und Steuerung auch die Möglichkeit Operationen nicht nur in Assistenz, sondern in Kooperation mit Maschinen durchzuführen. Die Manipulation von Gewebe stünde damit vor einem (weiteren) grundlegenden Wandel, nämlich dem von der bildgeführten hin zu einer computergeführten Chirurgie.

Literaturverzeichnis

- Alaker M, Wynn GR, and Arulampalam T. "Virtual Reality Training in Laparoscopic Surgery: A Systematic Review & Meta-Analysis". *International Journal of Surgery* 29 (May 2016): 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijso.2016.03.034>.
- Altmaier P. "Die Zweite Welle Der Digitalisierung Ist Europas Chance". *Handelsblatt*, October 28, 2019. <https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-die-zweite-welle-der-digitalisierung-ist-europas-chance/25160092.html>. [Zugriff: 1.3.2020]
- Anding M. "Fachkräftemangel: Zur Lösung Eines Greifbaren Problems in Digitalen Zeiten". *Wirtschaftsinformatik & Management* 10, no. 1 (February 2018): 14–21. <https://doi.org/10.1007/s35764-018-0012-2>.
- Bernardo A. "Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training". *World Neurosurgery* 106 (October 2017): 1015–29. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.06.140>.
- Bernhardt S, Nicolau SA, Soler L, and Doignon C. "The Status of Augmented Reality in Laparoscopic Surgery as of 2016." *Med Image Anal* 37 (2017): 66–90.
- Bichlmeier C, Sielhorst T, Heining SM, Navab N, 2007. "Improving depth perception in medical AR." In *Bildverarbeitung für die Medizin*, edited by Horsch A, Deserno TM, Handels H, Meinzer HP, Tolxdorff T, 217–221, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- Bloxham K. *XR Industry Insight Report*. VR Intelligence, 2019.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Berufsbildungsbericht*, 2019.
- Chan S, Conti F, Salisbury K, and Blevins NH. "Virtual Reality Simulation in Neurosurgery". *Neurosurgery* 72 (January 2013): A154–A164. <https://doi.org/10.1227/neu.ob013e3182750d26>.
- Chauvet P, Collins T, Debize C, Bartoli A, Canis M, and Bourdel N. "Augmented Reality in a Tumor Resection Model". *Journal of Minimally Invasive Gynecology* 23, no. 7 (November 2016). <https://doi.org/10.1016/j.jmig.2016.08.091>.
- Chen X, Xu L, Wang Y, Wang H, Wang F, Zeng X, Wang Q, and Egger J. "Development of a Surgical Navigation System Based on Augmented Reality Using an Optical See-through Head-Mounted Display". *J Biomed Inform* 55 (2015): 124–31.
- DigiCapital. "AR/VR-Investments". 2020. <https://digi-capital.com/news/2017/11/1-Billion-Ar-Vr-Investment-in-q4-2-5-Billion-This-Year-so-Far>. [Zugriff: 1.3.2020]
- Dongen KW, van der Wal WA, Borel Rinkes IHM, Schijven MP, and Broeders IAMJ. "Virtual Reality Training for Endoscopic Surgery: Voluntary or Obligatory?". *Surgical Endoscopy* 22, no. 3 (August 2007): 664–67. <https://doi.org/10.1007/s00464-007-9456-9>.
- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik. „Extended Reality for All – Moving the European XR Industry Forward”. 2005. http://xr4all.eu/wp-content/uploads/xr4all_d4.1_landscapereport_hhi_v1.o_public-1.pdf. [Zugriff: 1.3.2020]
- Funamizu M. 'The Future of Search', <https://petitvention.wordpress.com/2008/02/10/Future-of-Internet-Search-Mobile-Version>. 2008. [Zugriff: 1.3.2020]
- Gallagher AG, Ritter EM, Champion H, Higgins G, Fried MP, Moses G, Smith CD, and Satava RM. "Virtual Reality Simulation for the Operating Room". *Annals of Surgery* 241, no. 2 (February 2005): 364–72. <https://doi.org/10.1097/01.sla.0000151982.85062.80>.

