

Felix Ritter, Christian Hansen, Kjen Wilkens, Alexander Köhn und Heinz-Otto Peitgen

Benutzungsschnittstellen für den direkten Zugriff auf 3D-Planungsdaten im OP

User Interfaces for Direct Interaction with 3D Planning Data in the Operating Room

Mensch-Computer-Interaktion_Chirurgie_Berührungslose Benutzungsschnittstelle_GUI-Design_WiiMote

Zusammenfassung. Zur Unterstützung komplexer chirurgischer Eingriffe stehen seit einiger Zeit computergestützte Planungssysteme bereit. Für den direkten Zugriff im OP sind diese Systeme jedoch nur sehr eingeschränkt einsetzbar, da sie für die präoperative Planung entworfen wurden und die besonderen Bedingungen im Operationssaal nicht berücksichtigen. Die speziellen Anforderungen in Bezug auf kognitive Beanspruchung, Arbeitsfluss, Sterilität und Platz machen es dem Chirurg weitestgehend unmöglich, während der OP einen Computer mit den üblichen Eingabegeräten wie Tastatur und Maus zu bedienen. Dieser Artikel diskutiert zwei Konzepte zur intraoperativen Betrachtung von virtuellen Planungsmodellen für Operationen an der Leber. Die praktische Anwendbarkeit der Konzepte wird anhand einer Fallstudie diskutiert.

Summary. Computer-aided planning of complex surgical interventions as it is available today enables the surgeon to simulate and to optimize a resection strategy beforehand. The direct access to this planning data in the operating room, however, is limited by the design of the planning systems for preoperative use. Interfaces for operating room interaction need to consider the specific requirements as to the cognitive load, workflow, sterility, and workspace of the surgeon. During surgery, the control of interfaces by conventional interaction devices such as keyboard and mouse is rather limited for the surgeon. This article discusses two concepts for the intra-operative inspection of 3D planning data for liver surgery. The practical applicability of the concepts is discussed within a case study.

1. Einleitung

1.1 Operationsplanung in der Leberchirurgie

Computergestützte Planungssysteme erleichtern dem Chirurgen die Anfertigung einer patienten-individuellen Operationsplanung und ermöglichen die Simulation und Optimierung der Resektionsstrategie auf Grundlage der rekonstruierten und quantifizierten Patienten-anatomie. Die räumliche Lage wichtiger Risikostrukturen wie Blutgefäße oder räumlich benachbarter Organe wird dabei präzise mit Hilfe dreidimensionaler Planungsmodelle dargestellt. Für die Planung von Operation können risikobehaftete Strukturen wie Gefäße und abhängige Gefäßprovinzen mit Hilfe mathematischer Modelle

ermittelt und visualisiert werden. Die gesamte OP-Planung kann dabei am 3D-Modell vorgenommen und im 2D-Modus beliebig kontrolliert bzw. modifiziert werden. Die Planungsmodelle bieten hierbei eine verlässliche Grundlage für chirurgische Entscheidungen, eine höhere Sicherheit für den Operateur und können zu verkürzten Eingriffszeiten und weniger Komplikationen führen.

Grundlage für OP-Planungen ist oftmals die Software MeVis LiverAnalyzer, welche auf die Analyse tomographischer Bilder (CT, MRT) der Leber spezialisiert ist. Die Applikation bietet die Möglichkeit, eine OP-Planung mit konventionellen Eingabegeräten vorzunehmen. Die Ergebnisse der Planungsanalyse können anhand vorkonfigurierter Ansichten, welche aus einer Kollektion unterschiedlicher 3D-Planungsobjekte bestehen, in

der Applikation ausgewählt werden (Bild 1-1). Die vorkonfigurierten Ansichten zeigen die verschiedenen Gefäßsysteme, Ver- und Entsorgungsterritorien, Risikoanalysen, die vorgeschlagene Schnittfläche und Tumore. Ist eine Ansicht geladen, so kann das entsprechende 3D-Modell frei gedreht und vergrößert werden (Bild 1-2). Weiterhin werden Tabellen mit den entsprechenden Volumeninformationen angezeigt (Bild 1-3), und es besteht die Option, einzelne Schichten der Tomographiedaten zu betrachten (Bild 1-4), aus denen das 3D-Modell rekonstruiert wurde.

1.2 Intraoperative Nutzung von Planungsdaten

Der Erfolg einer Operation hängt maßgeblich von der Präzision ab, mit der bildgestützte Planungsdaten auf den Patien-

ten übertragen werden können. Insbesondere bei komplexen Eingriffen ist die Übertragung der Planungsdaten in den operativen Situs – mit dem Ziel einer Unterstützung des Chirurgen während des therapeutischen Eingriffs – von großer Bedeutung. Beispielsweise möchte sich der Chirurg vor riskanten Operationsphasen über umliegende Risikostrukturen informieren und diese in Relation zu der präoperativ generierten Resektionsfläche betrachten.

Weiterhin ist eine schnelle, intraoperative Anpassung der virtuellen Operationsplanung durch den Chirurgen wünschenswert, da bei bis zu 20 % der Tumoroperationen zusätzliche Tumore mittels moderner Ultraschalltechnologie diagnostiziert werden. Diese, meist kleineren Tumore, sind in den präoperativen Bild-daten nicht sichtbar.

Die bestehenden Planungssysteme sind jedoch nur sehr eingeschränkt für die intraoperative Steuerung geeignet, da ihre Benutzungsschnittstellen für die präoperative Planung entworfen wurden und die besonderen Bedingungen im Operationssaal nicht berücksichtigen.

2. Navigation in chirurgischen Planungsdaten mit der WiiMote

Konventionelle Eingabegeräte wie Maus oder Tastatur sind für die Verwendung im sterilen Bereich eines OP nicht geeignet. Ein steriles Verpacken unter Verwendung spezieller Plastikhüllen schränkt deren Bedienbarkeit zu stark ein. Dass Eingabegeräte sterilisierbar oder steril verpackbar sind, ohne dabei ihre Funktionalität einzuschränken, ist demnach eine wichtige Anforderung an ein intraoperatives Eingabegerät. Ferner ist zu beachten, dass bei funkbasierten Eingabegeräten wie beispielsweise einer kabellosen Maus, keine Störungen von im OP befindlichen medizinischen Geräten durch elektromagnetische Interferenzen verursacht werden.

