



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Informatik
Institut für Simulation und Graphik

Entwurf eines interaktiven onkologischen Reports

Diplomarbeit

Steven Birr



Entwurf eines interaktiven onkologischen Reports

Diplomarbeit

an der

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Informatik

Institut für Simulation und Graphik

von: Steven Birr

geb. am: 07. Dezember 1984

in: Halberstadt

Matrikel-Nr.: 172285

Zeitraum: 01.09.2010 – 01.02.2011

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim

Dr. Volker Dicken (Fraunhofer MEVIS)

Erklärung der Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, Steven Birr, die vorliegende Arbeit allein und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen angefertigt zu haben.

Steven Birr
Bremen, 01.02.2011

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinen Betreuern Dr. Volker Dicken und Prof. Dr. Bernhard Preim bedanken. Sie hatten immer ein offenes Ohr für mich und haben mich stets ideenreich beraten und unterstützt. Weiterhin danke ich Dr. Christina Stöcker, Dr. Benjamin Geisler, Dr. Nicholas Wendt sowie Dr. Stefan Limmer für die hervorragende fachliche Unterstützung. Dr. Konrad Mühler, Franziska Pietzsch und Cristin Priewe möchte ich ebenfalls meinen Dank für die vielen Verbesserungsvorschläge und hilfreichen Kommentare aussprechen.

An dieser Stelle sollen auch Axel Neue von MEVIS MEDICAL SOLUTIONS und Ivo Rössling von DORNHEIM MEDICAL IMAGES erwähnt werden, die mir wertvolle Tipps und Anregungen bzgl. der Implementierung gaben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, Ilona und Andreas Birr, die mir das Studium der Computervisualistik ermöglichten und mich stets mit Tat und Kraft unterstützt haben.

Ich danke außerdem der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die Teile dieser Arbeit im Rahmen des DFG-Projekts PE 199/20-1 gefördert hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	2
1.2	Kapitelübersicht	4
2	Medizinischer Hintergrund	5
2.1	Anatomie der Lunge	5
2.2	Bildgebende Verfahren	6
2.3	Lungenerkrankungen	8
2.4	Diagnose und Therapie von Lungentumoren	12
2.4.1	Allgemeines Diagnoseschema	12
2.4.2	Therapiekonzepte	13
2.4.3	Detektion und Operation von Lungenmetastasen	14
3	Grundlagen und verwandte Arbeiten	19
3.1	Computergestützte medizinische Visualisierung	20
3.1.1	Visualisierungsmethoden und Hervorhebungstechniken	20
3.1.2	Computerunterstützung in der Thoraxradiologie und -chirurgie	23
3.2	Medizinische Dokumentation im klinischen Alltag	31
3.2.1	Der Befund als Kommunikationsschnittstelle zwischen Ärzten	31
3.2.2	Annotationen in Befunden	33
3.3	Benutzerzentrierte Entwicklung chirurgischer Applikationen	34
3.3.1	Gestaltung chirurgischer Planungssoftware	34
3.3.2	Szenariobasierte Entwicklung	35
4	Entwurf des Visualisierungs- und Interaktionskonzeptes	37
4.1	User Personas	38
4.1.1	Der Thoraxchirurg A: Chefarzt Prof. Dr. Gerhard Helmholtz	38
4.1.2	Der Thoraxchirurg B: Assistenzarzt Dr. Johannes Planck	39

4.1.3	Der Radiologe: Oberarzt Dr. Stefan Leibniz	40
4.2	User Stories	41
4.2.1	User Story 1	41
4.2.2	User Story 2	45
4.2.3	User Story 3	48
4.3	Die Wahl der Technologie	51
4.3.1	Anforderungen an das System	51
4.3.2	Die Vorzüge des PDF-Dateiformates	53
4.4	Visualisierungskonzept	56
4.4.1	Anwendungsfälle	56
4.4.2	Evaluierung	58
4.5	Conceptual Scenarios	63
4.5.1	Conceptual Scenario 1: Tumorboard	64
4.5.2	Conceptual Scenario 2: OP-Planung – Fall 1	65
4.5.3	Conceptual Scenario 3: OP-Planung – Fall 1 (Forts.)	66
4.5.4	Conceptual Scenario 4: Verlaufskontrollstudie	69
4.5.5	Conceptual Scenario 5: OP-Planung – Fall 2	71
4.6	Concrete Scenarios	77
4.6.1	Hauptnavigation	77
4.6.2	Onkologischer Befund / Lungenfunktion	82
4.6.3	Wizard	87
4.6.4	3D-Visualisierung: Einstellungen	90
4.6.5	Direktauswahl einer Läsion	93
4.6.6	2D-Visualisierungen	95
4.6.7	Druck-, Hilfe- und Vollbildfunktion	97
4.6.8	Pop-Ups	98
5	Implementierung	101
5.1	Workflow	101
5.2	MeVisLab	103
5.3	Flex/ActionScript	107
5.4	PDF	110
6	Zusammenfassung und Ausblick	117
6.1	Diskussion	119
6.2	Ausblick	121
	Abkürzungsverzeichnis	V

Abbildungsverzeichnis	VII
Literaturverzeichnis	IX
A OP-Berichte und Befunde	XVII
A.1 Operationsbericht: Patient HL-NK-Me	XVIII
A.2 Radiologischer Befund: Patient HL-LH-Me	XXI
B Fraunhofer MEVIS Anforderungsbogen: Thoraxchirurgie-Planung	XXIII
C Fragebogen zum Visualisierungskonzept	XXVII
C.1 Fragebogen: Proband A (Viszeralchirurg)	XXVIII
C.2 Fragebogen: Proband B (Thoraxchirurg)	XXXII
C.3 Fragebogen: Proband C (Radiologe)	XXXVI
D Interaktive 3D-Visualisierungen	XLI
D.1 Patient HL-NK-Me	XLII
D.2 Patient HL-LH-Me	XLIII
D.3 Patient HL-MS-Bc	XLIV

Einleitung

Interaktive medizinische Visualisierungen gewinnen in der klinischen Praxis zunehmend an Bedeutung. Schwerpunkte medizinischer Visualisierungen sind die Diagnose und Therapieplanung von Krankheiten, die computergestützte Ausbildung von Ärzten und der intraoperative Einsatz dreidimensionaler Darstellungen. Seit einiger Zeit existieren chirurgische Planungswerkzeuge, mit denen Operationen vorab am Computer vorbereitet werden können. Neben der klassischen Analyse der 2D-Schichtbilddaten, stehen dem Arzt dank neuer Software-Werkzeuge nun auch interaktive 3D-Visualisierungen zur Verfügung, deren Parameter je nach medizinischer Fragestellung verändert werden können.

Die computergestützte Operationsplanung hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht. Bei knöchernen Strukturen, z. B. in der Orthopädie [Langlotz & Nolte, 2003] und Neurochirurgie [Keles & Berger, 2004], sind bildgestützte Planungs- und Navigationstechniken bereits etabliert. Die Entwicklung entsprechender Methodiken im Bereich der Weichgewebechirurgie ist Gegenstand aktueller Forschung. Insbesondere im Kontext der Leberchirurgie wurden in den letzten Jahren Konzepte für die computergestützte Operationsplanung erfolgreich vorangetrieben [Oldhafer u. a., 1999; 2001; Lang u. a., 2005]. Die Ziele dabei sind u. a. die Reduzierung des Operationsrisikos durch die präoperative Analyse von Risikostrukturen und die Abschätzung und Minimierung des funktionellen Ausfalls von Gewebeanteilen. Mit Hilfe von neuartigen Technologien im Bereich der Augmented Reality und illustrativen Visualisierungstechniken können digitale Planungsdaten auf den real vorhandenen Operationssitus übertragen werden [Hansen u. a., 2010]. Die intraoperative Beurteilung der Sicherheitsabstände zu Risikostrukturen (z. B. lebenswichtigen Gefäßen) wird somit erleichtert und die Sicherheit des Operateurs gesteigert.

Der Bereich der Lungendiagnostik und -therapie ist dagegen ein noch recht junges Anwendungsgebiet. Schwerpunkte hierbei sind u. a. die Diagnose und Therapie von Lungentumoren, die Quantifizierung von Lungenfunktionsstörungen und die Entwicklung von Software-Assistenten für die bildgestützte präoperative Analyse von OP-Strategien [Stöcker u. a., 2009]. Lungenerkrankungen, wie z. B. Lungenkrebs, die chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD) und Lungenmetastasen werden oft zu spät diagnostiziert und therapiert, was erhebliche Einschränkungen der Lebensqualität mit sich bringt oder sogar tödliche Folgen für den Patienten haben kann. Hierbei kann eine computerbasierte Therapieunterstützung dem Arzt helfen, die Erkrankung sicher einzuschätzen und zu behandeln.

Im klinischen Alltag erfolgt die Befundung von Lungenkrankheiten auf Basis der medizinischen Bildung und den daraus resultierenden Bildinformationen. Die Datensätze werden von einem Radiologen analysiert, interpretiert und in einem radiologischen Befund dokumentiert. Der Befundbericht wird im klinikinternen System abgespeichert und dient als Kommunikationsschnittstelle zwischen den Ärzten. Im klinischen Alltag sind solche Arztbriefe oft handgeschrieben und eher statischer Natur. Sie sind meist im Fließtext geschrieben und nur selten mit zusätzlichem annotierten Bildmaterial ausgestattet. Dabei könnten digitale, strukturierte Befunddokumente und sinnvoll eingesetzte Bild-Annotationen sehr wertvoll für die Ärztekommunikation und für die Patientenaufklärung sein [Reiner & Siegel, 2006].

1.1 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur computergestützten Therapieplanung von Lungenmetastasen auf Basis eines interaktiven onkologischen¹ Befunddokumentes leisten. 3D-Visualisierungen können bei der Planung eines chirurgischen Eingriffs den Prozess der Entscheidungsfindung des Chirurgen bzgl. Operabilität und Resektionsstrategie maßgeblich beeinflussen. Die dreidimensionalen Darstellungen der Patienten-Anatomie liefern dem Arzt wertvolle Informationen über Lokalisation und Ausdehnung von Tumoren sowie deren Nähe zu benachbarten Strukturen liefern.

Neben der Operationsplanung soll die onkologische Tumorverlaufskontrolle unterstützt werden. Die Strahlen- und Chemotherapie von Lungentumoren ist mit einer großen Belastung für den Patienten und hohen Kosten verbunden. Es wird ein Konzept umgesetzt, mit dem es einem Therapeuten ermöglicht werden soll, den Verlauf der Behandlung besser kontrollieren und interpretieren zu können. Computergenerierte dreidimensionale Modelle der Lungenstrukturen, reproduzierbare Quantifizierungen der Lungenmetastasen und geeignete Visualisierungsverfahren sollen die Sicherheit und Effizienz der Arbeit des Therapeuten steigern.

¹Onkologie: Spezialgebiet der Medizin, dass sich mit der Diagnose und Therapie von Geschwülsten (v. a. Krebs) beschäftigt [Paulick, 2001].

Mit Hilfe des interaktiven onkologischen Befunddokumentes werden vier grundlegende Ziele verfolgt:

- Die zeit- und kostensparende Planung chirurgischer Metastasen-Eingriffe,
- die exakte und reproduzierbare Verlaufskontrolle von Chemotherapien,
- der effektive Austausch von Befundinformationen zwischen den Ärzten sowie
- die Förderung der Patienten-Aufklärung mit Hilfe von übersichtlichen und leicht verständlichen Visualisierungen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen aussagekräftige 2D-Darstellungen und interaktive 3D-Visualisierungen von Lungenstrukturen in einen zusammenhängenden onkologischen Report eingebettet werden, um dem Chirurgen eine effiziente OP-Planung zu ermöglichen. Sämtliche Informationen, also textuelle Beschreibungen, quantitative Analysen sowie Bild-, Video- und 3D-Elemente sollen kompakt zusammengeführt werden, sodass sie sich in Form einer einzigen Datei über E-Mail und andere Kommunikationswege versenden lassen. Die Dateigröße soll dabei möglichst gering gehalten werden. Die nahtlose Anbindung an die bei Fraunhofer MEVIS genutzte Software MEVISLAB ist wünschenswert, sodass die relevanten Tumordaten und Visualisierungen in MEVISLAB exportiert und in den Report integriert werden können. Das Dokument soll weitgehend automatisch generierbar und auf einem internetfähigen Standard-Computer oder Notebook lauffähig sein, damit die Nutzung im Klinik-Alltag gewährleistet ist. Zusammenfassend ergeben sich für den zu implementierenden Report folgende zentrale Anforderungen:

- Darstellung von Bildern, Videos und 3D-Visualisierungen
- Plattformunabhängigkeit und Portabilität
- Automatische Generierbarkeit

Auf Basis einer detaillierten Anforderungsanalyse der verschiedenen Fachärzte wird diskutiert, welche Visualisierungsstrategien hilfreich sind und wie mit geeigneten Hervorhebungstechniken die Explorationsprozesse während der OP-Planung unterstützt werden können. Basierend auf User Personas und einer szenariobasierenden Beschreibung der klinischen Workflows wird das User Interface entworfen, mit dem die medizinischen 2D- und 3D-Darstellungen analysiert werden können. Es soll hierbei stark nutzerzentriert vorgegangen werden, d. h., der Anwender (der Arzt) wird frühzeitig in den Entwicklungsprozess integriert, um so dessen Fragestellungen und Bedürfnisse zu ermitteln. Anhand dieser Analyse soll eine einfach zu bedienende und schnell zu erlernende Benutzeroberfläche für die Exploration der Visualisierungen entwickelt werden. Der Prototyp wird im Anschluss dieser Arbeit bei Fraunhofer MEVIS weiter entwickelt und mit bestehenden Software-Lösungen kombiniert. Das langfristige Ziel ist die Integration der computergestützten Therapieplanung und -kontrolle in den klinischen Alltag der Thoraxradiologie und -onkologie.

1.2 Kapitelübersicht

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert:

Kapitel 2 – In diesem Kapitel wird der medizinische Hintergrund der Arbeit dargestellt. Es wird die Anatomie der Lunge und das Krankheitsbild von Lungentumoren beschrieben. Außerdem werden die typischen radiologischen Modalitäten zur Akquirierung der Bilddaten und grundlegende Therapiekonzepte vorgestellt.

Kapitel 3 – In dem dritten Kapitel erfolgt ein Einblick in die Grundlagen der medizinischen Visualisierungs- und Hervorhebungstechniken. Dabei wird der derzeitige Stand der computergestützten Thoraxradiologie und -chirurgie beleuchtet und Verbesserungspotentiale vorgestellt. Die medizinische Dokumentation von Krankheiten, die Kommunikation von Befunden sowie Gestaltungsgrundlagen bei der Entwicklung chirurgischer Planungssoftware sind weitere Themen dieses Kapitels.

Kapitel 4 – Dieses Kapitel umfasst den szenariobasierten Entwurfsprozess des Visualisierungs- und Interaktionskonzeptes. Ausgehend von einer umfangreichen Benutzer- und Aufgabenanalyse werden die Anforderungen und Erwartungen der Endanwender anhand von User Personas und User Stories ermittelt. Es wird geklärt, welche Visualisierungsmethoden und Hervorhebungstechniken sich eignen und wie das dazugehörige Interaktionskonzept aussieht.

Kapitel 5 – Es erfolgt die Beschreibung der prototypischen Implementierung des interaktiven Reports. Die unterschiedlichen Werkzeuge, Programmierungen und Schnittstellen werden genannt und die Anbindung an MEVIS-LAB beschrieben. Weiter wird der Workflow bei der Generierung des Reports ausgehend von der Datenbasis über den Export der 3D-Modelle bis hin zum fertigen interaktiven Befund dargestellt.

Kapitel 6 – Abschließend werden die Entwicklungen zusammengefasst, kritisch hinterfragt und Vorschläge für mögliche weiterführende Projekte präsentiert.

Anhang – Im Anhang befinden sich OP-Berichte, Radiologische Befunde und weiteres Anschauungsmaterial. Die Web-Version dieser Arbeit enthält darüber hinaus interaktive 3D-Visualisierungen.

Medizinischer Hintergrund

Dieses Kapitel beschreibt den medizinischen Hintergrund der vorliegenden Arbeit. In Abschnitt 2.1 wird überblicksartig der anatomische Aufbau und die Funktion der Lunge erklärt. Danach werden in Abschnitt 2.2 die gängigen bildgebenden Verfahren der Thoraxdiagnostik vorgestellt und deren Vor- und Nachteile erläutert. Im anschließenden Abschnitt 2.3 werden typische Lungenerkrankungen und deren Charakteristik beschrieben. Der letzte Abschnitt 2.4 umfasst Diagnose- und Therapiemaßnahmen bei Lungentumorerkrankungen.

2.1 Anatomie der Lunge

Die Lunge (*Pulmo*) dient der Atmung des Menschen. Abbildung 2.1 verdeutlicht den Aufbau der Lunge. Sie besteht aus zwei Lungenflügeln, die sich an den Zwischenlappenspalten (*Fissuren*) in sogenannte Lungenlappen aufsplitten. Der rechte Lungenflügel besteht aus einem oberen (*Lobus superior*), einem mittleren (*Lobus medius*) und einem unteren Lungenlappen (*Lobus inferior*) und ist größer als der linke Lungenflügel, der nur in Ober- und Unterlappen (*Lobus superior* und *Lobus inferior*) aufgeteilt ist. Der rechte Lungenflügel unterteilt sich weiter in zehn, der linke in neun Segmente, sogenannte *Lobuli*. Die beiden Lungenflügel umschließen den Mittelfellraum (*Mediastinum*), der neben dem Herz und den herznahen großen Gefäßen u. a. die Luftröhre (*Trachea*), die Speiseröhre (*Ösophagus*) sowie mehrere Mediastinallymphknoten enthält. Jeder Lungenflügel wird von einem Lungenfell (*Pleura visceralis*) umschlossen. Die äußere Schicht des Lungenfells nennt sich Rippenfell (*Pleura parietalis*) und schmiegt sich an die Rippen, das Zwerchfell und das Mediastinum an. Lungenfell und Rippenfell werden zusammen als Brustfell bezeichnet [Schade, 2001].

Abbildung 2.1.: Klassifikation und Verlauf der blut- und luftführenden Gefäße in der Lunge. Lymphgefäße (grün) begleiten den Bronchialbaum und münden in den Lymphknoten des Lungenhilus [Speckmann u. a., 2000].

Etwa auf Herzhöhe, im sogenannten *Lungenhilus*, gabelt sich die Luftröhre in einen linken und rechten Hauptbronchus. Der Lungenhilus ist der Bereich, in dem die Leitstrukturen (Hauptbronchien, Pulmonal- und Lymphgefäße) in die Lunge hinein bzw. aus der Lunge heraus führen. Ähnlich eines Baumes, dessen Äste immer dünner werden, ist auch das Bronchialsystem aufgebaut. Der rechte Hauptbronchus unterteilt sich in drei Lappenbronchien, der linke in zwei. Die kleinsten Verästelungen der Bronchien münden letztlich in den Lungenbläschen (*Alveolen*), die für den Gasaustausch zuständig sind. Dabei wird Sauerstoff aus der eingeatmeten Luft aufgenommen und über Kapillaren in den Blutkreislauf abgegeben. Gleichzeitig wird Kohlendioxid als Abfallprodukt abgeführt [Schade, 2001].

2.2 Bildgebende Verfahren

Bildgebende Verfahren sind die Grundlage für die medizinische Visualisierung. Für die Darstellung anatomischer und pathologischer Gegebenheiten wird der Patient bei der Bildakquisition einer Strahlung (z. B. Röntgenstrahlung) ausgesetzt. Es wird dabei ausgenutzt, dass unterschiedliche Gewebearten im menschlichen Körper die verabreichte Energie unterschiedlich stark absorbieren oder reflektieren. In der Thoraxdiagnostik spielen dabei v. a. Verfahren mit Röntgenstrahlen eine

große Rolle. Aufgrund der größtenteils luftgefüllten Strukturen ergeben sich im entstehenden Bild sehr gute Kontrastverhältnisse zwischen Lungengewebe, Gefäßen und Tumoren. Die Röntgen-Computertomographie (CT) ist der Goldstandard in der radiologischen Diagnostik von Lungenerkrankungen. Weitere, in bestimmten Fällen der Thoraxdiagnostik eingesetzte, Verfahren sind die Magnetresonanztomographie (MRT), die Positronenemissionstomographie (PET) und die Sonographie (Ultraschall).

Computertomographie (CT)

Die Computertomographie ist ein Schnittbildverfahren, bei dem Röntgenstrahlen spiralförmig aus unterschiedlichen Positionen auf den Körper des Patienten gerichtet werden, während er durch die Röntgenröhre bewegt wird. Die Strahlung wird im Körper von den jeweiligen Geweben unterschiedlich stark abgeschwächt. Die Röntgenabsorption wird von Detektoren gemessen und über eine inverse Radon-Transformation werden aus diesen Schwächungswerten überlagerungsfreie Schichtbilder zu einem Gesamtvolumen rekonstruiert. Die in der CT gemessenen Röntgenschwächungswerte werden in sogenannten Hounsfield-Einheiten (HE) normalisiert und bestimmten Grauwerten zugeordnet. Referenzpunkt der Skala ist Wasser (0 HE). Positive Skalenwerte repräsentieren Gewebearten mit hoher Röntgenabsorption bzw. großer Dichte während Strukturen mit geringer Dichte negativ sind. Knochen (ca. 500–1000 HE) stellen sich im CT weiß dar, Luft bei Werten um -1000 HE schwarz. Das Lungengewebe (*Lungenparenchym*) liegt bei ca. -550 bis -950 HE. Für ein besseres Kontrastverhältnis der Blutgefäße und Tumoren gegenüber des Lungenparenchyms wird dem Patienten meist ein Kontrastmittel verabreicht. Dieses hebt die Röntgenabsorption in den Gefäßen an, sodass sie heller dargestellt werden. Da Tumoren meist gut durchblutet sind, werden sie nach Kontrastmittelgabe ebenfalls hell abgebildet. Die Vorteile der CT sind die gute Beurteilung von Größe, Lokalisation und Ausbreitung von Lungentumoren aufgrund des guten Kontrastes gegenüber des Parenchyms. Nachteilig für den Patienten sind die Strahlenbelastung und die Gabe eines Kontrastmittels, das unter Umständen allergische Reaktionen auslösen kann [Morneborg, 1995].

Weitere bildgebende Verfahren in der Thoraxdiagnostik

Neben der CT kommen in bestimmten Anwendungsfällen weitere Bildgebungsverfahren für die Diagnostik von Lungenkrankheiten zum Einsatz. Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist ebenfalls ein Schnittbildverfahren, welches im Gegensatz zur CT einen sehr guten Weichgewebekontrast bietet. Bei der MRT wird die physikalische Eigenschaft des Drehimpulses (*Spin*) eines Atomkerns mit ungerader Anzahl an Protonen ausgenutzt. Die häufig im Körper vorkommenden Wasserstoffatome bieten diese Eigenschaft. Die MRT wird in der Lungendiagnostik aufgrund des guten Weichgewebekontrastes z. B. zur Analyse von infiltrierten Gefäßen und für die Beurteilung von Entzündungen und Tumoren der Pleura angewendet. Wei-

tere Vorteile der MRT sind die Möglichkeit von multiplanaren Schnittführungen und der Verzicht auf ionisierende Strahlung. Nachteilig sind die höheren Kosten des Verfahrens, die im Gegensatz zur CT nicht normierten Intensitätswerte und Artefakte in den Bilddatensätzen.

Des Weiteren ist die Positronenemissionstomographie (PET) als Vertreter der nuklearmedizinischen Bildgebung zu nennen. Dabei wird dem Patienten radioaktiv markierter Traubenzucker (*Radiopharmakon*) verabreicht. In Geweben mit schnellem Stoffwechselumsatz und hohem Zuckerverbrauch wird viel Strahlung freigesetzt. Diese Gebiete erscheinen in Schwarz-Weiß-PET-Bildern als besonders dunkle oder in Farbbildern als leuchtende Flecken. Tumoren und Metastasen haben meist einen höheren Energiestoffwechsel und heben sich dadurch in dem resultierenden Bild gut vom gesunden Gewebe ab. Die PET wird in der Lungendiagnostik u. a. zur Suche nach einem Primärtumor bei nachgewiesener Metastasierung und zum Nachweis von Fernmetastasen eingesetzt. Nachteilig ist die ungenaue Lokalisation eines Tumors, da reine PET-Bilder nur wenige anatomische Details darstellen. Aus diesem Grund wird oft eine kombinierte PET-CT-Untersuchung gemacht, bei der die anatomischen CT-Daten mit den funktionellen PET-Daten überlagert werden.

Die Ultraschall-Diagnostik (Sonographie) ist ein bildgebendes Verfahren, das im Lungenkontext nur in begrenztem Rahmen eingesetzt wird. Eine Voraussetzung für die Sonographie ist das Vorhandensein von Flüssigkeit im untersuchten Gewebe. Diese Untersuchungstechnik wird daher v. a. zur Diagnose von Pleuraergüssen angewendet. Die Sonographie hat den Vorteil, dass sie schnell durchführbar, günstig, und nebenwirkungsfrei ist. Die Nachteile dieser Untersuchungsform sind, dass sie sehr von der Erfahrung des Untersuchers abhängig ist und eine geringere Raumauflösung als die CT und MRT bietet [Krug, 2004].

2.3 Lungenerkrankungen

Es gibt sehr vielschichtige Lungenerkrankungen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig abgebildet werden können. Zu den häufigsten Erkrankungen gehören jedoch Bronchialkarzinome, Lungenmetastasen und Lungenemphyseme, deren Vorkommen und Charakteristik im Folgenden kurz beschrieben werden.

Abbildung 2.2.: Peripheres Bronchialkarzinom. Ausschnittsvergrößerungen des rechten Oberlappens. **a)** Übersichtsaufnahme im p.-a. Strahlengang. **b)** CT (Lungenfenster). **c)** CT (Mediastinalfenster). [Krug, 2004]

Bronchialkarzinom

Das Bronchialkarzinom („Lungenkrebs“, Abb. 2.2) ist in Deutschland sowohl bei Männern als auch bei Frauen, die dritthäufigste Tumorerkrankung (14 % Neuerkrankungen bei Männer, 7 % bei Frauen) [Robert Koch Institut, 2010]. Da Bronchialkarzinome oft erst spät diagnostiziert und therapiert werden, gehören sie zu den häufigsten Krebstodesursachen (26 % Männer, 7 % Frauen). Die 5-Jahres-Überlebensrate liegt bei Frauen zwischen 13 % und 19 % und bei Männern zwischen 13 % und 17 %. Man unterscheidet zwischen kleinzelligen (20 %) und nichtkleinzelligen (80 %) Bronchialkarzinomen, wobei die nichtkleinzelligen weiter in Plattenepithelkarzinome, Adenokarzinome und großzellige Karzinome unterschieden werden. Hauptursache für das Entstehen eines Bronchialkarzinoms ist Tabakrauch. Lungentumoren machen sich oft erst sehr spät bemerkbar. Husten, Atemschwierigkeiten und Schmerzen im Brustkorb können erste Anzeichen sein, im späten Stadium auch Bluthusten. Mehr als 50 % aller Patienten mit Bronchialkarzinom sind nicht mehr kurativ operabel [Schmid & Stockhausen, 2005]. Nichtkleinzellige Karzinome werden bevorzugt operativ behandelt¹, wobei eine nicht vorhandene Metastasierung die Heilungschance wesentlich verbessert. Klassische Operationsverfahren bei Bronchialkarzinomen sind die Lob- und Pneumonektomie (Abschnitt 2.4). Um das erneute Wachstum eines Tumors nach der OP zu verhindern, wird meist eine postoperative Strahlen- und Chemotherapie eingeleitet.

¹Wenn das Krebsstadium nicht schon zu weit fortgeschritten ist.

Lungenmetastasen

Lungenmetastasen sind bösartige (*maligne*) Tochtergeschwülste, deren Ursprungstumor meist außerhalb der Lunge sitzt.² Viele Karzinomarten bilden im Verlauf ihres Entstehens Metastasen, die oft über das Blutgefäß- und Lymphsystem in die Lunge gelangen. So finden sich bei ca. 29% aller verstorbenen Tumorpatienten pulmonale Metastasen [Schmid & Stockhausen, 2005]. Lungenmetastasen verursachen meist erst spät Beschwerden und werden oft nur zufällig bei Röntgenuntersuchungen gefunden. Für die zweifelsfreie Diagnose von Lungenmetastasen eignet sich die CT am besten, da sie auch subtile Metastasen mit einem Durchmesser kleiner als 1 cm detektieren und darstellen kann. Lungenmetastasen zeigen sich im Allgemeinen im Computertomogramm als helle Rundherde, die sowohl einzeln als auch in großer Anzahl vorliegen können (Abb. 2.3). Mittlerweile werden auch multiple pulmonale Metastasen operativ angegangen, z. B. mit laserchirurgischen Maßnahmen (Abschnitt 2.4). Die Grundvoraussetzung für die Metastasen Chirurgie ist, dass der Primärtumor unter Kontrolle ist und die Lungenfunktion des Patienten ausreicht. Bei Lungenmetastasen wird oft auch zusätzlich eine Chemotherapie durchgeführt, um die Herde für die Operation zu verkleinern. Bestimmte Metastasenarten sprechen dabei sehr gut auf chemotherapeutische Maßnahmen an, z. B. Metastasen des Hodentumors. Die Metastasen des Nierenzellkarzinoms lassen sich dagegen kaum mit einer Chemotherapie behandeln. Im Rahmen der Therapie werden in regelmäßigen Abständen Nachuntersuchungen durchgeführt und das Wachstumsverhalten der Metastasen kontrolliert [Schirren u. a., 2006].

Lungenemphysem

Von einer Lungenemphysem-Erkrankung sind ca. 900.000 Menschen in Deutschland betroffen [Schmid & Stockhausen, 2005]. Bei dieser Lungenerkrankung sind die Alveolen bedingt durch eine Zerstörung der Alveolarwände überbläht. In der Folge sinkt die funktionelle Gasaustauschfläche und die Lunge verliert an Elastizität, was zu chronischer Atemnot führen kann. Im CT zeigen sich die luftgefüllten „Emphysemlasen“ sehr dunkel (Abb. 2.4). Da die Zerstörung des Lungengewebes ein irreversibler Prozess ist, kann der weitere Krankheitsverlauf lediglich mit Hilfe von Medikamenten und palliativen Therapieverfahren beeinflusst werden. Eine vollständige Heilung ist nicht möglich. Bei starker Schädigung des Lungengewebes wird eine Sauerstoff-Langzeittherapie durchgeführt, mit der sich die Entstehung von Folgeerkrankungen hinauszögern bzw. verhindern lassen. In schweren Fällen muss das überblähte, nicht mehr funktionsfähige Gewebe im Rahmen einer Lungenvolumenreduktionsoperation entfernt werden. Nachteil bei dieser Operation ist, dass ca. 10% der Patienten eine Pneumonie, d. h. eine chronische Entzündung des Lungengewebes, erleiden. Eine Lungenvolumenreduktionsoperation wird oft auch als Überbrückung der Wartezeit auf eine Lungentransplantation durchgeführt [Schmid & Stockhausen, 2005].

²Auch Bronchialkarzinome können Lungenmetastasen entwickeln.

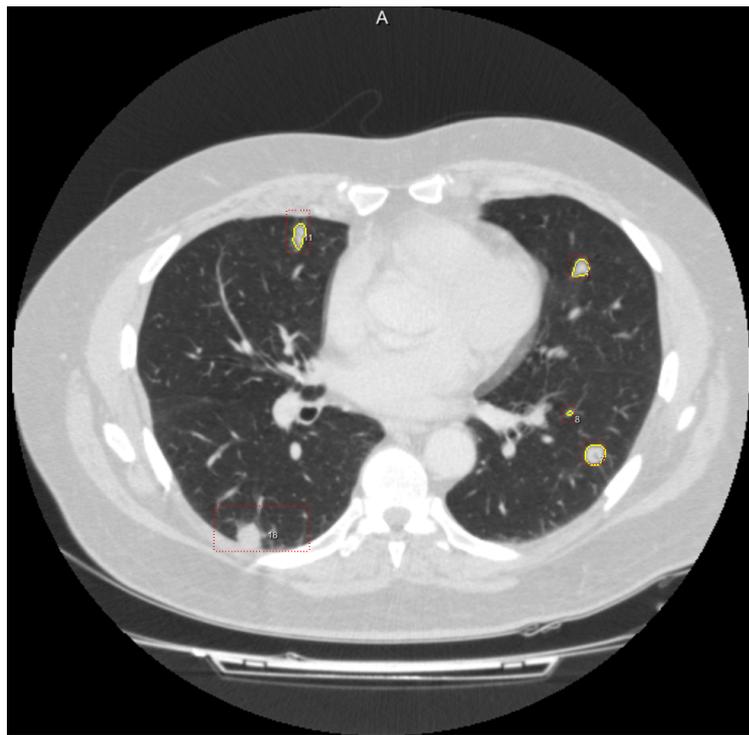


Abbildung 2.3.: Ausschnitt aus dem CT eines Patienten mit Lungenmetastasen. Die Rundherde wurden computergestützt segmentiert und werden durch gelbe Konturlinien hervorgehoben. Quelle: Universitätsklinikum Schleswig-Holstein

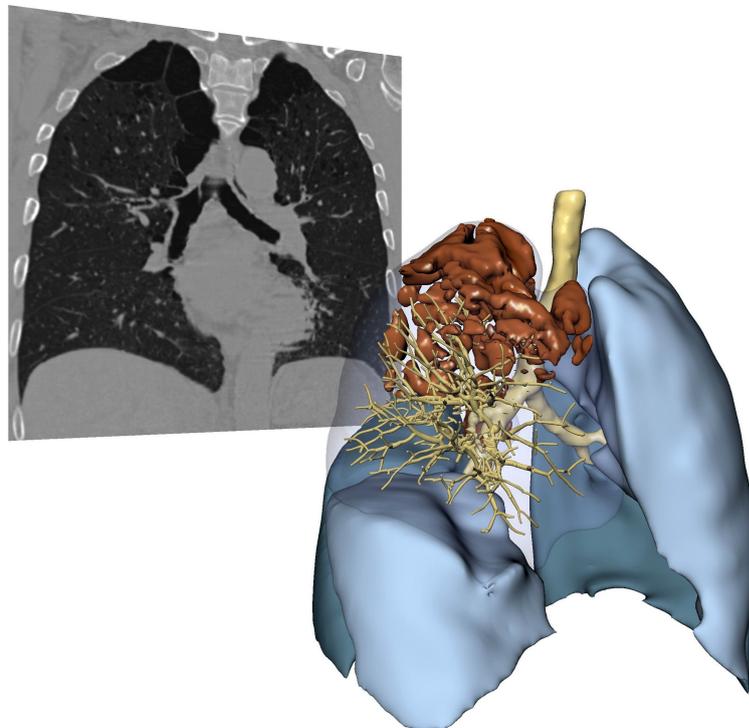


Abbildung 2.4.: Vordergrund: Dreidimensionale Darstellung der Lunge, der Bronchien und Blutgefäße sowie der emphysematischen Gebiete (braun) im rechten Oberlappen. Hintergrund: Zweidimensionale, reformatierte Darstellung des Computertomogramms der Lunge.

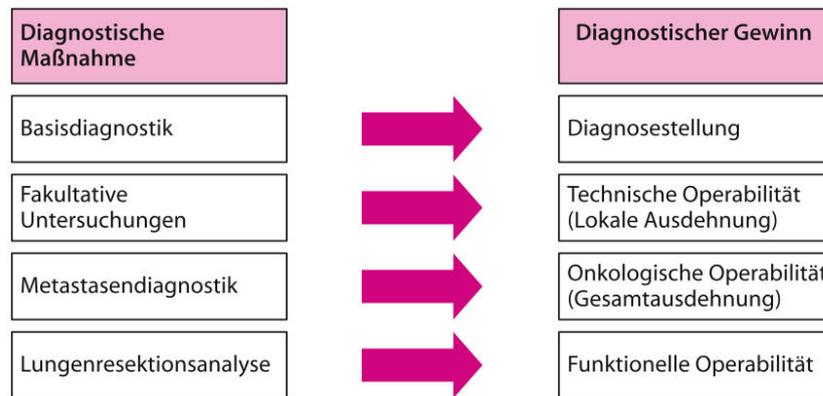


Abbildung 2.5.: Allgemeines Diagnoseschema bei Lungentumoren [Schmid & Stockhausen, 2005].

2.4 Diagnose und Therapie von Lungentumoren

Die Diagnostik in der Thoraxchirurgie folgt meist einem festgelegtem Schema (Abb. 2.5), welches im Folgenden vorgestellt wird. Im Anschluss wird ein Überblick über die gängigen Therapiekonzepte bei der Behandlung von Lungentumoren/-metastasen gegeben.

2.4.1 Allgemeines Diagnoseschema

In der **Basisdiagnostik** wird die Art, Größe und Ausbreitung eines Primärtumors bestimmt. Dabei werden in der Anamnese die Art und Dauer der tumorbedingten Symptome (z. B. Atemnot, Schluckstörungen) erhoben. Es folgen weitere körperliche Untersuchungen (z. B. Abhören mit Hilfe des Stethoskops) und labormedizinische Analysen mit Tumormarkern. Mit anschließenden Röntgen-Thoraxaufnahmen können Rundherde ab einem Durchmesser von etwa 1 cm sichtbar gemacht werden. Zur Abklärung eines Erstbefundes und für die Detektion kleiner pulmonaler Läsionen wird ein Thorax-CT angefertigt und ausgewertet. Mit einer Bronchoskopie werden die Bronchien auf tumoröse Veränderungen oder Entzündungen untersucht.

Bei einem Tumorbefund werden weitere **fakultative Untersuchungen** veranlasst, um die lokale Ausdehnung und die technische Operabilität zu ermitteln. Wichtig ist dies vor allem bei unklaren Befunden, z. B. zur Abklärung der Infiltration von Gefäßen oder der Pleura. Die MRT ist hier die Methode der Wahl, da sich der Tumor aufgrund des guten Weichteilkontrastes der MRT gut von anderen Strukturen, wie Fett, Muskeln und Gefäßen, abhebt. Zur Abklärung können weitere Untersuchungen der Gefäße (Angiographie) und der Pleura (Pleurapunktion) durchgeführt werden [Schmid & Stockhausen, 2005].

Bei Vorliegen eines malignen Primärtumors wird im Rahmen der **Metastasen-diagnostik** ein sogenanntes Tumorstaging durchgeführt, um eine (Fern-)Metastasierung abzuklären. Mit einer abdominalen Sonographie oder einem Abdomen-CT werden die Bauchorgane, insbesondere die Leber, auf Metastasen untersucht. Mit einem CT oder MRT des Kopfes und einer Knochenszintigraphie werden Gehirn- und Knochenmetastasen erfasst. Eine PET-Untersuchung kann eingesetzt werden, um Brustwand- und Lymphknoteninfiltrationen zu ermitteln. Außerdem lassen sich mit dem PET unklare Rundherde analysieren, z. B. zur Unterscheidung eines malignen Tumors von einer Entzündung oder Atelektase³.

Wenn der vollständige onkologische Befund aller benignen und malignen Prozesse vorliegt und eine alleinige medikamentöse Therapie nicht zielführend ist, kann ein operativer Eingriff geplant werden. Zuvor muss jedoch die **funktionelle Operabilität** der Lunge geklärt werden, d. h., der durch die Resektion entstehende Funktionsverlust der Lunge muss abgeschätzt werden. Dabei wird mittels einer Lungenszintigraphie (nuklearmedizinisches Verfahren) die Lungendurchblutung und -belüftung überprüft. In dem entstehenden Szintigramm können Strömungshindernisse oder Elastizitätseinschränkungen in der Lunge auffindig gemacht werden, da diese Areale wenige radioaktive Partikel beinhalten und sich dadurch schwach im Bild darstellen.

2.4.2 Therapiekonzepte

Die Durchführung einer Lungentumor-Therapie erfordert eine enge Zusammenarbeit unter Onkologen, Pneumologen und Strahlentherapeuten. In größeren Kliniken finden regelmäßig sogenannte „Tumorboards“ statt, bei denen onkologische Fälle und deren Behandlungskonzepte interdisziplinär besprochen werden. Grundsätzlich existieren drei Standardtherapieformen für die Behandlung von pulmonalen Tumoren:

- Operation
- Bestrahlung
- Chemotherapie

Die Therapieformen werden entweder für sich allein oder kombiniert angewendet, um eine Heilung oder zumindest eine Verkleinerung der Tumoren zu erreichen. Die chirurgische Entfernung eines Lungentumors ist klinische Routine. Der allgemeine Gesundheitszustand des Patienten muss jedoch eine Operation erlauben. Bei einem ausgedehnten Tumorbefall des Mediastinums oder dem Übergreifen des Tumors auf andere Organe wird meist von einer OP abgesehen und stattdessen eine kombinierte Strahlen-/Chemotherapie veranlasst. Nichtkleinzellige Bronchiakarzinome werden je nach Stadium meist operativ entfernt, wohingegen die kleinzelligen

³Atelektase: Ein kollabierter Lungenbereich, der wenig oder gar nicht luftgefüllt ist.

Karzinome oft chemotherapeutisch behandelt werden, da sie sehr schnell wachsen und früh Metastasen bilden. Befindet sich ein Tumor in einem späten Stadium, wird eine neoadjuvante Therapie durchgeführt. Dabei wird der Tumor vor der OP bestrahlt, um ihn zu verkleinern und in ein operables Stadium zu überführen. Nach der Operation wird ebenfalls oft eine Strahlentherapie eingeleitet, um lokal verbliebene Tumoranteile zu zerstören und die Bildung von Fernmetastasen zu verhindern. Neben primären Lungentumoren werden auch Lungenmetastasen in den letzten Jahren dank minimal-invasiver und parenchymsparender Operationstechniken immer öfter chirurgisch angegangen.

2.4.3 Detektion und Operation von Lungenmetastasen

Bestimmte Tumorarten tendieren besonders dazu, Lungenmetastasen zu entwickeln. Dazu gehören v. a. Nierenzell-, Hoden- und Mammakarzinome [Schirren u. a., 2006]. Metastasen der Lunge werden oft nur zufällig bei Röntgenuntersuchungen gefunden; die frühzeitige Erkennung von Lungentumoren mit Screeningmaßnahmen wird kontrovers diskutiert. Im Gegensatz zum Mammographie-Screening, welches 2005 eingerichtet und seit 2009 flächendeckend in Deutschland angeboten wird [Kooperationsgemeinschaft Mammographie, 2010], gibt es kein aktives Früherkennungsprogramm für Lungentumoren. Es werden zwar vereinzelt CT-Screeninguntersuchungen durchgeführt, dabei treten jedoch oft falsch-positive Resultate auf, die weitere unnötige Therapieverfahren zur Folge haben. Die Patientenbelastung und Strahlenexposition ist dabei nicht zu vernachlässigen [Herth, 2008]. Es könnten jedoch vor allem Risikogruppen (starke Raucher) von der Lungenkrebsfrüherkennung auf Basis von Niedrigdosis-CT-Untersuchungen profitieren. Laut einer Studie von [Swensen u. a., 2002] könnten somit Lungenkrebskrankungen in frühen Stadien diagnostiziert werden.

Die Spiral-Computertomographie ist der Goldstandard in der Detektion von pulmonalen Rundherden. Im klinischen Alltag werden die CT-Thoraxaufnahmen meist mit einer 5 mm-Schichtdicke angefertigt, vereinzelt werden auch Dünnschicht-Aufnahmen mit einer kleineren Schichtdicke gefahren. Die Verwendung von Dünnschicht-CTs resultiert in hochaufgelösten CT-Daten mit optimaler Bildqualität und kann so zu einer Steigerung der Metastasen-Detektionsrate um mehr als 12 % führen [Detterbeck u. a., 2010]. In der klinischen Routine werden pulmonale Rundherde manuell am Monitor erfasst und dokumentiert. Der Arzt scrollt dabei durch die 2D-Schichten und sucht nach krankhaften Veränderungen. In großen Kliniken fallen heutzutage sehr viele radiologische Untersuchungen an; für die Bearbeitung eines Einzelfalls bleibt dem Radiologen oft nicht viel Zeit. Um den Arzt bei der Suche nach Metastasen zu unterstützen, wurden sogenannte CAD (*Computer Aided Detection*)-Programme entwickelt. CAD-Software wird seit einiger Zeit erfolgreich bei der Detektion von Lungenmetastasen angewendet, wobei die Sensitivität je nach System bei ca. 70 % liegt [Li, 2007]. Aufgrund einer zum Teil hohen False-Positive-Rate bei der Erkennung der Läsionen, werden diese Tools jedoch nur zur Unterstützung und als zweite Meinung für den Arzt eingesetzt.

Ein Dünnschicht-CT und computergestützte Analysen allein sind jedoch keine Garantie für eine vollständige Erfassung sämtlicher Metastasen. Studien haben gezeigt, dass selbst bei 3 mm-Schichten noch ca. 25 % der Metastasen übersehen werden, weil sich die Rundherde im CT nicht exakt als solche erkennen lassen [Detterbeck u. a., 2010]. Dennoch ist die Entfernung *aller* Metastasen eine Voraussetzung für den Erfolg einer Therapie. Die intraoperative *Palpation* hat daher in der Thoraxchirurgie einen sehr hohen Stellenwert. Dabei ertastet sich der Operateur entlang der knorpelartigen und fühlbaren Bronchien auf der Suche nach knotenartigen Strukturen. Ein erfahrener Chirurg ist so in der Lage, selbst kleinste Rundherde, die radiologisch nicht nachweisbar sind, zu erspüren und anschließend zu entfernen. In 50–60 % der Fälle treten jedoch nach der Operation neue Metastasen auf [Detterbeck u. a., 2010]. Daher wird der Therapieerfolg in regelmäßigen Nachuntersuchungen (etwa alle 6–8 Wochen) kontrolliert.

Für die **Resektion von Lungenmetastasen** gelten folgende Voraussetzungen [Krug, 2004; Rusch, 2010]:

- Der Primärtumor muss unter Kontrolle sein.
- Der allgemeine Gesundheitszustand des Patienten muss eine OP zulassen.
- Die Funktion der Restlunge nach der Operation sollte ausreichend sein.
- Die pulmonalen Metastasen müssen vollständig resektabel sein.
- Die Anzahl der Metastasen darf nicht zu groß sein.

Der letzte Punkt wird unter Experten stark diskutiert. Die Anzahl der Metastasen ist ein wichtiger prognostischer Faktor. Die 5-Jahres-Überlebensrate nach der Resektion einer einzigen Metastase liegt im Durchschnitt bei 47 %. Im Gegensatz dazu ist die Überlebenswahrscheinlichkeit bei multiplen Metastasen mit 17 % wesentlich geringer [Detterbeck, 2010]. Es gibt aber keinen eindeutigen Schwellwert, ab dem eine Metastasenresektion aufgrund der Anzahl der Herde nicht mehr in Frage kommt. Es herrscht dagegen Einigkeit darüber, dass es wichtiger ist, alle Metastasen vollständig zu reseziieren. Multiple Metastasen können bei einseitigem Befall relativ problemlos entfernt werden. Bei beidseitigem Lungenbefall muss abgeschätzt werden, wieviel funktionsfähiges Lungengewebe nach einer Resektion verbleibt.

Die Wahl des Zugangsweges

Vor der OP wird der Zugangsweg zur Lunge und eine geeignete Operationsmethode mit Hilfe der CT-Daten und ggf. rekonstruierten 3D-Visualisierungen patientenindividuell besprochen. Für die Resektion von Lungentumoren existieren vier grundsätzliche chirurgische Zugangstechniken, die im Folgenden genannt und kurz beschrieben werden.

- Mediane Sternotomie
- Laterale Thorakotomie
- Transversale Thorakotomie
- Videoassistierte thorakoskopische Chirurgie (VATS)

Bei der **medianen Sternotomie** (Abb. 2.6b) wird der Patient auf dem Rücken gelagert und das Brustbein (*Sternum*) längs durchtrennt. Dies gewährleistet einen optimalen Zugriff auf beide Lungen und bietet die Möglichkeit der Lymphknoten-dissektion⁴ am oberen Mediastinum. Für peripher im Lungenparenchym gelegene Herde eignet sich dieser Zugangsweg sehr gut, nachteilig ist jedoch, dass hilusnahe Strukturen nur schwer exploriert werden können.

Bei der **lateralen Thorakotomie** (Abb. 2.6a) liegt der Patient seitlich auf dem Operationstisch. Der Thorax wird nur auf einer Seite geöffnet, d. h., es kann maximal eine Lungenseite operiert werden. Die Belastung für den Patienten hält sich dadurch in Grenzen. Der Nachteil ist jedoch, dass bei beidseitigem Lungenbefall eine zweite Operation angesetzt werden muss. Der laterale Zugangsweg ermöglicht eine gute Exposition aller Lungenbereiche und die Resektion von multiplen Metastasen. Lymphknoten im oberen und unteren Mediastinum können optimal erreicht werden.

Eine Alternative zum lateralen Zugangsweg ist die **transversale Thorakotomie**, die eine beidseitige Lungenexploration und eine komplette Lymphknoten-dissektion ermöglicht. Aufgrund der technisch aufwändigen Vorbereitung und der höheren postoperativen Belastung wird diese Art der Operation nur bei jüngeren Patienten mit beidseitigem Tumorbefall angewendet.

Die **videoassistierte thorakoskopische Chirurgie (VATS)** (Abb. 2.6c) ist eine minimal-invasive Operationstechnik und eine noch recht junge Disziplin der Thoraxchirurgie. Über eine kleine Öffnung am Thorax werden eine Spezialkamera und Operationsinstrumente in den Brustraum eingeführt. Der Chirurg verfolgt das Bild der Kamera auf einem Monitor und kann die entsprechenden Maßnahmen vornehmen. Die Vorteile liegen in dem kleineren Zugangsweg zur Lunge und damit geringeren Schmerzbelastung für den Patienten sowie in der technisch einfachen Durchführbarkeit. Voraussetzung für diese Operationstechnik ist das Vorliegen von peripheren und pleuranahen Tumoren. Zentral im Parenchym gelegene Herde wer-

⁴Lymphknoten-dissektion: Chirurgische Entfernung von Lymphknoten

Abbildung 2.6.: Typische Zugangswege bei Lungenoperationen. **(a)** Laterale Thorakotomie [Pichlmaier & Schildberg, 2005] **(b)** Mediane Sternotomie [Pichlmaier & Schildberg, 2005] **(c)** Videoassistierte thorakoskopische Chirurgie (VATS) [Mount Nittany Medical Center, 2010]

den dagegen bei dieser Zugangsmethode oft übersehen. Der größte Nachteil dieser Technik ist, dass die Palpation⁵, sowie die vollständige Beurteilung der Hilusstrukturen und der mediastinalen Lymphknoten erschwert ist [Schirren u. a., 2006].

Die Wahl des Operationsverfahrens

Neben der Wahl des optimalen Zugangsweges ist die Resektionstechnik (Abb. 2.7) entscheidend für den Erfolg des chirurgischen Eingriffs. Die wichtigsten Kriterien dabei sind die rückstandslose Entfernung des Tumorgewebes sowie die Schonung des umgebenden Gewebe und der benachbarten Gefäße. Bei peripheren und gut erreichbaren Läsionen wird meist eine **Keilresektion** / **Atypische Resektion** durchgeführt, bei der ein keilförmiger Bereich aus dem Lungenparenchym geschnitten wird. Diese Technik eignet sich sehr gut für die Gewebeentnahme von peripheren Tumoren, um sie histologisch untersuchen zu können. Das Vorgehen bei einer **Segmentresektion** entspricht dem der Keilresektion, nur erfolgt hier die Resektion entlang der anatomischen Grenzen der kleinsten anatomischen Einheiten der Lunge, den Lungensegmenten. Zentral liegende und große Tumoren lassen sich oft nicht, aufgrund der Infiltration von anderen lebenswichtigen Strukturen, parenchymsparend entfernen. Stattdessen werden in diesen Fällen meist ein oder mehrere Lungenlappen (**Lobektomie**) oder sogar ein ganzer Lungenflügel (**Pneumonektomie**) operativ entfernt, um ein bestmögliches prognostisches Er-

⁵Palpation: Untersuchung der Lunge durch Ertasten

Abbildung 2.7.: Operative Verfahren an der Lunge [Paetz u. a., 2004].

gebnis zu erreichen. Die Pneumonektomie wird jedoch nur in Ausnahmefällen und abhängig vom Zustand des Patienten durchgeführt. Sie ist v. a. dann eine Option, wenn sich Metastasen im Hilus großflächig ausgebreitet haben oder ein Tumor über mehrere Lappengrenzen gewachsen ist. Viele Patienten leben nach der Operation jedoch nicht länger als zwei Jahre [Migliore u. a., 2010].

Eine weitere, noch recht junge Operationstechnik ist die **Laserresektion**. Hierbei wird ein Laser mit einer Wellenlänge von 1318 nm verwendet, um Metastasen präzise und parenchymsparend herauszuschneiden. Aufgrund der hohen Energieabsorption des Lasers treten keine größeren Blutungen auf und die Wunde wird sofort versiegelt. Da ein Maximal-Abstand zu benachbartem Gewebe eingehalten werden kann, werden Gefäße und andere Strukturen geschützt und es treten weniger Komplikationen während der Operation auf. Die Lasertechnik eignet sich besonders gut, um auch Metastasen in großer Zahl vollständig zu reseziieren. Einen limitierenden Faktor bezüglich der Anzahl der Metastasen gibt es nicht: Es können problemlos ca. 30 Metastasen einer Lunge innerhalb einer Stunde operiert werden [Venuta u. a., 2010]. Laut [Rolle u. a., 2006] liegt die 5-Jahres-Überlebensrate bei Patienten mit 20 und mehr laser-resezierten Metastasen bei 26 %.

Grundlagen und verwandte Arbeiten

Das zu entwickelnde System soll in der Lage sein, einen onkologischen Lungenmetastasenbefund inklusive aller benötigten Befundinformationen, Bilder, Videos und 3D-Elemente kompakt in einem portablen und interaktiven Dokument zu präsentieren. Die dafür nötigen Grundlagen und Rahmenbedingungen werden in dem folgenden Kapitel beschrieben. In Abschnitt 3.1 wird erläutert, welche Methoden der interaktiven medizinischen Visualisierung existieren und welche Hervorhebungstechniken zur Aufmerksamkeitsteuerung genutzt werden können. Weiterhin wird der aktuelle Stand der Computerunterstützung in der Thoraxradiologie und -chirurgie dargestellt. Abschnitt 3.2 widmet sich der medizinischen Dokumentation im klinischen Alltag. Das besondere Augenmerk liegt hierbei auf den Aspekten der strukturierten und automatischen Befundung unter Einbezug von annotiertem Bildmaterial. Der onkologische Report soll leicht bedienbar sein und von einem Chirurgen ohne großen Lernaufwand für die chirurgische Interventionsplanung genutzt werden können. In Abschnitt 3.3 werden daher die Hauptaspekte der benutzerzentrierten Entwicklung chirurgischer Applikationen vorgestellt. Die speziellen Anforderungen der Chirurgen an eine OP-Planungs-Software werden erläutert und es wird beschrieben, welche Konsequenzen dies auf die Gestaltung des User Interfaces hat.

3.1 Computergestützte medizinische Visualisierung

Visualisierungstechniken sind nötig, um dem Arzt die aus der Bildgebung entstandenen Daten zu präsentieren und ihm somit die Diagnose und Therapie von Krankheiten zu ermöglichen. Im Kontext der Thoraxradiologie und -chirurgie steht die Darstellung und Exploration der Lunge und deren Bestandteile im Vordergrund. Es sind sowohl zwei- als auch dreidimensionale interaktive Visualisierungs- und Hervorhebungstechniken nötig, um den Radiologen effizient bei der Befundung zu unterstützen und dem Chirurgen eine Hilfestellung für die Operationsvorbereitung zu geben.

3.1.1 Visualisierungsmethoden und Hervorhebungstechniken

Bei den aus den tomographischen Bildgebungsverfahren gewonnenen Datensätzen handelt es sich um schichtweise aufgebaute Volumendaten, die zwei- und dreidimensional präsentiert werden können. Die Vorzüge der 2D- und 3D-Darstellungsform werden im Folgenden vorgestellt.

Darstellungsformen

Die Auswertung einzelner zweidimensionaler Schichten des Volumendatensatzes ist im klinischen Alltag eine gängige Praxis. Hierbei können Details wahrgenommen werden, die in einer 3D-Darstellung aufgrund der Komplexität oder durch Verdeckungen übersehen werden könnten. Ein Radiologe arbeitet täglich mit Schichtbildern und ist die zweidimensionale Darstellung der Daten gewohnt. Dem Arzt stehen bei der Befundung vielfältige Analyse- und Bearbeitungsfunktionen zur Verfügung. So ist, je nach Befundungssoftware, das Bestimmen der Dichtewerte von Strukturen, das Einzeichnen und Ermitteln geometrischer Ausmaße sowie das Hinterlassen von manuellen Anmerkungen (Symbole, Hinweise) für den therapierenden Arzt möglich. Die 2D-Daten können in unterschiedlichen Orientierungen (axial, sagittal, coronal) angezeigt und die Original-Intensitätswerte mit Hilfe von flexiblen Fensterungen je nach Fragestellung vom Arzt verändert werden. Der Nachteil der 2D-Repräsentation ist der fehlende räumliche Bezug und das zeitaufwändige Explorieren des zum Teil sehr großen Volumendatensatzes.

Im Gegensatz zur 2D-Darstellung, bei der lokale Bilddetails für die Analyse und Befundung ausschlaggebend sind, stehen bei der 3D-Visualisierung globale Lagebeziehungen und Größenverhältnisse im Vordergrund. Ein Chirurg profitiert von der dreidimensionalen Repräsentation der Daten, da aufgrund der räumlichen Darstellung die Tumorkalisation und -ausdehnung sowie Abstände zwischen Tumoren und lebenswichtigen Gefäßen abschätzbar sind. So können Aussagen zur Operabilität, der Wahl der Resektionsmethode und des Zugangsweges getroffen werden.

Man unterscheidet zwischen zwei grundlegenden Techniken der medizinischen 3D-Darstellung: *Indirektes Volumenrendering* und *Direktes Volumenrendering*.