- Green J, Wyllie A, and Jackson D. "Virtual Worlds: A New Frontier for Nurse Education?". *Collegian* 21 (2014): 135–41.
- Guha D, Alotaibi NM, Nguyen N, Gupta S, McFaul C, and VXD Yang. "Augmented Reality in Neurosurgery: A Review of Current Concepts and Emerging Applications.". *Can J Neurol Sci* 44 (2017): 235–45.
- Cutiérrez, F, J Pierce, VM Vergara, R Coulter, L Saland, TP Caudell, TE Goldsmith, and DC Alverson. "The Effect of Degree of Immersion upon Learning Performance in Virtual Reality Simulations for Medical Education.". *Stud Health Technol Inform* 125 (2007): 155–60.
- Halsted, WS. The Training of the Surgeon. *Johns Hopkins Bulletin*. 1904; 15:267–275.
- Hinterwaldner I. "Zur Fabrikation operativer Bilder in der Chirurgie.". In *The picture's image: wissenschaftliche Visualisierung als Komposit*, edited by Hinterwaldner I, Buschhaus M, 206-22. München: Fink, 2006.
- Hopmans, CJ, Hoed PT, van der Laan L, van der Harst E, van der Elst M, Mannaerts GH, Dawson I, Timman R, Wijnhoven BP, and Jermans JN. "Impact of the European Working Time Directive (EWTD) on the Operative Experience of Surgery Residents.". *Surgery* 157 (2015): 634–41.
- Huber T, Kirschniak A, and Johannink J. "[Survey of Training in Laparoscopic Skills in Germany]". *Zentralbl Chir* 142 (2017): 67–71.
- Huber T, Wunderling T, Paschold M, Lang H, Kneist W, and Hansen C. "Highly Immersive Virtual Reality Laparoscopy Simulation: Development and Future Aspects". *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 13, no. 2 (November 2017): 281–90. <https://doi.org/10.1007/s11548-017-1686-2>.
- Kapralos B, Moussa F, and Dubrowski A. "An Overview of Virtual Simulation and Serious Gaming for Surgical Education and Training". In *Studies in Computational Intelligence*, 289–306. Springer Berlin Heidelberg, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45432-5_14.
- Kersten-Oertel M, Jannin P, and Collins DL. "The State of the Art of Visualization in Mixed Reality Image Guided Surgery.". *Comput Med Imaging Graph* 37 (2013): 98–112.
- Khor WS, Baker B, Amin K, Chan A, Patel K, and Wong J. "Augmented and Virtual Reality in Surgery: the Digital Surgical Environment: Applications Limitations and Legal Pitfalls". *Annals of Translational Medicine* 4, no. 23 (December 2016): 454–54. <https://doi.org/10.21037/atm.2016.12.23>.
- Kleven NS, Prasolova-Forland E, Fominykh M, Hansen A, Rasmussen G, Sagberg LM, and Lindseth F. "Training Nurses and Educating the Public Using a Virtual Operating Room with Oculus Rift". In *2014 International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM)*. IEEE, 2014. <https://doi.org/10.1109/vsimm.2014.7136687>.
- Kong SH, Haouchine N, Soares R, Klymchenko A, Andreiuk B, Marques B, Shabat G. "Robust Augmented Reality Registration Method for Localization of Solid Organs' Tumors Using CT-Derived Virtual Biomechanical Model and Fluorescent Fiducials.". *Surg Endosc* 31 (2017): 2863–71.
- Kotsis SV, and Chung KC. "Application of the See One, Do One, Teach One Concept in Surgical Training.". *Plast Reconstr Surg* 131 (2013): 1194–1201.
- Ludmerer KM. *Time to Heal: American Medical Education from the Turn of the Century to the Era of Managed Care*. Oxford University Press, 2005. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195181364.001.0001>.
- Ma M, Jain LC and Anderson P, eds., *Virtual Augmented Reality and Serious Games for Healthcare* 1. Berlin & Heidelberg: Springer, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54816-1>.
- Mahmoud N, Grasa ÓG, Nicolau SA, Daignon C, Soler L, Marescaux J, and Montiel JM. "On-Patient See-through Augmented Reality Based on Visual SLAM.". *Int J Comput Assist Radiol Surg* 12 (2017): 1–11.

