

Gunther Sudra



**Wissensbasierte  
Situationsinterpretation  
für eine kontextbezogene  
Chirurgieassistenz mittels  
Erweiterter Realität**



Scientific  
Publishing



Gunther Sudra

**Wissensbasierte Situationsinterpretation für eine kontext-  
bezogene Chirurgieassistenz mittels Erweiterter Realität**



# **Wissensbasierte Situationsinterpretation für eine kontextbezogene Chirurgie- assistenz mittels Erweiterter Realität**

von  
Gunther Sudra

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie  
Fakultät für Informatik,  
Tag der mündlichen Prüfung: 15.04.2010

## Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales  
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz  
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2010  
Print on Demand

ISBN 978-3-86644-552-9







# **Wissensbasierte Situationsinterpretation für eine kontextbezogene Chirurgieassistentz mittels Erweiterter Realität**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

der Fakultät für Informatik

des Karlsruher Instituts für Technologie

genehmigte

**Dissertation**

von

**Gunther Sudra**

aus Esslingen am Neckar

Tag der mündlichen Prüfung: 15.04.2010

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Georg Eggers



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anthropomatik des Karlsruher Instituts für Technologie. Bedanken möchte ich mich bei den Personen, die mich auf dem Weg zur Promotion begleitet und unterstützt haben.

Meinem Doktorvater, Prof. Rüdiger Dillmann, danke ich für das in mich gesetzte Vertrauen, für seine fachlichen Anregungen sowie für die gewährten wissenschaftlichen Freiheiten. Ebenso bedanken möchte ich mich bei Prof. Georg Eggers von der Universitätsklinik Heidelberg für die Übernahme des Korreferats und die langjährige Kooperation. Des Weiteren gebührt mein Dank Prof. Wilfried Juling und Prof. Jörn Müller-Quade für die Mitwirkung als Prüfer im Rahmen meiner Doktorprüfung.

Mein herzlicher Dank gilt all meinen jetzigen und ehemaligen Kollegen. Steffi für die langjährige Zimmergemeinschaft, die Kaffeepausen, die Musikauswahl, die unzähligen Demos ohne Hasenkostüm und vor allem für ihre Unterstützung in allen Belangen. Darko für seinen fachlichen Rat und seine Begeisterungsfähigkeit. Sebastian S. für seine Verdienste an *MediAssist* und seine pragmatische Sicht der Dinge. Sascha und Roland für ihre Starthilfe. Roland zusätzlich für die Aufrechterhaltung der Kleiderordnung. Dominik für den Teamgeist beim gemeinschaftlichen Projekt der Vorlesungserneuerung. Michael D. für seine Hilfsbereitschaft und so manchen trockenen Spruch. Dilana für die zeitweilige Bereicherung unserer Zimmergemeinschaft. Stefan S. und Sebastian R. für die konsequente Weiterführung von *MediAssist*. Yoo-Jin für die Organisation kultureller Abendveranstaltungen. Stefan U. für seinen maßgeblichen Beitrag zum Gelingen der ersten OP-Versuche. Kronprinz Alex K. für die Übernahme des Minolta-Erbes und der damit verbundenen Konsequenzen. Alex B. und Paul H. für ihren technischen Beistand. Joachim für eine halbsbrecherische Lötaktion. Martin L. und Sven für so manch erheiternde Diskussion. Tilo für die Hilfe beim Bau des Projektors. Tobias S. für seine Ratschläge auf der Fahrt nach Dreieich. Björn für die anfängliche Zeit im gemeinsamen Büro und die Endzeitkrebse. Besonderen Dank schulde ich auch den Damen des Sekretariats. Isa, Christine, Diana, Nela und Bea waren durch ihre stete Hilfsbereitschaft und ihre Organisationskünste eine unschätzbar große Hilfe. Allen anderen jetzigen und ehemaligen Kollegen gilt ebenfalls mein größter Dank. Dies sind Ashraf, David, Julian, Kai, Marcus S., Markus P., Martin D., Michael P., Niko, Oliver B., Oliver T., Ömer, Paul R., Pedram, Peter, Rainer, Raoul, Regine, Sebastian B., Stefan G., Stefan V., Steffen, Steven, Tamim, Tobias G. und Thomas.

Ebenso herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen externen Kooperationspartnern. Prof. Georg Eggers und Prof. Rüdiger Marmulla für die Förderung meiner Arbeit und die Kooperation bei den gemeinsamen Forschungsprojekten. Dr. Gregor

Castrillón-Oberndorfer für seine wertvolle Unterstützung und die Nachtschichten im Versuchs-OP. Dr. Beat Müller-Stich für zahlreiche Diskussionen und den Einblick in den Alltag eines Viszeralchirurgen. Dr. Lüder Kahrs für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und den Roadtrip durch Kalifornien. Dr. Oliver Burgert und Dr. Thomas Neumuth für die freundschaftliche Begleitung meiner Arbeit. Ferner danke ich Herrn Buddrus-Breil (Fa. Camlog), Herrn Haller (Fa. Richard Wolf), Herrn Machui (Fa. Trivisio), Frau Neugebauer (Fa. Astratech) und Herrn Wessel (Fa. Racer Systems) für ihre Unterstützung.

Mein herzlicher Dank gilt ebenfalls all meinen Studenten, die mich im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten sowie als Hilfwissenschaftler unterstützt haben. Ich danke Ghizlane Al-Makadsi, Nicolas Dürr, Florian Eisenberg, Peter Leidinger, Bryan Matzel, Sebastian Pfeiffer und Alexander Seitel. Besondere Lorbeeren haben sich Johannes Ahlmann, Anne Becker, Michael Braun, Daniel (Nils) Koester, Stephan Platzek und Daniel Weber verdient. Für ihr unermüdliches Engagement weit über das übliche Maß hinaus danke ich vor allem den „Wächtern des heiligen Grals“: Maximilian Drentschew, Christian Godenschwager, Darko Katic, Sebastian Schalck und Stefan Ulbrich.

Weiterhin möchte ich mich bei Christiane, Micha, Miriam, René und Thomas für ihren Zuspruch und ihre Unterstützung bedanken. Christiane danke ich außerdem für ihre pragmatischen Ratschläge, sie waren mir oft eine große Hilfe. Vor allem danke ich Micha für seine Freundschaft und seine Loyalität.

Meinen Eltern Ursula und Adolf gilt mein besonderer Dank. Sie haben mich während der gesamten Ausbildungszeit unterstützt und mir Rückhalt gegeben. Das Gleiche gilt für meine Schwester Constanze, die stets ein offenes Ohr für meine Anliegen hat.

Der größte Dank geht an meine Frau Angelina. Nur durch ihre bedingungslose Unterstützung konnte diese Arbeit entstehen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Fragestellung . . . . .	2
1.3 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	4
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>7</b>
2.1 Problemfelder und Diskussionsbedarf . . . . .	7
2.2 Modelle des Operationsablaufs . . . . .	7
2.2.1 Modelle zur Ablaufbeschreibung . . . . .	8
2.2.2 Modelle zur Ablaufplanung . . . . .	12
2.3 Ansätze zur Analyse des Operationsablaufs . . . . .	15
2.3.1 Analyse dedizierter Eingriffsaspekte . . . . .	15
2.3.2 Analyse von Ablaufbeschreibungen . . . . .	16
2.3.3 Interpretation von Ablaufbeschreibungen . . . . .	17
2.4 Chirurgieassistenz mittels Erweiterter Realität . . . . .	19
2.4.1 Visualisierung von Planungsdaten . . . . .	20
2.4.2 Interaktion bei klinischen Anwendungen . . . . .	23
2.5 Diskussion, Erkenntnisse und Forschungsbedarf . . . . .	24
<b>3 Lösungsansatz für eine kontextbezogene Chirurgieassistenz</b>	<b>27</b>
3.1 Einführung . . . . .	27
3.2 Konzept des wissensbasierten Ansatzes . . . . .	28
3.3 Anwendung des Konzepts in der minimalinvasiven Chirurgie . . . . .	30
3.3.1 Rahmenbedingungen . . . . .	30
3.3.2 Kontextbezogene Assistenz mit <i>MediAssist</i> . . . . .	30
3.4 Anwendung des Konzepts in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie . . . . .	33
3.4.1 Rahmenbedingungen . . . . .	33
3.4.2 Kontextbezogene Assistenz mit <i>Inpres</i> . . . . .	33
3.5 Zusammenfassung . . . . .	35

<b>4</b>	<b>Wissensrepräsentation und Modellbildung</b>	<b>37</b>
4.1	Einführung . . . . .	37
4.2	Anwendungsbeispiel Cholezystektomie . . . . .	38
4.3	Merkmalsanalyse . . . . .	39
4.4	Anforderungen an die Wissensrepräsentation . . . . .	40
4.5	Wahl eines Repräsentationsformalismus . . . . .	42
4.5.1	Analyse existierender Formalismen . . . . .	43
4.5.2	Repräsentation mit einer Beschreibungslogik . . . . .	44
4.6	Entwurf einer Wissensrepräsentation . . . . .	46
4.6.1	Entwicklung einer Applikationsontologie . . . . .	47
4.6.2	Anbindung des <i>Foundational Model of Anatomy</i> . . . . .	53
4.7	Konzept zur Modellbildung . . . . .	56
4.8	Modelle der Operationssituation . . . . .	58
4.8.1	Patientenzustandsmodell . . . . .	58
4.8.2	Handlungsmodell . . . . .	64
4.8.3	Semantisches Situationsmodell . . . . .	65
4.8.4	Geometrisches Situationsmodell . . . . .	65
4.9	Modelle der Operationsplanung . . . . .	67
4.9.1	Ablaufmodell . . . . .	67
4.9.2	Geometrische Objektmodelle . . . . .	68
4.9.3	Planungsmodell . . . . .	69
4.10	Zusammenfassung . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Interpretation der Operationssituation</b>	<b>71</b>
5.1	Einführung . . . . .	71
5.2	Anforderungen an die Situationsinterpretation . . . . .	72
5.3	Konzept der Situationsinterpretation . . . . .	72
5.4	Interpretation durch ein Fallermittlungsnetz . . . . .	74
5.4.1	Netzstruktur und Knotenaktivierung . . . . .	75
5.4.2	Fallermittlungsnetz und Situationsinterpretation . . . . .	77
5.4.3	Ähnlichkeit von Situationsmodell und Referenzmodell . . . . .	79
5.4.4	Hypothese bezüglich des Situationskontexts . . . . .	88
5.5	Interpretation durch generalisierte Modelle . . . . .	89
5.5.1	Beschreibungskonzepte und Funktionen . . . . .	90
5.5.2	Definition eines generalisierten Modells . . . . .	91
5.5.3	Hypothese bezüglich des Situationskontexts . . . . .	94
5.6	Regelbasierte Interpretation . . . . .	95
5.6.1	Definition einer exemplarischen Regelbasis . . . . .	96
5.6.2	Regelauswertung . . . . .	99
5.7	Zusammenfassung . . . . .	99

<b>6</b>	<b>Kontextbezogene Visualisierung und Interaktion</b>	<b>101</b>
6.1	Einführung . . . . .	101
6.2	Kontextbezogene Visualisierung . . . . .	102
6.2.1	Analyse des Unterstützungsbedarfs . . . . .	102
6.2.2	Visualisierung bei der Umsetzung einer Inzision . . . . .	104
6.2.3	Visualisierung beim Setzen von Gefäßclips . . . . .	112
6.2.4	Visualisierung bei Gefahrensituationen . . . . .	113
6.3	Kontextbezogene Interaktion . . . . .	114
6.3.1	Analyse des Interaktionsbedarfs . . . . .	115
6.3.2	Bereitstellung von Interaktionstechniken . . . . .	116
6.3.3	Konzeption von Interaktionskomponenten . . . . .	117
6.4	Zusammenfassung . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Evaluation</b>	<b>125</b>
7.1	Einführung . . . . .	125
7.2	Schlüsselexperimente bei minimalinvasiven Anwendungsszenarien .	126
7.2.1	Schlüsselexperiment zur Situationsinterpretation . . . . .	126
7.2.2	Schlüsselexperiment zur kontextbezogenen Visualisierung .	134
7.2.3	Schlüsselexperiment zur Mensch-Maschine-Interaktion . . .	142
7.3	Evaluation beim Setzen von Dentalimplantaten . . . . .	146
7.3.1	Implantologie in der Zahnheilkunde . . . . .	147
7.3.2	Erweiterungen von <i>Inpres</i> . . . . .	148
7.3.3	Evaluation der Latenz . . . . .	152
7.3.4	Evaluation der Genauigkeit . . . . .	156
7.3.5	Evaluation der Erkennungsrate . . . . .	158
7.4	Zusammenfassung . . . . .	160
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>163</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	163
8.2	Diskussion . . . . .	164
8.3	Ausblick . . . . .	165
<b>A</b>	<b>Operationsablauf der betrachteten Eingriffe</b>	<b>167</b>
A.1	Cholezystektomie . . . . .	167
A.2	Setzen eines Dentalimplantats . . . . .	169
<b>B</b>	<b>Technische Daten der verwendeten Geräte</b>	<b>173</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>177</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>181</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>183</b>





# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

„Chirurgie wird technisch sein oder nicht erfolgreich sein.“ Dieser Satz stammt von Volker Schumpelick, dem Direktor der Chirurgischen Universitätsklinik Aachen, anlässlich der Eröffnung des Kongresses der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie in München im Jahr 2009. Im Hinblick auf die Entwicklung der Medizintechnikbranche in den letzten Jahrzehnten verwundern solche Aussagen nicht. Allein im Jahr 2006 wurden in Deutschland 15 000 medizintechnische Patente angemeldet, der Branchenumsatz belief sich auf 22 Milliarden Euro [Hac09].

Die zunehmende Leistungsfähigkeit von Computersystemen und die damit einhergehende Digitalisierung sämtlicher Daten ermöglichten in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Fortschritte in den Bereichen Bildgebung, Diagnostik, rechnergestützte Planung, Simulation und Chirurgieassistenz. Aufgrund ihres direkten Einsatzes am Patienten und der damit verbundenen Risiken nehmen letztgenannte chirurgische Assistenzsysteme dabei einen besonderen Stellenwert ein. Ein Ziel ist die Unterstützung des Chirurgen bei der Übertragung rechnerbasierter Operationsplanungsdaten auf den Patienten. Systeme dieser Art sind für ausgewählte chirurgische Disziplinen bereits heute kommerziell erhältlich. Erschwert wird die Arbeit des Chirurgen jedoch oftmals durch den ständigen Blickwechsel zwischen Patient und Monitor, auf dem die Daten dargestellt werden. Aus diesem Grund hat sich die Forschung verstärkt mit der Untersuchung von alternativen Methoden zur Visualisierung chirurgischer Planungsdaten beschäftigt. Hierbei entstanden Systeme der Erweiterten Realität<sup>1</sup> (ER), die eine präzise Visualisierung der Planungsdaten direkt im Operationsfeld ermöglichen. Bisherige ER-Systeme besitzen jedoch den Nachteil, dass sie nur bedingt den aktuellen Situationskontext berücksichtigen. Dies bedeutet, dass dem Chirurgen oftmals redundante oder unzureichende Informationen zur Verfügung stehen. Während redundante Informationen zu einer Ablenkung

---

<sup>1</sup>engl.: Augmented Reality.

des Chirurgen führen, erhöhen unzureichende Informationen das Risiko einer Verletzung sensibler anatomischer Strukturen.

Im Fokus dieser Arbeit steht deshalb der Entwurf eines kontextbezogenen Assistenzsystems, das die aktuelle Operationssituation analysiert und daraufhin eine situationsangepasste Unterstützung erzeugt. Durch die stärkere Integration in die intraoperativen Arbeitsabläufe entsteht das Potenzial für eine bessere Patientenversorgung. Hierzu wird ein Lösungsansatz verfolgt, dessen Leitgedanke die starke Einbeziehung einer Wissensbasis ist. Die Unterstützung des Chirurgen erfolgt durch Methoden der Erweiterten Realität. Als klinische Anwendungsbeispiele dienen die minimalinvasive Cholezystektomie<sup>2</sup> sowie das Setzen von Dentalimplantaten.

## 1.2 Fragestellung

Die vielschichtigen Anforderungen an ein kontextbezogenes Assistenzsystem ergeben sich aus den klinischen Rahmenbedingungen. Den Ausgangspunkt der Betrachtungen bildet eine Beschreibung der aktuell vorliegenden Operationssituation anhand sogenannter Situationsmerkmale. Diese zu erfassen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Der Schwerpunkt liegt stattdessen in der Modellbildung und in der Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung des Situationskontexts. Ergänzend werden Konzepte zur Unterstützung des Chirurgen mittels der Erweiterten Realität diskutiert. Hierbei stellen sich folgende Fragen:

- **Anhand welcher Informationen kann eine Operationssituation beschrieben werden?**

Eine Operationssituation ist das Ergebnis des Zusammenwirkens aller eingriffsrelevanten Aspekte zu einem bestimmten Zeitpunkt und kann unter der Annahme, dass alle Situationsmerkmale bekannt sind, vollständig beschrieben werden. Die Komplexität der zugrunde liegenden Sachverhalte erfordert dabei die Trennung von wichtigen und weniger wichtigen Informationen und die Wahl eines geeigneten Detaillierungsgrads bei der Erstellung eines Konzepts zur Modellierung von Operationssituationen.

- **Wie kann die Abbildung einer Operationssituation in einem Rechnersystem erfolgen?**

Die Abbildung der Operationssituation in dem verarbeitenden Rechnersystem ist eine notwendige Voraussetzung für die Bestimmung des Situationskontexts. Hierbei muss untersucht werden, welche Formalismen für die Darstellung des Modells der Operationssituation geeignet sind. Zur Sicherstellung einer erfolgreichen und effizienten Analyse des Situationsmodells kann diese Frage nur unter Berücksichtigung der weiteren Verarbeitungsschritte beantwortet werden.

---

<sup>2</sup>Entfernung der Gallenblase.

- **Wie kann auf den Situationskontext geschlossen werden?**

Unter dem Situationskontext wird in dieser Arbeit die Zuordnung der Operationssituation zu einem Operationsabschnitt<sup>3</sup> bzw. zu einer Klasse von Sondersituationen<sup>4</sup> verstanden. Unter der Annahme, dass sich der Unterstützungsbedarf anhand des Situationskontexts bestimmen lässt, stellt sich die Frage, wie der vorliegende Abschnitt bzw. die Klasse einer Sondersituation ermittelt werden kann. In der Literatur existieren hierzu vor allem stochastische Ansätze mit impliziten Modellen. In dieser Arbeit soll ein alternativer, wissensbasierter Ansatz für die angesprochene Problemstellung der Situationsinterpretation entwickelt und evaluiert werden.

- **Welches Wissen wird für die Interpretation benötigt?**

Die Frage nach dem benötigten Wissen orientiert sich an der chirurgischen Vorgehensweise zur Bestimmung des aktuellen Operationsabschnitts bzw. der Situationsklasse einer Sondersituation. Der Chirurg greift für diese Bestimmung auf sein in der Aus- und Weiterbildung erlerntes theoretisches Wissen sowie auf seine praktische Erfahrung im Operationssaal zurück. Die Nachahmung der menschlichen Vorgehensweise erscheint ein vielversprechender Ansatz zu sein und soll im Rahmen der Arbeit näher untersucht werden. Dies erfordert die Abbildung des theoretischen Faktenwissens sowie die Abbildung der praktischen Erfahrung.

- **Wie kann eine situationsangepasste Visualisierung erzeugt werden?**

Aufgrund des großen klinischen Interesses rückt eine Unterstützung des Chirurgen mittels Methoden der Erweiterten Realität zunehmend in den Fokus aktueller Forschungsprojekte. Die Bereitstellung einer situationsangepassten, d. h. kontextbezogenen Unterstützung erfordert hierbei die Entwicklung dedizierter Methoden. Angesichts der Komplexität einer solchen Unterstützung muss sich die Untersuchung auf ausgewählte Aspekte beschränken.

- **Welche Anforderungen muss die zugehörige Benutzungsschnittstelle erfüllen?**

Die Benutzungsschnittstelle soll eine effiziente Bedienung des Systems mittels Interaktionstechniken der Erweiterten Realität sicherstellen. Die Gestaltung der Benutzungsschnittstelle orientiert sich an den Interaktionszielen unter Berücksichtigung der klinischen Rahmenbedingungen. In Anlehnung an existierende Ansätze zur Interaktion werden dedizierte Interaktionstechniken für das kontextbezogene Assistenzsystem entwickelt.

---

<sup>3</sup>In der Literatur ebenfalls gebräuchlich: Operationsphase.

<sup>4</sup>Hierunter fallen alle außerplanmäßig eintretenden Situationen.

### 1.3 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag

Der Anspruch an die vorliegende Arbeit umfasst in erster Linie die Beantwortung der gestellten Fragen. Ein weiteres Ziel ist das Aufzeigen des Potenzials einer rechnergestützten kontextbezogenen Chirurgieassistenz anhand der exemplarischen Eingriffe Cholezystektomie und des Setzens von Dentalimplantaten. Die zunehmende Bedeutung der Thematik der kontextbezogenen Chirurgieassistenz spiegelt sich in der starken Zunahme thematisch assoziierter Veröffentlichungen der letzten beiden Jahre wider. Komplementär zu den Konzepten anderer Forschungsgruppen soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Lösung des Problemfelds der kontextbezogenen Assistenz leisten - unter Verwendung eines wissenschaftlichen Ansatzes. Folgende Aspekte werden hierzu betrachtet:

- **Wissensrepräsentation und Modellbildung**

Die Repräsentation von theoretischem Wissen über den chirurgischen Eingriff bildet die Ausgangsbasis für die Modellbildung. Ein besonderes Anliegen dieser Arbeit ist die Einbeziehung etablierter Wissensrepräsentationen sowie die Verwendung standardisierter Beschreibungsformalismen zur Anwendung von Schlussfolgerungsalgorithmen im Rahmen des Interpretationsprozesses. Der Beitrag besteht in der Erstellung einer Wissensrepräsentation des Diskursbereichs sowie in der Konzeptionierung von Modellen der Operationssituation und der Operationsplanung [SSM+07a, SSM+07b, SSB+07].

Methodisch liegt der Schwerpunkt auf dem strukturierten Entwurf anwendungsorientierter Modelle und deren Repräsentation mittels eines standardisierten Formalismus.

- **Interpretation der Operationssituation**

Bei der Interpretation einer Operationssituation handelt es sich aufgrund des Zusammenspiels sämtlicher beteiligten Aspekte um eine komplexe Aufgabe. Zu deren Lösung wird in dieser Arbeit ein Ansatz verfolgt, der sich an der menschlichen Vorgehensweise bei der Bewältigung einer solchen Aufgabe orientiert: der Kombination aus theoretischem Wissen und praktischer Erfahrung. Hierzu wurden drei Interpretationsverfahren entwickelt und implementiert [SSM+07a, SSS+08, SBS+09].

Der methodische Schwerpunkt liegt auf dem Entwurf und der formalen Konzeption der Interpretationsverfahren.

- **Kontextbezogene Visualisierung und Interaktion**

In dieser Arbeit werden Verfahren zur Erzeugung einer kontextbezogenen Visualisierung bei der Umsetzung einer Schnittplanung, beim Clipping und bei Gefahrensituationen entworfen und realisiert. Anhand des Interaktionsbedarfs wird eine geeignete Benutzungsschnittstelle zur Lösung der Interaktionsaufgaben entwickelt.

Methodisch liegt der Schwerpunkt auf der Konzeption einer exemplarischen Visualisierung sowie der Untersuchung von Interaktionstechniken zur Bedienung eines Assistenzsystems [SEP+06, SSS+08, SSP+08].

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in acht Kapitel gegliedert, deren Inhalt sich wie folgt zusammenfassen lässt:

- Kapitel 2 erörtert den für die Arbeit relevanten Stand der Forschung. Vorge stellt werden Modelle zur Beschreibung und Planung von Operationsabläufen sowie entsprechende Interpretationsverfahren. Des Weiteren werden aktuelle Systeme zur Realisierung einer Chirurgieassistenz mittels der Erweiterten Realität präsentiert.
- Kapitel 3 präsentiert das Konzept der kontextbezogenen Chirurgieassistenz mittels der Erweiterten Realität. Im Fokus der Betrachtung steht die Vorgehensweise zur Erzeugung einer situationsangepassten Unterstützung des Chirurgen in der minimalinvasiven Chirurgie sowie in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. Für jedes der beiden Anwendungsgebiete wird eine experimentelle Testumgebung vorgestellt.
- Kapitel 4 widmet sich der Modellbildung und Wissensrepräsentation für die im vorigen Kapitel beschriebenen Assistenzsysteme. Entwickelt werden Modelle zur Abbildung der Operationssituation und der Operationsplanung. Anhand des exemplarisch ausgewählten minimalinvasiven Eingriffs Cholezystektomie wird die Vorgehensweise zur Erstellung einer adäquaten Wissensbasis erläutert.
- Kapitel 5 befasst sich mit der Interpretation von Operationssituationen unter Verwendung der in Kapitel 4 entworfenen Modelle. Dabei werden drei verschiedene Ansätze zur Situationsinterpretation entwickelt und diskutiert. Gemeinsamkeit aller Ansätze ist die starke Einbeziehung einer Wissensbasis.
- Kapitel 6 behandelt die Erzeugung einer kontextbezogenen Visualisierung und Interaktion. Dies beinhaltet insbesondere Visualisierungen zur Unterstützung bei der Umsetzung einer Inzision, beim Clippen und bei Gefahrensituationen. Zusätzlich wird eine Benutzungsschnittstelle zur Lösung der Interaktionsaufgaben konzipiert.
- Kapitel 7 präsentiert und bewertet die durchgeführten Schlüsselexperimente zur Evaluation der entwickelten Verfahren in Bezug auf eine kontextbezogene Assistenz für die minimalinvasive Chirurgie. Zusätzlich wird die Über-

tragbarkeit des entwickelten Konzepts auf einen Eingriff in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie demonstriert. Hierzu wird ein bestehendes Assistenzsystem um Komponenten zur Modellbildung, Situationsinterpretation und kontextbezogenen Visualisierung erweitert und evaluiert.

- Kapitel 8 fasst die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse zusammen und zeigt Ansatzpunkte für Weiterentwicklungen auf.

# Kapitel 2

## Stand der Forschung

### 2.1 Problemfelder und Diskussionsbedarf

Die Bereitstellung einer kontextbezogenen Unterstützung erfordert die Definition einer Prozesskette, bei der alle Prozessschritte von der Erfassung der Sensordaten bis hin zur Erzeugung der Unterstützung reibungslos ineinandergreifen. Ein systematischer Ansatz zur Erzeugung solch einer kontextbezogenen Unterstützung tangiert somit ein breites thematisches Spektrum. Dies spiegelt sich auch im Stand der Forschung wider.