Beim **Indirekten Volumenrendering** (VR) werden Oberflächenmodelle aus den Bilddaten extrahiert, wobei in den meisten Fällen hierfür der Marching-Cubes-Algorithmus genutzt wird [Lorensen & Cline, 1987]. Die extrahierte Oberfläche orientiert sich dabei an einem vorher festgelegten Grenzwert. Voxel mit einem skalaren Wert oberhalb dieses Grenzwertes befinden sich innerhalb der von der Oberfläche eingeschlossenen Region, während Voxel mit einem kleineren Skalarwert außerhalb liegen. Bei diffusen Strukturen ist es oft nicht oder nur schwer möglich, einen festen Schwellwert für die Oberflächengenerierung zu definieren. In diesen Fällen werden die Strukturen manuell oder halb-automatisch segmentiert. Die segmentierte Fläche wird dann als Basis für die Extraktion des 3D-Modells genutzt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Oberfläche nur einen geringen Speicher belegt und Beleuchtungs- und Transparenzeffekte einfach implementiert und auf das 3D-Modell angewendet werden können. Im Lungenkontext eignet sich diese Form des Volumenrenderings besonders für große, zusammenhängende und mit geringem Aufwand segmentierbare Strukturen, beispielsweise den Lungenlappen. Die Nachteile des Verfahrens sind jedoch, dass die Original-Bildinformationen verloren gehen und die Oberflächenmodelle nicht immer exakt die Patienten-Anatomie wiedergeben. Bei der Oberflächenextraktion entstandene Artefakte, wie „Löcher“ oder Ausbuchtungen in den computergenerierten Modellen, können unter Umständen zu Fehleinschätzungen auf Seiten des Arztes führen.

Im Gegensatz dazu wird bei dem **Direkten Volumenrendering** ohne Vorverarbeitungsmechanismen mit den Original-Volumendaten gearbeitet. Die Voxelwerte des Volumendatensatzes werden dabei mit Hilfe von interaktiv einstellbaren Transferfunktionen auf Farb- und Transparenzwerte abgebildet. [Rezk-Salama, 2001] gibt einen Überblick über das direkte VR und dessen Weiterentwicklungen. Der Vorteil dieser Darstellungsform liegt darin, dass die Originaldaten unverfälscht und ohne Informationsverlust präsentiert werden. Im Kontext der Thoraxchirurgie eignet sich diese Form der 3D-Darstellung bei Strukturen des Mediastinums, da in diesem Bereich viele Gefäße und Lymphknoten eng beieinanderliegen und sich nicht exakt segmentieren lassen. Eine Oberflächenvisualisierung würde hier nicht zu befriedigenden Ergebnissen führen. Der Nachteil des direkten VR ist jedoch der Aufwand bei der Wahl einer geeigneten Transferfunktion und der zum Teil hohe Speicher- und Rechenaufwand aufgrund des großen Datenvolumens. Die Weiterentwicklungen im Bereich des Direkten VR haben sich daher in den letzten Jahren besonders auf die Performance des Verfahrens konzentriert. In [Krüger & Westermann, 2003] wird eine GPU-basierte VR-Technik vorgestellt, bei der das rechenintensive Volumenrendering auf der *Graphical Processing Unit* (GPU), dem Prozessor der Grafikkarte, ausgeführt wird. Mit Grafikkarten der neuesten Generation ergeben sich dadurch erhebliche Geschwindigkeitsvorteile. In [Lindemann & Ropinski, 2010] werden interaktive Beleuchtungs- und Reflektionsmethoden auf GPU-Basis vorgestellt, mit denen realistische Beleuchtungseffekte in dem VR simuliert werden können.

Interaktive Hervorhebungstechniken

Im medizinischen Kontext müssen oft sehr komplexe Strukturen und Zusammenhänge dreidimensional visualisiert werden. Die Aufmerksamkeitsvermittlung spielt dabei eine große Rolle: Interessante Objekte, z. B. Tumoren, werden vordergründig (Fokus) abgebildet, während weniger interessante Objekte, z. B. Organgrenzen, als Kontextinformation dargestellt werden. Die Herausforderung besteht darin, Lagebeziehungen und Größenverhältnisse sichtbar zu machen und dabei Verdeckungen von wichtigen Strukturen zu vermeiden. Mit Hilfe von unterschiedlichen Hervorhebungstechniken können, je nach Zielstellung, verschiedene Objektparameter beeinflusst werden, um somit den Informationsgehalt der Visualisierung zu steigern [Preim & Ritter, 2002].

Lokale Verfahren. Bei diesen Hervorhebungstechniken werden die Eigenschaften des hervorzuhebenden Objektes beeinflusst. Die Wahl einer Signalfarbe, die Darstellung eines Fadenkreuzes oder einer Bounding Box oder das Einbringen von Symbolen, z. B. Pfeilen, in die 3D-Szene sind möglich, um die Aufmerksamkeit auf ein Objekt zu lenken.

Regionale Verfahren. Um Verdeckungen von Fokusstrukturen durch Kontextobjekte zu vermeiden, werden regionale Hervorhebungstechniken eingesetzt. Sie ermöglichen den Blick auf die Zielstruktur, indem die verdeckenden Objekte teilweise oder vollständig transparent gesetzt werden. Illustrationstechniken können dazu beitragen, die Fokus-Strukturen gegenüber dem Kontext hervorzuheben. Bei dem Ansatz von [Tietjen u. a., 2005] werden die Objektgrenzen der Kontext-Elemente durch Silhouetten betont (Abb. 3.1a). Dabei gehen jedoch zum Teil viele Kontextinformationen verloren. Sogenannte „Smart Visibility“-Techniken schwächen die Kontextelemente nur teilweise ab. Ein Vertreter dieser Kategorie sind „Cutaway“-Darstellungen, bei denen verdeckte Strukturen sichtbar werden, indem quader- oder zylinderförmige Bereiche aus der 3D-Visualisierung „herausgeschnitten“ werden [Diepstraten u. a., 2003]. Eine andere Methode wird von [Zhou u. a., 2002] vorgeschlagen: Innerhalb des direkten VR wird eine kugelförmige Region frei bewegt, um die innerhalb der Kugel liegenden Strukturen hervorzuheben. Die Sichtbarkeit der Zielstruktur ist dabei jedoch nicht gewährleistet. Daher schlagen [Kubisch u. a., 2010] einen sogenannten „Ghost View“ vor (Abb. 3.1b). Hierbei werden alle Strukturen ausgeblendet, die zwischen dem Zielobjekt, z. B. einem Tumor, und dem Betrachter liegen.

Globale Verfahren. Diese Verfahren beziehen sich auf die Gesamtheit der dreidimensionalen Szene und deren Szenenobjekte. Die virtuelle Kamera wird so im Raum positioniert, dass die Sichtbarkeit der Zielstrukturen gewährleistet ist. [Mühler u. a., 2007] stellen ein Verfahren vor, bei dem automatisch optimale Blickpunkte für die Betrachtung anatomischer Strukturen in komplexen 3D-Visualisierungen ermittelt werden.

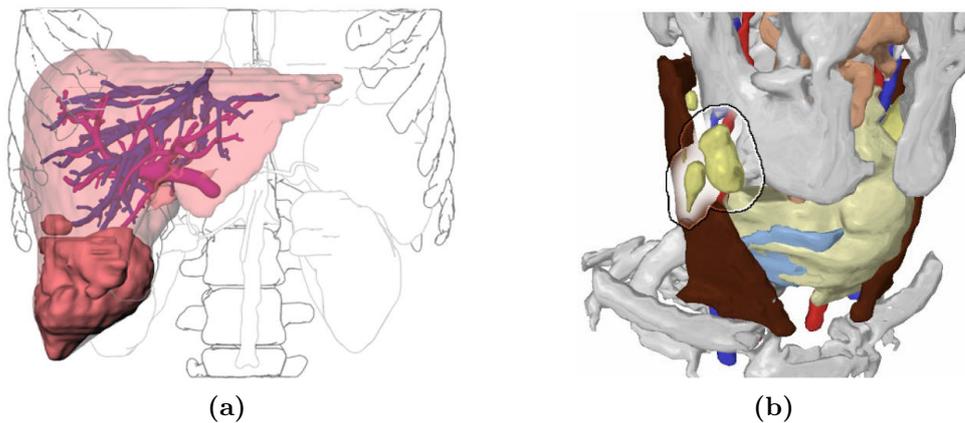


Abbildung 3.1.: (a) Kombinierte Oberflächen- und Konturvisualisierung zur Verdeutlichung von Fokus (Leber und Tumor) und Kontext (Knochen) [Tietjen u. a., 2005]. (b) Hervorhebung eines vergrößerten Hals-Lymphknotens durch eine „Ghost View“-Ansicht [Kubisch u. a., 2010].

3.1.2 Computerunterstützung in der Thoraxradiologie und -chirurgie

Die Akzeptanz für eine computerbasierte Operationsplanung ist unter Chirurgen sehr hoch. Laut [Oldhafer u. a., 2001] liegen die größten Vorteile einer Computerunterstützung in der Veranschaulichung der Lage von Tumoren und Gefäßen, dem Ermitteln einer optimalen Resektionsstrategie und der Dokumentation von Planungsergebnissen. Weiterhin werden die bessere Ausbildung von angehenden Chirurgen und die größere Sicherheit während der Operation genannt. Auch für die Verlaufskontrolle von Lungenmetastasen-Therapien ergeben sich Vorteile: Da eine Strahlen- oder Chemotherapie eine große Belastung für den Patienten darstellt, ist eine computergestützte und reproduzierbare Therapiekontrolle notwendig, um nicht zielführende Therapien anpassen zu können [Bornemann u. a., 2007].

Segmentierungen als Grundlage

Für die Planung von Lungenoperationen sind 3D-Modelle der Lungenstrukturen unerlässlich. Für den Thoraxchirurgen sind dabei die Visualisierung der Lungenlappen, des Bronchialbaums, des Blutgefäßsystems sowie die Darstellung von eventuell vorhandenen Lungentumoren, vergrößerten Lymphknoten und Emphysemen von Bedeutung.

Die 3D-Modelle werden aus Segmentierungen der jeweiligen Strukturen gewonnen. Dieser Prozess wird im Folgenden kurz beschrieben, Details können [Stöcker u. a., 2009] entnommen werden. Der Bronchialbaum wird mit einem Region-Growing-Verfahren, startend bei einem Saatpunkt innerhalb der Luftröhre, segmentiert. Flexible Korrekturmethode ermöglichen dabei exakte Segmentierungen in den Bereichen, in denen das Region Growing versagt hat. Die Lungenflügel werden mit einer markerbasierten Wasserscheidentransformation mit geringem manuellen Aufwand segmentiert und voneinander separiert. Für die exakte Unterteilung der

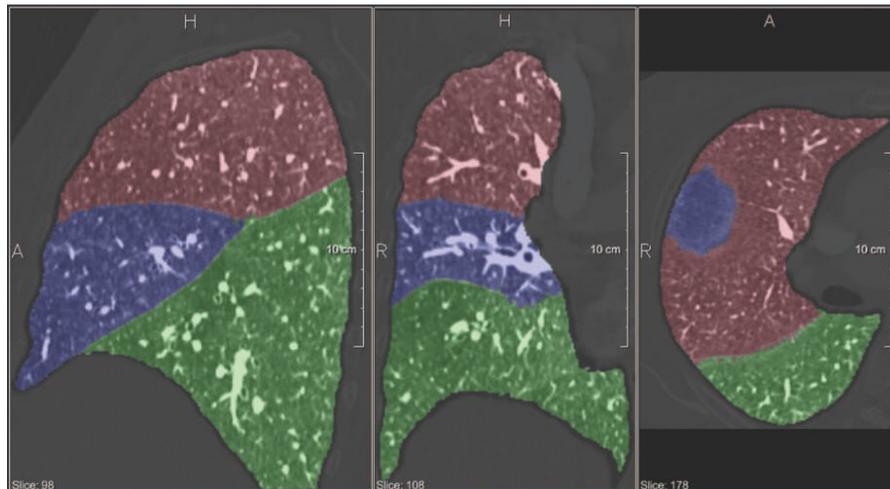
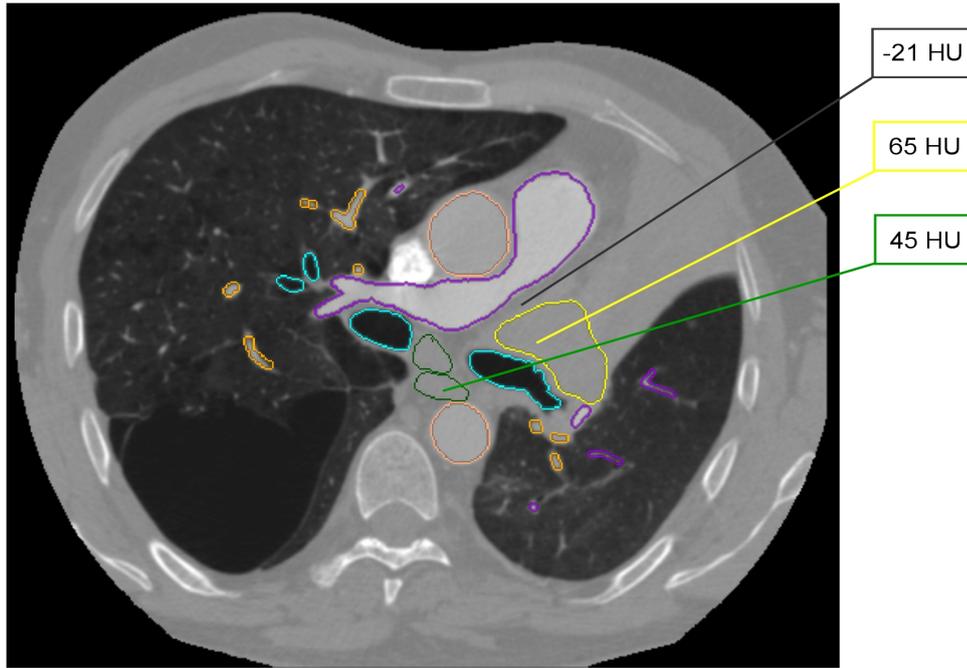


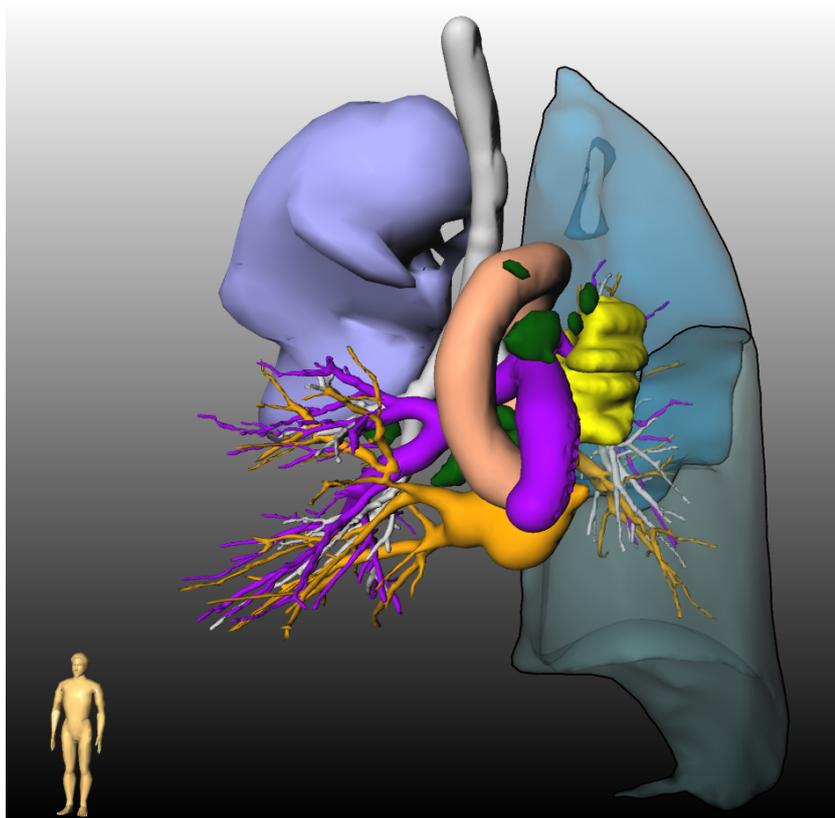
Abbildung 3.2.: (a) Segmentierte Lungenlappen der rechten Lunge in drei Ansichten (links: sagittal, mitte: coronal, rechts: axial)

Lungen in Lungenlappen wird anatomisches Wissen in den Segmentierungsprozess eingebracht: Man nutzt dabei aus, dass Gefäße nicht über Lappengrenzen hinweg wachsen und die Lappengrenzen einen großen Abstand zu Gefäßen haben. Eine interaktive Wasserscheidentransformation in Verbindung mit einer Distanztransformation führt somit zu einer präzisen Segmentierung der Lungenlappen (Abb. 3.2). Lungentumoren werden mit einer Kombination aus Region-Growing-Verfahren und morphologischen Operatoren segmentiert und vermessen [Kuhnigk u. a., 2006]. Während pulmonale Metastasen meist automatisch und korrekt segmentiert werden, verläuft die Segmentierung von zentralen großen Bronchialkarzinomen nicht immer zufriedenstellend.¹ Ein befriedigendes Segmentierungsergebnis ist oft nur mit erheblichen manuellem Aufwand erreichbar. Bei einem zentral liegenden Tumor sind vor allem die hilären Strukturen für die Einschätzung der Operabilität eines Patienten wichtig. Wie in Abb. 3.3a zu sehen ist, liegen die zentralen Lungenstrukturen (Gefäße, Tumoren, Lymphknoten) eng beieinander und unterscheiden sich zum Teil nur gering in ihren Grauwerten. Sie lassen sich daher nicht vollautomatisch segmentieren, sondern werden bei Fraunhofer MEVIS von geschultem Fachpersonal unter Einbezug von implizitem medizinischen Wissen identifiziert und segmentiert. Dabei werden überwiegend interaktive Live-Wire-Verfahren [Mortensen u. a., 1992] eingesetzt. Die Segmentierungsmasken werden anschließend in 3D-Oberflächenmodelle umgewandelt und können je nach Fragestellung des Arztes kombiniert visualisiert und interaktiv beeinflusst werden (Abb. 3.3b).

¹Zentral sitzende Bronchialkarzinome infiltrieren meist andere Strukturen, z. B. den Bronchialbaum, und lassen sich daher oft nicht eindeutig von ihrer Umgebung abgrenzen.



(a)



(b)

Abbildung 3.3.: (a) 2D-Darstellung der segmentierten Lungenstrukturen: Pulmonalarterie (lila), Pulmonalvene (orange), Bronchien (türkis), Aorta (hell-rosa), Lymphknoten (grün) und ein zentraler Tumor (gelb). Aufgrund der ähnlichen Grauwerte sind die hilären Strukturen nur mit halb-automatischen Algorithmen und hohem Interaktionsaufwand exakt segmentierbar. (b) 3D-Visualisierung des Tumorfalles. Zusätzlich werden die Emphyseme (blau) im rechten Oberlappen und der linken Ober- und Unterlappen abgebildet.

Comp.Param.	Vol. [ml]	Rel.Vol.	LAV
Overall	6180	100.0 %	14.7 %
Right Lung	4483	72.5 %	20.1 %
Left Lung	1697	27.5 %	0.3 %
R. Upper Lobe	2438	39.5 %	36.7 %
R. Middle Lobe	601	9.7 %	1.0 %
R. Lower Lobe	1444	23.4 %	0.2 %
L. Upper Lobe	692	11.2 %	0.7 %
L. Lower Lobe	1005	16.3 %	0.1 %

Abbildung 3.4.: Der zu Abb. 3.3 gehörende und in MEVisPULMO [Kuhnigk u. a., 2005] generierte Text-Report als Entscheidungsunterstützung bei Fragen zur Operabilität und der zu erwartenden postoperativen Lungenfunktion. Die eingekreisten Werte zeigen den kritischen Emphysemanteil im rechten Oberlappen anhand des berechneten LAV (Low Attenuation Volume)-Wertes, auch Emphyseindex genannt.

Klinische Bedeutung für die Chirurgie

Laut [Stöcker u. a., 2009] hat die computerassistierte Operationsplanung ein großes Potential für die Thoraxchirurgie in Hinblick auf die Abschätzung der postoperativen Lungenfunktion, die präoperative Risikoanalyse und die Wahl einer geeigneten Resektionsstrategie. Die Autoren von [Wormanns u. a., 2005] bestätigen den Nutzen der softwaregestützten, präoperativen Lungenfunktionsanalyse für die Einschätzung der Operabilität. In [Limmer u. a., 2010b] wird die dreidimensionale Rekonstruktion zentraler Lungentumoren und der Nachbarstrukturen als deutlicher Mehrwert gegenüber der klassischen 2D-Analyse hervorgehoben. Die Verwendung von CAD-Methoden kann zudem hilfreich bei der exakten Detektion und OP-Planung von Lungenmetastasen sein [Limmer u. a., 2010a].

Postoperative Lungenfunktion. Zusätzlich zu den in der Klinik durchgeführten Lungenfunktionstests und Szintigraphien können wichtige funktionelle Parameter aus den CT-Daten berechnet werden. Die lappenweise durchschnittliche Lungendichte und der prozentuale Emphysemanteil sind beispielweise nützliche Werte, die dem Chirurgen eine Einschätzung der postoperativen Lungenfunktion erlauben. So wird ein chirurgischer Eingriff nur dann durchgeführt, wenn genug restliche Lungenfunktion vorhanden ist (Abb. 3.4).

Risikoanalyse. Die computerbasierte Operationsplanung bietet die Möglichkeit, virtuelle Risikoanalysen durchzuführen. Bei Bronchialkarzinom- oder Metastasen-Operationen ist es essentiell, den oder die Tumoren vollständig, inklusive eines Sicherheitsrandes, zu entfernen, um das Wiederauftreten eines Tumors zu verhindern. Die 3D-Darstellungen vermitteln dem Arzt einen guten Eindruck von Lage- und Größenbeziehungen des Tumors zu benachbarten Gefäßen (Abb. 3.3b).

Resektionsstrategie. Mit Hilfe der Lappensegmentierung (Abb. 3.2) kann der Chirurg präoperativ Aussagen zur Operabilität und zu einer geeigneten Resektionsstrategie (siehe Abschnitt 2.4.3) treffen, da lappenweise die Distanzen zwischen Tumor und Lappen- oder Organgrenze beurteilt werden können. Somit kann beispielsweise entschieden werden, ob eine Lobektomie oder gar eine Pneumektomie durchgeführt werden muss.

Computergestützte Verlaufskontrolle von Lungenmetastasen-Therapien

Chemo- und Strahlentherapien erfordern eine regelmäßige und exakte Kontrolle des Ansprechverhaltens der Metastasen auf die Therapie. Die Wachstumsverhältnisse der Läsionen geben Auskunft über den Erfolg eines Behandlungskonzeptes. Kleiner werdende oder gänzlich verschwindende Raumforderungen stehen dabei für einen Therapieerfolg, während größer werdende oder neu hinzugekommene Läsionen eine Änderung der Medikation oder eine Operation erfordern.

Im Klinikalltag werden Metastasen meist manuell vom Radiologen bei der Analyse der CT-Daten detektiert und dokumentiert, d. h., die Lokalisation und Größe der Läsion wird ermittelt und im Befund festgehalten. Bei fortgeschrittener Metastasierung werden manuell die axialen Durchmesser der beiden größten Läsionen bestimmt (durch Einzeichnen eines Durchmessers in den CT-Daten). Diese Messwerte werden dokumentiert und in regelmäßigen Abständen (ca. alle 3-6 Monate) kontrolliert. Die manuelle Messung eines Läsion-Durchmessers ist jedoch ungenau und nicht reproduzierbar, v. a. bei Läsionen, die nicht kugelartig sind und dadurch das Finden der größten axialen Schicht schwierig ist. Dies hat signifikante Auswirkungen auf die Therapiekontrolle. Unpräzise Größenangaben der Metastasen führen zu nicht erfolgreichen Therapien und bedeuten einen längeren Leidensweg für den Patienten. Daher sind Verfahren entwickelt worden, bei denen die Tumorgößen nicht anhand der größten axialen Schicht, sondern anhand der räumlichen Ausdehnung der Läsion bestimmt werden. Diese Verfahren werden unter dem Stichwort **Volumetrie** zusammengefasst. In [Bornemann u. a., 2007] wird eine Software namens ONCOTREAT² (Abb. 3.5) vorgestellt, die eine robuste und reproduzierbare Volumetrie von Lungenläsionen, Lebermetastasen und vergrößerten Lymphknoten in CT-Scans ermöglicht. Weiterhin enthält das Tool Methoden für die Segmentierung von Hirnmetastasen in MR-Untersuchungen. Das Einbeziehen extrapulmonaler Metastasen ist wichtig, um einen vollständigen onkologischen Befund zu erstellen und die Therapie entsprechend auf andere Organe auszuweiten. Mit dieser Software können geringste Volumenänderungen erkannt und dokumentiert werden, was eine wesentlich höhere Zuverlässigkeit und Aussagekraft der onkologischen Verlaufskontrolle in der Lunge zur Folge hat. [Marten u. a., 2006] bestätigen die Exaktheit der volumetrischen Messungen gegenüber dem manuellen und ungenauen Einzeichnen von Durchmessern. [Bornemann u. a., 2007] führen an, dass das Hauptproblem in der Detektion und vollständigen Segmentierung von vergrößerten Lymphknoten liegt. Mit hilären Strukturen verwachsene oder pleurale Metastasen

²TREAT: Therapy Response Evaluation Tool

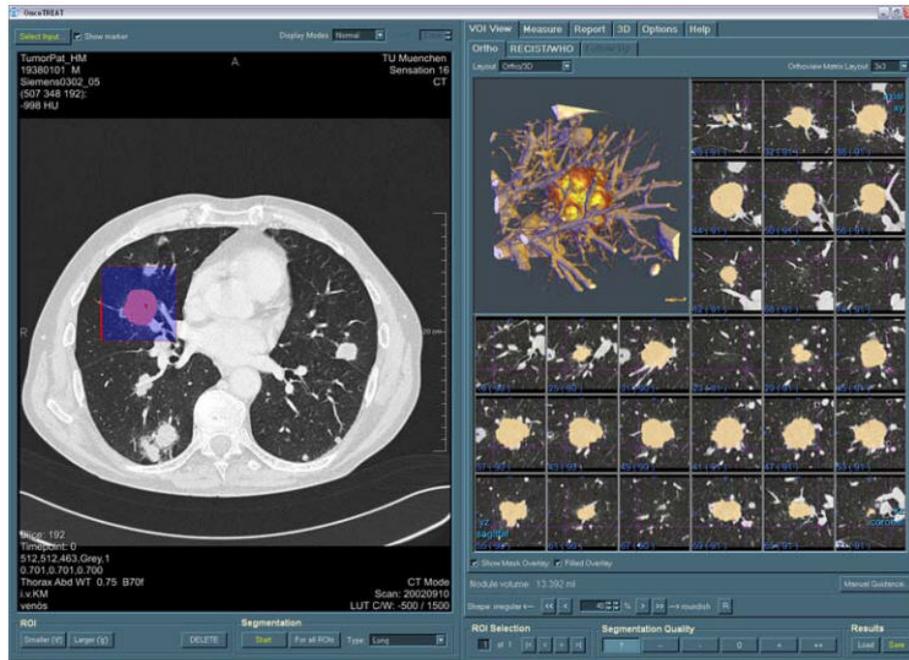


Abbildung 3.5.: ONCOTREAT für die Volumetrie von Lungenläsionen. Die Segmentierung, Registrierung und Quantifizierung der Läsionen erlaubt eine exakte und reproduzierbare Tumor-Verlaufskontrolle [Bornemann u. a., 2007].

sind ebenfalls nicht immer automatisch segmentier- und messbar. In diesen Fällen können jedoch vom Benutzer interaktiv Segmentierungskorrekturen vorgenommen werden.

In [Levy u. a., 2007] wird eine Software namens LESIONVIEWER (Abb. 3.6a) vorgestellt, mit der Tumorverlaufskontrollen in radiologischen Forschungsstudien dokumentierbar sind. Die Krankheitsstadien eines Patienten werden auf einer Zeitleiste dargestellt, sodass die Wachstumsänderungen der Läsionen abgelesen werden können. Die Stadien werden nach den RECIST³-Richtlinien ermittelt und dem Benutzer farbkodiert präsentiert. Zusätzlich zur grafischen Zusammenfassung des Krankheitsverlaufes können auf Knopfdruck die dazugehörigen Bildserien abgerufen werden.

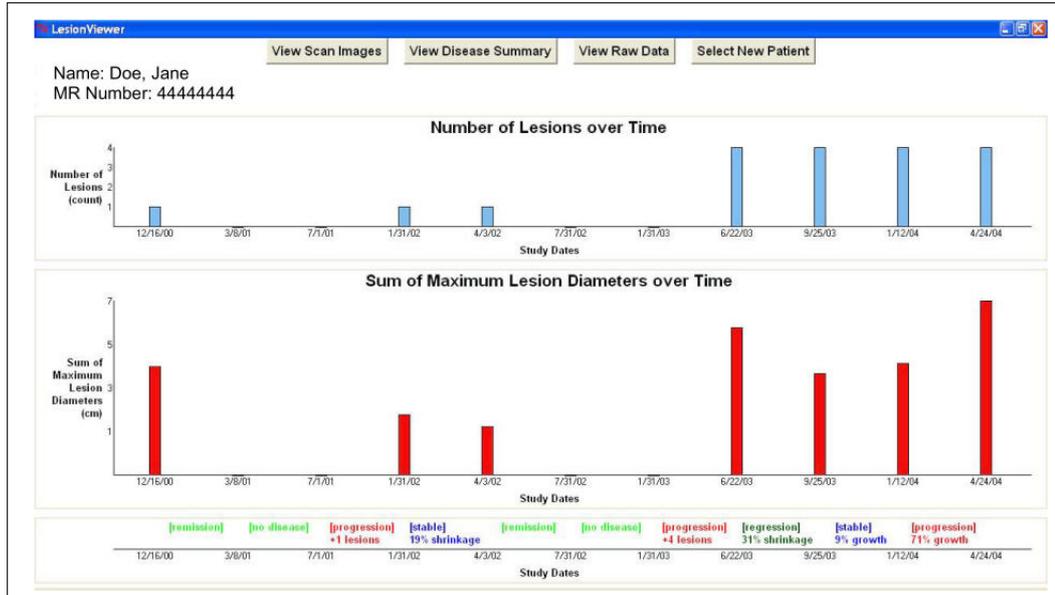
³RECIST (Response Evaluation Criteria In Solid Tumors): Objektive Bewertung des Behandlungserfolges von Krebserkrankungen anhand von definierten Regeln [Eisenhauer u. a., 2009]

Computergestützte Operationsplanung von Lungenmetastasen

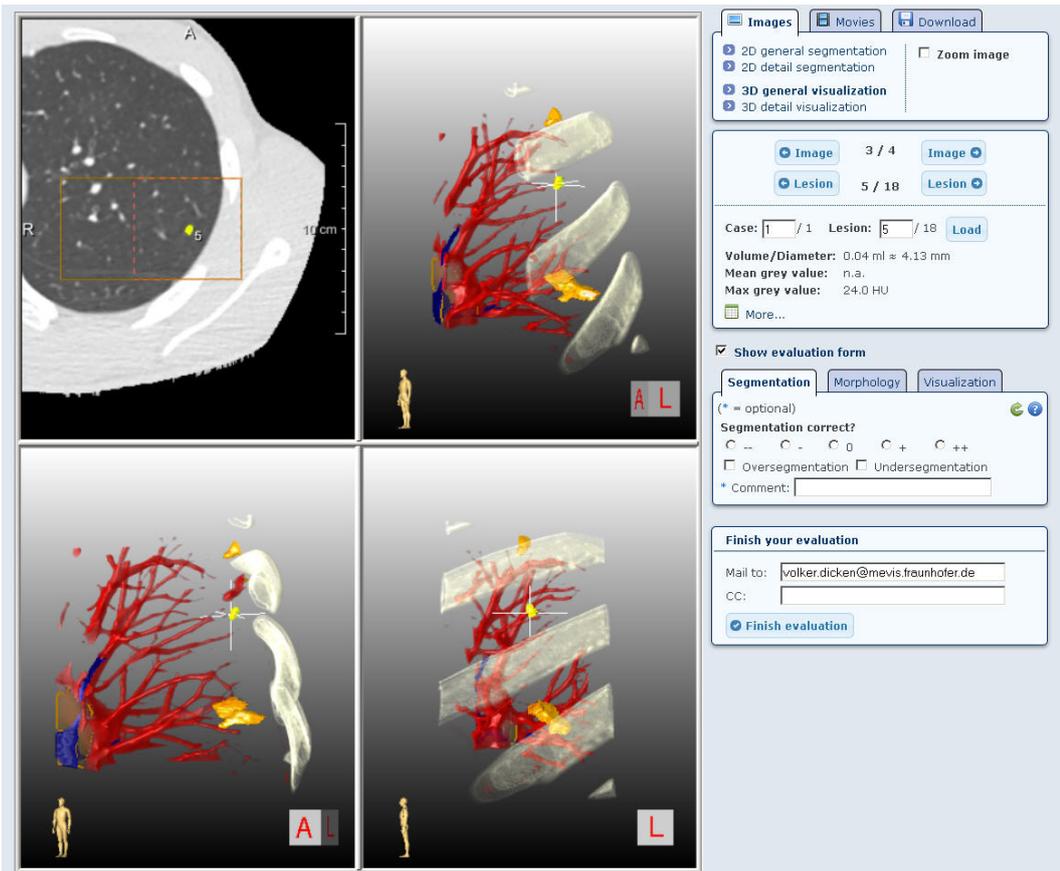
Die computergestützte Operationsplanung unter Zuhilfenahme von CAD-Verfahren und dreidimensionalen Visualisierungstechniken ist ein junges Anwendungsgebiet der Thoraxchirurgie, welches jedoch in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. So kann der Chirurg die Lokalisation und Größe der Metastasen und die Infiltration von Gefäßen oder Organen präoperativ am Bildschirm beurteilen, um daraus eine angemessene Zugangs- und Resektionsmethode ableiten zu können. In [Birr u. a., 2010] wird ein webbasiertes Verfahren für die Planungsunterstützung von Lungenoperationen präsentiert. Es wird eine Software vorgestellt, die die Markierungen eines CAD-Systems nutzt und diese Markierungen anschließend als Eingabe für einen Segmentierungsalgorithmus und eine kombinierte 2D/3D-Visualisierung verwendet. Die 2D-Visualisierung besteht in dem vorgestellten Konzept aus der schichtweisen Darstellung der Region-of-Interest (ROI) der jeweiligen Läsion und der dazugehörigen Segmentierungsmaske als Overlay. Die 3D-Visualisierung erfolgt mit Hilfe von lokalen direkten Volumenrenderings der Läsionen, wobei die hilusnahen Gefäße in die Darstellung einbezogen werden, um dem Chirurgen eine räumliche Orientierung zu bieten. Außerdem werden verschiedene Hervorhebungstechniken, wie unterschiedliche Farbabstufungen, 2D-Übersichtsdarstellungen, ein Fadenkreuz für die Lokalisation einer Läsion und automatisch generierte Kamerapositionen genutzt. Während die Metastasen eines Datensatzes in einem automatischen Prozess durchlaufen werden, fertigt die Software jeweils Screenshots der Visualisierungen an. Diese Screenshots werden auf einem Web-Server gespeichert und können vom Chirurgen in der Klinik über ein passwortgeschütztes Web Interface abgerufen werden (Abb. 3.6b).

In dem vorgestellten Konzept wird die Visualisierung als „Dienstleistung“ angeboten: Der CT-Datensatz wird verschlüsselt über das Internet versendet, die Daten werden extern ausgewertet, rekonstruiert und dem Chirurgen anschließend webbasiert zur Verfügung gestellt. Die Vorteile dieser Vorgehensweise liegen in den extra für die OP-Planung vorbereiteten Visualisierungen und dem schnellen und bequemen Zugriff auf die Bilddaten über die webbasierte Benutzeroberfläche. Nachteilig ist jedoch die fehlende Interaktionsmöglichkeit mit den 3D-Visualisierungen, da diese nur in Form von statischen Bildschirmfotos vorliegen. Dies erschwert die räumliche Orientierung, da die Kameraposition nicht nachträglich angepasst werden kann.

In einer Studie von [Limmer u. a., 2010a] wurde das Verfahren bei sechs Patienten mit Lungenmetastasen getestet und für die OP-Vorbereitung eingesetzt. In allen Fällen konnten dabei die in den vorbereiteten Visualisierungen zu sehenden Rundherde intraoperativ lokalisiert und reseziert werden. Laut Meinung der Autoren erlaubt die „Metastasenlandkarte“ dem Thoraxchirurgen eine exakte präoperative Lokalisationsdiagnostik und erleichtert ihm die intraoperative Detektion der Rundherde.



(a)



(b)

Abbildung 3.6.: (a) LESIONVIEWER für die Tumorverlaufskontrolle in radiologischen Forschungsstudien. Die auf einer Zeitleiste aufgetragenen RECIST-Stadien verdeutlichen den Therapieverlauf [Levy u. a., 2007]. (b) Webbasierte Planungsunterstützung von Lungenoperationen mit Screenshots von 2D- und 3D-Visualisierungen der Lungenmetastasen. Das Web Interface ermöglicht die gezielte Auswahl einer Läsion und ein Expertenfeedback über ein Online-Formular [Birr u. a., 2010].

3.2 Medizinische Dokumentation im klinischen Alltag

Die detaillierte medizinische Dokumentation ist die Grundvoraussetzung für eine zeitgemäße und qualitätsgerechte Behandlung von Patienten. Der Befundbericht als Teil dieses Systems umfasst alle von einem Arzt erhobenen körperlichen und/oder psychischen Erkrankungen eines Patienten. Wie Befunde zwischen Ärzten kommuniziert werden und welche Rolle Annotationen bei der Befundung spielen, wird im Folgenden geklärt.

3.2.1 Der Befund als Kommunikationsschnittstelle zwischen Ärzten

Die bei der Patientenaufnahme und im Rahmen der Anamnese gewonnenen Daten, wie Patientenstammdaten, Symptome, Allergien, Vorerkrankungen und Voruntersuchungen, werden zunehmend in elektronischen Patientenakten gespeichert. Wenn radiologische Untersuchungen vorgenommen wurden, werden die dabei anfallenden Bilddaten im DICOM⁴-Standard zusammen mit den fallspezifischen Informationen im Bildarchivierungs- und Kommunikationssystem (PACS⁵) gespeichert. Der gesamte Prozess der radiologischen Untersuchung wird im Radiologieinformationssystem (RIS) verwaltet, welches Teil eines fachabteilungsübergreifenden Krankenhausinformationssystems (KIS) ist. Der Radiologe erstellt unter Einbeziehung aller Patientendaten einen Befundbericht, der digital abgespeichert und von behandelnden Ärzten eingesehen werden kann. Der Befund enthält wichtige Informationen über die radiologischen Bilder und die darin festgestellten Abnormalitäten und deren Interpretation, aber auch Negativ-Befunde.

Strukturierte Befundung

Der Prozess der Befundung hat sich in den letzten Jahren nicht maßgeblich verändert. Trotz des digitalen Zeitalters werden vielerorts Befunde, auch Arztbriefe genannt, handschriftlich geschrieben und anschließend digitalisiert. Zum Teil werden bei der Befunderstellung Diktiergeräte als Unterstützung eingesetzt. Damit wird das vom Arzt gesprochene Befundprotokoll mit Hilfe einer Sprachsoftware in das digitale Befundsystem der Klinik eingespeist. Nicht standardisierte und rein auf Freitext basierende Arztbriefe sind oft unvollständig oder schlecht lesbar und führen so zu einer Barriere bei der ärzteübergreifenden Kommunikation. Mit Hilfe von strukturierten Befunden auf der Basis von einheitlichen und fest definierten Vokabeln kann dem entgegengewirkt werden. Das frei verfügbare RadLex [[Langlotz, 2006](#)] vereinheitlicht eine Vielzahl radiologischer Begriffe und stellt sie in Form eines elektronischen Lexikons zur Verfügung. Der Vorteil dabei ist, dass der Arzt

⁴DICOM: „Digital Imaging and Communications in Medicine“ - Offener Standard zum Austausch medizinischer Informationen

⁵PACS: „Picture Archiving and Communication System“ - System zur Verwaltung, Speicherung und zum Austausch medizinischer Bilddaten

aus einer Liste vordefinierter Ausdrücke auswählen kann und so im Gegensatz zur Freitext- oder Sprachvariante keine Probleme bei der Übertragung in das elektronische Dokument entstehen. [Weiss & Langlotz, 2008] bestätigen die Vorteile der strukturierten Befundung auf Basis von einheitlichen Lexika. Die Autoren heben jedoch auch hervor, dass die computergestützte Befundung in den gewohnten Arbeitsablauf integriert werden muss. Die Gefahr, dass der Radiologe mehr mit der Auswahl geeigneter Vokabeln und der Strukturierung des Arztbriefes beschäftigt ist, muss unterbunden werden. Die Eingabe von Freitext sollte daher, wie gewohnt, weiter möglich sein.

Kommunikation der Befundinformationen

Der Befundbericht dient als Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Radiologen, den behandelnden Ärzten und dem Patienten. Innerhalb des Krankenhaus- oder Radiologieinformationssystems können die Ärzte, mit den entsprechenden Zugriffsrechten ausgestattet, auf die Befunde zugreifen. Wenn der Befund dem Hausarzt des Patienten übermittelt werden soll, wird in der Regel eine CD angefertigt, auf der die Bilddaten gespeichert sind und sich mit Hilfe eines speziellen Abspielprogramms betrachten lassen. Der Befundbericht selber ist dabei eher statischer Natur: er enthält weder interaktive dreidimensionale Darstellungen, noch multimediale Elemente, wie z. B. Videos.

Mit dem Ziel der Unterstützung des Kommunikationskreislaufs zwischen dem befundenden Radiologen und den behandelnden Ärzten wird in [Arnold u. a., 2007] ein webbasiertes Reporting-System vorgestellt. Mit Hilfe einer Client-Server-Anwendung können die Bilddaten angezeigt und nachträglich mit Annotationen versehen werden. Einen Schritt weiter gehen die Autoren von [Eng u. a., 2002]. Sie entwickelten ein echtzeitfähiges Kollaborationssystem, mit dem der Radiologe und der behandelnde Arzt gleichzeitig einen DICOM-Datensatz betrachten und Abnormalitäten in den Bilddaten interaktiv diskutieren können. Dafür werden Chat- und Annotationsfunktionen bereitgestellt. Die Kommunikation erfolgt über einen zentralen Server. Clientseitig stehen den Ärzten Java-Applets für die Darstellung der medizinischen Daten zur Verfügung.

Bei onkologischen Fällen werden in vielen Kliniken regelmäßig interdisziplinäre Besprechungen durchgeführt, bei denen der Fall eines Patienten durchgesprochen wird. Oft sind dort auch Radiologen, Internisten und Ärzte weiterer Fachrichtungen, die für die Behandlung zuständig sind, anwesend. Bei solchen onkologischen Fallbesprechungen wird der Befund den Kollegen vorgestellt und die vorgeschlagenen Therapiemaßnahmen diskutiert. Durch die interdisziplinäre Einzelfallbesprechung wird jedem Patienten eine optimierte und maßgeschneiderte Behandlung ermöglicht. Bei solchen Tumorboards ist entscheidend, die Hauptaspekte und kritischen Punkte eines Falls mit Hilfe von Screenshots oder vorbereiteten Visualisierungen in kurzer Zeit darzustellen und zu besprechen. Rechenaufwändige 3D-Visualisierungen sind hierbei nicht zielführend.

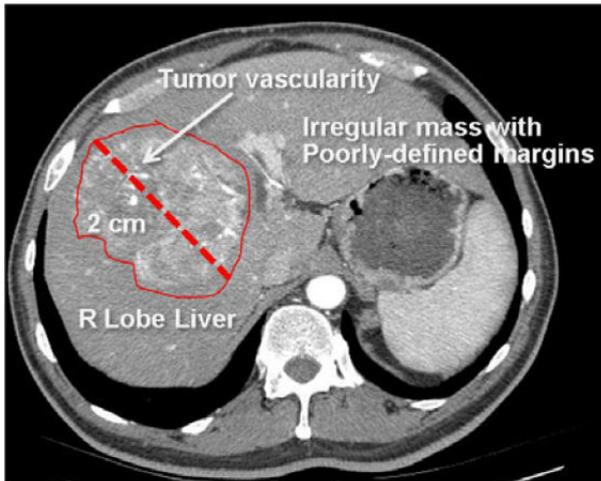


Abbildung 3.7.: Ausschnitt aus einem CT-Datensatz. Verschiedene Details wurden vom Radiologen annotiert: Text-Labels markieren anatomische Strukturen (z. B. einen Leberlappen), manuell eingezeichnete Linien und Maße heben den Tumor in der Darstellung hervor [Rubin u. a., 2008].

Neben den Tumorboard-Besprechungen gewinnt die Patientenaufklärung vor einer Operation einen immer größer werdenden Stellenwert. Der Patient wünscht sich verständlich aufbereitete Informationen zu seinem Krankheitsstand und zur geplanten Therapie. Laut [Hermann, 2002] können aussagekräftige 2D- und 3D-Darstellungen zur Qualität der präoperativen Patientenaufklärung beitragen. Dem Patienten können die Operationsschritte und die damit verbundenen Komplikationen verdeutlicht werden. Darüber hinaus kann mit der computeranimierten Aufklärung eine Vertrauensbasis geschaffen und die Angst vor der Operation minimiert werden.

3.2.2 Annotationen in Befunden

Nicht nur für die Patientenaufklärung, sondern vor allem bei der Befundung und der Kommunikation der Befundungsergebnisse können Annotationen sehr hilfreich sein. Annotationen können Markierungen, textuelle Hinweise oder Symbole sein, die entweder persistent in den Bilddaten „eingebrennt“ oder unabhängig von den Bilddaten in XML-Form oder als Vektorgrafiken gespeichert und verwaltet werden. Annotierte Befunde ermöglichen es dem Radiologen, bestimmte Details in den Bildern hervorzuheben und damit einen direkten Bezug zum geschriebenen Textbefund herzustellen (Abb. 3.7). Auf Seiten des behandelnden Arztes erhöhen annotierte Befundberichte das Verständnis über die radiologische Untersuchung und der Interpretation des Radiologen. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die große Zahl an Einzelschichten so auf wenige, aber wesentliche „Key-Images“ reduziert werden kann. Die Autoren von [Reiner & Siegel, 2006] behaupten sogar, dass annotierte Bildbefunde eines Tages den klassischen handgeschriebenen Textbefund komplett ablösen werden.

3.3 Benutzerzentrierte Entwicklung chirurgischer Applikationen

Die Hauptanwender des zu implementierenden Systems sind Thoraxchirurgen. Im Folgenden werden Vorschläge und Richtlinien für die benutzerorientierte Entwicklung von chirurgischen Applikationen vorgestellt.

3.3.1 Gestaltung chirurgischer Planungssoftware

Der Entwurf von Software-Benutzerschnittstellen sollte sich nach einschlägigen Richtlinien orientieren, z. B. [Shneiderman u. a., 2009] oder [Loranger & Nielsen, 2008]. Für das spezielle Gebiet der computergestützten Chirurgie sind solche Richtlinien bisher nicht bekannt. Daher wurden in [Mühler u. a., 2008] die typischen Arbeitsschritte eines Chirurgen analysiert und daraus Anforderungen an eine chirurgische Planungssoftware abgeleitet.

Laut [Mühler u. a., 2008] lassen sich Chirurgen wie folgt charakterisieren: Sie sind medizinische Experten, die meist nur geringe PC-Erfahrung haben und im Gegensatz zu einem Radiologen wenig mit dem Computer arbeiten. Weiterhin profitieren Chirurgen stark von der dreidimensionalen Repräsentation der patientenindividuellen Anatomie. Sie haben jedoch in der Regel wenig Erfahrungen mit der Interaktion von 3D-Modellen.

Der Chirurg nutzt eine chirurgische Planungssoftware mit dem Ziel der Unterstützung bei der Entscheidungsfindung. Die Fragen nach der Operabilität oder des erfolgversprechendsten Zugangsweges sollen mit der Software beantwortet werden. Aus der Beobachtung und Befragung von Chirurgen lassen sich einige wiederkehrende Arbeitsschritte identifizieren:

- Die 2D-Schichtdaten werden exploriert, wobei die Fensterung der Daten geändert wird oder Bildausschnitte gewählt werden.
- Für den räumlichen Eindruck der Daten werden dreidimensionale Visualisierungen exploriert. Dabei werden Strukturen ein- und ausgeblendet und die Szene rotiert, verschoben und gezoomt.
- Einzelne Strukturen werden gezielt untersucht, wobei Kontextelemente für die Orientierung wichtig sind.
- Zum Teil werden Annotationen (eigene Bemerkungen, Messwerte) hinzugefügt.
- Die Ergebnisse der Operationsplanung werden mit Hilfe von Screenshots und Videos dokumentiert.

[Mühler u. a., 2008] definieren aus der Analyse der Nutzer und deren Aufgaben zwei Grundregeln für die Gestaltung chirurgischer Software:

1. „Weniger ist mehr“: Chirurgen wünschen sich einfache Applikationen mit einer geringen Anzahl an Schaltflächen. Die Oberfläche sollte nicht zu überladen sein und Interaktionsmöglichkeiten nur dann eingeblendet werden, wenn sie tatsächlich nötig sind.
2. „Weniger Flexibilität, mehr Führung“: Chirurgen bevorzugen eine klare Schritt-für-Schritt-Abfolge bei der Planung einer Operation. Der aus der klinischen Praxis gewohnte Workflow sollte dabei auch von der Software abgebildet werden.

3.3.2 Szenariobasierte Entwicklung

Eine Weiterentwicklung der im vorherigen Abschnitt genannten Richtlinien wird in [Cordes u. a., 2009] beschrieben. Die Autoren geben Empfehlungen für die szenariobasierte Konzeption chirurgischer Trainings- und Planungssysteme. Anhand von Szenarien wurden dabei typische klinische Workflows bei der Planung halschirurgischer Eingriffe analysiert und somit eine gemeinsame Kommunikationsbasis zwischen Software-Entwicklern und Ärzten geschaffen. Bei der szenariobasierten Entwicklung werden Handlungsabläufe und Anforderungen aus Befragungen potentieller Endanwender und der Beobachtung bei ihrer täglichen Arbeit abgeleitet. Zu Beginn werden „User Stories“ entwickelt, die, beispielsweise in Form von Tagebucheinträgen oder Interviews, ausführlich die Aktivitäten und Aufgaben der Benutzer beschreiben. Durch einen Prozess der Abstraktion und Zusammenfassung ergeben sich daraus „Conceptual Scenarios“, in denen die Anforderungen an die umzusetzende Software definiert und erste Konzeptideen herausgearbeitet werden. Teilaspekte und Besonderheiten der Szenarien werden dabei in „Concrete Scenarios“ weiter verfeinert, um spezielle Funktionen und Sachverhalte auf Basis von prototypischen Umsetzungen zu erklären. Mehrere Concrete Scenarios werden am Ende zu „Use Cases“ zusammengefasst, die alle notwendigen Interaktionen der Anwender sowie die komplette Funktionalität des Systems einschließen [Cordes u. a., 2009].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird in Kapitel 4 basierend auf typischen Szenarios der Thoraxradiologie und -chirurgie der Entwurfsprozess des Systems beschrieben. Zusätzlich werden dabei „User Personas“ genutzt, um repräsentative Endanwender zu charakterisieren. User Personas sind eine Methode für die Modellierung von Endbenutzern einer Anwendung. Sie beinhalten Ziele, Verhaltensmuster, Einstellungen sowie persönliche Merkmale der Personen. Anhand eines Bildes, eines Namens sowie der Berufsbezeichnung wird das fiktive Nutzermodell „plastischer“ und realitätsnaher. Solche Personenbeschreibungen eignen sich sehr gut, um bei der Entwicklung interaktiver Systeme den eigentlichen Nutzer und dessen Kenntnisse und Anforderungen im Hinterkopf zu behalten [Petrovic u. a., 2010].

Entwurf des Visualisierungs- und Interaktionskonzeptes

In diesem Kapitel wird der Entwurfsprozess des Visualisierungs- und Interaktionskonzeptes erläutert. Anhand von „User Personas“ erfolgt im ersten Abschnitt die Charakterisierung typischer Endanwender. Die medizinische Ausbildung, die typischen Aufgaben, Computer-Kenntnisse sowie Wünsche und Anforderungen der Benutzer stehen dabei im Vordergrund. Entsprechend der in Abschnitt 3.3.2 dargestellten Vorgehensweise bei der szenariobasierten Entwicklung von interaktiven Systemen werden im Anschluss in Abschnitt 4.2 drei unterschiedliche „User Stories“ beschrieben. Anhand ausgewählter klinischer Fälle wird der Ist-Zustand in der onkologischen Tumordiagnostik und -Therapie vorgestellt. Die typischen Workflows der Thoraxradiologie und -chirurgie sowie konkrete Vorstellungen der Ärzte bzgl. computergestützter Analysen werden dabei deutlich gemacht. Der Abschnitt 4.3 beschreibt, welche Technologie sich am besten eignet, um die genannten Anforderungen umzusetzen. Im Anschluss daran wird in Abschnitt 4.4 geklärt, welche medizinischen 2D- und 3D-Visualisierungstechniken in unterschiedlichen Anwendungsfällen zielführend sind. Zusammen mit medizinischen Experten werden verschiedene Hervorhebungsmethoden erarbeitet und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Danach erfolgt in Abschnitt 4.5 basierend auf den User Personas und User Stories die Entwicklung von „Conceptual Scenarios“. Dadurch werden die Anforderungen des Systems zusammengefasst, allgemeine Designvorschläge erstellt und das Interaktionskonzept verdeutlicht. Im letzten Abschnitt 4.6 werden aus den Conceptual Scenarios mehrere „Concrete Scenarios“ abgeleitet, in denen bestimmte Sachverhalte und spezielle Funktionen genau erklärt und veranschaulicht werden. Auf eine gesonderte Darstellung von „Use Cases“ wird in dieser Arbeit verzichtet, da Benutzerinteraktionen in den Conceptual und Concrete Scenarios mit beschrieben werden.

4.1 User Personas

Im Folgenden werden einige typische Endbenutzer der Anwendung modelliert. Die fiktiven Personen werden mit Hilfe eines Namens, der Berufsbezeichnung und eines Fotos vorgestellt. Anhand der Darstellung der medizinischen Ausbildung, der Aufgaben und Fertigkeiten sowie den Wünschen und Anforderungen der Personen wird ein möglichst realitätsnahes Abbild der Anwender erzeugt. Die Angaben sind nicht „frei erfunden“, sondern basieren auf Beobachtungen und Befragungen der real existierenden Personen.

4.1.1 Der Thoraxchirurg A: Chefarzt Prof. Dr. Gerhard Helmholtz

- 53 Jahre alt, verheiratet, 2 Kinder
- Ausbildung: Nach Medizin-Studium spezialisiert auf Thorax- und Viszeralchirurgie; Übt Beruf seit 21 Jahren aus
- Aufgaben: Diagnostik und Therapie von Lungen- und Gefäßerkrankungen; Planung, Durchführung und Nachsorge von operativen Eingriffen an der Lunge, insbesondere im Rahmen der Tumorbehandlung; Patientenaufklärung
- Computer-Kenntnisse: Basiswissen; Nutzt den Computer nicht täglich, hauptsächlich für E-Mail und Kalender-Funktionen



„Im Rahmen von Tumorboard-Besprechungen möchte ich gerne 3D-Visualisierungen der Lungenstrukturen einsetzen. So kann ich auf bestimmte anatomische und pathologische Sachverhalte hinweisen und zusammen mit meinen Fachkollegen ein adäquates Therapiekonzept für den Patienten erarbeiten. Das System sollte es mir ermöglichen, in kurzer Zeit einen Überblick über Anzahl und Lage der Tumoren zu bekommen, damit die Operabilität des Patienten eingeschätzt und ein chirurgischer Eingriff optimal geplant werden kann. Außerdem sollte die Anwendung auch im OP nutzbar sein, um die intraoperative Situation mit der präoperativen Planung abzugleichen. Ich möchte ein System, das einfach zu bedienen ist und in dem ich mich schnell zurecht finde. Wenn ich während des Planungsprozesses durch einen Anruf von der Bedienung der Software abgelenkt werde, sollte ich mich anschließend schnell wieder orientieren können, um die Arbeit fortzusetzen. Bisher habe ich bei OP-Planungen nur 2D-Schichtdaten verwendet, die oft nicht

¹Bildquelle: [Flickr: Bildjournalismus HS Magdeburg, 2009a]

ausreichen, um komplexe anatomische Gegebenheiten abzubilden. Als Unterstützung wünsche ich mir aussagekräftige computergenerierte 3D-Modelle der Lungenstrukturen, sodass Lage- und Größenbeziehungen dreidimensional eingeschätzt werden können. Ich kenne mich zwar nicht mit interaktiven 3D-Visualisierungen aus, bin in der Hinsicht aber lernbereit und offen für neues. Von dem neuen System wünsche ich mir, dass auch ich als wenig computer-erfahrener Anwender es bedienen kann und dass leicht verständliche Hilfsfunktionen angeboten werden. Speziell für die 3D-Modelle sollte deutlich gemacht werden, wie diese mit Tastatur oder Maus aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden können. Ein Schritt-für-Schritt-Konzept wäre sicher hilfreich, um mir als Computer-Laien die Bedienung zu erleichtern. Ich könnte mir auch gut vorstellen, dreidimensionale Darstellungen unterstützend bei Gesprächen mit angehenden Fachärzten zu nutzen. Anhand der 3D-Rekonstruktion könnte ich auf kritische Punkte hinweisen und dabei meine Erfahrungswerte an die Auszubildenden weitergeben. Somit kann in einem kollaborativen Prozess gemeinsam ein Therapiekonzept erarbeitet und umgesetzt werden.“

4.1.2 Der Thoraxchirurg B: Assistenzarzt Dr. Johannes Planck

- 32 Jahre alt, nicht verheiratet, keine Kinder
- Ausbildung: 6 Jahre Medizin-Studium und anschließende Promotion; Befindet sich derzeit in einer fünfjährigen Ausbildung zum *Facharzt für Thoraxchirurgie* (2. Lehrjahr)
- Computer-Kenntnisse: Fortgeschrittene Kenntnisse; Hat im Rahmen spezieller Lehrveranstaltungen schon erste Erfahrungen mit computerbasierten OP-Planungssystemen gesammelt und dabei den Umgang mit interaktiven 3D-Darstellungen gelernt.