- Marescaux J, and Diana M. "Next Step in Minimally Invasive Surgery: Hybrid Image-Guided Surgery." *J Pediatr Surg* 50 (2015): 30–36.
- Mentis H, Chellali A, and Schwaitzberg S. "Learning to See the Body". In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI 14*. ACM Press, 2014. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557387>.
- Meola A, Cutolo F, Carbone M, Cagnazzo F, Ferrari M, and Ferrari V. "Augmented Reality in Neurosurgery: a Systematic Review." *Neurosurg Rev* 40 (2017): 537–48.
- Minhua M, Lakhmi CJ, and Anderson P, eds. *Virtual Augmented Reality and Serious Games for Healthcare 1*. Berlin & Heidelberg: Springer, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54816-1>.
- Morrison C, Culmer P, Mentis H, and Pincus T. "Vision-Based Body Tracking: Turning Kinect into a Clinical Tool". *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, December 2014, 1–5. <https://doi.org/10.3109/17483107.2014.989419>.
- Nataraja RM, Webb N, and Lopez PJ. "Simulation in Paediatric Urology and Surgery, Part 2: An Overview of Simulation Modalities and Their Applications." *J Pediatr Urol* 14 (2018): 125–31.
- Ntourakis D, Memeo R, Soler L, Marescaux J, Mutter D, and Pessaux P. "Augmented Reality Guidance for the Resection of Missing Colorectal Liver Metastases: An Initial Experience." *World J Surg* 40 (2016): 419–26.
- Ohara K, Dastur N, Carrell T, Gonzalez G, Sellen A, Penney G, Varnavas A. "Touchless Interaction in Surgery". *Communications of the ACM* 57, no. 1 (January 2014): 70–77. <https://doi.org/10.1145/2541883.2541899>.
- Okamoto T, Onda S, Matsumoto M, Gocho T, Futagawa Y, Fujioka S, Yanaga K, Suzuki N, and Hattori A. "Utility of Augmented Reality System in Hepatobiliary Surgery." *J Hepatobiliary Pancreat Sci* 20 (2013): 249–53.
- Patel P, Hiten RH, and Bijen P. "Virtual Reality Surgical Simulation in Training". *Expert Review of Anticancer Therapy* 12, no. 4 (April 2012): 417–20. <https://doi.org/10.1586/era.12.23>.
- Paulus CJ, Haouchine N, Kong SH, Soares RV, Cazier D, and Cotin S. "Handling Topological Changes during Elastic Registration : Application to Augmented Reality in Laparoscopic Surgery." *Int J Comput Assist Radiol Surg* 12 (2017): 461–70.
- Pessaux P, Diana M, Soler L, Piardi T, Mutter D, and Marescaux J. "Towards Cybernetic Surgery: Robotic and Augmented Reality-Assisted Liver Segmentectomy." *Langenbecks Arch Surg* 400 (2015): 381–85.
- Philips & Microsoft, "HoloLens 2: Could Augmented Reality Change the Face of Image Guided Therapy?". <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/standard/news/articles/2019/20190313-philips-and-microsoft-hololens-2-could-augmented-reality-change-the-face-of-image-guided-therapy.html>, 2019. [Zugriff: 1.3.2020]
- Polavarapu HV, Kulaylat AN, Sun S, and Hamed OH. "100 Years of Surgical Education: The Past, Present, and Future." *Bull Am Coll Surg* 98 (2013): 22–27.
- Prentice R. "The Anatomy of a Surgical Simulation". *Social Studies of Science* 35, no. 6 (December 2005): 837–66. <https://doi.org/10.1177/0306312705053351>.
- Pugh CM, Santacaterina S, DaRosa DA, and Clark RE. "Intra-Operative Decision Making: More than Meets the Eye". *Journal of Biomedical Informatics* 44, no. 3 (June 2011): 486–96. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2010.01.001>.
- Qian L, Barthel A, Johnson A, Osgood G, Kazanzides P, Navab N, and Fuerst B. "Comparison of Optical See-through Head-Mounted Displays for Surgical Interventions with Object-Anchored 2D-Display." *Int J Comput Assist Radiol Surg* 12 (2017): 901–10.
- Queisner M. "Bildoperationen. Das Problem der Mensch-Maschine Interaktion bei bildgeführten Interventionen". In *Techniken des Leibes*, edited by Goppelsröder F, Sternagel J, 77–86, Velbrück Verlag, 2016.
- Queisner M, Pogorzelskiy P, Remde C, Sauer IM. "Adaptive Anatomy – Design Principles for Medical Mixed Reality", 2020. <https://youtu.be/6xxAuOuYuC8>. [Zugriff: 1.3.2020]