Der Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Beschreibung der aktuell vorliegenden Operationssituation anhand von Situationsmerkmalen. Für die Bereitstellung einer kontextbezogenen Unterstützung müssen Modelle zur Beschreibung und Planung des Operationsablaufs, Verfahren zur Analyse und Interpretation von Operationssituationen sowie Verfahren zur Erzeugung einer Visualisierung und Interaktion mittels der Erweiterten Realität entwickelt werden. Der Stand der Forschung konzentriert sich auf Arbeiten dieser Problemfelder. Dem Autor sind ferner keine chirurgischen Assistenzsysteme bekannt, die in der Lage sind, eine kontextbezogene Unterstützung im Sinne dieser Arbeit bereitzustellen.

Diskussionsbedarf besteht bei der Klärung der Frage, inwiefern die vorgestellten Ansätze für ein kontextbezogenes Assistenzsystem verwendet werden können. Von praktischer Relevanz ist hierbei die Integration der Verfahren in ein Gesamtkonzept einer kontextbezogenen Assistenz, was eine isolierte Bewertung der vorgestellten Verfahren erschwert.

### 2.2 Modelle des Operationsablaufs

Der Operationsablauf wird anhand der patientenindividuellen Diagnose und der anatomischen Gegebenheiten geplant. Als Rahmenbedingungen können verfügbare technische Hilfsmittel sowie die präferierte Operationsstrategie betrachtet werden.

Die Untersuchung von Operationsabläufen ist Gegenstand des Forschungsgebiets *Chirurgische Abläufe*<sup>1</sup>. Hier werden Operationsabläufe erfasst, analysiert und bewertet. Die dabei erlangte Kenntnis bietet wertvolle Informationen, beispielsweise für die Entwicklung und Gestaltung chirurgischer Assistenzsysteme. Die aktuelle Relevanz dieses Forschungsgebiets verdeutlichen die Ergebnisse des im Jahre 2004 durchgeführten Workshops *OR 2020: The Operating Room of the Future* [CK05], bei dem ein internationales Gremium klinischer und technischer Experten die Anforderungen an den Operationssaal der Zukunft ermittelte. Veröffentlicht wurde eine Liste mit fünf Forschungsthemen. Auf dem ersten Platz steht hierbei die Standardisierung von Geräten, Abläufen und Schnittstellen. Explizit hervorgehoben wird der Forschungsbedarf zur Untersuchung chirurgischer Abläufe.

Die folgenden Abschnitte nähern sich dem Thema Operationsablauf aus zwei verschiedenen Anwendungsperspektiven. Zunächst werden Ansätze zur Beschreibung intraoperativ erfasster Abläufe diskutiert, welche die Grundlage für eine spätere Analyse darstellen. Demgegenüber stehen Ansätze zur Planung von Operationsabläufen, wobei sich die Betrachtung auf Ansätze zur Planung computerunterstützter Eingriffe beschränkt.

### 2.2.1 Modelle zur Ablaufbeschreibung

Der bereits erwähnte Workshop kann als Ausgangspunkt für eine Vielzahl von Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Verfahren bezüglich des Themenkomplexes *Chirurgische Abläufe* betrachtet werden. Ein Beleg hierfür ist der enorme Zuwachs diesbezüglicher Veröffentlichungen innerhalb der letzten Jahre. Im Fokus der Betrachtungen stehen dabei oftmals Bestrebungen zur Standardisierung und Integration von Informationen bezüglich des Patienten, des Operationsablaufs und der verwendeten Geräte. Dies beinhaltet Konzepte und Modelle zur Beschreibung des Operationsablaufs. In den folgenden Abschnitten werden hierzu verschiedene Ansätze vorgestellt.

#### Hierarchische Modelle

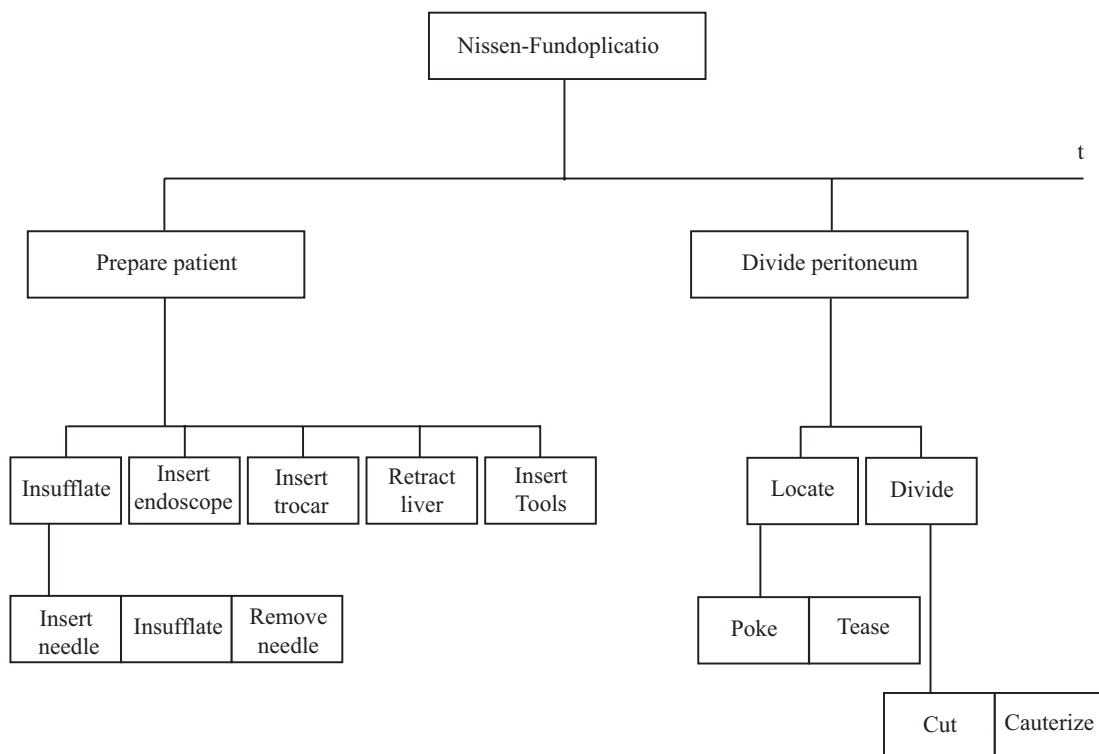
Als Grundlage für eine quantitative und qualitative Analyse eines laparoskopischen<sup>2</sup> Eingriffs schlagen MacKenzie et al. die Verwendung einer hierarchischen Repräsentation des Operationsablaufs vor [MIC+01]. Grundlage für die Erstellung des hierarchischen Modells bildet die manuelle Auswertung von Videoaufzeichnungen der endoskopischen Bilddaten und des Chirurgen während der Operation. Hierbei werden zunächst die einzelnen Ablaufschritte eines Eingriffs identifiziert. Anhand von markanten Zuständen der anatomischen Strukturen oder charakteristischen Aktivitäten des operierenden Chirurgen werden der Beginn und das Ende eines sol-

---

<sup>1</sup>engl.: Surgical workflows.

<sup>2</sup>Laparoskopische Chirurgie: minimalinvasiv durchgeführte Eingriffe im Bauchraum.





**Abb. 2.1:** Ausschnitt eines hierarchischen Ablaufmodells einer Nissen-Fundoplicatio (Auszug aus MacKenzie et al. [MIC+01], Fig. 1, © 2001, mit freundlicher Genehmigung von Informa Healthcare).

chen Ablaufschritts definiert. Für das Beispiel einer Nissen-Fundoplicatio<sup>3</sup> wurden sieben Ablaufschritte identifiziert. Die wiederholte Anwendung dieses Vorgehensmodells führt zu einer weiteren Dekomposition und damit zu einer hierarchischen Darstellung des Operationsablaufs mit insgesamt vier Detaillierungsstufen. Eine exemplarische Dekomposition eines Ablaufschritts für das Beispiel der Nissen-Fundoplicatio ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Das Verfahren ermöglicht die Darstellung chirurgenerindividueller Präferenzen bei der Durchführung einer Operation. Die Anzahl der Beschreibungselemente auf den einzelnen Detaillierungsstufen gibt Aufschluss über die Komplexität der höher aggregierten Elemente.

### Prozessmodelle

Dickhaus et al. präsentieren die Modellierung chirurgischer Abläufe mittels Ablaufmodellen aus dem Forschungsgebiet der Geschäftsprozessmodellierung [DBT+04]. Als Anwendungsbeispiel wurde ein Eingriff an der Prostata aufgeführt. Die generierte Prozessbeschreibung ermöglicht die Ableitung von Verbesserungsvorschlägen bezüglich des Operationsablaufs.

<sup>3</sup>Behandlungsmethode der Antirefluxchirurgie.

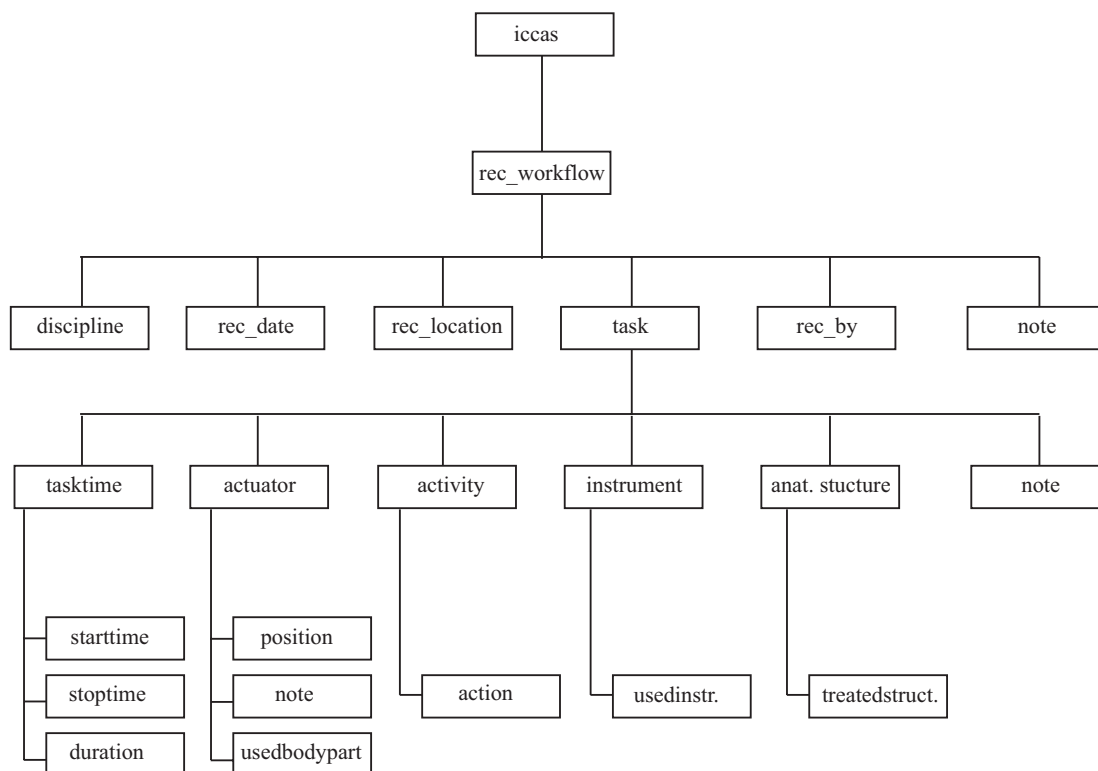
Ein Konzept zur Erfassung und Abbildung chirurgischer Abläufe im Operationsaal wurde von Neumuth et al. vorgestellt [NDM+06]. Die Erfassung eines Ablaufs erfolgt, indem ein klinischer Experte den Operationsablauf unter Zuhilfenahme eines Softwarewerkzeugs manuell protokolliert. Jeder Protokollant wird hierzu mit einem tragbaren Computer mit berührungsempfindlichem Bildschirm ausgestattet, sodass die Daten nach der Operation in einer maschinenlesbaren Form zur Verfügung stehen. Dies ermöglicht die Visualisierung und Analyse des aufgezeichneten Operationsablaufs, beispielsweise zur Klärung der Frage, ob durch den Einsatz eines Assistenzsystems eine Zeitersparnis zu erzielen ist. Für jeden protokollierten Eingriff werden Metainformationen und detaillierte Informationen bezüglich des Ablaufs erfasst. Zu den Metainformationen zählen die chirurgische Disziplin des durchgeführten Eingriffs samt der gestellten Diagnose und der geplanten Therapie sowie Informationen über das Operationsteam und den Protokollanten. Die Metainformationen werden für die Konfiguration des Softwarewerkzeugs verwendet und ermöglichen die Festlegung der Granularität der Ablaufbeschreibung. Diese richtet sich nach der Art und Anzahl der im Rahmen der Protokollierung betrachteten Körperteile zur Bedienung der chirurgischen Instrumente und Geräte. Dabei kommen jeweils die linke und rechte Hand sowie der linke und rechte Fuß der operierenden Chirurgen und Assistenten infrage. Diese Vorgehensweise führt zu maximal vier Prozessbeschreibungen bei der Protokollierung der Tätigkeit eines Chirurgen. Für jeden Prozessschritt werden der Beginn und das Ende festgelegt. Zusätzlich werden Informationen über das verwendete chirurgische Instrument, die ausgeführte Aktivität und die behandelte anatomische Struktur erfasst. Abbildung 2.2 verdeutlicht die wesentlichen Elemente des beschriebenen Schemas grafisch. Der aufgezeichnete Ablauf wird mittels einer XML-Notation<sup>4</sup> repräsentiert. Mit dem dargestellten Konzept konnten die Abläufe verschiedener chirurgischer Eingriffe durch Medizinstudenten erfolgreich protokolliert werden.

Neumuth et al. erweiterten das Konzept durch die Einführung zusätzlicher Beschreibungselemente, sodass auftretende Ereignisse, wie beispielsweise die Fehlermeldung eines Assistenzsystems, erfasst und repräsentiert werden können. Des Weiteren werden Beschreibungselemente zur Abbildung von Statusinformationen eines dedizierten Aspekts eingeführt. Als Beispiel für einen solchen Aspekt wird die Blickrichtung des Chirurgen genannt, wobei zwischen drei verschiedenen Zuständen (Blick auf Operationsfeld, Blick auf Monitor, andere Blickrichtung) unterschieden wird. Für das erweiterte Konzept zur Beschreibung von Operationsabläufen wird zusätzlich der Begriff *chirurgisches Prozessmodell*<sup>5</sup> eingeführt. Eine Visualisierung chirurgischer Prozessmodelle wurde in [NSS+06] vorgestellt. In [NTE+07] wurde anhand von Prozessmodellen der Nutzen eines chirurgischen Assistenzsystems bewertet. Die Verwendung einer Ontologie zur Definition der Konzepte, die

---

<sup>4</sup>eXtensible Markup Language.

<sup>5</sup>engl.: Surgical process model.



**Abb. 2.2:** Schema des Prozessmodells chirurgischer Abläufe (aus Neumuth et al. [NDM+06], © 2006 SPIE).

für die Erstellung der Prozessmodelle benötigt werden, wurde in [MNS+07] erörtert. Weiterhin wurde die Einbeziehung von Schlussfolgerungsalgorithmen zur Auswertung der Prozessmodelle untersucht [NMS+07]. Eine Anwendung des Prozessmodells zur standardisierten Erfassung von Operationsabläufen bei der Entfernung intrakranieller Hirntumore wurde von Blecha et al. vorgestellt [BLN+07]. Ziel war die objektive Bewertung einer Unterstützung durch ein Navigationssystem. Hierzu wurden die Prozessmodelle von sieben nicht navigierten und elf navigierten Eingriffen erfasst und ausgewertet. Hierbei stellte sich unter anderem heraus, dass die Qualität des aufgezeichneten Prozessmodells von der Erfahrung, den medizinischen Kenntnissen und den manuellen Fertigkeiten des Protokollanten abhängt. Unabhängig davon konnte in der Studie die Eignung des Konzepts der Prozessmodelle für die objektive Informationserfassung von Operationsabläufen gezeigt werden.

Die Abbildung des chirurgischen Prozessmodells auf das Konzept der zentralen Datensammlung<sup>6</sup> zur Analyse aufgezeichneter Operationsabläufe wird in [NMS+08] diskutiert. Hierzu wurde zunächst ein Konzept-Beziehungsdiagramm des chirurgischen Prozessmodells erstellt, um die Kardinalität der Beziehungen zwischen den einzelnen Beschreibungselementen der Ablaufbeschreibung zu ermitteln. Diese In-

<sup>6</sup>engl.: Data warehouse.

formationen bilden die Grundlage für die Erstellung der zentralen Datensammlung. Eine exemplarische Anwendung zur Analyse der Instrumentennutzung wurde anhand eines chirurgischen Eingriffs und einer geeigneten Abfragetechnik untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung unterstützen beispielsweise die Entscheidungsfindung, ob ein vorhandenes chirurgisches Instrument erfolgreich durch ein neues ersetzt werden kann.

## 2.2.2 Modelle zur Ablaufplanung

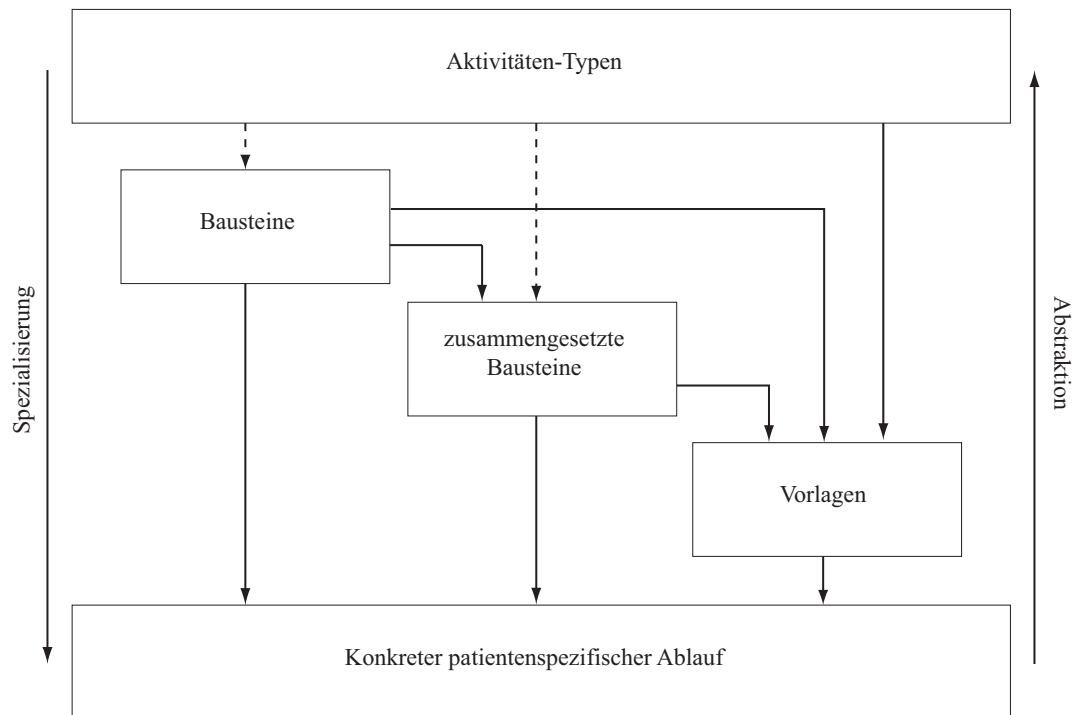
Für nahezu jeden Standardeingriff existiert eine Vielzahl an Vorschlägen zur Umsetzung des Operationsablaufs in der einschlägigen Literatur. Die Einbeziehung klinisch etablierter Assistenzsysteme, beispielsweise zur Navigationsunterstützung, wird dabei teilweise berücksichtigt. In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte Planungsmodelle vorgestellt, in denen die Unterstützung explizit abgebildet wird. Unterschieden werden Ansätze zur aktiven und passiven Assistenz. Aktive Assistenzsysteme, wie z. B. Roboter, arbeiten direkt am Patienten, wohingegen passive Systeme den Chirurgen durch die Bereitstellung von Informationen unterstützen. Systeme der Erweiterten Realität zählen somit zu den passiven Assistenzsystemen.

### Planungsmodelle für eine aktive Assistenz

Münchenberg präsentiert einen Ansatz zur Planung des Operationsablaufs für eine Anwendung in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie [Mun01]. Das System erlaubt die Planung des gesamten Operationsablaufs mittels einer flexiblen graphenbasierten Ablaufrepräsentation unter Berücksichtigung des Einsatzes von Chirurgieassistenzsystemen.

Ein Ansatz zur Operationsplanung und -steuerung wurde von Schorr vorgeschlagen [Sch05]. Dieser beinhaltet ein Metamodell zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen einem Ablauf und zusätzlichen Planungselementen. Des Weiteren werden Werkzeuge und Datenstrukturen zur Abbildung von Abläufen bereitgestellt. Besonderes Augenmerk wurde auf die Möglichkeit zur Flexibilisierung der Abläufe gelegt. Abbildung 2.3 verdeutlicht hierzu ein Konzept zur Definition sogenannter Bausteine, anhand derer eine Aktivität, ein Teilablauf oder ein kompletter Ablauf repräsentiert werden können. Diese Bausteine ermöglichen eine zeiteffiziente Generierung des patientenindividuellen Ablaufplans.

Kragic et al. stellen ein System zur Assoziation eines Ablaufplans und einer Roboterunterstützung vor [KH03]. Ziel ist die kontextbezogene Unterstützung des Chirurgen. Hierzu wird ein Schichtmodell verwendet, dessen erste Ebene einen Ablaufgraph des chirurgischen Eingriffs beinhaltet. In der zweiten Ebene werden die einzelnen Elemente des Ablaufgraphen an eine Ausführungseinheit übergeben, die



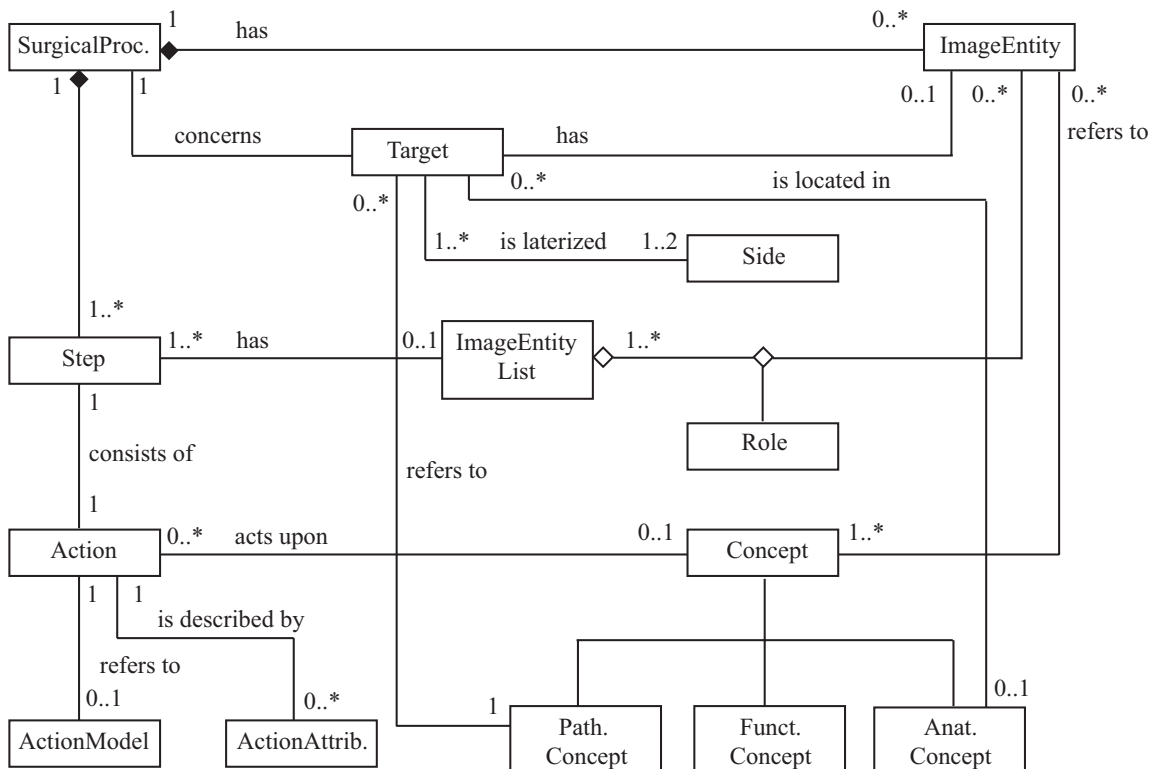
**Abb. 2.3:** Bausteine zur Erzeugung eines Ablaufplans (aus Schorr [Sch05], © 2005 Logos).

die Unterstützung steuert und überwacht. Die dritte Ebene besteht aus einer Menge von Bewegungsprimitiven zur Steuerung des Roboters. Der Ansatz ermöglicht die Wiederverwendung von Elementen des Ablaufgraphen sowie der realisierten Bewegungsprimitive bei verschiedenen chirurgischen Eingriffen.

### Planungsmodelle für eine passive Assistenz

Jannin et al. erstellten ein generisches Ablaufmodell für chirurgische Eingriffe in der Neurochirurgie und verknüpften dieses Ablaufmodell mit präoperativ erstellten Bilddaten [JRM+01]. Dies ermöglicht die Erzeugung einer parametrisierbaren Visualisierung zur Unterstützung des Chirurgen während eines navigierten Eingriffs. Hierzu wird der chirurgische Eingriff zunächst eingehend analysiert und in einem Modell abgebildet. Jannin et al. verwenden hierzu die Beschreibungssprache UML<sup>7</sup>. In Abbildung 2.4 ist das zugehörige Klassendiagramm dargestellt. Der chirurgische Eingriff (*Surgical Procedure*) wird als Folge von Operationsschritten (*Steps*) abgebildet. In einem Operationsschritt soll genau eine Aktion (*Action*) zur Veränderung eines anatomischen, pathologischen oder funktionalen Patientenaspekts (*Concept*) umgesetzt werden. Jede dieser Aktionen kann mit Daten der prä-

<sup>7</sup>Unified Modelling Language.



**Abb. 2.4:** Klassendiagramm eines Ablaufmodells für neurochirurgische Eingriffe (aus Jannin et al. [JRM+01], Fig. 1, © 2001, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier).

operativ erstellten Planung (*ImageEntity*) assoziiert werden. Das vorgestellte Verfahren wurde in [JM07] verfeinert. Eine Anwendung bei verschiedenen Eingriffen desselben Typs offenbarte eine geringe Varianz der erstellten Ablaufmodelle und stellt damit einen Hinweis auf die Möglichkeit zur Standardisierung der Ablaufmodelle dar.