„Ich befinde mich noch in der Ausbildung und habe daher noch nicht die nötige Erfahrung und Routine, die man braucht, um Operationsrisiken und geeignete Resektionstechniken präoperativ zu beurteilen. Ich wünsche mir vor allem dreidimensionale Visualisierungen der Lungenstrukturen für die Vorbereitung eines operativen Eingriffs. Komplizierte anatomische und pathologische Zusammenhänge könnten so, meiner Meinung nach, besser

²Bildquelle: [Flickr: Bildjournalismus HS Magdeburg, 2009b]

und schneller verdeutlicht werden, als rein auf Basis der Schichtdaten. Vor allem im Bereich der hilären Strukturen ist es oft nicht einfach, die sich verzweigenden Blutgefäße in den 2D-Schichtdaten genau zu identifizieren und voneinander zu separieren. 3D-Visualisierungen könnten hier eine sinnvolle Ergänzung sein, um den Verlauf der Gefäße besser beurteilen und ggf. notwendige Gefäßrekonstruktionen vorab einschätzen zu können. Zusätzlich zu den 3D-Visualisierungen wäre es angebracht, wenn synchron zu den 3D-Modellen die Original-2D-Daten abgerufen werden können, sodass der Zusammenhang zwischen den Schichtdaten und den resultierenden 3D-Rekonstruktionen einfach hergestellt werden kann. Des Weiteren wünsche ich mir eine Unterstützung bei Diskussionen mit Kollegen sowie bei Aufklärungsgesprächen mit Patienten und Angehörigen. Die Präsentation eines Tumorfalles bei Tumorboard-Diskussionen muss schnell und unkompliziert erfolgen – daher ist es essentiell, dass die 3D-Darstellungen schnell abrufbar und leicht bedienbar sind. Wichtige Strukturen sollten in der 3D-Darstellung kontexterhaltend hervorgehoben werden können. Es sollte möglich sein, die 3D-Objekte dabei selektiv ein- und auszublenden, sodass auf die Hauptaspekte und kritischen Punkte des Falls hingewiesen werden kann.“

4.1.3 Der Radiologe: Oberarzt Dr. Stefan Leibniz

- 42 Jahre alt, verheiratet, 1 Kind
- Ausbildung: Nach Medizin-Studium fünfjährige Ausbildung zum *Facharzt für Radiologie*; Seit 10 Jahren in dem Beruf tätig
- Aufgaben: Durchführung und Auswertung von CT- und MRT-Untersuchungen; Diagnostik, Befundung und Therapie von Erkrankungen; Patientenaufklärung
- Computer-Kenntnisse: Fortgeschrittene Kenntnisse; Nutzt den Computer privat und beruflich täglich, ist sehr erfahren im Umgang mit komplexen Benutzeroberflächen aufgrund der täglichen Arbeit mit den zum Teil sehr funktionsmächtigen Applikationen der radiologischen Workstations.



„Das System soll einen Mehrwert gegenüber der klassischen Befundung und Verlaufskontrolle von Lungenläsionen bieten. Wünschenswert wäre es, wenn

³Bildquelle: [Flickr: galleryquantum, 2009]

der klassische Textbefund um vorbereitete 2D-Bilder und interaktive 3D-Visualisierungen angereichert werden könnte, damit sowohl Tumorboard-Besprechungen als auch Patientengespräche effektiver durchgeführt werden können. Einfache farbige Darstellungen könnten dazu beitragen, dass die Ergebnisse von Verlaufsuntersuchungen besser zwischen den Ärzten kommuniziert werden, als rein auf Basis eines langen Fließtextes. Weiterhin könnte der Verlauf einer Chemo- oder Strahlentherapie einem Patienten verständlicher gemacht werden, wenn dabei unterstützend bildliche Darstellungen des Therapieverlaufs genutzt werden. Es wäre schön, wenn die verschiedenen Daten, die bei RECIST-Studien anfallen (Durchmesser und Volumina der Läsionen, Stadien-Einteilungen, Verlaufsuntersuchungen, Parameter der Bildgebung usw.) in einem strukturierten Report zusammengefasst und die Messdaten zusätzlich in Diagrammen dargestellt werden. Das System sollte sich nahtlos in das klinikinterne System integrieren lassen und einfach bedienbar sein.“

4.2 User Stories

Im Folgenden wird anhand von drei typischen onkologischen Fällen der Ist-Zustand in der Thoraxradiologie und -chirurgie beschrieben. Die hauptsächlichen Arbeitsschritte werden erläutert, um die Aufgaben, Fragestellungen und Präferenzen der Benutzer zu verstehen. Die User Stories basieren zum Teil auf real existierenden Befunden und OP-Berichten (siehe Anhang A) und auf Gesprächen mit erfahrenen Mitarbeitern bei Fraunhofer MEVIS.

4.2.1 User Story 1

Bei einem 59-jährigen Patienten (Kennung: HL-NK-Me) wurde ein Gallengangskarzinom, eine sehr selten auftretende Tumorform, festgestellt. Die Diagnose des Tumors erfolgte erst sehr spät, sodass er bereits in die Lunge gestreut hatte. Im Rahmen einer OP sind Primärtumor und benachbarte Lymphknotenmetastasen restlos entfernt worden. Die Lungenmetastasen wurden in einer Röntgen-Thoraxaufnahme festgestellt und in einem anschließenden CT abgeklärt.

Der Radiologe dokumentiert die Lungenläsionen (insgesamt 18) in dem radiologischen Befund und fügt einige Anmerkungen zur Größe und Lokalisation hinzu. Er scrollt dazu durch den 2D-Schichtdatensatz und beurteilt auffällige Strukturen mit Hilfe von verschiedenen Fensterungen. Neben den Lungenrundherden dokumentiert er einige vergrößerte pulmonale Lymphknoten (Lymphknotenmetastasen). In dem Befundbericht werden außerdem auch Negativbefunde festgehalten, bei-

spielsweise, dass keine Pleuraergüsse vorliegen und abdominal keine Auffälligkeiten festzustellen sind. Des Weiteren nimmt der Radiologe Bezug auf Voruntersuchungen. Er protokolliert, dass im Vergleich zur vorherigen Aufnahme neue pulmonale Rundherde hinzu gekommen und einige Läsionen größer geworden sind.

Der Metastasen-Fall wird auf einer interdisziplinären Tumorboard-Besprechung mit anderen Fachärzten der Klinik (Chirurgen, Internisten, Radiologen) besprochen. Es stellt sich die Frage, ob der Patient kurativ behandelbar ist und welches onkologische Therapiekonzept zum Ziel führt.⁴ Laut radiologischem Befund sind keine weiteren Organe von Metastasen befallen. Die Basiskriterien für eine operative Entfernung der Lungenmetastasen sind damit gegeben (Primärtumor unter Kontrolle, keine Metastasierung in anderen Organen). Die Metastasen der Lunge sollen in einer Laseroperation angegangen werden, da die Prognose für eine restlose Entfernung der Raumforderungen gut ist (die Läsionen liegen überwiegend peripher und infiltrieren keine zentralen Strukturen). Zur Verdeutlichung des Sachverhaltes werden während der Besprechung einzelne Schichten aus dem PACS abgerufen und über einen Beamer auf einer großen Leinwand gezeigt. Ausgefeilte 2D- oder 3D-Visualisierungen kommen dabei nicht zum Einsatz.

Nach der Tumorboard-Besprechung wird die Operationstaktik dem Patienten und seinen Angehörigen mitgeteilt. Der Patient hat dabei Schwierigkeiten, sich das komplexe Geschehen vorzustellen und stellt viele Fragen zur OP und zu den möglichen Komplikationen. Diese Fragen werden vom Chirurgen umfassend beantwortet, jedoch ohne Verwendung von bildlichen Darstellungen.

Der behandelnde Chirurg plant die Operation mit Hilfe des radiologischen Befundberichtes und den dazugehörigen Bilddaten vorab an der Workstation. Der Chirurg scrollt dafür durch den CT-Schichtdatensatz und analysiert die von dem Radiologen beschriebenen Strukturen. Im Rahmen des operativen Eingriffs ist es essentiell, alle Läsionen zu entfernen, dabei möglichst viel gesundes Gewebe zu erhalten und genügend Sicherheitsabstand zu lebenswichtigen Organen oder Gefäßen einzuhalten. Des Weiteren ist es wichtig, die Läsionen vollständig inklusive eines Sicherheitsrandes von mehreren Millimetern zu entfernen, damit auch Metastasen-Zellen in der unmittelbaren Umgebung des Herdes mit reseziert werden. Bei der Operationsvorbereitung ist es daher notwendig, Fragen zur Anzahl, Lokalisation, Ausdehnung und Gefäßinfiltration der Rundherde abzuklären. Dies erfolgt rein auf Basis der 2D-Bilddaten – dem Chirurgen stehen im klinischen Alltag keine interaktiven dreidimensionalen Darstellungen der Lunge und der Läsionen zur Verfügung. Der Prozess der OP-Planung ist daher vor allem bei multiplen Raumforderungen zeitaufwändig und mühselig, da Lage- und Größenbeziehungen anhand der 2D-Daten nur schwer beurteilt werden können und eine lange Erfahrung des Chirurgen voraussetzen.

⁴Gallengangskarzinome werden oft erst in einem nicht zu heilenden Stadium diagnostiziert. Tumoren der Gallenwege sprechen meist schlecht auf chemotherapeutische Behandlungen an. Die vollständige chirurgische Entfernung des Tumors ist daher oft die einzige kurative Therapie bei diesem Krankheitsbild [Gumpert, 2010].

Aus den 2D-Bildern rekonstruiert der Chirurg ein „mentales 3D-Modell“ der Lunge und fertigt zusätzlich einige Skizzen für die OP-Planung an (Abb. A.3). Aufgrund der Vielzahl der Läsionen, der bilateralen Verteilung der Herde sowie der guten Erreichbarkeit wird als Operationsmethode eine laserchirurgische Behandlung festgelegt. Die anterolaterale Thorakotomie (Lagerung in Rückenlage) soll als Zugangsweg dienen. Die Operation wird auf zwei Tage verteilt.

Die beiden chirurgischen Eingriffe an linker und rechter Lunge werden erfolgreich durchgeführt. Alle 18 befundeten Metastasen können vollständig mit dem Laser bzw. zum Teil mit atypischen Resektionen (Keilresektionen) entfernt werden. Die Rundherde sowie die Lymphknotenmetastasen werden dabei vom Chirurgen erastet und anschließend mit dem Laser herausgeschnitten. Die Resektate werden in Probengefäßen abgelegt, beschriftet und an die Pathologie weitergeleitet. Die anschließenden pathologischen Untersuchungen geben Aufschluss darüber, ob es sich bei den Resektionen tatsächlich um Metastasen gehandelt hat und welchem Tumortyp sie entsprechen. Womöglich entstammen die Metastasen sogar einem anderen wachsenden Primärtumor, der in den Bilddaten nicht eindeutig zu erkennen war. Der Chirurg schreibt nach dem Eingriff einen Operationsbericht und speichert diesen im klinikinternen System ab. Dieser Bericht enthält u. a. die Namen der Operateure und Assistenten sowie Informationen über den Operationsverlauf (Abb. A.1 und Abb. A.2).

Anforderungen und Wünsche der Anwender

Aus Sicht der Ärzte besteht in einigen Punkten des klinischen Workflows Verbesserungspotential. Die manuelle Suche nach Metastasen und deren Befundung ist kritisch anzusehen, da sie vor allem bei starker Metastasierung viel Zeit in Anspruch nimmt. Für die exakte Detektion aller Rundherde soll für zukünftige Metastasen-Fälle ein CAD-System in der Klinik installiert und als Unterstützung für den Radiologen eingesetzt werden.

Zur Hilfestellung bei der chirurgischen Entscheidungsfindung, sowie der effektiven Informationsvermittlung bei Tumorboards und Patientengesprächen sollen zukünftig aussagekräftige, vorbereitete und mit wenig Aufwand bedienbare 3D-Darstellungen genutzt werden. Es ist der klinikinterne Einsatz einer Software geplant, mit der auf Basis von dünnenschichtigen, hochaufgelösten CT-Aufnahmen entsprechende 3D-Rekonstruktionen der Lungenstrukturen generiert werden können. Die Software soll sich nahtlos in das Krankenhaus-IT-System und den klinischen Workflow integrieren lassen und zukünftig bei der Planung von Lungenoperationen als Hilfestellung eingesetzt werden. Gelegentlich sind Operationen aufgrund von Infiltrationen in zentrale Strukturen nicht wie geplant durchführbar und müssen erfolglos abgebrochen werden. Mit Hilfe von 3D-Visualisierungen können dagegen komplexe anatomische Situationen vorab am Computer patientenindividuell bewertet und das Operationsrisiko dadurch besser abgeschätzt werden. Aus Sicht des Thoraxchirurgen sollen mit Hilfe von computerbasierten Analysen und in-

teraktiven 3D-Visualisierungen verschiedene Fragestellungen beantwortet werden können:

- **Resektabilität und Risikoabschätzung:** Können Primärtumor und Metastasen vollständig und rückstandslos entfernt und der Patient damit geheilt werden? Sind zentrale Strukturen, z. B. die Stammbronchien, so stark infiltriert, dass eine OP unmöglich wird und lediglich eine palliative Therapie angewendet werden kann?
- **Operabilität:** Erlaubt der allgemeine Gesundheitszustand des Patienten sowie Herz- und Lungenfunktion die Entfernung von Lungengewebe?
- **Läsionenanzahl, -lokalisierung und -größe:** Wieviel Läsionen gibt es insgesamt und in welchen Lungenlappen liegen sie? Liegen sie eher zentral oder peripher und wachsen sie über Lappengrenzen hinaus?
- **Resektionsmethode:** Können die Herde mit einer parenchymsparenden Laserresektion entfernt werden oder muss aufgrund großflächigen Befalls eine Lobektomie oder gar Pneumektomie durchgeführt werden?
- **Lymphknotenmetastasen:** Wo liegen die vergrößerten Lymphknoten, die neben der Operation der Lungenrundherde ebenfalls mit entfernt werden?

Im Rahmen der präoperativen Risikoanalyse sind vor allem die Gefäße interessant, die im Durchmesser etwa 3–6 mm groß sind. Bei einer Verletzung dieser Gefäße während der Operation kann es zu starken Blutungen kommen und die Gefäße müssten aufwändig rekonstruiert werden. Die 3D-Visualisierung sollte es dem Chirurgen daher ermöglichen, die Darstellung der Blutgefäße interaktiv zwischen „grob“ (große Gefäße) und „fein“ (kleine, periphere Gefäße) zu wechseln.

Bei Lungenoperationen wird meist nur eine Lungenseite während eines Eingriffs operiert. Bei der OP-Planung wird daher auch nur ein Lungenflügel betrachtet und bei der Analyse lappenweise vorgegangen. Die Software soll es dem Arzt daher ermöglichen, einen Lungenflügel einzeln oder beide gleichzeitig darzustellen. Weiterhin ist das Ein-/Ausblenden von einzelnen Lungenlappen, Blutgefäßen und Bronchien wünschenswert, um nur diejenigen anatomischen Strukturen auszuwählen, die für die aktuelle Planungssituation benötigt werden. So kann sich der Arzt auf Teilaspekte der komplexen Visualisierung konzentrieren, ohne von anderen Strukturen abgelenkt zu werden.

Aus Sicht des Chirurgen ist nicht nur die globale 3D-Repräsentation der Lungenstrukturen bei der OP-Vorbereitung hilfreich, sondern auch lokale Darstellungen einzelner Läsionen. Aus der klinischen Routine ist der Arzt die Beurteilung der Rundherde auf Basis zweidimensionaler Bilddaten gewohnt. Daher sollte es dem Arzt möglich sein, zwischen der abstrakten 3D-Visualisierung und der detaillierten 2D-Darstellung zu wechseln. So kann der Bezug zu den Originaldaten hergestellt werden und Bild-Details wahrgenommen werden, die in dem 3D-Modell nicht erkennbar sind. Vorstellbar sind dabei schichtweise 2D-Ausschnitte der ROI einer

Läsion, die in verschiedenen Orientierungen (axial, sagittal, coronal) betrachtet werden können. So können beispielsweise Aussagen zu Gefäß- oder Pleurainfiltrationen getroffen werden, die rein auf Basis der abstrahierten 3D-Darstellung nicht immer zweifelsfrei zu beantworten sind.⁵

4.2.2 User Story 2

Bei einer 53-jährigen Patientin wurde vor zwei Jahren ein Mammakarzinom diagnostiziert. Der Tumor war etwa 1 cm groß und konnte im Rahmen einer brusterhaltenden chirurgischen Therapie erfolgreich entfernt werden.⁶ Nach der Operation musste sich die Patientin einer kombinierten Chemo-/Strahlentherapie unterziehen, um möglicherweise verbliebene Tumorzellen abzutöten. Die chemotherapeutische Behandlung erfolgte in mehreren Zyklen (sechs mal im Abstand von zwei Wochen). Die Strahlentherapie begann vier Wochen nach der Operation und wurde über eine Dauer von sechs Wochen durchgeführt.

Im Rahmen der Nachsorge wurden in einer Röntgen-Thoraxuntersuchung knotenartige Veränderungen in der Lunge festgestellt. Ein zur Abklärung angefertigtes CT legt den Verdacht nahe, dass es sich bei den verdächtigen Strukturen um Lungenmetastasen handelt, die vermutlich dem Brusttumor entstammen.⁷ Im Rahmen weiterer Untersuchungen soll dieser Befund weiter abgeklärt und wenn nötig, eine Therapie eingeleitet werden.

Die Ergebnisse der Verlaufsuntersuchungen sollen im Rahmen einer klinischen Studie gesammelt werden. Dafür ist es notwendig, die Aufnahmeparameter der Bildgebung, Datumsangaben, Läsionenmarkierungen, -anzahl und -größenänderungen und die jeweiligen Therapiestadien anhand der RECIST-Kriterien [Eisenhauer u. a., 2009] zu dokumentieren. Die Dokumentation nimmt der untersuchende Radiologe vor. Er führt die Untersuchungen durch und protokolliert die Daten in dem radiologischen Befund. Die bei der Analyse der CT-Untersuchung gefundenen Raumforderungen werden mit Anmerkungen zur Größe und Lokalisation dokumentiert. Der Radiologe scrollt dabei an der Workstation durch den Schichtbilddatensatz und nutzt unterschiedliche Fensterungen. Der Datensatz wird auf Unregelmäßigkeiten untersucht, evtl. befallene Lymphknoten protokolliert und Grauwerte festgehalten.⁸

⁵Wobei auch in den 2D-Schichtdaten nicht immer zweifelsfrei erkennbar ist, ob es sich bei einer auffälligen Struktur um eine tumorartige Veränderung oder den Teil eines Gefäßes handelt. Limitierend sind hierbei die Aufnahmeparameter der CT-Untersuchung, das Rauschen in den Daten und die Kontrastmittelmenge.

⁶Eine brusterhaltende Therapie ist dann möglich, wenn das Karzinom in einem prognostisch günstigen Tumorstadium entdeckt wird und den Brustmuskel noch nicht infiltriert hat [Janni u. a., 2005].

⁷Mammakarzinome metastasieren bevorzugt in die Lunge [Schirren u. a., 2006].

⁸Beispielsweise sind Raumforderungen mit sehr hohen Grauwerten (im Durchschnitt z. B. > 300 HU) eher Verkalkungen als bösartige Strukturen.

Laut RECIST sollen maximal fünf Raumforderungen pro Organ und 10 insgesamt identifiziert und vermessen werden [Eisenhauer u. a., 2009]. Der Radiologe nimmt die zwei größten Läsionen, die sich am besten zur wiederholten genauen Messung eignen. Diese Läsionen werden als Target-Läsionen bezeichnet. Er ermittelt nach Augenmaß die größte axiale Schicht eines gefundenen Rundherdes und zeichnet manuell mit der Maus einen Durchmesser in die Schicht ein. Die Software der Workstation zeigt ihm den jeweiligen Messwert an, der anschließend im Befundbericht festgehalten wird. Außerdem beurteilt der Radiologe Form, Lokalisation und Infiltration des Herdes. Die Durchmesser der beiden größten Läsionen (engl. *longest diameter*, LD) werden addiert und als Ausgangssumme vermerkt. Die Veränderung dieses Wertes ist ein Indikator für den Erfolg oder Misserfolg der Therapie. Im Rahmen der RECIST-Studie werden dazu alle 3–6 Monate Folgeuntersuchungen (Follow-Up-Scans) vorgenommen und Größenänderungen oder das Neuauftreten von Läsionen kontrolliert. Die Follow-Up-Untersuchungen sollten im Vergleich zur Basisuntersuchung identische Aufnahmeprotokolle haben, um eine gleichbleibende Qualität und Aussagekraft der Studie zu gewährleisten.⁹

Neben den Target-Läsionen werden alle weiteren Raumforderungen und erkrankten Regionen identifiziert und dokumentiert. Diese Läsionen werden als Non-Target-Läsionen bezeichnet und müssen nicht genau vermessen werden, sollten aber trotzdem im Befund vermerkt sein. Der Radiologe dokumentiert die Untersuchung mit seinem Diktiergerät und digitalisiert den gesprochenen Text danach mit Hilfe einer Sprachsoftware. Gegebenenfalls müssen einzelne Wörter, die von der Software nicht richtig erkannt worden sind, nachkorrigiert werden. Der Befundbericht wird im klinikinternen RIS gespeichert, die Thorax-Röntgenuntersuchungen und CT-Aufnahmen des Patienten werden im PACS abgelegt.

Im Rahmen der Verlaufsstudie wird alle sechs Wochen eine erneute CT-Untersuchung durchgeführt und die Prozedur wiederholt. Das Gesamtansprechen der Raumforderungen auf die Therapie kann anhand der ermittelten Messwerte eingeschätzt werden. Bezogen auf die Target-Läsionen wird dabei zwischen vier Therapie-Stadien unterschieden:

- **Komplette Remission** (engl. *complete response/remission*, CR): Alle Zielläsionen sind verschwunden.
- **Partielle Remission** (engl. *partial remission*, PR): Die LD-Summe der Zielläsionen ist verglichen mit dem Basiswert um mindestens 30 % gesunken.
- **Progression** (engl. *progressive disease*, PD): Die LD-Summe ist um mindestens 20 % gestiegen oder es haben sich neue Läsionen gebildet.
- **Stabile Erkrankung** (engl. *stable disease*, SD): Weder PR noch PD.

⁹In der klinischen Praxis ist dies jedoch nicht die Regel, da die CT-Untersuchungen zum Teil von unterschiedlichen Personen mit teilweise unterschiedlichen CT-Geräten durchgeführt werden.

Datum	RECIST-Stadium	Anzahl Läsionen	Summe LD	Kommentar
2009/03/06	-	3	15 mm	CT-Erstuntersuchung. 3 verdächtige Rundherde im rechten Oberlappen. Keine vergrößerten Lymphknoten. Kein Pleuraerguss. Unauffälliger Befund der abdominalen Organe.
2009/04/22	PD	5	20 mm	Zwei neu hinzu gekommene Raumforderungen am Bronchus principalis dexter (5 mm) und rechts pleuranah (3 mm). Links thorakal keine neuen Findings.
2009/06/12	PR	3	12 mm	LD-Summe verkleinert um 40%. Keine neuen Läsionen.
2009/08/04	PR	1	4 mm	Eine verbleibende Läsion hilusnah, rechts.

Abbildung 4.1.: Beispielhafte, tabellarische Zusammenfassung von Metastasen-Verlaufsuntersuchungen. Vom Radiologen wurden die Läsionen vermessen, RECIST-Stadien festgelegt und Kommentare hinzugefügt.

Bei der Patientin werden im Rahmen der Studie nach der Basisuntersuchung (Base Line Scan) insgesamt vier Folge-Untersuchungen (Follow Up Scans) durchgeführt und die jeweiligen Ergebnisse in Befundberichten festgehalten. Der Base Line Scan wird am 06.03.2009 durchgeführt. Folgende Messwerte, RECIST-Stadien und zusätzliche Kommentare des Radiologen werden in den Befunden festgehalten:¹⁰

Bei der ersten Follow-Up-Untersuchung am 22.04.2009 zeigt sich, dass in der Zwischenzeit zwei weitere Läsionen hinzugekommen sind und der RECIST-Status damit als PD festgelegt werden muss. Eine Chemotherapie wird eingeleitet und schlägt erfolgreich an, was die nächste Untersuchung vom 12.06.2009 zeigt. Die Anzahl der Läsionen verringerte sich um 2 und die LD-Summe ist um 40% geschrumpft, was als Partielle Remission (PR) bezeichnet wird. Es haben sich keine weiteren Metastasen gebildet. Bei der nächsten Untersuchung am 04.08.09 dokumentiert der Radiologe, dass von den drei Läsionen noch eine verbleibende 4 mm-große Raumforderung hilusnah liegt. Diese Läsion wird in einem operativen Eingriff entfernt.

Die Messwerte, Beurteilungen und Stadieneinteilungen werden in Fließtextform vom Radiologen in Befunden festgehalten. Dabei kommen weder bildliche Darstellungen der befundeten Läsionen noch grafische Darstellungen des Therapieverlaufes zum Einsatz.

¹⁰Ein vollständiger radiologischer Befundbericht enthält viele weitere Informationen, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht in voller Gänze dargestellt werden können.

Anforderungen und Wünsche der Anwender

Aus Sicht des Radiologen wäre eine Computerunterstützung in mehreren Punkten wünschenswert. An einem typischen Arbeitstag muss ein Radiologe sehr viele Untersuchungen vornehmen, deren Anzahl oft im zweistelligen Bereich liegt. Radiologen haben daher in der klinischen Praxis aufgrund der Masse der Untersuchungen oft nur wenig Zeit für die Befundung eines einzelnen Falls. Bei einem bekannten Tumor kann der Arzt meist aufgrund des Tumortyps abschätzen, ob er Fernmetastasen bildet oder nicht. In diesen Fällen kann er oft schon durch bloßes Scrollen der Schichtdaten und „mit Augenmaß“ feststellen, ob sich verdächtige Absiedlungen gebildet haben oder nicht. Handelt es sich jedoch um einen neuen, unklaren Tumorbefund, müssen aufwändige Untersuchungen eingeleitet werden, bei denen der gesamte Körper des Patienten auf Fernmetastasen untersucht werden muss. Das Scrollen durch die Schichten, die Analyse mit unterschiedlichen Fensterungen sowie die Detektion und Vermessung der Metastasen ist dabei mühselig und zeitintensiv. In diesem Fall wäre es wünschenswert, wenn der Radiologe bei der Detektion, Registrierung und Quantifizierung der pulmonalen Rundherde mit einer CAD-Software unterstützt werden würde.

Der Arzt beklagt außerdem die subjektive Einschätzung der Läsionengrößen anhand der manuellen Messungen mit der Maus und die damit nicht reproduzierbaren Untersuchungen. Ein anderer Radiologe würde die Messungen evtl. in anderen Schichten vornehmen, was zu nicht vergleichbaren Untersuchungsergebnissen führen könnte. Untersucherunabhängige und reproduzierbare Messungen könnten nur erreicht werden, wenn die Ausmaße der Läsionen nicht manuell approximiert, sondern mit Softwareunterstützung volumetrisch vermessen würden.

Die auf Basis der CAD-Markierungen und ggf. weiteren manuellen Markierungen des Radiologen vorgenommenen Analysen und Verlaufsmessungen sollten in einem zusammenhängenden Befundbericht strukturiert präsentiert werden. Zusätzlich zu den reinen Messwerten und Text-Beurteilungen wäre es sinnvoll, bildliche Annotationen, grafische Animationen des Therapieverlaufs und einfache 3D-Visualisierungen in den Befund einzubeziehen. Dies würde eine effiziente Kommunikation der Befundergebnisse und eine verständlichere Patientenaufklärung zur Folge haben.

4.2.3 User Story 3

Bei einem 65-jährigen männlichen Patienten (Kennung: HL-LH-Me), wurde ein kolorektales Karzinom festgestellt. Der Darmtumor wurde zwar chirurgisch vollständig entfernt, hatte jedoch bereits in die Lunge metastasiert. Der Radiologe hält in seinem Befundbericht¹¹ vier Lungenrundherde im linken Unterlappen fest, die weiter kontrolliert werden sollen. Des Weiteren dokumentiert der Arzt „emphysematöse Lungengerüstveränderungen“ in seinem Bericht. Der Radiologe misst die vier Rundherde an der radiologischen Workstation aus und protokolliert die Mess-

¹¹Der vollständige Befund ist in Abb. A.4 zu sehen.

werte in dem Befund. Der Befund wird mit einem Diktiergerät eingesprochen, über eine Sprachsoftware digitalisiert und im RIS in der Patientenakte hinterlegt.

Sechs Wochen später wird eine Folgeuntersuchung vorgenommen. Sie soll Aufschluss über die Wachstumsprozesse der Läsionen geben. Der Radiologe schreibt in seinem Befund, dass die vier Lungenrundherde „gering größenprogredient“ sind und dass sich ein „unveränderter kleiner Lungenrundherd im rechten Oberlappen lateral“ befindet. Weiterhin hält er fest, dass im linken Unterlappen eine neue Raumforderung festgestellt wurde. Die Analyse der Gefäße, der Knochen und der Oberbauchorgane ergab keine Auffälligkeiten.

Der Radiologe schließt den Befund mit einer zusammenfassenden Beurteilung ab. Demnach könnte es sich bei dem kleinen Lungenrundherd im rechten Oberlappen um eine weitere Metastase handeln. Außerdem besteht der Verdacht auf mediastinale Lymphknoten-Metastasen.

Der Metastasenfall wird bei einem Tumorboard unter den behandelnden Fachärzten diskutiert. Der anwesende Radiologe fasst den Fall noch einmal für seine Kollegen zusammen. Es sind keine weiteren extrapulmonalen metastasensuspekten Veränderungen festgestellt worden und die Lungenmetastasen sind leicht gewachsen. Ein ebenfalls anwesender Thoraxchirurg entscheidet sich daher für einen chirurgischen Eingriff.

Der Chirurg analysiert im Rahmen der OP-Vorbereitung die 2D-Schichtdaten und schaut sich die vom Radiologen befundeten Läsionen an. Alle fünf Raumforderungen der linken Lunge liegen im Unterlappen und infiltrieren keine zentralen Gefäßabschnitte. Zusammen mit einem weiteren Thoraxchirurgen trifft er die Entscheidung, eine Standardlobektomie des linken Unterlappens durchzuführen. Des Weiteren soll eine Lymphknotendisektion durchgeführt werden, d. h., die mediastinalen vergrößerten Lymphknoten sollen ebenfalls operativ entfernt werden. Der Chirurg trifft diese Entscheidungen rein auf Basis der 2D-Schichtdaten. 3D-Visualisierungen kommen bei der Bildanalyse und der OP-Vorbereitung nicht zum Einsatz. Die Abschätzung der Größen- und Lageverhältnisse der Läsionen ist dadurch sehr mühselig. Die Schichtdaten müssen vor und zurück gescrollt werden, um das volle Ausmaß der Erkrankung exakt beurteilen zu können. Ob die Blutgefäße von Läsionen infiltriert sind, lässt sich zwar in den Bilddaten abschätzen, jedoch ist auch dieser Analyseprozess langwierig. Aufgrund der ähnlichen Grauwerte von Tumoren und Gefäßen, sind sie nicht immer eindeutig separierbar.

Die Bildanalyse mittels unterschiedlicher Fensterungen hat ergeben, dass sich im rechten Mittellappen verstärkt emphysematische, also überblähte, Lungenareale befinden. Grauwerte kleiner als -950 HU deuten auf diesen Sachverhalt hin.¹² Im rechten Ober- und Unterlappen sind im CT keine Luftblasen erkennbar. Eine ange-

¹²Lungenemphyseme treten oft bei starken Rauchern auf. Durch entzündliche Veränderungen der Lunge verliert die Lunge an Elastizität, die enthaltene Luft kann nicht mehr entweichen und dies bedeutet in der Folge eine verminderte Lungenfunktion in den betreffenden Gebieten. Solche Areale müssen bei der Operationsplanung berücksichtigt werden, um gewährleisten zu können, dass nach dem Eingriff noch genug Lungenrestfunktion vorhanden ist.

forderte Inhalations- und Perfusionsszintigraphie dient der Beurteilung der Operabilität und der vermutlichen postoperativen Lungenfunktion. Die Lungenfunktion der rechten Lunge scheint, trotz Emphysemen im Mittellappen, ausreichend zu sein, sodass einer Lobektomie des linken Unterlappens nichts im Wege steht. Die laterale Thorakotomie wird als Zugangsweg zur Lunge gewählt, um sowohl alle Läsionen als auch Lymphknoten, komplett reseziieren zu können.

Vor, während und nach der Therapie wird der Patient und dessen Angehörige über Behandlungsstrategien und -erfolge aufgeklärt. Der Patient stellt dabei viele Fragen zum Risiko des chirurgischen Eingriffs und zur Überlebenswahrscheinlichkeit. Weder bei Tumorboardbesprechungen noch beim Patientengespräch werden dreidimensionale Visualisierungen zur Verdeutlichung der Sachlage eingesetzt, obwohl diese vor allem der Patientenaufklärung zuträglich wären.

Anforderungen und Wünsche der Anwender

Aus Sicht der Ärzte gibt es in einigen Punkten Potential für eine Computerunterstützung. Patienten mit schweren Atemwegserkrankungen sowie Patienten im fortgeschrittenen Lebensalter haben oft eine zu geringe Lungenfunktion und limitieren damit das eigentlich notwendige Resektionsausmaß. Mit Hilfe von softwarebasierten Analysemethoden könnten präoperativ Fragen zur Operabilität und zur postoperativen Lungenfunktion exakt beantwortet werden. Die Quantifizierung funktioneller CT-Parameter wie Lungenvolumina, Emphyseindex oder mittlerer Lungendichte würde eine genauere Abschätzung des verbleibenden gesunden Restparenchyms ermöglichen.

Der Chirurg wünscht sich außerdem aussagekräftige und interaktiv beeinflussbare 3D-Darstellungen sämtlicher intrapulmonaler Gefäßstrukturen, der Lymphknoten und Lungentumoren und des ihnen zugehörigen Lappenterritoriums. Dies würde ihm eine exaktere OP-Vorbereitung ermöglichen, da Größen- und Lagebeziehungen dreidimensional besser einschätzbar wären und beispielsweise das Risiko, ein lebenswichtiges Gefäß bei der OP zu verletzen, vorab am Computer beurteilt werden könnte.

Aus Sicht des Radiologen wäre es erstrebenswert, wenn die Befunde der Tumorverlaufskontrolle besser kommuniziert werden könnten. Ein zusammenhängender Report, der die Falldaten des Patienten, die quantitativen Ergebnisse der Verlaufsbeobachtungen und einfache 3D-Rekonstruktionen enthält, würde einen Mehrwert bei der Verständigung zwischen Ärzten und bei Patientengesprächen darstellen. Vorstellbar wären beispielsweise einfache und verständliche Farbmodelle nach dem Ampelschema: Im Therapieverlauf gewachsene Läsionen könnten rot dargestellt werden, geschrumpfte Herde dagegen grün.

Verlaufskontrollen mit Hilfe von Softwaretools für die Segmentierung und Registrierung von Lungenrundherden und der exakten Vermessung von Lymphknoten sind zwar für aufwändige klinische Studien sinnvoll. Im klinischen Alltag wird

jedoch aus Zeitgründen die Ausdehnung der Läsionen meist nur approximiert, indem der Durchmesser der Raumforderungen mit der Maus abgeschätzt wird. Diese Messwerte könnten genutzt werden, um die Läsionen etwas abstrakter als farbige Kugeln im dreidimensionalen Raum darzustellen. So erreicht man mit verhältnismäßigem Aufwand eine einheitliche und leicht verständliche Visualisierung der Verlaufskontrollergebnisse, die zudem einfach in den klinischen Workflow integriert werden könnte.

4.3 Die Wahl der Technologie

Auf Basis der User Personas und User Stories ergeben sich einige Hauptanforderungen an das zu implementierende System. Diese Anforderungen werden im Folgenden genannt und kurz beschrieben.

4.3.1 Anforderungen an das System

Integration von interaktiven 3D-Modellen. Das System soll dem Benutzer interaktive und qualitativ hochwertige 3D-Darstellungen der Lungenstrukturen zur Verfügung stellen. Es muss dem Anwender möglich sein, die 3D-Visualisierungen mit geringem Aufwand bedienen und analysieren zu können.

Nutzung von Bildern und Videos. Zusätzlich ist es sinnvoll, wenn das System zweckmäßig aufbereitete Bilder und Videos der Lungenstrukturen bereitstellt. So wird der Metastasen-Report um weitere bildliche Informationen angereichert, die bei der OP-Planung oder der Durchführung von Verlaufskontrollstudien hilfreich sind.

Integration in den Softwareentwicklungsprozess. Ein wichtiges Kriterium ist die Anbindung an die bei Fraunhofer MEVIS genutzte Software MEVIS-LAB¹³. Es muss möglich sein, die 3D-Modelle, die in MEVISLAB erzeugt werden, zusammen mit den restlichen quantitativen und bildlichen Informationen automatisch und auf Knopfdruck in einen zusammenhängenden Report zu exportieren. Für die Generierung und den Export des Reports sollten dabei möglichst wenige weitere Programme notwendig sein, um die reibungslose Integration in den Workflow der Softwareentwicklung zu gewährleisten. Der Benutzer sollte sich nicht um die Generierung des Reports kümmern müssen – dieser Vorgang soll nahezu unsichtbar im Hintergrund passieren.

¹³MeVisLab ist ein Applikationsframework für medizinische Bildverarbeitung und Visualisierung [MeVis Medical Solutions, 2011].

Verwendung weiterer Software und Plugins. Auf Anwenderebene sollte die Abhängigkeit von mehreren Software-Tools und Plugins vermieden werden, da diese aufwändig installiert und verwaltet werden müssen. Stattdessen soll der Nutzer möglichst nur eine einzige Software installieren müssen, die eine möglichst große Verbreitung hat und bestenfalls auf handelsüblichen Computern schon vorinstalliert ist.

Integration in den medizinischen Workflow. Der Report muss auf verschiedenen Softwaresystemen (z. B. Microsoft Windows, Linux, Mac) mit unterschiedlichen Hardwarevoraussetzungen (Prozessor, Grafikkarte) lauffähig sein. Des Weiteren ist es erstrebenswert, wenn das Befunddokument im Klinik-IT-System gespeichert und verwaltet werden kann. Nur so ist gewährleistet, dass das System reibungslos in den medizinischen Workflow integriert wird.

Portabilität und Dateigröße. Der Report sollte am Ende der Prozesskette in einem zusammenhängenden Dokument vorliegen, welches über das Internet versandt werden kann. Die Dateigröße ist dabei nicht zwingend ein limitierender Faktor, da größere Kliniken heutzutage meist mit schnellen Internetverbindungen ausgestattet sind. Trotzdem sollte das Dokument nicht zu groß sein (maximal etwa 20–30 MB), um einen reibungslosen Up- und Download per E-Mail oder FTP zu gewährleisten. Ein portables Dokument hat außerdem den Vorteil, dass es problemlos auf mehreren Workstations nutzbar ist und bei Bedarf auch dem Patienten ausgehändigt werden kann.

Internetzugriff. Nach Möglichkeit sollten alle notwendigen Daten (Bilder, Videos, 3D-Modelle, Messwerte) schon in dem Report integriert sein, sodass nach dem einmaligen Herunterladen des Dokuments keine weiteren Daten aus dem Internet abgerufen werden müssen. So ist auch die Nutzung im OP-Saal garantiert, wo oft kein direkter Internet-Zugang vorhanden ist.

Es gibt verschiedene Techniken, die es ermöglichen, interaktive Dokumente zu erstellen. Es soll jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sein, die Vielzahl an unterschiedlichen Applikationen und 3D-Formaten vorzustellen und zu vergleichen. Stattdessen wird stellvertretend auf [Kunze, 2009] verwiesen. Dabei wurde in einem anderen medizinischen Anwendungskontext (Analyse der Koronargefäße) untersucht, welche Techniken geeignet sind, um die relevanten Daten in einem interaktiven Befunddokument zusammenzufassen. Verschiedene internetbasierte und dokumentbasierte Technologien sind gegenübergestellt und deren Vor- und Nachteile diskutiert worden. Abb. 4.2 zeigt schematisch einige mögliche Techniken für interaktive Dokumente. Des Weiteren sind in [Kunze, 2009] unterschiedliche 3D-Formate vorgestellt und verglichen worden. Die Ergebnisse dieser Analyse potentieller Techniken sollen in die vorliegende Arbeit einfließen und genutzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine dokumentbasierte Technologie genutzt werden. Das *Portable Document Format* (PDF, deutsch: transportables Dokumentenformat) eignet sich dabei am besten für die Umsetzung der oben gestellten

Anforderungen. Es ist ein plattformunabhängiges Dateiformat, das von ADOBE SYSTEMS entwickelt wurde. Ein PDF-Dokument kann mit einem für alle Systeme frei verfügbaren Darstellungsprogramm, dem ADOBE READER¹⁴, angezeigt werden. Das PDF-Format ist ein Standard-Dateiformat für den Austausch von meist statischen Informationen in Dokumentform. Es hält jedoch auch Möglichkeiten für Interaktionen bereit, beispielsweise können Flash-Applikationen in das Dokument eingebunden werden. Weiterhin ist es möglich, 3D-Modelle im *Universal 3D*¹⁵ (U3D)-Format in ein PDF einzubetten. U3D ist ein universelles und standardisiertes Dateiformat für dreidimensionale Daten und wird größtenteils in industriellen Applikationen eingesetzt. Mit Hilfe von *JavaScript*, einer objektbasierten Skriptsprache, kann eine Interaktionsschnittstelle zwischen dem Dokumentinhalt, dem darin integrierten 3D-Modell und dem Anwender hergestellt werden.¹⁶

Im Folgenden soll exemplarisch an den oben genannten Kernanforderungen gezeigt werden, warum sich das PDF-Dokument für den Zweck dieser Arbeit sehr gut eignet. Dieser Abschnitt skizziert nur grob die Vorzüge des interaktiven PDF-Dateiformates. Die detaillierte Umsetzung und Implementierung wird in Kapitel 5 erläutert.

4.3.2 Die Vorzüge des PDF-Dateiformates

Integration von interaktiven 3D-Modellen. Mit Hilfe des U3D-Formates lassen sich dreidimensionale Daten in das PDF integrieren. Die 3D-Modelle können mit einer Flash-Benutzerschnittstelle und über JavaScript-Funktionen interaktiv manipuliert, d. h. gedreht, gezoomt und verschoben werden.

Nutzung von Bildern und Videos. Es ist möglich, Bild- und Video-Dateien als Anhang zu einem PDF hinzuzufügen. Diese Dateien können dann aus dem Dokument herausgelöst und gespeichert werden. Bilder und multimediale Elemente können jedoch auch in eine Flash-Applikation eingebettet und somit direkt im Dokumentinhalt integriert werden. Mit Flash lassen sich darüber hinaus optisch ansprechende Media-Player erstellen, die beispielsweise für das Abspielen von Videos genutzt werden können.

Integration in den Softwareentwicklungsprozess. In MEVISLAB existiert eine Schnittstelle, mit der aus Segmentierungen gewonnene Oberflächenmodelle auf Knopfdruck in ein U3D-Format exportiert werden können. Dadurch wird es dem Software-Entwickler ermöglicht, die 3D-Modelle auch außerhalb der MEVISLAB-Umgebung zu nutzen, um sie in ein PDF zu integrieren. Eine Flash-Anbindung existiert zwar nicht, jedoch kann mit diversen

¹⁴Adobe Reader: <http://www.adobe.com/de/products/reader.html>

¹⁵U3D (Universal 3D): Ein von der ECMA (European Computer Manufacturers Association) standardisiertes 3D-Format. <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-363.htm>

¹⁶JavaScript für Acrobat PDF: <http://www.adobe.com/devnet/acrobat/javascript.html>

Applikationen (z. B. ADOBE FLASH BUILDER¹⁷) mit einfachen Mitteln eine Benutzerschnittstelle designt und implementiert werden. Die exportierte Flash-Anwendung kann ohne weiteres in das PDF eingebaut werden.

Verwendung weiterer Software und Plugins. Auf Anwenderebene ist lediglich eine aktuelle Version des kostenlosen ADOBE READER notwendig, um alle Funktionen des interaktiven PDF-Reports nutzen zu können. In dem ADOBE READER ist ein 3D-Renderer und ein Flash-Player integriert, sodass der Anwender keine zusätzlichen Applikationen installieren muss.

Integration in den medizinischen Workflow. Über eine DICOM-Schnittstelle ist es möglich, ein PDF in ein DICOM-Objekt zu kapseln.¹⁸ So kann das Dokument auch in einem handelsüblichen PACS abgespeichert und verwaltet werden.

Portabilität und Dateigröße. Ein PDF ist ein portables Dokumentformat und kann somit zwischen verschiedenen Computersystemen, beispielsweise innerhalb des Krankenhauses, transportiert werden. Das Dokument kann darüber hinaus auch problemlos per E-Mail versandt oder auf einem Web-Server abgelegt werden.

Internetzugriff. Einmal heruntergeladen, hat der Benutzer vollen Zugriff auf alle Funktionalitäten des PDFs, inklusive der interaktiven 3D-Modelle. Es müssen keine Inhalte zeit- und kostenintensiv nachgeladen werden. Um die Dateigröße klein zu halten, ist es jedoch auch möglich, multimediale Inhalte, wie z. B. Videos, auf einem Web-Server zu speichern und diese über eine in das PDF eingebettete Flash-Applikation abzuspielen.

Die Wahl der PDF-Technologie wurde nicht nur auf Basis der oben genannten Kriterien getroffen, sondern auch auf Grundlage der Erfahrungswerte, die bei Fraunhofer MEVIS, im speziellen bei MEVIS DISTANT SERVICES¹⁹, gesammelt wurden. Dort werden seit einigen Jahren erfolgreich interaktive 3D-PDF-Reports für die Unterstützung der Operationsplanung von Lebertumoren eingesetzt. Dazu wird ein Leber-CT-Datensatz von geschultem medizinischen Fachpersonal aufwändig segmentiert und dreidimensional aufbereitet. Die 3D-Visualisierung, bestehend aus den Oberflächenmodellen der Leber, der Tumoren und Gefäße, wird dann zusammen mit Videos vom segmentierten Datensatz in ein PDF eingebettet. Dieses Dokument wird dem behandelnden Chirurgen webbasiert zur Verfügung gestellt. Der Arzt hat somit ein nützliches Werkzeug in der Hand, um Risikostrukturen vorab einzuschätzen und Operationsmethoden virtuell planen zu können.

¹⁷ Adobe Flash Builder: <http://www.adobe.com/products/flashbuilder>

¹⁸ pdf2dcm: <http://support.dcm4k.org/docs/pdf2dcm.html>

¹⁹ MeVis Distant Services: http://www.mevis.de/mms/en/Surgery_planning_for_tumor_resections.html

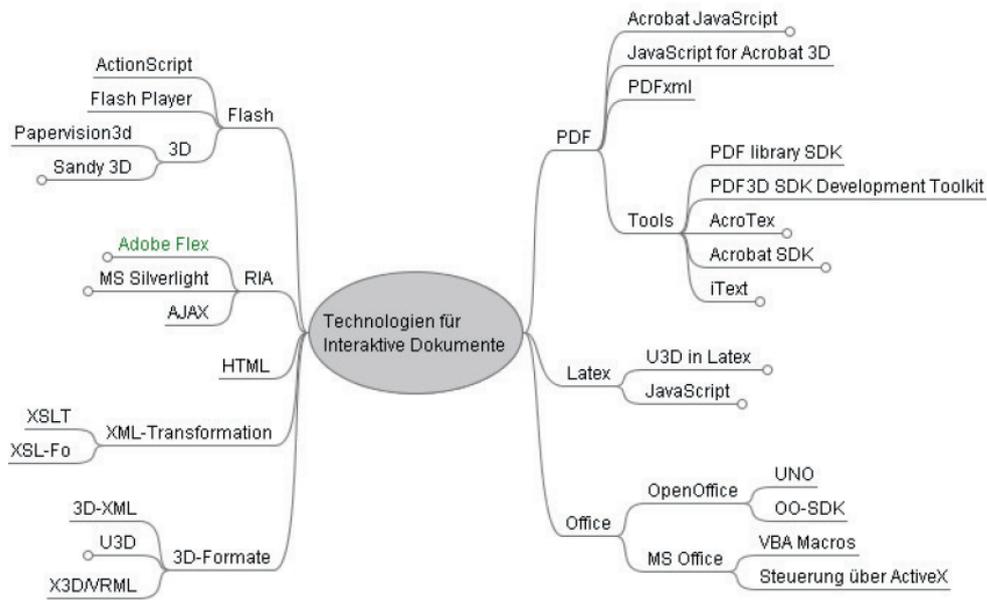


Abbildung 4.2.: Mögliche Technologien für interaktive Dokumente. Links: Internetbasierte Techniken. Rechts: Dokumentbasierte Techniken. [Kunze, 2009]

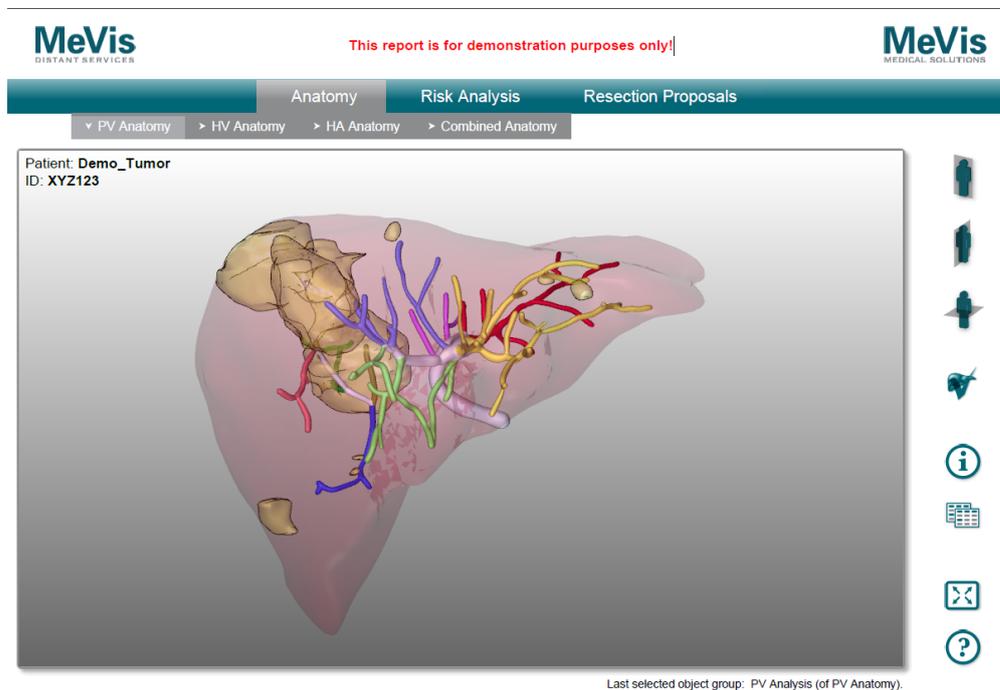


Abbildung 4.3.: Screenshot des von MEVIS DISTANT SERVICES generierten 3D-PDF-Reports für die Operationsplanung von Lebertumoren. Mit Hilfe der Buttons am rechten Rand kann der Benutzer das 3D-Modell der Leber interaktiv beeinflussen oder quantitative Informationen, beispielsweise Tumorumfänge, abrufen.

4.4 Visualisierungskonzept

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Wahl der Technologie beschrieben wurde, soll im Folgenden erläutert werden, wie das Visualisierungskonzept umgesetzt wurde. Die Grundlage für das 2D- und 3D-Visualisierungskonzept bilden die in Abschnitt 4.2 dargestellten User Stories, Erfahrungswerte bei Fraunhofer MEVIS im Bereich der Thoraxchirurgie-Planung sowie Befragungen und Beobachtungen von Benutzern. In der Softwareentwicklung von interaktiven Systemen ist es erforderlich, den Endanwender schon früh in den Entwicklungsprozess einzubeziehen, ihn nach seinen Wünschen und Vorstellungen zu befragen und daraus erste Designideen und grobe Konzeptskizzen abzuleiten. Ein erster Prototyp wird dann zusammen mit den Endnutzern getestet und anschließend basierend auf Beobachtungen und Interviews weiter verfeinert [Mayhew, 1999].

Es wurde daher frühzeitig ein erster Prototyp (Abb. 4.4) entwickelt, der für die Evaluierung des Visualisierungskonzeptes genutzt wurde. An der kleinen Befragung haben insgesamt drei Ärzte teilgenommen: Ein Viszeralchirurg, ein Thoraxchirurg und ein Radiologe. Es wurde ein Fragebogen entwickelt, in dem u. a. allgemeine Fragen zur Bedienbarkeit der 3D-Modelle gestellt wurden, aber beispielsweise auch gezielt danach gefragt wurde, welche Blutgefäß- oder Metastasendarstellungen zielführend sind. Die Ergebnisse der Befragung sind anschließend in die weitere Entwicklung des interaktiven Reports eingeflossen. Im Folgenden werden die zwei Hauptanwendungsfälle skizziert und anschließend die Visualisierungsentscheidungen zusammengefasst und mit Zitaten aus den Interviews belegt.²⁰

4.4.1 Anwendungsfälle

Es gibt zwei mögliche Anwendungsfälle, in denen der onkologische Report zum Einsatz kommen könnte. Die beiden Fälle spielen eine wichtige Rolle bei dem nachfolgenden Entwurf des Visualisierungskonzeptes.

1. **Umfassende Analysen bei Fraunhofer MEVIS:** Die Klinik stellt Fraunhofer MEVIS die Bilddaten zur Verfügung, die von geschultem medizinischen Fachpersonal, z. B. MTRAs, umfassend analysiert, vermessen, segmentiert sowie zwei- und dreidimensional rekonstruiert werden. Die von den Ärzten gewünschten Analysen und Informationen werden in einem Anforderungsbogen (Kapitel B) festgehalten. Die aufbereiteten Daten werden in Form eines interaktiven PDFs an die Klinik zurückgeschickt, wo auf Basis des PDF-Reports die OP-Planung durchgeführt wird. Diese Vorgehenweise entspricht dem Geschäftsmodell von MEVIS DISTANT SERVICES.

²⁰Die vollständigen von den Probanden ausgefüllten Fragebögen können in Kapitel C ab Seite XXVII nachgelesen werden.

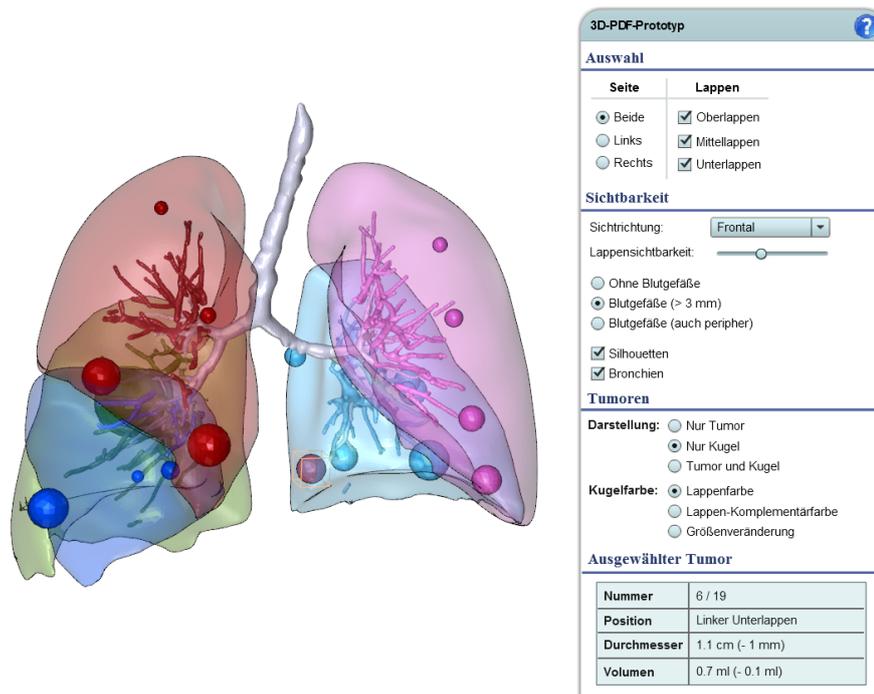


Abbildung 4.4.: Ein erster 3D-PDF-Prototyp, der für die Evaluierung des Visualisierungskonzeptes genutzt wurde. Mit dem rechts zu sehenden User Interface kann der Benutzer verschiedene Parameter der 3D-Darstellung beeinflussen, beispielsweise einzelne Lungenlappen ein- oder ausblenden.

- 2. Klinikseitige Installation der Software:** In der Klinik wird eine Software installiert, mit der die Ärzte computerbasierte Analysen, beispielsweise Tumorsegmentierungen und -Verlaufskontrollen oder Emphysemquantifizierungen, selbstständig durchführen können. Die Software sollte robust genug sein, damit sie Bilddaten mit unterschiedlichen Aufnahmeparametern verarbeiten kann. Außerdem muss sie soweit in den Klinikalltag integriert sein, dass dem Arzt dadurch kein hoher zeitlicher Mehraufwand entsteht und er stattdessen bei seiner Arbeit signifikant unterstützt wird.

Der erste Anwendungsfall hat den Vorteil, dass den Ärzten vorbereitete Visualisierungen und Quantifizierungen zur Verfügung gestellt werden. Sie enthalten umfangreiche, zum Teil mit hohem manuellem Aufwand angefertigte, Segmentierungen der Gefäße und Lymphknoten, die mit Hilfe von implizitem Wissen der MTRAs durchgeführt worden sind. So entstehen seitens der Klinik keine aufwändigen Segmentierungsaufgaben oder umfangreiche Software-Installationen. Der Nachteil liegt darin, dass die rekonstruierten Daten im Nachhinein nicht von den Ärzten beeinflusst werden können. Die Kliniker erhalten lediglich einen zusammenhängenden Tumorreport mit 3D-Oberflächenmodellen und eventuell zusätzlichen Videos.