- Queisner M, Pogorzelskiy P, Remde C, Sauer IM. „VolumetricOR”, 2020. <https://doi.org/10.18452/20470>. [Zugriff: 1.3.2020]
- Robison RA, Liu CY, and Apuzzo MLJ. “Man Mind, and Machine: The Past and Future of Virtual Reality Simulation in Neurologic Surgery”. *World Neurosurgery* 76, no. 5 (November 2011): 419–30. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2011.07.008>.
- Sachdeva AK., Bell RH, Britt LD, Tarpley JL, Blair PG, and Tarpley MJ. “National Efforts to Reform Residency Education in Surgery”. *Academic Medicine* 82, no. 12 (December 2007): 1200–1210. <https://doi.org/10.1097/acm.0b013e318159e052>.
- Sauer IM, Queisner M, Pogorzelskiy M, Pratschke J. “Operieren im digitalen Raum – Mixed Reality in der Chirurgie”. In *Die Zukunft der Medizin*, edited by Erwin Böttinger, Jasper zu Putlitz, 71–83, Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 2019.
- Sauer IM, Queisner M, Tang P, Moosburner S, Hoepfner O, Horner R, Lohmann R, and Pratschke J. “Mixed Reality in Visceral Surgery: Development of a Suitable Workflow and Evaluation of Intraoperative Use-Cases.”. *Ann Surg* 266 (2017): 706–12.
- Schneider NK, Masthoff M, Gosheger G, Schopow N, Theil JC, Marschall B, and Zehrfeld J. “Generation Y in der Chirurgie. Der Konkurrenzkampf um Talente in Zeiten des Nachwuchsmangels”. *Der Chirurg*, February 2020. <https://doi.org/10.1007/s00104-020-01138-2>.
- Schwab K. *Vierte industrielle Revolution*. Pantheon Verlag, 2017.
- Seymour NE. “VR to OR: A Review of the Evidence That Virtual Reality Simulation Improves Operating Room Performance”. *World Journal of Surgery* 32, no. 2 (December 2007): 182–88. <https://doi.org/10.1007/s00268-007-9307-9>.
- Shaharan S, and Neary P. “Evaluation of Surgical Training in the Era of Simulation.”. *World J Gastrointest Endosc* 6 (2014): 436–47.
- Shaprio A. “Roadmap Künstliches Leben. Auf Dem Weg Zu Dialogischer Künstlicher Intelligenz”. *Schnittstellen* 33 (2019). https://www.kulturstiftung-des-bundes.de/de/magazin/magazin_33/roadmap_kuenstliches_leben_auf_dem_weg_zu_dialogischer_kuenstlicher_intelligenz.html.
- Sielhorst T, Feuerstein M, and Navab N. “Advanced Medical Displays: A Literature Review of Augmented Reality”. *Journal of Display Technology* 4, no. 4 (December 2008): 451–67. <https://doi.org/10.1109/jdt.2008.2001575>.
- Sutherland IE. “A Head-Mounted Three Dimensional Display”. In *Proceedings of the December 9-11 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I on - AFIPS 68 (Fall, Part I)*. ACM Press, 1968. <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>.
- Sutherland IE. “The Ultimate Display”. In *Information Processing: Proceedings of International Federation for Information Processing Congress*. Macmillan and Co., 1965.
- Tepper OM, Rudy HL, Lefkowitz A, Weimer KA, Marks SM, Stern CS, and Garfein ES. “Mixed Reality with HoloLens: Where Virtual Reality Meets Augmented Reality in the Operating Room.”. *Plast Reconstr Surg* 140 (2017): 1066–70.
- Vávra P, Roman J, Zonča P, Ihnát P, Němec M, Kumar J, Habib N, and El-Gendi A. “Recent Development of Augmented Reality in Surgery: A Review.”. *J Healthc Eng* 2017 (2017): 4574172.
- Veelen MA van, Jakimowicz JJ, and Kazemier G. “Improved Physical Ergonomics of Laparoscopic Surgery”. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies* 13, no. 3 (January 2004): 161–66. <https://doi.org/10.1080/13645700410033193>.
- Vitish-Sharma P, Knowles J, and Patel B. “Acquisition of Fundamental Laparoscopic Skills: Is a Box Really as Good as a Virtual Reality Trainer?”. *International Journal of Surgery* 9, no. 8 (2011): 659–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijso.2011.08.009>.