2.1 Anbindung der WiiMote an eine Planungsapplikation für Leberoperationen

In den vergangenen Jahren haben Forschergruppen kommerziell erhältliche Eingabegeräte im sterilen Bereich des OP verwendet und evaluiert. Dabei handelte es

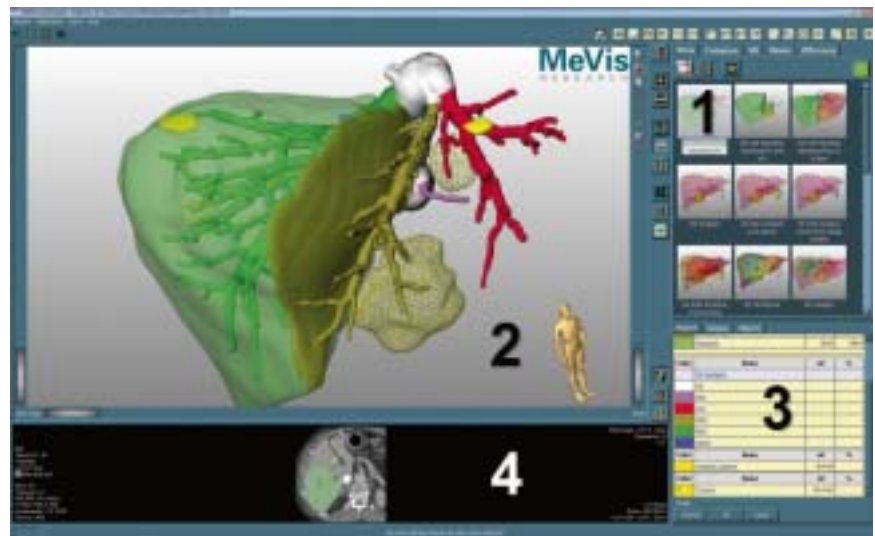


Bild 1: Grafische Benutzungsschnittstelle der Software MeVis LiverAnalyzer zur Analyse von Planungsdaten. Dargestellt sind die Leber eines Patienten, die Gefäße innerhalb der Leber und mehrere Metastasen, die im Planungsmodell virtuell entfernt werden

sich in den meisten Fällen um steril verpackte Touchscreens (Chojceki et al. 2009) und 3D-Mäuse. Einige Gruppen verwenden optische Trackingsysteme, welche in der Chirurgie zur Navigation von Instrumenten genutzt werden, um dem Chirurgen ein Interaktionsgerät bereitzustellen (Fischer et al. 2005, Reitinger et al. 2006, Hansen et al. 2008). Navigierte Eingriffe sind jedoch nur bei ausgewählten Patienten von medizinischer Notwendigkeit.

Im Folgenden diskutieren wir die intraoperative Verwendung der Fernbedienung Wii Remote, verkürzt als WiiMote bezeichnet. Bei der WiiMote handelt es sich um das primäre Eingabegerät für Nintendo's Spielekonsole Wii. Durch die integrierte Bewegungserkennung eignet sich die WiiMote als kabelloses Zeigegerät oder zur Erfassung von Handgesten. Wie in Bild 2-1 dargestellt, ist die WiiMote mit einer Vielzahl an Steuerungselementen versehen. Sieben Eingabegeräte

beknöpfe, ein Digitalsteuerkreuz, drei Beschleunigungssensoren und ein infrarot-basiertes Trackingsystem (IR-Kamera und Sensorbar) ermöglichen die Erfassung von Benutzereingaben in Echtzeit.

Die Kommunikation mit der Wii-Spielekonsole erfolgt kabellos über den offenen Bluetooth-Standard. Dass durch den Einsatz von Bluetooth im Operationssaal (Bild 2-2) keine Störungen von medizinischen Geräten in Form elektromagnetischer Interferenzen verursacht werden, belegen aktuelle Studien (Høgetveit et al., 2005).

2.2 Verwendung der WiiMote im Operationssaal

Wir haben die WiiMote an das Planungssystem MeVis LiverAnalyzer angebunden und den dadurch entstehenden Nutzen für den Chirurgen unter realistischen Bedingungen im Operationssaal bewertet. Das Einpacken der WiiMote in eine sterile Kunststoffhülle (Flexanorm®, Fern-

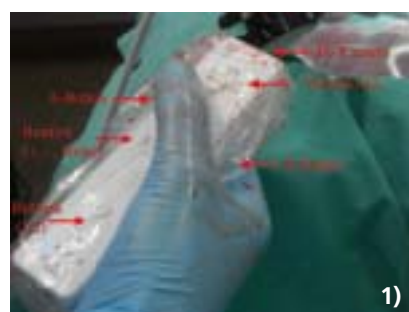


Bild 2: Nintendo's WiiMote unter sterilen Rahmenbedingungen im Experimental-OP des Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Lübeck

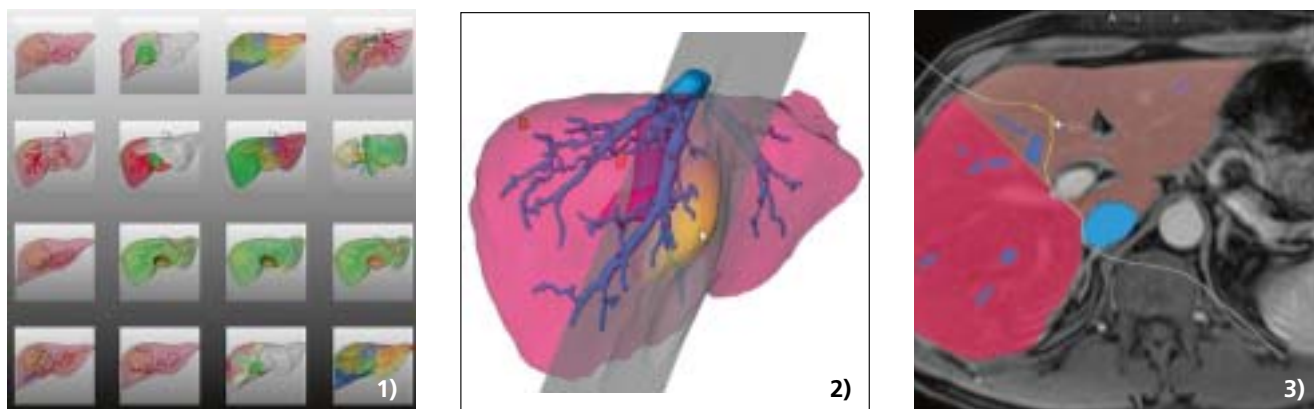


Bild 3: Umschaltbare Vollbildansichten: Übersicht der vorkonfigurierten Ansichten, 3D-Ansicht und 2D-Ansicht