Trevisan et al. präsentierten ein Konzept zur Planung der Unterstützung durch ein System der Erweiterten Realität, das implizit Elemente des Operationsablaufs beinhaltet [TVM+03]. Dabei wird zunächst ein hierarchisches Aufgabenmodell erstellt, in dem Ziele und Aktivitäten des Chirurgen sowie Visualisierungsobjekte abgebildet werden. Die Unterscheidung zwischen parallel und sequenziell auszuführenden Aktivitäten ist möglich. Anhand dieses Aufgabenmodells wird ein Präsentationsmodell definiert, das bei einem Einsatz des Systems eine Visualisierung generiert. Dieses Präsentationsmodell berücksichtigt die im Aufgabenmodell definierten Bedingungen, beispielsweise um zu verhindern, dass sich Visualisierungsobjekte überlappen.

## 2.3 Ansätze zur Analyse des Operationsablaufs

Die Ermittlung des Situationskontexts durch eine Analyse und Bewertung der aktuell vorliegenden Operationssituation ist eine Grundvoraussetzung für die Erzeugung einer kontextbezogenen Assistenz. Thematisch assoziierte Forschungsarbeiten analysieren den Operationsablauf und untersuchen dedizierte Eingriffsaspekte, wie beispielsweise die Instrumentenpose. In den folgenden Abschnitten werden aktuelle Forschungsarbeiten aus diesem Themenbereich vorgestellt.

### 2.3.1 Analyse dedizierter Eingriffsaspekte

Sielhorst et al. entwickelten einen Ansatz zur Analyse und Bewertung der Instrumentenführung auf Basis einer Synchronisation der erfassten Trajektorien [SBN05]. Als Anwendungsgebiet wird die Ausbildung von Chirurgen genannt. In einem simulierten Eingriff wird zunächst die Instrumentenführung eines erfahrenen Chirurgen aufgezeichnet. Im Anschluss wird dieselbe Aufgabe von einem auszubildenden Chirurgen umgesetzt, dessen Instrumentenführung ebenfalls aufgezeichnet wird. Hierfür werden Marker an den Instrumenten angebracht, deren Pose durch ein optisches Positionsverfolgungssystem erfasst wird. Die Visualisierung der beiden aufgezeichneten Ausführungen erfolgt durch ein System der Erweiterten Realität. Für eine Analyse werden die ausgeführten Bewegungen zunächst synchronisiert und anschließend in einem Brillensystem visualisiert. Die Synchronisation der Trajektorien erfolgt durch die *Longest Common Subsequence* sowie durch die *Dynamic Time Warp*-Methode. Bei beiden Methoden werden die erfassten Instrumententrajektorien aufeinander abgebildet. Durch eine Verzögerung der schneller bzw. eine Beschleunigung der langsamer durchgeführten Bewegung können beide Trajektorien im Brillensystem synchron dargestellt werden. Die Betrachtung der Ausführung aus verschiedenen Blickwinkeln ist durch eine Positionsveränderung des Betrachters möglich.

Blum et al. erweiterten die Simulationsumgebung, indem sie mehrere Experten-vorführungen synchronisieren und daraus eine durchschnittliche Vorführung generieren [BSN07]. Diese wird als Referenz für die synchrone Visualisierung der Instrumentenführung des Chirurgen verwendet. Ziel ist die Verbesserung des Lerneffekts für den auszubildenden Chirurgen, da die Durchschnittsbildung eine Adaption bezüglich der charakteristischen Bewegungselemente ermöglicht, die alle Experten ähnlich ausgeführt haben. Chirurgenindividuelle Abweichungen werden aufgrund der Durchschnittsbildung hingegen abgeschwächt. Blum et al. stellen die Abweichung der Instrumentenführung bezüglich der aus Expertendaten genierten Durchschnittsvorführung grafisch dar. Des Weiteren wird die Methode für die Generierung einer Onlinesynchronisation erweitert. Dies ermöglicht eine Visualisierung während der Ausführung und hilft dem auszubildenden Chirurgen, Fehler zu vermeiden.

Rosen et al. verwenden *Hidden-Markov-Modelle* (HMM) für die objektive Beurteilung eines Chirurgen im Rahmen von Tierversuchen am Beispiel einer minimalinvasiven Gallenblasenentfernung [RSH+02]. Hierzu werden ein Video der Operation aufgezeichnet und haptische Informationen mittels Kraftsensoren in den chirurgischen Instrumenten erfasst. Im Anschluss erfolgt eine Zuordnung der Sensordaten mit den im Video identifizierten chirurgischen Elementaraktionen. Dies ermöglicht die Modellierung eines HMMs zur Beschreibung der Elementaraktionen bezüglich der haptischen Informationen, das für eine Beurteilung der chirurgischen Ausführung verwendet werden kann.

Die Dekomposition eines Nähvorgangs in Elementaraktionen und deren Abbildung durch ein *Markov-Modell* wurden ebenfalls von Rosen et al. vorgestellt [RBC+06]. Der Nähvorgang wird als Folge von Zustandsübergängen des *Markov-Modells* repräsentiert. Für die Berechnung des Modells werden die Pose und die auftretenden Kräfte der chirurgischen Instrumente verwendet. Das *Markov-Modell* besteht aus insgesamt 30 Knoten, von denen jeweils die Hälfte für die Repräsentation des linken und des rechten Instruments verwendet wird. Die Berechnung chirurgener individueller *Markov-Modelle* erfolgt anhand aufgezeichneter Daten in einer Experimentierumgebung. An einem Modell wird hierzu der Nähvorgang von erfahrenen und auszubildenden Chirurgen erfasst. Durch einen anschließenden Vergleich der ermittelten Modelle kann der Ausbildungsgrad quantifiziert werden. Für den Vergleich wird die statistische Ähnlichkeit der *Markov-Modelle* bestimmt.

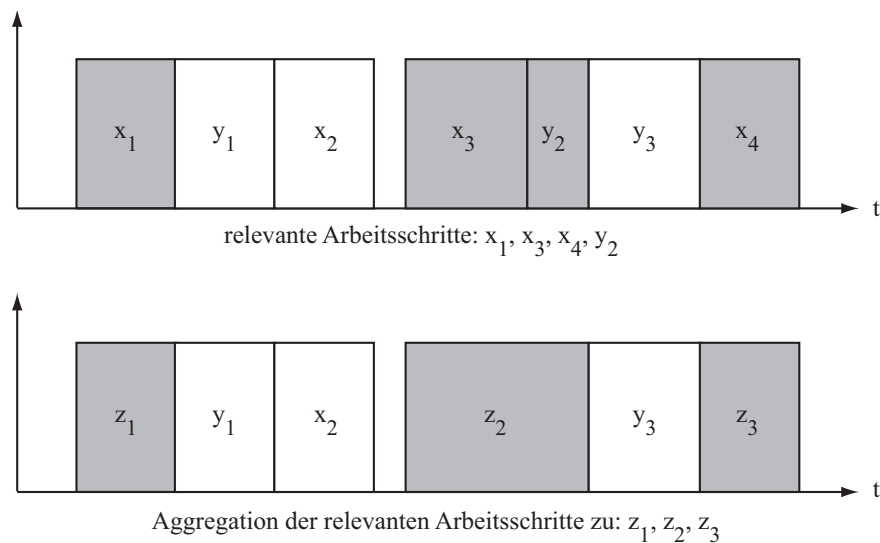
Die automatische Segmentierung einer Operation in einzelne Elementaraktionen anhand von Bewegungs- und Videodaten des Telemanipulatorsystems *da Vinci*<sup>®</sup> der Firma *Intuitive Surgical* untersuchen Lin et al. am Beispiel eines Nähvorgangs. Hierzu wird der Nähvorgang in acht Elementaraktionen zerlegt, die während der Ausführung mit einem probabilistischen Klassifikator erkannt werden [LSM+06].

### 2.3.2 Analyse von Ablaufbeschreibungen

Jannin et al. erweiterten das in Abschnitt 2.2.2 vorgestellte Modellierungskonzept zu einem Softwareframework und stellten eine exemplarische Anwendung zur Abbildung patientenindividueller Eingriffe vor [JM07]. Hierzu wird eine Ontologie des betrachteten chirurgischen Eingriffs erstellt. Für die Repräsentation der Ontologie und des Ablaufmodells verwenden Jannin et al. die XML-Notation. Im Rahmen von zwei klinischen Studien aus dem Fachbereich der Neurochirurgie wurde das vorgestellte Modellierungskonzept zur Untersuchung von Abhängigkeiten des Operationsverlaufs bezüglich patientenindividueller Aspekte angewandt.

In Abschnitt 2.2.1 wurde das Prozessmodell zur Beschreibung chirurgischer Abläufe von Neumuth et al. vorgestellt. Dieses dient als Grundlage für die im Folgenden vorgestellte Analyse chirurgischer Eingriffe [NTE+07]. Ein Ziel dieser Analyse ist die Ermittlung von Kennzahlen zur Unterstützung des Entscheidungsfindungsprozesses bei ablaufbezogenen Fragestellungen. Exemplarisch wird untersucht, ob sich





**Abb. 2.5:** Aggregation der relevanten Arbeitsschritte (aus Neumuth et al. [NTE+07], Fig. 1, © 2007, mit freundlicher Genehmigung von Springer Science und Business Media).

durch den Einsatz eines Assistenzsystems eine Zeitersparnis erzielen lässt. Hierzu werden die einzelnen Arbeitsschritte des Prozessmodells entsprechend einer eingriffsindividuell festgelegten Vorgehensweise aggregiert. Die Vorgehensweise wird am Beispiel einer Bandscheibenoperation erläutert. Zunächst werden die Arbeitsschritte identifiziert, die für eine Unterstützung durch das chirurgische Assistenzsystem infrage kommen. Daraufhin werden folgende Kennzahlen berechnet: das Intervall zwischen Beginn des ersten und Ende des letzten relevanten Arbeitsschritts, die kumulierte Dauer aller relevanten Arbeitsschritte, die Anzahl der relevanten Arbeitsschritte, die Aggregation relevanter Arbeitsschritte zu Gruppen sowie die Anzahl dieser Gruppen. Abbildung 2.5 verdeutlicht die Aggregation der relevanten Arbeitsschritte  $x_1, x_3, y_2$  und  $x_4$  zu  $z_1, z_2$  und  $z_3$ . Anhand der zugehörigen Kennzahlen wird der Nutzen eines Assistenzsystems bezüglich der Operationsdauer geschätzt. Hierfür wird zusätzlich die Einsatz- und Vorbereitungszeit des Assistenzsystems in Betracht gezogen.

### 2.3.3 Interpretation von Ablaufbeschreibungen

Ahmadi et al. erweiterten den Ansatz von Sielhorst et al. zur Synchronisation von Operationsphasen [ASS+06]. Das Ziel ist die Bestimmung der aktuellen Operationsphase durch Abbildung auf einen zuvor erstellten Normablauf. Als Daten der betrachteten Operation stehen Informationen bezüglich der verwendeten Instrumente für jeden Operationszeitpunkt zur Verfügung. Dazu werden Videodaten der Operation manuell klassifiziert. Die Anwendung der Methode erfordert in einem ersten Schritt die Erstellung eines Normablaufs der Operation. Für das Beispiel einer Cho-

lezystektomie verwenden Ahmadi et al. die Daten von fünf aufgezeichneten und klassifizierten Operationen. Dabei wird der durchschnittliche Ablauf durch Synchronisation der fünf Eingriffe mittels einer Erweiterung der *Dynamic Time Warp*-Methode erstellt. Sollen nun die Phasen einer aufgezeichneten und klassifizierten Operation bestimmt werden, so erfolgt dies anhand der nichtlinearen Abbildung auf den zuvor erstellten Normablauf. Diese Abbildung ermöglicht die Übertragung von Start- und Endpunkten der einzelnen Operationsphasen des Normablaufs auf die betrachtete Operation und damit die Bestimmung der einzelnen Phasen.

Ein modellbasierter Ansatz zur Segmentierung des Operationsablaufs wurde von Padoy et al. vorgestellt [PHF+07]. Basierend auf der Annahme eines linearen Operationsablaufs erfolgt die Modellierung des Eingriffs mit einem *Hidden-Markov-Modell* (HMM), dessen Zustände die einzelnen Operationsphasen repräsentieren. Als Trainingsdaten werden analog zum Ansatz von Ahmadi et al. Informationen bezüglich der chirurgischen Instrumente verwendet. Die Evaluation erfolgt ebenfalls am Beispiel einer Cholezystektomie, wobei das HMM anhand der Daten von fünf Eingriffen trainiert und mithilfe eines sechsten Eingriffs evaluiert wird.

Blum et al. verwenden *Hidden-Markov-Modelle* für die Analyse des Operationsablaufs und präsentieren eine Applikation zur Visualisierung der Modelle [BPF+08a]. Die Topologie des erstellten HMMs wird dabei wie sämtliche andere Parameter aus den Trainingsdaten generiert. Bei diesen Trainingsdaten handelt es sich wie bei Ahmadi et al. um manuell klassifizierte Informationen bezüglich der verwendeten chirurgischen Instrumente. Ausgangspunkt für die Modellierung des Operationsablaufs ist die Erstellung von HMMs zur Beschreibung einzelner Phasen. Diese werden in einem weiteren Schritt zusammengefasst, sodass daraus eine Beschreibung des gesamten Operationsablaufs entsteht. Für die Analyse des resultierenden Operationsablaufs wurde eine grafische Oberfläche zur Visualisierung des Operationsvideos, der Eingabedaten und des *Hidden-Markov-Modells* erstellt. Die Evaluation des vorgestellten Ansatzes erfolgte anhand manuell klassifizierter Cholezystektomien. In [BPF+08b] wird die Eignung von *Hidden-Markov-Modellen* mit einer automatisch generierten Topologie für die Erkennung von Operationsphasen bei Cholezystektomien untersucht. Als Referenz dient die Modellierung einer Operation als HMM mit einer manuell erstellten Topologie. Der Ansatz der HMMs mit automatisch generierter Topologie erweist sich hierbei als überlegen.

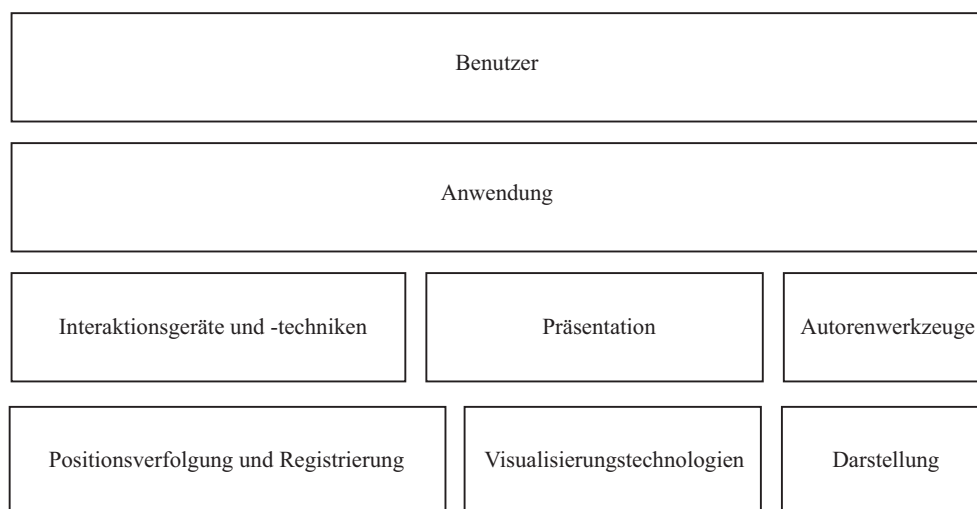
Ein Konzept zur Erkennung von Operationsphasen einer laparoskopischen Cholezystektomie unter Verwendung eines Augentrackers und der Auswertung von Bilddaten wurde von [JVL+07] vorgestellt. Mithilfe des Augentrackers wird die Blickrichtung des Chirurgen ermittelt. Dies ermöglicht die Erkennung markanter Punkte des Operationsablaufs, beispielsweise eines Instrumentenwechsels, bei dem die Blickrichtung des Chirurgen vom Operationsmonitor zum Patienten wandert. Anhand der erfassten Bilddaten wird das verwendete Instrument identifiziert. Mit diesen Daten und einem Klassifikator auf Basis *Neuronaler Netze* wird die Erkennung

des kritischen Operationsschritts einer Cholezystektomie untersucht. Das Verfahren wurde an einem tierischen Versuchsobjekt evaluiert.

## 2.4 Chirurgieassistenz mittels Erweiterter Realität

Der Begriff Erweiterte Realität bezeichnet die Ergänzung der realen Welt mit virtuellen, d. h. rechnergenerierten Daten, die dem Anwender zusätzliche Informationen zur Verfügung stellen. Im Fall eines intraoperativ eingesetzten ER-Systems zur Unterstützung des Chirurgen wird die reale Operationsszene beispielsweise um Daten der Operationsplanung ergänzt. Reale und virtuelle Informationen verschmelzen dabei zu einer einheitlichen Wahrnehmung. Die folgende Betrachtung beschränkt sich auf die visuelle Überlagerung von Informationen.

In der Literatur existieren zahlreiche Definitionen des Begriffs Erweiterte Realität und unterschiedliche Auffassungen bezüglich der Abgrenzung zur virtuellen Realität [Bim05]. Ein Konsens besteht hingegen bei den Komponenten eines ER-Systems, wie sie in Abbildung 2.6 dargestellt sind. Im folgenden Abschnitt werden die Bedeutung und Funktion der einzelnen Komponenten näher erläutert.



**Abb. 2.6:** Komponenten eines Systems der Erweiterten Realität (aus [Bim05], © 2005 Peters).

Die Realisierung einer zeitlichen und räumlichen Überlagerung von realen Objekten mit virtuellen Informationen erfordert die Positionsverfolgung sowie die Registrierung der realen Objekte mit den assoziierten virtuellen Daten. Die Positionserfassung erfolgt durch ein Sensorsystem. Im Rahmen klinischer Anwendungen haben sich aufgrund der hohen Zuverlässigkeit vor allem markerbasierte optische und elektromagnetische System etabliert. Der Begriff Registrierung bezeichnet die

Abbildungsvorschrift der virtuellen Daten bezüglich der realen Objekte. Die Registrierung stellt somit die korrekte Überlagerung bzw. Erweiterung der Realität sicher. Bei den Technologien zur Visualisierung klinisch relevanter Daten kommen vor allem Brillen- und Projektorsysteme zum Einsatz. Beide Systemtypen ermöglichen die Überlagerung der Planungsdaten mit dem Patienten direkt im Sichtfeld des Chirurgen. Im Gegensatz zur Verwendung eines Monitors, auf dem die Planungsdaten präsentiert werden, stellt dies einen großen Vorteil für den Chirurgen dar: Der Blickwechsel zwischen Patient und Monitor entfällt. Die Übertragung der Planungsdaten auf das Operationsgebiet erfolgt somit durch das System und nicht durch die Vorstellungskraft des Chirurgen. Bei stereoskopischen Brillensystemen lässt sich zusätzlich eine dreidimensionale Darstellung der Planungsdaten realisieren.

Anhand der aktuellen Position der zu überlagernden Objekte wird die virtuelle Szene berechnet und dargestellt<sup>8</sup>. Aufgrund der Berechnungsdauer und des Zeitaufwands für die Datenübertragung entstehen zwangsläufig Latenzzeiten. Für eine korrekte Überlagerung müssen diese so gering wie möglich gehalten werden. Im Gegensatz zu ER-Systemen aus anderen Anwendungsbereichen ist bei klinischen Anwendungen keine fotorealistische Darstellung notwendig. Von Bedeutung ist jedoch die Art und Weise, in der Informationen dargestellt werden. Hierzu zählen die Dimensionalität der visualisierten Daten und des Visualisierungsmediums sowie die Position der dargestellten Inhalte. Bei der Überlagerung dreidimensionaler Planungsdaten mit dem Patienten und der Präsentation in einem stereoskopischen Brillensystem handelt es sich beispielsweise um eine objektfixierte Darstellung von 3-D-Inhalten in einem 3-D-Medium. Demgegenüber steht die weltfixierte, körperfixierte oder bildschirmfixierte Darstellung zwei- oder dreidimensionaler Inhalte zur Realisierung von Interaktionstechniken.

Die angesprochenen Interaktionstechniken ermöglichen dem Anwender die Steuerung der Anwendung. Aufgrund des Konzepts der Erweiterten Realität werden hier nur selten klassische Eingabegeräte, wie beispielsweise eine Tastatur, verwendet. Insofern wird bei diesen Anwendungen der Einsatz spezieller Eingabegeräte und -techniken untersucht. Als letzter Aspekt seien die Autorenwerkzeuge genannt, welche die einfache Gestaltung der ER-Anwendung ermöglichen.

Eine konkrete Anwendung greift auf die hier aufgeführten Komponenten bzw. Verfahren zurück, um dem Benutzer die Erreichung seiner Ziele zu ermöglichen. Insofern bildet die Erweiterte Realität eine Benutzungsschnittstelle zwischen Mensch und Maschine.

### 2.4.1 Visualisierung von Planungsdaten

Systeme der Erweiterten Realität sind seit mehr als zehn Jahren Gegenstand klinischer Forschung. Der folgende Abschnitt gibt anhand von drei klinischen Anwen-

---

<sup>8</sup>engl.: Rendering.

dungsfeldern und exemplarisch ausgewählten Systemen einen Überblick bezüglich der jeweiligen Assistenzfunktionen und der verwendeten Systemkonzepte.

### Assistenz bei minimalinvasiven Eingriffen

Fuchs et al. stellten ein brillenbasiertes ER-System vor, das eine laparoskopisch durchgeführte Biopsie unterstützt, indem Positionierungsinformationen eingeblendet werden [FLR+98]. Das System wurde an einem Phantom evaluiert und zeigte einen Vorteil gegenüber der Durchführung mit dem klinischen Standard, der ultraschallgestützten Biopsie [RBC+01].

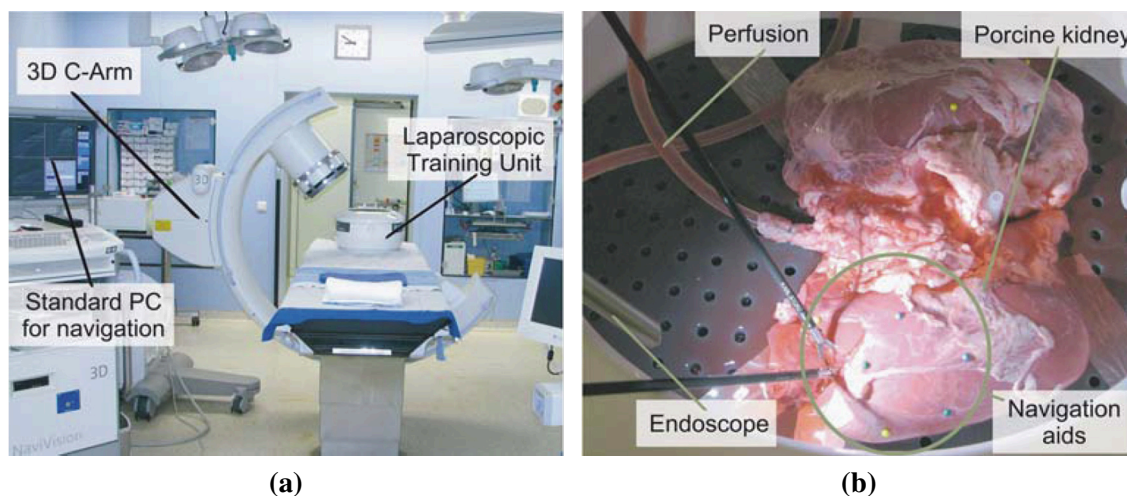
Für minimalinvasive Eingriffe, die mithilfe eines Teleskopmanipulators umgesetzt werden, existiert gleichfalls eine Unterstützung durch Methoden der Erweiterten Realität. So untersuchten Traub et al. die optimale Portplatzierung anhand einer präoperativ durchgeführten Simulation, die die verschiedenen Gelenkstellungen des Manipulators bezüglich Erreichbarkeit und Überschneidung mit anatomischen Strukturen bewertet. Während des Eingriffs kann die Umsetzung der Planung durch die Visualisierung in der Erweiterten Realität verifiziert werden [TFB+04]. Für Eingriffe mit dem minimalinvasiven Teleskopmanipulationssystem *da Vinci*<sup>®</sup> präsentieren Akinbiyi et al. eine Unterstützung bei der Erstellung chirurgischer Knoten mittels eines ER-Systems. Hierbei werden die an den Instrumenten anliegenden Kräfte auf einem Display visualisiert. Im Rahmen einer Evaluation konnte durch den Einsatz dieses Systems die Anzahl von losen Knoten und gerissenen Fäden verringert werden [ARS+06].

Ein System zur Unterstützung minimalinvasiv durchgeführter Nephrektomien<sup>9</sup> wurde von Baumhauer et al. vorgestellt [BSM+08]. Das System unterstützt den Chirurgen durch die Einblendung relevanter Risikostrukturen und der Tumorposition. Modelle dieser Strukturen werden im Vorfeld der Operation aus den Daten eines bildgebenden Verfahrens generiert. Zu Beginn der Operation werden nadelartige Navigationshilfen in die Niere eingeführt, deren Enden farblich markiert sind (vgl. Abbildung 2.7b). Für die Registrierung werden die Daten eines mobilen C-Bogens verwendet (vgl. Abbildung 2.7a). Die Evaluation erfolgte anhand einer in vitro durchgeführten Studie.

### Assistenz in der Mund-Kiefer-Gesichts- und Wirbelsäulenchirurgie

Goebels et al. untersuchten für den Bereich der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie die Projektion grafischer Operationsplanungsdaten auf ein halbtransparentes sterilisierbares Display, das über den Patienten gehalten wird. Das System wurde im Rahmen von Transplantatanhebungen zur Berechnung und Visualisierung von Osteotomien erfolgreich am Patienten eingesetzt [ZSG+03]. Birkfellner et al. entwickelten einen Prototypen zur Erzeugung Erweiterter Realität auf Basis eines OP-

<sup>9</sup>Tumorentfernungen bei Erkrankungen der Niere.



**Abb. 2.7:** Assistenz für minimalinvasiv durchgeführte Nephrektomien (aus Baumhauer et al. [BSM+08], Fig. 3, © 2008, mit freundlicher Genehmigung von Springer Science und Business Media). (a) Assistenzsystem. (b) In-vitro-Versuch an Tierpräparat.