Bei dem zweiten Anwendungsfall liegt der Vorteil darin, dass die Ärzte die computergestützten Analysen und Rekonstruktionen selbst vor Ort durchführen können und somit einen direkten Einfluss auf die entstehenden Daten haben. Aufwändige und detaillierte Tumor-, Lymphknoten- und Gefäßvisualisierungen sind somit je-

doch nicht oder nur bedingt möglich, weil sich diese Strukturen oft nicht vollautomatisch segmentieren lassen. In diesem Fall sind einfache Segmentierungs- und Visualisierungstechniken, beispielsweise interaktive Schwellwertsegmentierungen oder Volume Renderings, eher zielführend, um dem Arzt mit verhältnismäßigem Aufwand präoperative Bildanalysen zu ermöglichen.

4.4.2 Evaluierung

Im Folgenden werden die genutzten Visualisierungs- und Hervorhebungstechniken erläutert, die in Abschnitt 3.1.1 eingeführt wurden. Größtenteils kommen dabei einfache Methoden, beispielsweise Farb- und Transparenzabstufungen, zum Einsatz. High-Level-Visualisierungsalgorithmen, wie zum Beispiel die in [Kubisch u. a., 2010] vorgestellten „Ghost Views“, sind mit den einfachen Mitteln des 3D-Renderers vom ADOBE READER nicht umsetzbar.

Lungenlappen

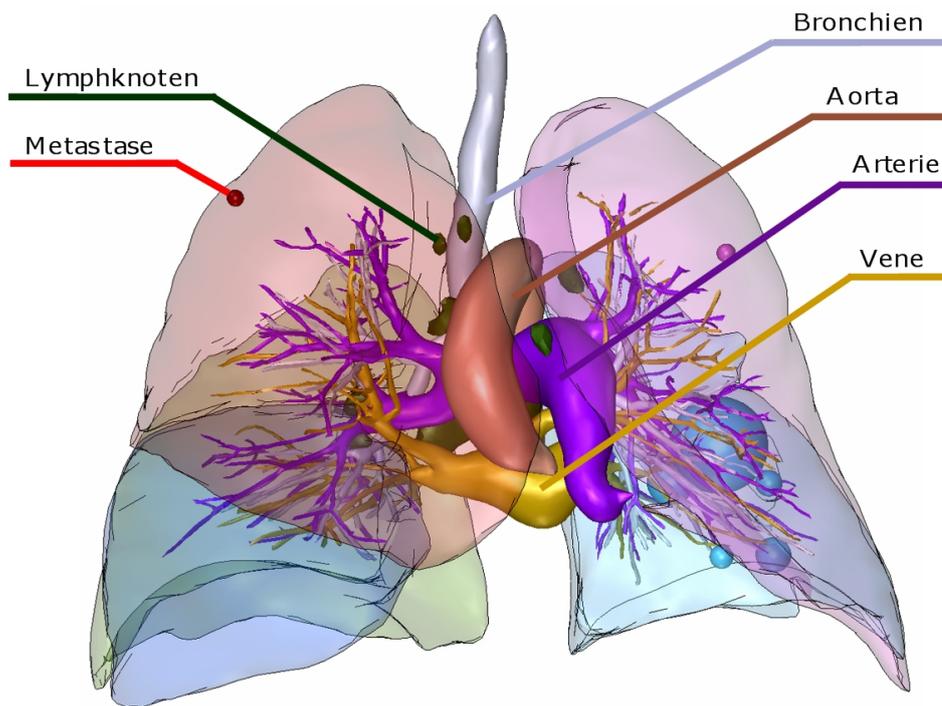
Wie in Abb. 4.5a zu sehen ist, werden die fünf Lungenlappen mit unterschiedlichen Farben dargestellt, um sie optisch voneinander trennen zu können. Die Farbwerte entsprechen denen, die in der MEVISPULMO-Software zum Einsatz kommen. Die Lungenlappen werden gleichmäßig transparent dargestellt, um einen Blick auf die innenliegenden Strukturen zu gewährleisten. Neben der Transparenz kommt als weitere regionale Hervorhebungstechnik ein Silhouettenrendering zum Einsatz, um die Grenzen der Lungenlappen etwas hervorzuheben.

Blutgefäße

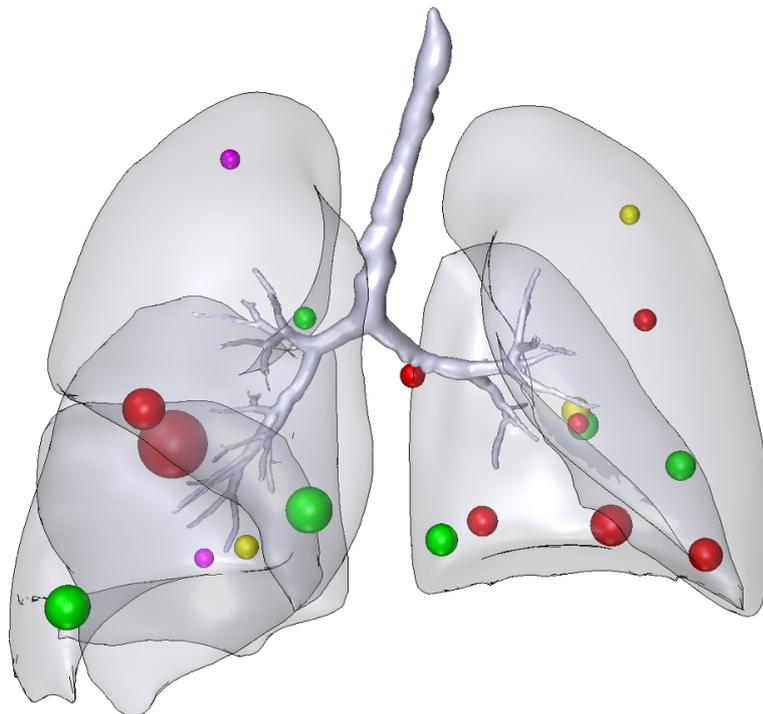
Die Darstellung der Blutgefäße erfolgt je nach Anwendungsfall (Abschnitt 4.4.1). Im ersten Anwendungsfall sind alle pulmonalen und hilären Gefäße von MTRAs exakt segmentiert worden. Dabei wurden auch arterielle und venöse Gefäße voneinander separiert. In Abb. 4.5a ist zu sehen, dass die Pulmonalarterie lila, die Pulmonalvene dunkel-gelb und die Aorta hell-braun visualisiert werden. Laut Meinung der Ärzte ist die Darstellung der hilären Gefäße wichtig bis sehr wichtig („Je nach Lage des Tumors“, Proband A).

Im zweiten Anwendungsfall liegen nur grobe 3D-Modelle der pulmonalen Blutgefäße vor. Diese wurden zuvor mit Hilfe einer einfachen Schwellwertsegmentierung erzeugt.²¹ Mit Hilfe von automatischen Distanztransformationen wurde die Segmentierungsmaske nachverarbeitet, sodass zwischen großen Gefäßen mit einem Durchmesser größer als 3 mm und kleineren, peripheren Gefäßen unterschieden

²¹Pulmonale Blutgefäße lassen sich aufgrund des guten Kontrastes gegenüber dem dunkleren Lungenparenchym (Grauwertintervall etwa -250 HU bis -900 HU) relativ gut mit einem Schwellwert > -250 HU segmentieren.



(a)



(b)

Abbildung 4.5.: (a) 3D-Visualisierung der Lungenlappen, der Lymphknoten, der arteriellen und venösen Blutgefäße, der Aorta, der kugelförmigen Läsionen sowie des Bronchialbaums. Die Oberflächenmodelle wurden zuvor von medizinischem Fachpersonal aufwändig segmentiert und dreidimensional rekonstruiert. (b) Reduzierte 3D-Darstellung eines anderen Metastasen-Falls. Während die Größenveränderungen der Metastasen im Vordergrund stehen (z. B. rot = gewachsen), werden die Lungenlappen und Bronchien als Kontextstrukturen abgebildet.

werden kann. Ein Wechsel zwischen den beiden Modi ist laut Meinung von Proband B „sehr wichtig, v. a. bei differenzierter Betrachtung der Peripherie“. Wie in Abb. 4.6d zu sehen ist, werden die Gefäße entsprechend ihrer Lappenzugehörigkeit farblich dargestellt.

Bronchien und Lymphknoten

Die Bronchien werden im Kontrast zu den farbigen Lungenlappen und Blutgefäßen schlicht und hell-grau abgebildet. Lymphknoten werden, falls sie mitsegmentiert wurden, einheitlich dunkel-grün und opak abgebildet. Verwechslungen mit den ebenfalls rundlichen Lungenläsionen werden somit verhindert (Abb. 4.5a).

Läsionen

Für die Darstellung der Läsionen werden dem Benutzer drei Modi zur Verfügung gestellt. Die Läsionen können entweder in grober Kugelform oder in ihrer Originalform, basierend auf dem Segmentierungsergebnis, oder kombiniert in Kugel- und Originalgestalt visualisiert werden. Bei der Darstellung als Kugel wird auf den berechneten Läsionsdurchmesser ein Aufschlag von 3 mm hinzugefügt. Laut Meinung des Probanden C „übersieht man kleine Läsionen [somit] nicht“. Die Kugelform eignet sich sehr gut für eine einheitliche Übersichtsdarstellung und für die Einschätzung der „groben Lage“ (Proband A). Derselbe Arzt hebt jedoch auch hervor, dass die Originalform der Läsionen „wichtig bei zentraler Lage“ der Raumforderungen ist. So können Gefäßinfiltrationen gut beurteilt werden. Die Originalform ist darüber hinaus „wirklichkeitsnäher“ (Proband C) als die Kugelgestalt.

Aufgrund der unterschiedlichen Meinungen der Ärzte wurde ein interaktiver Wechsel zwischen den drei Modi verwirklicht. Standardmäßig ist dabei der Modus „Nur Kugel“ eingestellt, der von zwei der drei Probanden bevorzugt wurde. In Absprache mit den Ärzten werden die Kugeln entsprechend des ihnen zugeordneten Lappenterritoriums farblich dargestellt. Eine Läsion des linken lilafarbenen Oberlappens wird demzufolge ebenso lila gefärbt, wie in Abb. 4.6a zu sehen ist.

Im zweiten Modus „Nur Tumor“ wird die Kugel ausgeblendet und die Läsion gelb und transparent visualisiert. So kann die Infiltration von Gefäßen oder anderen Strukturen beurteilt werden. Um den Benutzer bei der 3D-Beurteilung der Läsionen effektiv zu unterstützen, wurde ein interaktiver Zoom-Modus realisiert. Ist die gesamte Lunge zu sehen, also eine ferne Zoomstufe eingestellt, werden die Läsionen als abstrakte Kugeln abgebildet (Übersichtsdarstellung, Abb. 4.6a). Zoomt der Nutzer in die 3D-Szene hinein, werden automatisch die Originalformen der Läsionen sichtbar und die Kugeln ausgeblendet (Detaildarstellung, Abb. 4.6d).

Als weitere lokale Hervorhebungstechnik wird eine Bounding Box in Form eines transparenten Würfelgitters eingesetzt, um eine selektierte Läsion gegenüber anderen 3D-Objekten herauszustellen (Abb. 4.7c).

Visualisierung von Messwerten

Ein Modus, in dem die Größenänderung der Metastasen deutlich wird, ist laut Meinung der Ärzte sehr hilfreich für die Beurteilung von Verlaufsuntersuchungen. Der in Abb. 4.5b zu sehende „Ampelmodus“ ist von allen drei Probanden als „verständlich“ eingestuft worden. Grüne Rundherde stehen dabei für kleiner gewordene, rote Läsionen für größer gewordene Läsionen. Gelbe Läsionen bewegen sich in einem Toleranzkriterium, das zuvor festgelegt werden muss. Läsionen, die grell leuchtend pink visualisiert werden, heben neu hinzugekommene Raumforderungen hervor. Die Größenänderungen beziehen sich dabei auf die CT-Voruntersuchung des Patienten. In Absprache mit den Ärzten werden die Lungenlappen im Größenänderungsmodus hintergründig, hell-grau als Kontext abgebildet. So interferieren die unterschiedlichen Farben der Läsionen nicht mit den Farben der Lungenlappen. In Abb. 4.5b wird diese Fokus- und Kontextdarstellung deutlich. Die Veränderung der Läsionengröße steht im Vordergrund und der räumliche Bezug geht nicht verloren.

Zwei der drei Interview-Teilnehmer fänden es wünschenswert, wenn die Nummern der Läsionen zusätzlich in der 3D-Szene sichtbar wären. Der dritte Arzt hingegen hält die zusätzliche Darstellung der Nummern nicht für sinnvoll, da dadurch eine „zu komplexe Visualisierung“ entstehen würde, die „so wie sie ist, schon sehr komplex ist und viele Informationen enthält“ (Proband A). Die Nummer einer selektierten Läsion wird daher stattdessen in dem User-Interface direkt über dem 3D-Modell gut sichtbar abgebildet.

Auswahl von Sichtrichtungen, 3D-Interaktion

Dem Arzt ist es wichtig, möglichst wenig Visualisierungsparameter beeinflussen zu müssen, um zum Ziel zu gelangen. Dem Anwender sollten daher wichtige Funktionen gut sichtbar und erreichbar zur Verfügung gestellt werden, mit denen er die 3D-Darstellung entsprechend seinen Wünschen anpassen kann. „Extrem wichtig“ (Proband B) ist dabei das Ein- und Ausblenden einzelner Lungenlappen, um den Fokus auf einzelne Teilstrukturen der 3D-Szene richten zu können. Die Auswahl aus mehreren unterschiedlichen, vordefinierten Sichtrichtungen wird dabei ebenfalls als sinnvoll angesehen, falls „mal die Orientierung verloren geht“ (Proband C).

Die 3D-Interaktion wird von zwei der drei Probanden als „einfach“ bewertet, ein Interview-Teilnehmer schätzt sie sogar als „sehr einfach“ ein. Alle drei Ärzte bevorzugen eindeutig die Interaktion mit der Maus, wobei Proband C angemerkt hat, „die Mausempfindlichkeit etwas abzusenken, da das 3D-Modell sehr direkt auf Maus-Bewegungen reagiert“. Die Einschränkung der Freiheitsgrade mit Hilfe von festen Rotationsachsen, sodass beispielsweise nur horizontal oder vertikal rotiert werden kann, wurde eindeutig abgelehnt und als zu „ungenau“ (Proband C) beschrieben.²²

²²Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die drei Interview-Teilnehmer schon einige Erfahrungen im Umgang mit medizinischen 3D-Visualisierungen hatten und daher die Interak-

Video und 2D-Visualisierungen

In dem ersten entwickelten Prototyp standen lediglich die dreidimensionalen Oberflächenmodelle zur Verfügung. Während der Beobachtung und der Befragung der Probanden ist deutlich geworden, dass allein auf Basis der abstrakten 3D-Visualisierungen oft keine exakten Beurteilungen möglich sind. Es fehlte der eindeutige Bezug zu den Originaldaten. Nur anhand der Original-Schichtdaten können Aussagen darüber getroffen werden, ob es sich bei einer in der 3D-Szene zu sehenden „Läsion“ tatsächlich um einen Rundherd oder eher um einen Gefäßabschnitt, eine Narbe oder eine kalkhaltige Veränderung handelt.

Es wäre jedoch nicht zielführend, einen gesamten CT-Datensatz in einem PDF-Dokument einzubetten, abgesehen von der schwierigen technischen Realisierbarkeit. Stattdessen wird der interaktive 3D-Report in der Klinik im Idealfall als Ergänzung zu den CT-Daten und den Patientenbefunden eingesetzt. Die 2D-Bilddatensätze können parallel zum PDF-Report im PACS abgerufen und an der Workstation analysiert werden. Damit die 3D-Darstellungen in dem Report jedoch nicht völlig ohne direkten Bezug zu den ursprünglichen Schichtdaten präsentiert werden, wurde ein Video in das Dokument integriert. Das Video zeigt schichtweise den komprimierten CT-Thoraxdatensatz mit allen segmentierten Lungenstrukturen als Overlays (Abb. 4.8e). Die Grenzen der Lungenlappen und der Läsionen werden dabei lediglich als Konturen abgebildet, um wichtige Bildinformationen nicht zu überdecken. Die Gefäße werden dagegen flächig dargestellt, um den Segmentierungsverlauf besser beurteilen zu können. In dem Video wird außerdem die ROI jeder einzelnen Läsion mit einer rot gestrichelten Bounding Box hervorgehoben. Des Weiteren ist die Nummer jeder einzelnen Läsion erkennbar, was von den Ärzten als sehr hilfreich kommentiert wurde. Das Video wurde in einem Vorverarbeitungsschritt automatisch generiert und auf einem Web-Server abgelegt, um die Dateigröße des PDFs gering zu halten. Über ein in dem PDF integrierten Media-Player kann das Online-Video abgespielt werden.

Neben dem Video des CTs werden weitere 2D-Visualisierungen in dem Report integriert, um dem Arzt den Bezug zu den Originaldaten zu ermöglichen. Jede einzelne Läsion wird in Form von drei Bildern visualisiert. Jedes Bild wird dabei in insgesamt neun gleichgroße Bereiche aufgeteilt, die je eine Schicht der Läsion-ROI enthalten. Die ROI einer Läsion ist dabei etwa dreimal so groß, wie die Läsion selbst. Pro Bild ist eine andere orthogonale Blickrichtung (axial, sagittal, coronal) zu sehen. Die Abbildungen 4.7d-f verdeutlichen diesen Sachverhalt. Die Kontur der Läsion wird dabei gelb dargestellt. Der Arzt kann somit den Segmentierungsverlauf einschätzen und erkennt in dem Bildbeispiel in Abb. 4.7d, dass der Rundherd fest mit der Brustwand verwachsen ist. Diese Form der aufbereiteten 2D-Darstellung wurde in [Birr u. a., 2010] bereits erfolgreich für die Operationsplanung von Lungenläsionen eingesetzt und wird daher auch in dem interaktiven PDF-Report verwendet.

tion mit der Maus keine Probleme bereitet hat. Eine größere Probandengruppe, einschließlich unerfahrener Ärzte, wäre besonders in diesem Punkt aussagekräftiger.

3D-Visualisierung der hilären Strukturen

Besonders in dem in Abschnitt 4.4.1 dargestellten Anwendungsfall 2, dem klinik-internen Einsatz der Software, ist die folgende Visualisierungsform als hilfreich anzusehen. Das hiläre Gefäßgeflecht, bestehend aus Bronchien, Aorta sowie Pulmonalarterie und -vene, ist aufgrund von ähnlichen Grauwerten nur schwer mit automatischen Bildverarbeitungsalgorithmen exakt und robust zu segmentieren. In der Folge können von den hilären Gefäßen keine zufriedenstellenden Oberflächenmodelle generiert werden, um dem Arzt einen dreidimensionalen Eindruck dieser Region geben zu können. Statt des indirekten Volumenrenderings wird in diesem Fall ein direktes VR genutzt, um die Hilus-Strukturen ohne Segmentierungsaufwand trotzdem abbilden zu können. Ähnlich zu der in [Zhou u. a., 2002] beschriebenen Vorgehensweise, wird hierbei in einem Vorverarbeitungsprozess eine kugelförmige Region in dem Volumenrendering platziert und damit die Hilusregion „herausgeschnitten“. Die innerhalb der Kugel liegenden Strukturen werden anschließend mit Hilfe von interaktiv veränderbaren Transferfunktionen dargestellt (Abb. 4.7g). Die Kugel enthält lediglich die Strukturen, die mindestens die Röntgendichte von Wasser haben, also große Gefäße, Lymphknoten, Muskeln und Knochen. Das Lungenparenchym und kleine Gefäße sind dabei transparent. Der mit verhältnismäßigem Aufwand segmentierbare Bronchialbaum wird zusätzlich als Oberflächenmodell eingebunden. Diese Art der Visualisierung hat den Vorteil, dass sie die Originalvolumendaten dreidimensional abbildet, ohne dass aufwändige, manuelle Segmentierungen notwendig sind. Vorausgesetzt, die Software arbeite robust mit unterschiedlichen Aufnahmeparametern und sei benutzerfreundlich gestaltet, kann solch ein interaktives 3D-VR innerhalb von wenigen Minuten von einem Arzt vor Ort produziert werden. Dem Chirurgen wird dadurch präoperativ die Einschätzung der Operabilität eines Patienten erleichtert.²³

4.5 Conceptual Scenarios

Nachfolgend werden basierend auf den User Personas und User Stories sogenannte „Conceptual Scenarios“ entwickelt. Sie spiegeln den Soll-Zustand wieder, der mit Hilfe von computergestützten Analysen sowie 2D- und 3D-Visualisierungen angestrebt wird. Obwohl die klinischen Abläufe möglichst realitätsgetreu abgebildet werden sollen, ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, alle medizinischen Befundungs- und Analyseprozesse detailliert zu beschreiben. Vielmehr sollen anhand der Szenarien verschiedene Visualisierungs- und Designentscheidungen der Endanwendung begründet werden. Die einzelnen Teilschritte werden im nachfolgenden Abschnitt in „Concrete Scenarios“ weiter verfeinert und veranschaulicht. Die Verbindung zu einem Concrete Scenario wird im Text beispielsweise durch [→ [Überblick: Falldaten](#)] kenntlich gemacht.

²³Bisher existieren zu dieser Visualisierungsform jedoch keine Erfahrungen und Rückmeldungen von medizinischen Experten. Weitere Diskussionen mit Ärzten sollen Aufschluss über den effektiven Nutzen dieses Verfahrens bringen.

4.5.1 Conceptual Scenario 1: Tumorboard

- **Hintergrund:** Tumorboard-Besprechung
- **Basiert auf:** User Story 1, Fall 1 (Patient HL-NK-Me)
- **Beteiligte Personen:** Chefarzt Prof. Dr. Gerhard Helmholtz und Assistenzarzt Dr. Johannes Planck sowie weitere Fachärzte der Chirurgie, Onkologie und Radiologie

Chefarzt Prof. Dr. Gerhard Helmholtz und der Assistenzarzt Dr. Johannes Planck stellen den Metastasen-Fall „HL-NK-Me“ gemeinsam auf einer Tumorboardbesprechung den anderen Fachärzten der Klinik vor. Dabei sind Ärzte der Chirurgie, Radiologie und Onkologie anwesend. Alle Ärzte treffen sich in einem Raum, in dem eine Workstation mit angeschlossenem Beamer steht. Es besteht ein direkter Zugriff auf die Bildserien des PACS und die Patientenbefunde. Der Chefarzt ruft an der Workstation die digitale Patientenakte des vorzustellenden Falls auf und fasst die bisherigen Befunde in wenigen Sätzen zusammen. Nebenbei ruft er die CT-Daten aus dem PACS auf und zeigt dabei mit der Maus auf die kritischen Bereiche in den Bildern. Er erklärt den anwesenden Ärzten, welche bisherigen Untersuchungen vorgenommen wurden und warum eine Operationsindikation besteht. Er klärt seine Kollegen darüber auf, dass die Bilddaten dieses Tumorfalles dem Forschungsinstitut Fraunhofer MEVIS für computerbasierte Analysen und 3D-Rekonstruktionen webbasiert zur Verfügung gestellt worden sind. Daraufhin wurde ein PDF-Dokument an die Klinik zurückgeschickt, das die Ergebnisse der Analysen sowie 2D- und 3D-Visualisierungen enthält.

Sein jüngerer Kollege, Assistenzarzt Dr. Planck, öffnet an der Workstation die PDF-Datei, die automatisch mit dem installierten ADOBE READER 10 angezeigt wird. Nachdem das Dokument geöffnet wurde, überspringt der Arzt die Falldaten-Zusammenfassung und die MTRA-Kommentare, da der Fall vom Chefarzt bereits vorgestellt wurde [→ [Überblick: Falldaten](#)]. Er wechselt daraufhin mit einem Klick in den 3D-Modus [→ [2D/3D-OP-Planung](#)]. Die beiden Lungenflügel, die Lungenlappen und Metastasen werden daraufhin auf der Leinwand angezeigt. Ein Arzt aus den hinteren Reihen fragt, ob man das 3D-Modell auch „etwas größer machen kann, weil es von weiter hinten nicht so gut zu erkennen ist“. Der Assistenzarzt klickt oben rechts, neben dem Drucker-Symbol, auf ein Icon, wodurch das Dokument im Vollbildmodus dargestellt wird [→ [Vollbildfunktion](#)]. Der Arzt verdeutlicht seinen Kollegen die kritischen Bereiche des Falls, indem er die Darstellung rotiert und zoomt. Die Handhabung der 3D-Szene fällt dem jungen Assistenzarzt leicht. Neben dem 3D-Modell nutzt er zusätzlich die Möglichkeit, über die Direktauswahl einzelner Läsionen, die 2D-Visualisierungen anzuzeigen [→ [2D-Darstellungen einer Läsion](#)]. Die beiden Ärzte besprechen mit den Fachkollegen mögliche Therapiestrategien und dokumentieren die Entscheidungen in der Patientenakte. Es wird entschieden, eine Operation durchzuführen und den Eingriff mit Hilfe des 3D-PDF-Reports von Fraunhofer MEVIS vorzubereiten. Danach gehen die Ärzte zum nächsten Tumorfall über.

4.5.2 Conceptual Scenario 2: OP-Planung – Fall 1

- **Hintergrund:** Vorbereitung einer Metastasen-OP
- **Basiert auf:** User Story 1, Fall 1 (Patient HL-NK-Me)
- **Beteiligte Personen:** Chefarzt Prof. Dr. Gerhard Helmholtz

Prof. Dr. Gerhard Helmholtz möchte die Operation des Patienten HL-NK-Me am Computer vorbereiten. Er öffnet dazu die Patientenakte im KIS und ruft das PDF-Dokument von Fraunhofer MEVIS mit dem ADOBE READER 10 auf. Als erstes möchte er sich die Falldaten anschauen. Ihn interessiert dabei, um welchen Patienten es geht, wann welche CT-Untersuchungen durchgeführt worden sind und ob ein(e) MEVIS-MTRA zusätzliche Kommentare zu dem Fall hinterlassen hat [→ [Überblick: Falldaten](#)]. Der Chirurg wechselt anschließend in den Modus „3D-OP-Planung“, da er einen operativen Eingriff vorbereiten will [→ [2D/3D-OP-Planung](#)]. Er möchte sich zunächst einen Überblick über die Metastasen-Anzahl und deren Größe und Lappenlokalisierung verschaffen. Weiterhin interessiert ihn, ob größere Gefäße infiltriert sind. Nachdem er in den OP-Planungsmodus gewechselt ist, sieht er die 3D-Darstellung der Lunge und der Läsionen, weiß aber nicht, wie er damit interagieren kann. Er sieht einen großen Button, der ihn in einen Schritt-für-Schritt-Modus durch die OP-Planung führt [→ [Wizard](#)]. In der klinischen Routine wird bei der Analyse der 2D-Schichtdaten pro Lungenseite lappenweise vorgegangen. Der Chirurg beginnt mit der rechten Seite der Lunge und möchte dabei alle drei Lungenlappen sehen. Er interessiert sich vor allem für die Lokalisation der Läsionen in den Lappen und den Kontakt zu Nachbarstrukturen, z. B. zu größeren Gefäßen mit einem Durchmesser größer als 3 mm. Die Darstellung der 3D-Lunge hat sich nach jedem Schritt entsprechend der Auswahl verändert (Abb. 4.6a-b). Das System schlägt dem Benutzer als letztes drei weitere Schritte vor: Der Anwender hat die Möglichkeit, die 3D-Visualisierung zu explorieren, er kann zur Läsionen-Übersicht wechseln oder den Wizard von vorne beginnen. Der Arzt entscheidet sich für die erste Option, da er nicht weiß, wie man die 3D-Darstellung drehen kann, um die rechte Lunge besser zu erkennen. Er hofft, im nächsten Schritt eine Hilfestellung dazu zu erhalten. Nachdem er den kurzen Hilfetext gelesen hat, ist er in der Lage dazu, die dreidimensionale Darstellung mit der Maus etwas zu drehen [→ [3D-Visualisierung: 3D-Interaktion](#)]. Da er jedoch ein ungeübter Anwender ist, verdreht er die 3D-Szene sehr stark, sodass er etwas die Orientierung verliert (Abb. 4.6c). Er scheitert daran, die Darstellung wieder in die ursprüngliche Ansicht zurück zu führen. Daher sucht der Arzt nach einer Möglichkeit, die ursprüngliche Standardansicht wieder herzustellen und findet den entsprechenden Eintrag in einem Auswahlmenü in der Unterkategorie „Ansicht“ [→ [3D-Visualisierung: Ansicht](#)]. Die Darstellung ist wieder in der Frontal-Ansicht zu sehen und wird vom Arzt dieses mal etwas vorsichtiger gedreht. Er fragt sich, ob man mit der Maus auch in die Szene hinein zoomen kann, um Details besser wahrzunehmen. Außerdem würde er nun gern statt der abstrakten Kugelform die Originalform der jeweiligen Läsionen sehen, um Gefäßinfiltrationen präzise beurteilen zu können. Er

erinnert sich an den kurzen Hilfetext zur Rotation der 3D-Darstellung und vermutet dort eine weitere Hilfestellung zur Zoomfunktionalität. So wechselt er von der Unterkategorie „Ansicht“ zurück zur Unterkategorie „3D-Interaktion“ und findet dort einen Hinweis, wie man in die Szene hinein/hinaus zoomen kann [→ [3D-Visualisierung: 3D-Interaktion](#)]. Dabei wechselt die Läsiondarstellung automatisch von der Kugel- zur Originalform, wenn weit in die Szene hinein gezoomt wird (Abb. 4.6d). Der Chirurg erkundet die 3D-Visualisierung, indem er sie mit der Rotations- und Zoomfunktion aus verschiedenen Perspektiven betrachtet. Er verschafft sich so einen Überblick über Anzahl, Lokalisation und Größe der rechtsseitig liegenden Metastasen. Der Arzt stellt dabei fest, dass im rechten Unterlappen eine Läsion, im rechten Oberlappen vier und im rechten Mittellappen drei Läsionen liegen. Die Raumforderungen sind überwiegend peripher lokalisiert und zentrale Bronchien sind nicht infiltriert. Der Chirurg möchte sich nun die linke Lunge anschauen und startet dafür den Wizard neu [→ [Wizard](#)]. Er entscheidet sich dieses mal dafür, auch periphere Blutgefäße in der 3D-Darstellung anzeigen zu lassen (Abb. 4.6e). Der Chirurg begutachtet die 3D-Szene und stellt dabei fest, dass im linken Unterlappen drei Läsionen dicht beieinander in der Nähe eines größeren zentralen Gefäßes liegen. Eine weitere Raumforderung des linken Unterlappens scheint pleuraständig zu sein (Abb. 4.6f).

Der Arzt wird plötzlich von einem Telefonanruf unterbrochen und beendet die OP-Vorbereitung für diesen Fall vorerst. Er macht sich ein paar schriftliche Notizen zu dem Fall (einige Unklarheiten: drei benachbarte Läsionen im linken Unterlappen, Brustwandinfiltration) und schließt das PDF-Dokument daraufhin. Der Chirurg fragt telefonisch seinen Kollegen, Assistenzarzt Dr. Johannes Planck, ob er die OP-Vorbereitung zwischenzeitlich übernehmen könne, verlässt anschließend den Raum und macht sich auf den Weg zu einer Besprechung.

4.5.3 Conceptual Scenario 3: OP-Planung – Fall 1 (Forts.)

- **Hintergrund:** Vorbereitung einer Metastasen-OP
- **Basiert auf:** User Story 1, Fall 1 (Patient HL-NK-Me)
- **Beteiligte Personen:** Assistenzarzt Dr. Johannes Planck und Chefarzt Prof. Dr. Gerhard Helmholtz

Der sich noch in der Ausbildung befindende Dr. Johannes Planck hat von Prof. Dr. Gerhard Helmholtz die Notizen übermittelt bekommen mit der Bitte, ihn zwischenzeitlich bei der OP-Planung zu unterstützen. Er soll dabei abklären, ob die drei beschriebenen Läsionen tatsächlich eng beieinander liegen, welche Operationstaktik er daraus ableiten würde und ob der eine fragwürdige Rundherd tatsächlich pleuraständig ist. In der kurzen Zeit konnte der Chefarzt diese Informationen nicht eindeutig der 3D-Darstellung entnehmen, daher soll sein Kollege auch die 2D-Schichtdaten des Falls hinzuziehen.

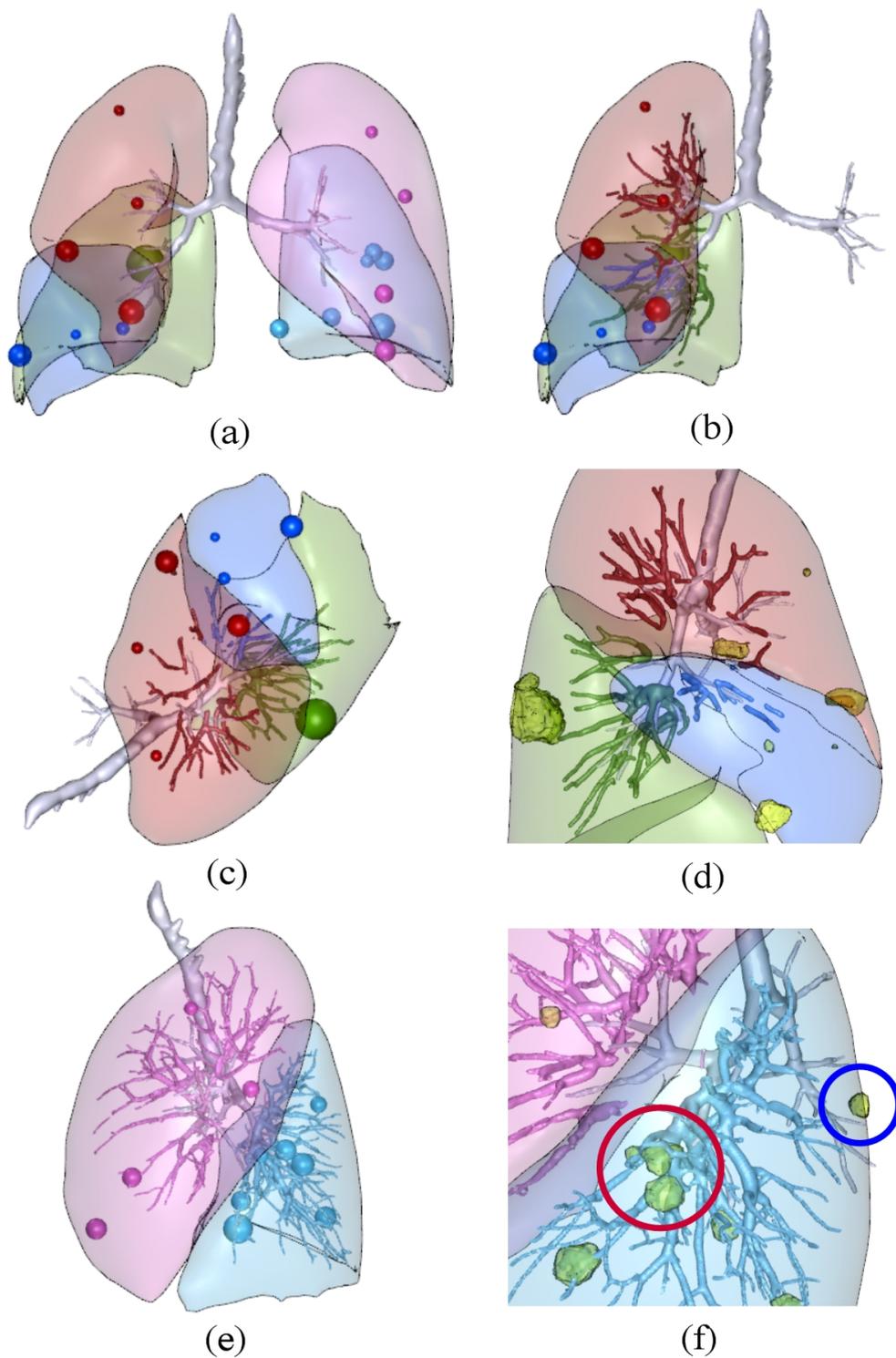


Abbildung 4.6.: Conceptual Scenario 2. **(a)** Standardansicht (Frontal) der beiden Lungenflügel, der Lungenlappen und der Läsionen in Kugelform, sowie des Bronchialbaums. **(b)** Darstellung der rechten Lungenseite mit großen Blutgefäßen (Durchmesser > 3 mm). Die linke Lunge ist ausgeblendet. **(c)** Vom Arzt stark verdrehte Ansicht des rechten Lungenflügels. **(d)** Gezoomte Ansicht auf die rechte Lunge. Die Läsionen werden in ihrer Originalform (Segmentierung) dargestellt. **(e)** Ansicht von links auf die linke Lunge. Darstellung großer und kleiner Gefäße. **(f)** Zoom auf linken Unterlappen. Drei dicht beieinander liegende Läsionen (roter Kreis) und ein vermutlich pleuraständiger Rundherd (blauer Kreis).

Dr. Johannes Planck öffnet den PDF-Report und liest sich zuerst die Falldaten-Übersicht durch, um sich ein Bild von dem Patienten zu machen (Voruntersuchungen, OP-Indikation, Kommentare) [→ [Überblick: Falldaten](#)]. Anschließend geht er in den OP-Planungs-Modus über [→ [2D/3D-OP-Planung](#)] und klickt sich durch das Schritt-für-Schritt-Konzept, um die 3D-Visualisierung seinen Wünschen entsprechend anzupassen [→ [Wizard](#)]. Er lässt sich – aufgrund der konkreten Fragestellung seines Kollegen – nur den Bronchialbaum, den linken Unterlappen und die darin liegenden Läsionen anzeigen. Blutgefäße lässt er zunächst ausgeblendet, um sich erst einmal einen Überblick zu verschaffen. Der Assistenzarzt ist erfahrener im Umgang mit 3D-Visualisierungen als sein älterer Kollege und findet schnell heraus, wie man die 3D-Szene mit der Maus drehen und zoomen kann. Aufgrund der einheitlichen Kugeldarstellung der Läsionen erkennt er sofort, dass im linken Unterlappen insgesamt sieben Raumforderungen liegen, wobei zwei davon miteinander verwachsen zu sein scheinen (Abb. 4.7a). Der Chirurg zoomt weiter in die Szene hinein, um mehr Details sehen zu können. Dabei wird ab einer gewissen Zoomstufe automatisch die originale Form der Läsionen angezeigt (Abb. 4.7b).²⁴ Der Arzt erkennt so, dass die drei fraglichen Raumforderungen nicht, wie anfangs vermutet, miteinander verwachsen sind. Die vierte vom Chefarzt als unklar beschriebene Läsion scheint nach Analyse der Detail-3D-Darstellung tatsächlich Pleurakontakt zu haben, eindeutig erkennen lässt sich dies jedoch nicht (Abb. 4.7c). Zur genauen Differenzierung sollen daher die in dem Report integrierten 2D-Visualisierungen der Läsionen herangezogen werden. Der Chirurg versucht, die Läsion direkt in der 3D-Visualisierung anzuklicken, mit dem Ziel dadurch weitere Informationen abzurufen. Die Selektion des 3D-Objektes gelingt ihm jedoch nicht. In dem User Interface entdeckt der Arzt jedoch eine Kategorie „Läsionen“, in der er sein Ziel erreicht. Dort lassen sich die 3D-Modelle der Läsionen über ein Auswahlménü selektieren und weitere Informationen dazu abrufen [→ [Selektion einer Läsion](#)]. Neben einigen quantitativen Daten, wie zum Beispiel dem Durchmesser und Volumen eines Tumors [→ [Läsionen-Info](#)], können außerdem verschiedene 2D-Visualisierungen einer Läsion angezeigt werden. Diese zeigen den Verlauf der Segmentierungskontur in drei orthogonalen Ansichten, verteilt auf neun Schichten [→ [2D-Darstellungen einer Läsion](#)]. In den 2D-Illustrationen des fraglichen Rundherdes lässt sich dadurch eindeutig erkennen, dass die Läsion tatsächlich mit der Brustwand verwachsen ist (Abb. 4.7d-f).

In der Zwischenzeit ist Prof. Dr. Gerhard Helmholtz von der Besprechung zurückgekehrt. Beide Ärzte schauen nun gemeinsam auf die 3D-Darstellung. Der Assistenzarzt erklärt seinem Vorgesetzten, dass die 2D-Visualisierungen des Reports im Zweifelsfall bei der Beurteilung von Pleura- und Gefäßinfiltrationen hilfreich sein können. Während die beiden Chirurgen die 3D-Szene rotieren, bemerken sie, dass die zentralen Zu- und Abgänge der Blutgefäße, sowie zentrale Lymphknoten, nicht in der dreidimensionalen Darstellung zu sehen sind. Neben der Unterkategorie „Läsion (2D)“, in der die 2D-Darstellungen einer ausgewählten Läsion abgerufen werden können, entdecken sie eine Unterkategorie „Hilus (3D)“. Dort lassen sich ei-

²⁴Die Morphologie und Größe der 3D-Modelle basiert dabei auf dem Segmentierungsergebnis der Rundherde.

nige Screenshots von Volumenrenderings der hilären Strukturen aus verschiedenen Perspektiven anzeigen [→ [2D-Darstellungen hilärer Strukturen](#)]. So ist es den beiden Chirurgen möglich, auch die zentralen Blutgefäße, die in der 3D-Visualisierung nicht zu sehen sind, in die OP-Planung einzubeziehen (Abb. 4.7g). Die beiden Chirurgen treffen gemeinsam auf Basis der 2D- und 3D-Analysen eine OP-Strategie für den vorliegenden Fall. Es soll eine parenchymsparende Laserresektion der pulmonalen Rundherde durchgeführt werden, verteilt auf zwei Operationen. Als Zugangsweg wird die laterale Thorakotomie gewählt. Für die Operation drucken die Ärzte einige 3D-Ansichten aus, indem sie auf einen Button mit Drucker-Icon oben rechts im PDF-Dokument klicken [→ [Druckfunktion](#)]. Die Ausdrücke eignen sich darüber hinaus als Dokumentation des OP-Planungsprozesses und können als Anschauungsmaterial bei weiteren Besprechungen genutzt werden (Abb. 4.7h).

4.5.4 Conceptual Scenario 4: Verlaufskontrollstudie

- **Hintergrund:** Durchführung einer Verlaufskontrollstudie
- **Basiert auf:** User Story 2
- **Beteiligte Personen:** Oberarzt Dr. Stefan Leibniz

Der Radiologe und Oberarzt Dr. Stefan Leibniz möchte die Ergebnisse einer Verlaufskontrollstudie anschauen, die sein Assistenzarzt durchgeführt hat. Dazu wurden im RIS alle Patientenbefunde und Verlaufsuntersuchungen dokumentiert und im PACS die jeweiligen Bilddaten abgespeichert. Die Zwischenergebnisse der Studie wurden in ein PDF-Dokument exportiert, welches dem Radiologen nun vorliegt. Mit Hilfe der Bilddaten, der Befunde und des PDF-Reports möchte sich der Arzt einen Überblick über die Studie seines Kollegen verschaffen. Es ist geplant, die Studie in einer Fachzeitschrift zu publizieren.

Der Radiologe öffnet die digitale Patientenakte im RIS und den PDF-Bericht. In dem PDF-Dokument sieht er als erstes die Zusammenfassung der Falldaten des Patienten [→ [Überblick: Falldaten](#)]. Diese Informationen liest sich der Arzt kurz durch, wechselt dann aber zurück zur Patientenakte des RIS, um detaillierte Informationen zu dem Fall abzurufen.²⁵ Nachdem sich der Arzt einen Überblick über den Fall verschafft hat, wechselt er in dem PDF-Report in den Modus „Onkologischer Befund“, in dem die Verlaufsuntersuchungen zusammengefasst werden [→ [Onkologischer Befund / Lungenfunktion](#)]. Dort schaut er sich die Befundhistorie an. Seine Fragestellungen dabei sind:

- An welchen Tagen wurden radiologische Untersuchungen mit welchen Aufnahmeparametern durchgeführt?

²⁵Das RIS speichert alle Informationen eines Patienten, z. B. Patientenstammdaten, Terminplanungen, sämtliche Befunde, klinische Behandlungspfade und viele mehr.

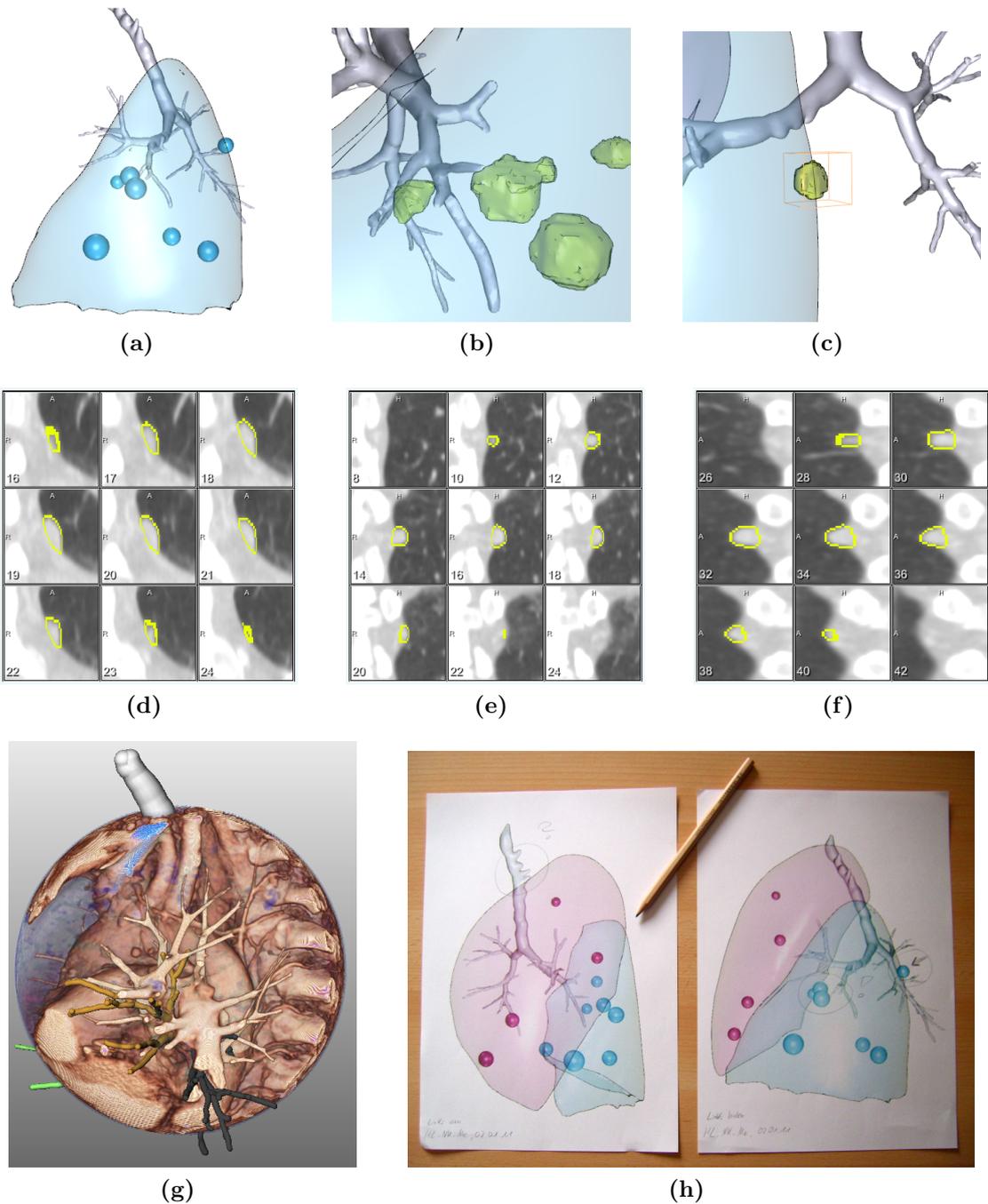


Abbildung 4.7.: Conceptual Scenario 3. **(a)** Ansicht von links auf den linken Unterlappen und die sieben darin liegenden Läsionen. **(b)** Gezoomte Detailansicht, in der die Originalform der Läsionen, basierend auf deren Segmentierung, dargestellt wird. **(c)** Ein im linken Unterlappen selektierter Rundherd, vermutlich pleuraständig. Die durchsichtige orangefarbene Bounding Box verdeutlicht die Selektion des Objektes. **(d-f)** Axiale, coronale und sagittale Darstellung der Segmentierungskontur der selektierten Läsion in Bild c). In den drei Ansichten der 2D-Schichten wird deutlich, dass die Metastase tatsächlich mit der Brustwand verwachsen ist. **(g)** Volumenrendering einer kugelförmigen Region um den Hilus für die Beurteilung zentraler Strukturen. Zur Orientierungsunterstützung wird zusätzlich das 3D-Modell des segmentierten Bronchialbaumes integriert, wobei die Hauptäste je nach Lappenzugehörigkeit eingefärbt wurden. **(h)** Zwei Ausdrücke für die Dokumentation der OP-Planung. Die Annotationen der Ärzte (eingezeichnete Regionen) markieren unklare oder wichtige Aspekte in den Bildern.

- Was wurde bei den Untersuchungen festgestellt? Zu welchen Entschlüssen ist sein Kollege gekommen?
- Sind die Metastasen im Therapieverlauf kleiner oder größer geworden oder sind neue hinzu gekommen?
- Wie haben sich die beiden Faktoren *Summe der maximalen Durchmesser* und *Summe der Läsionen* im Laufe der Therapie verändert?
- Welche RECIST-Stadien-Einteilungen wurden vorgenommen und wie ist der Verlauf der Therapie zu bewerten?

Die Informationen entnimmt der Radiologe einer tabellarischen Übersicht in dem PDF-Bericht [→ [Verlaufskontrolle: Übersicht](#)]. Zusätzlich zur textuellen Darstellung der Daten werden die Zahlenwerte der beiden Parameter *Summe der maximalen Durchmesser* und *Summe der Läsionen* in Form von Säulendiagrammen grafisch präsentiert. Die Diagramm-Darstellung vermittelt dem Radiologen, dass die Therapie erfolgreich verlief. Sowohl der Durchmesser der Läsionen, als auch die Anzahl der Läsionen ist im Laufe der Behandlung kleiner geworden. In einem kleinen Infotext über dem Diagramm liest der Arzt, dass die genauen Zahlenwerte und RECIST-Stadien dem Diagramm entnommen werden können, wenn die Maus darüber bewegt wird. In einem kleinen Pop-Up wird daraufhin das Datum der Untersuchung, der jeweilige Zahlenwert (z. B. Summe: 4,5 mm) und das RECIST-Stadium (z. B. PR) angezeigt [→ [Verlaufskontrolle: Interaktive Diagramme](#)]. Der Arzt möchte nun detaillierte Informationen zu einzelnen Läsionen des Tumorfalls abrufen und wechselt dafür von der Kategorie „Überblick“ in die Kategorie „Detail“. In einer Tabelle liest er die Nummer jeder Läsion, ihr zugeordnetes Lappenterritorium, Größen- und Verlaufsangaben (Durchmesser, Volumen), sowie Grauwert-Angaben (Durchschnitts- und Maximalgrauwert) [→ [Verlaufskontrolle: Detailinformationen](#)]. Als letztes druckt der Arzt das Diagramm der Verlaufsuntersuchungen aus, indem er auf einen Button mit einem Drucker-Icon klickt [→ [Druckfunktion](#)]. Zusätzlich erstellt der erfahrene Computeranwender einige Screenshots des PDF-Reports, die im Rahmen einer Veröffentlichung oder bei weiteren Diskussionen genutzt werden können.

4.5.5 Conceptual Scenario 5: OP-Planung – Fall 2

- **Hintergrund:** Vorbereitung einer Metastasen-OP
- **Basiert auf:** User Story 3, Fall 2 (Patient HL-LH-Me)
- **Beteiligte Personen:** Chefarzt Prof. Dr. Gerhard Helmholtz

Der Chefarzt Prof. Dr. Gerhard Helmholtz möchte mit Hilfe des 3D-PDF-Reports einen chirurgischen Eingriff bei dem Patienten HL-LH-Me vorbereiten. Er öffnet dazu an seinem Arbeits-Laptop die PDF-Datei mit dem installierten ADOBE

READER 10. Als erstes liest er sich die Falldaten-Zusammenfassung und die darin hinterlegten Kommentare eines MEVIS-Mitarbeiters durch [[→ Überblick: Falldaten](#)]. In dem Kommentar weist der MEVIS-Angestellte daraufhin, dass drei von seinen sieben Findings nicht exakt als Metastasen zu identifizieren waren.²⁶ Seiner Meinung nach, könnte es sich dabei auch um Gefäßabschnitte oder Verkalkungen handeln. Laut Meinung des MEVIS-Mitarbeiters liegen alle Läsionen, die tatsächlich Metastasen zu sein scheinen, im linken Unterlappen. Diese Informationen sind wichtig für den Chirurgen. So bekommt er vorab eine Unterstützung bei der Bearbeitung des Tumorfalls. Zusätzlich zu den Lungenlappen, den Bronchien und den Rundherden, wurden bei diesem Fall die Pulmonalarterien und -venen, die Aorta sowie die Lymphknoten von einer MTRA aufwändig segmentiert und dreidimensional aufbereitet.

Der Arzt steigt daraufhin mit einem Klick direkt in den 3D-Modus ein [[→ 2D/3D-OP-Planung](#)]. Da er in der Zwischenzeit schon andere Tumorfälle mit dem 3D-Report bearbeitet hat, stellt die Bedienung der 3D-Darstellungen für ihn mittlerweile kein Problem mehr da. Routiniert dreht und zoomt der Chefarzt das dreidimensionale Modell mit der Maus und erkennt auf den ersten Blick, dass im linken Unterlappen mehrere Läsionen liegen (Abb. 4.9b). Der Arzt liest parallel dazu in dem Befundbericht des Radiologen, dass sich im rechten Oberlappen ein unveränderter kleiner Rundherd befindet und dass es sich dabei um eine Metastase handeln könnte (Abb. 4.8a). Der radiologische Befund enthält keine weiteren bildlichen Darstellungen dieser fragwürdigen Raumforderung. Der Arzt sieht den Herd jedoch in der 3D-Visualisierung und versucht ihn direkt mit der Maus anzuklicken, in der Hoffnung, dadurch evtl. weitere Informationen abrufen zu können. Das direkte Anklicken der Kugel ist jedoch nicht von Erfolg gekrönt, obwohl der Radiologe ihm versichert hat, dass man interaktiv in der 3D-Szene selektiv Läsionen aktivieren kann. Der Chirurg sucht daher nach einer Hilfe in dem PDF-Dokument und sieht oben rechts in der Ecke ein Fragezeichen-Icon. Ein Klick auf das Icon ruft ein Pop-Up mit einem Hilfetext auf [[→ Hilfefunktion](#)]. Unter der Kategorie „Selektion von Läsionen“ findet er die Information, die er gesucht hat.²⁷ In dem Menü wählt er die Läsion im rechten Oberlappen aus und schaut sich die quantitativen Parameter an [[→ Selektion einer Läsion](#) und [→ Läsionen-Info](#)]. Der Rundherd ist etwa 3 mm groß und hat einen Maximalgrauwert von -37 HU. Zusätzlich betrachtet der Chirurg die 2D-Visualisierungen der aktivierten Läsion, die parallel zu der 3D-Darstellung angezeigt werden (Abb. 4.8b). Er schaut sich nacheinander die axiale, sagittale und coronale 2D-Visualisierung an, indem er in der Unterkategorie „Läsion (2D)“ auf „Axial“, „Sagittal“ und „Coronal“ klickt [[→ 2D-Darstellungen einer Läsion](#)]. Die Bilder der Segmentierung und der relativ kleine Maximalgrauwert legen die Vermutung nahe, dass es sich bei dieser Struktur tatsächlich nur

²⁶Zusätzlich zu den CAD-Findings sucht der erfahrene MEVIS-Mitarbeiter manuell nach verdächtigen Strukturen in dem CT-Datensatz, die von dem CAD nicht markiert worden sind. Die manuell detektierten Findings werden segmentiert, dreidimensional rekonstruiert und in dem Fallbericht für den Chirurgen dokumentiert.

²⁷Kleine 3D-Objekte (Läsionen), die innerhalb von größeren transparenten Objekten (Lungenlappen) liegen, lassen sich im Adobe Reader nicht direkt mit der Maus anklicken, sondern müssen über ein Menü in der Benutzeroberfläche aktiviert oder ausblendet werden.

um einen Teil eines Gefäßastes handelt, in dem etwas mehr Kontrastmittel als bei den Strukturen in der Umgebung angelangt ist. Der Chirurg entscheidet sich dazu, diese Region in weiteren Untersuchungen zu beobachten.

Der Radiologe hat in seinem Befund eine Region im linken Oberlappen beschrieben, die klar verkalkt ist (Abb. 4.8c). Der Chirurg wählt diese Raumforderung in dem Auswahlmenü aus, analysiert die Größen- und Grauwertangaben und schaut sich die dazugehörigen 2D-Bilder an [→ [Läsionen-Info](#) und → [2D-Darstellungen einer Läsion](#)]. Die beschriebene Region ist etwa 4 mm groß und hat einen Maximalgrauwert von 679 HU. Der sehr hohe Grauwert deutet auf eine stark kalkhaltige Struktur hin, die jedoch ungefährlich ist. In einem kleinen Textfeld neben den Läsionen-Daten wird zusätzlich der Kommentar einer MTRA eingeblendet. In dem kurzen Text weist sie auf die Verkalkung dieses Findings hin [→ [Läsionen-Info](#)]. Auf Basis der 2D- und 3D-Analyse und des hohen Grauwertes entscheidet sich der Chirurg dafür, diese Region weiter zu beobachten und nicht zu operieren. Die weitere Analyse konzentriert sich nun auf den linken Unterlappen, in dem insgesamt fünf Läsionen vom Radiologen beschrieben wurden. Die fünf Herde sind in der 3D-Szene sichtbar.