bedienungs-Bezug) schränkt die Bedienbarkeit kaum ein. Lediglich der an der Unterseite befindliche B-Button ist unter Umständen etwas schwerer zu aktivieren, aus diesem Grund sollten keine wichtigen Funktionen damit versehen werden. Die Funktion der Infrarotkamera wird durch die Kunststoffhülle nicht beeinträchtigt, jedoch traten im Falle eines Blutfilmes vor der Kameralinse geringe Störungen bei der Übermittlung der optischen Trackingdaten auf. Im Rahmen unserer Studie stellten wir den Chirurgen zum einen Basisfunktionen zur Navigation in Planungsdaten mit der WiiMote zur Verfügung, zum anderen Interaktionsmöglichkeiten zur intraoperativen Anpassung von Planungsdaten.

Basisfunktionen zur Navigation in Planungsdaten

Wie in Abschnitt 1.1 beschrieben, stehen dem Chirurgen in der präoperativen Phase wichtige Interaktionsmöglichkeiten zur Exploration der patienten-individuellen Anatomie zur Verfügung. Basisfunktionen sind, wie in Bild 1 dargestellt, das Auswählen vorkonfigurierter Ansichten, das Rotieren und Vergrößern der ausgewählten Ansicht in 3D, das Navigieren in 2D-Schichtdaten und die Auswahl quantitativer Zusatzinformationen wie Volumenangaben. Im Hinblick auf die einführend beschriebenen intraoperativen Anforderungen an eine Benutzungsschnittstelle wird im Folgenden erläutert, wie diese Basisfunktionalitäten mit Hilfe der WiiMote ausgeführt werden können.

Um eine maximale Sichtbarkeit zu gewährleisten, werden dem Chirurgen drei Vollbildansichten angeboten: Eine Übersicht der vorkonfigurierten Ansichten

(Bild 3-1), eine 3D-Ansicht (Bild 3-2) und eine 2D-Ansicht (Bild 3-3). Die Ansichten können durch Drücken des 1-Buttons gewechselt werden. Quantitative Informationen zu den Planungsobjekten werden in der 3D-Ansicht durch Selektieren eines Objektes mit dem Mauszeiger eingeblendet. Zum Auswählen einer vorkonfigurierten Ansicht in der Übersicht bewegt der Benutzer den mit der WiiMote geführten Mauszeiger über das gewünschte Screenshot-Icon der vorkonfigurierten Ansicht und bestätigt die Auswahl mit dem A-Button, woraufhin automatisch in den 3D-Ansicht-Modus umgeschaltet wird. Für das Vergrößern und Verkleinern der 3D-Ansicht wurden die Plus- und Minustasten, für das Wiederherstellen der Standardkameraposition die Home-Taste belegt. Ein Rotieren der Ansicht erfolgt in diskreten 22,5°-Schritten um die x- und y-Achse des Kamerakoordinatensystems und kann mit dem Steuerkreuz vorgenommen werden. Auf die Möglichkeit, das Modell mit Hilfe des optischen Trackingsystems zu rotieren, wurde bewusst verzichtet. Zum einen stellten wir in einzelnen Benutzungstest fest, dass Anwender zu viel Zeit benötigen, um mit der sensiblen Steuerung eine gewünschte Kameraposition einzustellen. Zum anderen hat dies den Vorteil, dass die Rotation des Modells somit auch ohne Sichtverbindung zwischen WiiMote und Sensorbar (IR-Tracking) möglich ist. Für das „Blättern“ durch die 2D-Schichten bewegt der Chirurg die WiiMote in die intendierte Richtung. Aus den Messdaten der Beschleunigungssensoren und des IR-Trackings können Bewegungsrichtung, -strecke und -geschwindigkeit ermittelt werden, und die 2D-Schicht wird ent-

sprechend angepasst. Zum „präzisen Blättern“ wird alternativ das Steuerkreuz zur Interaktion angeboten.

Adaption von Planungsdaten

Wie einführend beschrieben, werden während eines Eingriffes vermehrt zusätzliche Tumore mittels moderner Ultraschalltechnologie diagnostiziert. Liegen diese Tumore in der Nähe von Risikostrukturen, ist eine Neudefinition der geplanten, virtuellen Resektionsfläche wünschenswert, um Informationen über das verbleibende Restvolumen des Organs zu erhalten und mögliche Risikoareale zu identifizieren. Bisher wurden intraoperative Planungsanpassungen ohne Unterstützung onkologischer Planungssoftware vorgenommen, weil keine geeignete Benutzungsschnittstelle bereit stand.

Basierend auf der Arbeit von Konrad-Verse et al. (2004) im Bereich virtueller Resektionsflächen und den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Basisinteraktionen, stellen wir Möglichkeiten zur Neudefinition von Resektionsflächen mit Hilfe der WiiMote vor. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Basisinteraktionen ist die Verwendung der IR-Tracking-Funktionalität für die Art der Interaktion zwingend notwendig. In der 3D-Ansicht hat der Chirurg hierbei die Möglichkeit, mit gedrücktem A-Button eine Resektionslinie auf der virtuellen Organoberfläche einzuzichnen. Nach Bestätigung (mit einem frei konfigurierbarem Button) wird anhand der Resektionslinie ein 3D-Gitter generiert, welches durch Selektieren und Verschieben der Gitterpunkte verformt werden kann (Bild 3-2). In der 2D-Ansicht können weitere Feineinstellungen der Resektionsfläche vorgenommen werden

(Bild 3-3). Durch anschließendes Wechseln in die 3D-Ansicht wird das aktualisierte Planungsmodell generiert und die aktualisierten Volumeninformationen eingeblendet.

3. Berührungsloser Zugriff auf 3D-Planungsdaten im OP

Die Nutzung der WiiMote als Eingabegerät versetzt den Chirurgen in die Lage, auch komplexe Interaktionsaufgaben direkt vom Situs aus steuern zu können. Dennoch ist die WiiMote ein zusätzliches Gerät und erhöht die Anzahl der „Operationsinstrumente“. In den folgenden Abschnitten wird eine im Funktionsumfang bewusst reduzierte Benutzungsschnittstelle entworfen, die dem Chirurgen die direkte Steuerung über einfachste Gesten mit hoher Fehlertoleranz erlaubt.