Wasen K, and Brierley M. "The Visual Touch Regime: Real-Time 3D Image-Guided Robotic Surgery and 4D and 5D Scientific Illustration at Work". In *SpringerBriefs in Health Care Management and Economics*, 21–51. Berlin Heidelberg: Springer, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32570-0_2.

Woodrow B. ed., *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. CRC Press, 2015. <https://doi.org/10.1201/b18703>.

Zobel B, Werning S, Berkemeier L, and Thomas O. "Augmented- und Virtual-Reality-Technologien zur Digitalisierung der Aus- und Weiterbildung. Überblick, Klassifikation und Vergleich". In *Digitalisierung in der Aus- und Weiterbildung*, 20–34. Berlin Heidelberg: Springer, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56551-3_2.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Moritz Queisner, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „XR in der Chirurgie. *Spatial und embodied computing in der digitalen Chirurgie: Funktionsweise, Anwendungsfelder, Darstellungsprinzipien*“ (deutsch) / „XR in Surgery. *Spatial and embodied computing in digital surgery: Technology, Application, Design*“ (english) selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Grafiken und Tabellen) werden von mir verantwortet. Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe. Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe. Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Moritz Queisner

Berlin, 30.3.2020

Publikationsliste

Jahr	Titel
2020	Moritz Queisner (2020) VolumetricOR: A new Approach to Simulate Surgical Interventions in Virtual Reality for Surgical Education – A Concept Study. <i>Virtual Reality</i> , Springer. (in Begutachtung)
2019	Igor Maximilian Sauer, Moritz Queisner , Michael Pogorzelskiy, Johann Pratschke (2019) Operieren im digitalen Raum – Mixed Reality in der Chirurgie . In: Erwin Böttinger, Jasper zu Putlitz (Eds.) <i>The Future of Medicine. Disruptive innovations transform healthcare in the 21st Century</i> . Berlin: Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
	Moritz Queisner , Michael Pogorzelskiy, Christopher Remde, Peter Tang, Simon Moosburner, Igor M. Sauer. Volumetric Operating Room – Virtual Reality Concept for Surgical Training , 13.2.2019, https://youtu.be/jFQOU1nyThI .
	Moritz Queisner , Michael Pogorzelskiy, Christopher Remde, Peter Tang, Simon Moosburner, Igor M. Sauer. Adaptive Anatomy – Design Principles for Medical Mixed Reality , 13.2.2019, https://youtu.be/6xxAuOuYuC8 .
	Simon Moosburner, Christopher Remde, Peter Tang, Moritz Queisner , Nils Haep, Johann Pratschke, Igor M Sauer (2019), Real world usability analysis of two augmented reality headsets in visceral surgery , <i>Artificial organs</i> 43 (7), 694-698.
	Moritz Queisner , Nina Franz (2018) Die Akteure verlassen die Kontrollstation .
2018	Krisenhafte Kooperationen im bildgeführten Drohnenkrieg . In Benske, Johannes; Seifert, Johanna; Siegler, Martin; Terberl, Christina (Hg.): <i>Prekäre Koexistenz</i> , Paderborn: Fink 2018.