Der Arzt stellt fest, dass die 3D-Visualisierung sehr komplex ist, da sehr viele Gefäße, Kugeln und Lungenlappen zu sehen sind, die für die Beurteilung der Strukturen des linken Unterlappens nicht relevant sind. Er sucht nach einer Möglichkeit, einzelne Objekte auszublenden und findet die entsprechenden Bedienelemente in der Benutzeroberfläche unter der Kategorie „3D-Visualisierung“. Mit wenigen Klicks blendet er alle drei Lungenlappen der rechten Lunge sowie den linken Oberlappen aus [→ [3D-Visualisierung: Ansicht](#)]. Für eine bessere Sichtbarkeit der Läsionen und Gefäße erhöht der Arzt die Transparenz der Lungenlappen in dem direkt daneben liegenden Menü [→ [3D-Visualisierung: Ansicht](#)].

Der Chirurg möchte nun statt der abstrakten Kugelform die reale Form der Rundherde sehen, um den Kontakt zwischen Läsionen und Gefäßen oder anderen Strukturen besser einschätzen zu können. Er sucht in dem User Interface nach einer Möglichkeit, die Kugeln auszublenden. In der noch geöffneten Unterkategorie „3D-Objekte“ findet er neben der Option, den Kugelmodus (Lokalisation vs. Größenänderung) zu wechseln, die Möglichkeit, die Darstellung der Läsionform zu beeinflussen. Er ändert die Einstellung von „Nur Kugel“ auf „Nur Läsion“, wodurch die Kugeln in der 3D-Visualisierung ausgeblendet werden und stattdessen die wahre Form der Läsionen dargestellt ist [→ [3D-Visualisierung: 3D-Objekte](#)]. Aus der transparenten Darstellung der Rundherde wird ersichtlich, dass die Läsionen nicht über Lappengrenzen hinweg wachsen und dass keine größeren zentralen Gefäße infiltriert sind (Abb. 4.8e und Abb. 4.8f). Es besteht demzufolge kein erhöhtes OP-Risiko.

Der Chirurg wird plötzlich von einem Telefonanruf unterbrochen. Er wird von seinem Assistenzarzt Dr. Johannes Planck angerufen, der seinem Chefarzt von einem neuen Metastasenfall berichtet. Dr. Planck fragt ihn außerdem, welcher Patient als nächstes operiert wird, damit er sich auf den Eingriff vorbereiten kann. Der

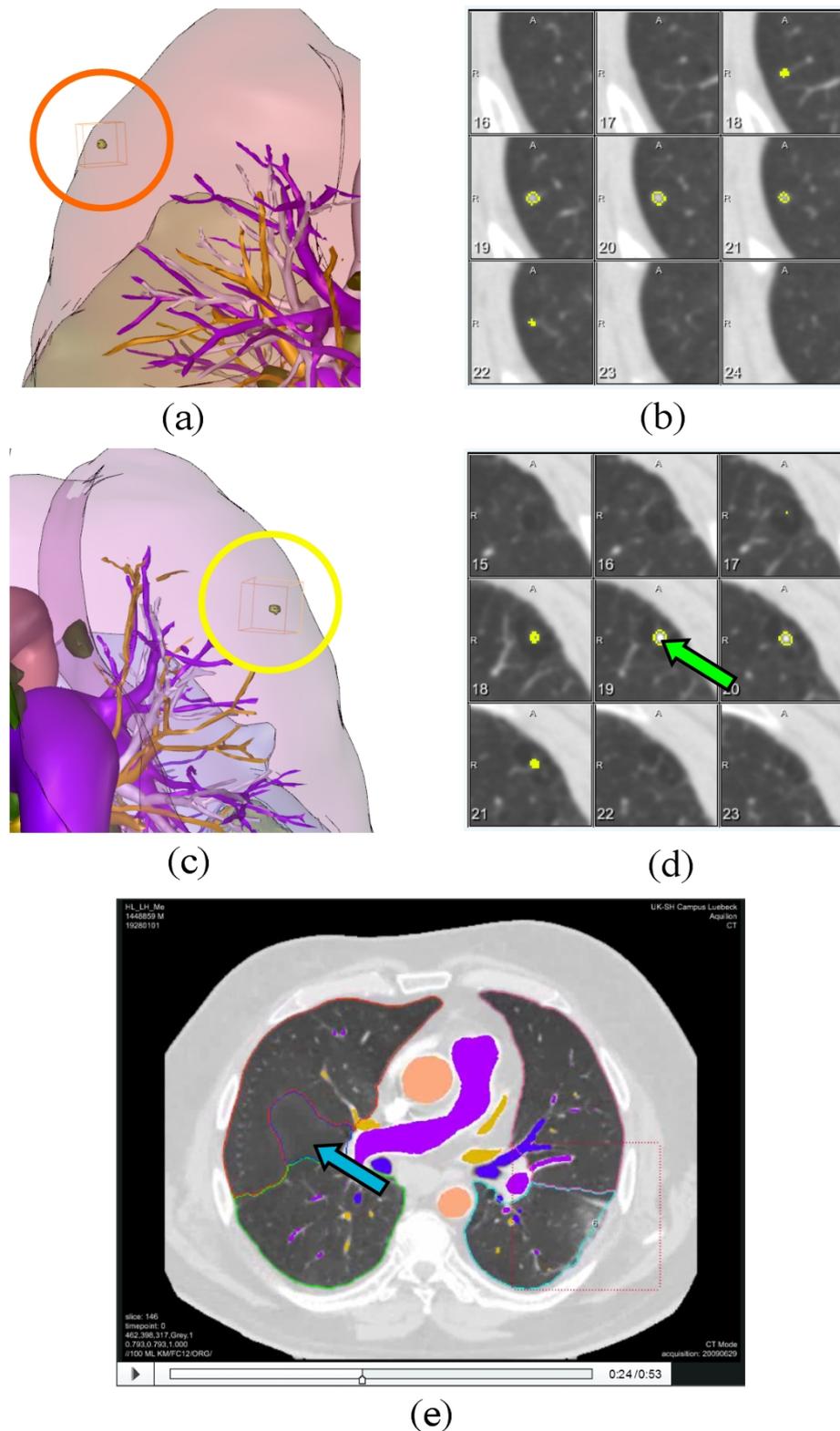


Abbildung 4.8.: Conceptual Scenario 5a. **(a-b)** Unveränderter Rundherd im rechten Oberlappen (orangefarbener Kreis), der weiter beobachtet wird. **(c-d)** Selektierte Raumforderung des linken Oberlappens (gelber Kreis). Ein sehr hoher Maximalgrauwert von 679 HU im Inneren der Läsion deutet auf eine Verkalkung hin (grüner Pfeil). **(e)** Ausschnitt aus dem CT-Video. Farbige Overlays markieren die in der 3D-Visualisierung zu sehenden Strukturen. Emphyseme (dunkle Regionen) sind erkennbar (blauer Pfeil).

Chefarzt ist gerade mit der OP-Vorbereitung dieses Falls beschäftigt. Er sieht in dem PDF-Dokument neben der 3D-Visualisierung einen großen Button „Falldaten“. Er klickt darauf und in einem sich öffnenden Pop-Up-Fenster wird angezeigt, um welchen Patienten es sich handelt, dessen Fall in diesem Report abgebildet wird [→ [Pop-Up: Falldaten](#)]. Der Chefarzt teilt seinem Kollegen mit, dass es sich um den Patienten „HL-LH-Me“ handelt. Die OP findet am nächsten Tag vormittags, 10.00 Uhr statt. Der Chefarzt verabschiedet sich und beendet das Gespräch.

Der Chirurg möchte nun gern wissen, welche der vom Radiologen beschriebenen Läsionen gewachsen und welche neu hinzugekommen sind. Der Radiologe hat ihm mitgeteilt, dass man in dem PDF-Report größer und kleiner gewordene Läsionen anzeigen lassen kann. Der Chirurg sucht in der Benutzeroberfläche nach einem Button, mit dem diese Aktion vorgenommen werden kann. In der Unterkategorie „3D-Objekte“ findet er die Lösung. Dort lässt sich mit einem Klick vom Läsionen-Modus „Lokalisation“ in den Modus „Größenänderung“ wechseln [→ [3D-Visualisierung: 3D-Objekte](#)]. Zusätzlich hat der Benutzer hier die Möglichkeit, einzelne in der 3D-Szene zu sehende Objekte ein- und auszublenden. Der Chirurg entfernt die Häkchen aus den Checkboxes „Pulmonalarterie“, „Pulmonalvene“, „Aorta“ und „Lymphknoten“, sodass nur noch der linke Unterlappen, die Bronchien und die Kugeln der Rundherde zu sehen sind. In der resultierenden 3D-Visualisierung (Abb. 4.9d) wird deutlich, dass vier von den insgesamt fünf Läsionen im linken Unterlappen im Vergleich zur Voruntersuchung größer geworden sind (rot), während ein zentraler Rundherd neu gewachsen ist (pink).

Dem radiologischen Befund entnimmt der Chirurg, dass sich im rechten mittleren Lungenlappen überblähte Lungenareale (Emphyseme) befinden. Der Arzt hat vom Radiologen den Tipp bekommen, dass in dem PDF-Report auch ein Video vom CT des Patienten integriert ist. Er klickt auf den Button „CT-Video“, der sich direkt neben dem „Falldaten“-Button befindet und schaut sich das Video an [→ [CT-Video](#)]. Die dunklen Areale im rechten Mittellappen sind in dem Video zu erkennen. Durch die Hervorhebung der Lappengrenzen mit Hilfe von farbigen Segmentierungsoverlays wird es dem Arzt ermöglicht, die emphysematischen Regionen den jeweiligen Lungenlappen zuzuordnen (Abb. 4.8e). Für die genaue Analyse der postoperativen Lungenfunktion wechselt der Arzt anschließend auf die Seite „Funktionelle Analyse“ [→ [Funktionelle Analyse](#)]. Dort befindet sich eine tabellarische Zusammenfassung der berechneten Volumina und Emphysemindizes jedes einzelnen Lungenlappens. Zusätzlich werden die Daten in Form eines Tortendiagramms visualisiert [→ [Funktionelle Analyse: Interaktives Diagramm](#)]. Den Zahlenwerten und der Darstellung des Diagramms entnimmt der Arzt, dass die Funktion der rechten Lunge ausreicht, wenn der linke Unterlappen entfernt werden würde.

Der Chefarzt wechselt zurück in den 3D-Modus und holt einen weiteren Kollegen hinzu, um eine zweite Meinung einzuholen. Die beiden Ärzte rotieren und zoomen die 3D-Darstellung, schauen sich zusätzlich die Original-Bilddaten im PACS an und entscheiden sich letztlich für eine Lobektomie des linken Unterlappens. Die Chirurgen dokumentieren ihre Entscheidungen in der Patientenakte, beenden daraufhin die OP-Planung und schließen das PDF-Dokument.

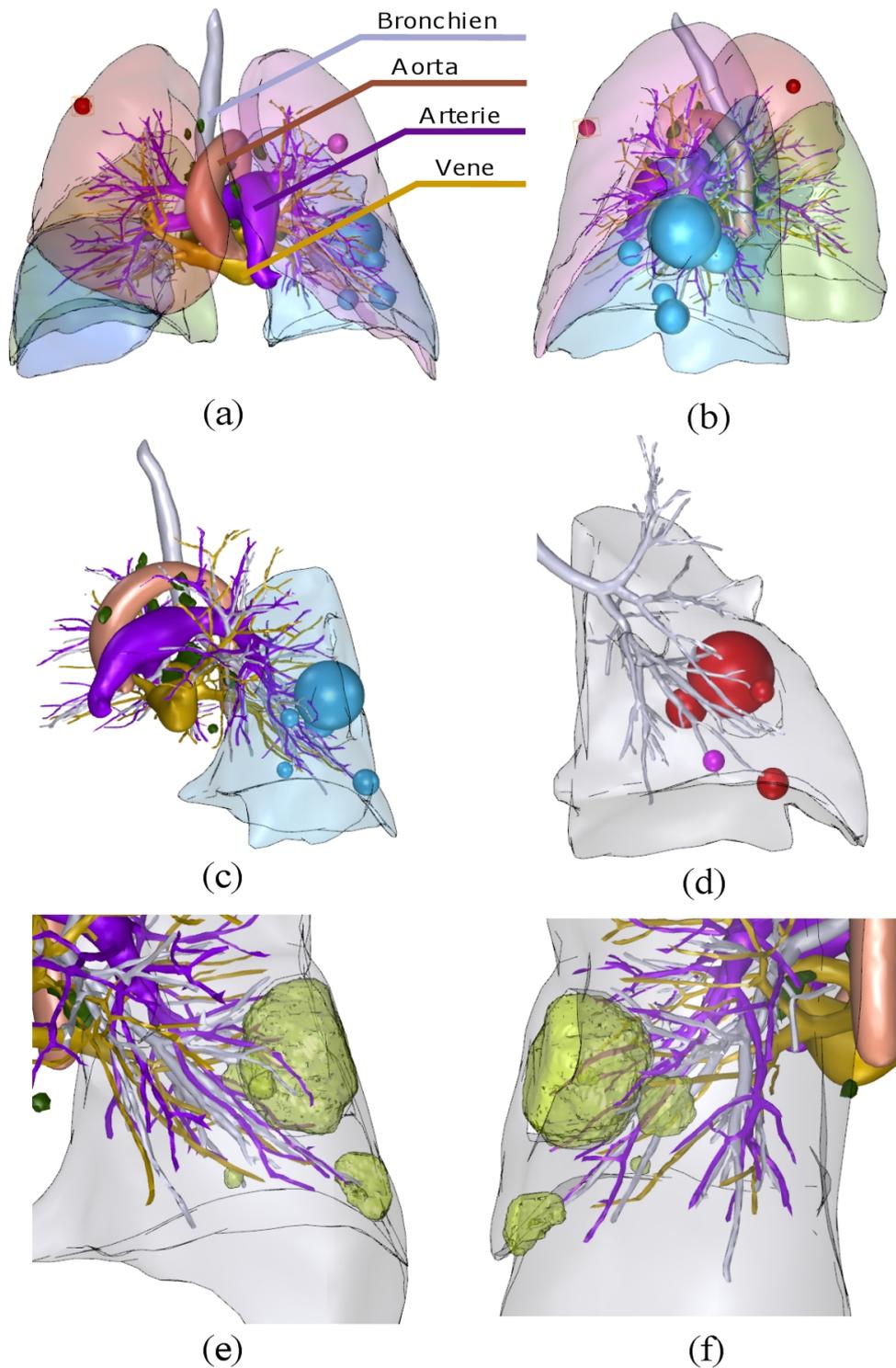


Abbildung 4.9.: Conceptual Scenario 5b. **(a)** Frontalansicht der Lungenlappen, der Lymphknoten, der arteriellen und venösen Blutgefäße, der Aorta, der kugelförmigen Läsionen sowie des Bronchialbaums. Ein selektierter Rundherd im rechten Oberlappen (orangefarbene Bounding Box). **(b)** Ansicht von hinten auf die linke Lungenseite. Eine selektierte Läsion im linken Oberlappen. **(c)** Läsionmodus: *Lappenlokalisierung*. Rechter Lungenflügel und linker Oberlappen ausgeblendet. **(d)** Läsionmodus: *Größenänderung*. Vier größer gewordene Läsionen (rot), ein neu hinzugekommener Rundherd (pink). Der Lungenlappen wird in diesem Modus hell-grau dargestellt. **(e-f)** Zoom auf linken Unterlappen von vorn (e) und hinten (f), wodurch die Originalform der Rundherde deutlich wird.

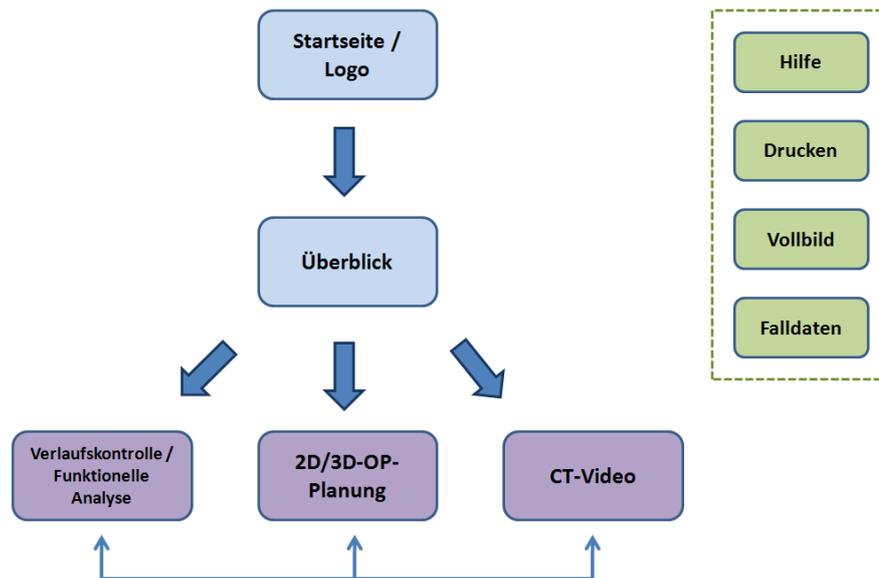


Abbildung 4.10.: Die Hauptnavigation des PDF-Reports. Nach einer Überblicksseite kann in einen der drei Modi „Verlaufskontrolle/Funktionelle Analyse“, „2D/3D-OP-Planung“ oder „CT-Video“ navigiert werden. Neben dieser Dokumentnavigation ist es außerdem von jeder PDF-Seite aus möglich, die Vollbild-, Druck- und Hilfefunktion oder die Falldaten des Patienten aufzurufen.

4.6 Concrete Scenarios

In diesem Abschnitt werden die zuvor beschriebenen Conceptual Scenarios in Teilaspekte aufgesplittet. Die Denkweisen potentieller Anwender sowie deren Benutzerinteraktionen mit dem System sollen dabei berücksichtigt und anhand von konkreten prototypischen Umsetzungen veranschaulicht werden.

4.6.1 Hauptnavigation

Die Navigationsschritte in dem PDF-Report sind einfach strukturiert (Abb. 4.10). Auf der ersten Seite des PDF-Dokumentes wird das Fraunhofer-MEVIS-Logo und ein Start-Button platziert. Nach einem Klick auf diesen Start-Button wird der Benutzer zu einer Überblicksseite geführt, auf der die Falldaten und weitere mögliche Schritte präsentiert werden. Von dort aus kann zu einem der Modi „Verlaufskontrolle/Funktionelle Analyse“ (Abschnitt 4.6.2), „3D-OP-Planung“ (Abschnitt 4.6.1.3) oder „CT-Video“ (Abschnitt 4.6.1.4) navigiert werden. Zwischen den jeweiligen Modi kann mit Hilfe von großen Buttons bequem gewechselt werden. Die Hilfe-, Druck- und Vollbildfunktion ist von jeder Seite aus aufrufbar. Die einzelnen Teilfunktionen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Auf der Startseite des PDF-Reports wird das Fraunhofer-MEVIS-Logo, eine große Überschrift und ein Start-Button abgebildet. Der Startknopf wurde bewusst groß und präsent gestaltet, damit der Benutzer nicht die Scrollleiste des PDF-Doku-



Abbildung 4.11.: Die Startseite des PDF-Reports. Ein Klick auf den Start-Button führt auf die Übersichtsseite des Dokumentes. Die Patienten-ID kennzeichnet die Zugehörigkeit dieses Reports zu einem bestimmten Fall.

mentes bedienen muss.²⁸ Außerdem werden Ansprechpartner aufgelistet, falls der Benutzer Schwierigkeiten mit dem Dokument oder Nachfragen hat. Zusätzlich wird die ID des Patienten präsentiert. So kann es nicht zu Verwechslungen zwischen mehreren Patienten kommen.

4.6.1.1 Überblick: Falldaten

Die nachfolgende Übersichtsseite ist in zwei große Bereiche geteilt (Abb. 4.12). Links befindet sich eine Zusammenfassung der Falldaten des Patienten, rechts ein Überblick über weitere mögliche Navigationsschritte. Die beiden Boxen heben sich aufgrund des weißen Hintergrundes, einer dunklen Rahmenlinie und eines leichten Schattenwurfes vom etwas dunkleren Hintergrund des Dokumentes ab. Zur weiteren Strukturierung werden große, selbstklärende Überschriften (z. B. „Weitere Schritte“) verwendet, um den Inhalt der jeweiligen Box zusammenzufassen. Um dem Benutzer eine Hilfestellung zu geben, wird einleitend ein kurzer Text präsentiert. Der Hilfe-Text setzt sich aufgrund der blauen Schriftfarbe vom Rest ab, wird durch ein Info-Icon neben dem Text hervorgehoben und wird unten von einer grauen Linie abgeschlossen. Diese Art der Hilfestellung (Info-Text, Icon, Begrenzungslinie) zieht sich durch das gesamte Dokument, um dem Benutzer ein einheitliches Hilfekonzept anbieten zu können.

²⁸Seitenwechsel mit Hilfe der Scrollleiste innerhalb eines PDF-Dokumentes mit mehreren Flash-Applikationen und 3D-Visualisierungen führen manchmal zu Abstürzen des Adobe Readers.

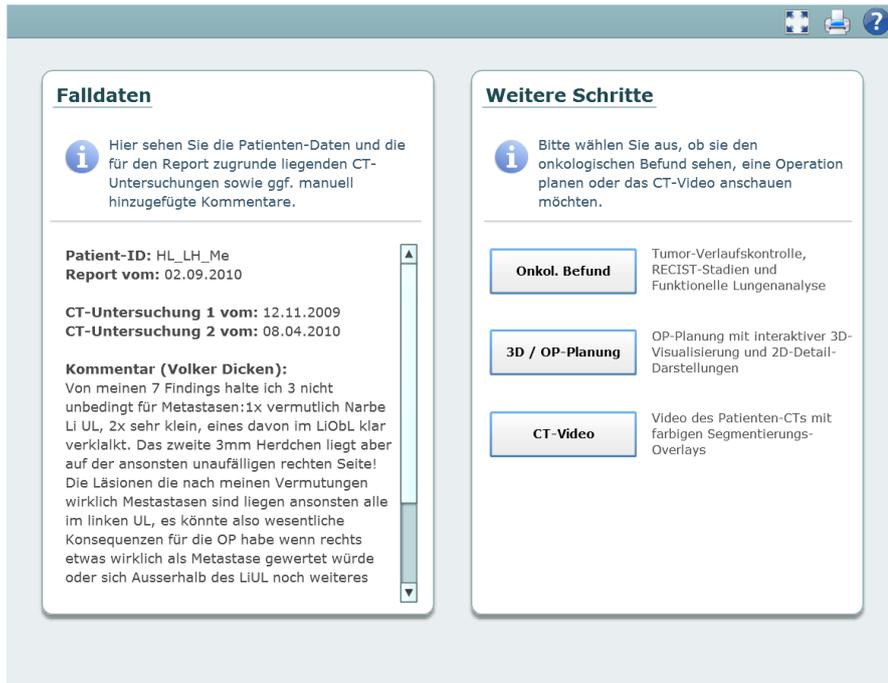


Abbildung 4.12.: Überblicksseite des PDF-Reports. Links: Falldaten-Zusammenfassung und zusätzliche Kommentare eines MEVIS-Mitarbeiters. Rechts: Überblick über die weiteren möglichen Navigationsschritte. Kurze Hilfetexte beschreiben die jeweiligen Funktionen der Bedienelemente.

Die Falldaten-Zusammenfassung beschränkt sich in dieser prototypischen Umsetzung auf die ID des Patienten, das Datum der Erstellung des Reports, Angaben über radiologische Untersuchungen und fallbezogene Kommentare eines MEVIS-Mitarbeiters oder einer MEVIS-MTRA. In dem in der Abb. 4.12 zu sehenden Kommentar weist der MEVIS-Angestellte auf bestimmte Unklarheiten oder Auffälligkeiten des CT-Datensatzes hin. Bei der Bearbeitung eines Falls kann es beispielsweise zu Schwierigkeiten bei der Segmentierung der Lungenstrukturen kommen. Nicht exakt segmentierte Strukturen, z. B. Lungenlappen oder Metastasen, führen zu 3D-Rekonstruktionen, die vom Chirurgen falsch interpretiert werden könnten.²⁹ Auf solche datensatzspezifischen Gegebenheiten kann in dem Kommentar hingewiesen werden. Die Falldaten-Zusammenfassung kann von jeder Seite des PDF-Dokumentes über einen Button aufgerufen werden [→ [Pop-Up: Falldaten](#)].

²⁹Die Lungenlappen lassen sich bei großflächigem Tumorbefall oft nur manuell mit großem Aufwand exakt segmentieren. Lungenmetastasen sind nicht immer exakt als solche zu erkennen und können unter Umständen als Teil eines Blutgefäßes angesehen werden.

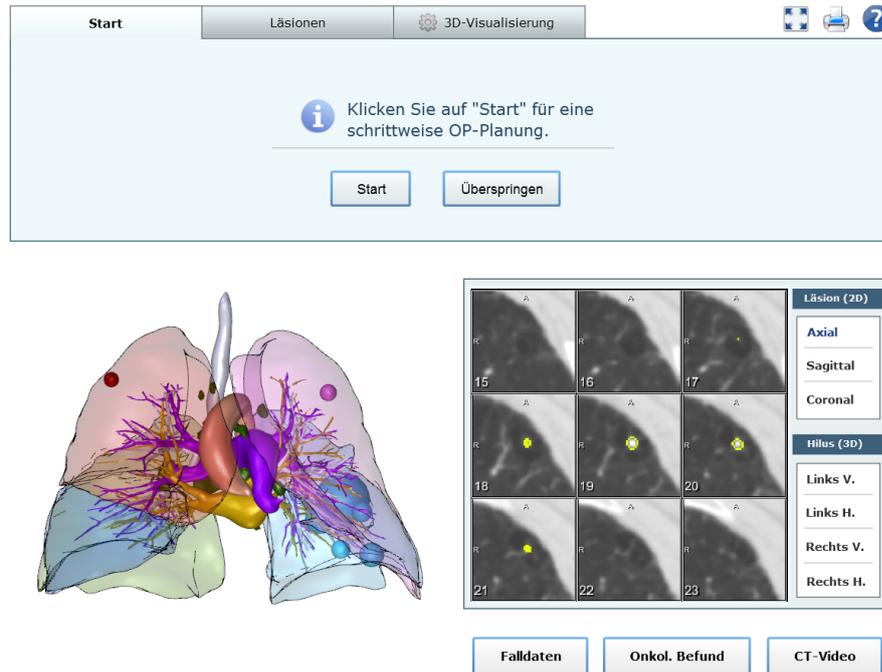


Abbildung 4.13.: Kombinierte 2D/3D-Visualisierung für die OP-Planung. In einer neben dem 3D-Modell der Lunge platzierten Box wird die 2D-Darstellung einer ausgewählten Läsion abgebildet. Über ein Tab-Menü im oberen Bereich der Seite können wahlweise der Wizard, die Läsionenübersicht oder die Einstellungsmöglichkeiten der 3D-Szene aufgerufen werden. Eine Buttonleiste unten rechts ermöglicht die direkte Navigation in einen anderen Modus. Die Icons am oberen rechten Rand ermöglichen die Aktivierung der Vollbild-, Druck- oder Hilfefunktion.

4.6.1.2 Überblick: Weitere Schritte

Rechts neben der Falldatenzusammenfassung befindet sich eine Übersicht über die weiteren Navigationsschritte in dem PDF-Dokument. Die Modi „Onkologischer Befund“, „3D / OP-Planung“ oder „CT-Video“ können mit Hilfe von großen Buttons direkt ausgewählt werden. Die Buttons sind aufgrund der breiten, blau leuchtenden Umrandung und des fett-geschriebenen Labels deutlich als klickbare Schaltflächen zu erkennen. Zusätzlich wird neben jedem Button ein kurzer, prägnanter Infotext abgebildet. Er beschreibt in kurzen Worten die Informationen, die über diese Klickfläche abgerufen werden können (Abb. 4.12).

4.6.1.3 2D/3D-OP-Planung

Die Seite für die OP-Planung mit Hilfe der 2D- und 3D-Visualisierungen ist in drei große Bereiche unterteilt. Unten links befindet sich das 3D-Modell der Lunge, rechts daneben die Box, mit der die 2D-Visualisierungen der Läsionen und der hilären Strukturen abgerufen werden können. In Abb. 4.13 ist die axiale 2D-Darstellung einer ausgewählten Läsion zu sehen. Diese Anordnung ermöglicht dem Arzt eine synchrone 2D/3D-Beurteilung der Lungenläsionen und der mediastinalen Strukturen. In Abschnitt 4.6.6 wird weiter auf diesen Aspekt eingegangen.

Über der kombinierten 2D/3D-Darstellung befindet sich das User Interface, mit dem die 3D-Szene vom Benutzer angepasst werden kann. Die Unterteilung dieser Benutzeroberfläche wurde mit einem Tab-Menü realisiert. Es ist unterteilt in drei Kategorien „Start“, „Läsionen“ und „3D-Visualisierung“, wobei die erste Kategorie in Abb. 4.13 aktiviert ist. In diesem Abschnitt wird dem Benutzer ein Schritt-für-Schritt-Konzept („Wizard“) präsentiert, mit dem er schrittweise eine OP-Planung vornehmen kann (weitere Informationen dazu in Abschnitt 4.6.3). Ein Klick auf den Tab „Läsionen“ öffnet eine Läsionenübersicht, über die es dem Arzt ermöglicht wird, einzelne Läsionen gezielt in der 3D-Szene zu aktivieren und weitere Informationen dazu abzurufen (Abschnitt 4.6.5). Der dritte Tab „3D-Visualisierung“ enthält Bedienelemente, mit denen der Benutzer die 3D-Darstellung seinen Wünschen entsprechend anpassen kann. Beispielsweise lassen sich in dieser Kategorie einzelne Lungenlappen ein- oder ausblenden. Auf die konkrete Umsetzung wird in Abschnitt 4.6.4 eingegangen.

Rechts oben befindet sich die Buttonleiste für die Vollbild-, Druck- und Hilfefunktion (Abschnitt 4.6.7). Diese Buttonleiste wird konsistent auf jeder PDF-Seite an der selben Stelle positioniert. Die Schaltflächen für die Navigation innerhalb des Dokumentes werden unten rechts übersichtlich nebeneinander angeordnet. So lässt sich beispielsweise mit einem Klick das CT-Video abrufen (Abschnitt 4.6.1.4) oder die Falldaten in einem Pop-Up-Fenster öffnen (Abschnitt 4.6.8.2).

4.6.1.4 CT-Video

Um zusätzlich zur 3D-Rekonstruktion einen Bezug zu den Original-Schichtdaten herstellen zu können, kann der Benutzer ein Video vom Patienten-CT anschauen. Das Video wird auf einer extra PDF-Seite präsentiert. Der Grund dafür ist, dass das Video in einer möglichst großen Auflösung dargestellt werden muss, damit genug Bilddetails erkennbar sind. Farbige Overlays markieren die segmentierten Strukturen in dem Datensatz (z. B. gelbe Umrandungen für die Lungenläsionen, blaue Overlays für die Bronchien). Die Seite enthält, neben der Buttonleiste für die Dokument-Navigation und dem Movie-Player, einen kurzen Hinweis darauf, dass eine aktive Internetverbindung vorhanden sein muss. Sobald die Seite in dem PDF-Dokument aufgerufen wird, beginnt der Movie-Player das Video von dem Web-Server zu laden. Ein Klick auf das Play-Icon startet das Video. Der Benutzer kann interaktiv einzelne Szenen des Videos (die Schichten des Datensatzes) über den Schieberegler ansteuern. Die Lautstärke- und Vollbildfunktionen des Movie-Players sind deaktiviert.³⁰

³⁰Ein Video, das in einer Flash-Applikation abgespielt wird, die wiederum in einem PDF-Dokument eingebettet ist, kann *nicht* im Vollbild angeschaut werden. Die Aktivierung der Vollbildfunktion des Flash-Movie-Players führt aufgrund eines Bugs des Adobe Readers dazu, dass das Video plötzlich unsichtbar wird.

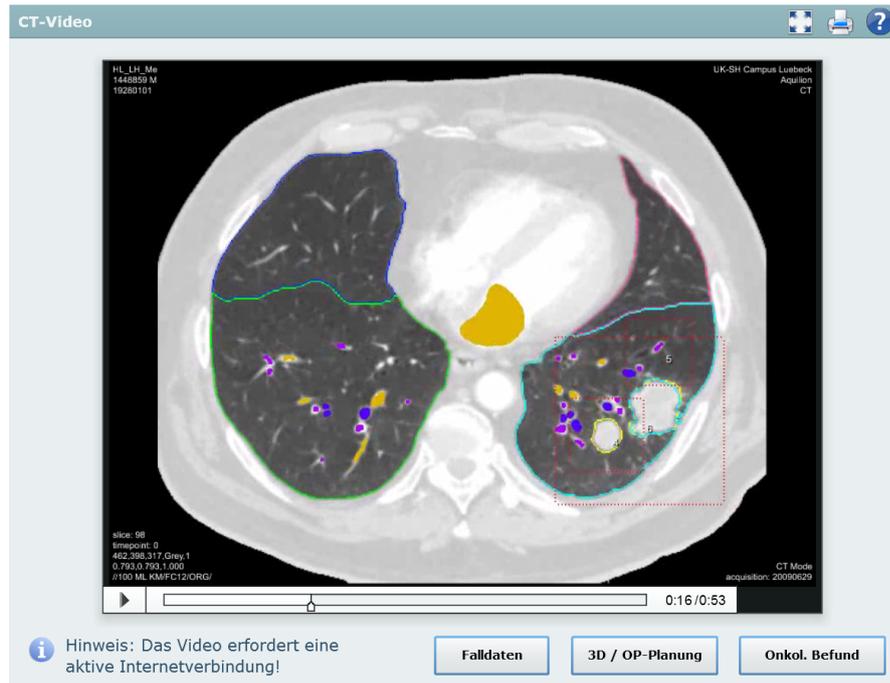


Abbildung 4.14.: Ein in das PDF-Dokument integrierter Flash-Movie-Player ermöglicht das Abspielen eines auf einem Web-Server gespeicherten Videos (Dateiformat: FLV). Einzelne CT-Schichten können über einen Schieberegler aufgerufen werden; farbige Overlays heben die segmentierten Lungenstrukturen hervor.

4.6.2 Onkologischer Befund / Lungenfunktion

Die Seite „Onkologischer Befund / Lungenfunktion“ ist mit einem Tab-Menü in die zwei Kategorien „Verlaufskontrolle“ und „Funktionelle Analyse“ unterteilt. So kann z. B. ein Radiologe Informationen zu Verlaufsbeobachtungen und RECIST-Stadien abrufen oder ein Chirurg die quantitativen Daten der Lungenfunktionsanalyse beurteilen. Der Tab „Verlaufskontrolle“ ist mit Hilfe einer seitlich positionierten, vertikalen Navigation weiter unterteilt. In Abb. 4.15 ist der Navigationspunkt „Übersicht“ aktiviert (blau hervorgehoben). Die beiden Navigationspunkte werden durch eine horizontale Linie voneinander separiert und befinden sich in einer extra Box. Die Navigationsleiste wird so visuell vom Hauptinhalt getrennt.

4.6.2.1 Verlaufskontrolle: Übersicht

In der Verlaufskontrollübersicht werden die Befunde des Patienten und die Ergebnisse der radiologischen Verlaufsbeobachtungen zusammengefasst dargestellt. Die strukturierte, tabellarische Zusammenfassung ermöglicht es dem behandelnden Arzt, einen Überblick über Diagnosestellungen, Verlaufsuntersuchungen und Therapiemaßnahmen dieses Falls zu erhalten. In der prototypischen Umsetzung wird das Datum einer radiologischen Untersuchung, das vom Radiologen beurteilte RECIST-Stadium sowie ggf. ein Kommentar des Arztes abgebildet.

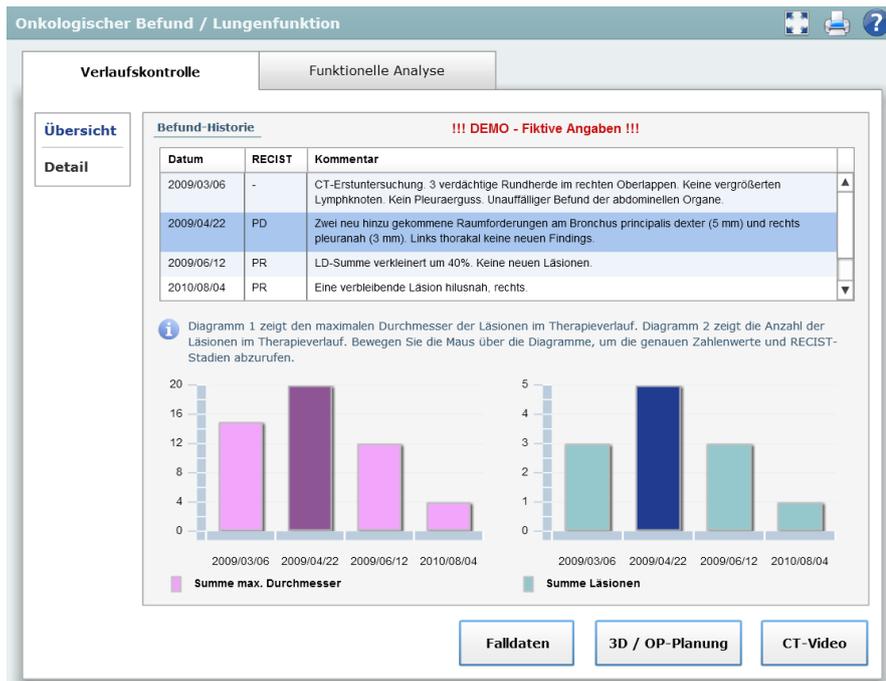


Abbildung 4.15.: Die Ergebnisse von Verlaufskontrolluntersuchungen werden tabellarisch zusammengefasst und in Form von interaktiven Diagrammen visualisiert. Über einen zweiten Tab können die quantitativen Daten der Lungenfunktionsanalyse abgerufen und analysiert werden.

4.6.2.2 Verlaufskontrolle: Interaktive Diagramme

Zusätzlich zur tabellarischen Darstellung der Daten, werden die bei Verlaufskontrolluntersuchungen wichtigen Kenngrößen „Summe der maximalen Durchmesser“ (Abb. 4.15 unten links) und „Summe der Läsionen“ (Abb. 4.15 unten rechts) in Form von interaktiven Säulendiagrammen visualisiert. Diese Daten werden im Rahmen von radiologischen Kontrolluntersuchungen erhoben, um den Therapieerfolg messbar zu machen und ggf. Therapiemaßnahmen anpassen zu können. Anhand der Säulendiagramme kann der Erfolg der Therapie auf einen Blick eingeschätzt werden.

Die Tabelle und die beiden Diagramme sind miteinander verknüpft. So werden beispielsweise bei Selektion der Tabellenzeile mit dem Datum „2009/04/22“ die beiden Säulen, denen dieses Datum zugeordnet ist, farblich hervorgehoben. Umgekehrt wird bei Selektion einer Säule die entsprechende Tabellenzeile hervorgehoben. Des Weiteren können den Diagrammen Detailangaben entnommen werden, indem der Nutzer die Maus über das Diagramm bewegt. Ein Mouse-Over-Effekt bewirkt die Einblendung eines kleinen Pop-Ups, in dem die Daten der Tabelle zusammengefasst präsentiert werden. In Abb. 4.16 wird die Summe der maximalen Durchmesser aller Läsionen am Untersuchungstag, dem 22.04.2009, sowie das dabei eingeschätzte RECIST-Stadium angezeigt.

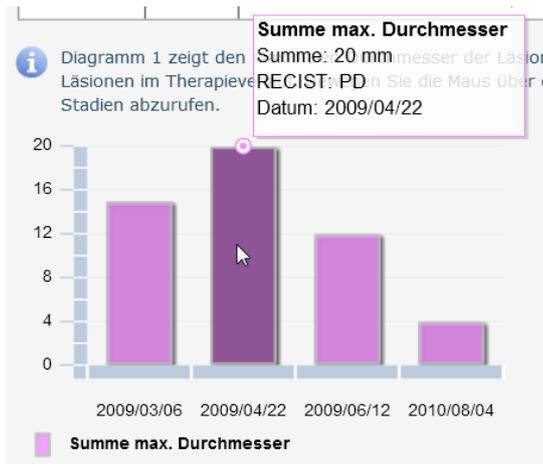


Abbildung 4.16.: Über ein kleines Pop-Up können dem Diagramm die genauen Zahlenwerte, Datumsangaben und RECIST-Stadieneinteilungen entnommen werden.

4.6.2.3 Verlaufskontrolle: Detailinformationen

In der aktivierten Unterkategorie „Detail“ werden die Messwerte der Läsionen dieses Reports tabellarisch dargestellt. In der Tabelle wird die Nummer, die Lappenzugehörigkeit, Effektiv- und Maximaldurchmesser, das Volumen (falls der Messwert vorliegt) sowie Durchschnitts- und Maximalgrauwert einer Raumforderung aufgelistet. Des Weiteren werden die berechneten Größenveränderungen der Läsionen in Klammern hinter den Durchmesser- und Voluminawerten abgebildet. Die Veränderung der Messwerte ergibt sich dabei aus dem Vergleich der letzten mit der vorletzten CT-Aufnahme.

4.6.2.4 Funktionelle Analyse

In dem aktivierten Tab „Funktionelle Analyse“ kann der Arzt die Messwerte abrufen, die im Rahmen einer computerbasierten Lungenfunktionsanalyse mit Hilfe der Software MEVISPULMO berechnet worden sind. Zu den hauptsächlich interessanten Messwerten gehören dabei die Lungenvolumina, der relative Volumenanteil sowie der Anteil emphysematischer Bereiche (LAV: Low Attenuation Volume, „Emphysemindex“). Diese Messwerte werden in der Tabelle in Abb. 4.17 strukturiert lungen- und lappenweise aufgelistet. Die Messergebnisse geben dem Arzt Aufschluss über die Lungenfunktion eines ganzen Lungenflügels oder eines einzelnen Lungenlappens und können bei der Beurteilung der zu erwartenden postoperativen Lungenreserve berücksichtigt werden. Die einzelnen Lungenlappen sind in der Tabelle etwas eingerückt. So wird ihre Zugehörigkeit zur linken oder rechten Lunge verdeutlicht. Um dem Benutzer eine visuelle Hilfestellung bei der Analyse der Messwerte zu geben, werden diese zusätzlich in Form eines interaktiven Kreisdiagramms³¹ dargestellt. In dem Diagramm wird der Gesamtvolumenanteil der Lunge als Referenzwert genutzt. Die beiden Tortenstücke visualisieren demzufolge

³¹Kreisdiagramme eignen sich besonders für die Darstellung von Anteilen oder Verteilungen, die sich zu einer Grundgesamtheit addieren. Die Anzahl der zu visualisierenden Größen sollte dabei nicht zu groß sein (max. 5-6), da das Diagramm sonst unübersichtlich wird. Das Dia-

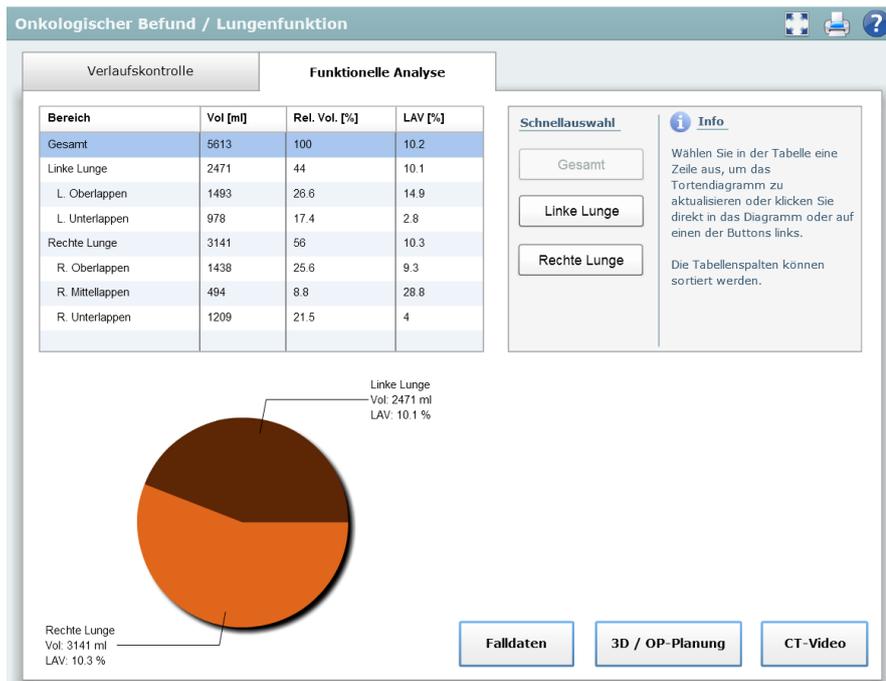


Abbildung 4.17.: Die Messwerte der computerbasierten Lungenfunktionsanalyse auf Basis der Software MEVISPULMO werden tabellarisch und in Form eines interaktiven Tortendiagramms visualisiert. Die berechneten Werte geben Aufschluss über die zu erwartende postoperative funktionelle Lungenreserve. In der Abbildung ist die erste Zeile in der Tabelle ausgewählt. Das Diagramm zeigt synchron zur Tabelle die Volumina und Emphysemindizes der gesamten Lunge, verteilt auf linken und rechten Lungenflügel.

die beiden Volumenanteile der linken und der rechten Lunge. Die Beschriftungen am Rand kennzeichnen die genauen Messwerte, die dem Diagramm zu Grunde liegen. Zusätzlich zum Volumen wird der Emphysemindex des betreffenden Lungenflügels in der Beschriftung angezeigt.

4.6.2.5 Funktionelle Analyse: Interaktives Diagramm

Der Benutzer hat die Möglichkeit, interaktiv auszuwählen, welche Messwerte in dem Kreisdiagramm angezeigt werden sollen. Das Diagramm verhält sich dabei synchron zur tabellarischen Darstellung der Daten. Klickt der Benutzer beispielsweise in der Tabelle in die Zeile „Rechte Lunge“, aktualisiert sich das Diagramm automatisch und zeigt die Volumina der drei rechten Lungenlappen an. Als Gesamtwert für die gleichmäßige Aufteilung wird nun das Lungenvolumen der rechten Lunge genutzt (Abb. 4.18a). Eine kleine Animation verdeutlicht den Übergang zwischen den Zuständen: Der Benutzer kann dabei beobachten, wie das Diagramm sich langsam in drei Kuchenstücke aufteilt. Die Farben der Kreissektoren entsprechen den Farben der jeweiligen Lungenlappen in der 3D-Visualisierung. So kann der Benutzer den direkten Vergleich zwischen Diagramm und 3D-Modell herstellen.

gramm sollte ausreichend groß dargestellt werden, da bei kleinen Kreisen der Vergleich von Flächenanteilen sehr schwierig ist [Schumann & Müller, 1999].

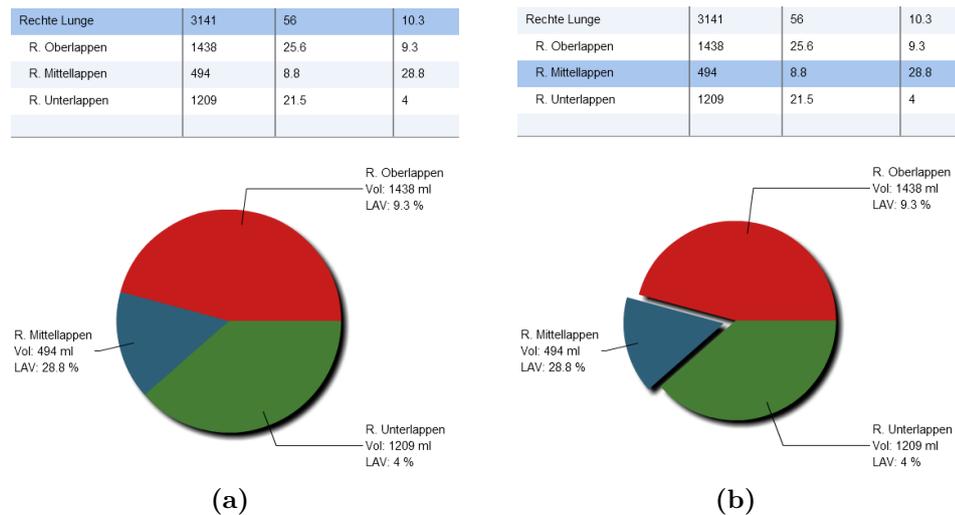


Abbildung 4.18.: Die Messwerte werden synchron zur Tabelle in einem interaktiven Kreisdiagramm veranschaulicht. Je nach ausgewählter Tabellenzeile ändert sich die Darstellung des Diagramms. In (a) ist die rechte Lunge ausgewählt, das Tortendiagramm zeigt synchron dazu die entsprechenden Daten der rechten Lungenlappen an. In (b) ist einer dieser Lungenlappen ausgewählt, sodass das Tortenstück in dem Diagramm hervorgehoben wird.

In Abb. 4.18b ist zu sehen, was passiert, wenn ein Teillappen in der Tabelle ausgewählt wurde. Der selektierte Lungenlappen wird in dem interaktiven Diagramm hervorgehoben, indem der entsprechende Sektor von den beiden anderen Tortenstücken abgetrennt wird. Auch dabei wird eine Animation als visuelle Unterstützung des Prozesses genutzt: Nach der Selektion eines Lappens, wird das entsprechende Kuchenstück langsam von den verbleibenden Anteilen weg bewegt. Gleichzeitig ändert sich die Selektion in der Tabelle: Es wird nun die Zeile „R. Mittellappen“ blau hinterlegt. Der Benutzer bekommt so immer ein Feedback, welche Auswahl gerade aktiv ist. Der gleiche Effekt kann erreicht werden, wenn direkt in das Diagramm geklickt wird. So entsteht beim Benutzer der Eindruck einer Zoomfunktionalität: Beginnend bei der Gesamtübersicht beider Lungenseiten, kann er den ihn interessierenden Lungenflügel und anschließend einen einzelnen Lappen selektieren, um die entsprechenden Messwerte abzurufen. Des Weiteren hat der Benutzer die Möglichkeit, über drei neben der Tabelle platzierten Buttons, eine Auswahl vorzunehmen (Abb. 4.17). Ein kleiner nebenstehender Infotext weist auf diese interaktive Funktionalität von Tabelle und Diagramm hin.

4.6.3 Wizard

Der Schritt-für-Schritt-Modus („Wizard“) führt den Benutzer durch die Einstellungsmöglichkeiten der 3D-Visualisierung. Ärzte, die keine Erfahrungen mit komplexen 3D-Darstellungen haben, bekommen somit eine Hilfestellung bei der Bedienung des 3D-Modells und der zielgerichteten OP-Planung. Mit Hilfe des Wizards wird es dem Anwender ermöglicht, die dreidimensionale Visualisierung Schritt für Schritt entsprechend seinen Fragestellungen anzupassen, beispielsweise einzelne Objekte ein- oder auszublenden. Zu Beginn werden zwei große Buttons präsentiert, mit denen der Wizard entweder gestartet oder übersprungen werden kann. Der Assistent umfasst insgesamt fünf Teilschritte. Wenn der Assistenzmodus übersprungen wird, gelangt der Benutzer direkt zum letzten Schritt.

Im ersten Schritt wird der Anwender gefragt, welche Lungenseite angezeigt werden soll. Da bei Lungen-OPs meist nur eine Seite pro Eingriff operiert wird, ist es sinnvoll, diese Einstellungsmöglichkeit beim Benutzer abzufragen. Der Arzt kann mit Hilfe von zwei Checkboxen entweder beide Lungenflügel oder nur einen einzelnen in der 3D-Visualisierung aktivieren (Abb. 4.19b). Zwei Buttons am unteren rechten Rand des Wizards ermöglichen ein Vor- und Zurückspringen innerhalb des Dialogs. In Teilschritt 2 hat der Benutzer die Möglichkeit, selektiv einzelne Lungenlappen einer Lunge ein- oder auszublenden. Diese Einstellungsmöglichkeit wird von den Ärzten gewünscht, da im Rahmen einer OP-Vorbereitung die Lungenlappen einzeln exploriert werden. In dem Beispiel in Abb. 4.19c wird die Checkbox für den Mittellappen automatisch deaktiviert (grau hinterlegt), da im vorherigen Schritt die linke Lunge ausgewählt wurde. Im dritten Teilschritt in Abb. 4.19d wird der Benutzer gefragt, ob sein Fokus auf der Lokalisation der Läsionen liegt oder ob die Größenveränderung der Raumforderungen in der 3D-Szene dargestellt werden soll. Im ersten Modus werden die Läsionen entsprechend des ihnen zugeordneten Lappenterritoriums eingefärbt (Linker Oberlappen = hellblau → Läsionen des linken Oberlappens = hellblau). Im zweiten Modus werden die Läsionen dagegen entsprechend ihrer Größenveränderung im Vergleich zur vorherigen Untersuchung dargestellt (Rote Läsion = gewachsen). Während der erste Modus vor allem für einen Chirurgen als Lokalisationsunterstützung bei der OP-Planung sinnvoll ist, eignet sich der zweite Modus für die Demonstration der Ergebnisse einer Verlaufskontrolluntersuchung. Neben den beiden Radiobuttons werden kurze Infotexte dargestellt, die die jeweilige Option beschreiben. Im vierten Schritt wird der Arzt nach dem Detaillevel der Blutgefäße gefragt. Er hat hier die Möglichkeit, sich zwischen drei Optionen zu entscheiden: Entweder die Blutgefäße sind in der 3D-Szene gar nicht sichtbar, es werden nur die größeren Gefäße mit einem Durchmesser > 3 mm dargestellt oder sowohl große als auch kleine Gefäße sind erkennbar (Abb. 4.19e). Im darauffolgenden letzten Schritt bekommt der Nutzer drei Optionen präsentiert, die er als nächstes vornehmen kann. Er hat die Möglichkeit, die 3D-Visualisierung zu erkunden (mittels Rotation, Selektion und Zoom), zur Läsionen-Übersicht zu wechseln oder den Wizard von vorn zu beginnen (Abb. 4.19f).



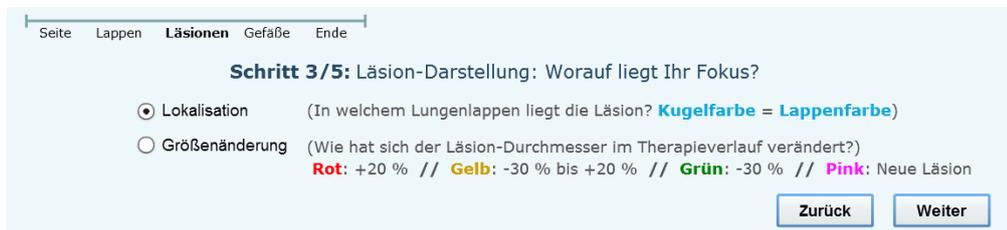
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Abbildung 4.19.: Darstellung der Zwischenschritte des Wizards für die OP-Planung.

Anmerkungen zur Gestaltung des Wizards

Bei MEVIS DISTANT SERVICES werden seit einigen Jahren 3D-PDF-Reports generiert. Die Reports werden von den Ärzten als Unterstützung bei der Planung von Leberoperationen eingesetzt. Dabei hat sich herausgestellt, dass einige der klinischen Partner zwar in der Lage waren, den PDF-Report zu öffnen, jedoch nicht wussten, dass es sich bei den „Leber-Abbildungen“ um interaktive 3D-Visualisierungen handelt, die gedreht und gezoomt werden können. Die 3D-Funktion wurde jedoch im Handbuch ausführlich beschrieben. Dieses Beispiel zeigt, dass Handbücher in der Regel nicht von den Anwendern gelesen werden. Daher ist es als sinnvoll anzusehen, den Benutzer „an die Hand zu nehmen“ und ihm ein Schritt-für-Schritt-Konzept anzubieten, mit dem die interaktiven Funktionen des PDF-Dokumentes verdeutlicht werden. Der Anwender wird dadurch nicht mit komplexen Bedienoberflächen konfrontiert, sondern schrittweise durch die Einstellungs- und Bedienmöglichkeiten geführt [Preim & Dachsel, 2010].

Der Wizardmodus wird überflüssig, wenn der Benutzer nach einiger Zeit und mehreren Anwendungen das Konzept und die Funktionsweise verstanden hat. Erfahrenen Anwendern sollte daher immer die Möglichkeit gegeben werden, Schritt-für-Schritt-Konzepte zu überspringen. Die Benutzerschnittstelle muss adaptierbar gestaltet werden und sich sowohl an gelegentliche, als auch an erfahrene Anwender richten [Preim & Dachsel, 2010]. Zielführend sind in diesem Fall Bedienoberflächen, die individuelle Einstellmöglichkeiten bereit halten, sodass wiederkehrende Aktionen schnell und flexibel ausgeführt werden können.

Bei der Gestaltung des Wizards wurde viel Wert auf aussagekräftige und gut lesbare Überschriften, die Verwendung weniger Bedienelemente und eine einfache Navigationsstruktur gelegt. Die kognitiven Ressourcen des Menschen in Bezug auf Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis sind begrenzt. Daher sollte bei der Entwicklung interaktiver Systeme die kognitive Belastung des Anwenders berücksichtigt werden [Preim & Dachsel, 2010]. Mit Hilfe des Wizards werden die wichtigsten Einstellmöglichkeiten strukturiert und zusammengefasst. Dem Benutzer wird die Möglichkeit gegeben, zwischen den fünf Schritten hin- und herzuspringen. Es entstehen dabei keine langen Wartezeiten. Der Systemzustand und der Fortschritt im Wizard ist ständig sichtbar: Dazu wird am oberen linken Rand eine Zeitleiste abgebildet, die den aktuellen Schritt fett hervorhebt und gleichzeitig vermittelt, welche Einstellungen schon vorgenommen wurden und welche Schritte als nächstes folgen. Die Forderung nach der „angemessenen Rückkopplung“ des Systems [Preim & Dachsel, 2010] wird damit erfüllt. Der Benutzer hat außerdem die Möglichkeit, über die Zeitleiste gezielt einen bestimmten Schritt anzuwählen oder Zwischenschritte zu überspringen.