3.1 Bedarfsanalyse an 3D-Planungsdaten

In Rücksprache mit zwei Chirurgen und durch teilnehmende Beobachtung bei Leberoperationen wurde der Bedarf an zusätzlichen Informationen unter Berücksichtigung einer minimierten Interaktion ermittelt.

Analyse verfügbarer Planungsergebnisse

Für die Analyse der notwendigen Planungsdaten wurden die vom virtuellen Planungsmodell bereitgestellten Informationen (siehe Abschnitt 1.1) bewertet. Im Ergebnis sind folgende Angaben und Darstellungsformen verzichtbar:

- *Darstellung und Interaktion in den 2D-Bilddaten*, da die Schichtbilder redundante Informationen zu den 3D-Modellen enthalten. Die Schichtbilder werden von den Chirurgen lediglich zur Vorbereitung auf die OP und zur Kontrolle des berechneten 3D-Modells herangezogen und sind für die Operationsdurchführung in den meisten Fällen nicht erforderlich.
- *Darstellung der tabellarischen Volumeninformationen*, da es sich hier nur um nichtveränderbare Angaben handelt. Es ist vorstellbar, diese Informationen in die 3D-Ansicht zu integrieren. Die Evaluation des Prototyps zeigte

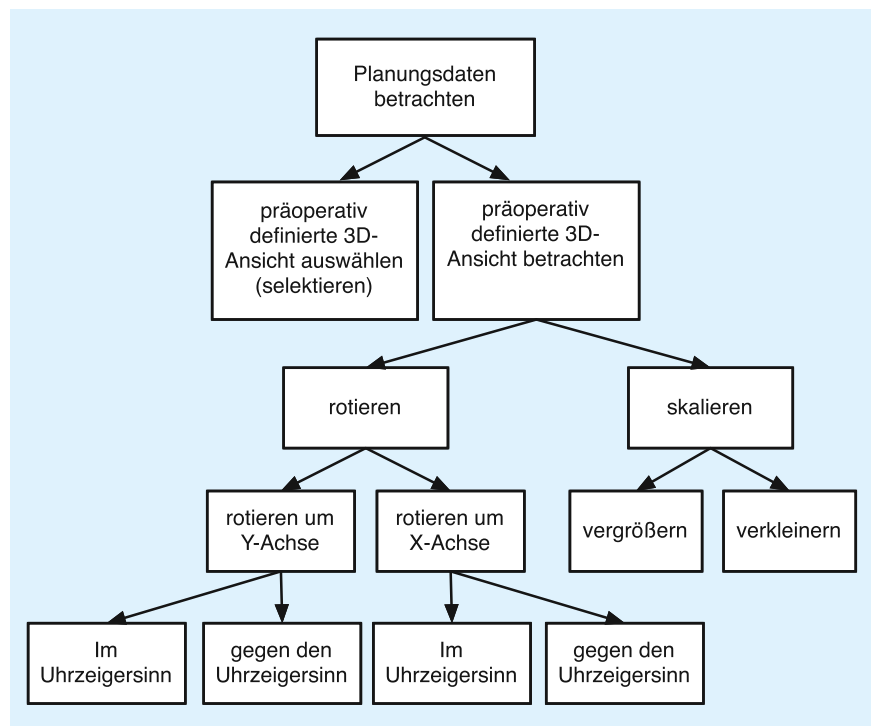


Bild 4: Hierarchische Aufgabenanalyse der Interaktionsaufgabe „Betrachten von 3D-Planungsdaten“

jedoch, dass diese Informationen während der Operationsdurchführung nicht benötigt werden.

- *Möglichkeit, eine virtuelle Resektion nachträglich einzuzeichnen*, um die Komplexität der abzubildenden Interaktionsaufgaben zu verringern.

Aus den aufgezeigten Gründen wird die Informationspräsentation auf eine interaktive 3D-Visualisierung des Planungsmodells beschränkt, wobei jedoch alle für die OP relevanten Strukturen wie Gefäße, Organterritorien sowie Läsionen darstellbar sein müssen.

Analyse der Interaktionsbedürfnisse

Um die zentrale Interaktion für die Informationsbeschaffung „Betrachten von 3D-Planungsdaten“ aufteilen und mit Interaktionstechniken verknüpfen zu können, wurde eine hierarchische Aufgabenanalyse durchgeführt. Hierbei wurden zunächst die mit der Tätigkeit verbundenen Hauptaufgaben identifiziert und diese dann schrittweise zerlegt. Dies wurde so lange durchgeführt, bis eine unseren Zwecken genügende Granularität erreicht war (Bild 4).

Die Hauptinteraktionsaufgaben bestehen aus der Auswahl einer vorkonfigurierten Ansicht der Planungsdaten, welche neben der Sicht auf das 3D-Mo-

dell auch die sichtbaren Objekte und Objekteigenschaften definiert, sowie der Rotation und Skalierung des 3D-Modells. Ein auf diese interaktive Funktionalität reduzierter Planungsdaten-Viewer erlaubt eine einfache Gestaltung der Steuerung und bietet dennoch eine Vielzahl operationsunterstützender Informationen.

3.2 Konzeption der Interaktion

Um die Frage beantworten zu können, welche Interaktionstechniken für die Realisierung der Interaktionsaufgaben im OP angemessen sind, wurde zunächst die Kommunikation im OP analysiert und ein Bedienkonzept auf Grundlage eines Interaktionsszenarios entwickelt.

Analyse der Kommunikation im OP

Die Kommunikationsstrukturen im OP sind im Vergleich mit anderen Industriezweigen, die ein ähnlich hohes Risikopotenzial aufweisen, relativ unstandardisiert (Turrentine et al. 2003). Zwar existieren eine Reihe von Vorschriften, die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit medizinischer Geräte und Software regeln (IEC 60601-1-6, IEC 62366), dennoch berichten 70 % der Chirurgen von Schwierigkeiten mit der Bedienung. Etwa 60 % der Vorkommnisse, die mit medizintechnischen Geräten in Zusammenhang stehen, beruhen auf Missverständnissen



Bild 5: Gesten verdeutlichen und präzisieren die an einen Chirurgieassistenten verbal erteilten Kommandos zur Steuerung der Sicht auf das 3D-Planungsmodell (Ausschnitt aus einem OP-Video)

zwischen Mensch und Maschine (Matern et al. 2006). Eine möglichst intuitive, fehlertolerante und robuste Steuerung hilft, Fehlbedienungen zu minimieren und erhöht die Akzeptanz beim Chirurgen.