	Moritz Queisner (2018) „ Wir schaffen einen Experimentierraum zur Erprobung neuer Technologien .“ Interview mit TK-Blog.
	Moritz Queisner , Luisa Feiersinger, Kathrin Friedrich (Ed.) (2018) Image – Action – Space. Situating the Screen in Visual Practice . De Gruyter.
	Moritz Queisner , Nina Franz (2018) The Actors Are Leaving the Control Station. The Crisis of Cooperation in Image-guided Drone Warfare . In: Luisa Feiersinger, Kathrin Friedrich, Moritz Queisner (Ed.) <i>Image – Action – Space. Situating the Screen in Visual Practice</i> . De Gruyter.
	Moritz Queisner , Igor Sauer, Johann Pratschke (2018) Mixed and Augmented Reality – Why Surgeons Should Care . In <i>Annals of Surgery</i> . July, 2018. doi: 10.1097/SLA.0000000000002913.
	Moritz Queisner , Igor Sauer, Michael Pogorzelskiy, Christopher Remde (2018) Future Operating Room. Augmented und Virtual Reality in der Chirurgie . In: <i>Making Games</i> . Nr. 31, 4, 2018.
2017	Moritz Queisner (2017) Disrupting Screen-Based Interaction. Design Principles of Mixed Reality Displays . In: Carsten Busch, Christian Kassung and Jürgen Sieck (ed.) <i>Mixed Reality</i> . Hülsbusch. S. 133-144.
	Moritz Queisner (2017) “Look to Kill.” On the Precarious Relationship between Transparency and Opacity in Helmet Displays . In: Nikola Doll, Horst Bredekamp, Wolfgang Schäffner (Ed.) <i>+ultra. knowledge & gestaltung</i> . E. A. Seemann, Leipzig, p. 294–300.
	Sauer, Igor M.; Queisner, Moritz ; Tang, Peter; Moosburner, Simon; Hoepfner, Ole; Horner, Rosa; Lohmann, Rudiger; Pratschke, Johann: „Mixed Reality in visceral surgery – Development of a suitable workflow and evaluation of intraoperative use-cases“ . In: <i>Annals of Surgery</i> , 2017 Aug 1. doi: 10.1097/SLA.0000000000002448.
	Moritz Queisner (2017) 'Looking Through a Soda Straw': Mediated Vision in Remote Warfare . In: <i>Politik</i> , Vol. 20, No. 1.
2016	Moritz Queisner , Michael Friedman, Kathrin Friedrich, Christian Stein (2016) Conceptualizing Screen Practices: How Head-Mounted Displays Transform Action and Perception . <i>Media Tropes</i> , Vol 6, No 1.
	Moritz Queisner (2016) Der Blick als Waffe. Zum prekären Verhältnis von Transparenz und Opazität bei Helmdisplays . In: Nikola Doll, Horst Bredekamp, Wolfgang Schäffner (Hrg.) <i>+ultra. gestaltung schafft wissen</i> . E. A. Seemann, Leipzig, S. 293–299.

Moritz Queisner (2016) **Medical Screen Operations: How Head-Mounted Displays Transform Action and Perception in Surgical Practice**. In: *Media Tropes*, Vol 6, No 1 (2016): Conceptualizing Screen Practices: How Head-Mounted Displays Transform Action and Perception, 30–51.

Moritz Queisner, Kathrin Friedrich, Anna Roethe (Hrg.) (2016) **Bildwelten des Wissens**. *Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Bd. 12.1: Image Guidance. Bedingungen bildgeführter Operation. Berlin: De Gruyter.