Eine Anforderung, die bei der Gestaltung interaktiver Systeme erfüllt werden sollte, ist es, „die Sprache des Benutzers zu sprechen“ [Preim & Dachsel, 2010]. Dies bezieht sich nicht nur auf die verständliche Formulierung von Eingabeelementen, sondern auch darauf, inhaltlich die Denkweise der Benutzer zu verstehen. In dem letzten Schritt des Wizards wird die Umsetzung dieses Kriteriums beson-

ders deutlich. In Abb. 4.19f ist erkennbar, dass der Benutzer am Ende des Wizards angelangt ist. Er hat soeben die 3D-Visualisierung mit Hilfe des Assistenten angepasst und fragt sich nun, was er als nächstes tun kann. Dies wird verdeutlicht durch die Überschrift „Fertig! Was möchten Sie als nächstes tun?“. Dem Anwender ist im Laufe der Abarbeitung der Wizard-Schritte aufgefallen, dass sich die 3D-Visualisierung entsprechend seiner Eingaben verändert hat. Ein unerfahrener Anwender könnte sich nun fragen, wie er dieses 3D-Modell mit Maus oder Tastatur bedienen kann. Dieser Frage wird die erste Auswahloption gerecht. Auch hierbei wurde auf eine verständliche Formulierung geachtet. Frage: Was möchte der Benutzer als nächstes tun? Antwort: Er möchte... : „Die 3D-Visualisierung explorieren (Rotation, Selektion, Zoom)“ oder direkt „Zur Läsionen-Übersicht wechseln“, falls er ein erfahrener Anwender ist, der schon weiß, wie man das 3D-Modell bedient.

4.6.4 3D-Visualisierung: Einstellungen

Die Kategorie „3D-Visualisierung“ enthält drei Unterkategorien, in denen dem Benutzer verschiedene Bedienelemente für die Manipulation der 3D-Darstellung bereit gestellt werden. In dem Bereich „3D-Interaktion“ (Abschnitt 4.6.4.1) werden dem Benutzer die grundlegenden Funktionen zur Bedienung des 3D-Modells vorgestellt. In der zweiten Unterkategorie „Ansicht“ (Abschnitt 4.6.4.2) hat der Benutzer die Möglichkeit, einzelne Lungenlappen ein- und auszublenden, die Sichtrichtung auf das 3D-Modell sowie den Grad der Lappentransparenz einzustellen. In der dritten Unterkategorie „Läsionen & Gefäße“ (Abschnitt 4.6.4.3) kann die Darstellung der Läsionen und Gefäße vom Nutzer verändert werden.

4.6.4.1 3D-Visualisierung: 3D-Interaktion

Diese Unterkategorie ist bei Aktivierung der Oberkategorie „3D-Visualisierung“ automatisch vorausgewählt und wird dem Anwender als erstes präsentiert. Die in Abb. 4.20 zu sehende Übersicht soll dem Benutzer eine Hilfestellung bei der Bedienung des 3D-Modells geben. Wenn der Benutzer im letzten Schritt des Wizards die Option „Die 3D-Visualisierung explorieren (Rotation, Selektion, Zoom)“ ausgewählt hat, wird er automatisch zu dieser Info-Übersicht geleitet. Dem Anwender werden hier in Form von kurzen Infotexten die 3D-Grundfunktionen Rotation, Selektion und Zoom erklärt.

Der Benutzer möchte keine langen Texte lesen, sondern schnell zum Ziel kommen. Sätze, die sich über mehrere Zeilen erstrecken, können nur schwer erfasst werden; umfangreiche Handbücher werden oft nicht vom Benutzer gelesen [Preim & Dachsel, 2010]. Daher ist es angebracht, die Funktionen der 3D-Interaktion übersichtlich zusammenzufassen und in kurzen Worten zu beschreiben. Beispiel Rotation: „*Klicken und halten Sie die linke Maustaste über der 3D-Szene gedrückt und bewegen Sie die Maus.*“. Zu jedem Infotext wird jeweils eine Überschrift abgebildet, die mit einem Wort die Funktion beschreibt (z. B. „Rotation“). In vielen

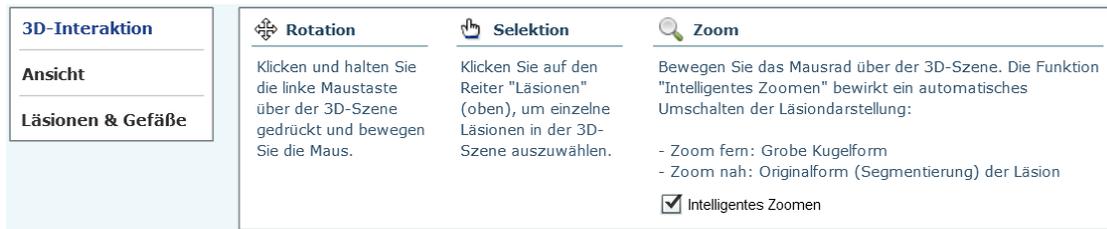


Abbildung 4.20.: Die grundlegenden Funktionen der 3D-Interaktion (Rotation, Selektion und Zoom) werden in kurzen Worten beschrieben. Die Verwendung von Icons, Trennlinien unter den Überschriften und Abstände zwischen den Abschnitten vermitteln eine aufgeräumte und strukturierte Benutzeroberfläche.

Fällen ist die Kombination aus bildhaften und textuellen Beschreibungen sinnvoll, um dem Anwender die Bedienung einer Benutzerschnittstelle zu erleichtern. Daher wird zusätzlich zur textuellen Beschreibung der 3D-Interaktionsfunktion jeweils ein kleines Icon abgebildet, um die Funktion bildlich zu beschreiben. Beispielsweise wird die Zoom-Möglichkeit mittels einer kleinen Lupe visualisiert (Abb. 4.20). Der Benutzer hat in dieser Unterkategorie außerdem die Möglichkeit, die Funktion „Intelligentes Zoomen“ an oder aus zu schalten. Im aktivierten Zustand bewirkt sie ab einer bestimmten Zoomstufe ein automatisches Umschalten der Läsiondarstellung (Kugelgestalt → Originalform).

4.6.4.2 3D-Visualisierung: Ansicht

In der zweiten Unterkategorie „Ansicht“ hat der Benutzer die Möglichkeit, selektiv einzelne Lungenlappen ein- oder auszublenden und die Sichtrichtung auf das 3D-Modell zu verändern. Die fünf Lungenlappen werden in dem User Interface strukturiert zusammengefasst, indem sie unter Verwendung von Trennlinien ihrer jeweiligen Lungenseite zugeordnet werden. Da in diesem Fall nur zwischen zwei Zuständen unterschieden wird (Lungenlappen an/aus), werden Checkboxen als GUI-Elemente eingesetzt (Abb. 4.21).

Unerfahrene Anwender haben womöglich Probleme bei der Bedienung der 3D-Visualisierung. Da Benutzerschnittstellen adaptiv sein und sich sowohl von erfahrenen Benutzern als auch von Anfängern bedienen lassen sollten [Preim & Dachselt, 2010], wird dem Nutzer dieses 3D-Reports eine Hilfestellung bei der Auswahl einer bestimmten Sichtrichtung gegeben. Die Hauptsichtrichtungen bei der Analyse von 3D-Darstellungen sind Frontal („Von vorn“), Lateral links („Von links“), Lateral rechts („Von rechts“), Dorsal („Von hinten“), Cranial („Auf dem Bauch liegend“) und Caudal („Auf dem Rücken liegend“).³² Diese Sichtrichtungen sind automatisch in der 3D-Darstellung gespeichert und können über eine Dropdown-Listbox ausgewählt werden. Selektiert der Benutzer eine Option in der Listbox, bewegt sich die 3D-Visualisierung in die ausgewählte Position. Ein weicher Übergang zwi-

³²Diese Sichtrichtungen wurden dem 3D-Leber-PDF von MeVis Distant Services entnommen.



Abbildung 4.21.: Die Unterkategorie „Ansicht“ enthält GUI-Elemente zum Ein- und Ausblenden einzelner Lungenlappen, die Auswahl einer Sichtrichtung der 3D-Visualisierung sowie die Möglichkeit, den Transparenzgrad der Lungenlappen zu verändern.

schen zwei Sichtrichtungen begleitet den Zustandswechsel, um den Benutzer nicht zu verwirren.

Um eine optimale Sicht auf Strukturen im Inneren eines Lungenlappens zu gewährleisten, hat der Nutzer die Möglichkeit, die Transparenz der Lappen zu beeinflussen. Die Standardeinstellung ist „Mittel“: Dabei wird ein Kompromiss aus guter Erkennbarkeit der inneren Strukturen und der äußeren Form des Lungenlappens eingegangen. Die anderen über eine Dropdown-Listbox auswählbaren Transparenzstufen sind „Leicht“, „Stark“ und „Unsichtbar“.

4.6.4.3 3D-Visualisierung: 3D-Objekte

In der Unterkategorie „Läsionen & Gefäße“ kann der Benutzer die Darstellung der Läsionen und der Gefäße beeinflussen. Die GUI-Elemente sind dabei in drei Abschnitte unterteilt. Unter der Überschrift „Läsionform“ werden die Radiobuttons für die Veränderung der Gestalt der Läsionen zusammengefasst. Der Benutzer hat dabei die Möglichkeit, sich die Originalform einer Läsion („Nur Läsion“), die Läsion in abstrakter Kugelform („Nur Kugel“) oder beides kombiniert („Läsion & Kugel“) anzuschauen. Unter dem Begriff „Kugelfarbe“ werden die beiden Radiobuttons für die Änderung des Läsionmodus abgebildet. Der Nutzer hat hier die Option, sich entweder die Läsionen passend zu ihrem Lappenterritorium anzeigen zu lassen (Modus „Lokalisation“) oder den Größenänderungsmodus zu aktivieren, der die Kugeln je nach Wachstum/Verkleinerung farblich visualisiert („Modus Größenänderung“).

Für das Ein- und Ausblenden der Gefäße werden beispielhaft in Abb. 4.22 zwei Möglichkeiten gezeigt, wie die Bedienelemente gestaltet und angeordnet werden könnten. In Abb. 4.22a werden Radiobuttons genutzt, um dem Benutzer mehrere Möglichkeiten zum Einstellen eines Detailgrades der Blutgefäße zu ermöglichen. Er hat hier die Möglichkeit, sich zwischen drei Optionen zu entscheiden: Entweder die Blutgefäße sind in der 3D-Szene gar nicht sichtbar (Option „Ohne Blutgefäße“), es werden nur die größeren Gefäße mit einem Durchmesser > 3 mm dargestellt (Option „Blutgefäße mit Durchm. > 3 mm“) oder sowohl große als auch kleine Gefäße sind in der 3D-Visualisierung erkennbar (Option „Auch periphere Blutgefäße“). Diese Einstellungsmöglichkeiten eignen sich vor allem für eine Software, die im Klinik-Alltag eingesetzt wird, wo die pulmonalen Gefäße aus Zeitgründen

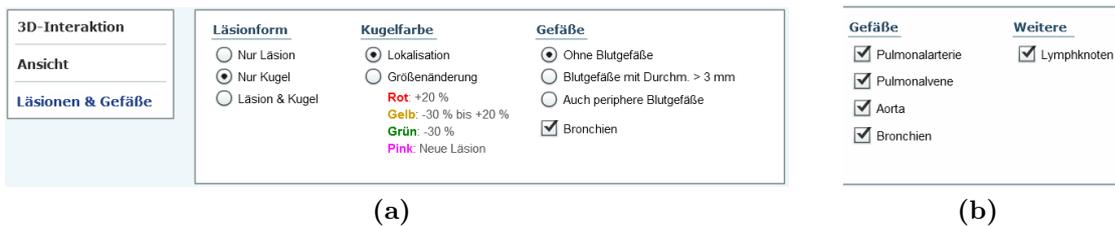


Abbildung 4.22.: (a) User-Interface-Elemente für die Veränderung der Darstellungsform der Läsionen und der pulmonalen Gefäße. (b) Eine zweite Möglichkeit, die Gefäß- und Lymphknotendarstellung zu beeinflussen. Voraussetzung dafür sind die entsprechenden, nur mit großem manuellen Aufwand herstellbaren, exakten Segmentierungen der Blutgefäße und Lymphknoten.

nur mit verhältnismäßig einfachen Mitteln segmentiert werden können (z. B. mit einem Schwellwertalgorithmus). Sind die Gefäße und weitere Strukturen jedoch mit Hilfe von ausgebildetem medizinischen Fachpersonal (z. B. von MTRAs) exakt identifiziert und segmentiert worden, könnte das in in Abb. 4.22b zu sehende User Interface genutzt werden. Dabei hat der Benutzer die Möglichkeit, mit Hilfe von Checkboxen die Pulmonalarterie und -vene sowie die Aorta und die Bronchien ein- oder auszublenden. Unter der Überschrift „Weitere“ werden andere segmentierte Strukturen (in diesem Fall Lymphknoten) zusammengefasst.

4.6.5 Direktauswahl einer Läsion

Neben dem Wizardmodus und dem Tab für die Einstellungsmöglichkeiten der 3D-Visualisierung, gibt es in dem User Interface einen dritten Tab „Läsionen“. Dieser enthält eine Übersicht über alle Läsionen. Abb. 4.23 verdeutlicht den Aufbau dieser Benutzerschnittstelle. Der Nutzer hat die Möglichkeit, einzelne Läsionen zu selektieren und damit in der 3D-Visualisierung hervorzuheben und weitere quantitative Daten zu jeder Läsion abzurufen, beispielsweise den Durchmesser oder den Maximalgrauwert. Die Teilfunktionen werden in den folgenden zwei Abschnitten beschrieben.

4.6.5.1 Selektion einer Läsion

3D-Objekte, die innerhalb von anderen transparenten Objekten liegen, können nicht direkt in der 3D-Szene des ADOBE Renderers mit der Maus angeklickt werden, auch wenn sie sichtbar erscheinen. Daher musste eine Möglichkeit geschaffen werden, die Läsionen, die in der Regel im Inneren eines Lungenlappens liegen, selektieren zu können. Mit Hilfe des in Abb. 4.23 links zu sehenden Pulldown-Menüs ist es dem Benutzer möglich, einzelne Läsionen anzuklicken und sie damit in der 3D-Darstellung zu aktivieren. Die Läsionen sind hierarchisch nach ihrer Lappenzugehörigkeit angeordnet. Hinter jedem Listeneintrag wird in Klammern die Gesamtanzahl der Läsionen dieses Lungenlappens angezeigt. Der in Abb. 4.23 zu sehende Zustand ist der folgende: Der Eintrag „Rechter Unterlappen (1)“ ist



Abbildung 4.23.: Die Benutzerschnittstelle enthält ein Pulldown-Menü, mit dem einzelne Läsionen selektiert werden können. Es ist außerdem möglich, die Läsionen anhand ihrer Nummer zu aktivieren sowie Messwerte und Kommentare anzeigen zu lassen.

aufgeklappt und die in diesem Lungenlappen liegende Läsion Nr. 18 ist selektiert. Die Selektion wird dem Benutzer anhand des blauen Hintergrunds verdeutlicht. Zusätzlich wird ein Mouse-Over-Effekt genutzt, der dem Benutzer ein visuelles Feedback gibt, über welchem Listeneintrag er sich gerade befindet. Diese maus-sensitive Hervorhebung hat außerdem den Effekt, dass der Anwender das Gefühl bekommt, „etwas anklicken“ zu können. In der Abb. 4.23 befindet sich der Mauscursor gerade über dem Eintrag „Linker Unterlappen (7)“, der dadurch hellblau hinterlegt ist. Die Forderung nach der „Sichtbarkeit von Systemzuständen und möglichen Aktionen“ [Preim & Dachzelt, 2010] wird damit erfüllt.

Das Nutzungserlebnis, die *User Experience*, spielt eine große Rolle bei der Benutzung von interaktiven Systemen. Dynamische Effekte können dabei hilfreich sein, Veränderungen zwischen Systemzuständen leicht nachvollziehbar darzustellen, sodass der Benutzer sie beobachten kann [Preim & Dachzelt, 2010]. Beim Ausklappen des Pulldown-Menüs wird solch ein Effekt eingesetzt: Klickt der Nutzer in dem Menü auf eine Oberkategorie (ein Lungenlappen), werden die Unterpunkte (die Läsionen) in einer weichen Animation „herausgefahren“.

Lungenläsionen werden durchnummeriert, damit sie während der OP-Planung und intraoperativ eindeutig identifiziert werden können. Die exakte Selektion einer Läsion anhand ihrer Nummer wird in dem User Interface durch ein Texteingabefeld ermöglicht. Zusätzlich zur manuellen Eingabe einer Nummer ist es außerdem möglich, mit Hilfe von zwei Buttons durch das Pulldown-Menü zu navigieren. Die beiden vertikal übereinander angeordneten Buttons wurden neben dem Textfeld platziert. Ein Pfeil-hoch- bzw. Pfeil-herunter-Icon verdeutlicht die Funktion der Buttons. Bei dem Benutzer entsteht dadurch der Eindruck, dass mit den Pfeilknöpfen die Läsion-Nummer vergrößert/verkleinert werden kann. Bei numerischen Eingabefeldern ist es wichtig, dem Benutzer die zulässigen Wertebereiche kenntlich zu machen. Daher wird neben dem Textfeld angezeigt, wieviel Läsionen insgesamt vorhanden sind. In dem Beispiel in Abb. 4.23 ist zu sehen, dass die Läsion „18/18“ ausgewählt ist und somit die Eingabe der Zahl 19 unzulässig wäre. Falsche Benutzereingaben müssen bei der Entwicklung von interaktiven Systemen berücksichtigt und abgefangen werden [Preim & Dachzelt, 2010]. Daher wird dem Nutzer bei Eingabe einer unzulässigen Nummer oder eines Buchstabens eine Fehlermeldung angezeigt (Abschnitt 4.6.8.4).

4.6.5.2 Läsionen-Info

Zu jeder ausgewählten Läsion werden über der 3D-Visualisierung, neben dem Auswahlmenü, die Daten der Raumforderung angezeigt. In Abb. 4.23 rechts ist zu sehen, dass diese Informationen tabellarisch aufgelistet werden. Der Benutzer kann somit auf einen Blick die für ihn wichtigen Informationen entnehmen. Die folgenden quantitativen Angaben sind für den Arzt interessant und werden in der Tabelle angezeigt: Die Nummer der gewählten Läsion, ihre Position im Lungenlappen als Unterstützung bei der Lokalisation, Größenangaben (Durchmesser und Volumen, wenn Messwert vorhanden) sowie Durchschnitts- und Maximalgrauwert.

Die Position einer Läsion wird in Prozent angegeben. Dieser Wert bezieht sich auf die Lage in dem entsprechenden Lungenflügel, in dem die Raumforderung liegt. Voxel- oder Weltkoordinatenangaben wären hierbei nicht hilfreich, weil das zugrunde liegende Koordinatensystem in dem PDF-Report nicht zur Verfügung steht. Zusätzlich zu den Größenangaben werden dem Benutzer die Wachstumsänderungen aller Läsionen angezeigt, wenn entsprechende Voruntersuchungen und Messwerte vorlagen. Die Größenveränderungen werden farblich hervorgehoben. In Abb. 4.23 ist beispielweise zu sehen, dass das Volumen der Läsion um 78 % gestiegen ist. Dieser Wert wird rot hervorgehoben, um den Benutzer optisch auf diese gewachsene Läsion hinzuweisen.

Des Weiteren wird neben der Info-Tabelle ein Kommentar-Feld abgebildet. Hierbei ist vorstellbar, dass der Radiologe oder ein(e) MTRA einen kurzen Kommentar zu einer unklaren Läsion hinterlässt. Oftmals ist aufgrund von Grauwertvariationen nicht ganz klar, ob es sich bei einem Finding um eine Verkalkung oder tatsächlich um eine Metastase handelt. Auf solche Unklarheiten bei der Befundung kann mit kurzen Kommentaren hingewiesen werden. Diese dienen dem behandelnden Arzt als Unterstützung bei der Analyse der Daten.

4.6.6 2D-Visualisierungen

Der PDF-Report enthält neben den 3D-Darstellungen zusätzlich Screenshots der Läsionen und der hilären Strukturen. Das User Interface für die 2D-Visualisierungen ist zweigeteilt (Abb. 4.24) und wird in den folgenden beiden Abschnitten beschrieben.



Abbildung 4.24.: Das User-Interface für die Auswahl der 2D-Visualisierungen besteht aus zwei vertikalen Navigationsleisten. Sie sind ausgestattet mit Links, über die die entsprechenden Bilder aufgerufen werden können. Der aktuell ausgewählte Link wird blau hervorgehoben, ein Mouse-Over-Effekt dient dem visuellen Feedback einer Linkauswahl.

4.6.6.1 2D-Darstellungen einer Läsion

Der obere in (Abb. 4.24) zu sehende Bereich enthält drei Links, mit denen der Benutzer zwischen den drei Screenshots einer Läsion auswählen kann. Dabei stehen die orthogonalen Richtungen „Axial“, „Sagittal“ und „Coronal“ zur Verfügung. Ein ausgewählter Link wird blau hervorgehoben, die restlichen Links haben eine schwarze Schriftfarbe. Ein dunkler Rand sowie horizontale Trennlinien dienen der Strukturierung der Navigationsleiste. Die Überschrift „Läsion (2D)“ hebt sich aufgrund der weißen Schriftfarbe und des dunklen Hintergrunds von der Navigationsleiste ab.

4.6.6.2 2D-Darstellungen hilärer Strukturen

Das User Interface für die 2D-Darstellungen der hilären Strukturen enthält vier Links, über die die entsprechenden Bilder abgerufen werden können. Der Link „Links V.“ bedeutet dabei „Links Vorn“, aus Platzgründen wurde das zweite Wort abgekürzt. Hinter dem Link verbirgt sich ein Screenshot vom Volumenrendering des Hilus, schräg von links vorn betrachtet. Wie in Abb. 4.24 zu sehen ist, wird ein Mouse-Over-Effekt eingesetzt, um dem Nutzer ein visuelles Feedback zu geben und ihm zu vermitteln, dass die Links angeklickt werden können. Der mit der Maus fokussierte Link wird dabei mit einem hellblauen Hintergrund versehen.



Abbildung 4.25.: Icons für die Vollbild-, Druck- und Hilfefunktion



Abbildung 4.26.: Kontextsensitive Hilfefunktionen. (a) Ein kurzer Infotext beschreibt eine Komponente des User Interfaces. Zur Hervorhebung des informellen Charakters wird ein kleines Info-Icon verwendet. (b) Ein Tooltip erklärt die Funktion eines Bedienelementes, in diesem Fall den Läsionen-Modus „Größenänderung“.

4.6.7 Druck-, Hilfe- und Vollbildfunktion

Bestimmte Funktionen von interaktiven Systemen lassen sich am besten durch einprägsame Icons visualisieren. Daher werden in dem PDF-Dokument auf jeder Seite am oberen rechten Rand drei Icons abgebildet, mit denen die Druck-, Hilfe- und Vollbildfunktion aufgerufen werden kann (Abb. 4.25).

4.6.7.1 Druckfunktion

Klickt der Nutzer auf das Drucker-Icon, öffnet sich der Drucken-Dialog des AD-OBE READERS und das Dokument kann gedruckt werden. Diese Funktion eignet sich vor allem zu Dokumentationszwecken. So können beispielsweise während des OP-Planungsprozesses die 2D- und 3D-Visualisierungen ausgedruckt werden. Die Ausdrücke können für Diskussionen mit Fachkollegen oder während des chirurgischen Eingriffs als Unterstützung genutzt werden.

4.6.7.2 Hilfefunktion

Hinter dem Fragezeichen-Icon verbirgt sich die globale Hilfefunktion. Klickt der Benutzer auf das Symbol, öffnet sich ein Pop-Up-Fenster. Der Anwender kann hier Informationen zu bestimmten Funktionen abrufen, beispielsweise wie die 3D-Visualisierung bewegt werden kann.

Der PDF-Report enthält jedoch nicht nur eine globale Hilfe, die auf Knopfdruck aufgerufen wird. Zusätzlich werden, wie in Abb. 4.26a zu sehen ist, bestimmte Abschnitte mit kurzen Infotexten erklärt. Strukturelle und grafische Konsistenz ist ein wichtiges Prinzip bei interaktiven Benutzerschnittstellen. Das Interface ist dann

leicht zu bedienen, wenn Bedienelemente einheitlich angeordnet und konsistent verwendet werden [Preim & Dachsel, 2010]. Die Art der Hilfestellung (Kurzer Hilfetext + kleines Info-Icon) wird konsistent im gesamten Dokument angewendet und bietet dem Nutzer damit ein homogenes Gesamtbild. Die dritte Methode, wie gewisse Funktionen von Bedienelementen dem Anwender erklärt werden, ist in Abb. 4.26b zu sehen. Beim Überfahren eines GUI-Elementes wird eine kurze Beschreibung eingeblendet. Dieser Tooltip hebt sich aufgrund des gelben Hintergrunds und des leichten 3D-Effektes gut vom darunter liegenden User Interface ab.

4.6.7.3 Vollbildfunktion

Der Inhalt des Dokumentes sollte auch auf kleineren Bildschirmen (z. B. Notebooks oder Netbooks) ausreichend groß und gut erkennbar sein. Daher wird dem Benutzer in der Buttonleiste ein Icon für den Vollbildmodus angeboten. Klickt der Nutzer auf das Icon, werden alle User-Interface-Elemente des ADOBE READERS ausgeblendet und nur der tatsächliche Dokumentinhalt angezeigt. Das PDF-Dokument kann zwar auch mit der ADOBE READER-eigenen Funktion³³ im Vollbild dargestellt werden. Aus Gründen der grafischen Konsistenz wird jedoch neben dem Druck- und Hilfe-Icon zusätzlich ein Symbol für die Vollbildfunktion platziert, erkennbar an den vier diagonal ausgerichteten Pfeilen (Abb. 4.25).

4.6.8 Pop-Ups

Um den Benutzer auf Anzeigeänderungen, Wartezeiten oder fehlerhafte Eingaben hinzuweisen, werden Pop-Up-Fenster eingeblendet.

4.6.8.1 Pop-Up: Vollbildmodus

Klickt der Nutzer auf das Icon für den Vollbildmodus, öffnet sich ein kleines Pop-Up-Fenster (Abb. 4.27). Darin wird der Nutzer gefragt, ob er das Dokument tatsächlich im Vollbild darstellen möchte. Dieses Fenster hat zusätzlich den Hintergrund, dass dem Benutzer angezeigt werden kann, wie der Vollbildmodus wieder ausgeschaltet wird („Vollbildmodus beenden mit [Esc-Taste]“).³⁴ Der Modus kann jedoch auch durch einen erneuten Klick auf das Icon wieder verlassen werden.

³³Im Adobe Reader 10 über: Anzeige → Vollbildmodus

³⁴Aus der Beobachtung von Benutzern ist hervorgegangen, dass einige nicht wussten, wie man den Vollbildmodus wieder ausschalten kann.

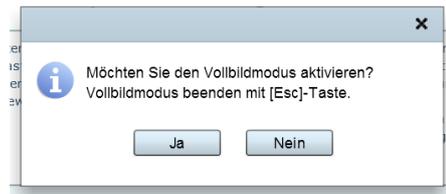


Abbildung 4.27.: Pop-Up-Fenster nach Aktivierung der Vollbildfunktion

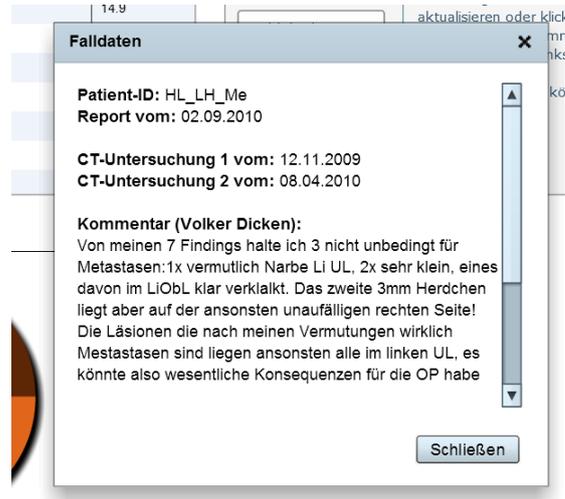


Abbildung 4.28.: Pop-Up-Fenster, in dem die Falldaten des Reports zusammengefasst werden.

4.6.8.2 Pop-Up: Falldaten

Damit dem Nutzer von jeder Seite des Dokumentes der Zugriff auf die Falldaten gewährleistet wird, können die fallspezifischen Daten über einen Button in einem Pop-Up-Fenster angezeigt werden (Abb. 4.28).

4.6.8.3 Pop-Up: 2D/3D-OP-Planung und CT-Video

Der Wechsel zu einer PDF-Seite, auf der sich ein 3D-Modell oder ein Movie-Player befindet, kann unter Umständen auf einem leistungsarmen Computer mehrere Sekunden dauern. Es muss davon ausgegangen werden, dass das Dokument im Klinikalltag auf einem Rechner betrachtet wird, der etwas älter und langsamer ist. Aus diesem Grund und in usabilitytechnischer Hinsicht aus Gründen der „Angemessenen Rückkopplung“ [Preim & Dachzelt, 2010] wird der Benutzer in einem sich öffnenden Pop-Up-Fenster darauf hingewiesen, dass der Prozess einige Zeit dauern kann. Des Weiteren wird in dem in Abb. 4.29b zu sehenden Pop-Up darauf verwiesen, dass für das Abspielen des Videos eine Internetverbindung erforderlich ist. Sollte diese nicht vorhanden sein, kann der Benutzer den Prozess sofort wieder abbrechen, indem er auf den Button „Abbruch“ klickt.

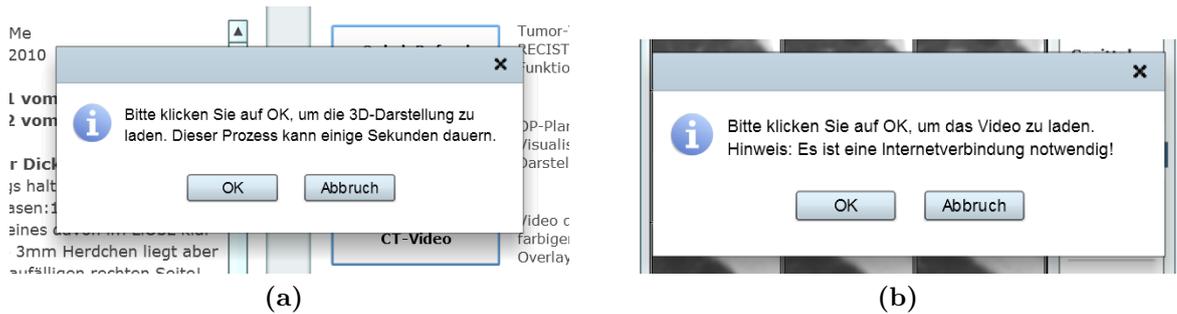


Abbildung 4.29.: (a) Das Pop-Up-Fenster weist den Benutzer daraufhin, dass das Laden der 3D-Darstellung einige Zeit dauern kann. (b) Der Movie-Player erfordert eine aktive Internetverbindung.

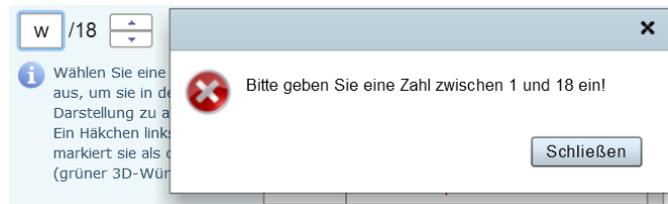


Abbildung 4.30.: Ein Pop-Up-Fenster, das den Benutzer auf eine fehlerhafte Eingabe in einem numerischen Textfeld hinweist.

4.6.8.4 Pop-Up: Eingabefehler

Bedienfehler auf Seiten des Endanwenders müssen bei der Entwicklung von interaktiven Systemen eingeplant und berücksichtigt werden. Wenn ein Fehler auftritt, sollte der Benutzer dabei unterstützt werden, den Fehler zu bemerken, die Ursache zu verstehen und sie zu beheben. Der verständlichen Formulierung von Warnhinweisen und Fehlermeldungen wird hierbei eine besondere Bedeutung zugeschrieben [Preim & Dachsel, 2010]. Beispiel: Falls der Benutzer in dem numerischen Texteingabefeld für die Auswahl einer Läsion einen Buchstaben statt einer Zahl eingibt (z. B. aufgrund eines Tippfehlers), wird eine Fehlermeldung in Form eines Pop-Up-Fensters eingeblendet. Dieser Warnhinweis verhält sich dabei konsistent zu den restlichen Pop-Ups: Statt eines Info-Icons wird in diesem Fall ein Fehler-Icon (roter Kreis mit weißem Kreuz) angezeigt. Somit ist sofort erkennbar, dass eine falsche Eingabe vorgenommen wurde. Die Fehlermeldung beschreibt unmissverständlich den gültigen Wertebereich („Bitte geben Sie eine Zahl zwischen 1 und 18 ein“), sodass der Nutzer den Fehler sofort verstehen und beheben kann (Abb. 4.30).

5

Implementierung

In diesem Kapitel wird die prototypische Implementierung des PDF-Reports beschrieben. Abschnitt 5.1 zeigt überblicksartig die drei genutzten Programmierumgebungen und die Ablaufprozesse zwischen den unterschiedlichen Technologien. Abschnitt 5.2 widmet sich der Implementierung in MEVISLAB. Dabei erfolgt jedoch keine detaillierte Beschreibung aller Bildanalyse- und Visualisierungsprozesse. Stattdessen wird exemplarisch gezeigt, wie Oberflächenmodelle aus Segmentierungsmasken erzeugt und aus MEVISLAB heraus exportiert werden. In Abschnitt 5.3 wird die Umsetzung des Flash-User-Interfaces auf Basis der Programmiersprachen Flex und ActionScript beschrieben. Abschnitt 5.4 behandelt die Generierung des PDF-Dokumentes mit Hilfe der PDF-Bibliothek IT_{EXT}.

5.1 Workflow

Für die Entwicklung des interaktiven PDF-Reports sind drei unterschiedliche Programmierumgebungen verwendet worden. Der Workflow sowie die notwendigen Schnittstellen zwischen den Umgebungen werden in Abb. 5.1 skizziert und im Folgenden beschrieben. Bei dem in Abb. 5.1 zu sehenden Schema handelt es sich lediglich um einen angestrebten Soll-Zustand. Im Rahmen dieser Arbeit konnten einige Prozesse nur prototypisch umgesetzt werden.

In **MeVisLab**¹, einem modularen Framework für medizinische Bildverarbeitung und Visualisierung, werden alle für den Tumorreport relevanten Analysen und Segmentierungen durchgeführt und exportiert. Dazu gehören Messwerte (z. B. Tu-

¹MeVisLab: <http://www.mevislab.de>

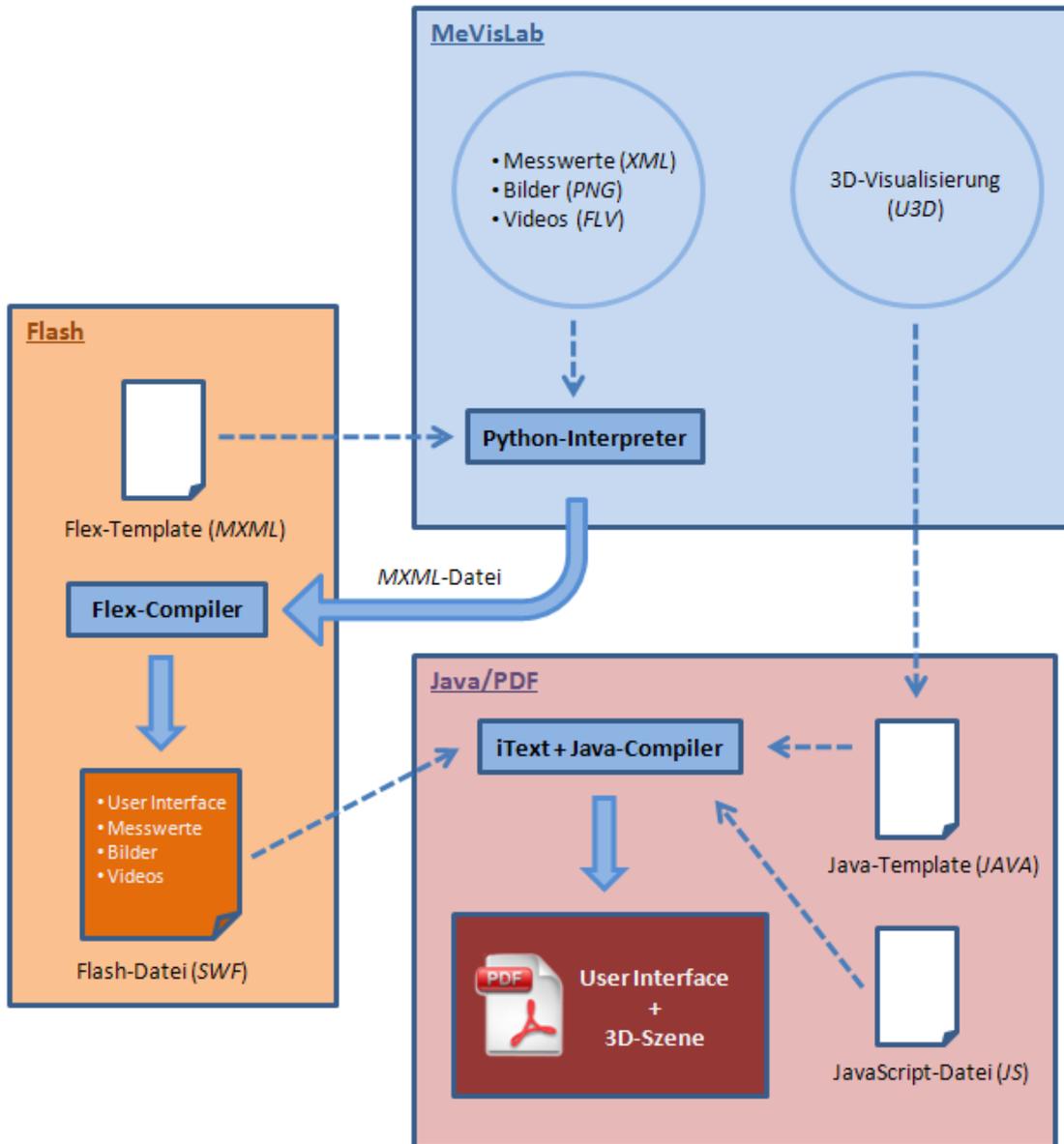


Abbildung 5.1.: Das Ablaufschema skizziert die Prozesse und Schnittstellen zwischen den drei verschiedenen Entwicklungsumgebungen MEVISLAB, Flash und Java/PDF.

morvolumina oder Emphysemverteilungen), Bilder (z. B. 2D-Visualisierungen der Metastasen) und ggf. Videos vom CT-Datensatz. Zusätzlich werden in MEVISLAB aus den 2D-Segmentierungsmasken dreidimensionale Oberflächenmodelle generiert und über eine Export-Schnittstelle außerhalb der MEVISLAB-Umgebung verfügbar gemacht.

In der zweiten Entwicklungsumgebung wird auf Basis der Programmiersprache **Flex**² das Flash-User-Interface entworfen und implementiert. Dafür wird ein großes funktionsloses MXML³-Template vordefiniert, welches als Basisgerüst genutzt wird. Die Template-Datei wird anschließend in MEVISLAB eingelesen. Unter Verwendung der in MEVISLAB integrierten Skriptsprache Python werden die zuvor generierten Tumordaten, Bilder und Videos in das Template geschrieben, sodass es mit Inhalt gefüllt ist. Ein Flex-Compiler übersetzt die textbasierte MXML-Datei in Maschinencode und erzeugt somit eine einzelne binäre Flash-Datei. Diese enthält das vollständige User Interface inklusive aller Bedienelemente, Interaktionsmöglichkeiten sowie Bilder und Videos.

Die dritte Umgebung basiert auf einer **Java/JavaScript**-Technologie. Das Flash-User-Interface und das aus MEVISLAB exportierte 3D-Modell werden dabei in einer Java-Datei gebündelt. Die Benutzerinteraktionen werden über die Skriptsprache JavaScript geregelt. Mit Hilfe der frei verfügbaren PDF-Bibliothek iTEXT⁴ wird die Java-Datei anschließend kompiliert. Das Endprodukt ist das fertige interaktive PDF-Dokument in Form einer einzigen Datei. Die einzelnen schematisch dargestellten Prozesse werden in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

5.2 MeVisLab

MEVISLAB ist eine Entwicklungsumgebung für medizinische Bildverarbeitung, Bildanalyse und Visualisierung. Dem Benutzer wird eine netzwerkartige Architektur zur Verfügung gestellt, in der die Knoten des Netzwerkes eigenständige Softwaremodule darstellen. Dabei wird zwischen drei Modulklassen unterschieden. Open Inventor⁵-Module kapseln Funktionalitäten für die Manipulation von Grafikprimitiven und von Szeneneigenschaften. So kann beispielsweise eine virtuelle Kamera in einer dreidimensionalen Szene positioniert werden. Die ML-Module (*MeVis Image Processing Library*) beinhalten C++-Algorithmen für die Segmentierung, Registrierung und Quantifizierung morphologischer und funktioneller Prozesse. Mehrere Module können außerdem zu sogenannten Makro-Modulen kombiniert werden, um Teilfunktionalitäten zusammenzufassen. Ein Modul kann Ein- und Ausgänge haben, über die Informationen empfangen und zu anderen Modu-

²Adobe Flex: <http://www.adobe.com/de/products/flex/?promoid=BPBDO>

³MXML ist eine XML-verwandte Auszeichnungssprache und wird für die Gestaltung der Benutzeroberflächenkomponenten für Adobe Flex-Anwendungen verwendet. http://www.adobe.com/de/devnet/flex/quickstart/coding_with_mxml_and_actionscript

⁴iText: <http://www.itextpdf.com>

⁵Open Inventor: <http://oss.sgi.com/projects/inventor/>

len transportiert werden können. Neben der Netzwerkebene gibt es eine Skriptebene, mit der komplexe Applikationen über eine einfach zu erstellende grafische Benutzeroberfläche steuerbar sind. Die GUI-Elemente werden mit der *MeVisLab Definition Language* (MDL) erstellt und können mit Python oder JavaScript mit Funktionen ausgestattet werden.

Segmentierung und Visualisierung eines Lungentumors

Anhand des in Abb. 5.2a zu sehenden Netzwerkes wird exemplarisch gezeigt, wie die medizinischen Daten in MEVISLAB verarbeitet werden. Der Thorax-CT-Datensatz wird über das **ImageLoad**-Modul eingelesen. Das **SubImage**-Modul schneidet eine Region-of-Interest (ROI), in der sich die Lungenmetastase befindet, aus dem Datensatz heraus. Die ROI wird an das nachfolgende Modul **VISIA.LungNoduleVolumetry** weitergeleitet. Dort erfolgt die Segmentierung der Lungenläsion. Die binäre 2D-Segmentierungsmaske wird mit dem Modul **WEMIsoSurface** in ein 3D-Oberflächenmodell umgewandelt, welches vom **SoWEMRenderer** mit einer Farbe und einer Transparenz ausgestattet wird. Mit dem **SoExaminerViewer** erfolgt die Darstellung des 3D-Modells in einem Viewer. Als anatomische Kontextinformation wird außerdem der linke untere Lungenlappen in die 3D-Szene integriert. Dazu wird die Segmentierungsmaske aller fünf Lungenlappen mit dem Modul **ImageLoad1** geladen und an das Modul **IntervalThreshold** weitergeleitet. Jeder segmentierte Lungenlappen ist in der Segmentierungsmaske anhand eines festen Grauwertes identifizierbar. So wird der linke Unterlappen mit Hilfe eines Schwellwertverfahrens von den restlichen Lappen getrennt und weiter verarbeitet. Das angeschlossene **WEMIsoSurface1**-Modul überführt die 2D-Maske in ein 3D-Modell. Anschließend senkt das Modul **WEMReducePolygons** die Polygonzahl des Oberflächenmodells. Der Hintergrund ist der, dass die 3D-Modelle in sehr hoher Auflösung mit hoher Anzahl an Polygonen generiert werden. Die Lungenlappen werden am Ende jedoch nur als anatomische Kontextinformation genutzt und brauchen daher nicht so detailliert dargestellt werden. Die Polygonzahl des Lungenlappens wird daher mit einem Wert von 90 % reduziert, um Speicher zu sparen und eine flüssige Interaktion in dem 3D-Renderer des **ADOBE READERS** zu gewährleisten. Da die Lungenlappen relativ große und gleichmäßig geformte Objekte mit wenigen Kanten sind, ergeben sich aus der Reduktion der Dreiecke keine signifikanten Qualitätseinbußen. Das Modul **SoWEMRenderer1** stattet den Lungenlappen ebenfalls mit einem Farb- und Transparenzwert aus und leitet das Ergebnis an den **SoExaminerViewer** weiter. Das Endresultat ist in Abb. 5.2b zu sehen.

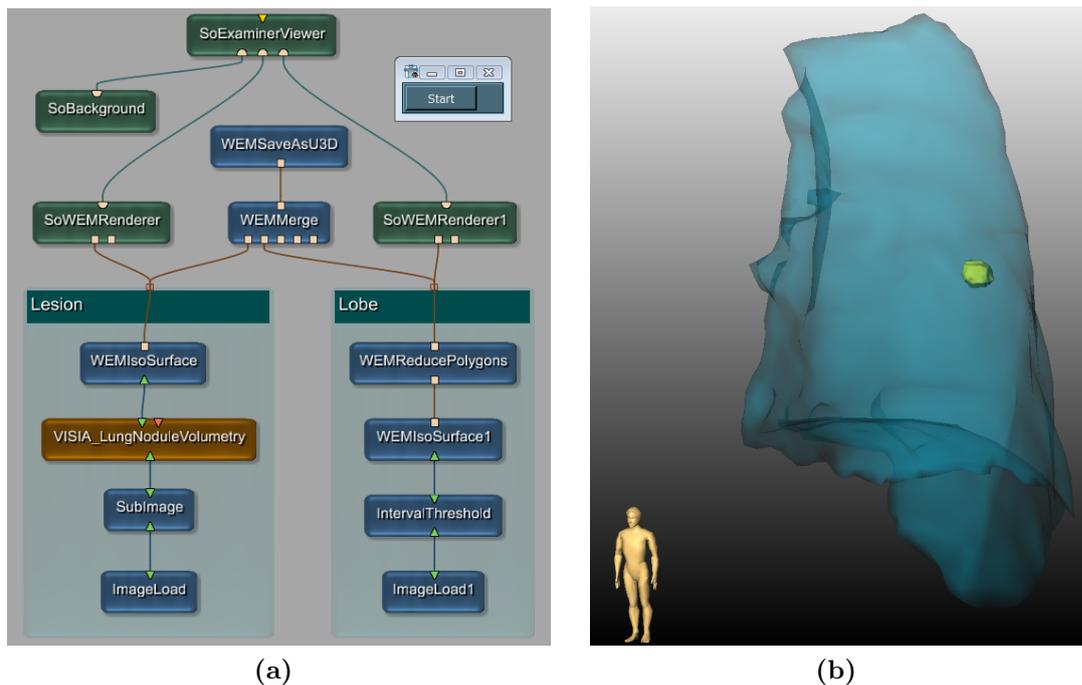


Abbildung 5.2.: (a) MEVISLAB-Netzwerk für die Segmentierung und Visualisierung einer Lungenmetastase und eines Lungenlappens. (b) Die mit dem Netzwerk in a) erzeugte 3D-Visualisierung.

U3D-Export der Oberflächenmodelle

Um die in MEVISLAB erzeugten 3D-Modelle im ADOBE READER nutzen zu können, müssen sie zunächst exportiert werden. Dies geschieht mit dem Modul WEMSaveAsU3D, welches die Oberflächen in ein U3D-Format überführt. U3D⁶ ist ein internationaler Standard für dreidimensionale Daten aller Art. Der Standard wurde 2005 von der *European Computer Manufacturers Association* (ECMA) verabschiedet und erlaubt einen herstellerübergreifenden Austausch der 3D-Modelle. Das U3D-Format wird v. a. in der Industrie genutzt, um komplexe Produkte als interaktive und animierbare 3D-Grafiken zu veranschaulichen. Der PDF-Standard erlaubt die Einbindung von 3D-Objekten im U3D-Format, sodass diese oft in PDF-Dokumenten zu finden sind. Der Vorteil liegt darin, dass die 3D-Modelle problemlos mit Standard-Hardware dargestellt werden können. Typische Anwendungsgebiete sind Verkauf und Marketing sowie Kundenbetreuung und Produktwartung.

An dieser Stelle wird der umfangreiche U3D-Standard nicht im Detail erklärt; die komplette Spezifikation des Standards kann [European Computer Manufacturers Association (ECMA), 2007] entnommen werden. Stattdessen erfolgt eine kurze überblicksartige Beschreibung der Modul-Eingaben in MEVISLAB, mit denen Oberflächenmodelle in das U3D-Format exportiert werden. Verschiedene 3D-Modelle können zu einem Gesamtmodell zusammengefasst werden. Jedes Teilobjekt der 3D-Szene bekommt dabei ein eindeutiges Label und eine Beschreibung. In den WEMIsoSurface-Modulen befinden sich die entsprechenden Felder „Label“

⁶U3D: <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-363.htm>

und „Description“, in denen die entsprechenden Informationen einzutragen sind. Exemplarisch an dem oben genannten Beispiel werden die erforderlichen Eingaben genannt:

3D-Modell der Lungenmetastase:

- **Label:** Lesion1
- **Description:** U3DGroupName=Lesions; U3DModelName=PDF3DPrototype; U3DColor=0.859 0.871 0.063 0.0

3D-Modell des Lungenlappens:

- **Label:** LeftLowerLobe
- **Description:** U3DGroupName=Lobes; U3DModelName=PDF3DPrototype; U3DColor=0.0 0.631 0.773 0.0

Das U3D-Tag *U3DGroupName* steht für die Oberkategorie von 3D-Modellen. So können beispielsweise mehrere Lungenlappen zur Gruppe „Lobes“ zusammengefasst werden. Dies ermöglicht in der späteren Verwendung im PDF ein gleichzeitiges Ein- und Ausblenden aller oder nur einzelner Lungenlappen. Das Tag *U3DModelName* steht für den Namen des gesamten 3D-Modells. In dem *U3DColor*-Tag werden die Farb- und Transparenzwerte des 3D-Objektes erfasst. Während die ersten drei Werte die RGB-Farbwerte repräsentieren, kennzeichnet der vierte Wert die Transparenz des Objektes. Der Wert 0.0 bedeutet dementsprechend, dass das Objekt vollständig opak abgebildet wird. Der Opazitätswert kann jedoch im PDF skriptgesteuert nachträglich verändert werden. Das Modul *WEMSaveAsU3D* parst alle Eingangsdaten und erzeugt daraus eine U3D-Datei, die außerhalb der MEVISLAB-Umgebung weiter verwendet werden kann. Wie diese Datei in das PDF-Dokument integriert wird, zeigt Abschnitt 5.4.

Weitere Daten für den Report

Neben den 3D-Modellen werden weitere Daten aus MEVISLAB heraus exportiert und in den Report eingebunden. Dazu gehören beispielsweise die in dem Abschnitt 4.4 angesprochenen 2D-Visualisierungen der Lungenrundherde. Diese werden automatisch in MEVISLAB generiert und in Form von Screenshots im PNG-Bildformat lokal abgespeichert. Dazu wird ein Netzwerk genutzt, in dem eine Markerliste von Läsionen geladen und weiter verarbeitet wird. Ein Python-Skript regelt dabei auf Knopfdruck den automatischen Ablauf der Visualisierungsprozesse und die Speicherung der Bilddaten.

Zusätzlich wird in MEVISLAB ein Video des Thorax-CTs angefertigt. Dabei werden die segmentierten Lungenstrukturen als Overlays über die Original-Bilddaten gelegt und der Datensatz automatisch „durchgescrollt“. Das Endergebnis ist ein Video im AVI-Format, welches bei einer 512 * 512-CT-Auflösung ca. 200 MB groß ist. Daraus ergeben sich zwei Probleme: Die Dateigröße ist sehr hoch, sodass die

angestrebte Portabilität des PDF-Reports in Frage gestellt wird. Außerdem kann ein Video nur im FLV-Format in einem Flash-Movie-Player abgespielt werden. Daher wird nach der Generierung des Videos ein externes Video-Konvertierungstool, z. B. XMEDIA RECODE⁷, für die Komprimierung und Konvertierung in ein FLV-Format genutzt. So entsteht ein etwa 5–10 MB großes Video, welches problemlos in einem portablen PDF-Report integrierbar ist.

Die Quantifizierungen der Lungenrundherde und der Lungenfunktionsanalyse werden in der prototypischen Umsetzung den entsprechenden MEVISLAB-Modulen entnommen, manuell exportiert und in den Quellcode des Flash-User-Interfaces eingebettet. Auf diesem Wege werden die Daten im PDF verfügbar gemacht. Weitere Entwicklungen konzentrieren sich darauf, die Analyse-Ergebnisse XML-basiert bereit zu stellen. So können die Daten außerhalb von MEVISLAB nutzbar gemacht und unkompliziert in anderen Software-Umgebungen weiter verarbeitet werden.

5.3 Flex/ActionScript

Das User Interface für die Interaktionen im PDF-Dokument wurde auf Basis der Flash-Technologie unter Verwendung des Entwicklungsframeworks ADOBE FLEX programmiert. Das Framework besteht aus einem *Software Development Kit* (SDK) und dem ADOBE FLASH BUILDER 4. Flex ermöglicht das Erstellen von interaktiven Flash-Applikationen mit der XML-basierten Auszeichnungssprache MXML. Ähnlich wie in HTML werden dabei die Komponenten eines Systems (die Bedienelemente) beschrieben und mit Hilfe der imperativen Programmiersprache ActionScript Funktionalitäten umgesetzt. Der ADOBE FLASH BUILDER ist eine integrierte Entwicklungsumgebung, basierend auf Eclipse, und ermöglicht es dem Software-Entwickler über Drag & Drop grafisch ansprechende Benutzeroberflächen zu gestalten. Der Flex-Compiler übersetzt in einem Zwischenschritt die MXML-Komponenten in ActionScript-Quelldateien, die im Weiteren zu einer Flashdatei kompiliert werden. Diese Flash-Datei kann universell auf einer Webseite mit dem kostenlosen FLASH PLAYER angezeigt oder in ein PDF-Dokument integriert werden.

Die Implementierung des User Interfaces auf Flash-Basis hat einige Vorteile. Der ADOBE FLASH BUILDER stellt dem Entwickler sehr viele vorgefertigte *Widgets*, d. h. grafische Benutzeroberflächenkomponenten, zur Verfügung. Dazu gehören beispielsweise einfache Elemente wie Radiobuttons oder Checkboxes, aber auch komplexe Diagramme, wie z. B. animierte Torten- und Säulendiagramme. Nach dem Rapid-Prototyping-Konzept lassen sich die Komponenten in dem WYSIWYG-Editor auf Knopfdruck einfügen, verschieben und vergrößern. So kann in kurzer Zeit, eine moderne und interaktive Bedienoberfläche entworfen werden. Ähnlich zur MEVISLAB-Entwicklung erfolgt eine Trennung zwischen der Gestaltung der Oberfläche (MEVISLAB: MDL, Flex: MXML) und der Implementierung der Funk-

⁷XMedia Recode: <http://www.xmedia-recode.de>

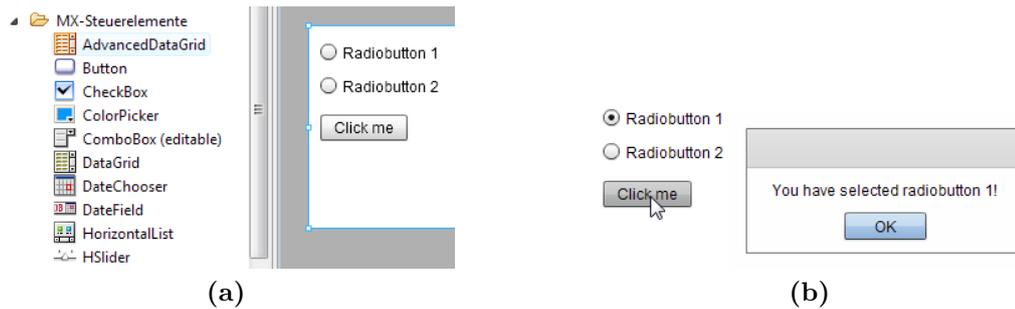


Abbildung 5.3.: (a) *Designmodus* des ADOBE FLASH BUILDER 4. Die Flex-Steuerelemente werden per Drag & Drop rechts auf einer Zeichenfläche arrangiert. (b) Die kompilierte Flash-Datei. Bei Klick auf den Button wird ein Pop-Up-Fenster geöffnet.

tionalitäten (MEVISLAB: Python/JavaScript, Flex: ActionScript). Dieses Konzept ermöglicht dem MEVISLAB-Software-Entwickler den einfachen Einstieg in die Flash-Programmierung. Die beiden Sprachen JavaScript (MEVISLAB) und ActionScript (Flex) sind zudem skriptbasiert und sich sehr ähnlich.

Flex/ActionScript-Beispiel

Im Folgenden wird die Flash-Entwicklung exemplarisch erklärt. In Abb. 5.3a sind einige Bedienelemente des ADOBE FLASH BUILDER 4 zu sehen. Diese können aus einer Liste ausgewählt und mit der Maus rechts auf einer weißen Zeichenfläche platziert werden. In dem Beispiel wurden zwei Radiobuttons und ein einfacher Button untereinander angeordnet. Bei Klick auf den Button soll eine Meldung ausgegeben werden, welcher der beiden Radiobuttons vom Benutzer selektiert worden ist. Der vollständige dazugehörige Flex-Quellcode ist in Abb. 5.4 zu sehen. Der Entwickler kann ständig zwischen Design- und Code-Ansicht wechseln. Der kurze Programmcode verdeutlicht die einfache Struktur der Flex-Entwicklung. Da es eine XML-basierte Sprache ist, werden die Bedienelemente innerhalb von `mx`-Tags definiert. Mit dem `mx:Style`-Tag kann das Aussehen der Komponenten über eine CSS-Schnittstelle zusätzlich optional verändert werden. Innerhalb des `mx:Script`-Tags erfolgt die Implementierung des ActionScript-Codes, der jedoch auch in eine externe Datei ausgelagert werden kann. In dem ActionScript wird den Buttons eine Funktionalität verliehen. Die Funktion `showAlert()` wird über einen einfachen Aufruf von `click=„showAlert()“` innerhalb des MXML-Buttons definiert und somit bei einem Klick auf den Button ausgelöst. In der Funktion wird daraufhin geprüft, welcher der beiden Radiobuttons, identifizierbar anhand einer zugewiesenen `id`, zuvor vom Benutzer selektiert wurde. Entsprechend der Auswahl wird, wie in Abb. 5.3b zu sehen ist, eine Alert-Meldung angezeigt.