Mikroskops [BHW+00]. Hierauf aufbauend erfolgte die Anbindung an ein existierendes Operationsplanungssystem zum Setzen dentaler Implantate in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. Das System visualisiert dem Chirurgen die geplante sowie die aktuelle Position des Bohrinstrument direkt im Operationsfeld [BFH+02]. Ein projektorbasierter Ansatz zur Überlagerung von Planungsdaten mit dem Patienten für Eingriffe in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie wurde von Hoppe et al. vorgestellt [HWE+02].

Ein System zur Überlagerung von Kamerabildern mit den Daten eines mobilen C-Bogens wurde von Navab et al. präsentiert [NBM99]. Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes ermöglicht eine Unterstützung für das Setzen von Pedikelschrauben bei Eingriffen an der Wirbelsäule. Dem Chirurgen werden dabei Positionsinformationen zur Führung des Instruments visualisiert [HWE+06]. Traub et al. untersuchten anhand von Phantomexperimenten, inwieweit sich der Einsatz eines ER-Systems auf den Operationsablauf auswirkt. In dem Anwendungsszenario unterstützt das ER-System den Chirurgen bei der Durchführung einer Vertebroplastie<sup>10</sup>, indem das Kamerabild mit den Daten eines mobilen C-Bogens überlagert wird. Untersucht werden die Dauer, die Strahlenbelastung und Abweichungen vom üblichen Operationsablauf [TAP+08]. Eine Navigationsunterstützung in der thoroskopischen Wirbelsäulen Chirurgie zur Überlagerung lokaler anatomischer Strukturen mit den jeweiligen, aus CT-Daten erstellten, virtuellen Modellen wurde von Sauer et al. entwickelt [SVK+06].

<sup>10</sup>Stabilisierung des Wirbelkörpers durch Spezialzement.

### 2.4.2 Interaktion bei klinischen Anwendungen

Die Definition von Azuma [Azu97] benennt die Echtzeitinteraktion als eines von drei Kriterien, die ein ER-System erfüllen muss. Eine Aussage über die notwendige Komplexität der Interaktion wird hierbei jedoch nicht getroffen. Für eine Kategorisierung der Interaktion bezüglich der Benutzerschnittstelle Erweiterte Realität wird auf die allgemeine Klassifikation von Interaktionstechniken von [Dac04] zurückgegriffen. Diese unterscheidet Interaktionstechniken zur direkten Objektinteraktion, zur Manipulation der 3-D-Szene, zur Exploration und Visualisierung sowie zur Anwendungskontrolle.

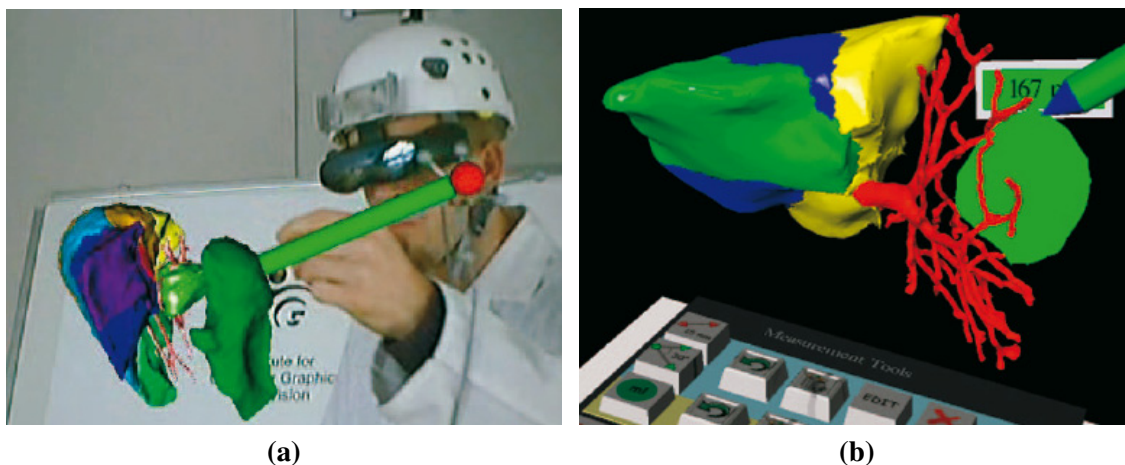
Zur direkten Objektinteraktion zählen die Selektion und Manipulation von Objekten. Bei der Selektion werden ein oder mehrere Objekte aus einer Menge ausgewählt. Exemplarisch ausgesuchte Forschungsarbeiten verwenden für die Selektion beispielsweise das Konzept der virtuellen Hand [BI05], der 3-D-Positionsmarke<sup>11</sup> [WMB03] oder die Verdeckungstechnik<sup>12</sup> [GLB05], die eine Distanzselektion von Objekten ermöglicht. Unter der Manipulation von Objekten versteht [BKL04] die Veränderung von Objektparametern. Einfache Manipulationsaufgaben verändern die Position und Orientierung von Objekten im Raum. Die Parameter entsprechen hierbei den Objektfreiheitsgraden. Eine Interaktionstechnik zur Manipulation der 3-D-Szene ermöglicht die Veränderung von Darstellungsparametern der virtuellen und realen Szene. Als Beispiel für einen Parameter sei die Position der virtuellen Lichtquelle genannt. Bei den Parametern der realen Szene handelt es sich beispielsweise um die Einstellungen des verwendeten Kamerasystems, sofern ein solches verwendet wird. Interaktionstechniken zur Exploration und Visualisierung tragen dem Grundgedanken der Erweiterten Realität - der Verschmelzung von realen Objekten mit virtuellen Informationen - auf besondere Weise Rechnung. Diese Techniken ermöglichen die Untersuchung von einzelnen virtuellen Objekten oder der gesamten Szene. Exemplarisch seien Anwendungen zur Vergrößerung und zur Änderung des Detaillierungsgrads virtueller Objekte genannt [BSP+93, SSS02, GC99]. In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick bezüglich klinisch motivierter Interaktionstechniken präsentiert.

Fischer et al. entwickelten für ER-Anwendungen im Operationssaal eine Visualisierung mit Interaktionssteuerung für die semiautomatische Volumenklassifikation anatomischer Strukturen. Hierbei nutzt der Chirurg ein Instrument, dessen Pose bekannt ist, um Bereiche des Patienten virtuell zu markieren [FBS05]. Bichlmeier et al. entwickelten einen virtuellen Spiegel, der es ermöglicht, die Rückseite virtueller anatomischer Strukturen zu betrachten. Hierzu verwendet er einen Zeigestab von der Größe eines chirurgischen Instruments, an dessen Ende der virtuelle Spiegel visualisiert wird. Durch diese Technik muss der Chirurg weder das virtuelle Modell drehen noch seinen Standpunkt verändern, um rückwärtige Strukturen zu unter-

---

<sup>11</sup>engl.: 3-D-Cursor.

<sup>12</sup>Verdeckung des Objekts durch das Interaktionselement.



**Abb. 2.8:** Interaktion mittels Erweiterter Realität (aus [Rei06], © 2006 IEEE). (a) Visualisierung von Planungsdaten für die Leberchirurgie. (b) Zugehöriges virtuelles Menü.

suchen. Gleichzeitig bleibt die korrekte Überlagerung realer und virtueller Daten erhalten [BSN06].

Zur Planung von Eingriffen in der Leberchirurgie wurde von Reitinger et al. ein interaktives Planungssystem auf Basis der Erweiterten Realität erstellt [Rei06]. Dieses Planungswerkzeug verwendet ein reales Interaktionstablett mit virtuellen Interaktionskomponenten zur Bearbeitung und Visualisierung der Planungsdaten (vgl. Abbildung 2.8). Die Bedienung erfolgt durch ein reales Zeigewerkzeug. Die Pose des Interaktionstabletts, des Zeigewerkzeugs und des für die Visualisierung verwendeten Brillensystems wird durch ein Positionsverfolgungssystem erfasst.

Eine Interaktionstechnik zur System- und Anwendungskontrolle wurde für das *Medarpa*-System<sup>13</sup> realisiert. Es ermöglicht die Steuerung der Einblendung durch eine Interaktion mit dem berührungsempfindlichen halbtransparenten Display zur Überlagerung realer und virtueller Daten [SSS+03].

## 2.5 Diskussion, Erkenntnisse und Forschungsbedarf

In den vorhergehenden Abschnitten wurde deutlich, dass es sich bei den skizzierten Arbeiten zumeist um dedizierte Ansätze zur Lösung spezieller Fragestellungen handelt. Ein umfassender Ansatz zur Erzeugung einer kontextbezogenen Unterstützung ist dem Autor nicht bekannt. In den folgenden Abschnitten wird deshalb die Eignung der vorgestellten Ansätze gesondert betrachtet.

Das Konzept des hierarchischen Modells zur Beschreibung des Operationsablaufs von MacKenzie et al. ermöglicht eine einfache Auswertung des Ablaufs bezüglich

<sup>13</sup>MEDical Augmented Reality for PATients.



verschiedener Aggregationsstufen. Der Ansatz berücksichtigt jedoch lediglich Informationen bezüglich der chirurgischen Instrumente. Des Weiteren fehlt eine formale Basis zur Repräsentation der verwendeten Begriffe. Dies führt zu einem hohen Aufwand bei der Modellerstellung für weitere chirurgische Eingriffe. Dem Standardisierungsaspekt wird ebenfalls nur ungenügend Rechnung getragen. Im Gegensatz dazu basiert das Prozessmodell von Neumuth et al. auf einer Wissensbasis zur Repräsentation der verwendeten Konzepte. Dies erleichtert die Anbindung an existierende Begriffssysteme, beispielsweise zur Beschreibung der Anatomie, und ist somit mit den Standardisierungsbestrebungen aktueller Forschungsarbeiten konform. Allerdings beinhaltet das Prozessmodell in der vorgestellten Form noch keine Möglichkeit zur Abbildung von Veränderungen der anatomischen Strukturen, wie sie durch die chirurgische Tätigkeit verursacht werden. Die Einbeziehung der patientenindividuellen Anatomie birgt jedoch ein hohes Potenzial, um die Operationssituation präzise beschreiben zu können. Dementsprechend soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Repräsentation der Patientenanatomie näher untersucht werden.

Bei den Ansätzen zur Modellierung des Ablaufplans sind die Arbeiten von Jannin et al. und Trevisan et al. besonders hervorzuheben. Beide verknüpfen den chirurgischen Ablaufplan mit den präoperativ erstellten Daten der Operationsplanung. Eine solche Vorgehensweise ist eine notwendige Voraussetzung für die Erzeugung einer kontextbezogenen Visualisierung. Das Visualisierungskonzept von Trevisan et al. erweist sich dabei als sehr mächtig in Bezug auf die Möglichkeiten zur Gestaltung der Visualisierung, erfordert jedoch einen sehr hohen Planungsaufwand. Der Ansatz von Jannin et al. erscheint diesbezüglich vorteilhafter. Beide Arbeiten beinhalten Aspekte, deren Berücksichtigung beim Entwurf des kontextbezogenen Assistenzsystems sinnvoll erscheint.

Die Ansätze zur Analyse dedizierter Eingriffsaspekte beschränken sich zumeist auf eine Untersuchung der Instrumentenführung. Hierzu werden die Trajektorien sowie die auftretenden Kräfte der verwendeten Instrumente erfasst und analysiert. Der Situationskontext lässt sich mit diesen Verfahren nicht ermitteln. Jedoch kann durch einen Einsatz solcher Verfahren ein präziseres Bild der aktuell vorliegenden Operationssituation erstellt werden. Die vorgestellten Ansätze zur Analyse von Ablaufbeschreibungen sind ebenfalls nur bedingt für die Situationsinterpretation eines kontextbezogenen Assistenzsystems zu verwenden, da diese eine Analyse des gesamten Operationsablaufs fokussieren. Bei den Ansätzen zur Interpretation der Ablaufbeschreibungen ist eine differenzierte Betrachtung notwendig. Der Ansatz von Ahmadi et al. zur Synchronisation von Operationsphasen basiert auf einem Normablauf des chirurgischen Eingriffs. Problematisch ist hierbei, wenn die Operationsverläufe des beobachteten Eingriffs und des Normablaufs voneinander abweichen. Bei den Arbeiten zur Interpretation der Ablaufbeschreibung mittels *Hidden-Markov-Modellen* erwiesen sich die Ansätze von Blum et al. mit einer automatisch generierten Topologie als überlegen. Die Lesbarkeit der Modelle für den Menschen wurde

durch die Entwicklung einer geeigneten zusätzlichen Darstellung verbessert. Das Fehlen einer solchen Darstellung erschwert die Interpretation der erlernten Parameter des *Neuronalen Netzes* zur Bestimmung eines bestimmten Operationsabschnitts bei dem Ansatz von James et al. Keines der Verfahren zieht die Verwendung einer Wissensbasis in Betracht, um medizinisches Faktenwissen in den Interpretationsprozess einfließen zu lassen. Ob ein solcher Ansatz von Vorteil wäre, soll im Rahmen dieser Arbeit erforscht werden. Dabei soll nach Möglichkeit auf etablierte Wissensrepräsentationssysteme zurückgegriffen werden.

Für die Visualisierung von Planungsdaten mittels der Erweiterten Realität existiert ein breites Spektrum technischer Lösungen in verschiedenen Disziplinen. Bei den vorgestellten Ansätzen handelt es sich zumeist um Systeme und Algorithmen, die für die Unterstützung eines dedizierten Anwendungsfalls konzipiert wurden. Nach dem Verständnis dieser Arbeit ermöglicht keines der aufgezählten Systeme eine kontextbezogene Unterstützung. Die vorgestellten Interaktionstechniken fokussieren mit wenigen Ausnahmen die Planung chirurgischer Eingriffe. Insgesamt handelt es sich jedoch um Konzepte, deren Anwendung auch in einem intraoperativen Szenario denkbar ist.

# Kapitel 3

## Lösungsansatz für eine kontextbezogene Chirurgieassistenz

### 3.1 Einführung

Das Ziel einer kontextbezogenen Chirurgieassistenz mittels der Erweiterten Realität ist die Unterstützung des Chirurgen durch die Erzeugung einer situationsangepassten Visualisierung. Durch solche Maßnahmen soll die Qualität und Quantität einer Unterstützung des Chirurgen erhöht und ein Beitrag zu einer besseren Patientenversorgung geleistet werden.

Dies erfordert das reibungslose Zusammenspiel einer Vielzahl an Systemkomponenten im Rahmen einer Prozesskette, an deren Anfang die sensorische Erfassung der aktuell vorliegenden Operationssituation und deren Abbildung auf ein Modell stehen. In weiteren Prozessschritten muss dieses Modell analysiert bzw. interpretiert werden, um den Situationskontext zu bestimmen, anhand dessen eine situationsangepasste Visualisierung erzeugt werden kann.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Entwicklung von Konzepten und Verfahren zur Modellbildung, Situationsinterpretation und Visualisierung. Nachstehend wird das allgemeine Lösungskonzept des wissensbasierten Ansatzes vorgestellt und in den darauffolgenden Kapiteln erläutert. Die Umsetzung erfolgt anhand von zwei Eingriffen aus unterschiedlichen chirurgischen Disziplinen:

1. Cholezystektomie (minimalinvasive Chirurgie).
2. Setzen von Dentalimplantaten (Mund-Kiefer-Gesichts-Chirurgie).

Hierzu wird das minimalinvasive Assistenzsystem *MediAssist*<sup>1</sup> vorgestellt und das bestehende Assistenzsystem *Inpres*<sup>2</sup> um Komponenten für eine kontextbezogene Assistenz in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie erweitert.

---

<sup>1</sup>Medical Assistance for Intraoperative Surgical Assistance.

<sup>2</sup>Intraoperative Presentation of Simulation and Planning Data.

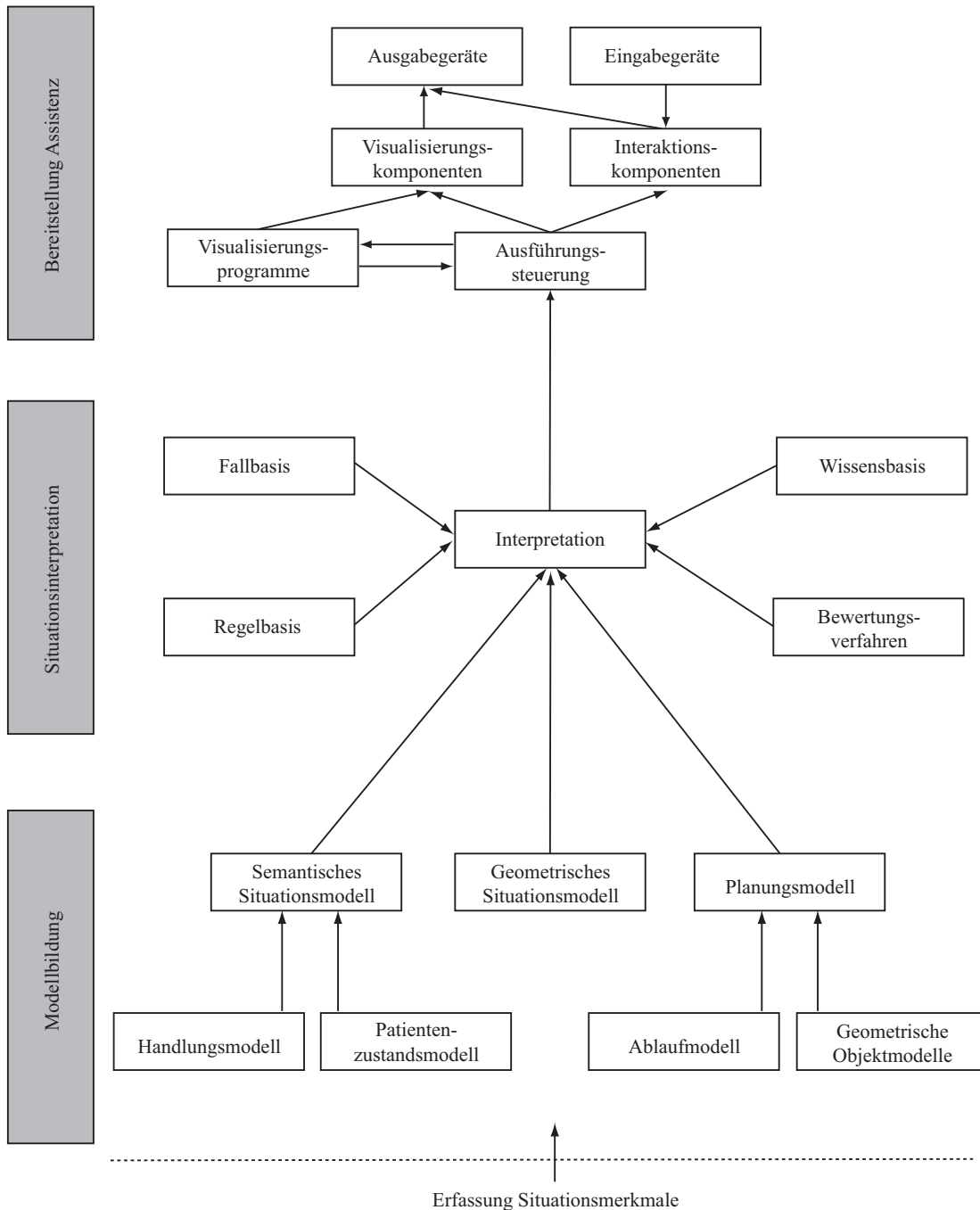
## 3.2 Konzept des wissensbasierten Ansatzes

Die Bezeichnung wissensbasierter Ansatz begründet sich in der Einbeziehung einer Wissensbasis zur Lösung der gestellten Aufgabe. Das Konzept lässt sich in drei eng verzahnte Teilbereiche gliedern: Die Modellbildung, die Situationsinterpretation sowie die Bereitstellung einer Assistenz. In Abbildung 3.1 ist das Gesamtkonzept des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Lösungsansatzes dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur die wichtigsten Komponenten und Beziehungen abgebildet. Im Folgenden wird der entwickelte Lösungsansatz grob umrissen.

Den zentralen Aspekt des kontextbezogenen Assistenzsystems bildet die Situationsinterpretation, anhand derer letztendlich entschieden wird, welche Unterstützung zu generieren ist. Die Grundlage für die Interpretation stellt eine Vielzahl an Modellen dar. Die wichtigsten Modelle sind hierbei das semantische und das geometrische Situationsmodell, die die aktuell vorliegende Operationssituation anhand ihrer Situationsmerkmale beschreiben. Das semantische Situationsmodell enthält Informationen über den Patientenzustand und die chirurgische Handlung. Das geometrische Situationsmodell beschreibt die Lage der Instrumente bezüglich ausgewählter anatomischer Strukturen. Ein weiteres benötigtes Modell ist das Planungsmodell. In diesem werden sämtliche Informationen der Operationsplanung abgelegt. Hierzu zählen der im Vorfeld der Operation festgelegte Operationsablauf sowie geometrische Modelle aus den präoperativ gewonnenen Bilddaten. Letztgenannte Modelle bilden die Grundlage für die Unterstützung des Chirurgen durch eine kontextbezogene Visualisierung. Die Modellbildung wird in Kapitel 4 erläutert.

Der Begriff Situationsinterpretation fasst sämtliche Aktivitäten zusammen, die zur Ermittlung des Situationskontexts beitragen. Unter dem Situationskontext wird dabei die Zuordnung der Operationssituation zu einem Operationsabschnitt bzw. zu einer Klasse von Sondersituationen verstanden. Für die Auswertung der o. g. Situationsmodelle kommen drei Interpretationsverfahren zur Anwendung: Ein fall- und regelbasiertes Verfahren sowie ein Verfahren auf Basis generalisierter Modelle. Das Ziel ist die Nachahmung der chirurgischen Vorgehensweise zur Interpretation einer Operationssituation. Ein Chirurg greift hierzu auf sein Fakten- als auch auf sein Erfahrungswissen zurück. Im wissensbasierten Lösungsansatz wird Faktenwissen in der Wissensbasis sowie in der Regelbasis abgebildet, das Erfahrungswissen mittels Beispielen in der Fallbasis. Die Verfahren zur Situationsinterpretation werden in Kapitel 5 erörtert.

Die Kenntnis des Situationskontexts bildet die Ausgangsbasis für die Erzeugung einer kontextbezogenen Unterstützung. Als Unterstützungsmaßnahmen stehen Komponenten zur Visualisierung von Planungsdaten sowie Interaktionstechniken zur Anpassung der Darstellung zur Verfügung. Die Bereitstellung dieser Maßnahmen erfolgt durch geeignete Eingabe- und Ausgabegeräte unter Verwendung dedizierter Visualisierungsprogramme. Ein solches Visualisierungsprogramm erzeugt die Unterstützung für einen bestimmten Situationskontext, beispielsweise in Gefahrensi-



**Abb. 3.1:** Konzept des wissensbasierten Ansatzes zur Erzeugung einer kontextbezogenen Chirurgieassistenz (vgl. Sudra et al. [SKB+09], © 2009 Gesellschaft für Informatik).

tuationen oder bei der Umsetzung einer vorab geplanten Inzision<sup>3</sup>. In Kapitel 6 werden die Verfahren für eine kontextbezogene Unterstützung präsentiert.

Nachfolgend werden die beiden klinischen Anwendungsgebiete vorgestellt. Dabei wird kurz auf die verwendeten Assistenzsysteme *MediAssist* und *Inpres* eingegangen.

### **3.3 Anwendung des Konzepts in der minimalinvasiven Chirurgie**

Der folgende Abschnitt erörtert die Rahmenbedingungen einer Assistenz in der minimalinvasiven Chirurgie. Im Anschluss wird das *MediAssist*-System, ein kontextbezogenes Assistenzsystem der Erweiterten Realität für die minimalinvasive Chirurgie, vorgestellt. *MediAssist* dient als Entwicklungsplattform für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren zur Modellbildung, Situationsinterpretation und Visualisierung.

#### **3.3.1 Rahmenbedingungen**

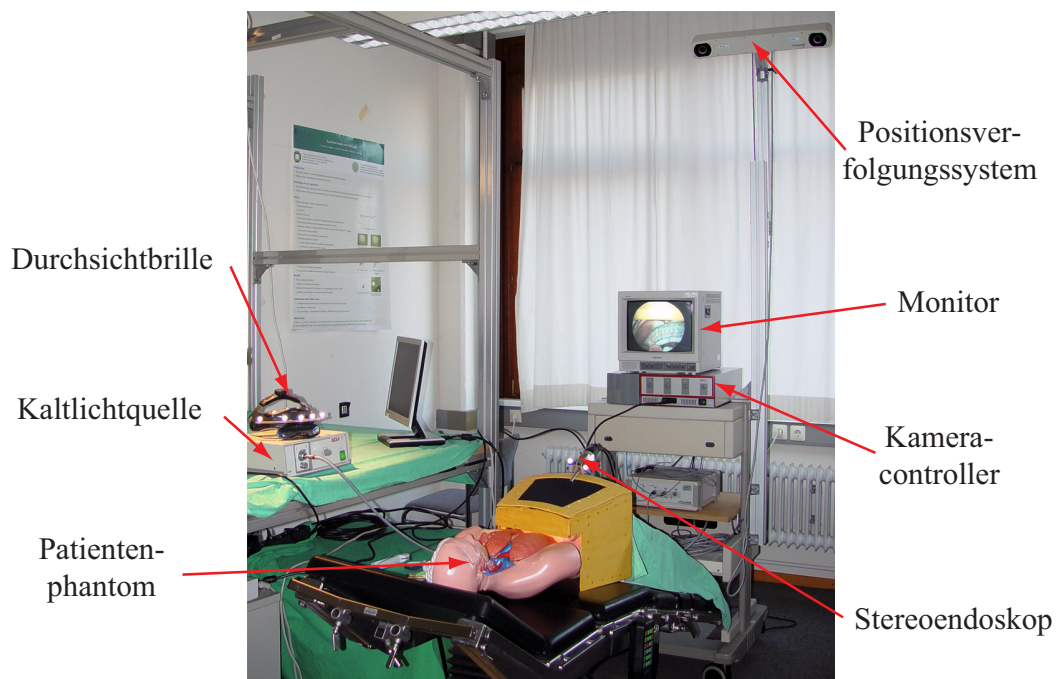
Bei minimalinvasiv durchgeführten chirurgischen Eingriffen erfolgt der Zugang zum Operationsgebiet über kleinste Hautöffnungen oder natürliche Zugänge. Dies bietet eine Vielzahl an Vorteilen für den Patienten, wie beispielsweise ein reduziertes Patiententrauma und eine verringerte Narbenbildung, erfordert vom operierenden Chirurgen jedoch die Handhabung besonderer Instrumente und die Beherrschung spezieller Operationstechniken. Im Gegensatz zu konventionell durchgeführten Eingriffen erfolgt die Betrachtung der Operationsszene über ein sogenanntes Endoskopiesystem. Hierbei handelt es sich um eine spezielle Apparatur, deren Hauptkomponente ein optisches Bildübertragungssystem ist, das ebenfalls in den Körper eingeführt wird. Für den Chirurgen stellt die minimalinvasive Durchführung einer Operation eine zusätzliche Herausforderung dar. Gründe hierfür liegen u. a. in der eingeschränkten Sicht auf das Operationsgebiet und dem verminderten taktilen Empfinden aufgrund der stabförmigen Instrumente. Ebenfalls gewöhnungsbedürftig für den Chirurgen ist die veränderte Körperhaltung während der Operation.