Videoanalysen von aufgezeichneten Leberoperationen sowie eigene, teilnehmende Beobachtungen an OPs zeigten, dass eine „berührungslose“ Kommunikation des Teams über Sprache und Gesten erfolgt. Gesten wurden insbesondere eingesetzt, um dem die Software bedienenden Chirurgieassistenten die gewünschte räumliche Orientierung einer Ansicht mitzuteilen (Bild 5).

Berührungslose Interaktion im OP

Neben der Vermeidung eines zusätzlichen „Operationsinstrumentes“ werden durch die Beschränkung auf berührungslose Benutzungsschnittstellen viele Probleme der Sterilität und Verschmutzung, insbesondere durch Blut, von vornherein ausgeschlossen. Nachfolgend werden mögliche berührungslose Steuerungsmöglichkeiten in Bezug auf ihre Tauglichkeit für den OP betrachtet.

Sprachsteuerung

Sprachsteuerung kann sich, wenn die Hände schon beschäftigt sind, als ideales Eingabemedium erweisen (vgl. Dix et al. 2004, S. 558). Dennoch sind Techniken der Sprach- und Gestenerkennung im intraoperativen Einsatz aus Sicherheitsgründen nicht sehr weit verbreitet, da aufgrund des im OP vorhandenen Geräuschpegels eine Erkennung oftmals zu ungenau ist (Yaniv und Cleary 2006). Weiterhin beobachteten Jyrkinen et al. (2000), dass es auf Grund der hohen Anspannung für einen Arzt schwierig ist, während der OP eindeutige Anweisungen zu geben, speziell wenn es sich um

Eigenschaften wie Größen-, Mengen- und Richtungsangaben handelt.

Fußsteuerung

Die Steuerung über einen Fußschalter ließe sich im Operationssaal einfach verwenden. Dennoch ist es schwierig, die komplexen Aktionen, wie sie in der Interaktionsanalyse beschrieben sind, mit Hilfe eines binären Schalters abzubilden. Schnell würde die Anzahl der verwendeten Schalter ein akzeptables Maß übersteigen oder die Kombinationen der zu betätigenden Schalter zu komplex werden. Dennoch ist die Verwendung von Fußschaltern in anderen Situationen, wenn z. B. die halbautomatische Kalibrierung eines Navigationssystems (Yaniv und Cleary 2006) vorgenommen wird, sinnvoll.

Gestensteuerung

Bei der Gesteninteraktion steuert der Benutzer ein System über Körpergesten. In vielen Systemen werden Hand- oder Armgesten ausgewertet (Penne et al. 2009). Es gibt aber auch Systeme, die Gesichts-, Kopf- oder Ganzkörpergesten auswerten. Wie ein Review von Yaniv und Cleary (2006) zeigte, gibt es im medizinischen Bereich nur wenige gestenbasierte Systeme. Beispielsweise nutzt Gratzel (2004) Handgesten, um die Funktionen einer Computermaus für einen Arzt während der OP zugänglich zu machen. Als Argumente, die für den Einsatz von sichtbasierter Gestenerkennung im OP sprechen, werden die konstanten Lichtverhältnisse in Bezug auf Farbe und Helligkeit genannt, da OPs im allgemeinen von Tageslichteinflüssen abgeschirmt sind. Zudem erfordern sicht- bzw. gestenbasierte Systeme keinen physischen Kontakt, was es ermöglicht, diese auch direkt über dem sterilen Operationsfeld

einzusetzen. Die für die Gestenaufnahme verwendeten Kameras sind mittlerweile klein und leicht, eine Unterbringung im OP wird somit vereinfacht.

Teilnehmende Beobachtungen an OPs sowie Gespräche mit Chirurgen zeigten, dass eine gestenbasierte Handinteraktion in diesem Nutzungskontext grundsätzlich möglich ist. Einhändige Gesten bieten sich nach Analyse von OP-Videos hier besonders an, da der Arzt oft noch Operationsbesteck in der dominanten, operierenden Hand hält.

3.3 Konzeption der Benutzungsschnittstelle

Für die Übertragung dieser Planungsdaten in den OP-Kontext zur Operationsunterstützung sind die geltenden Rahmenbedingungen ausschlaggebend für das Systemdesign. Wichtigster Faktor für das Design war die einfache Bedienbarkeit aller erforderlichen Interaktionsaufgaben.

Klickfreie Steuerung

Klassische GUI-Benutzungsschnittstellen lösen Aktionen zumeist über Area Pointing, bei dem der Zeigepunkt in einen bestimmten Bereich wie z.B. einen Button bewegt und eine zusätzliche Taste gedrückt werden muss, aus. Bei der Verwendung einer gestenbasierten Steuerung muss hierfür ein Ersatz gefunden werden. Zwar kann auch eine spezielle Geste zum Auslösen vereinbart werden, es existieren jedoch auch alternative Ansätze für eine klickfreie Steuerung.

Ein alternativer Ansatz ist das Goal Crossing (Accot und Zhai 2002). Hierbei werden Aktionen durch das Überqueren von Linien ausgelöst. Wobbrock und Gajos (2007) zeigten, dass für Menschen mit motorischen Störungen diese Eingabemöglichkeit eine angenehmere und effektivere Alternative darstellt. Falls also durch das verwendete Eingabegerät Probleme mit der Zielgenauigkeit entstehen, könnte Goal Crossing eine Alternative darstellen. Eine weitere Methode des Aktivierens von Elementen ohne zusätzliche Maustaste stellt das Wait-to-Click Paradigma (Gratzel 2004) dar. Hier verweilt ein Nutzer mit dem Zeigegerät auf einem Punkt, um ein Ereignis auszulösen. Für die Steuerung des Prototypen wurde aufgrund seiner Einfachheit das Wait-to-Click Paradigma gewählt. Dabei wird die Zeit, die für ein Auslösen der Aktion notwendig ist, visuell