In der prototypischen Umsetzung wurde das User Interface mit dem ADOBE FLASH BUILDER 4 designet, kompiliert und in einem getrennten Prozess in das PDF-Dokument eingebettet. Wünschenswert ist eine automatisierte Kompilierung des Flex-Codes. Der Flex-SDK-Compiler kann dafür über einen Konsolenaufruf aus MEVISLAB heraus aufgerufen werden, um den MXML/ActionScript-Sourcecode

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<mx:Application
  xmlns:mx="http://www.adobe.com/2006/mxml"
  width="600" height="300" layout="absolute">

  <mx:Style source="ButtonTest.css"/>
  <mx:Script>
    <![CDATA[
      import mx.controls.Alert;
      public function showAlert():void
      {
        if (radioButton1.selected)
          Alert.show("You have selected radiobutton 1!");
        else if (radioButton2.selected)
          Alert.show("You have selected radiobutton 2!");
        else
          Alert.show("Please select a radiobutton!");
      }
    ]]>
  </mx:Script>

  <mx:RadioButtonGroup id="radioButtonGroup"/>
  <mx:RadioButton x="10" y="12" label="Radiobutton 1" id="radioButton1"/>
  <mx:RadioButton x="10" y="39" label="Radiobutton 2" id="radioButton2"/>
  <mx:Button x="10" y="72" label="Click me" click="showAlert()"/>
</mx:Application>

```

Abbildung 5.4.: Quellcode-Modus des ADOBE FLASH BUILDER 4: Der Flex- und ActionScript-Code für die in Abb. 5.3 dargestellten Komponenten wird angezeigt.

in eine Flash-Datei umzuwandeln. Dabei werden alle für den Report notwendigen Daten auf XML-Basis eingebunden. Die Bilder der Läsionen werden ebenfalls in die Flash-Applikation eingefügt, um sie später im PDF verfügbar zu machen. Die Dateigröße der Flash-Datei steigt dadurch jedoch sehr schnell an. Um die Dateigröße der Flash-Anwendung und damit auch die Größe des PDF-Dokumentes aus Portabilitätsgründen so klein wie möglich zu halten, wird das CT-Video nicht mit kompiliert. Es wird stattdessen auf einem Web-Server abgelegt und kann über den integrierten Flash-Movie-Player abgespielt werden, vorausgesetzt, es ist eine Internetverbindung vorhanden. Insgesamt werden vier eigenständige Flash-Applikationen erstellt und in das PDF integriert. Warum es vier unterschiedliche Anwendungen sind, wird im nächsten Abschnitt 5.4 näher erläutert.

Der ADOBE FLASH BUILDER ist kostenpflichtig. Es gibt jedoch auch Studenten-Lizenzen oder Lizenzen für den Lehrbetrieb. Darüber hinaus existieren auch kostenlose Alternativen zum ADOBE FLASH BUILDER, wie beispielsweise FLASHDEVELOP⁸ oder AMETHYST⁹, das in einer Free- und Professional-Edition angeboten wird. AMETHYST ermöglicht die Flex-Entwicklung in VISUAL STUDIO. Die Flex SDK-Versionen 3 und 4 gibt es als Open-Source-Lizenz¹⁰, die unter der Mozilla Public Licence¹¹ steht. Das Standard-Flex-SDK steht unter der ADOBE FLEX SDK Licence¹², einer Mischung aus Open-Source- und Closed-Source-Lizenz.

⁸FlashDevelop: <http://www.flashdevelop.org>

⁹Amethyst: <http://www.sapphiresteel.com/Adobe-Flex-Development-in-Visual>

¹⁰Open-Source Flex SDK: <http://opensource.adobe.com>

¹¹Mozilla Public Licence: <http://www.mozilla.org/MPL>

¹²Adobe Open Source: <http://opensource.adobe.com/wiki/display/flexsdk/Legal+Stuff>

5.4 PDF

In diesem Abschnitt wird auf die automatische Generierung des PDF-Dokumentes eingegangen. Weiterhin sollen einige Programmfehler des ADOBE READERS und die entsprechenden Workarounds vorgestellt werden.

Der PDF-Standard¹³ liegt seit dem 1. Juli 2008 in Version 1.7 als offener Standard vor (ISO 32000-1:2008). PDF ist eine vektorbasierte Seitenbeschreibungssprache. Das heißt, die Inhalte des Dokumentes können frei skalierbar und originalgetreu dargestellt werden. Ein PDF kann verschiedene Inhalte, wie Texte, Bilder, Grafiken, Videos, Musik oder 3D-Modelle enthalten und diese genauso wie im Ursprungsformat ohne Qualitätsverlust und plattformunabhängig wiedergeben. Dadurch ist es zum Standardaustauschformat für Dokumente geworden und wird von vielen Programmen, beispielsweise MICROSOFT OFFICE, als Export-Funktion zur Verfügung gestellt.

Für die Einbindung von Flash-Anwendungen und 3D-Modellen in ein PDF mit Hilfe einer grafischen Oberfläche kann das Programm ADOBE ACROBAT X PRO¹⁴ mit dem Plugin 3D PDF CONVERTER von TETRA 4D¹⁵ genutzt werden. Der Nachteil dabei ist, dass beide Tools kostenpflichtig sind und die PDF-Erstellung nicht automatisierbar ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher die kostenlose Open-Source-Programmierschnittstelle iTEXT¹⁶ verwendet. iTEXT ist eine auf Java bzw. C# basierende Bibliothek, die das automatische Generieren, das Aufteilen und Zusammenfügen sowie das Ändern von PDF-Dateien unterstützt.

Lizenzierung

Bis zur Version 4.2.0 (C#) bzw. Version 2.1.7 (Java) stand iTEXT unter der LGPL¹⁷ und MPL¹⁸, seit Version 5.0.0 (C# und Java) jedoch ausschließlich unter der AGPL¹⁹. Das bedeutet: Ein Programm (MEVISLAB-Applikation), welches die LGPL-lizenzierte Software (iTEXT) nur extern benutzt, beispielsweise als Programmbibliothek, kann seine eigene Lizenz behalten. Wird die LGPL-Software jedoch direkt in einem anderen Programm eingebunden, muss auch dieses unter der LGPL veröffentlicht werden. Eine unter der LGPL lizenzierte Software kann für beliebige Zwecke genutzt, vervielfältigt, weitergegeben und nach eigenen Bedürfnissen geändert werden. Der Quellcode einer unter der AGPL gestellten Software muss von Anfang an allen Benutzern verfügbar gemacht werden. Sollte iTEXT in einer Version > 5.0 kommerziell in einem anderen Programm verwendet

¹³PDF-Referenz: http://www.adobe.com/devnet/pdf/pdf_reference.html

¹⁴Adobe Acrobat X Pro: <http://www.adobe.com/de/products/acrobatpro.html?promoid=DTEOI>

¹⁵3D PDF Converter von Tetra 4D: <http://www.tetra4d.com/3dpdf>

¹⁶Open-Source-PDF-Generierung mit iText: <http://www.itextpdf.com>

¹⁷GNU Lesser General Public License (LGPL): <http://www.gnu.org/licenses/lgpl.html>

¹⁸Mozilla Public License (MPL): <http://www.mozilla.org/MPL>

¹⁹GNU Affero General Public License: <http://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.html>

werden, so muss der Quellcode und die Ausgabe dieses Programms vollständig unter der AGPL veröffentlicht werden. Dazu gehört beispielsweise das Erstellen der PDF-Datei in einer Web-Applikation oder das Beifügen der Bibliothek zu einer proprietären Software. Es gibt jedoch auch eine kostenpflichtige iTEXT-Version²⁰, mit der der Programmcode der kommerziellen Software geschützt wird.

Verwendung von iText

Die Java-Version 2.1.7 (LGPL) von iTEXT unterstützt alle für diese Arbeit notwendigen Funktionen, inklusive der Einbindung von Flash- und U3D-Dateien. Der iTEXT-Quellcode wird nicht direkt eingebunden oder verändert. Stattdessen wird die Programmbibliothek lediglich extern aufgerufen und somit ein PDF-Dokument generiert. Wie in den Abschnitten 5.2 und 5.3 gezeigt wurde, sind die Flash-Dateien und U3D-Modelle zu diesem Zeitpunkt bereits erstellt worden und können eingebunden werden. In der prototypischen Umsetzung erfolgt dies mit Hilfe der kostenlosen und quelloffenen Programmierumgebung ECLIPSE²¹. In ECLIPSE wird dazu iTEXT verlinkt und eine vorbereitete Java-Datei mit dem Java-Compiler kompiliert. Diese Java-Datei enthält Anweisungen für die Erstellung eines PDFs unter Verwendung von iTEXT sowie Pfade zu den lokal gespeicherten Flash-Applikationen und dem U3D-Modell. Zusätzlich wird eine JavaScript-Datei in die Kompilierung eingeschlossen. Diese Datei regelt den Informationsfluss zwischen den verschiedenen Flash-Dateien und der 3D-Szene im ADOBE READER. Der Beispielcode in [iText in Action 2nd Edition, 2010] zeigt die Integration eines 3D-Modells in eine Java-Datei und damit in das entstehende PDF. Die Kompilierung der Java-Datei kann automatisiert werden, indem der Java-Compiler über die Kommandozeile in der MEVISLAB-Skriptumgebung aufgerufen wird.

Besonderheiten bei der PDF-Entwicklung

Bei der Entwicklung eines PDF-Dokumentes inklusive verschiedener Annotationen, wie Flash-Anwendungen und 3D-Grafiken, müssen einige Besonderheiten beachtet werden. PDF 1.7²² unterstützt erst seit Juni 2008 die Einbindung von Flash-Dateien und interaktiven 3D-Elementen. Einige 3D- und Flash-Funktionen sind dabei noch nicht voll ausgereift, sodass im Rahmen der vorliegenden Arbeit einige Schwierigkeiten und Herausforderungen bei der Implementierung aufgetreten sind.

²⁰Lizensierung kommerzieller Software unter Verwendung von iText: <http://itextpdf.com/terms-of-use/index.php>

²¹Eclipse: <http://www.eclipse.org>

²²Adobe-Erweiterung zur PDF-Spezifikation ISO 32000: http://www.adobe.com/content/dam/Adobe/en/devnet/acrobat/pdfs/adobe_supplement_iso32000.pdf

Version: Damit 3D- und Flash-Annotationen dargestellt werden können, muss mindestens ADOBE ACROBAT 9.1 oder der ADOBE READER 9.1 verwendet werden.²³

3D-Modell-Platzierung: Das 3D-Modell ist auf einer PDF-Seite ständig sichtbar und kann nicht ausgeblendet oder mit der Flash-Technologie kombiniert dargestellt werden. Dieser Umstand führt dazu, dass das User Interface für die Ansteuerung der 3D-Szene um die 3D-Annotation herum angeordnet werden muss.

3D-Rendering: Der 3D-Renderer des ADOBE READERS ist teilweise fehlerhaft implementiert. Sichtbare Objekte, die innerhalb von anderen transparenten Objekten liegen, können nicht direkt angeklickt werden. Auch eine skriptbasierte Identifizierung des angeklickten Teilobjektes anhand der Klickposition der Maus wird nicht unterstützt. Der Renderer ist außerdem stark auf Interaktionen ausgelegt. Enthält ein 3D-Modell viele detaillierte Dreiecksnetze, werden Teilbereiche der Szene auf rechenschwachen Systemen teilweise ausgeblendet. So wird zwar eine flüssige Interaktion ermöglicht, jedoch leidet die 3D-Darstellung dadurch erheblich, da sie ständig „flackert“.²⁴ Kontextsensitive Mauscursor werden nicht unterstützt, sodass der Benutzer kein visuelles Feedback bekommt, wenn er die Maus über die 3D-Szene bewegt.²⁵ Des Weiteren werden einige Oberflächen von transparenten 3D-Objekten in bestimmten Perspektiven plötzlich unsichtbar, sodass sie dadurch kleiner erscheinen, als sie eigentlich sind (Abb. 5.5b und 5.5c, schwarzer Pfeil). Daher ist es zwingend notwendig, die Silhouettendarstellung des 3D-Renderers skriptseitig zu aktivieren, damit die Gesamtgröße eines 3D-Objektes anhand der Konturlinie erkennbar bleibt.

Flash-Annotationen: Die Darstellung von Flash-Dateien im ADOBE READER ist ebenfalls nicht fehlerfrei implementiert. Befinden sich auf zwei unterschiedlichen PDF-Seiten Flash-Anwendungen, so werden diese beim Wechsel zwischen den Seiten neu geladen. Die Eingaben und Einstellungen in den Flash-Applikationen, die die Benutzeroberfläche darstellen, gehen somit beim Seitenwechsel verloren. Außerdem wird ein Seitenwechsel im PDF-Dokument manchmal, nicht reproduzierbar, von einem Flash-Absturz begleitet. Das Flash-User-Interface wird dann im ADOBE READER als graues Quadrat mit rotem Fragezeichen angezeigt (Abb. 5.5a, blauer Pfeil). Bei einem Klick auf das Icon wird die Flash-Datei neu geladen und wieder angezeigt. Weiterhin kann ein Flash-Movie-Player für die Anzeige eines Videos nicht im Vollbildmodus dargestellt werden, da das Video daraufhin plötzlich unsichtbar wird.

²³Laut Spezifikation ist die Darstellung von 3D-Modellen ab Version 9.0 möglich. In dieser Version reagierten jedoch GUI-Elemente nicht auf Benutzerinteraktionen. Ab Version 9.1 treten diese Probleme nicht mehr auf.

²⁴Dieses Optimierungsschema kann jedoch in den Einstellungen des Adobe Readers unter „Bearbeiten → Voreinstellungen → 3D & Multimedia → Automatischer Qualitätsverlust → Optimierungsschema für niedrige Framerate: Ohne“ angepasst werden.

²⁵Dieser Umstand könnte dazu führen, dass ein Anwender die interaktive Funktionalität der 3D-Darstellung nicht zur Kenntnis nimmt und sie schlicht für ein statisches Bild hält.

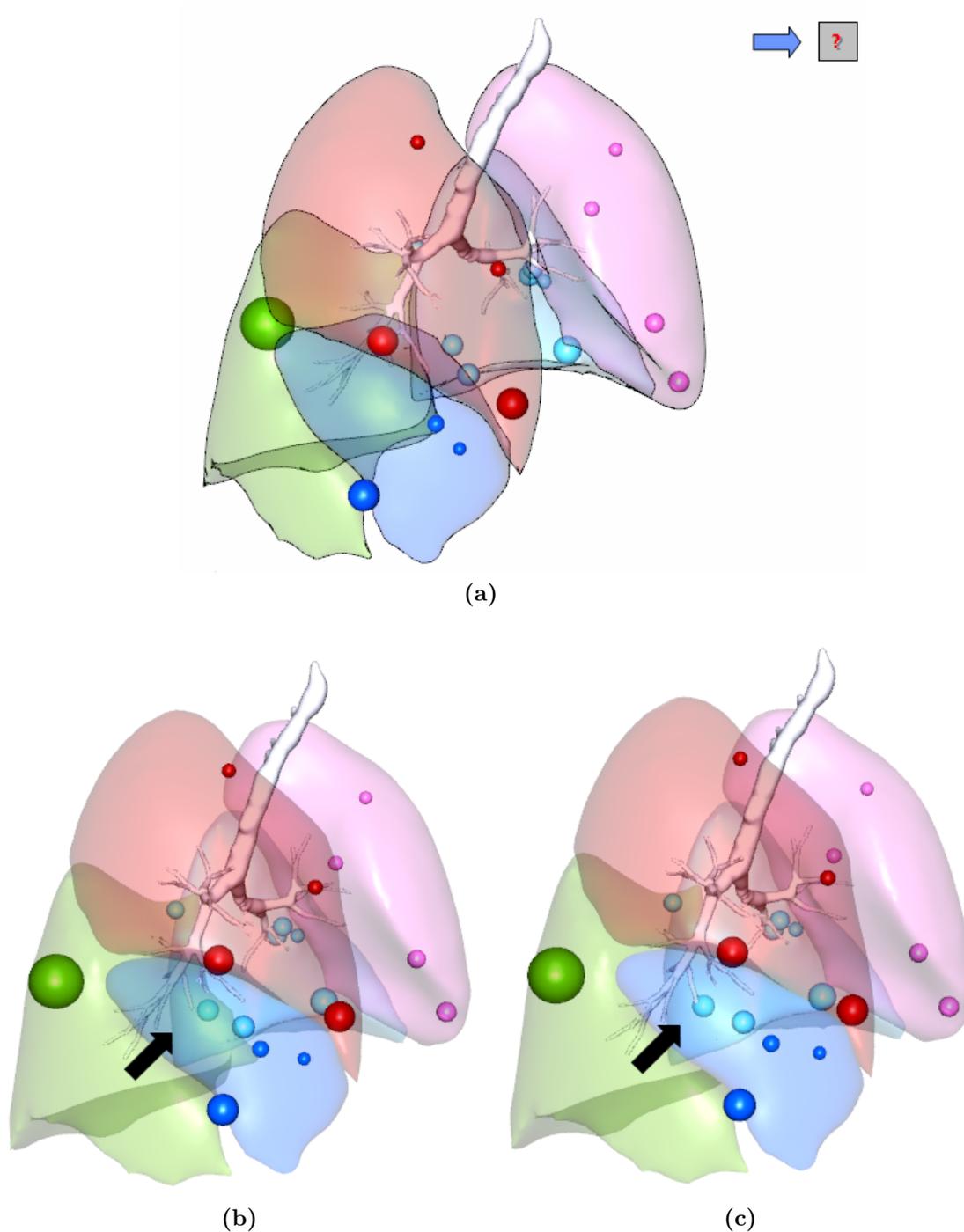


Abbildung 5.5.: Der ADOBE READER enthält einige Bugs. **(a)** Manchmal wird ein Seitenwechsel innerhalb des Dokumentes von einem Absturz der Flash-Anwendung begleitet. Sie wird daraufhin nur als Fragezeichen-Icon dargestellt (blauer Pfeil). Der 3D-Renderer blendet außerdem in bestimmten Sichtrichtungen transparente Oberflächen aus. In **(b)** ist ein verdeckter Teil der Oberfläche des grünen rechten Unterlappens erkennbar (Pfeil). In **(c)** ist diese Region verschwunden, obwohl die Szene nur wenige Millimeter nach rechts bewegt wurde. Der rechte Unterlappen wirkt somit kleiner. Silhouetendarstellungen, wie in a), sind daher notwendig, um auch bei solchen Artefakten die Größe eines 3D-Objektes richtig einschätzen zu können.

```

// ActionScript in Flash-Applikation
public function toJS_selectLesion():void
{
    ExternalInterface.call("fromAS_selectLesion", "Lesion1");
}