#### **3.3.2 Kontextbezogene Assistenz mit *MediAssist***

Das Ziel von *MediAssist* ist die kontextbezogene Unterstützung des Chirurgen bei minimalinvasiv durchgeführten Eingriffen [SSM+07b]. Das Assistenzsystem erfasst und analysiert die aktuelle Operationssituation anhand endoskopischer Bildsequenzen, interpretiert die Situation durch den wissensbasierten Ansatz und er-

---

<sup>3</sup>Schnitt in Gewebe.



**Abb. 3.2:** Bestandteile des *MediAssist*-Systems in der Experimentierumgebung.

zeugt eine kontextbezogene Unterstützung mittels der Erweiterten Realität. Für die Durchführung von Versuchen wurde eine vorklinische experimentelle Testumgebung geschaffen. Die beiden folgenden Abschnitte beschreiben die Systembestandteile in der Testumgebung und die Prozesskette des *MediAssist*-Systems.

Abbildung 3.2 verdeutlicht die Bestandteile der *MediAssist*-Testumgebung. Das Endoskopiesystem besteht aus einem Kameracontroller (vgl. Anhang B.4), einer Kaltlichtquelle (vgl. Anhang B.5) und einem Monitor, die auf einem Endoskopturm untergebracht sind, sowie aus einem Stereoadskop (vgl. Anhang B.3). Bei diesem handelt es sich um ein optisches Stabliniensystem mit integrierten CCD-Chips, dessen Bilder vom Kameracontroller über einen Video-zu-Firewire-Konverter (vgl. Anhang B.6) auf einen Personal Computer übertragen werden. Die Kaltlichtquelle dient der Beleuchtung der Operationsszene, indem das erzeugte Licht über einen flexiblen Lichtleiter in das Stereoadskop eingespeist und zu dessen Spitze übertragen wird. Auf dem Monitor kann einer der beiden Kamerakanäle angezeigt werden. Es stehen ein Patientenphantom sowie chirurgische Instrumente zur Verfügung. Das Patientenphantom erlaubt die Durchführung von Experimenten an Modellen sowie an anatomischen Strukturen tierischen Ursprungs. Des Weiteren wird ein klinisch etabliertes Positionsverfolgungssystem<sup>4</sup> (vgl. Anhang B.1) eingesetzt, um die Pose des Endoskops, des Patientenphantoms und einer Durchsichtbrille<sup>5</sup> (vgl. Anhang B.2), anhand dessen die Unterstützung bereitgestellt wird, zu ermitteln.

<sup>4</sup>Ebenfalls gebräuchliche Bezeichnung: Trackingsystem.

<sup>5</sup>Für minimalinvasive Anwendungsszenarien: Betrieb im Virtual Reality-Modus.

Die Leistungsfähigkeit der verwendeten Gerätschaften hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Unterstützung. Von ebenso großer Bedeutung ist jedoch die Qualität der Algorithmen zur Erfassung und Interpretation der Operationssituation sowie zur Erzeugung einer geeigneten Unterstützung. Der gesamte Prozess einer kontextbezogenen Assistenz mit *MediAssist* lässt sich dabei in sechs Prozessschritten zusammenfassen:

**1. Perzeption**

Bei der Perzeption wird die aktuelle Operationssituation durch die Bilddaten des Stereoendoskops sensorisch erfasst. Die Bildsequenzen werden zusätzlich vorverarbeitet, beispielsweise zur Bearbeitung von Glanzlichtartefakten.

**2. Quantitative Endoskopie**

Im zweiten Prozessschritt werden die vorverarbeiteten Bildsequenzen mit dem Ziel der Gewinnung möglichst umfangreicher Informationen über die vorliegende Operationssituation ausgewertet. Hierzu zählen beispielsweise die Instrumentenpose sowie ein rekonstruiertes Oberflächenmodell des Operationsgebiets.

**3. Handlungsanalyse**

Im Rahmen der Handlungsanalyse werden die einzelnen Aspekte der chirurgischen Handlung näher untersucht. Dies umfasst die Tätigkeit des Chirurgen, den verwendeten Instrumententyp sowie die eingebrachten chirurgischen Materialien, wie beispielsweise chirurgische Clips und chirurgische Netze.

**4. Modellbildung**

Bei der Modellbildung werden die ermittelten Informationen aus der Quantitativen Endoskopie und der Handlungsanalyse im semantischen und geometrischen Situationsmodell abgebildet. Präoperativ wird das patientenindividuelle Planungsmodell erstellt.

**5. Situationsinterpretation**

Im fünften Prozessschritt wird der Situationskontext der aktuell vorliegenden Operationssituation ermittelt, indem das semantische und das geometrische Situationsmodell interpretiert werden. Dabei kommen drei Interpretationsverfahren zur Anwendung.

**6. Visualisierung und Interaktion**

Die Unterstützung des Chirurgen erfolgt durch die Visualisierung der geometrischen Objektmodelle im Planungsmodell sowie durch die Bereitstellung von Interaktionstechniken.

Die Perzeption, die Quantitative Endoskopie und die Handlungsanalyse des *MediAssist*-Systems werden unter dem Begriff „bildbasierte Analyse endoskopischer



Sequenzen“ zusammengefasst. Detaillierte Informationen bezüglich der verwendeten Methoden und erzielten Ergebnisse finden sich in [Spe09, SBS+08, SKS+08, SZS+09].

Die Modellbildung, die Situationsinterpretation sowie die Visualisierung und Interaktion bilden den Kern des wissensbasierten Ansatzes zur Erzeugung einer kontextbezogenen Assistenz mittels der Erweiterten Realität. In den Kapiteln 4, 5 und 6 werden die zugehörigen Konzepte und Methoden eingehend erörtert.

## 3.4 Anwendung des Konzepts in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie

Wie der folgende Abschnitt zeigt, unterscheiden sich die Rahmenbedingungen einer Assistenz in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie erheblich von denen der minimalinvasiven Chirurgie. Für die Bereitstellung einer kontextbezogenen Assistenz in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie wird im Zuge dieser Arbeit das bestehende Assistenzsystem *Inpres* um Komponenten zur Modellbildung, Situationsinterpretation und Visualisierung erweitert.

### 3.4.1 Rahmenbedingungen

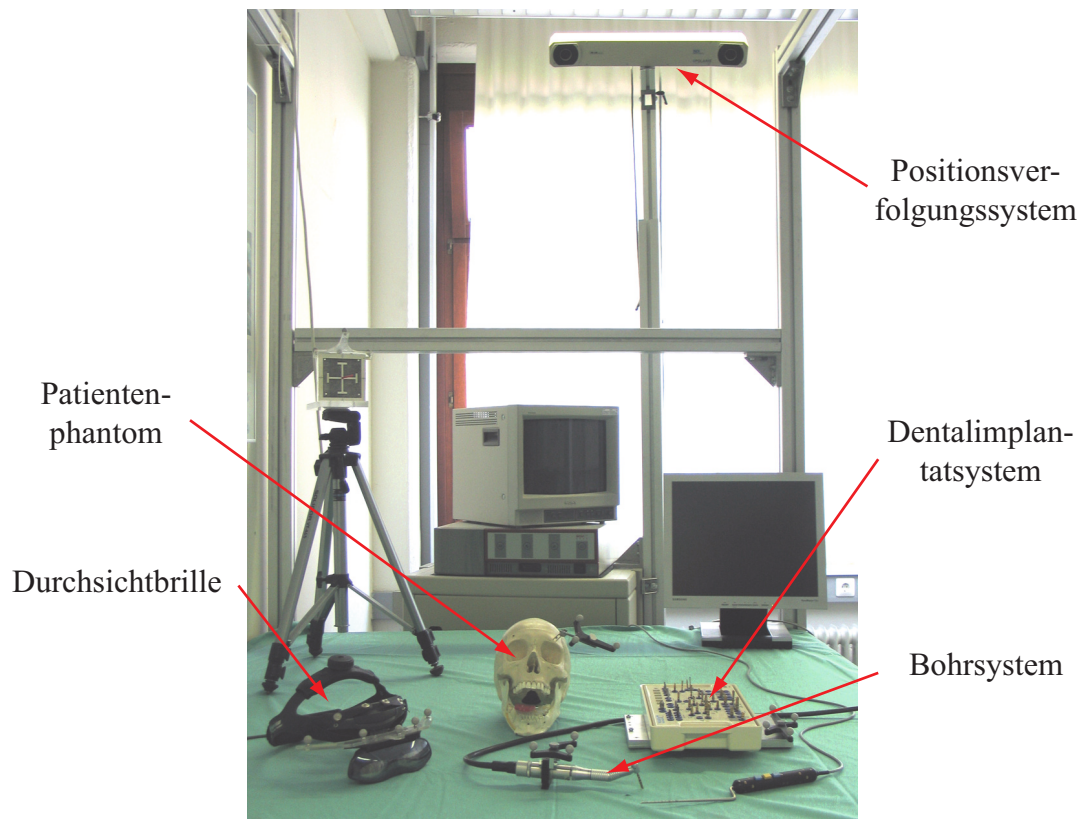
Gegenstand der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie<sup>6</sup> sind Erkrankungen im Bereich der Zähne, der Mundhöhle, des Kiefers und des Gesichts. Zu den häufigsten Erkrankungen zählen hierbei Frakturen, Tumore, Kraniostenosen, Dysgnathien und Zysten. Bei der Behandlung dieser Erkrankungen durch einen chirurgischen Eingriff werden sowohl funktionale als auch ästhetische Ziele verfolgt. Die Anatomie des Kopfes ist vor allem durch die verbundenen Knochen des Kраниums gekennzeichnet. Die knöchernen Strukturen dienen bei einem navigierten Eingriff als starre Referenzobjekte. Dies begünstigt den Einsatz von Assistenzsystemen zur exakten Umsetzung der präoperativ erstellten Operationsplanung. Eine ausführlichere Erörterung dieser Rahmenbedingungen ist in [Sal03] zu finden.

### 3.4.2 Kontextbezogene Assistenz mit *Inpres*

Das klinisch evaluierte *Inpres*-System ermöglicht die Visualisierung anatomischer und pathologischer Daten des Patienten sowie die Darstellung von Zielinformationen direkt im chirurgischen Operationsfeld [SEP+05b]. Hierzu werden Methoden der Erweiterten Realität eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der wissensbasierte Ansatz einer kontextbezogenen Assistenz auf das *Inpres*-System übertragen. Dies erforderte die Erweiterung des Systemkonzepts um Komponenten zur

---

<sup>6</sup>kranio-maxillofaziale Chirurgie.



**Abb. 3.3:** Bestandteile des *Inpres*-Systems in der Experimentierumgebung.

Modellbildung, Situationsinterpretation und Visualisierung. Die beiden folgenden Abschnitte beschreiben die Systembestandteile der experimentellen Testumgebung und die Prozesskette des erweiterten *Inpres*-Systems.

Der wichtigste Bestandteil des Systems ist eine optische Durchsichtbrille, in der die reale Operationsszene mit den virtuellen Planungsdaten überlagert wird. Das Gerät erzeugt eine Visualisierung durch Projektion des rechnergenerierten Bildes auf einen halbdurchlässigen Spiegel (vgl. Anhang B.2). Das Konzept der kontextbezogenen Assistenz mit dem erweiterten *Inpres*-System soll an einem häufigen Eingriff in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie, dem Setzen von Dentalimplantaten (vgl. Abschnitt 7.3.1), untersucht werden. Dies erfordert die Einbeziehung eines Dentalimplantat- und Bohrsystems (vgl. Anhang B.8). Für die Versuchsdurchführung steht ein *Astra Tech Implantatsystem<sup>TM</sup>* zur Verfügung. Die benötigten Bohrer sind in einer Kunststoffkassette untergebracht. Die Experimente erfolgen an einem Patientenphantom. An der Durchsichtbrille, am Winkelstück des Bohrsystems, am Patientenphantom und an der Kunststoffkassette des Dentalimplantatsystems sind Marker befestigt, die mit einem klinisch etablierten Positionsverfolgungssystem (vgl. Anhang B.1) erfasst werden (vgl. Abbildung 3.3).

Anhand der verwendeten Gerätschaften wird deutlich, dass für die Erfassung der Operationssituation lediglich die Informationen des Positionsverfolgungssystems

zur Verfügung stehen. Dies ermöglicht eine Darstellung der Prozesskette des erweiterten *Inpres*-Systems in vier Prozessschritten:

**1. Erfassung Positionsdaten**

Das Positionsverfolgungssystem erfasst Pose<sup>7</sup>-Informationen der relevanten anatomischen Strukturen, des Bohrsystems, der Kunststoffkassette des Implantatsystems und der Durchsichtbrille des behandelnden Chirurgen.

**2. Modellbildung**

Im Rahmen der Modellbildung wird ein geometrisches Situationsmodell der Operationssituation erstellt. Hierzu werden die erfassten Pose-Informationen entsprechend ausgewertet.

**3. Situationsinterpretation**

Im dritten Prozessschritt wird das geometrische Situationsmodell mittels des fall- und regelbasierten Verfahrens interpretiert. Das Ziel ist die Erkennung von Gefahren- und Plansituationen.

**4. Visualisierung und Interaktion**

In Abhängigkeit des Situationskontexts erzeugt das Assistenzsystem eine Unterstützung zur Planumsetzung und warnt den Chirurgen bei Gefahrensituationen.

## 3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der wissensbasierte Ansatz einer kontextbezogenen Chirurgieassistenz mittels der Erweiterten Realität vorgestellt. Die Anwendung des Lösungsansatzes wurde für zwei klinische Anwendungsgebiete, die minimalinvasive Chirurgie und die Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie, skizziert.

Erstmals wird die Eignung eines wissensbasierten Ansatzes für die Interpretation von Operationssituationen untersucht. Neuartig ist die Nachahmung der chirurgischen Vorgehensweise zur Situationsinterpretation durch eine Kombination aus Fakten- und Erfahrungswissen anhand der Definition einer Wissens-, Regel- und Fallbasis. Dabei werden insgesamt drei Interpretationsverfahren entwickelt. Die Grundlage dieses Ansatzes bildet die Verwendung einer semantisch fundierten Wissensrepräsentation, die die Wiederverwendbarkeit existierender Wissensrepräsentationssysteme erlaubt und das Vokabular für die Modellbildung bereitstellt.

Die Erzeugung einer kontextbezogenen Assistenz in der minimalinvasiven Chirurgie erfolgt durch das *MediAssist*-System, für Anwendungen in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie wird das bestehende *Inpres*-System erweitert. Für beide Systeme

---

<sup>7</sup>Position und Orientierung.

werden Komponenten zur Modellbildung, Situationsinterpretation und Visualisierung benötigt. In den nachfolgenden Kapiteln 4, 5 und 6 werden die hierfür entwickelten Methoden und Konzepte erörtert. Die in diesen Kapiteln verwendeten Beispiele entstammen dem Anwendungsgebiet der minimalinvasiven Chirurgie. Auf das Anwendungsgebiet der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie wird in Abschnitt 7.3 näher eingegangen. Die Evaluation der Verfahren wird in Kapitel 7 vorgestellt. Dabei werden Experimente mit dem *MediAssist*- als auch dem *Inpres*-System durchgeführt.

# Kapitel 4

## Wissensrepräsentation und Modellbildung

### 4.1 Einführung

Die Aufgabe der Wissensrepräsentation besteht in der Organisation und Darstellung des Wissens für den im vorigen Kapitel vorgestellten Lösungsansatz. Hierzu zählen beispielsweise Informationen bezüglich des Patienten, des Eingriffs und der Operationsplanung. Der verwendete Repräsentationsformalismus hat dabei weitreichende Konsequenzen in Bezug auf die sich anschließende Modellbildung. Die Modelle wiederum bilden die Grundlage für die nachfolgende Situationsinterpretation.

Aus diesen Gründen ist ein besonderes Augenmerk auf die Wahl des Repräsentationsformalismus zu legen. Von Vorteil wären dabei eine semantisch fundierte Darstellung des Wissens sowie die Anwendbarkeit von Schlussfolgerungsalgorithmen. Die tragende Rolle der Wissensrepräsentation für das Gesamtkonzept schließt zudem eine Ad-hoc-Modellierung aus und erfordert nach Möglichkeit die Einbeziehung medizinisch etablierter Wissensrepräsentationssysteme.

Im Rahmen der Modellbildung müssen Modelle zur Abbildung der Operationssituation und der Operationsplanung entwickelt werden. Es ist zu klären, welche Aspekte hierbei berücksichtigt werden müssen und wie diese für eine weiter gehende Verarbeitung im Rahmen der Situationsinterpretation repräsentiert werden können. Im Hinblick auf die Modellierung einer Operationssituation ist vor allem zu erforschen, wie der Zustand des Patienten abgebildet werden kann. Des Weiteren ist zu untersuchen, inwiefern ein auf die kontextbezogene Assistenz zugeschnittenes Planungsmodell aussehen kann.

Die Entwicklung der Wissensrepräsentation erfolgt für das in Kapitel 3 vorgestellte *MediAssist*-System mit dem Anwendungsziel einer kontextbezogenen Assistenz bei Cholezystektomien. Die Anwendung des Konzepts für das Setzen von Dentalimplantaten mit dem erweiterten *Inpres*-System wird in Kapitel 7 präsentiert.

## 4.2 Anwendungsbeispiel Cholezystektomie

Das Konzept der kontextbezogenen Assistenz wird für den exemplarischen Eingriff der Cholezystektomie erläutert, einem der am häufigsten durchgeführten Eingriffe überhaupt. Hierbei wird die Gallenblase operativ entfernt. Zu den Indikationen einer Cholezystektomie zählen beispielsweise Entzündungen und Karzinome der Gallenblase. Heutzutage erfolgt die Durchführung einer Cholezystektomie in 95 % aller Fälle minimalinvasiv [Dor07]. Im Folgenden wird der Idealablauf einer minimalinvasiv durchgeführten Cholezystektomie näher erläutert (vgl. Anhang A.1).

Der Eingriff beginnt mit der Errichtung des Pneumoperitoneums. Dabei wird in der Nähe des Bauchnabels eine Kanüle für die Insufflation des Bauchraums mit Kohlenstoffdioxid gesetzt. Dies führt zu einer Anhebung der Bauchdecke und erleichtert die Arbeit des Chirurgen. Nach der Durchführung von Sicherheitstests auf Verletzungen wichtiger Organe werden im zweiten Arbeitsschritt der Optiktrokar für das Endoskop und die Arbeitstrokare für die chirurgischen Instrumente platziert. Das Endoskop und die chirurgischen Instrumente werden eingeführt und der Chirurg beginnt mit der Freilegung der Gallenblase, indem er diese über den Leberrand spannt und eventuell vorhandene Adhäsionen<sup>1</sup> entfernt. Im folgenden vierten Arbeitsschritt wird das sogenannte Calot'sche Dreieck, das Bauchfellareal an der Leberunterseite, freigelegt. Hierzu wird zunächst das Bauchfell im Bereich des Infundibulums<sup>2</sup> geöffnet. Im Anschluss werden der Ductus Cysticus<sup>3</sup> und die Arteria Cystica<sup>4</sup> zirkulär freigelegt. Im fünften Arbeitsschritt wird die Gallenblase abgesetzt, indem der freigelegte Ductus Cysticus und die Arteria Cystica dreifach geclippt und anschließend durchtrennt werden. Daraufhin werden im sechsten und siebten Schritt die Gallenblase aus dem Leberbett gelöst und das Leberbett verschorft, um die auftretenden Blutungen zu stillen. Die nun abgelöste Gallenblase wird im achten Arbeitsschritt durch Einführen eines Bergebeutel evakuiert. In den Arbeitsschritten neun und zehn werden zunächst die Bauchdecke und anschließend die Haut verschlossen.

Durch eine Analyse des Ablaufs werden Ansatzpunkte für eine Unterstützung ermittelt. Infrage kommt eine planmäßige Unterstützung beim Setzen der Trokarpositionen, beim Freilegen des Calot'schen Dreiecks sowie beim Clippen und Durchtrennen der Arteria Cystica und des Ductus Cysticus. Zusätzlich bietet sich die Möglichkeit an, den Chirurgen vor einer unbeabsichtigten Verletzung sogenannter Risikostrukturen zu warnen, da eine Verletzung dieser Strukturen zu ernsthaften Komplikationen oder bleibenden Folgeschäden für den Patienten führen kann. Die Ausgangsbasis für die Erzeugung einer solchen Unterstützung bildet die korrekte Interpretation der aktuell vorliegenden Operationssituation. Dies erfordert die

---

<sup>1</sup>Verwachsungen.

<sup>2</sup>Teil der Gallenblase.

<sup>3</sup>Gallenblasengang.

<sup>4</sup>Gallenblasenarterie.

Repräsentation der Operationssituation, der Operationsplanung und der Unterstützungsmöglichkeiten in dem verarbeitenden Rechnersystem.

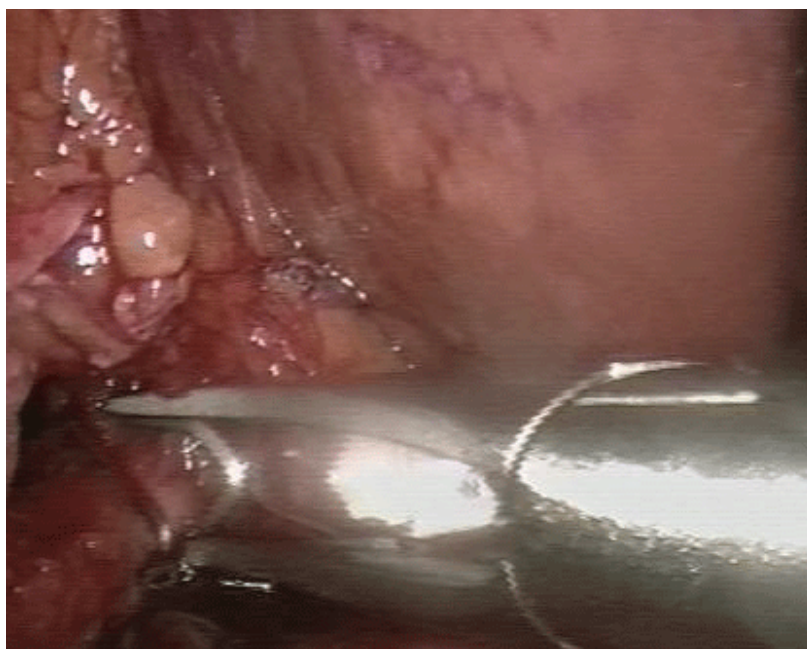
### 4.3 Merkmalsanalyse

Bei der Erstellung einer Wissensrepräsentation werden nach dem Vorgehensmodell von [Rei92] zunächst die abzubildenden Merkmale identifiziert. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick bezüglich der relevanten Merkmale für eine kontextbezogene Assistenz. Eine detaillierte Analyse erfolgt im Rahmen der Erstellung der Wissensrepräsentation in Abschnitt 4.6.

Im Zentrum der Betrachtung stehen die Operationssituation und die Operationsplanung des betrachteten Eingriffs. Die Merkmale zur Beschreibung einer Operationssituation werden im Folgenden als Situationsmerkmale bezeichnet. Abbildung 4.1 zeigt eine häufig auftretende Situation einer Cholezystektomie, die wie folgt beschrieben werden kann: *„Die Gallenblase wurde noch nicht vom Leberbett gelöst. Die Arteria Cystica und der Ductus Cysticus wurden geclippt, aber noch nicht durchtrennt. Der Chirurg verwendet einen Clip-Applikator, um einen zweiten Clip am Ductus Cysticus zu setzen.“* Eine exemplarische Beschreibung dieser Operationssituation setzt die Abbildung der folgenden Beschreibungselemente in der Wissensrepräsentation voraus: das chirurgische Instrument Clip-Applikator samt Clips; die ausgeführte Tätigkeit Clippen; die anatomischen Strukturen Gallenblase, Ductus Cysticus, Arteria Cystica und die Leber bzw. das Leberbett. Ferner werden Beschreibungselemente benötigt, um auszudrücken, dass sich Clips auf dem Ductus Cysticus und der Arteria Cystica befinden und dass die Gallenblase mit dem Leberbett verbunden ist.

Folglich wird eine Operationssituation vor allem durch den Zustand des Patienten und die chirurgische Handlung charakterisiert. Zu den Merkmalen des Patienten zählen der Zustand der anatomischen und pathologischen Strukturen sowie die räumlichen und funktionalen Beziehungen zwischen diesen Strukturen. Im Verlauf einer Operation werden die Strukturen durch den Chirurgen bearbeitet, wodurch sich deren Gestalt und Funktionalität verändern. Merkmale der chirurgischen Handlung sind in Anlehnung an den Ansatz von [NDM+06] die behandelte Struktur, die verwendeten chirurgischen Instrumente und die ausgeführte chirurgische Tätigkeit.

Die Operationsplanung umfasst den patientenindividuell festgelegten Ablaufplan sowie die präoperativ erstellten Bilddaten. Je nach Art der Bilddaten bietet sich eine Verarbeitung und Nutzung dieser Daten für die Erzeugung einer kontextbezogenen Unterstützung an. Dies erfordert die Verknüpfung von Ablaufplan und Bilddaten. Hierdurch wird beispielsweise die Visualisierung bestimmter Daten durch Aufruf einer geeigneten Unterstützungsfunktion in einem vorher festgelegten Operationsabschnitt ermöglicht. Zu den Merkmalen des Ablaufplans zählen die Anzahl und



**Abb. 4.1:** Setzen eines Clips am Ductus Cysticus.

die Abfolge der einzelnen Ablaufschritte sowie die zugehörigen Unterstützungsfunktionen.