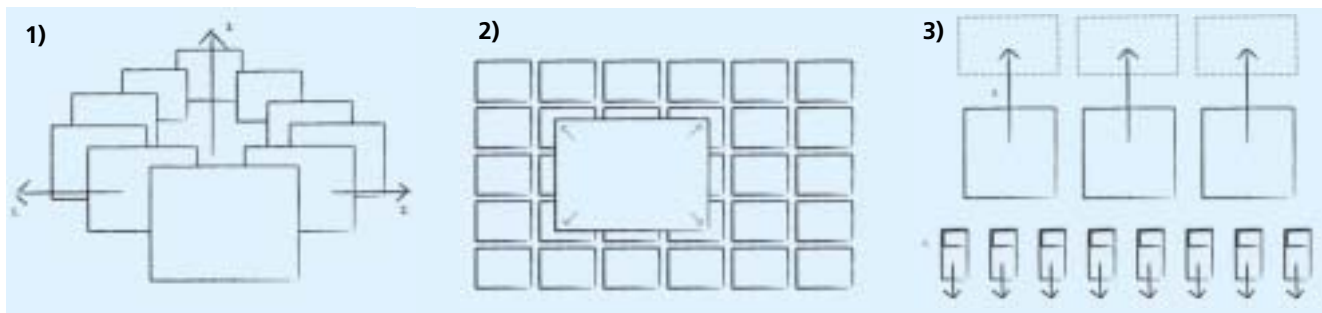


Bild 6: Entwürfe für die Benutzungsschnittstelle zur Auswahl einer vorkonfigurierten Ansicht



Bild 7: Realisierung der grafischen Benutzungsschnittstelle zur Auswahl einer vorkonfigurierten Ansicht

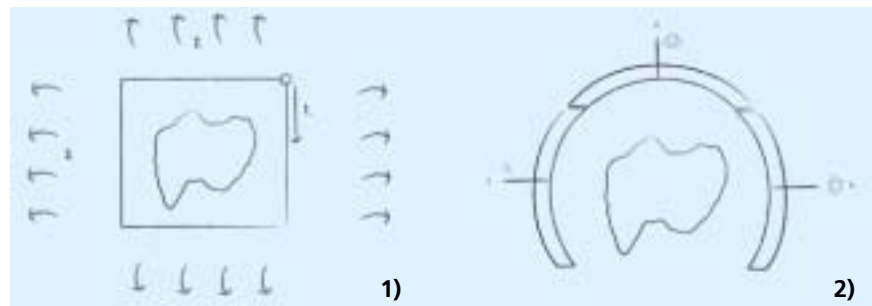


Bild 8: Initiale Designstudien für die Benutzungsschnittstelle zur Sichtsteuerung auf das vorkonfigurierte 3D-Modell

durch einen anschwellenden, gefüllten Kreis inmitten eines konturierten, den maximalen Durchmesser repräsentierenden Kreises dargestellt.

Auswahl einer vorkonfigurierten Ansicht

Für die Auswahl einer vorkonfigurierten Ansicht wurde ein Ringmenü favorisiert. Alternative Entwürfe, die ebenfalls untersucht wurden, waren eine Matrixdarstellung, sowie eine Auswahl anhand von Kriterien, die über visuelle Kippschalter aktivierbar waren (Bild 6).

Die in der Skizze des Ringmenüs enthaltenen Nummerierungen 1. und 2. stehen dabei für eine Rotation nach links oder rechts. Wenn der Benutzer auf den rechten Bildschirmrand zeigt, dann rotieren die Ansichten in die entsprechende Richtung. Das gleiche gilt für den linken Bildschirmrand. Wenn die richtige Ansicht gefunden wurde, findet aus der Mitte des Bildschirms heraus durch eine Handbewegung nach oben (3.) der Auswahlprozess statt.

Wie Hand (1997) beschreibt, liegt der Vorteil dieser Art von Menü darin, den Auswahlprozess auf einen Freiheitsgrad, also eine eindimensionale Operation, abzubilden. Ein weiterer Vorteil ist, dass beim Wechseln zwischen verschiede-

nen Ansichten der Kontext bestehen bleibt. So ist es leichter für den Nutzer, die aktuelle Position im gesamten Datenraum wahrzunehmen. Dies wäre nicht der Fall, wenn ein schlichtes Durchschalten der Bilder stattfinden würde. Weiterhin wird durch die räumliche Anordnung das ausgewählte Objekt im Vordergrund größer dargestellt als die anderen im Hintergrund. Ein Nachteil ist die schlechte Skalierbarkeit der Anzahl der darzustellenden Organansichten. Dieses Kriterium trifft für diesen Anwendungsfall jedoch nicht zu, da eine Darstellung mit bis zu 20 verschiedenen Ansichten noch praktikabel ist und zu meist weit weniger als 20 Ansichten erstellt werden. Bild 7 zeigt die Realisierung im Prototypen.

Vorkonfigurierte Ansicht betrachten

Die Interaktionsaufgabe „Betrachten des 3D-Modells“ besteht laut Aufgabenanalyse aus den Teilaufgaben *Rotieren* und *Skalieren*.

Planungsmodell rotieren

Die Funktion Rotieren wird, wie schon das Ringmenü für die Auswahl, über aktive Bereiche an den Seiten des Monitors abgebildet. Somit kann um die horizontale und vertikale Raumachse rotiert wer-

den, wobei auf eine Rotation um den Sichtstrichtungsvektor des Betrachters verzichtet wurde. Sie ist weder notwendig noch sinnvoll. Zunächst sah der Entwurf in Bild 8-1 vor, die Funktion Skalieren, also das Vergrößern oder Verkleinern der Ansicht, über eine aktive Fläche in der Mitte des Bildschirms zu realisieren, die dort über eine senkrechte Bewegung der Hand gesteuert werden sollte (1.). Da dieser Entwurf jedoch eher Fehlbedienungen provozierte als fehlertolerant zu sein, wurde die Funktion Skalieren stattdessen in einen eigenen Modus überführt.

Eine alternative Variante für einen gemeinsamen Modus zeigt Bild 8-2. Die Funktionen sind hier im Halbkreis um das 3D Modell des Organs angeordnet. Ein Zeigen auf eines der Bedienelemente für

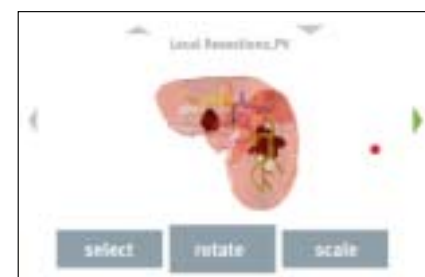


Bild 9: Ansicht der Benutzungsschnittstelle zur Rotation des 3D-Planungsmodells

einen Zeitraum wählt die damit assoziierte Funktion aus. Ein Bewegen der Hand auf einer waagerechten bzw. einer senkrechten Linie verändert den Zustand der entsprechenden Eigenschaft. Eine größere Bewegung entgegen dieser Richtung hebt die Auswahl auf.