Moritz Queisner (2016) **Bildoperationen. Das Problem der Mensch-Maschine Interaktion bei bildgeführten Interventionen**. In: F. Goppelsröder, J. Sternagel (Hrg.) *Techniken des Leibes*. Velbrück. S. 77–86.

2015 **Moritz Queisner** (2015) **Armchair Activist**. In: *Aesthetics of Resistance, Pictorial Glossary, The Nomos of Images*, ISSN: 2366-9926.

Moritz Queisner (2016) **Drone Vision. Sehen und Handeln an der Schnittstelle von Sinnen und Sensoren**. In: B. Ochsner & R. Stock (Hrg.) *senseAbility – Mediale Praktiken des Sehens und Hörens*. Transcript. S. 169–188. DOI: <https://doi.org/10.14361%2F9783839430644-008>.

Kathrin Friedrich, **Moritz Queisner**, Thomas Picht, Anna Roethe (2015) **Im Bildlabor der Neurochirurgie. Ein interdisziplinärer, bildgeführter Fallbericht**. In: Wolfgang Schäffner / Horst Bredekamp (Hrg.): *Haare hören – Strukturen wissen – Räume agieren*. Transcript. S.31–43.

2014 **Moritz Queisner**, Kathrin Friedrich (2014). **Automated killing and mediated caring How image-guided robotic intervention redefines radiosurgical practice**. In S. Torrance, M. Coeckelbergh, J. Soraker, B. Whitby, & A. van Wynsberghe (Eds.), *Proceedings of the 50th Anniversary Convention of the Society for the Study of Artificial Intelligence and the Simulation of Behaviour*. London.

Moritz Queisner (2014). **Click Social Activism? A Localisation of Political Participation After Networks**. In C. Apprich, J. B. Slater, A. Iles, & O. L. Schultz (Eds.), *Plants, Androids and Operators – A Post-Media Handbook*. Mute Books. pp. 126–137.

2013 Catalogue: **Moritz Queisner**, Kristian Lukic, Boaz Levin, Owen Mundy, Daniel Herleth, Adam Kaplan, Frédéric Eyl, Oliver Lerone Schultz (2013) **The Earth Observation Guide**.

2012 Franz Engel, **Moritz Queisner**, Tullio Viola (Hrg.) (2012). **Das bildnerische Denken: Charles S. Peirce**. Akademie Verlag.

Franz Engel, **Moritz Queisner**, Tullio Viola (2012) **Viertheit: Peirce' Zeichnungen**. In: Franz Engel, Moritz Queisner, Tullio Viola (Hrg.) *Das bildnerische Denken: Charles S. Peirce*. Akademie Verlag. S. 39–50.

2010 Franz Engel, **Moritz Queisner** (2010) **Ich denke niemals in Worten. Zeichnungen von Charles S. Peirce**, in: *Humboldt* 6, S. 3.

2009 **Moritz Queisner** (2009) **Border Crossings** was a speed-project that I did during my studies at the University of Potsdam, Germany. It was part of a work about the relation between visibility and iconicity entitled „Uncertainty – On the Transparency of Pictures“. <https://border-crossings.tumblr.com/>

2008 **Moritz Queisner** (2008) **Follow Me** was a student mapping-project on tracking and tracing I did as a student at the Institute for Arts and Media at the University of Potsdam. The aim of the project was to combine technological and artistic elements in order to frame the relationship of intermediality and the archive. <http://followme-emw.blogspot.com/>

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Danksagung

Besonderer Dank gilt Prof. Dr. Igor Sauer für das Vertrauen, die Unterstützung und die interdisziplinäre Offenheit, die diese Arbeit erst möglich gemacht haben. Mein besonderer Dank gilt auch Michael Pogorzelskiy und Christopher Remde für die großartige Zusammenarbeit, Prof. Dr. Johann Pratschke für seinen Weitblick und den Willen, XR-Technologien in der Chirurgie langfristig zu etablieren, Peter Tang und Dr. Simon Moosburner für die technische Expertise und organisatorische Unterstützung, Prof. Dr. Matthias Bruhn für die Weichenstellung in Richtung Chirurgie und schließlich meiner Familie für die Geduld.