## 4.4 Anforderungen an die Wissensrepräsentation

Reimer definiert den Begriff Wissen als „*die Menge aller von ihm (Anmerkung: Wissensträger) als wahr angenommenen Aussagen über die repräsentierte Welt, die tatsächlich wahr sind.*“ [Rei92]. Für die Erfassung von Symbolen, die einem Ausschnitt der zu repräsentierenden Welt entsprechen, verwenden Bachmann et al. den Begriff Repräsentationsstruktur [BL85]. Reimer ergänzt diese Repräsentationsstruktur in [Rei92] um eine Interpretationsvorschrift in der festgelegt ist „*wie die Strukturen der Repräsentation auf die Merkmale der repräsentierten Welt abzubilden sind.*“

Die Verwendung des Begriffs Wissensrepräsentation in der vorliegenden Arbeit leitet sich aus diesen Definitionen ab und bezeichnet die symbolische Darstellung von Wissen anhand einer festgelegten Interpretationsvorschrift. Aufgrund der Notwendigkeit zur Modellierung domänenspezifischer Aspekte wird das kontextbezogene Assistenzsystem zur Klasse der wissensbasierten Systeme<sup>5</sup> gezählt. Die Klärung der Anforderungen an solch eine Wissensrepräsentation bedingt die gesamtheitliche Analyse der kontextbezogenen Unterstützung hinsichtlich inhaltlicher und methodischer Aspekte.

---

<sup>5</sup>Der Begriff „wissensbasiertes System“ etablierte sich für die Bezeichnung domänenabhängiger Verfahren [GP77].



Die inhaltliche Analyse gibt Antwort auf die Frage, welche Anforderungen bei der Abbildung der Operationssituation und der Operationsplanung erfüllt sein müssen. Ebenfalls von Bedeutung ist die Abbildung ausgewählter Systemkomponenten, beispielsweise zur flexiblen Nutzung von Visualisierungstechniken. Eine detaillierte Betrachtung der bereits angesprochenen Merkmale ist notwendig, um diese in einer symbolischen Repräsentation durch Objektbezeichner, Objekteigenschaften und Objektabhängigkeiten in der Wissensrepräsentation ablegen zu können.

Die methodische Analyse stellt sicher, dass ein optimaler Kompromiss zwischen der Ausdrucksmächtigkeit der Modellierung und der Anwendbarkeit von Algorithmen zur Bearbeitung dieses Wissens gewählt wird. Aus der inhaltlichen und methodischen Analyse ergeben sich folgende Anforderungen an die Wissensrepräsentation eines kontextbezogenen Assistenzsystems:

- **Repräsentation sämtlicher Merkmale**

Für eine kontextbezogene Chirurgieassistenz werden Modelle der Operationssituation und der Operationsplanung benötigt. Die zugehörigen Merkmale wurden in Abschnitt 4.3 vorgestellt. Die Repräsentation dieser Merkmale ist eine zwingend notwendige Voraussetzung für die Realisierung des wissensbasierten Lösungsansatzes. Der Repräsentationsformalismus muss ferner die Handhabung von patientenunabhängigem und patientenindividuellem Wissen vereinen, um den Modellieraufwand eines konkreten Eingriffs so gering wie möglich zu halten. Die Verwendung von Symbolen zur Repräsentation von Situationsmerkmalen erfordert die Definition von Vorschriften, wie diese Symbole mit Aspekten der realen Welt verknüpft werden. Die Vorgehensweise zur Erstellung einer solchen Verknüpfung in verschiedenen Anwendungsszenarien wird in der Literatur seit Langem diskutiert [TF05].

- **Verständlichkeit für den Menschen**

Die Erfassung von Wissen erfolgt in der Regel durch einen technischen Experten in Kooperation mit einem Spezialisten für das jeweilige Fachgebiet, in diesem Fall also einem Chirurgen. Zur Erleichterung der Kommunikation zwischen dem technischen und klinischen Experten ist es von Vorteil, wenn sich die Wissensrepräsentation an den menschenüblichen Denkweisen zur Strukturierung von Wissen orientiert. Eine einfach zu bedienende und intuitiv verständliche Mensch-Maschine-Schnittstelle erhöht die Akzeptanz des Nutzers gegenüber dem jeweiligen System. Die Anwendung des kontextbezogenen Assistenzsystems setzt eine Verknüpfung der patientenindividuellen Planungsdaten mit den Symbolen der systemeigenen Wissensrepräsentation voraus. Diese Verknüpfung erfolgt im Rahmen der Operationsplanung und bedeutet für den planenden Chirurgen einen zusätzlichen Aufwand. Eine verständliche Darstellung dieser Repräsentation erleichtert dem Chirurgen diese Aufgabe aufgrund der Möglichkeit zur Denkweise in seinen gewohnten Kategorien.

- **Erweiterbarkeit und Flexibilität**

Die Erweiterbarkeit und Flexibilität der Wissensrepräsentation sind eine unabdingbare Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz eines kontextbezogenen Assistenzsystems. Teilweise bedingen erhebliche Variationen bezüglich der anatomischen und pathologischen Gegebenheiten eines Patienten einen individuellen Operationsablaufplan. Neue Erkenntnisse der klinischen Forschung führen zu neuen Operationstechniken und Operationsstrategien, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Ein weiteres Ziel ist die Übertragbarkeit des Konzepts auf unterschiedliche Eingriffe, nach Möglichkeit auch in verschiedene chirurgische Disziplinen. Deshalb soll die Wissensrepräsentation als Menge von modularen, gekapselten Komponenten unabhängig vom restlichen System entworfen werden. Als letzte Forderung sei die Anbindung existierender Wissensrepräsentationssysteme genannt.

- **Formalisierbarkeit und Verarbeitungsmechanismen**

Eine maschinelle Verarbeitung des vorhandenen Wissens kann nur durch eine geeignete formale und maschinenlesbare Darstellung erzielt werden. Die Art und Weise der Repräsentation ist dabei maßgeblich für die Anwendbarkeit der Verarbeitungsmechanismen. Bibel identifiziert hierzu das Hinzufügen, Entfernen, Auffinden und Ziehen von Schlüssen als die vier bedeutendsten Verarbeitungsmechanismen, auch Operationsarten genannt [Bib93]. Deren Anwendbarkeit ist eine Grundvoraussetzung für die Realisierung eines kontextbezogenen Assistenzsystems und ermöglicht beispielsweise die Sicherstellung der Konsistenz des repräsentierten Wissens sowie die Nutzung von Schlussfolgerungsalgorithmen zur Situationsinterpretation.

## 4.5 Wahl eines Repräsentationsformalismus

Die Repräsentation von Wissen und die Möglichkeit, dieses zu verarbeiten, sind wesentliche Einflussfaktoren für die Leistungsfähigkeit eines wissensbasierten Systems. Die Wahl eines Repräsentationsformalismus hat Auswirkung auf beide dieser Faktoren und ist somit sehr sorgfältig unter Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile zu treffen. Die Bewertung existierender Repräsentationsformalisten bezüglich des kontextbezogenen Assistenzsystems erfolgt anhand der definierten Anforderungen. Dabei werden, entsprechend der Empfehlung von [Bib93], die Repräsentationsformalisten nicht unabhängig von ihren Operatoren betrachtet. Ein Schwerpunkt wird auf die Anwendbarkeit von Schlussfolgerungsalgorithmen gelegt. Diese werden für die Interpretation des Situationsmodells benötigt.

### 4.5.1 Analyse existierender Formalismen

Eine vollständige Beschreibung sämtlicher Repräsentationsformalismen würde den Umfang dieser Arbeit sprengen, weswegen der geneigte Leser an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen wird. Bei der Bewertung der ausgewählten Formalismen werden die Ergebnisse einer allgemeinen Analyse von Reimer herangezogen [Rei92]. Folgende Repräsentationen werden untersucht:

- **Semantische Netze**

Die Familie der semantischen Netze erhielt ihren Namen aufgrund der Ähnlichkeit der bildhaften Darstellung mit einer Netzstruktur. Die Ursprünge dieser Repräsentationsformalismen entstammen dem Forschungsgebiet der Kognitionspsychologie. Ziel war die Erstellung eines Modells des menschlichen Gedächtnisses. Das Modell besteht aus einer Menge von Konzepten und einer Menge von Beziehungen zwischen diesen.

Die Darstellungsmächtigkeit semantischer Netze unterliegt generell nur geringen Einschränkungen. So lassen sich mit semantischen Netzen auch Bedingungen und regelhaftes Wissen darstellen. Solch komplexe Sachverhalte können allerdings nur sehr umständlich und aufwändig modelliert werden. Zusätzlich leidet die Übersichtlichkeit und damit auch die Lesbarkeit für den Menschen. Die Erweiterung der Wissensrepräsentation durch Hinzufügen neuer Inhalte ist möglich, erfordert jedoch eine formal spezifizierte Semantik, um Fehlinterpretationen verschiedener Nutzer zu vermeiden. Operationen auf semantischen Netzen können als Problem der Graphtraversierung effizient realisiert werden.

- **Frames**

Genau wie die semantischen Netze haben auch Frames ihre Ursprünge im Forschungsgebiet der Kognitionspsychologie. Im Gegensatz zu den semantischen Netzen beziehen sich Frames jedoch auf schematische Modelle der Gedächtnisstruktur. Unter einem Schema versteht man hierbei ein stereotypisches Erinnerungsmuster, welches dem menschlichen Erfahrungswissen nachempfunden ist. Bei der Bewertung einer Situation greift der Mensch auf dieses Erfahrungswissen zurück und erzeugt eine Erwartungshaltung anhand der zugehörigen Erinnerungen. Diese Erwartungshaltung bewirkt eine situationsabhängige Interpretation aller weiteren Beobachtungen. Eine Nachbildung dieser Schemata wurde von [Min75] entwickelt. Sämtliches für ein Konzept relevantes Wissen wird in einer einzigen Struktur, genannt Frame, dargestellt.

Frames eignen sich besonders zur Repräsentation von Wissen in stark strukturierten Anwendungsumgebungen, bei denen das Wissen objektbezogen dargestellt werden kann. Insofern würde sich eine Wissensrepräsentation mittels

Frames für die Situationsmodellierung eines Assistenzsystems prinzipiell eignen. Allerdings ergibt sich bei Frames, wie auch bei semantischen Netzen, eine sehr umständliche Repräsentation von Regelwissen und einschränkender Bedingungen. Aufgrund der dem Menschen nachempfundenen Speicherungsstruktur wird die Lesbarkeit für den Menschen als gut angesehen. Das Nichtvorhandensein einer formalen Semantik kann jedoch zu Inkonsistenzen innerhalb der Wissensrepräsentation führen.

- **Logikbasierte Verfahren**

Im Gegensatz zu semantischen Netzen und Frames ist der Ursprung der Logik nicht in den Kognitionswissenschaften, sondern in der Philosophie angesiedelt. Die Modellierung mit einer Logik orientiert sich also nicht an Modellen des menschlichen Gedächtnisses. Daraus ergibt sich ein wesentlicher Unterschied zur Wissensrepräsentation mit semantischen Netzen oder Frames: Einer logikbasierten Wissensrepräsentation fehlt die Objektbezogenheit des repräsentierten Wissens aufgrund der verteilten Darstellung des Wissens mittels Termen und Formeln.

Logikbasierte Wissensrepräsentationen besitzen per Definition eine wohldefinierte Semantik und Syntax. Weiterhin stellen diese ausdrucksmächtigen Repräsentationen umfangreiche Schlussfolgerungsmechanismen zur Verfügung. Dies sind wesentliche Vorteile für die Anwendung bei einem kontextbezogenen Assistenzsystem. Die Lesbarkeit der Wissensrepräsentation für den Menschen kann durch geeignete Werkzeuge und Darstellungsformen verbessert werden.

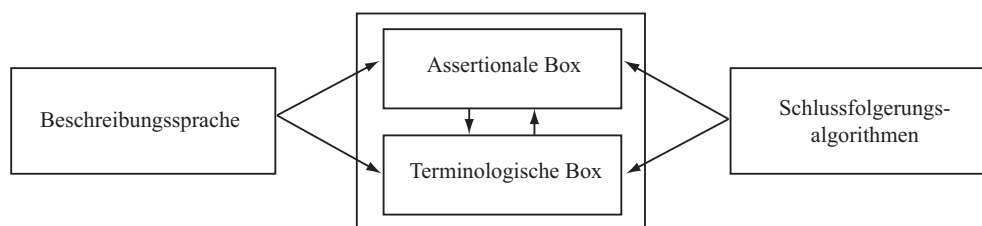
Aufgrund der wohldefinierten Semantik sowie der einfachen Anwendbarkeit von Schlussfolgerungsalgorithmen fällt die Wahl auf eine logikbasierte Repräsentation des Wissens. Eine Analyse sämtlicher logikbasierter Formalismen, zu denen u. a. die Aussagenlogik, Temporallogik, Modallogik und Beschreibungslogik gehören, würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Mit Verweis auf die Forschungsarbeiten von Neumann et al. konzentriert sich die folgende Betrachtung auf die Sprachfamilie der Beschreibungslogiken [NM08].

## 4.5.2 Repräsentation mit einer Beschreibungslogik

Beschreibungslogiken können auf eine Prädikatenlogik erster Ordnung zurückgeführt werden und stellen damit ein sehr ausdrucksstarkes Modellierungsinstrumentarium zur Verfügung [BL85]. Die verwendeten Sprachkonstrukte entscheiden hierbei über Berechenbarkeit und Entscheidbarkeit der zugehörigen Schlussfolgerungsalgorithmen. Beschreibungslogiken traten zunächst unter dem Begriff der terminologischen Systeme und später als sogenannte Konzeptsprachen<sup>6</sup> in Erscheinung.

---

<sup>6</sup>engl.: Concept language.



**Abb. 4.2:** Komponenten eines Wissensrepräsentationssystems auf Basis einer Beschreibungssprache (aus Baader et al. [BCM03], © 2003 Cambridge University Press).

Der erste Begriff drückt die Verwendung zur Bereitstellung einer Terminologie der modellierten Domäne aus. Die Bezeichnung als Konzeptssprache stellt darüber hinaus die Möglichkeit zur Definition komplexer Konzepte in den Vordergrund. Details der Entwicklungsgeschichte sind in [BCM03] nachzulesen.

Beschreibungslogiken werden in vielfältiger Weise eingesetzt, beispielsweise bei Anwendungen des *Semantischen Internets*<sup>7</sup>, in der Medizin, bei der Organisation von Datenbanken oder bei der Sprachverarbeitung [SBR97, BCM03]. Der Begriff Beschreibungssprache steht für eine ganze Sprachfamilie. Ein Ansatz, der diese Sprachfamilie für die Anwendung einer Ontologiesprache (*OWL*<sup>8</sup>) anhand ihrer Ausdrucksmächtigkeit in die drei grundlegenden Klassen *OWL-Lite*, *OWL-DL*, *OWL-Full* einteilt, stammt von [SWM04]<sup>9</sup>. Für praktische Anwendungen wird oftmals eine Beschreibungssprache aus der Klasse *OWL-DL* gewählt. Diese stellt ein für die meisten Anwendungsbereiche ausreichendes Maß an Modellierungskonstrukten bei gleichzeitiger Entscheidbarkeit der Schlussfolgerungsalgorithmen zur Verfügung. Der schematische Aufbau eines Wissensrepräsentationssystems auf Basis einer Beschreibungssprache kann entsprechend Abbildung 4.2 dargestellt werden. Die eigentliche Wissensrepräsentation erfolgt dabei in der sogenannten *Terminologischen Box (TBox)* und in der *Assertionalen Box (ABox)*.

In der *Terminologischen Box* wird das allgemeine, statische Wissen des Anwendungsbereichs repräsentiert. Dazu werden Konzepte und deren Konzepteigenschaften definiert, um die Domänenaspekte zu repräsentieren. Der häufig auftretende Fall, dass ein Konzept ein anderes Konzept subsumiert, führt zu einer baumartigen Struktur der resultierenden *TBox*. Aus diesem Grund existiert eine zweite Bezeichnung der Abkürzung *TBox*: *Taxonomische Box*.

In der *Assertionalen Box* wird das spezifische Wissen eines konkreten Anwendungsfalls repräsentiert. Die Bezeichnung als assertionales Wissen, d. h. zugesichertes Wissen, drückt hierbei die Verbundenheit des allgemeinen mit dem spezifischen

<sup>7</sup>engl.: Semantic web.

<sup>8</sup>Ontology Web Language.

<sup>9</sup>World Wide Web Consortium (W3C).

Wissen aus: Einem Element der *ABox*, gemeinhin als Instanz bezeichnet, werden die Eigenschaften eines assoziierten *TBox*-Konzepts zugeschrieben.

Die Beschreibungssprache bestimmt die Ausdrucksmächtigkeit der Modellierung sowie die anwendbaren Schlussfolgerungsalgorithmen. Eine Einschränkung dieser Ausdrucksmächtigkeit bedeutet hierbei Einschränkungen bei der Modellierung von Konzepteigenschaften. Die Ausführung der Schlussfolgerungsalgorithmen erfolgt sowohl auf der *TBox* als auch auf der *ABox*.

## 4.6 Entwurf einer Wissensrepräsentation

Im Folgenden wird der Entwurf einer Wissensrepräsentation für das kontextbezogene Assistenzsystem auf Basis einer Beschreibungslogik vorgestellt. Durch die Wahl einer konkreten Beschreibungssprache werden die Ausdrucksmächtigkeit der Wissensrepräsentation und die Anwendbarkeit von Schlussfolgerungsalgorithmen festgelegt. Bei der Vorgehensweise zur Erstellung der Wissensrepräsentation wird auf existierende Schemata zurückgegriffen, um sicherzustellen, dass es sich um keine Ad-hoc-Lösung handelt. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens erfordert jedoch die Festlegung der Form der Wissensrepräsentation. Dies kann durch eine Analyse der semantischen Reichhaltigkeit des Anwendungsbereichs geklärt werden.

Die Repräsentation des Patientenzustands erfordert die Abbildung der eingriffsrelevanten anatomischen und pathologischen Strukturen. In der Wissensrepräsentation muss dazu die Zugehörigkeit mehrerer anatomischer Strukturen zu einem Begriffssystem, z. B. dem Herz-Kreislaufsystem, ausgedrückt werden. Eine weitere Notwendigkeit besteht in der Abbildung von sogenannten Partonomien<sup>10</sup>. Diese ermöglichen die Beschreibung komplexer anatomischer Strukturen durch ihre Bestandteile. Eine Gliederung der anatomischen Strukturen gemäß ihrer Funktion im menschlichen Körper, wie beispielsweise Organ, Skelett oder Muskulatur, ist ebenfalls von Bedeutung. Die Abbildung von Veränderungen der anatomischen Strukturen setzt die Möglichkeit zur Modellierung struktureller und funktionaler Beziehungen voraus. Die Repräsentation der chirurgischen Handlung bedingt eine Repräsentation der chirurgischen Instrumente und der chirurgischen Aktivität. Eine Verknüpfung dieser Informationen erlaubt die Anwendung von Plausibilitätstests auf Basis der Wissensrepräsentation, beispielsweise ob eine Aktivität mit einem bestimmten Instrument ausgeführt werden kann.

Diese Analyse legt die Verwendung einer sehr ausdrucksstarken Wissensrepräsentation nahe. So kann der o. g. Zusammenhang zwischen chirurgischer Aktivität und chirurgischem Instrument nicht durch eine Taxonomie oder durch einen Thesaurus ausgedrückt werden. Daher soll bei dem Entwurf einer Wissensrepräsentation auf existierende Schemata zum Entwurf einer Ontologie zurückgegriffen werden.

---

<sup>10</sup>Teil-Ganzes-Beziehungen.

### 4.6.1 Entwicklung einer Applikationsontologie

Der Begriff Ontologie stammt ursprünglich aus der Philosophie. Eine häufig zitierte Definition des Begriffs ist die von [Gru93]: „*An ontology is a formal, explicit specification of a conceptualization.*“ Erweitert wurde sie von [SBR97]: „*An ontology is formal, explicit formal specification of a shared conceptualization.*“ Die Erweiterung besteht einerseits in der Forderung einer formalen Repräsentation als Grundlage für eine maschinelle Verarbeitung und andererseits in der Forderung, dass es sich bei dem dargestellten Wissen um allgemein akzeptiertes Wissen handelt.

Ein Modell für die Ontologieentwicklung wurde von [FGJ97] vorgestellt. Es unterteilt den Ontologieentwicklungsprozess in drei Phasen: Management, Entwicklung und Unterstützung. Die Management- und Unterstützungsphase stellen dabei die systematische und zielgerichtete Vorgehensweise bei der Ontologieentwicklung sicher. Die Entwicklungsphase beinhaltet sämtliche Aktivitäten, die in einem direkten Bezug zur Erstellung der Ontologie stehen. In der Literatur existieren hierzu zahlreiche Vorgehensweisen. Stellvertretend seien hier *METHONTOLOGY* [FGJ97] und *On-To-Knowledge* [SSS+01] genannt. Eine ausführliche Beschreibung dieser und weiterer Methoden zur Ontologierstellung ist in [Gom04] zu finden.

Nach der Ontologieklassifikation von [Gua98] auf Basis der Konzeptgeneralität handelt es sich bei der zu entwickelnden Ontologie um eine Applikationsontologie<sup>11</sup>. Die Entwicklung dieser Applikationsontologie erfolgt in Anlehnung an den *METHONTOLOGY*-Ansatz. Die folgenden Abschnitte erläutern die einzelnen Arbeitsschritte des Vorgehensmodells. Details zu Entwurf und Implementierung der Applikationsontologie sind in [SSM+07a, SSB+07, Bra09] nachzulesen.

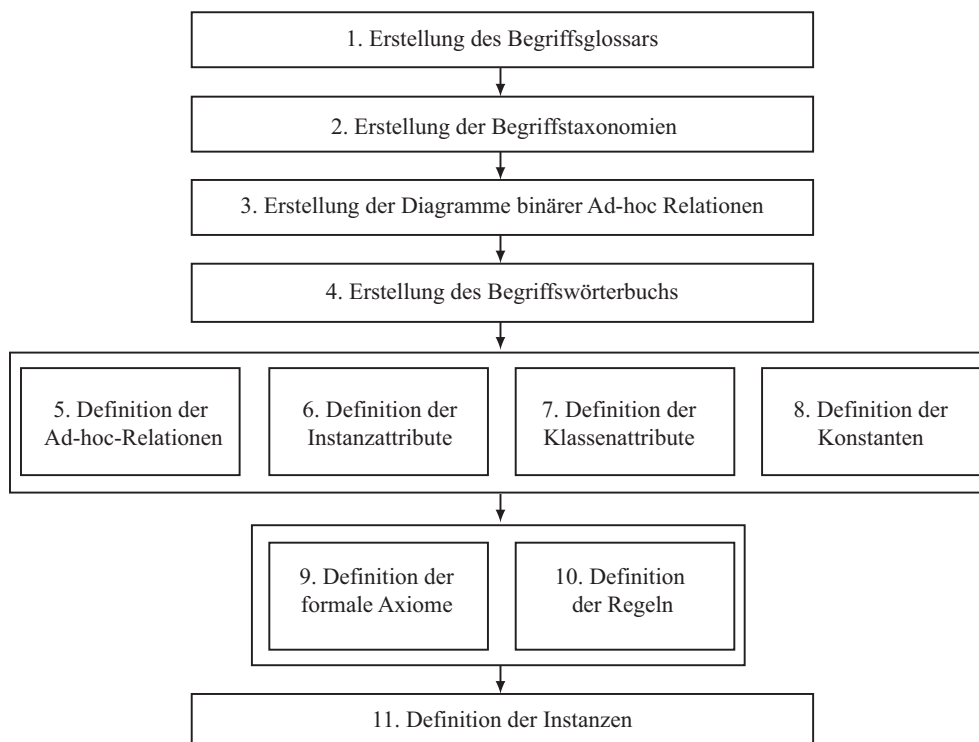
Die Ausgangsbasis für die Entwicklung einer Ontologie nach dem *METHONTOLOGY*-Vorgehensmodell bildet die Analyse vorhandener Wissensrepräsentationssysteme hinsichtlich einer Wiederverwendbarkeit für die gegebene Problemstellung. Dabei bietet sich insbesondere die Einbeziehung eines Wissensrepräsentationssystems zur Beschreibung der menschlichen Anatomie an. Die Analyse vorhandener Repräsentationen und deren Anbindung wird in Abschnitt 4.6.2 erläutert. Sukzessiv wird ein konzeptionelles Ontologiemodell erstellt, das schrittweise in ein formalisiertes Modell überführt und anschließend in einer Ontologiesprache implementiert wird. Der wesentliche Schritt ist hierbei die Konzeptualisierung der Ontologie. Diese gliedert sich, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, in elf Arbeitsschritte:

#### 1. Erstellung des Begriffsglossars

In diesem ersten Arbeitsschritt werden sämtliche Begriffe, Relationen zwischen diesen Begriffen und Attribute dieser Begriffe ermittelt und natürlichsprachlich beschrieben. Dies bezieht die Erfassung von Synonymen und Akronymen ein. Entsprechend der Analyse des Anwendungsbereichs in Abschnitt 4.3 enthält das Glossar Begriffe zur Beschreibung der Operationssi-

---

<sup>11</sup>engl.: Application ontology.



**Abb. 4.3:** Schritte zur Konzeptualisierung der Applikationsontologie nach *METHONTOLOGY* (aus Gomez et al. [Gom04], Fig 3.14, © 2004, mit freundlicher Genehmigung von Springer Science und Business Media).

tuation, der Operationsplanung und der Komponenten des Assistenzsystems. Eine Operationssituation wird dabei durch den Zustand des Patienten und die chirurgische Handlung charakterisiert. Bei den Begriffen zur Beschreibung des Patienten handelt es sich um anatomische Strukturen, die direkt oder indirekt in einem Zusammenhang mit dem Eingriff Cholezystektomie stehen. Zur Beschreibung der chirurgischen Handlung werden zusätzlich Begriffe für chirurgische Instrumente und chirurgische Tätigkeiten definiert. Weitere Begriffe werden für die Beschreibung der Operationsplanung eingeführt. Hierzu zählen beispielsweise die Bezeichnungen der einzelnen Operationsabschnitte einer Cholezystektomie. Zuletzt werden Begriffe zur Abbildung des Assistenzsystems hinzugefügt. Beschrieben werden Aspekte der Erfassung und Auswertung von Sensordaten sowie der Unterstützung des Chirurgen. Die Verknüpfung der Begriffe erfolgt durch die Definition von Relationen, die aus den Beziehungen zwischen den Begriffen abgeleitet werden. Für die Erstellung eines Modells der Operationssituation werden hierzu räumliche und mereologische Beziehungen ermittelt, um beispielsweise auszudrücken, dass die Leber an die Gallenblase angrenzt und der Infundibulum ein Teil der Gallenblase ist. Eine Diskussion der abgebildeten Beziehungen wird im Rahmen



der Erstellung des Situationsmodells in Abschnitt 4.8.1 geführt. Weitere Relationen werden für die Abbildung der Operationsplanung benötigt. Hierzu zählen beispielsweise Relationen, mit denen die Reihenfolge der einzelnen Operationsschritte festgelegt wird. Ebenso besteht ein Bedarf an Relationen zur Verknüpfung der Planungsdaten mit dem Ablaufplan sowie zur Parametrisierung der kontextbezogenen Assistenz (vgl. Abschnitt 4.9). Die Ermittlung der Attribute bildet den letzten Arbeitsschritt bei der Erstellung des Begriffsglossars. Mittels Attributen werden Eigenschaften, wie beispielsweise Alter und Geschlecht des Patienten, konkretisiert.