Bild 9 zeigt die prototypische Realisierung der Rotation, bei der ein direktes Umschalten in den Auswahlmodus für eine neue Ansicht oder ein Umschalten zur Skalierungsfunktion durch Wait-to-Click möglich ist.

Ausschnitt vergrößern/verkleinern

Die Realisierung der Skalierungsfunktion entspricht in der Bedienung der Rotationsfunktion. Ein schneller Wechsel in den Auswahlmodus oder zur Rotationsfunktion ist auch hier möglich. Die Funktionen Vergrößern und Verkleinern werden über eine waagerechte Interaktion ausgeführt. Obwohl jeweils die gesamte linke und rechte Seite des Monitors für die Steuerung aktiv ist, sind die Zeichen + und – auf unterschiedlicher Höhe angebracht, um eine leicht diagonale, hoch/runter-



Bild 10: Sicht auf das Planungsmodell mit Skalierungsfunktion

Geste zur Bedienung zu fördern (Bild 10). Im Gegensatz zu einer rein waagerechten Steuerung wird so eine intuitivere Abbildung erreicht.

Wechsel zwischen den Interaktionsaufgaben

Während die Auswahl der vorkonfigurierten Ansicht und die Interaktion mit dem 3D-Modell über eine Richtungsbewegung gesteuert wird, geschieht der Wechsel zwischen Auswahl, Rotation und Skalierung über das zuvor beschriebene Wait-to-Click Paradigma. Die Verwendung des Wait-to-Click für die Feinjustierung der 3D-Ansicht über Schaltflächen würde einen erheblichen zusätzlichen Zeitbedarf bedeuten. Daher wurde diese Interakti-

onsform lediglich für den Wechsel der Interaktionsaufgaben verwendet. Die aktiven Flächen (Schalter) für den Wechsel zeigen die jeweils aktuelle Interaktionsaufgabe durch eine vergrößerte Interaktionsfläche an. Um den Wechsel durch Zeigen zu vereinfachen, werden die Flächen vergrößert, sobald sich der Zeigepunkt ihnen nähert (Target Expansion (McGuffin und Balakrishnan 2005)).

Evaluierung

Im Rahmen der Evaluierung während der Entwurfsphase wurden durch die Cooperative Think Aloud Methode (Dix et al. 2004) Claims generiert, die dann durch eine Claimsanalyse zurück in den Entwicklungsprozess fließen konnten. Folgende Kriterien wurden dabei beurteilt:

- Das Interaktionsdesign: die Abfolge von Arbeitsschritten
- Das Interfacedesign: die grafische Benutzungsschnittstelle

Die Zeigeinteraktion wurde von dieser Evaluierung ausgenommen, der Test einer vergleichbaren Interaktion ist in der Literatur zu finden (Argyros und Lourakis 2006).

Ablauf

Nach einem einführenden Gespräch wurde der jeweils testende Chirurg gebeten, die Interaktionsschritte eines vorbereiteten Nutzungsszenarios durchzuführen. Er wurde dabei angehalten, seine Gedankengänge zu äußern. Im Rahmen einer Cooperative Think Aloud Evaluierung ist es dem Nutzer im Gegensatz zur einfachen Think Aloud Variante erlaubt, Rückfragen an den Testdurchführenden zu stellen. Gemeinsam wurden Probleme identifiziert und protokolliert.

Ergebnisse und Auswertung

Die Evaluierung wurde mit zwei Chirurgen jeweils einzeln durchgeführt. Beide haben umfangreiche Erfahrungen mit Leberresektionen und computergestützter Schnittplanung.

Das gewählte Nutzungsszenario wurde als realistisch bewertet. Auch die gewählten Grundfunktionen und Vereinfachungen wurden als tauglich für das gewählte Szenario bestätigt. Weiterhin wurde bestätigt, dass die 2D-Schichtbilder redundante Informationen darstellen, die nur während der OP-Vorbereitung genutzt werden, um die durchge-

führte Segmentierung der einzelnen Strukturen zu überprüfen. Intraoperativ sei es üblich, sich auf die 3D-Modelle zu verlassen. Auch die Tabellen mit Voluminformationen sind wie angenommen intraoperativ nicht relevant und werden lediglich in der Planungsphase benötigt.

Im Laufe der Evaluierung wurden drei Funktionswünsche geäußert:

1. Eine Darstellung des intraoperativ verwendeten Ultraschallbildes auf dem gleichen Monitor wäre wünschenswert, damit der Arzt nicht ständig zwischen den an verschiedenen Orten angebrachten Monitoren hin- und herschauen muss.
2. Außerdem wurde eine Möglichkeit zum Ein- und Ausblenden verschiedener Gefäßsysteme innerhalb einer Ansicht gewünscht.
3. Der Rotations- und Skalierungszustand sollte beim Umschalten zu anderen Ansichten erhalten bleiben. Dieses war im getesteten Prototypen nicht von vornherein der Fall.

Der erste geäußerte Funktionswunsch bezieht sich auf die räumliche Anordnung der Geräte und resultiert aus negativen Erfahrungen beider Probanden. Bei einer Implementierung sollte diese Problematik beachtet werden. Dem Wunsch nach der Möglichkeit des Ein- und Ausblendens verschiedener Gefäßsysteme (2.) wurde durch ein einfacheres und schnelleres Umschalten zwischen den verschiedenen Ansichten und der gleichzeitigen Bewahrung von Rotations- und Skalierungszustand (3.) entsprochen. Die Planungsansichten enthalten in der gängigen Praxis Einzelansichten jedes Gefäßsystems.

An der grafischen Benutzungsschnittstelle für die Funktion „Auswählen einer vorkonfigurierten Ansicht“ wurden folgende Punkte kritisiert:

1. Es ist nicht deutlich, welche der Ansichten ausgewählt ist.
2. Bei stark vergrößerten Ansichten ist auch einem Arzt nicht immer sofort klar, welches Gefäßsystem er vor sich hat. Es wäre sinnvoll Beschreibungen einzublenden.
3. Die 18 Ansichten des Beispielfalles stellen eine ungewöhnlich hohe Anzahl dar. Gewöhnlich sind es ca. 12.
4. Der Pfeil nach oben fordert nicht deutlich genug zur entsprechenden Auswahl auf.