// JavaScript für 3D-Modell
public function fromAS_selectLesion(argLesion)
{
    context3D.scene.selectedNode = context3D.scene.nodes.getByName(argLesion);
}

```

Abbildung 5.6.: Die in dem PDF eingebetteten Flash-Anwendungen kommunizieren über die ExternalInterface-Schnittstelle mit dem 3D-Modell. Die Kommunikation verläuft von ActionScript (Flash) nach JavaScript (PDF).

Diese Besonderheiten wurden bei dem Entwurf der Navigationsstruktur und der Implementierung des PDFs berücksichtigt. Da die 3D-Annotation fest im Dokumentinhalt verankert ist und nicht mit Flash kombiniert werden kann, musste eine Möglichkeit geschaffen werden, das PDF sinnvoll zu strukturieren. Das Dokument ist insgesamt auf drei Seiten aufgeteilt, wobei jede Seite einen eigenständigen Abschnitt darstellt. So muss der Benutzer nicht mehrmals zwischen verschiedenen Seiten wechseln, wodurch Verzögerungen durch Ladevorgänge umgangen werden.

Die erste Seite wird vollständig durch eine Flash-Anwendung repräsentiert. Dem Benutzer wird die Navigationsstruktur verdeutlicht und die Möglichkeit gegeben, sich die animierte Verlaufskontrollübersicht sowie die Ergebnisse der Lungenfunktionsanalyse anzuschauen (Modus „Onkologischer Befund/Lungenfunktion“, Abschnitt 4.6.2).

Die zweite PDF-Seite enthält das 3D-Modell der Lunge sowie zwei Flash-Dateien. Da die 3D-Szene nicht hinter oder innerhalb einer Flash-Annotation platziert werden kann, wurden zwei Flash-Anwendungen erstellt und um das 3D-Modell herum positioniert (Abb. 4.13). Diese PDF-Seite bietet dem Anwender die Möglichkeit, die dreidimensionale Rekonstruktion und die 2D-Visualisierungen der Lungenläsionen zu explorieren (Modus „2D/3D-OP-Planung“, Abschnitt 4.6.1.3).

Wenn der Benutzer sich zusätzlich das Video vom CT anschauen möchte, so kann er auf die dritte PDF-Seite wechseln. Diese enthält die vierte Flash-Anwendung in Form eines Movie-Players. Dieser nimmt nahezu die gesamte Seite ein, damit dem Video möglichst viel Details entnommen werden können (Modus „CT-Video“, Abschnitt 4.6.1.4).

Die 3D-Annotation im ADOBE READER ist vollkommen unabhängig von der Flash-Technologie. Flash und U3D-Modell können jedoch untereinander kommunizieren. Dies geschieht über die in dem PDF-Standard integrierte ExternalInterface-Schnittstelle. Sie ermöglicht die Kommunikation zwischen der dokument-globalen PDF-Skriptsprache JavaScript und dem artverwandten ActionScript, welches in Flex verwendet wird. Über das JavaScript wird wiederum das 3D-Modell angesprochen und verändert. In Abb. 5.6 wird dieser Prozess beispielhaft gezeigt. In der ActionScript-Funktion toJS_selectLesion(), wird über das ExternalInterface die JavaScript-Funktion fromAS_selectLesion(argLesion) aufgerufen.

Die Variable `argLesion` enthält dabei den eindeutigen Namen der Läsion in Form eines `String`. Die Daten werden über die Schnittstelle vom Flash-ActionScript zum PDF-JavaScript gesendet, von der JavaScript-Funktion empfangen und von dort aus an das 3D-Modell weitergeleitet. Die Läsion ist in der 3D-Szene als Teilobjekt (`Node`) integriert und lässt sich über `nodes.getByName(argLesion)` identifizieren. Über `scene.selectedNode` wird die Läsion schließlich im 3D-Renderer selektiert und hervorgehoben.

Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung dieser Arbeit war es, einen interaktiven onkologischen Report zu entwickeln. Die Motivation der Arbeit lag darin, einen Radiologen oder Thoraxchirurgen bei der täglichen Arbeit mit Hilfe von computerbasierten Analysen und medizinischen 2D- und 3D-Visualisierungen zu unterstützen. Dafür wurde ein Tool bereitgestellt, das als Hilfestellung bei der sicheren Planung von Lungenoperationen, der effektiven Therapiekontrolle von Verlaufsuntersuchungen sowie der verständlichen Patientenaufklärung dienen soll. Der Report sollte auf Basis von MEVISLAB sowie ggf. weiteren Technologien konzipiert und implementiert werden. Die Kernanforderung war der automatische Export der 3D-Oberflächenmodelle in MEVISLAB in Form eines zusammenhängenden, portablen und plattformunabhängigen Dokumentes.

Im Rahmen der Arbeit wurde untersucht, wie Lungentumoren im klinischen Alltag diagnostiziert und therapiert werden und wie der Ist-Zustand der computergestützten Thoraxradiologie und -chirurgie aussieht. Dabei wurde gezeigt, dass Softwarewerkzeuge für die Analyse von OP-Strategien viel Potential bieten. Vor allem dreidimensionale Darstellungen sind nützlich für die Einschätzung der Operabilität und der postoperativen Lungenfunktion. Sie ermöglichen die präoperative virtuelle Analyse von Risikostrukturen und dienen als Unterstützung bei der Wahl geeigneter Resektionsstrategien und Zugangswege.

Des Weiteren wurde untersucht, wie Lungenkrankheiten im Klinikalltag dokumentiert werden und auf welchen Wegen der Austausch der Befundinformationen zwischen den Ärzten erfolgt. Dabei hat sich gezeigt, dass annotiertes Bildmaterial und interaktive 3D-Visualisierungen bei der Befundung und der Kommunikation der radiologischen Analyseergebnisse hilfreich sind.

Die Entwicklung von interaktiven Systemen erfolgt nach einschlägigen Richtlinien, wie zum Beispiel in [Shneiderman u. a., 2009] oder [Preim & Dachsel, 2010]. Für das spezielle Gebiet der computergestützten Chirurgie sind solche Richtlinien jedoch nicht bekannt. Auf Basis eines szenariobasierten Konzeptes wurden daher die Anforderungen und Wünsche der Ärzte bzgl. computerbasierter Analysen und 3D-Rekonstruktionen ermittelt und umgesetzt.

Es wurden User Personas erstellt, um typische Endanwender des Systems (Chirurgen und Radiologen) zu charakterisieren, d. h., deren unterschiedlichen Aufgaben, Fertigkeiten und Erwartungen zu beschreiben. Auf Basis von User Stories ist ein realitätsnahes Abbild der Thoraxonkologie geschaffen worden. Die User Stories beschreiben typische Metastasen-Fälle und die Herangehensweise der Ärzte bei der interdisziplinären und kollaborativen Entwicklung onkologischer Therapiekonzepte. Dabei wurden die konkreten Vorstellungen der Ärzte bzgl. computergestützter Analyse- und Visualisierungstechniken herausgearbeitet.

Im Anschluss daran wurden die Vorteile des PDF-Dateiformates bei der Umsetzung der in den User Personas und User Stories beschriebenen Anforderungen vorgestellt. Das PDF-Format ermöglicht die kompakte Zusammenfassung aller quantitativen Tumoranalysen, die Integration von Bildern und Videos sowie die Darstellung interaktiver 3D-Modelle.

Für die effektive Informationsvermittlung und Aufbereitung der medizinischen Daten in dem Report wurde zusammen mit medizinischen Experten ein Visualisierungskonzept erarbeitet. Dafür wurde ein früh entwickelter Software-Prototyp genutzt, um die potentiellen Endanwender schon zu Beginn des Entwicklungsprozesses einzubeziehen. Zielführende 2D- und 3D-Visualisierungstechniken sowie Hervorhebungsmethoden sind zusammen mit zwei Chirurgen und einem Radiologen auf Grundlage von Gesprächen, Beobachtungen und Fragebögen ermittelt worden.

Anschließend erfolgte in Form von Conceptual Scenarios eine szenarioartige Beschreibung typischer Anwendungsfälle und Prozesse der klinischen Onkologie. Die Scenarios stellen den Zustand dar, der mit Hilfe des entwickelten PDF-Reports erreicht werden soll. Einzelne Teilaspekte der Conceptual Scenarios wurden in Concrete Scenarios in den Fokus gestellt und weiter verfeinert. Dabei sind Designentscheidungen begründet und Benutzerinteraktionen mit dem System veranschaulicht worden.

Der Report wurde auf Basis der 3D-PDF- und Flash-Technologie prototypisch umgesetzt. Die dazu notwendigen Programmierumgebungen sowie die Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Technologien wurden erläutert. Es wurde beispielhaft beschrieben, wie die Flash-Benutzerschnittstelle mit dem 3D-Modell des PDF-Dokumentes kommuniziert und welche Herausforderungen bei der PDF-Entwicklung zu bewältigen waren.

6.1 Diskussion

Im Folgenden sollen einige Aspekte dieser Arbeit kritisch hinterfragt und Verbesserungsvorschläge genannt werden.

Qualität der CT-Daten

Im klinischen Alltag der Thoraxchirurgie werden meist dickschichtige CT-Aufnahmen angefertigt, anhand derer computergestützte Analysen oft nicht mit zufriedenstellender Qualität möglich sind. Die hohe Bildqualität von Multislice-CT-Geräten ist nicht flächendeckend verfügbar. Für die Operationsplanung werden dem Chirurgen meist nur 5 mm-Schichten oder sogar nur minderwertige Papierausdrucke zur Verfügung gestellt. Die Planung komplexer thoraxchirurgischer Eingriffe erfordert jedoch hochaufgelöste Dünnschicht-CTs, die eine computergestützte Detektion und Segmentierung von kleinen Rundherden sowie aussagekräftige Quantifizierungen der Läsionen ermöglichen. Diese Daten müssen jedoch vom Chirurgen meist speziell angefordert werden. Für adäquate Therapiekonzepte sind demzufolge nicht nur qualitativ hochwertige Analysen und Reformatierungen nötig, sondern sie erfordern auch ein Umdenken in den Kliniken und die Bereitstellung von aussagekräftigem Bildmaterial.

Qualität der 3D-Visualisierungen

Die 3D-Darstellung der Lungenstrukturen bietet einen großen quantitativen und qualitativen Informationsgewinn im Rahmen der präoperativen Risikoanalyse sowie bei der Vorbereitung des chirurgischen Eingriffs. Dies wird u. a. von [Limmer u. a., 2010b] bestätigt. Die in dieser Arbeit eingesetzten Oberflächenmodelle sind jedoch nur abstrakte Darstellungen der Patientenanatomie und setzen eine präzise Detektion und Segmentierung der betreffenden Regionen voraus. Dies kann jedoch nicht immer gewährleistet werden, da die Strukturen im CT aufgrund geringer Grauwertunterschiede oft nicht eindeutig identifizierbar und damit exakt segmentierbar sind. Beispielsweise ist die Differenzierung zwischen Tumor und Atelektase oder die Beurteilung der Tumordinfiltration von Gefäßwänden und Mediastinalregionen selbst in hochaufgelösten CTs nicht immer zweifelsfrei möglich [Limmer u. a., 2010b]. Die 3D-Modelle vermitteln nur die Informationen, die in den 2D-Bilddaten erkennbar sind. Problematisch ist dies beispielsweise im Rahmen von Verlaufsuntersuchungen. Erscheint eine Läsion nicht in der 3D-Rekonstruktion, kann dies mehrere Ursachen haben. Sie kann im Rahmen der Therapie kleiner geworden oder vollständig verschwunden sein. Vorstellbar ist jedoch auch, dass die Läsion aufgrund der Infiltration eines Gefäßes nicht exakt segmentierbar war. Die 3D-Visualisierungen sind demzufolge nicht als einziges therapieentscheidendes Kriterium einsetzbar, sondern können nur als Hilfsmittel zusätzlich zu den bisherigen Befunden, Verlaufsuntersuchungen und originalen Schichtdaten angesehen werden.

Volumenrendering vs. Oberflächenmodelle

Im Rahmen von chirurgischen Eingriffen bei zentralen Bronchialkarzinomen hat die exakte Einschätzung der Operabilität des Patienten oberste Priorität. Es muss untersucht werden, ob der Tumor vollständig entfernt werden kann oder ob zentrale Strukturen, beispielsweise der Aortenbogen oder die Stammbronchien, so stark infiltriert sind, dass der Patient nicht operabel ist. Allein auf Basis der 2D-CT-Daten oder unter Zuhilfenahme abstrakter 3D-Oberflächen ist dies jedoch nicht exakt durchführbar. Die Strukturen des Lungenhilus sind aufgrund von geringen Grauwertunterschieden und bei schlecht aufgelösten Bilddaten nicht immer zweifelsfrei und mit automatischen Segmentierungsmethoden zu unterscheiden. Derzeit übernehmen bei Fraunhofer MEVIS beschäftigte MTRAs die aufwändige Segmentierung und 3D-Rekonstruktion der Thorax-CT-Daten. Dem Chirurgen werden anschließend vorbereitete 3D-Modelle zur Verfügung gestellt und ihm somit eine optimale OP-Vorbereitung ermöglicht. Dieser Workflow ist jedoch kritisch anzusehen. Die CT-Daten müssen aufwändig transportiert werden (per CD oder webbasiert) und zeitnah analysiert, visualisiert und zurückgesendet werden. Die generierten Visualisierungen sind im Nachhinein nicht mehr veränderbar. Sinnvoll wäre stattdessen die Vor-Ort-Installation einer Software, die mit verhältnismäßigem Aufwand die Visualisierung zentraler Strukturen mit Hilfe eines direkten Volumenrenderings ermöglicht. Das VR stellt die tatsächliche Patientenanatomie und -pathologie dar und erfordert keine Segmentierung der hilären Regionen. So können unter Umständen auch Strukturen sichtbar werden, die vom Radiologen nicht beschrieben worden, aber für die Operation von Bedeutung sind, beispielsweise mediastinale Lymphknoten. Problematisch ist jedoch die Wahl geeigneter Transferfunktionen, um spezielle Regionen in den komplexen Darstellungen sichtbar zu machen und farblich hervorzuheben.

MeVisPULMO-Quantifizierungen

Die Quantifizierungen der bei Fraunhofer MEVIS entwickelten Software MEVISPULMO [Kuhnigk u. a., 2005] sind in den interaktiven onkologischen Report integriert worden. Die Berechnungen der durchschnittlichen Lungendichte und der Emphysemverteilungen erfolgen in MEVISPULMO lappenweise und ermöglichen dem Chirurgen damit eine Abschätzung der zu erwartenden postoperativen Lungenfunktion. Die berechneten Werte sind jedoch kritisch anzusehen. Es sind keine standardisierten Messwerte, deren Aussagekraft und Nutzen in repräsentativen Studien bewiesen worden ist. Die Software wird zwar von einzelnen Ärzten bei der OP-Planung eingesetzt, jedoch nur zusätzlich zur bewährten klinischen Lungenfunktionsmessung, der Lungenszintigraphie. Kritisch anzumerken ist, dass die Messwerte ansteigen, wenn der Patient während der CT-Aufnahme stärker einatmet.¹

¹Lungen-CT-Untersuchungen werden in inspiratorischer Atemlage durchgeführt, um ein möglichst großes Kontrastverhältnis zwischen Parenchym, Gefäßen und Tumoren zu erhalten.

Onkologischer Report

Die Tumorummetrie ermöglicht es dem Arzt, das Ansprechverhalten der Lungenläsionen auf eine Chemotherapie exakt einzuschätzen. Die Ausdehnungen der Raumforderungen sind reproduzierbar und untersucherunabhängig ermittelbar und geben Hinweise auf den Therapieerfolg. Nicht zielführende Therapien können somit frühzeitig angepasst werden, um die Belastung für den Patienten und die Kosten gering zu halten. In dem in dieser Arbeit vorgestellten Tumorreport werden jedoch nur *Lungenläsionen* berücksichtigt. Für einen vollständigen onkologischen Report müssen darüber hinaus weitere Informationen eingebracht werden. Bei einem Kolon-Rektum-Karzinom treten beispielsweise oft nicht nur Lungenmetastasen, sondern zusätzlich auch Lebermetastasen auf. Bei komplexer Metastasierung in anderen Organen wird in der Regel von einem chirurgischen Eingriff abgesehen, da die Patienten in diesen Fällen oft älter sind, sich in einem schlechten Allgemeinzustand befinden und eine kurative Therapie nur selten möglich ist. Das bedeutet: Neben den Lungenmetastasen sollten auch Metastasen anderer Organe, z. B. Leber, Gehirn und Skelletsystem, detektiert, segmentiert, dreidimensional rekonstruiert und schließlich in einen umfassenden onkologischen Report integriert werden. Dies setzt jedoch exakte und robuste Segmentierungsmethoden aller Arten von Metastasen voraus. Vor allem die Detektion und Segmentierung von Lymphknotenmetastasen erweist sich dabei als sehr schwierig, da diese prinzipiell überall entstehen können und oft nicht zweifelsfrei zu erkennen sind. Vorstellbar ist hierbei der Einbezug weiterer Modalitäten, zum Beispiel eines PET-CTs, um funktionelle Prozesse in den Daten sichtbar zu machen. Das PET-CT bietet enorme Vorteile beim Nachweis von Fernmetastasen und bei der Suche nach einem Primärtumor, da es Regionen mit hoher Stoffwechselaktivität anzeigt und somit Indizien für tumoröse Prozesse liefert [Bornemann u. a., 2007].

6.2 Ausblick

Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept für die Visualisierung von Lungenläsionen wurde zum Teil zusammen mit drei Fachärzten erarbeitet. Eine umfassende Evaluierung mit einer großen Anzahl an Probanden ist jedoch nicht erfolgt, wird aber angestrebt. Dabei ist vor allem interessant, inwieweit die Anforderungen und Erwartungen der Ärzte umgesetzt worden sind und ob der interaktive Report einen effektiven Mehrwert bei Operationsplanungen oder bei Gesprächen mit Fachkollegen und Patienten bietet. Weitere Befragungen und Beobachtungen der Ärzte bei der Arbeit mit dem entwickelten Report geben außerdem Aufschluss darüber, ob die Benutzerschnittstelle intuitiv gestaltet wurde. Das in [Cordes u. a., 2009] vorgestellte szenariobasierte Konzept kann nicht nur in frühen Entwicklungsphasen von chirurgischen Planungssystemen eingesetzt werden, sondern auch in späteren Phasen, etwa bei der Evaluierung der Prototypen. Vorstellbar ist es, dem Arzt konkrete Aufgabenstellungen zu geben (z. B. die virtuelle OP-Planung eines zentralen Bronchialkarzinoms) und ihn dabei zu beobachten, welche Benutzereingaben er

vornimmt, um die Aufgabe zu lösen. So können Schwachstellen des Visualisierungs- und Interaktionskonzeptes aufgedeckt und ausgebessert werden.

Der entwickelte Report basiert auf der PDF-Technologie und nutzt das standardisierte U3D-Format. Mit Hilfe von kostenloser Open-Source-Software ist es jedoch nicht möglich, PDF-Dokumente zu erstellen, in denen Benutzereingaben persistent gespeichert werden können. So kann der Arzt z. B. keine Kommentare in dem PDF hinterlassen und abspeichern. Die Abhängigkeit von weiteren Entwicklungen am 3D-Renderer von ADOBE sind ebenfalls kritisch anzusehen. Eine vielversprechende Alternative ist das von GOOGLE entwickelte 3D-Format O3D² (Abb. 6.1a und 6.1b). Es handelt sich dabei um eine Open-Source-API für webbasierte 3D-Grafiken, basierend auf dem WebGL-Standard³. O3D ermöglicht anspruchsvolle und interaktive 3D-Applikationen im Webbrowser. Zusätzlich zu dem 3D-Modell wäre es vorstellbar, ein auf HTML und CSS basierendes User Interface zu gestalten und den Report dadurch mit kostenlosen Entwicklungsumgebungen frei von Lizenzierungsfragen webbasiert zur Verfügung zu stellen. O3D hat den entscheidenden Vorteil, dass es direkt in einem modernen Browser (z. B. GOOGLE CHROME⁴) ohne Installation zusätzlicher Plugins lauffähig ist. Nachteilig sind jedoch das noch frühe Entwicklungsstadium des Web-3D-Formates und die anspruchsvollen Hardwareanforderungen. Eine weitere Alternative stellt das standardisierte X3D⁵-Format dar. X3D basiert auf dem VRML⁶-Standard und erfordert die Installation eines kostenlosen Plugins. Dank der geringen Hardwarevoraussetzungen ist es auch problemlos auf mobilen Geräten, wie z. B. dem IPAD von APPLE lauffähig. In [Loidl & Loidl, 2010] wurde gezeigt, dass sich der Einsatz des IPADS vor allem bei Beratungsgesprächen mit Patienten als sinnvoll erwiesen hat (Abb. 6.2a).

Die Interaktion mit medizinischen 3D-Darstellungen erfolgt heutzutage meist mit gängigen Eingabegeräten wie Maus und Tastatur oder vereinzelt mittels haptischer Eingabeinstrumente [Krüger u. a., 2007]. Die Steuerung computergenerierter 3D-Darstellungen bereitet ungeübten Nutzern jedoch oft Schwierigkeiten. Neuartige Entwicklungen im Computerspielebereich haben aber in den letzten Jahren dazu beigetragen, dass sowohl jungen als auch älteren Menschen das intuitive Interagieren mit virtuellen Modellen ermöglicht wird. So sind beispielsweise 3D-Avatare mit Hilfe der NINTENDO WII und einem kabellosen Controller (*Wii mote*) über Bewegungen und Gesten einfach steuerbar. Dieses Interaktionsprinzip kann auch in den medizinischen Anwendungsbereich übertragen werden. Vorstellbar ist die Steuerung medizinischer 3D-Visualisierungen mit Hilfe des Wii-Controllers bei der Operationsplanung oder, wie in [Hansen u. a., 2008] gezeigt, direkt im OP-Saal. Die in sterile Plastikfolie gehüllte *Wii mote* ermöglicht es dem Arzt während des chirurgischen Eingriffs, die präoperativ festgelegten Resektionsebenen intuitiv und gestenbasiert zu modifizieren (Abb. 6.2b).

²Google O3D: <http://code.google.com/p/o3d>

³WebGL: <http://www.khronos.org/webgl>

⁴Google Chrome: <http://www.google.de/chrome>

⁵X3D: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=33913

⁶VRML: <http://www.web3d.org/x3d/specifications/vrml/ISO-IEC-14772-VRML97>

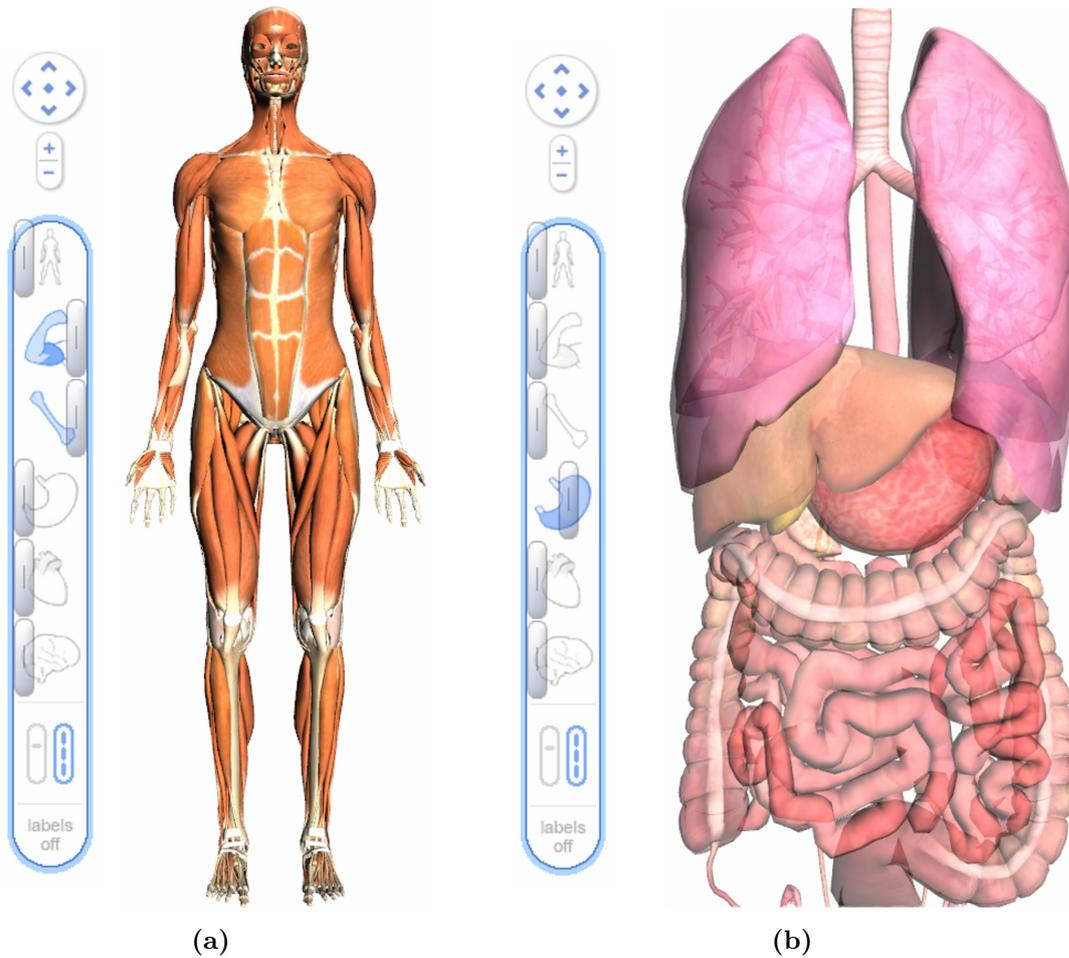


Abbildung 6.1.: Webbasierte 3D-Grafiken mit GOOGLE O3D. **(a)** Darstellung der Muskeln und Knochen des Menschen. **(b)** Halbtransparente Darstellung der Organe. Quelle: <http://bodybrowser.googlelabs.com> (Mozilla Firefox 4 Beta oder Google Chrome)

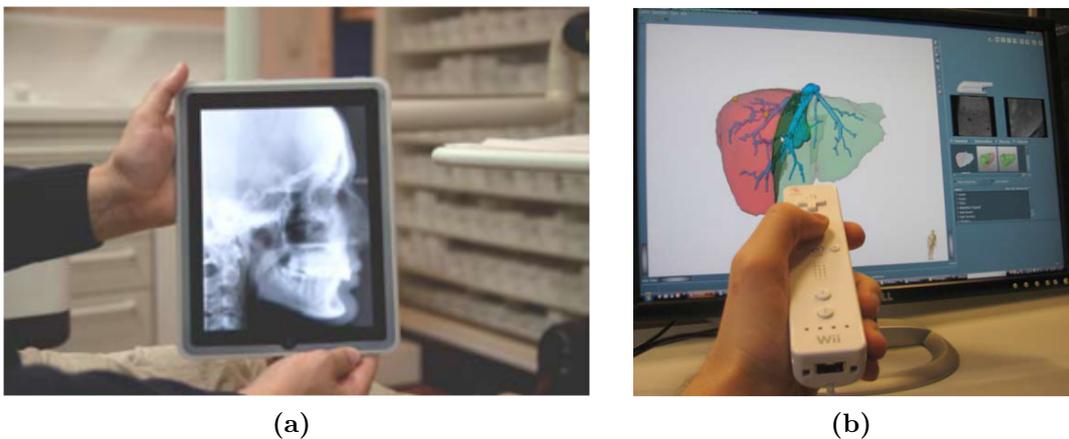


Abbildung 6.2.: **(a)** Nutzung des APPLE iPADS in einer kieferorthopädisch-allgemeinzahnärztlichen Praxis [Loidl & Loidl, 2010]. **(b)** NINTENDO Wii-Controller für die Interaktion mit einem 3D-Lebermodell im OP-Saal [Hansen u. a., 2008].

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided-Detection
COPD	Chronic Obstructive Pulmonary Disease (Chronisch obstruktive Lungenerkrankung)
CT	Computertomographie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
GUI	Graphical User Interface
MRT	Magnetresonanztomographie
MTRA	Medizinisch-Technische(r) Radiologieassistent(in)
PACS	Picture Archiving and Communication System
PDF	Portable Document Format
PET	Positronenemissionstomographie
RECIST	Response Evaluation Criteria In Solid Tumors
RIS	Radiology Information System
ROI	Region of Interest
U3D	Universal 3D
VR	Volumenrendering
WEM	Winged Edge Mesh
WYSIWYG	What You See Is What You Get

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung der Lunge	6
2.2	Peripheres Bronchialkarzinom.	9
2.3	Ausschnitt aus dem CT eines Patienten mit Lungenmetastasen . . .	11
2.4	Lunge mit Lungenemphysem	11
2.5	Allgemeines Diagnoseschema bei Lungentumoren	12
2.6	Typische Zugangswege bei Lungenoperationen	17
2.7	Operative Verfahren an der Lunge	18
3.1	Regionale Hervorhebungstechniken.	23
3.2	Lungenlappensegmentierung	24
3.3	2D- und 3D-Visualisierung der segmentierten Lungenstrukturen . .	25
3.4	MeVisPULMO-Report	26
3.5	ONCOTREAT für die Volumetrie und Verlaufskontrolle von Lun- genläsionen	28
3.6	LESIONVIEWER für die Tumorverlaufskontrolle in Forschungsstudi- en und eine webbasierte Lösung für die Planungsunterstützung von Lungenoperationen	30
3.7	Annotierter Lebertumor	33
4.2	Mögliche Technologien für interaktive Dokumente.	55
4.3	3D-PDF-Report für die Operationsplanung von Lebertumoren . . .	55
4.4	Erster 3D-PDF-Prototyp	57
4.5	Visualisierungskonzept	59
4.6	Conceptual Scenario 2	67
4.7	Conceptual Scenario 3	70
4.8	Conceptual Scenario 5a	74
4.9	Conceptual Scenario 5b	76
4.10	Hauptnavigation des PDF-Reports	77
4.11	Startseite des PDF-Reports	78
4.12	Überblicksseite des PDF-Reports	79
4.13	Kombinierte 2D/3D-Visualisierung für die OP-Planung	80
4.14	CT-Video	82
4.15	Überblick über die Ergebnisse der Verlaufsuntersuchungen	83

4.16	Verlaufskontrolle: Zusammenhang zwischen Tabelle und interaktivem Diagramm	84
4.17	Tabellarische und grafische Darstellung der Lungenfunktionsmesswerte	85
4.18	Funktionelle Analyse: Zusammenhang zwischen Tabelle und interaktivem Diagramm	86
4.19	Wizard-Zwischenschritte	88
4.20	3D-Visualisierung: 3D-Interaktion	91
4.21	3D-Visualisierung: Ansicht	92
4.22	3D-Visualisierung: 3D-Objekte	93
4.23	Läsionauswahl und -Info	94
4.24	User Interface für die 2D-Visualisierungen	96
4.25	Icons für die Vollbild-, Druck- und Hilfefunktion	97
4.26	Kontextsensitive Hilfefunktionen	97
4.27	Pop-Up-Fenster: Vollbildfunktion	99
4.28	Pop-Up-Fenster: Falldaten	99
4.29	Pop-Up-Fenster: Laden der 3D-Darstellung und des Movie-Players .	100
4.30	Pop-Up-Fenster: Fehlerhafte Eingabe	100
5.1	Ablaufschema: Entwicklungsumgebungen	102
5.2	MEVISLAB-Netzwerk für die Segmentierung und Visualisierung eines Lungentumors.	105
5.3	Entwicklung des Flex-User-Interfaces	108
5.4	Flex-Beispielcode	109
5.5	Bugs im ADOBE READER	113
5.6	ActionScript-JavaScript-Kommunikation	114
6.1	Webbasierte 3D-Grafiken mit GOOGLE O3D	123
6.2	APPLE IPAD und NINTENDO WII für die Darstellung und Interaktion medizinischer Visualisierungen	123

Literaturverzeichnis

- [**Arnold u. a., 2007**] ARNOLD, C. W. ; BUI, A. A. ; MORIOKA, C. ; EL-SADEN, S. ; KANGARLOO, H.: A prototype Web-based reporting system for onsite-offsite clinician communication. In: *Radiographics* 27 (2007), Nr. 4
- [**Birr u. a., 2010**] BIRR, S. ; DICKEN, V. ; PREIM, B.: Webbasierte Planungsunterstützung von Lungenoperationen. In: *Mensch und Computer*. Duisburg, 12.-15. September 2010, S. 113–118
- [**Bornemann u. a., 2007**] BORNEMANN, Lars ; DICKEN, Volker ; KUHNIGK, Jan-Martin ; WORMANNS, Dag ; SHIN, Hoen-Oh ; BAUKNECHT, Hans-Christian ; DIEHL, Volker ; FABEL, Michael ; MEIER, Stefan ; KRESS, Oliver: OncoTREAT: a software assistant for cancer therapy monitoring. In: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 1 (2007), Nr. 5, S. 231–241
- [**Cordes u. a., 2009**] CORDES, J. ; DORNHEIM, J. ; PREIM, B.: Szenariobasierte Entwicklung von Systemen für Training und Planung in der Chirurgie. In: *i-com* 1 (2009), S. 5–12
- [**Detterbeck, 2010**] DETTERBECK, F. C.: The Number of metastases and Its Influence on Outcome. In: *Journal of Thoracic Oncology* 5 (2010), Nr. 6 Suppl 2, S. 164–165
- [**Detterbeck u. a., 2010**] DETTERBECK, F. C. ; GRODZK, T. ; GLEESON, F. ; ROBERT, J. H.: Imaging requirements in the practice of pulmonary metastasectomy. In: *Journal of Thoracic Oncology* 5 (2010), Nr. 6 Suppl 2, S. 134–139
- [**Diepstraten u. a., 2003**] DIEPSTRATEN, J. ; WEISKOPF, D. ; ERTL, T.: Interactive Cutaway Illustrations. In: *Eurographics* 22 (2003), Nr. 3
- [**Eisenhauer u. a., 2009**] EISENHAUER, E. A. ; THERASSE, P. ; J, J. B.: New response evaluation criteria in solid tumours: Revised RECIST guideline (version 1.1). In: *European Journal of Cancer* 42 (2009), Nr. 2, S. 228–247
- [**Eng u. a., 2002**] ENG, J. ; LEAL, J. P. ; SHU, W. ; LIANG, Y. G.: Collaboration system for radiology workstations. In: *Radiographics* 22 (2002), Nr. 5

- [**European Computer Manufacturers Association (ECMA), 2007**] EUROPEAN COMPUTER MANUFACTURERS ASSOCIATION (ECMA): *Universal 3D File Format*. <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-363.htm>, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [**Flickr: Bildjournalismus HS Magdeburg, 2009a**] FLICKR: BILDJOURNALISMUS HS MAGDEBURG: *Alltag eines Chirurgen*. <http://www.flickr.com/photos/bildjournalismus/3447884416>, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [**Flickr: Bildjournalismus HS Magdeburg, 2009b**] FLICKR: BILDJOURNALISMUS HS MAGDEBURG: *Alltag eines Chirurgen*. <http://www.flickr.com/photos/bildjournalismus/3447070663/in/set-72157617053592222>, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [**Flickr: galleryquantum, 2009**] FLICKR: GALLERYQUANTUM: *doctor*. <http://www.flickr.com/photos/32490173@N05/3170078056>, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [**Gumpert, 2010**] GUMPERT, Dr. N.: *Therapie Gallengangskrebs*. http://www.dr-gumpert.de/html/therapie_gallengangskrebs.html, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [**Hansen u. a., 2008**] HANSEN, C. ; KOEHN, A. ; SCHLICHTING, S. ; WEILER, F. ; ZIDOWITZ, S. ; KLEEMANN, M. ; PEITGEN, H.-O.: Intraoperative Modification of Resection Plans for Liver Surgery. In: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 3 (2008), Nr. 3-4, S. 291-297
- [**Hansen u. a., 2010**] HANSEN, C. ; WIEFERICH, J. ; RITTER, F. ; RIEDER, C. ; PEITGEN, H.-O.: Illustrative visualization of 3D planning models for augmented reality in liver surgery. In: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 4 (2010), Nr. 2, S. 133-141
- [**Hermann, 2002**] HERMANN, M.: Dreidimensionale Computeranimation - neues Medium zur Unterstützung des Aufklärungsgesprächs vor Operationen. Akzeptanz und Bewertung der Patienten anhand einer prospektiv randomisierten Studie - Bild versus Text. In: *Der Chirurg* 73 (2002), S. 500-507
- [**Herth, 2008**] HERTH, F.: *Neues bei der Früherkennung und Therapie von Lungentumoren*. http://www.krebsgesellschaft.de/download/statement_prof_herth_vorlage.pdf, Letzter Abruf: 29.01.2011. Statement auf 28. Deutschem Krebskongress, Berlin 2008
- [**iText in Action 2nd Edition, 2010**] ITEXT IN ACTION 2ND EDITION: *Chapter 16: PDF Streams - Pdf3D*. <http://itextpdf.com/examples/iaa.php?id=299>, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [**Janni u. a., 2005**] JANNI, W. ; GERBER, B. ; SOMMER, H. ; UNTCH, M. ; KRAUSE, A. ; DIAN, D. ; RUNNEBAUM, I. ; RACK, B. ; FRIESE, K.: Therapie des primären, invasiven Mammakarzinoms. In: *Deutsches Ärzteblatt* 102 (2005), Nr. 41, S. 2795-2804

- [Keles & Berger, 2004] KELES, G. E. ; BERGER, M. S.: Advances in neurosurgical technique in the current management of brain tumors. In: *Seminars in Oncology* 31 (2004), Nr. 5, S. 659–665
- [Kooperationsgemeinschaft Mammographie, 2010] KOOPERATIONSGEMEINSCHAFT MAMMOGRAPHIE: *Qualitätsbericht 2005-2007. Ergebnisse des Mammographie-Screening-Programms in Deutschland.* http://www.mammo-programm.de/cms_upload/datenpool/20100827_presseinfoqualitaetsbericht.pdf, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [Krüger u. a., 2007] KRÜGER, A. ; STAMPE, K. ; HERTEL, I. ; STRAUSS, G. ; PREIM, B.: Haptische Interaktion zur Planung von Nasennebenhöhlen-Operationen. In: *Bildverarbeitung für die Medizin (BVM)*, Springer, 2007 (Informatik aktuell), S. 303–307
- [Krüger & Westermann, 2003] KRÜGER, J. ; WESTERMANN, R.: Acceleration Techniques for GPU-based Volume Rendering. In: *Proceedings of the 14th IEEE Visualization 2003*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2003 (VIS '03)
- [Krug, 2004] KRUG, Barbara (Hrsg.): *Thoraxdiagnostik*. 1. Thieme, Stuttgart, 2004
- [Kubisch u. a., 2010] KUBISCH, C. ; TIETJEN, C. ; PREIM, B.: GPU-based Smart Visibility Techniques for Tumor Surgery Planning. In: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* (2010)
- [Kuhnigk u. a., 2006] KUHNIGK, J.-M. ; DICKEN, V. ; BORNEMANN, L. ; BAKAI, A. ; WORMANNS, D. ; KRASS, S. ; PEITGEN, H.-O.: Morphological segmentation and partial volume analysis for volumetry of solid pulmonary lesions in thoracic CT scans. In: *IEEE Trans. Med. Imaging* 25 (2006), Nr. 4, S. 417–434
- [Kuhnigk u. a., 2005] KUHNIGK, J.-M. ; DICKEN, V. ; ZIDOWITZ, S. ; BORNEMANN, L. ; KUEMMERLEN, B. ; KRASS, S. ; PEITGEN, H.-O. ; YUVAL, S. ; JEND, H.-H. ; RAU, W. S. ; ACHENBACH, T.: New Tools for Computer Assistance in Thoracic CT. Part 1. Functional Analysis of Lungs, Lung Lobes, and Bronchopulmonary Segments. In: *RadioGraphics* 25 (2005), Nr. 2, S. 525–536
- [Kunze, 2009] KUNZE, S.: *Untersuchung der Realisierbarkeit interaktiver Befundberichte im klinischen Alltag*, Georg-August-Universität Göttingen, Diplomarbeit, 2009
- [Lang u. a., 2005] LANG, H. ; RADTKE, A. ; LIU, C. ; SOTIROPOULOS, G. C. ; HINDENNACH, M. ; SCHROEDER, T. ; HO, H.-O. P. ; BROELSCH, C. E.: Improved Assessment of Functional Resectability in Repeated Hepatectomy by Computer-assisted Operation Planning. In: *Hepatogastroenterology* 52 (2005), S. 1645–1648
- [Langlotz, 2006] LANGLOTZ, C. P.: RadLex: A New Method for Indexing Online Educational Materials. In: *Radiographics* 26 (2006), Nr. 6, S. 1595–1597

- [Langlotz & Nolte, 2003] LANGLOTZ, F. ; NOLTE, L.-P.: Computer-Assisted Orthopaedic Surgery: From Theory to the Operating Room. In: *Techniques in Orthopaedics* 18 (2003), Nr. 2, S. 140–148
- [Levy u. a., 2007] LEVY, M. A. ; GARG, A. ; TAM, A. ; GARTEN, Y. ; RUBIN, D. L.: LesionViewer: A tool for tracking cancer lesions over time. In: *AMIA Annu Sympo Proc* (2007), S. 443–447
- [Li, 2007] LI, Q.: Recent progress in computer-aided diagnosis of lung nodules on thin-section CT. In: *Computerized Medical Imaging and Graphics* 31 (2007), Nr. 4, S. 248–257
- [Limmer u. a., 2010a] LIMMER, S. ; BIRR, S. ; STÖCKER, C. ; KUJATH, P. ; DICKEN, V.: *3D Rekonstruktion von CAD-detektierten Rundherden in der Lungenmetastasen Chirurgie - erste Erfahrungen*. Poster-Präsentation auf der gemeinsamen Jahrestagung der Deutschen, Österreichischen und Schweizer Gesellschaft für Thoraxchirurgie, 2010
- [Limmer u. a., 2010b] LIMMER, S. ; DICKEN, V. ; KUJATH, P. ; KRASS, S. ; STÖCKER, C. ; WENDT, N. ; UNGER, L. ; HOFFMANN, M. ; VOGT, F. ; KLEEMANN, M. ; BRUCH, H.-P. ; PEITGEN, H.-O.: Dreidimensionale Rekonstruktion von zentralen Lungentumoren basierend auf CT-Daten. In: *Der Chirurg* 81 (2010), Nr. 9, S. 833–840
- [Lindemann & Ropinski, 2010] LINDEMANN, F. ; ROPINSKI, T.: Advanced Light Material Interaction for Direct Volume Rendering. In: WESTERMANN, Rüdiger (Hrsg.) ; KINDLMANN, Gordon (Hrsg.): *IEEE/EG International Symposium on Volume Graphics*, Eurographics Association, 2010, S. 101–108
- [Loidl & Loidl, 2010] LOIDL, D. P. ; LOIDL, H.: *iPad-Anwenderbericht*. http://www.praxisbetreuung-berlin.de/files/anwenderbericht_ipad.pdf, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [Loranger & Nielsen, 2008] LORANGER, Hoa ; NIELSEN, Jakob: *Web Usability*. Addison Wesley Verlag, 2008
- [Lorensen & Cline, 1987] LORENSEN, W. E. ; CLINE, H. E.: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In: *SIGGRAPH 87: Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1987), S. 163–169
- [Marten u. a., 2006] MARTEN, K. ; AUER, F. ; SCHMIDT, S. ; KOHL, G. ; RUMMENY, E. J. ; ENGELKE, C.: Inadequacy of manual measurements compared to automated CT volumetry in assessment of treatment response of pulmonary metastases using RECIST criteria. In: *European Radiology* 16 (2006), Nr. 4, S. 781–790
- [Mayhew, 1999] MAYHEW, D. J.: *The Usability Engineering Lifecycle: A Practitioner's Handbook for User Interface Design (Interactive Technologies)*. 1st. Morgan Kaufmann, 1999

- [MeVis Medical Solutions, 2011] MEVIS MEDICAL SOLUTIONS: *MeVisLab - Medical Image Processing and Visualization*. <http://www.mevislab.de>, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [Mühler u. a., 2008] MÜHLER, K. ; CORDES, J. ; TIETJEN, C. ; PREIM, B.: Richtlinien für die Gestaltung chirurgischer Planungs- und Trainings-Software. In: BARTZ, D. (Hrsg.) ; BOHN, S. (Hrsg.) ; HOFFMANN, J. (Hrsg.): *CURAC Jahrestagung 2008 Tagungsband*. Leipzig, September 2008, S. 241–242
- [Mühler u. a., 2007] MÜHLER, K. ; NEUGEBAUER, M. ; TIETJEN, C. ; PREIM, B.: Viewpoint Selection for Intervention Planning. In: MUSETH, K. (Hrsg.) ; MÖLLER, T. (Hrsg.) ; YNNERMAN, A. (Hrsg.): *EEE/Eurographics Symposium on Visualization (EuroVis)*, 2007, S. 267–274
- [Migliore u. a., 2010] MIGLIORE, M. ; JAKOVIC, R. ; HENSENS, A. ; KLEPETKO, W.: Extending Surgery for Pulmonary Metastasectomy: What Are the Limits? In: *Journal of Thoracic Oncology* 5 (2010), Nr. 6 Suppl 2, S. 155–160
- [Morneborg, 1995] MORNEBORG, Heinz: *Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik*. 3. Publicis MCD Verlag, Erlangen, 1995
- [Mortensen u. a., 1992] MORTENSEN, E. N. ; MORSE, B. S. ; BARRETT, W. A. ; UDUPA, J. K.: Adaptive boundary detection using live-wire two-dimensional dynamic programming. In: *IEEE Proceedings of Computers in Cardiology*, 1992, S. 635–638
- [Mount Nittany Medical Center, 2010] MOUNT NITTANY MEDICAL CENTER: *Diagnosing Chest and Lung Problems: Surgical Procedures*. <http://www.mountnittany.org/wellness-library/healthsheets/documents?ID=1527>, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [Oldhafer u. a., 1999] OLDHAFER, K. J. ; HÖGEMANN, D. ; STAMM, G. ; RAAB, R. ; PEITGEN, H.-O. ; GALANSKI, M.: Dreidimensionale (3-D) Visualisierung der Leber zur Planung erweiterter Leberresektionen. In: *Der Chirurg* 70 (1999), Nr. 3, S. 233–238
- [Oldhafer u. a., 2001] OLDHAFER, K. J. ; PREIM, B. ; DÖRGE, C. ; PEITGEN, H.-O. ; BROELSCH, C. E.: Akzeptanz einer computergestützten Operationsplanung in der Viszeralchirurgie - Ergebnisse einer bundesweiten Umfrage. In: *Zentralblatt für Chirurgie* 127 (2001), Nr. 2, S. 128–133
- [Paetz u. a., 2004] PAETZ, Burkhard ; BENZINGER-KÖNIG, Brigitte ; HOFFART, Hanns-Edgar: *Chirurgie für Pflegeberufe*. 20. Thieme, 2004
- [Paulick, 2001] PAULICK, Sigrun: *Der Brockhaus in einem Band*. Brockhaus GmbH, 2001
- [Petrovic u. a., 2010] PETROVIC, K. ; GÖRING, K. ; KOWALLIK, P.: Personas für Business Software. In: BRAU, H. (Hrsg.) ; DIEFENBACH, S. (Hrsg.) ; GÖRING, K. (Hrsg.) ; PREISSNER, M. (Hrsg.) ; PETROVIC, K. (Hrsg.): *Usability Professionals 2010*. Stuttgart, 2010, S. 59–64

- [Pichlmaier & Schildberg, 2005] PICHLMAIER, H. (Hrsg.) ; SCHILDBERG, F. W. (Hrsg.): *Thoraxchirurgie: Die Eingriffe an der Brust und in der Brusthöhle (Klassiker der Medizin)*. 3. Springer, 2005
- [Preim & Dachsel, 2010] PREIM, B. ; DACHSELT, R.: *Interaktive Systeme: Band 1: Grundlagen, Graphical User Interfaces, Informationsvisualisierung*. 2. Springer, 2010
- [Preim & Ritter, 2002] PREIM, B. ; RITTER, F.: Techniken zur interaktiven Hervorhebung von Objekten in medizinischen 3d-Visualisierungen. In: *SimVis*, 2002, S. 187–200
- [Reiner & Siegel, 2006] REINER, B. ; SIEGEL, E.: Radiology reporting: returning to our image-centric roots. In: *American Journal of Roentgenology* 187 (2006), Nr. 5, S. 1151–1155
- [Rezk-Salama, 2001] REZK-SALAMA, C.: *Volume Rendering Techniques for General Purpose Graphics Hardware*. Erlangen, Deutschland, Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2001
- [Robert Koch Institut, 2010] ROBERT KOCH INSTITUT: *Krebs in Deutschland 2005/2006. Häufigkeiten und Trends*. http://www.rki.de/cln_151/mn_196910/DE/Content/GBE/Gesundheitsberichterstattung/GBEDownloadsB/KID2010.html?__nnn=true, Letzter Abruf: 29.01.2011
- [Rolle u. a., 2006] ROLLE, A. ; PERESZLENYI, A. ; KOCH, R. ; RICHARD, M. ; BAIER, B.: Is surgery for multiple lung metastases reasonable? A total of 328 consecutive patients with multiple-laser metastasectomies with a new 1318-nm Nd:YAG laser. In: *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* 131 (2006), S. 1236–1242
- [Rubin u. a., 2008] RUBIN, D. L. ; RODRIGUEZ, C. ; SHAH, P. ; BEAULIEU, C.: iPad: Semantic annotation and markup of radiological images. In: *AMIA Annu Symp Proc* (2008), S. 626–630
- [Rusch, 2010] RUSCH, V. W.: Pulmonary Metastasectomy: A Moving Target. In: *Journal of Thoracic Oncology* 5 (2010), Nr. 6 Suppl 2, S. 130–131
- [Schade, 2001] SCHADE, P.: *Lexikon Medizin und Gesundheit (Neuausgabe)*. Serges Medien, 2001
- [Schirren u. a., 2006] SCHIRREN, J. ; BÖLÜKBAS, S. ; BERGMANN, T. ; BEQIRI, S. ; TRAINER, S.: Die chirurgische Therapie von Lungenmetastasen. In: *Hessisches Ärzteblatt* (2006), Mai
- [Schmid & Stockhausen, 2005] SCHMID, Christof ; STOCKHAUSEN, Dietrich: *Leitfaden Thoraxchirurgie*. 1. Steinkopff, 2005
- [Schumann & Müller, 1999] SCHUMANN, H. ; MÜLLER, W.: *Visualisierung: Grundlagen und allgemeine Methoden*. 1. Springer, 1999

- [Shneiderman u. a., 2009] SHNEIDERMAN, Ben ; PLAISANT, Catherine ; COHEN, Maxine ; JACOBS, Steven: *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction (5th Edition)*. 5. Addison Wesley, 2009
- [Speckmann u. a., 2000] SPECKMANN, Erwin-Josef ; WITTKOWSKI, Werner ; ENKE, Axel: *Bau und Funktionen des menschlichen Körpers, Lehrbuch*. 19. Urban u. Fischer, 2000
- [Stöcker u. a., 2009] STÖCKER, C. ; BORNEMANN, L. ; DICKEN, V. ; KRASS, S. ; KUHNIGK, J.-M. ; ZIDOWITZ, S.: CT-based patient individual anatomical modeling of the lung and its impact on thoracic surgery. In: DÖSSEL, O. (Hrsg.) ; SCHLEGEL, W. C. (Hrsg.): *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering* Bd. 25, Springer, 2009, S. 1592–1595
- [Swensen u. a., 2002] SWENSEN, S. J. ; JETT, J. R. ; SLOAN, J. A. ; MIDTHUN, D. E. ; HARTMAN, T. E. ; SYKES, A. M. ; AUGHENBAUGH, G. L. ; ZINK, F. E. ; HILLMAN, S. L. ; NOETZEL, G. R. ; MARKS, R. S. ; CLAYTON, A. C. ; PAIROLERO, P. C.: Screening for lung cancer with low-dose spiral computed tomography. In: *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 165 (2002), Nr. 4, S. 508–513
- [Tietjen u. a., 2005] TIETJEN, C. ; ISENBERG, T. ; PREIM, B.: Illustrative Rendering-Techniken für die medizinische Ausbildung und Therapieplanung. In: *Bildverarbeitung für die Medizin (BVM)*, Springer, 2005 (Informatik aktuell), S. 282–286
- [Venuta u. a., 2010] VENUTA, F. ; ROLLE, A. ; ANILE, M. ; MARTUCCI, N. ; BIS, B. ; ROCCO, G.: Techniques Used in Lung Metastasectomy. In: *Journal of Thoracic Oncology* 5 (2010), Nr. 6 Suppl 2, S. 145–150
- [Weiss & Langlotz, 2008] WEISS, D. ; LANGLOTZ, C. P.: Structured Reporting: Patient Care Enhancement or Productivity Nightmare? In: *Radiology* 249 (2008), Nr. 3, S. 739–747
- [Wormanns u. a., 2005] WORMANNS, D. ; BEYER, F. ; HOFFKNECHT, P. ; DICKEN, V. ; KUHNIGK, J.-M. ; LANGE, T. ; THOMAS, M. ; HEINDEL, W.: Clinical value of CT-based preoperative software assisted lung lobe volumetry for predicting postoperative pulmonary function after lung surgery. In: *Medical Imaging 2005: Physiology, Function, and Structure from Medical Images* 5746 (2005), Nr. 1, S. 78–83
- [Zhou u. a., 2002] ZHOU, J. ; HINZ, M. ; TOENNIES, K. D.: Hybrid Focal Region-based Volume Rendering of Medical Data. In: *Bildverarbeitung für die Medizin*, 2002, S. 113–116

A

OP-Berichte und Befunde

A.1 Operationsbericht: Patient HL-NK-Me

UK SH	Universitätsklinikum Schleswig-Holstein
	Zentrum Campus Lübeck Klinik f. Allgemeine Chirurgie 45C - Chirurgie D -23538 Lübeck, Hansestadt, Ratzeburger Allee 160 / Tel: 0451/ 500-6019 Leiter: Prof. Dr. Hans-Peter Bruch
Operationsbericht	
Patient: [REDACTED] geb.: 18.09.1950	
diktiert am: 01.06.2010 geschrieben am: 10.06.2010 / Karka	
Station:	45C - Chirurgie
OP-Datum:	[REDACTED]
Operationsbeginn:	09:55 Uhr
Operationsende:	13:08 Uhr
Diagnose:	Lungenmetastasen bds. bei Choledochuscarcinom.
Durchgeführte Operation:	Anterolaterale Thorakotomie rechts, offenen Segmentresektion rechts, atypische Resektion von insgesamt 8 Metastasen im Ober-, Unter-, und Mittellappen mit Klammernahtgerät, 4x Laserabtragung, Einlage Bülaudrainage.
Operateur:	OA Dr. S. Limmer
1. Assistent:	Prof. P. Kujath
Instrument:	Varbelow
Saaldienst:	Reinhardt
Anästhesist:	Dr. Sieker
Operationsverlauf:	Patient in Linksseitenlage, steriles Abwaschen und Abdecken des Situs. Anterolaterale Thorakotomie und Eröffnung des Thorax in üblicher Weise. Einsetzen der Finochietto-Sperrer und Exploration. Es wird die rechte Pulmo explizit und sorgfältigst durchgetastet. Im Vorfeld waren zwei verschiedene Metastasensuchprogramme verwendet worden. Zusätzlich war eine 3D-Rekonstruktion der Herde durchgeführt worden. Auf der rechten Seite waren 8 Herde beschrieben. Zunächst wird der Unterlappen durchgetastet. Hier finden sich zwei unmittelbare nebeneinander liegende Herde im Segment 6 peripher sowie ein kleiner Herd dorsalseitig im Unterlappen. Am Mittellappen insgesamt 3 Herde, wobei zwei unmittelbar am großen Lappenspalt liegen. Weitere 4 Herde sind im Oberlappen verteilt. Es wird zunächst der größte Herd angegangen. Dies ist der Unterlappenherd. Das Ligamentum pulmonale wird gelöst und die Lunge mobilisiert. Bei der Präparation des unteren Venensterns wird ein Lymphknoten entfernt und als Lymphknoten unter der Pulmonalvene gesondert eingesandt. Nunmehr wird die Fissura obliqua und der Abgang A6 dargestellt. Dies gelingt problemlos. A6 wird unterfahren, bds. mit Ligaturen versorgt und nach zentral zusätzlich durchstoßen. Anschließend wird am unteren Venenstern V6 dargestellt und in identischer Weise versorgt. Die Parenchymbrücke wird auf dem Bronchus unterfahren und mit dem GIA 80 mm blauem Magazin abgesetzt. Mit einem weiteren Schlag des GIA wird die Segmentresektion komplettiert. Das Präparat wird entsprechend markiert und abgegeben. Ein Lymphknoten an
<small>OP-Bericht, gedruckt am 21.06.2010 09:32</small>	
<small>1/2</small>	

Abbildung A.1.: OP-Bericht: Patient HL-NK-Me, Seite 1.

Pat. [REDACTED] Geb.Dat.: 18.09.1950, M

der Bifurkation wird als Lymphknotenstation 7 entfernt und ebenfalls eingesandt. Nunmehr wird sich dem Mittellappen zugewandt. Am cranialen Mittellappen und am caudalen Oberlappen finden sich in unmittelbarer Spalten jeweils zwei Herde. Es wird daher eine atypische Resektion des Lappenspaltes mit 3 Schlägen des GIA durchgeführt, wobei alle 4 Herde sicher erfasst sind. Nunmehr finden sich noch zwei Herde im Oberlappen, einer dorsal am Unterlappen und einer im Mittellappen. Diese Herde werden einzeln mit dem Laser mit einem Sicherheitsabstand von mehreren Millimetern excidiert. Die Laserdefekte am Parenchym werden mit fortlaufender PDS-Naht 5.0 verschlossen. Weitere Herde finden sich nicht. Die Dokumentation der entfernten Herde erfolgt analog der Nummerierungen im Cutsystem. Im Bereich der Parenchymbrücke kam es zu einer Parenchymeinreißung. Diese wird mittels fortlaufender Naht und einem Tachosilfließ suffizient versorgt. Die Lunge wird freigegeben und es erfolgt die Unterwasserprobe. Hier findet sich zunächst kein Hinweis auf eine Parenchymleckage. Im Verlauf tritt jedoch eine Leckage am Unterlappen auf. Hierbei zeigt sich, dass die Laserresektionsstelle am dorsalen Unterlappen noch einen kleinen Bronchus enthält, welcher nicht verschlossen war. Dieser wird gefasst und mit einer fortlaufenden Naht PDS. 5.0 sicher gefasst. Im Anschluss herrscht Luftdichtheit. Nochmalige Kontrolle auf Bluttrockenheit und Parenchymdichtigkeit. Von der Anästhesie wird ebenfalls keine Leckage mehr berichtet. Einlage einer geraden und gebogenen Bülaudrainage. Schichtweiser Verschluss des thorax mit Perikostalnaht, Fasziennaht, Subkutannaht und Hautnaht. Steriler Verband.

Postop. Procedere:

10 cm Sog auf beide Bülaudrainagen. Fortführung der perioperativ begonnenen Antibiotikatherapie mit Tazobac 3x1 für mind. 3 Tage. Sanierung der linken Pulmo nach Erholung des Patienten.

Dr. S. Limmer
Oberarzt

Abbildung A.2.: OP-Bericht: Patient HL-NK-Me, Seite 2.

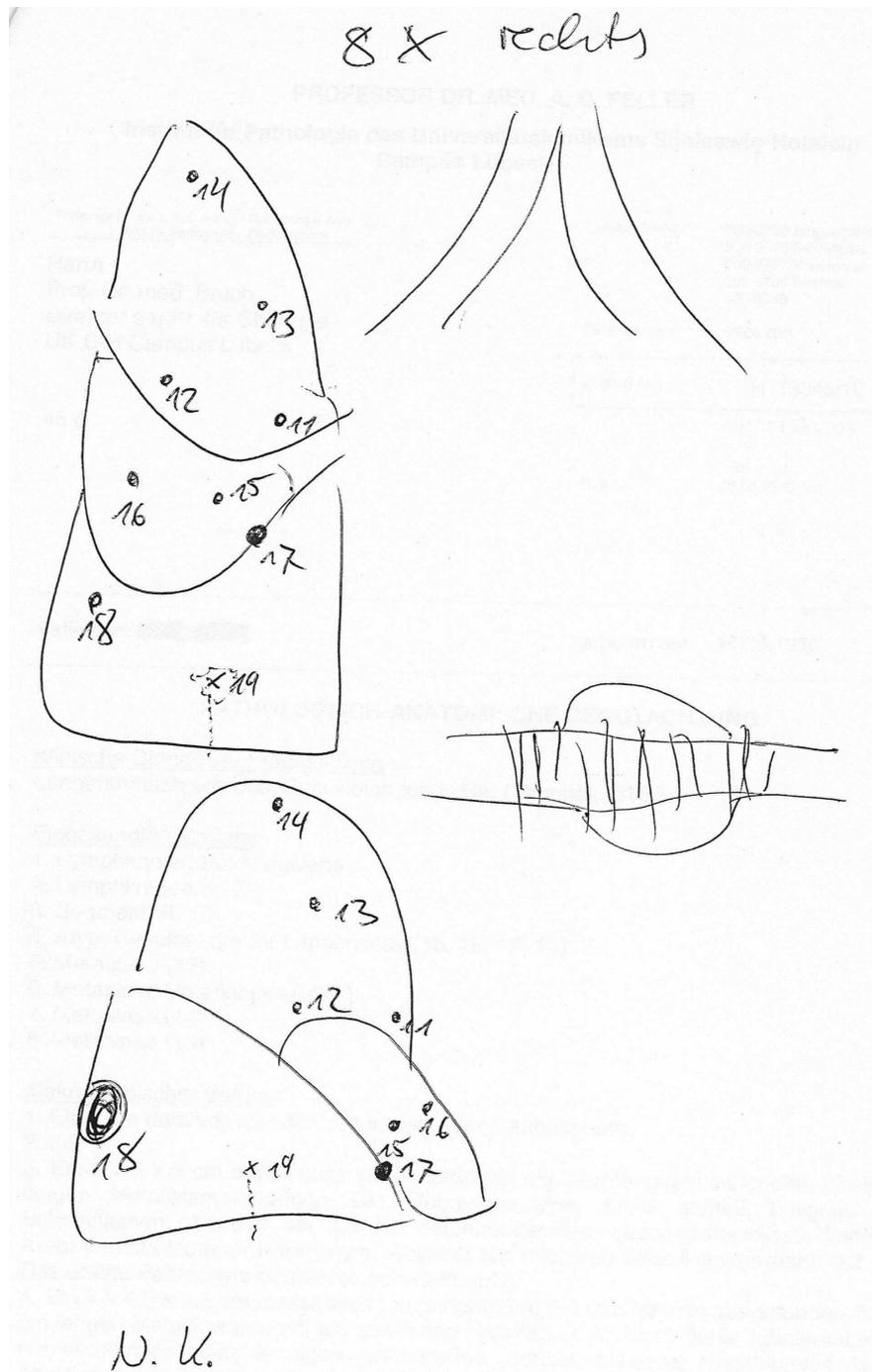


Abbildung A.3.: Vom Thoraxchirurgen präoperativ angefertigte Skizze. Zu sehen sind die drei Lungenlappen der rechten Lunge. Die Nummern kennzeichnen die Positionen der Läsionen von Patient HL-NK-Me.

A.2 Radiologischer Befund: Patient HL-LH-Me



UK-SH Campus Lübeck, Klinik f. Radiologie und Nuklearmedizin
Ratzeburger Allee 160, 23538 Lübeck

Klinik f. Chirurgie
45C - Chirurgie
im Hause

UNIVERSITÄTSKLINIKUM Schleswig-Holstein

Campus Lübeck
Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin
Direktor: Univ. Prof. Dr. med. Jörg Barkhausen
Telefon 0451 500-2129
Fax 0451 500-6497
Email joerg.barkhausen@uk-sh.de
Zentrale Anmeldung 0451 500-6452
Brustzentrum 0451 500-5275
Ltd. Oberarzt PD Dr. med. P. Hunold
Telefon 0451 500-6552
Sektionsleiterin NukMed PD Dr. med. I. Buchmann
Telefon 0451 500-6667
Fax 0451 500-6668
Schilddrüsenambulanz 0451 500-6669

Datum: 29.06.2009

	Pat: HL_LH_Me	Fall-Nr.: XXXXXXXXXX
--	---------------	--

Klinische Angaben Lungenmetastasen UL li bei Coecum Ca
Fragestellung Bitte präop. Dünnschicht CT (1 mm) an Fr. Haude, CD an Dr. Limmer
06-1732. Studien CTA

CT CTA Pulmonalis, mit i.v. KM, durchgeführt am 29.06.2009 um 14:21

Befund

Voruntersuchung vom 14.05.2009 zum Vergleich - CT zur Punktion, nativ.

Unveränderte emphysematöse Lungengerüstveränderungen und 4 Lungenrundherde des linken Unterlappens, die gering größenprogredient sind (exemplarisch Bild 6/52: 3,9 x 3,2 cm, 2,0 x 1,5 cm, Bild 6/50: 1,6 x 1,7 cm bzw. 1,0 x 0,8 cm). Nicht miterfasster Lungenrundherd links im Unterlappen (Bild 6/57: 0,9 x 0,8 cm, zentral). Unveränderte subpleurale Auflagerungen bipulmonal. Keine weiteren metastasensuspekten Veränderung der Lunge. Unveränderter kleiner Lungenrundherd im rechten Oberlappen lateral.
Mediastinum normal breit und mittelständig. Vereinzelt kleine links-hiläre Lymphknoten bis 8 mm und kleine mediastinale Lymphknoten: Präaortal 10 mm (Bild 7/191 links) und 13 mm (Bild 7/192 rechts). Unverändert mit 28x13 mm großer Lymphknoten infrakarinal. Unauffällige Darstellung der großen intrathorakalen sowie der mit dargestellten supraaortalen Gefäße.
Keine metastasensuspekten Osteolysen oder Osteodestruktionen. Degenerative Veränderungen der Wirbelsäule, besonders im thorako-lumbalen Übergang. Thoraxweichteile regelrecht dargestellt. Miterfasste Oberbauchorgane unauffällig.

Beurteilung

Gering größenprogrediente pulmonale Raumforderungen linksseitig.
Neu erfasster Lungenrundherd im linken Unterlappen. Kleiner Lungenrundherd rechts im Oberlappen unverändert, hier ist eine Metastase ebenfalls möglich.
Dringender V.a. mediastinale Lymphknoten-Metastasen.

PD Dr. med. Peter Hunold
Ltd. Oberarzt

Martina Paetzel
Assistenzärztin

Dieser Befund wurde elektronisch validiert und bedarf keiner Unterschrift

Abbildung A.4.: Radiologischer Befund (Patient HL-LH-Me).

B

**Fraunhofer MEVIS
Anforderungsbogen:
Thoraxchirurgie-Planung**

Thoraxchirurgie-Planung Anforderungsbogen 3D-Analyse Lungen-CTs	Fraunhofer MEVIS
---	----------------------------

1. Kontakt	
Klinik: Universitätsklinikum Lübeck	
Ansprechpartner: Dr. Stefan Limmer	Telefon: 0451 500-6071
e-mail: Stefan.Limmer@uk-sh.de	

2. CT / Patient	
Patienten-Id: ██████████	Datum CT-Aufnahme: 29.06.09

3. Diagnose					
<input type="checkbox"/> Bronchialkarzinom		<input type="checkbox"/> rechte Lunge		<input type="checkbox"/> linke Lunge	
	<input type="checkbox"/> zentral	<input type="checkbox"/> R. Oberlappen	Anz.:	<input type="checkbox"/> L. Oberlappen	Anz.:
	<input type="checkbox"/> peripher	<input type="checkbox"/> R. Mittellappen	Anz.:	<input type="checkbox"/> L. Unterlappen	Anz.:
		<input type="checkbox"/> R. Unterlappen	Anz.:		
<input type="checkbox"/> Metastase(n)		<input type="checkbox"/> rechte Lunge		<input type="checkbox"/> linke Lunge	
	<input type="checkbox"/> zentral	<input type="checkbox"/> R. Oberlappen	Anz.:	<input type="checkbox"/> L. Oberlappen	Anz.:
	<input type="checkbox"/> peripher	<input type="checkbox"/> R. Mittellappen	Anz.:	<input checked="" type="checkbox"/> L. Unterlappen	Anz.: 4
		<input type="checkbox"/> R. Unterlappen	Anz.:		
<input type="checkbox"/> Rundherd(e)		<input type="checkbox"/> rechte Lunge		<input type="checkbox"/> linke Lunge	
	<input type="checkbox"/> zentral	<input type="checkbox"/> R. Oberlappen	Anz.:	<input type="checkbox"/> L. Oberlappen	Anz.:
	<input type="checkbox"/> peripher	<input type="checkbox"/> R. Mittellappen	Anz.:	<input type="checkbox"/> L. Unterlappen	Anz.:
		<input type="checkbox"/> R. Unterlappen	Anz.:		
<input type="checkbox"/> Emphysem		<input checked="" type="checkbox"/> rechte Lunge		<input checked="" type="checkbox"/> linke Lunge	
		<input type="checkbox"/> R. Oberlappen		<input type="checkbox"/> L. Oberlappen	
		<input type="checkbox"/> R. Mittellappen		<input type="checkbox"/> L. Unterlappen	
		<input type="checkbox"/> R. Unterlappen			
<input type="checkbox"/> Atelektase		<input type="checkbox"/> rechte Lunge		<input type="checkbox"/> linke Lunge	
		<input type="checkbox"/> R. Oberlappen		<input type="checkbox"/> L. Oberlappen	
		<input type="checkbox"/> R. Mittellappen		<input type="checkbox"/> L. Unterlappen	
		<input type="checkbox"/> R. Unterlappen			
<input type="checkbox"/> Erguss		<input type="checkbox"/> rechte Lunge		<input type="checkbox"/> linke Lunge	
		<input type="checkbox"/> R. Oberlappen		<input type="checkbox"/> L. Oberlappen	
		<input type="checkbox"/> R. Mittellappen		<input type="checkbox"/> L. Unterlappen	
		<input type="checkbox"/> R. Unterlappen			
<input type="checkbox"/> Sonstiges					

Abbildung B.1.: Anforderungsbogen für 3D-Analysen eines Lungen-CTs, Seite 1.

4. Gewünschte CT-Analyse / 3D-Darstellung:		
<input type="checkbox"/> Lappen		
<input checked="" type="checkbox"/> Bronchialbaum	<input type="checkbox"/> bis Segmentebene	<input checked="" type="checkbox"/> bis Peripherie
<input type="checkbox"/> Pulmonalarterie	<input type="checkbox"/> bis Segmentebene	<input checked="" type="checkbox"/> bis Peripherie
<input type="checkbox"/> Pulmonalvene	<input type="checkbox"/> bis Segmentebene	<input checked="" type="checkbox"/> bis Peripherie
<input checked="" type="checkbox"/> Tumor in	<input type="checkbox"/> rechte Lunge	<input type="checkbox"/> linke Lunge
	<input type="checkbox"/> R. Oberlappen	<input type="checkbox"/> L. Oberlappen
	<input type="checkbox"/> R. Mittellappen	<input checked="" type="checkbox"/> L. Unterlappen
	<input type="checkbox"/> R. Unterlappen	
<input checked="" type="checkbox"/> mediastinale Lymphknoten		
<input type="checkbox"/> Lagebeziehung	Tumor zu	
	<input type="checkbox"/> Bronchialbaum	
	<input type="checkbox"/> Pulmonalarterie	
	<input type="checkbox"/> Pulmonalvene	
	<input type="checkbox"/> Sonstiges:	
<input checked="" type="checkbox"/> Parenchym-Quantifizierung	<input checked="" type="checkbox"/> Volumina	<input checked="" type="checkbox"/> Lungen
		<input checked="" type="checkbox"/> Lappen
	<input type="checkbox"/> Emphysemverteilung	<input type="checkbox"/> Lungen
		<input type="checkbox"/> Lappen
	<input type="checkbox"/> Sonstiges:	
<input type="checkbox"/> Sonstiges:		

5. Bemerkungen
Bitte SPECT Fusion, Daten anbei. Dr. Dicken informiert. Mit freundlichen Grüßen S. Limmer

6. VON FRAUNHOFER MEVIS AUSZUFÜLLEN:		
Patienten-Name (anonymisiert):		
Abgelegt:	Ort:	Datum:
Bearbeitet von:		
Eingang von Klinik (Datum):		
Bemerkungen:		

Abbildung B.2.: Anforderungsbogen für 3D-Analysen eines Lungen-CTs, Seite 2.

C

Fragebogen zum Visualisierungskonzept

C.1 Fragebogen: Proband A (Viszeralchirurg)

Fragebogen: Visualisierung von Lungentumoren

(I.) Lungenlappen-Visualisierung

1. Wie schätzen Sie allgemein die Qualität der Lungenlappen-Visualisierung ein?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
2. Wie gut sind die Lungenlappen farblich differenzierbar?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
3. Hilft die Silhouetten-Darstellung bei der visuellen Unterscheidung der Lungenlappen?
 Ja Nein
4. Möchten Sie den Transparenzgrad der Lungenlappen manuell beeinflussen können (z.B. mit dem Schieberegler) oder sollte ein standardmäßiger Transparenzgrad für die Lungenlappen eingestellt sein und wenn ja, welcher?
 Ja, manuelle Auswahl Nein, Standard-Transparenzwert: (Wert zw. 0.0 und 1.0)

(II.) Bronchien-Visualisierung

1. Wie bewerten Sie allgemein die Qualität der Bronchien-Darstellung?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
2. Wie schätzen Sie den Detailgrad der Bronchien ein?
 Zu detailliert Ausreichend Könnte detaillierter sein
3. Gefällt Ihnen die Farbwahl der Bronchien (hell-grau)? Wenn nicht, welche Farbe sollten Ihrer Meinung nach die Bronchien haben?
 Ja, Farbwahl in Ordnung Nein, Farbwunsch: (Bitte eine Farbe angeben)
4. Zuordnung der Bronchien zu den Lungenlappen: Sollten die Bronchien dieselbe Farbe haben, wie der jeweilige Lungenlappen, in dem sie verlaufen?
 Ja Nein

(III.) Blutgefäße-Visualisierung

1. Wie gut ist die Segmentierungs-/Visualisierungsqualität der Blutgefäße?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht

Seite 1/4

Abbildung C.1.: Fragebogen Proband A, Seite 1.

2. Welcher Blutgefäße-Modus ist für die OP-Planung am besten geeignet?
- Ohne Blutgefäße Blutgefäße > 3 mm Blutgefäße auch peripher
3. Möchten Sie zwischen den 3 Abstufungen auswählen können? (Kreuzen Sie „Nein“ an, wenn standardmäßig ein Modus ausgewählt sein soll und geben Sie an, welcher es sein soll.)
- Ja
 Nein, Standardmodus: Ohne Blutgefäße Blutgefäße > 3 mm Blutgefäße auch peripher
4. Wie wichtig sind die mediastinalen Blutgefäße für die OP-Planung? *Je nach Lage des Tumors*
- Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig
5. Wie wichtig ist die Unterscheidung zwischen arteriellen und venösen Blutgefäßen für die OP-Planung?
- Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

(IV.) Tumor-Visualisierung

Tumor-Form:

1. Welche Tumor-Darstellung ist für die OP-Planung gut geeignet? (Mehrere Antworten möglich)

Nur Tumor Nur Kugel Tumor & Kugel

Bitte begründen Sie Ihre Antwort:

*Kugel: „große Lage“ (Lappenzugehörigkeit)
 Tumor: bei zentraler Lage → Beziehung zu Gefäß/Bronchien*

2. Welcher Modus ist am besten geeignet und sollte standardmäßig aktiviert sein?
- Nur Tumor Nur Kugel Tumor & Kugel
3. Wie wichtig ist es Ihnen, bei der OP-Planung zwischen den 3 Möglichkeiten („Nur Tumor“, „Nur Kugel“, „Tumor & Kugel“) per Klick wechseln zu können?
- Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig
- bei zentralen Tumoren*

Tumor-Farbe:

1. Wie wichtig ist es Ihnen, zwischen den 2 Tumor-Farb-Modi („Wie Lappenfarbe / Lappenkomplementärfarbe“, „Größenveränderung“) wechseln zu können?
- Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

Abbildung C.2.: Fragebogen Proband A, Seite 2.

2. Welcher Modus ist am besten geeignet, um auf einen Blick erkennen zu können, wieviel Tumoren sich in einem bestimmten Lungenlappen befinden?

Tumorfarbe: Wie Lappenfarbe Tumorfarbe: Lappen-Komplementärfarbe

3. Wie verständlich ist der Modus „Größenveränderung“ (Für Tumorverlaufskontrolle; Rot: *Tumor stark gewachsen*, Gelb: *Tumor etwas gewachsen*, Grün: *Tumor geschrumpft*)?

Sehr verständlich Verständlich Mittelmäßig Wenig verständlich Unverständlich

4. Standardmäßig sind die Lungenlappen durch eindeutige Farbabstufungen differenzierbar. Welche Lappenfarbe soll im aktivierten Tumor-Farbmodus „Größenveränderung“ gewählt werden?

Keine Änderung: Lappenfarbe bleibt bestehen
 Alle Lappen bekommen die selbe Farbe (z.B. ein schwach gesättigtes Orange)

Tumor-Daten:

1. Wie wichtig ist es Ihnen, selektiv quantitative Daten eines Tumors einzublenden (z.B. bei Klick auf einen Tumor wird dessen Durchmesser/Volumen angezeigt)?

Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

2. Sind die Angaben eines ausgewählten Tumors ausreichend (Nummer, Position, Durchmesser, Volumen)? Wenn „Nein“, welche weiteren Angaben wären hilfreich?

Ja Nein, weitere nützliche Daten:

3. Wie gefällt Ihnen die tabellarische Auflistung dieser quantitativen Daten?

Sehr gut Gut Mittelmäßig Nicht gut Überhaupt nicht gut

4. Wie gut fänden Sie es, wenn einige dieser Daten (z.B. Läsion-Nummer) direkt in der 3D-Darstellung neben dem Tumor sichtbar wären? Wenn ja, welche Daten sollten in der 3D-Visualisierung angezeigt werden?

Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht *Zu komplexe Visualisierung*

In der 3D-Szene sichtbare Daten:

(V.) Sichtrichtungen

1. Wie wichtig ist es Ihnen, selektiv nur einzelne Lungenlappen anzuzeigen?

Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

2. Wie wichtig ist es Ihnen, aus mehreren vordefinierten Sichtrichtungen (Frontal, Lateral Links, ...) auswählen zu können?

Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

Seite 3/4

Abbildung C.3.: Fragebogen Proband A, Seite 3.

3. Welche Methode gefällt Ihnen am besten, um in der 3D-Darstellung eine optimale Sichtrichtung auszuwählen? (Mehrere Antwortmöglichkeiten)

- „Ziehen“ der 3D-Darstellung mit der Maus
 Auswahl einer vordefinierten Sichtrichtung (Z.B. „Lateral Links“)
 Horizontales und vertikales rotieren mit der Tastatur
 (Z.B. über die Pfeiltasten: 1x Klick auf „Pfeil-nach-links-Taste“ dreht die Ansicht um 30° nach links um die Y-Achse)

(VI.) Allgemeines

1. Wie wichtig sind Ihnen 2D(!)-Darstellungen der Tumoren für die OP-Planung? (Z.B. in Form von ausgewählten Screenshots der CT-Schichtbilder)

- Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

2. Wie einfach ist die Orientierung in der 3D-Darstellung?

- Sehr einfach Einfach Mittelmäßig Schwer Sehr schwer

3. Wie wichtig wäre Ihnen ein Orientierungsmodell (Z.B. „Mensch-Figur“ oder „Sichtrichtungen-Würfel“) zur Unterstützung der Orientierung?

- Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

Wenn ja, welches Orientierungsmodell würden Sie bevorzugen?

- Mensch-Figur  Sichtrichtungen-Würfel 

4. Welche weiteren Anmerkungen, Hinweise, Vorschläge haben Sie?

Abbildung C.4.: Fragebogen Proband A, Seite 4.

C.2 Fragebogen: Proband B (Thoraxchirurg)

Fragebogen: Visualisierung von Lungentumoren

(I.) Lungenlappen-Visualisierung

1. Wie schätzen Sie allgemein die Qualität der Lungenlappen-Visualisierung ein?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
2. Wie gut sind die Lungenlappen farblich differenzierbar?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
3. Hilft die Silhouetten-Darstellung bei der visuellen Unterscheidung der Lungenlappen?
 Ja Nein
4. Möchten Sie den Transparenzgrad der Lungenlappen manuell beeinflussen können (z.B. mit dem Schieberegler) oder sollte ein standardmäßiger Transparenzgrad für die Lungenlappen eingestellt sein und wenn ja, welcher?
 Ja, manuelle Auswahl Nein, Standard-Transparenzwert: (Wert zw. 0.0 und 1.0)

(II.) Bronchien-Visualisierung

1. Wie bewerten Sie allgemein die Qualität der Bronchien-Darstellung?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
2. Wie schätzen Sie den Detailgrad der Bronchien ein?
 Zu detailliert Ausreichend Könnte detaillierter sein
3. Gefällt Ihnen die Farbwahl der Bronchien (hell-grau)? Wenn nicht, welche Farbe sollten Ihrer Meinung nach die Bronchien haben?
 Ja, Farbwahl in Ordnung Nein, Farbwunsch: (Bitte eine Farbe eintragen)
4. Zuordnung der Bronchien zu den Lungenlappen: Sollten die Bronchien dieselbe Farbe haben, wie der jeweilige Lungenlappen, in dem sie verlaufen?
 Ja Nein

(III.) Blutgefäße-Visualisierung

1. Wie gut ist die Segmentierungs-/Visualisierungsqualität der Blutgefäße?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht

Seite 1/4

Abbildung C.5.: Fragebogen Proband B, Seite 1.

2. Welcher Blutgefäße-Modus ist für die OP-Planung am besten geeignet?
 Ohne Blutgefäße Blutgefäße > 3 mm Blutgefäße auch peripher
3. Möchten Sie zwischen den 3 Abstufungen auswählen können? (Kreuzen Sie „Nein“ an, wenn standardmäßig ein Modus ausgewählt sein soll und geben Sie an, welcher es sein soll.)
 Ja
 Nein, Standardmodus: Ohne Blutgefäße Blutgefäße > 3 mm Blutgefäße auch peripher
Wechselmodus sehr wichtig, v.a. bei differenzierter Betrachtung der Peripherie
4. Wie wichtig sind die mediastinalen Blutgefäße für die OP-Planung?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig
5. Wie wichtig ist die Unterscheidung zwischen arteriellen und venösen Blutgefäßen für die OP-Planung?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

(IV.) Tumor-Visualisierung

Tumor-Form:

1. Welche Tumor-Darstellung ist für die OP-Planung gut geeignet? (Mehrere Antworten möglich)
 Nur Tumor Nur Kugel Tumor & Kugel
 Bitte begründen Sie Ihre Antwort:

Überprüfung von Form und Struktur im Rahmen der intraoperativen digitalen Manöver
2. Welcher Modus ist am besten geeignet und sollte standardmäßig aktiviert sein?
 Nur Tumor Nur Kugel Tumor & Kugel
3. Wie wichtig ist es Ihnen, bei der OP-Planung zwischen den 3 Möglichkeiten („Nur Tumor“, „Nur Kugel“, „Tumor & Kugel“) per Klick wechseln zu können?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

Tumor-Farbe:

1. Wie wichtig ist es Ihnen, zwischen den 2 Tumor-Farb-Modi („Wie Lappenfarbe / Lappenkomplementärfarbe“, „Größenveränderung“) wechseln zu können?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

2. Welcher Modus ist am besten geeignet, um auf einen Blick erkennen zu können, wieviel Tumoren sich in einem bestimmten Lungenlappen befinden?
 Tumorfarbe: Wie Lappenfarbe Tumorfarbe: Lappen-Komplementärfarbe

3. Wie verständlich ist der Modus „Größenveränderung“ (Für Tumorverlaufskontrolle; Rot: *Tumor stark gewachsen*, Gelb: *Tumor etwas gewachsen*, Grün: *Tumor geschrumpft*)?
 Sehr verständlich Verständlich Mittelmäßig Wenig verständlich Unverständlich

4. Standardmäßig sind die Lungenlappen durch eindeutige Farbabstufungen differenzierbar. Welche Lappenfarbe soll im aktivierten Tumor-Farbmodus „Größenveränderung“ gewählt werden?
 Keine Änderung: Lappenfarbe bleibt bestehen
 Alle Lappen bekommen die selbe Farbe (z.B. ein schwach gesättigtes Orange)

Tumor-Daten:

1. Wie wichtig ist es Ihnen, selektiv quantitative Daten eines Tumors einzublenden (z.B. bei Klick auf einen Tumor wird dessen Durchmesser/Volumen angezeigt)?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

2. Sind die Angaben eines ausgewählten Tumors ausreichend (Nummer, Position, Durchmesser, Volumen)? Wenn „Nein“, welche weiteren Angaben wären hilfreich?
 Ja Nein, weitere nützliche Daten:

3. Wie gefällt Ihnen die tabellarische Auflistung dieser quantitativen Daten?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Nicht gut Überhaupt nicht gut

4. Wie gut fänden Sie es, wenn einige dieser Daten (z.B. Läsion-Nummer) direkt in der 3D-Darstellung neben dem Tumor sichtbar wären? Welche Daten sollten in der 3D-Visualisierung angezeigt werden?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Nicht gut Überhaupt nicht gut
 In der 3D-Szene sichtbare Daten:

(V.) Sichtrichtungen

1. Wie wichtig ist es Ihnen, selektiv nur einzelne Lungenlappen anzuzeigen?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig
Extrem wichtig!

2. Wie wichtig ist es Ihnen, aus mehreren vordefinierten Sichtrichtungen (Frontal, Lateral Links, ...) auswählen zu können?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

Abbildung C.7.: Fragebogen Proband B, Seite 3.

3. Welche Methode gefällt Ihnen am besten, um in der 3D-Darstellung eine optimale Sichtrichtung auszuwählen? (Mehrere Antwortmöglichkeiten)

- „Ziehen“ der 3D-Darstellung mit der Maus
 Auswahl einer vordefinierten Sichtrichtung (z.B. "Lateral Links")
 Horizontales und vertikales rotieren mit der Tastatur (Rotation auf X-Y-Achse beschränkt)

(Z.B. über die Pfeiltasten: 1x Klick auf „Pfeil-nach-links-Taste“ dreht die Ansicht um 30° nach links um die Y-Achse)

(VI.) Allgemeines

1. Wie wichtig sind Ihnen 2D(!)-Darstellungen der Tumoren für die OP-Planung? (Z.B. in Form von ausgewählten Screenshots der CT-Schichtbilder oder in Form von Videos, die vor- und zurückgespult werden können.)
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig
2. Wie einfach ist die Orientierung in der 3D-Darstellung?
 Sehr einfach Einfach Mittelmäßig Schwer Sehr schwer
3. Wie wichtig wäre Ihnen ein Orientierungsmodell (Z.B. „Mensch-Figur“ oder „Sichtrichtungen-Würfel“) zur Unterstützung der Orientierung?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig
4. Welches Orientierungsmodell würden Sie bevorzugen?



- Mensch-Figur Sichtrichtungen-Würfel Keins der beiden

5. Wie einfach / intuitiv finden Sie die Interaktion mit der 3D-Visualisierung?
 Sehr einfach Einfach Mittelmäßig Schwer Sehr schwer
6. Welche weiteren Anmerkungen, Hinweise, Vorschläge haben Sie?

C.3 Fragebogen: Proband C (Radiologe)

Fragebogen: Visualisierung von Lungentumoren

(I.) Lungenlappen-Visualisierung

1. Wie schätzen Sie allgemein die Qualität der Lungenlappen-Visualisierung ein?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
2. Wie gut sind die Lungenlappen farblich differenzierbar?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
3. Hilft die Silhouetten-Darstellung bei der visuellen Unterscheidung der Lungenlappen?
 Ja Nein
4. Möchten Sie den Transparenzgrad der Lungenlappen manuell beeinflussen können (z.B. mit dem Schieberegler) oder sollte ein standardmäßiger Transparenzgrad für die Lungenlappen eingestellt sein und wenn ja, welcher?
 Ja, manuelle Auswahl Nein, Standard-Transparenzwert: (Wert zw. 0.0 und 1.0)
↳ Vorgabe gut (0,4)

(II.) Bronchien-Visualisierung

1. Wie bewerten Sie allgemein die Qualität der Bronchien-Darstellung?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
2. Wie schätzen Sie den Detailgrad der Bronchien ein?
 Zu detailliert Ausreichend Könnte detaillierter sein
3. Gefällt Ihnen die Farbwahl der Bronchien (hell-grau)? Wenn nicht, welche Farbe sollten Ihrer Meinung nach die Bronchien haben?
 Ja, Farbwahl in Ordnung Nein, Farbwunsch: (Bitte eine Farbe eintragen)
4. Zuordnung der Bronchien zu den Lungenlappen: Sollten die Bronchien dieselbe Farbe haben, wie der jeweilige Lungenlappen, in dem sie verlaufen?
 Ja Nein

(III.) Blutgefäße-Visualisierung

1. Wie gut ist die Segmentierungs-/Visualisierungsqualität der Blutgefäße?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Schlecht Sehr schlecht
(ausreichend)

Abbildung C.9.: Fragebogen Proband C, Seite 1.

2. Welcher Blutgefäße-Modus ist für die OP-Planung am besten geeignet?
 Ohne Blutgefäße Blutgefäße > 3 mm Blutgefäße auch peripher
3. Möchten Sie zwischen den 3 Abstufungen auswählen können? (Kreuzen Sie „Nein“ an, wenn standardmäßig ein Modus ausgewählt sein soll und geben Sie an, welcher es sein soll.)
 Ja
 Nein, Standardmodus: Ohne Blutgefäße Blutgefäße > 3 mm Blutgefäße auch peripher
4. Wie wichtig sind die ^(hilflos) mediastinalen Blutgefäße für die OP-Planung?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig
5. Wie wichtig ist die Unterscheidung zwischen arteriellen und venösen Blutgefäßen für die OP-Planung?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig
(aber, kein Ausprägungswert)

(IV.) Tumor-Visualisierung

Tumor-Form:

1. Welche Tumor-Darstellung ist für die OP-Planung gut geeignet? (Mehrere Antworten möglich)

Nur Tumor Nur Kugel Tumor & Kugel

Bitte begründen Sie Ihre Antwort:

*nur Kugel: man übersieht kleinere Läsionen nicht
 " Tu = Wichtigkeits-wert*

2. Welcher Modus ist am besten geeignet und sollte standardmäßig aktiviert sein?

Nur Tumor Nur Kugel Tumor & Kugel

wird = default

(Kugeldarstellung ist besser)

3. Wie wichtig ist es Ihnen, bei der OP-Planung zwischen den 3 Möglichkeiten („Nur Tumor“, „Nur Kugel“, „Tumor & Kugel“) per Klick wechseln zu können?

Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

Tumor-Farbe:

1. Wie wichtig ist es Ihnen, zwischen den 2 Tumor-Farb-Modi („Wie Lappenfarbe / Lappenkomplementärfarbe“, „Größenveränderung“) wechseln zu können?

Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

*- Komp.-Farbe - weg
 - Größenver. wichtig*

Abbildung C.10.: Fragebogen Proband C, Seite 2.

2. Welcher Modus ist am besten geeignet, um auf einen Blick erkennen zu können, wieviel Tumoren sich in einem bestimmten Lungenlappen befinden?
 Tumorfarbe: Wie Lappenfarbe Tumorfarbe: Lappen-Komplementärfarbe

3. Wie verständlich ist der Modus „Größenveränderung“ (Für Tumorverlaufskontrolle; Rot: Tumor stark gewachsen, Gelb: Tumor etwas gewachsen, Grün: Tumor geschrumpft)?
 Sehr verständlich Verständlich Mittelmäßig Wenig verständlich Unverständlich

4. Standardmäßig sind die Lungenlappen durch eindeutige Farbabstufungen differenzierbar. Welche Lappenfarbe soll im aktivierten Tumor-Farbmodus „Größenveränderung“ gewählt werden?
 Keine Änderung: Lappenfarbe bleibt bestehen
 Alle Lappen bekommen die selbe Farbe (z.B. ein schwach gesättigtes Orange)
(etw. bläulich interpretiert weniger?)

Tumor-Daten:

1. Wie wichtig ist es Ihnen, selektiv quantitative Daten eines Tumors einzublenden (z.B. bei Klick auf einen Tumor wird dessen Durchmesser/Volumen angezeigt)?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

2. Sind die Angaben eines ausgewählten Tumors ausreichend (Nummer, Position, Durchmesser, Volumen)? Wenn „Nein“, welche weiteren Angaben wären hilfreich?
 Ja Nein, weitere nützliche Daten:

3. Wie gefällt Ihnen die tabellarische Auflistung dieser quantitativen Daten?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Nicht gut Überhaupt nicht gut

4. Wie gut fänden Sie es, wenn einige dieser Daten (z.B. Läsion-Nummer) direkt in der 3D-Darstellung neben dem Tumor sichtbar wären? Welche Daten sollten in der 3D-Visualisierung angezeigt werden?
 Sehr gut Gut Mittelmäßig Nicht gut Überhaupt nicht gut
 In der 3D-Szene sichtbare Daten:

(V.) Sichtrichtungen

1. Wie wichtig ist es Ihnen, selektiv nur einzelne Lungenlappen anzuzeigen?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

2. Wie wichtig ist es Ihnen, aus mehreren vordefinierten Sichtrichtungen (Frontal, Lateral Links, ...) auswählen zu können?
 Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

Abbildung C.11.: Fragebogen Proband C, Seite 3.

3. Welche Methode gefällt Ihnen am besten, um in der 3D-Darstellung eine optimale Sichtrichtung auszuwählen? (Mehrere Antwortmöglichkeiten)

ganz klar:

- „Ziehen“ der 3D-Darstellung mit der Maus
 Auswahl einer vordefinierten Sichtrichtung (z.B. "Lateral Links")
 Horizontales und vertikales rotieren mit der Tastatur (Rotation auf X-Y-Achse beschränkt) (*ungenau*)

(Z.B. über die Pfeiltasten: 1x Klick auf „Pfeil-nach-links-Taste“ dreht die Ansicht um 30° nach links um die Y-Achse)

(VI.) Allgemeines

1. Wie wichtig sind Ihnen 2D(!)-Darstellungen der Tumoren für die OP-Planung? (Z.B. in Form von ausgewählten Screenshots der CT-Schichtbilder oder in Form von Videos, die vor- und zurückgespult werden können.)

Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

(z.B. Movie, 3D, 2D, Schnitt)

2. Wie einfach ist die Orientierung in der 3D-Darstellung?

Sehr einfach Einfach Mittelmäßig Schwer Sehr schwer

3. Wie wichtig wäre Ihnen ein Orientierungsmodell (Z.B. „Mensch-Figur“ oder „Sichtrichtungen-Würfel“) zur Unterstützung der Orientierung?

Sehr wichtig Wichtig Weniger wichtig Überhaupt nicht wichtig

4. Welches Orientierungsmodell würden Sie bevorzugen?



Mensch-Figur Sichtrichtungen-Würfel Keins der beiden

5. Wie einfach / intuitiv finden Sie die Interaktion mit der 3D-Visualisierung?

Sehr einfach Einfach Mittelmäßig Schwer Sehr schwer

6. Welche weiteren Anmerkungen, Hinweise, Vorschläge haben Sie?

↳ Drehung 3D: Mausepfl. Blick ↓

Abbildung C.12.: Fragebogen Proband C, Seite 4.

D

Interaktive 3D-Visualisierungen

Auf den folgenden drei Seiten befinden sich die 3D-Rekonstruktionen der Fälle „HL-NK-Me“, „HL-LH-Me“ und „HL-MS-Bc“. Die ersten beiden Fälle sind Lungenmetastasen-Patienten, während beim dritten Fall ein Bronchialkarzinom vorliegt. Die 3D-Modelle sind ausschließlich mit ADOBE ACROBAT oder dem kostenlosen ADOBE READER in einer Version > 9.0 abspielbar.¹

Bedienung der 3D-Modelle

- **Rotation:** Klicken und halten Sie die linke Maustaste gedrückt und bewegen Sie die Maus.
- **Zoom:** Drehen Sie das Mousrad oder klicken und halten Sie die rechte Maustaste gedrückt und bewegen Sie die Maus.
- **Verschieben:** Halten Sie beide Maustasten gedrückt und bewegen Sie die Maus.

¹Adobe Reader Download: <http://get.adobe.com/de/reader>

D.1 Patient HL-NK-Me

(patHLNKMe.u3d)

Abbildung D.1.: Patient HL-NK-Me: Multiple bilaterale Lungenrundherde. Operativer Eingriff: Keil- und Laserresektionen.

D.2 Patient HL-LH-Me

(patHLLHMe.u3d)

Abbildung D.2.: Patient HL-LH-Me: Zwei unklare Rundherde im linken und rechten Oberlappen; fünf Läsionen im linken Unterlappen. Operativer Eingriff: Lobektomie des linken Unterlappens.

D.3 Patient HL-MS-Bc

(patHLMSBc.u3d)

Abbildung D.3.: Patient HL-MS-Bc: Ein linksseitig zentral infiltrierendes Bronchialkarzinom und eine Atelektase; Emphysematische Regionen im rechten Oberlappen.