## 2. Erstellung der Begriffstaxonomien

In diesem Arbeitsschritt werden die Begriffe des Glossars durch sogenannte *is-a*-Relationen hierarchisch geordnet. Eine wesentliche Rolle spielt die Abgrenzung disjunkter Begriffe, d. h. Begriffe, die keine gemeinsamen Instanzen besitzen können. Die folgende Betrachtung beschränkt sich auf die Beschreibung der strukturelevanten Oberbegriffe, die maßgeblich für das konzeptionelle Modell der Ontologie sind. Bei der Wahl der Begriffsbezeichnungen wird falls möglich auf die Definitionen des *Foundational Model of Anatomy*<sup>12</sup>, eines etablierten Wissensrepräsentationssystems anatomischer Strukturen, zurückgegriffen. Dies erleichtert dessen Anbindung und erhöht die Wiederverwendbarkeit der zu entwickelnden Applikationsontologie. In Abschnitt 4.6.2 werden die Anbindung und die technische Umsetzung näher erläutert. Anatomische Strukturen werden unter dem Begriff *Anatomical\_entity* zusammengefasst. Die Beschreibung von Modifikationen anatomischer Strukturen, beispielsweise Schnittwunden, erfolgt unter dem Oberbegriff *Anatomical\_transformation\_entity*. Die Einbeziehung nicht anatomischer Begriffe ist beispielsweise zur Abbildung des Operationsplans und der Systemfunktionalität notwendig. Abbildung 4.4 verdeutlicht exemplarisch die Taxonomie der nicht anatomischen Begriffe. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle Unterkonzepte vollständig dargestellt. Abstrakte Konzepte zur Abbildung von Sensordaten, Visualisierungsobjekten und Interaktionselementen werden unter dem Begriff *Dimensional\_entity* zusammengefasst.

## 3. Erstellung der Diagramme binärer Ad-hoc-Relationen

Für den Anwendungsbereich relevante Relationen wurden bereits bei der Erstellung des Glossars identifiziert. Durch Eingrenzung ihrer Domäne<sup>13</sup> und ihres Zielbereichs<sup>14</sup> werden die Relationen in diesem Arbeitsschritt näher spezifiziert. Exemplarisch ist in Abbildung 4.5 ein Diagramm binärer Ad-hoc-Relationen zur Abbildung der Ein- und Ausgabedaten diverser Detektoren des kontextbezogenen Assistenzsystems abgebildet. Hier ist zu erkennen,

---

<sup>12</sup><http://sig.biostr.washington.edu/projects/fm/>.

<sup>13</sup>engl.: Domain.

<sup>14</sup>engl.: Range.

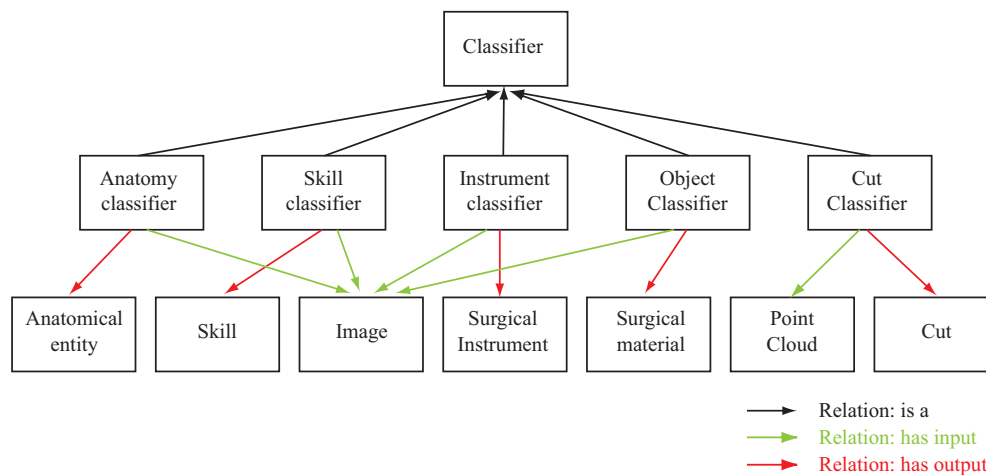


**Abb. 4.4:** Ausschnitt der Taxonomie der nicht anatomischen Begriffe (aus [Bra09]).

dass der Instrumentenklassifikator (*Instrument Classifier*) Bilddaten (*Image*) auswertet, um ein Objekt als Instrument (*Surgical Instrument*) zu klassifizieren. Der Klassifikator für Schnittwunden (*Cut Classifier*) verwendet Punktwolken (*Point Cloud*) für die detaillierte Analyse einer Schnittwunde (*Cut*). Das zugehörige Verfahren der Schnittwundenanalyse wird in Abschnitt 6.2 erörtert.

#### 4. Erstellung des Begriffswörterbuchs

Das Begriffswörterbuch fasst die Ergebnisse der ersten drei Arbeitsschritte zusammen. Zusätzlich sieht das *METHONTOLOGY*-Schema die Definition von Instanzen und Konstanten vor. Mittels Instanzen werden patientenindi-



**Abb. 4.5:** Diagramm binärer Ad-hoc-Relationen am Beispiel von Klassifikatoren des kontextbezogenen Assistenzsystems.

viduelle bzw. eingriffsspezifische Aspekte der Operationssituation, der Operationsplanung und des verwendeten Assistenzsystems beschrieben. Die Verwendung von Instanzen wird im Rahmen der Modellbildung in Abschnitt 4.7 näher erläutert. Die Definition von Konstanten entfällt für den gegebenen Anwendungsfall.

### 5. Definition der Ad-hoc-Relationen

Die Definition der Ad-hoc-Relationen verfeinert die Ergebnisse des dritten Arbeitsschritts und überführt die grafische Darstellung in eine tabellarische Form. Für jede Relation werden neben dem Domänen- und Wertebereich die Kardinalität und mathematischen Eigenschaften, wie Symmetrie oder Transitivität, bestimmt.

### 6. Definition der Instanzattribute

Die Definition der Instanzattribute, wie beispielsweise das Alter eines konkreten Patienten, erfolgt wie die Definition der Instanzen patientenindividuell bzw. eingriffsspezifisch.

### 7. Definition der Klassenattribute

Im gegebenen Anwendungsfall besteht kein Bedarf an Klassenattributen.

### 8. Definition der Konstanten

Für den gegebenen Anwendungsfall werden keine Konstanten benötigt.

### 9. Definition der formalen Axiome

Mittels formaler Axiome werden Aussagen bezüglich des Anwendungsgebiets formuliert, die weder bewiesen noch abgeleitet werden können. Die Ermittlung dieser Axiome ist Gegenstand dieses Arbeitsschritts und dient der

Axiom	Eingabedaten des Instrumentenklassifikators
Beschreibung	Instrumentenklassifikatoren verwenden ausschließlich Bilddaten als Eingabe.
Ausdruck	$\forall has\ input\ only\ Image$
Attribute	-
Binäre Relation	<i>has input</i>
Variablen	-

**Tab. 4.1:** Axiom zur Beschreibung der Eingabedaten des Instrumentenklassifikators.

Formulierung von Einschränkungen innerhalb der Applikationsontologie. Jedes Axiom wird durch einen Bezeichner, eine natürlichsprachliche Beschreibung, eine Formulierung des Axioms mittels Prädikatenlogik erster Ordnung sowie durch die relevanten Begriffe, Relationen, Attribute und Variablen definiert. In Tabelle 4.1 ist beispielhaft ein Axiom für einen Klassifikator zur Ermittlung der momentan verwendeten chirurgischen Instrumente dargestellt. Mittels dieses Axioms wird definiert, dass ein solcher Klassifikator als Eingabe ausschließlich Bilddaten verarbeitet.

#### 10. Definition der Regeln

Eine Regel ermöglicht die automatisierte Ableitung von neuem Wissen aus vorhandenem Wissen. Hierzu werden der Bedingungsteil und der Aktionsteil einer Regel definiert. Eine ausführliche Betrachtung von Regeln erfolgt in Abschnitt 5.6 im Rahmen der regelbasierten Situationsinterpretation.

#### 11. Definition der Instanzen

Die Definition von Instanzen erfolgt patientenindividuell bzw. eingriffsspezifisch und wird im Rahmen der Modellbildung in den Abschnitten 4.8 und 4.9 behandelt.

Anhand des Vorgehensmodells des *METHONTOLOGY*-Schemas wird das konzeptionelle Modell der Ontologie erstellt. Im Rahmen der Formalisierung wird dieses Modell auf den gewählten Repräsentationsformalismus der Beschreibungslogik abgebildet und mittels *OWL* implementiert. Dies erfordert eine Abbildung der *METHONTOLOGY*-Notation auf die *OWL*-Sprachkonstrukte. Tabelle 4.2 veranschaulicht die Abbildung der Begriffe und die zugehörige deutsche Übersetzung, wie sie in dieser Arbeit verwendet wird. Die Implementierung erfolgt mittels des Modellierungswerkzeugs Protegé<sup>15</sup>. Im folgenden Abschnitt wird die bereits angesprochene Anbindung des etablierten Wissensrepräsentationssystems *Foundational Model of Anatomy* an die Applikationsontologie erläutert.

<sup>15</sup><http://protege.stanford.edu>.

<i>METHONTOLOGY</i>	<i>OWL</i>
Concept (Begriff)	Class (Klasse)
Relation (Relation)	Object property (Relation)
Attribute (Attribut)	Datatype property (Eigenschaft)
Instance (Instanz)	Individual (Instanz)

**Tab. 4.2:** Abbildung der *METHONTOLOGY*-Notation auf die *OWL*-Sprachkonstrukte (aus [Bra09]).

#### 4.6.2 Anbindung des *Foundational Model of Anatomy*

Die Erstellung und Pflege einer Taxonomie sind ein aufwändiger und fehleranfälliger Prozess. Für den Entwurf der Applikationsontologie gilt es zu überprüfen, ob hier nicht bereits etablierte Wissensrepräsentationssysteme wiederverwendet werden können. Hierzu wird die Eignung von zwei Wissensrepräsentationssystemen untersucht: das *Foundational Model of Anatomy* sowie das *Systematized Nomenclature of Medicine*<sup>16</sup>. Quellen dieser Art garantieren aufgrund der jahrelangen Entwicklung und der Kooperation zwischen medizinischen und technischen Experten eine umfassende und zugleich konsistente Darstellung des Wissens. Der Rückgriff auf bestehende Quellen geht einher mit den Standardisierungsbestrebungen klinischer Applikationen [CK05] und erleichtert die Anbindung an Operationsplanungssysteme. Die beiden genannten Wissensrepräsentationssysteme werden im Folgenden kurz vorgestellt und anschließend miteinander verglichen.

- ***Foundational Model of Anatomy (FMA<sup>TM</sup>)***

Das *FMA* ist eine Bereichsontologie zur symbolischen Repräsentation des Aufbaus und des Erscheinungsbildes des menschlichen Körpers. Das Ziel ist die Bereitstellung einer wiederverwendbaren Referenzontologie, die für verschiedene Anwendungen gefiltert und angepasst werden kann. Die framebasierte Repräsentation erlaubt eine maschinelle Lesbarkeit der abgelegten Daten, die auch für einen menschlichen Benutzer verständlich ist [RM03]. Die Ontologie umfasst die Beschreibung anatomischer Strukturen beginnend bei der Zell- bzw. Molekülebene über Gewebe, Organe und Organsysteme bis hin zu Körperteilen. Die Repräsentation erfolgt durch mehr als 135 000 Begriffe, welche durch 2,5 Millionen Relationen miteinander verknüpft sind. Das *FMA* gilt als die größte Ontologie anatomischer Strukturen [RM08].

- ***Systematized Nomenclature of Medicine (SNOMED<sup>®</sup>)***

*SNOMED* beinhaltet eine umfangreiche Terminologie klinischer Begriffe zur Abbildung verschiedenster Aspekte des klinischen Umfelds. So enthält die Hierarchie beispielsweise Begriffe und Relationen zur Beschreibung klinischer Befunde, von Behandlungsmethoden, des Aufbaus des menschlichen

<sup>16</sup>Version Clinical Terms.

Körpers, von Organismen und Substanzen. Für eine vollständige Beschreibung wird auf [Int08] verwiesen. Insgesamt stehen 360 000 Begriffe zur Verfügung, die durch 1,4 Millionen Relationen verknüpft sind. Die *SNOMED*-Terminologie erlaubt die präzise Formulierung klinischer Dokumente und eignet sich ferner für die Abfrage und Analyse klinischer Sachverhalte.

In der Literatur existieren zahlreiche Publikationen, in denen *FMA* und *SNOMED* miteinander verglichen werden. Die Darstellung eines Sachverhalts variiert hierbei erheblich, wie [BZ06] beispielhaft an der Repräsentation von Blut gezeigt hat. Das *FMA* beschränkt sich auf die möglichst detailgetreue Abbildung der menschlichen Anatomie, wohingegen *SNOMED* mit der Abbildung des gesamten klinischen Umfelds eine andere Zielsetzung verfolgt. Dies spiegelt sich im Umfang und in der Struktur der Darstellung wider. Während im *FMA* 135 000 Begriffe zur Beschreibung der Anatomie existieren, werden bei *SNOMED* nur ca. 31 000 Begriffe für deren Darstellung verwendet. Die Struktur der beiden Wissensrepräsentationssysteme unterscheidet sich insbesondere durch die verwendeten Relationen. In *SNOMED* werden Taxonomien und Partonomien durch die Relationen *is-a* (*ist-ein*) und *part-of* (*ist-Teil-von*) ausgedrückt. Relationen dieser Art existieren im *FMA* ebenfalls. Darüber hinaus sind im *FMA* zusätzliche Relationen zur Beschreibung von Beziehungen zwischen anatomischen Strukturen vorhanden. Als Beispiel sei hier die Blutversorgung eines Organs durch eine Arterie genannt.

Ausschlaggebend für die Wahl einer Repräsentation sind die Akzeptanz und Verwendung innerhalb der Forschungsgemeinde sowie der Umfang und die Struktur der repräsentierten Inhalte. Beide Repräsentationen sind in der Forschungsgemeinde etabliert und Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, sodass sich Umfang und Struktur als maßgebliche Kriterien erweisen. Die Wahl fällt somit auf das *FMA*, das die umfassendere und ausdrucksstärkere Beschreibung der menschlichen Anatomie bietet.

Das Ziel einer Anbindung ist die Verwendung klar definierter Begriffe und Relationen zur Beschreibung der menschlichen Anatomie. Im *FMA* werden sämtliche Strukturen durch einen eindeutigen Bezeichner und eine zugehörige Konzeptdefinition beschrieben. Der Begriff Gallenblase (*Gallbladder*) wird beispielsweise definiert als: „*Organ with organ cavity which is continous proximally with the cystic duct and distally terminates in the fundus of the gallbladder*“. Die Begriffe und Definitionen des *FMA* sollen für die Applikationsontologie übernommen werden, soweit sie für den Eingriff der Cholezystektomie von Bedeutung sind. Weiterhin werden die zugehörigen Taxonomien und Partonomien übernommen. Die Abbildung spezieller Beziehungen erfolgt nach pragmatischen Gesichtspunkten, falls sie für die Anwendung des kontextbezogenen Assistenzsystems von Bedeutung sind.

Aufgrund der unterschiedlichen Formalismen zur Repräsentation des *FMA* und der Applikationsontologie ist eine Vorschrift zur Abbildung der repräsentierten Inhalte

notwendig. In der vorliegenden Arbeit wird auf die Forschungsergebnisse einer automatischen Konvertierung der framebasierten *FMA*-Notation in die *OWL*-Notation von [NR08] zurückgegriffen. Hierzu wird deren frei verfügbare Implementierung verwendet. Auf Basis dieser *OWL*-Konvertierung erfolgt die Übernahme der ein-griffsrelevanten Begriffe und Beziehungen in einem iterativen Prozess analog zum *METHONTOLOGY*-Schema. Details hierzu sind in [Bra09] dokumentiert. Abbildung 4.6 verdeutlicht das Ergebnis der Anbindung, die Taxonomie der anatomischen Begriffe in der Applikationsontologie gemäß *FMA*.



**Abb. 4.6:** Ausschnitt der Taxonomie der anatomischen Begriffe in der Applikationsontologie gemäß *FMA* (aus [Bra09]).

## 4.7 Konzept zur Modellbildung

Die Realisierung einer kontextbezogenen Assistenz erfordert die Abbildung der Operationssituation und der Operationsplanung. Hierzu werden die in Abbildung 4.7 skizzierten Modelle eingeführt:

### 1. Semantisches Situationsmodell

Das semantische Situationsmodell enthält wichtige Informationen für die Ermittlung des aktuell vorliegenden Operationsabschnitts. Es entsteht durch die Zusammenführung des chirurgischen Handlungsmodells und des Patientenzustandsmodells.

#### (a) Chirurgisches Handlungsmodell

Das chirurgische Handlungsmodell ist die symbolische Darstellung der chirurgischen Handlung. In diesem Modell werden die verwendeten Instrumente, die aktuell ausgeführte Tätigkeit des Chirurgen und die behandelten anatomischen Strukturen abgebildet.

#### (b) Patientenzustandsmodell

Im Patientenzustandsmodell wird der Zustand des Patienten durch eine symbolische Darstellung repräsentiert. Dazu werden der Zustand der eingriffsrelevanten anatomischen Strukturen sowie deren Beziehungen abgebildet.

### 2. Geometrisches Situationsmodell

Das geometrische Situationsmodell bildet mittels Symbolen die relative Lage der chirurgischen Instrumente bezüglich der relevanten anatomischen Strukturen ab und liefert wertvolle Hinweise für die Erkennung von Sondersituationen.

### 3. Planungsmodell

Im Planungsmodell werden die geometrischen Objektmodelle mit dem geplanten Operationsablauf verknüpft. Das Planungsmodell bildet die Grundlage für die Erzeugung einer kontextbezogenen Assistenz mittels der erweiterten Realität.

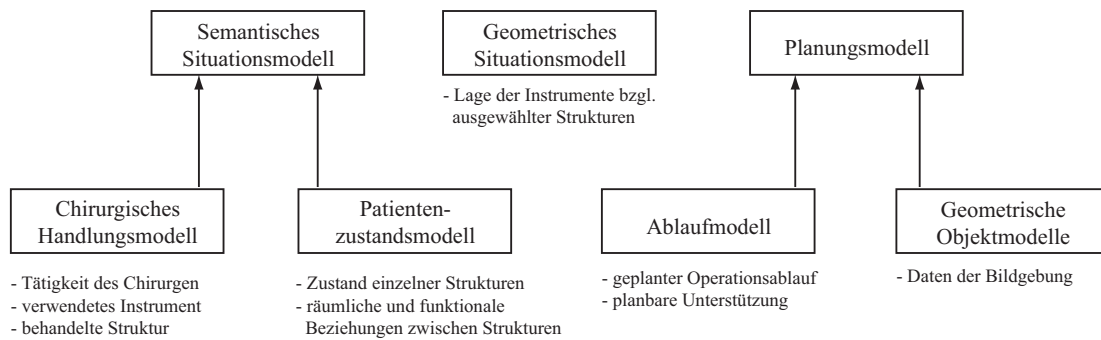
#### (a) Ablaufmodell

Im Ablaufmodell wird der geplante Operationsablauf symbolisch abgebildet. Dies ermöglicht die Planung von Unterstützungsmaßnahmen.

#### (b) Geometrische Objektmodelle

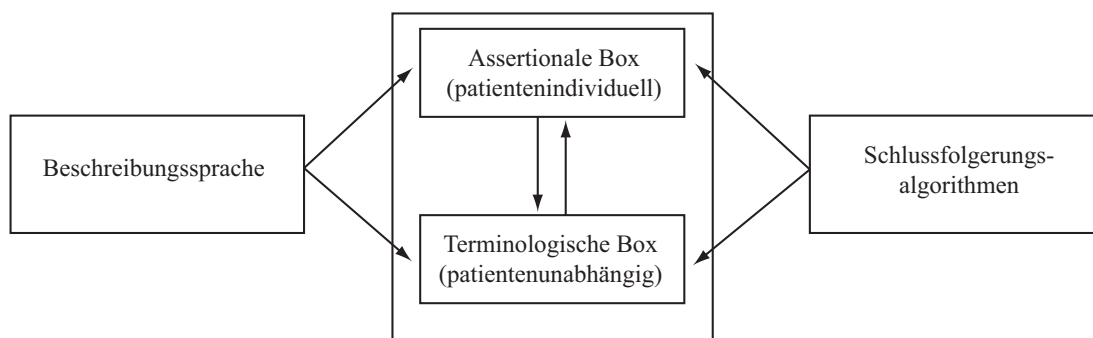
Unter geometrischen Objektmodellen werden die aufbereiteten Daten der präoperativen Bildgebung verstanden. Für die Anwendung des kontextbezogenen Assistenzsystems liegen sie üblicherweise in Form von Oberflächenmodellen vor.





**Abb. 4.7:** Modelle zur Erzeugung einer kontextbezogenen Assistenz.

Die genannten Modelle werden in der *Assertionalen Box* des Wissensrepräsentationssystems abgebildet. Diese eignet sich besonders für die Darstellung patientenindividueller Aspekte wie beispielsweise einer Ablaufplanung oder einer konkreten Operationssituation. Im Gegensatz hierzu wird in der *Terminologischen Box* patientenunabhängiges Faktenwissen abgebildet. Durch diese Vorgehensweise ist das unveränderliche Domänenwissen der Applikationsontologie mit dem Wissen über patientenindividuelle Sachverhalte eng gekoppelt, wird aber dennoch eigenständig repräsentiert. Des Weiteren ist die Anwendbarkeit von Schlussfolgerungsalgorithmen bezüglich der in der *Assertionalen Box* abgebildeten patientenindividuellen Sachverhalte möglich. Abbildung 4.8 verdeutlicht den Zusammenhang grafisch. In den folgenden Abschnitten werden die Modelle detailliert erläutert. Weitere Details zu Entwurf und Umsetzung sind in [SSM+07a, SSB+07, SKB+09, Bra09] dokumentiert. In den aufgeführten Beispielen werden die englischsprachigen Konzeptbezeichnungen entsprechend der Definition in der Applikationsontologie verwendet.



**Abb. 4.8:** Die patientenindividuellen Modelle werden in der *Assertionalen Box* repräsentiert, die patientenunabhängigen Aspekte in der *Terminologischen Box*.

## 4.8 Modelle der Operationssituation

Eine Operationssituation wird gemäß Abbildung 4.7 durch das semantische und das geometrische Situationsmodell beschrieben. Das semantische Situationsmodell umfasst dabei das Patientenzustandsmodell sowie das chirurgische Handlungsmodell. Nachfolgend werden die aufgezählten Modelle erörtert.

### 4.8.1 Patientenzustandsmodell

Die Repräsentation des Patienten während einer Operation erfolgt durch das Patientenzustandsmodell und liefert wertvolle Informationen für die Bestimmung des aktuell vorliegenden Operationsabschnitts durch die Situationsinterpretation. Im Patientenzustandsmodell werden folgende Aspekte abgebildet:

- **Strukturelle Beziehungen zwischen zwei Strukturen**

Die Arbeit des Chirurgen führt zu strukturellen und funktionalen Veränderungen des Operationsgebiets. Aufgrund der Komplexität dieses Sachverhalts beschränkt sich der hier entwickelte Ansatz auf die Abbildung struktureller Veränderungen. Hierzu wird ein Konzept auf Basis der Topologie und Mereologie entwickelt. Dies erlaubt beispielsweise die Modellierung zweier angrenzender Strukturen und der resultierenden strukturellen Veränderungen, wenn der Chirurg eine der beiden Strukturen entfernt.

- **Zustand einer Struktur**

Anatomische und pathologische Strukturen werden durch die Tätigkeit des Chirurgen modifiziert. Dazu zählen alle Modifikationen, die das Aussehen oder die Eigenschaft einer Struktur verändern, beispielsweise aufgrund von Ablationen<sup>17</sup> und Schnitten.

In den folgenden Abschnitten werden Lösungsansätze für die Modellbildung aufgezeigt und exemplarisch erörtert.

#### Modellierung struktureller Beziehungen zwischen zwei Strukturen

Bei der Modellierung struktureller Beziehungen im Patientenzustandsmodell kommen Konzepte der Topologie [BRS06] und Mereologie [Don04] zum Einsatz. Die Topologie beschäftigt sich gemäß der Übersetzung aus dem Griechischen mit der Lehre vom Raum. Dabei werden geometrische Körper analysiert und auf sogenannte topologische Räume abgebildet. Die resultierende Beschreibung enthält lediglich strukturelle Aspekte der ursprünglichen geometrischen Körper. In einem engen Zusammenhang mit der Topologie steht der Begriff der Mereologie. Gegenstand der

---

<sup>17</sup>Abtragung von Gewebe.

Mereologie ist die Untersuchung von Teil-Ganzes-Beziehungen und Eigenständigkeiten. Im Folgenden wird die Eignung dieser beiden Konzepte für die Darstellung struktureller Beziehungen im Patientenzustandsmodell untersucht.

Die Ausgangsbasis für die Betrachtung topologischer Beziehungen bildet die Forschungsarbeit der Theorie des qualitativen räumlichen Schließens von [RCC92]. Diese basiert auf dem *Clarke-Vieu-Kalkül*<sup>18</sup> und betrachtet insbesondere Überlappungs- und Kontakteigenschaften ausgedehnter räumlicher Strukturen. Es werden folgende Beziehungen unterschieden: *getrennt*, *grenzt an*, *identisch*, *teilweise überlappend*, *tangential enthalten*, *invers tangential enthalten*, *vollständig enthalten* und *invers vollständig enthalten*. Wird mit den genannten acht Beziehungen modelliert, so spricht man vom *Region-Connection-Calculus-8 (RCC-8)* [Ren02]. Weit verbreitet ist aber auch die Verwendung des *Region-Connection-Calculus-5 (RCC-5)*, bei dem nicht zwischen Berührung und Überlappung unterschieden wird, sodass sich die Verwendung der drei Beziehungen *grenzt an*, *tangential enthalten* und *invers tangential enthalten* erübrigt.