Um zu verdeutlichen, welche Ansicht ausgewählt ist (1.), wurde nachträglich eine Umrandung des entsprechenden Bildes vorgenommen. Um Verwechslungen zu vermeiden (2.), erscheint es außerdem nötig, die Namen der Ansichten einzublenden. Dies wurde in den vorgestellten Entwürfen später ebenfalls durch Einblendung über der gewählten Ansicht realisiert. Um die Geste des Auswählens besser zu erklären (4.) wurde eine Animation mit nach oben zeigenden Pfeilen eingefügt, welche die Bewegung der Hand nach oben motiviert. Zudem ist nun ein schneller, direkter Wechsel zwischen den Interaktionsaufgaben möglich.

Zur grafischen Benutzungsschnittstelle für die Funktionen Rotieren und Skalieren gab es folgende Anmerkung:

- Rotation nach oben und unten ist nicht möglich.

Die Funktion zum Rotieren nach oben und unten wurde zunächst weggelassen, um Eingabefehler zu vermeiden, die auftreten können, wenn der Chirurg die Hand nach unten aus dem Sichtfeld der Kamera bewegt. Dennoch wurde diese Funktion später hinzugefügt.

Die Anmerkungen der Probanden erwiesen sich als äußerst hilfreich während der Entwurfsphase der Benutzungsschnittstelle. Insgesamt äußerten sich die Probanden sehr positiv über das System und die gebotenen Möglichkeiten.

Danksagung

Die Autoren danken Stefan Schlichting, Armin Besirevic, Dr. Markus Kleemann (UKSH, Lübeck), Volker Martens (Universität Lübeck), Prof. Karl Oldhafer, Dr. Gregor Stavrou (AKH Celle), Prof.

Stefan Weber (ARTORG, Uni Bern) sowie den Mitarbeitern von MeVis, Bremen für die fruchtbaren Diskussionen, die Teilnahme an Benutzungsstudien und ersten klinischen Tests.

Literatur

- Accot, J.; Zhai, S.: More than Dotting the i's – Foundations for Crossing-based Interfaces. Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 73–80, 2002.
- Argyros, A.A.; Lourakis, M.I.A.: Vision-Based Interpretation of Hand Gestures for Remote Control of a Computer Mouse. Computer Vision in Human-Computer Interaction, 40–51, 2006.
- Chojacki, P.; Leiner, U.: Berührungslose Gestik-Interaktion im Operationssaal. *i-com, Zeitschrift für interaktive und kooperative Medien* **8,1** (2009) 13–18.
- Dix, A.; Finlay, J.E.; Abowd, G.D.; Beale, R.: Human-Computer Interaction, 2004.
- Gratzel, C.: A Non-Contact Mouse for Surgeon-Computer Interaction. *Technology and Health Care* **12(3)** (2004) 245–257.
- Fischer, J.; Bartz, D.; Straßer, W.: Intuitive and Lightweight User Interaction for Augmented Reality. Proc. of Vision, Modeling, and Visualization. Erlangen, 375–382, 2005.
- Hansen, C.; Köhn, A.; Schlichting, S.; Weiler, F.; Zidowitz, S.; Kleemann, M.; Peitgen, H.-O.: Intraoperative Modification of Resection Plans for Liver Surgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology* **3(3–4)** (2008) 291–297.
- Høgetveit, J.O.; Balansingham, I.; Øyri, K.: Introducing Multiple Wireless Connections to the Operating Room, Interference or not?. Proc. of European Medical and Biological Engineering Conference, 2005.
- Jyrkinen, L.; Ojala, R.; Haataja, L.; Blanco, R.; Klemola, R.; Silven, O.; Tervonen, O.: Managing the Complexity of the User Interface of a MRI Guided Surgery System. Proc. of ERCIM "User Interfaces for All" Workshop, 2000.
- Konrad-Verse O., Preim B., Littmann A.: Virtual Resection with a Deformable Cutting Plane. Proc. of Simulation und Visualisierung, 203–214, 2004.
- Lamadé, W.; Ulmer, C.; Ritter, F.; Peitgen, H.-O.; Otto, G.; Thon, K.-P.: Virtuelle Operationsplanung: Aktueller Stand und Perspektiven. *Chirurgische Gastroenterologie* **21(2)** (2005) 7–13.
- Matern U.: Arbeitsbedingungen und Sicherheit am Arbeitsplatz OP. *Deutsches Ärzteblatt* **103(47)** (2006) 3187–3192.
- Penne, J.; Soutschek, S.; Stürmer, M.; Schaller, C.; Placht, S.; Kornhuber, J.; Hornegger, J.: Touchscreen ohne Touch – Berührungslose 3D Gesten-Interaktion für den Operationssaal. *i-com, Zeitschrift für interaktive und kooperative Medien* **8,1** (2009) 19–23.
- Reitinger, B.; Bornik, A.; Beichel, R.; Schmalstieg, D.: Liver Surgery Planning Using Virtual Reality. *Computer Graphics and Applications* **26(6)** (2006) 36–47.
- Turrentine, B.; Calland, J. F.; Adams, R.; Shin, T.; Guerlain, S.: Studying Communication Patterns During Surgery. Proc. of Human Factors and Ergonomics Society, 1488–1492, 2003.
- Wobbrock, J.O., Gajos, K.Z.: A Comparison of Area Pointing and Goal Crossing for People with and without Motor Impairments. Proc. of ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility, 3–10, 2007.
- Yaniv, Z.; Cleary, K.: Image-Guided Procedures: A Review. *Computer Aided Interventions and Medical Robotics*. 2006.

Prof. Heinz-Otto Peitgen, Dr. Felix Ritter, Christian Hansen und Alexander Köhn entwickeln am Fraunhofer MEVIS – Institute for Medical Image Computing in enger Zusammenarbeit mit einem weltweiten Netzwerk von klinischen Partnern bildbasierte Diagnose- und Therapielösungen für klinisch bedeutsame Fragestellungen.

Kjen Wilkens studiert am Royal College of Art, London Design Interactions und interessiert sich insbesondere für die Langzeitauswirkungen von Emerging Technologies.