Die Betrachtung mereologischer Beziehungen stützt sich auf die Erkenntnisse der *Basisinklusionstheorie*<sup>19</sup> von Donnelly, die die folgenden Basisbeziehungen definiert [Don04]: *teil von*, *invers teil von*, *echt teil von*, *invers echt teil von*, *überlappt*. Diese Basisbeziehungen erlauben eine eingeschränkte Modellierung der räumlichen Beziehung zwischen zwei Strukturen, da die Modellierung auf die Abbildung sich überlappender oder in einer Teilbeziehung stehender Strukturen beschränkt ist. Deswegen umfasst die *Basisinklusionstheorie* die zusätzlichen Lokalisationsbeziehungen: *lokalisiert in*, *invers lokalisiert in*, *teilweise in*, *invers teilweise in*.

Im Gegensatz zum *RCC-8* wurde die *Basisinklusionstheorie* speziell zur Beschreibung medizinischer Sachverhalte entwickelt. Von besonderer Bedeutung für die Erstellung eines Situationsmodells ist die *lokalisiert in*-Beziehung. Diese kann beispielsweise für die Lagebeschreibung von Fremdobjekten verwendet werden. Solche Fremdobjekte, wie ein Projektil oder ein Virus, befinden sich zwar in einer Körperregion, sind jedoch kein Teil davon. Für die Darstellung der strukturellen Beziehungen im Patientenzustandsmodell wird ein Ansatz gewählt, der Elemente des *RCC-8* und der *Basisinklusionstheorie* kombiniert. Dabei werden die folgenden strukturellen Beziehungen zwischen zwei Strukturen *A* und *B* definiert:

- **grenzt an(*A,B*)** (*externally connected*)  
Die Strukturen *A* und *B* berühren sich an mindestens einem Raumpunkt, überlappen sich jedoch nicht.
- **getrennt(*A,B*)** (*disconnected*)  
Es existiert keine Überlappung oder Berührung zwischen den Strukturen *A* und *B*.

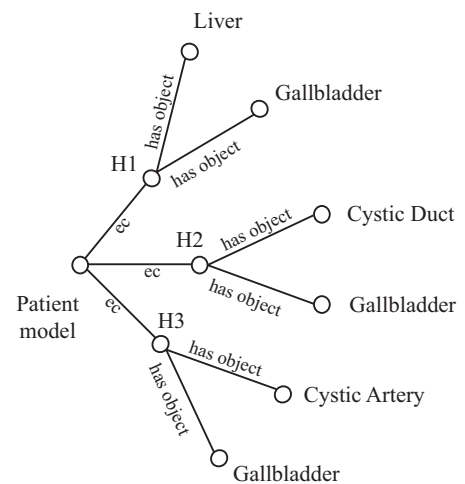
<sup>18</sup>Betrachtung offener und abgeschlossener Regionen.

<sup>19</sup>engl.: Basic inclusion theory.

- **teilweise überlappend(A,B)** (*partially overlapping*)  
Es gibt einen Bereich, in dem sich die Strukturen A und B überlappen. Keine der beiden Strukturen enthält jedoch die andere vollständig.
- **tangential enthalten(A,B)** (*tangential proper part*)  
Struktur A enthält Struktur B vollständig. Zusätzlich berühren sich die Randpunkte beider Strukturen in mindestens einem Raumpunkt.
- **vollständig enthalten(A,B)** (*non-tangential proper part*)  
Struktur A enthält Struktur B vollständig. Die Schnittmenge der Randpunkte beider Strukturen ist leer.
- **identisch(A,B)** (*equal*)  
Die Strukturen A und B sind identisch.
- **lokalisiert in (A,B)** (*located in*)  
Die Struktur A befindet sich in Struktur B, A ist jedoch kein Teil von B.



(a)

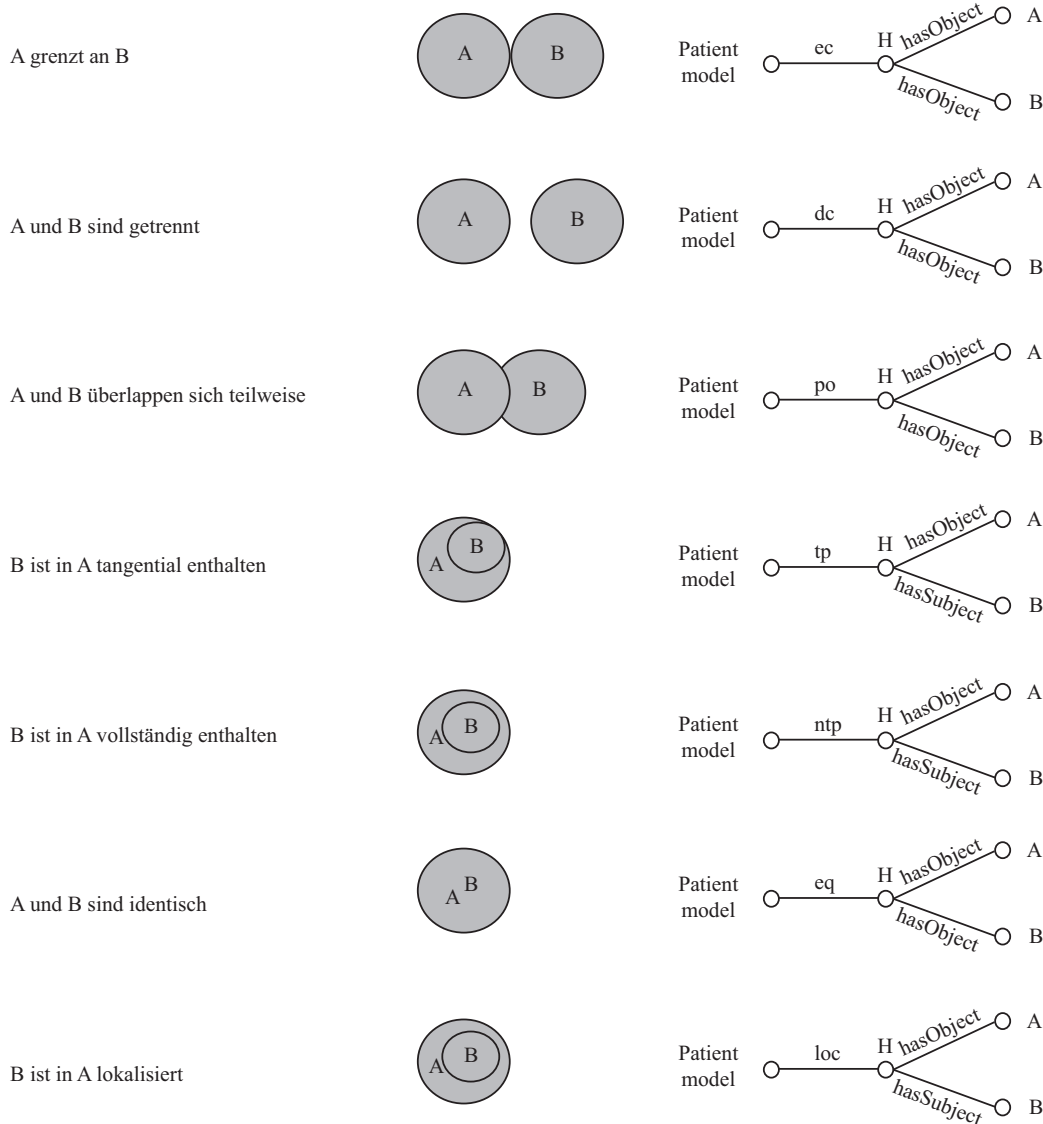


(b)

**Abb. 4.9:** a) Gallenblase zu Beginn der Operation, d. h. vor einer Ablösung von der Leber. b) Schematische Darstellung des zugehörigen Patientenzustandsmodells.

Auf die Verwendung der inversen Beziehungen wird aus Gründen der besseren Anwendbarkeit von Schlussfolgerungsalgorithmen verzichtet. Für die Abbildung der Beziehungen wird ein eigenes Modellierungskonzept verwendet (vgl. Abbildung 4.10), das nachfolgend am Beispiel der Entfernung der Gallenblase erläutert wird.

Zu Beginn der Operation ist die Gallenblase (*Gallbladder*) mit der Leber (*Liver*), dem Ductus Cysticus (*Cystic Duct*) und der Arteria Cystica (*Cystic Artery*) ver-



**Abb. 4.10:** Strukturelle Beziehungen und ihre Abbildung im Patientenzustandsmodell durch Rollen und Instanzen. *A* und *B* sind die Instanzen zur Repräsentation zweier anatomischer Strukturen. *H* ist eine Hilfsinstanz, die für die Modellierung benötigt wird.

wachsen bzw. verbunden (vgl. Abbildung 4.9a). Dies wird im Modell (vgl. Abbildung 4.9b) durch die strukturelle Beziehung *grenzt an* ausgedrückt. Hierzu wird die Rolle (*ec*<sup>20</sup>) zwischen der Instanz des Patientenmodells (*Patient model*) und den jeweiligen Hilfsinstanzen (*H1*, *H2*, *H3*) definiert. Über diese Hilfsinstanzen werden die Instanzen der beteiligten Strukturen assoziiert. Dies geschieht durch die Rolle *has object*. Wie Abbildung 4.10 zu entnehmen ist, ist bei den Beziehungen *tangential enthalten*, *vollständig enthalten* und *lokalisiert in* eine Unterscheidung zwischen

<sup>20</sup>externally connected.

bezogener und bezugnehmender Struktur notwendig. Dies wird durch entsprechende Rollen (*has object* bzw. *has subject*) zwischen der Instanz des Hilfskonzepts und den Instanzen der jeweiligen Strukturen realisiert.

### Modellierung des Zustands einer Struktur

Während einer Operation verändert der Chirurg die anatomischen Strukturen des Patienten. Bei der Durchführung einer Cholezystektomie kommt es dabei zu folgenden Modifikationen:

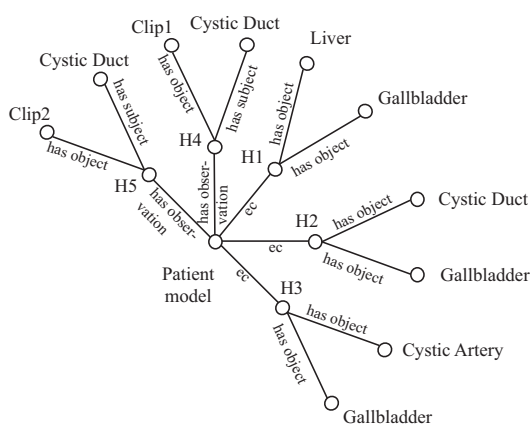
- **Ablation**  
Der Begriff Ablation bezeichnet die Abtragung von Gewebe. Im Rahmen der Cholezystektomie werden beispielsweise Adhäsionen abgetragen.
- **Clippen**  
Das Clippen eines Gefäßes verhindert dessen Flüssigkeitsdurchlässigkeit. Bei einer Cholezystektomie werden der Ductus Cysticus und die Arteria Cystica geclippt.
- **Dissektion**  
Bei einer Dissektion wird eine Struktur in zwei disjunkte Teile zerlegt. Gegenstand einer solchen Dissektion sind beispielsweise Gefäße. So erfordert die Entfernung der Gallenblase die Durchtrennung der geclippten Arteria Cystica und des geclippten Ductus Cysticus.
- **Ektomie**  
Die vollständige Entfernung einer anatomischen Struktur wird mit Ektomie bezeichnet. Der Begriff Cholezystektomie impliziert somit die vollständige Entfernung der Gallenblase.
- **Inzision**  
Unter einer Inzision wird ein Einschnitt in Gewebe verstanden. Diese wird zur Eröffnung des Operationsgebiets und zur Freilegung des Zielgebiets benötigt.

Die Erstellung eines Patientenzustandsmodells für den Eingriff der Cholezystektomie erfordert die Abbildung dieser Modifikationen im Modell. Die Repräsentation des Zustands erfolgt in der *Assertionalen Box* der Beschreibungslogik. Für jede anatomische Struktur wird eine Instanz erzeugt. Modifikationen werden durch hinzugefügte Rollen, Instanzen und Attribute beschrieben. Auf die Modellierung von Ablationen und Ektomien wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Stattdessen wird die Abbildung von Modifikationen durch Clippen und Dissektionen behandelt. Des Weiteren wird in Abschnitt 6.2.2 ein Verfahren zur kontextbezogenen Assistenz bei der Umsetzung von Inzisionen vorgestellt.

**Modifikation durch Clippen.** Bei chirurgischen Clips handelt es sich wie bei Fäden, Klammern oder Netzen um Fremdmaterialien, die der Chirurg in das Operationsgebiet einbringt. Die Erfassung dieser Materialien durch das kontextbezogene Assistenzsystem liefert wertvolle Hinweise bezüglich des aktuell vorliegenden Operationsabschnitts, weshalb hierfür spezielle Algorithmen entwickelt werden [SZS+07]. Die Abbildung einer solchen Beobachtung erfolgt konzeptuell analog zur Modellierung struktureller Beziehungen durch Einführung einer Hilfsinstanz. Diese wird mittels der Rolle *has observation* mit der Instanz des Patientenmodells assoziiert. Abbildung 4.11 verdeutlicht die Modellierung zweier Clips auf dem Ductus Cysticus als Erweiterung des Beispiels aus Abbildung 4.9.



(a)

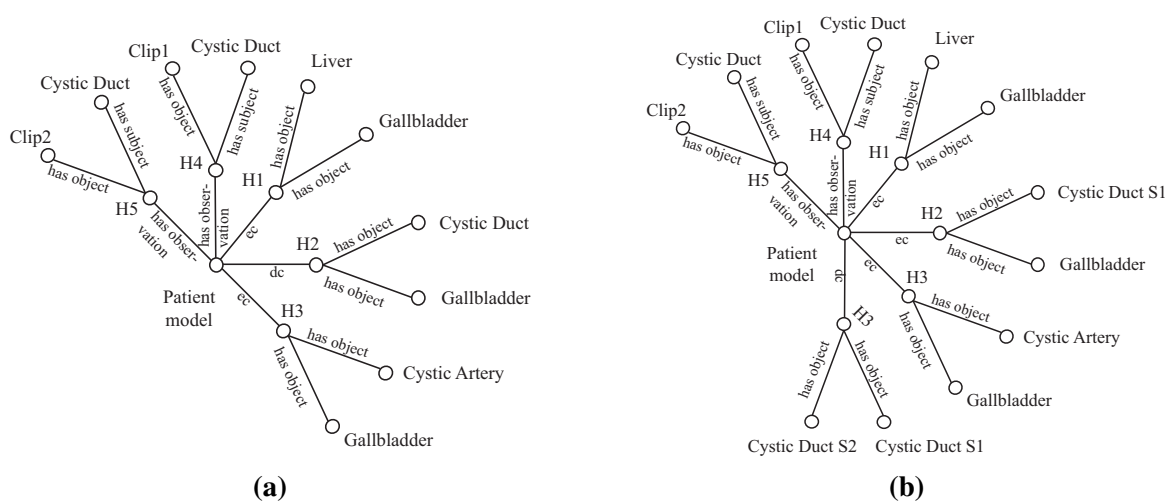


(b)

**Abb. 4.11:** a) Clip auf Ductus Cysticus. b) Schematische Darstellung des zugehörigen Patientenzustandsmodells.

**Modifikation durch Dissektion.** Bei der Dissektion wird eine Struktur in zwei Teile zerlegt. Für die Abbildung einer Dissektion im Patientenzustandsmodell existieren zwei Ansätze. Beim ersten Ansatz wird die strukturelle Beziehung zwischen den beiden beteiligten Strukturen von *grenzt an* zu *getrennt* verändert. Hierzu wird die Rolle *ec* durch die Rolle *dc*<sup>21</sup> wie in Abbildung 4.12a ersetzt. Dies stellt eine Vereinfachung der Realität dar, da die durchtrennte Struktur weiterhin durch eine einzige Instanz repräsentiert wird. Aufgrund dessen erfolgt beim zweiten Ansatz eine detailliertere Repräsentation durch mehrere Instanzen (vgl. auch Abbildung 5.12 auf Seite 98). Für das Anwendungsbeispiel des durchtrennten Ductus Cysticus impliziert dies die Definition einer Instanz für jedes Segment (*Cystic Duct S1* und *Cystic Duct S2*). Die beiden Segmente sind nicht miteinander verbunden, was durch die Rolle *dc* ausgedrückt wird. Abbildung 4.12b verdeutlicht den Ansatz am bekannten Anwendungsbeispiel.

<sup>21</sup>disconnected.



**Abb. 4.12:** Durchtrennter Ductus Cysticus: a) Schematische Darstellung des zugehörigen Patientenzustandsmodell Variante 1. b) Variante 2.

## 4.8.2 Handlungsmodell

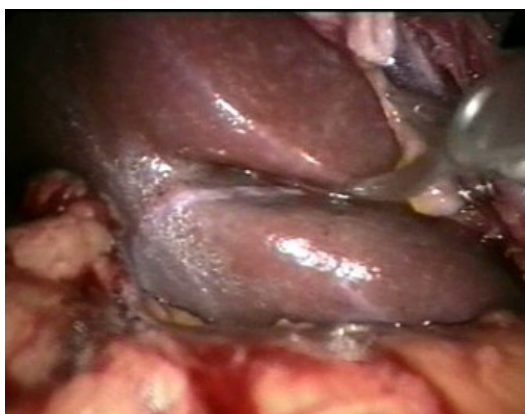
Das chirurgische Handlungsmodell enthält Informationen über die Tätigkeit des Chirurgen, die verwendeten chirurgischen Instrumente sowie die behandelten anatomischen und pathologischen Strukturen. Ein solches Tripel wird in Forschungsarbeiten des Themenkomplexes *Chirurgische Abläufe* für die Ablaufbeschreibung eines Eingriffs verwendet [NDM+06]. Die Informationen des chirurgischen Handlungsmodells fließen wie die Informationen des Patientenzustandsmodells in das Situationsmodell ein. Hierbei stellt sich vor allem die Frage nach dem notwendigen Detaillierungsgrad der Beschreibung.

Für die Abbildung der behandelten anatomischen und pathologischen Struktur wird eine Modellierung auf der Ebene der Teilstrukturen gefordert. Ein solcher Detaillierungsgrad bildet die Grundlage für eine präzise Abbildung eingriffsspezifischer Zusammenhänge, beispielsweise dass die Gallenblase mit der Faszange am Fundus gegriffen wird, um sie vom Leberbett zu lösen. Diese Teilstrukturen sind im *Foundational Model of Anatomy* enthalten und werden bei der Anbindung an die Wissensrepräsentation übernommen.

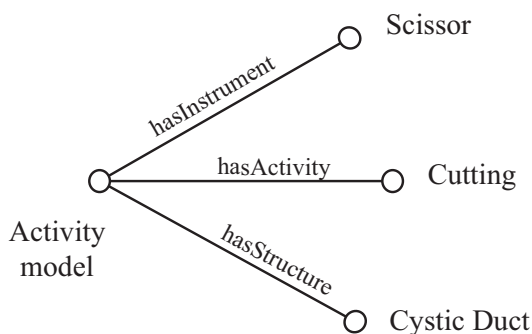
Der zweite Aspekt des Handlungsmodells, bei dem der Detaillierungsgrad festgelegt werden muss, ist die chirurgische Tätigkeit. Aufgrund von Bestrebungen zur Verwendung einheitlicher Begriffsbezeichnungen wurde im Rahmen eines Workshops von Satava et al. ein Glossar chirurgischer Tätigkeiten<sup>22</sup> erstellt [SCH03]. Dieses bildet die Ausgangsbasis für die Entwicklung der entsprechenden Taxonomie innerhalb der Applikationsontologie. Für das kontextbezogene Assistenzsystem werden Klassifikatoren zur Erkennung und Bewertung ausgeführter Tätigkei-

<sup>22</sup>engl.: Surgical skill.





(a)



(b)

**Abb. 4.13:** a) Durchtrennung des Ductus Cysticus mit einer Schere. b) Schematische Darstellung des zugehörigen Handlungsmodells.

ten mittels eines *Hidden-Markov-Modells* entwickelt [SZS+09]. Die Repräsentation der chirurgischen Tätigkeit im Handlungsmodell orientiert sich an diesem Detaillierungsgrad.

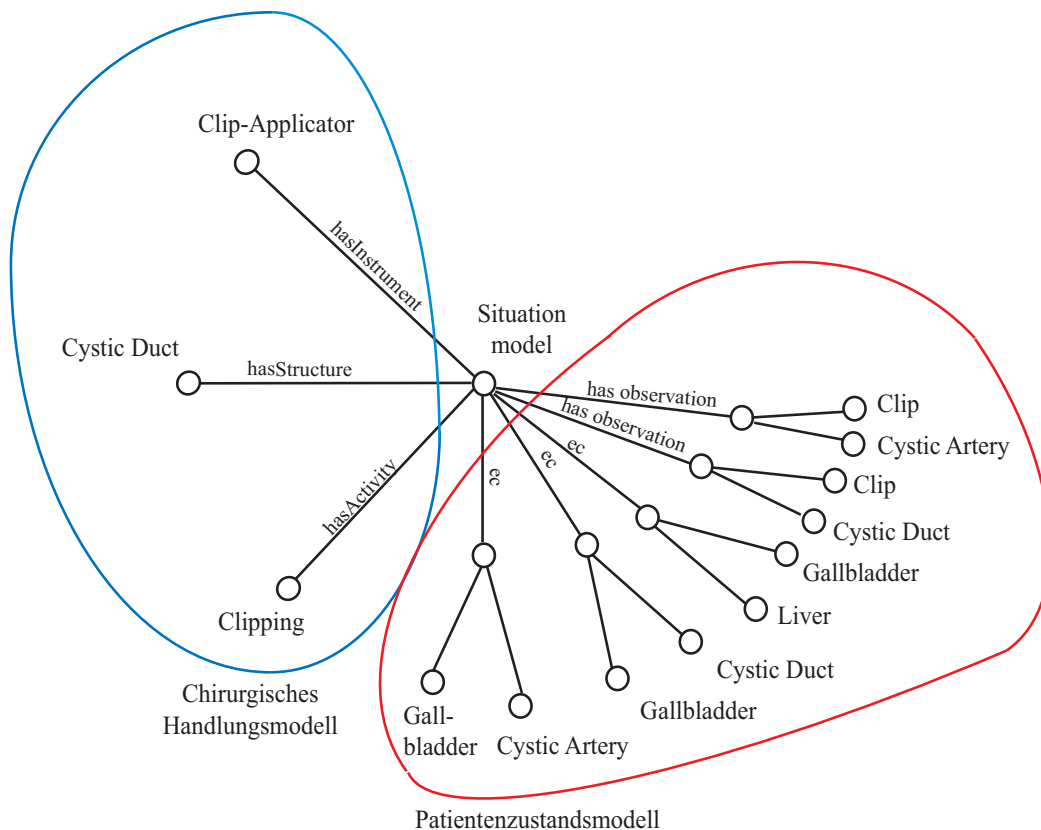
In Abbildung 4.13 ist ein Handlungsmodell dargestellt, bei dem der Chirurg mit einer Schere den Ductus Cysticus durchtrennt. Das Modell der chirurgischen Handlung wird durch die Instanz *Activity model* repräsentiert. Die Schere, der Ductus Cysticus und die Tätigkeit Schneiden werden durch die Instanzen *Scissor*, *Cystic Duct* und *Cutting* repräsentiert. Die Assoziation dieser Instanzen mit der Instanz des Handlungsmodells erfolgt durch Einführung der Rollen *hasInstrument*, *hasStructure* und *hasActivity*.

### 4.8.3 Semantisches Situationsmodell

Das Situationsmodell vereint das Patientenzustands- und das Handlungsmodell. Die Instanz des Situationsmodells *Situation model* wird dabei mit sämtlichen Rollen des Patientenzustandsmodells *Patient model* und den Rollen des Handlungsmodells *Activity model* assoziiert. In Abbildung 4.14 ist das Situationsmodell für die eingangs dargestellte Operationssituation aus Abbildung 4.1 schematisch dargestellt.

### 4.8.4 Geometrisches Situationsmodell

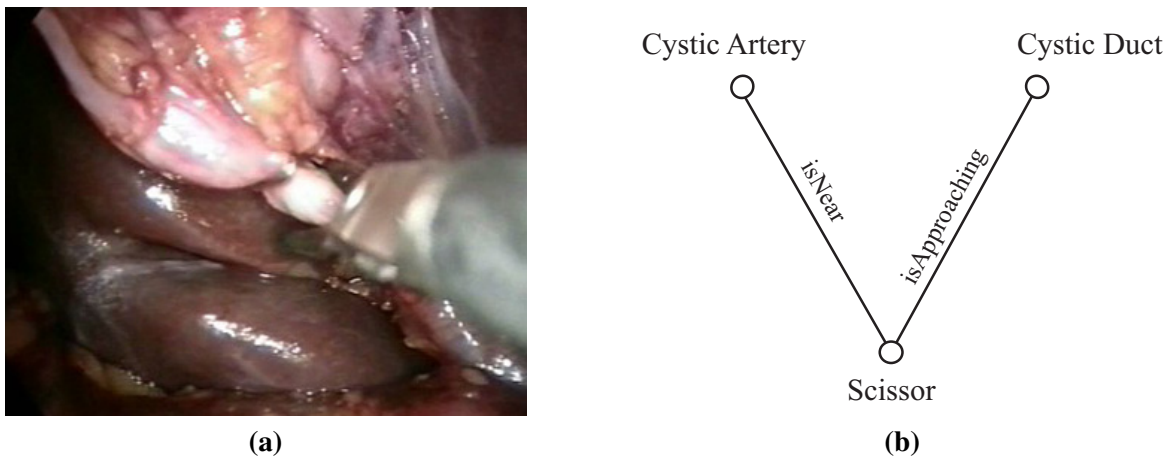
Im geometrischen Situationsmodell wird die relative Lage der chirurgischen Instrumente bezüglich anatomischer Strukturen abgebildet. Das Modell kann als Ergänzung des semantischen Situationsmodells verstanden werden, das die Anwendung zusätzlicher Kriterien zur Beurteilung der aktuell vorliegenden Operationssituation erlaubt. Dies ermöglicht insbesondere die Warnung des Chirurgen vor einer unbeabsichtigten Verletzung wichtiger anatomischer Strukturen.



**Abb. 4.14:** Schematische Darstellung des semantischen Situationsmodells der eingangs dargestellten Operationssituation aus Abbildung 4.1: „Die Gallenblase wurde noch nicht vom Leberbett gelöst. Die Arteria Cystica und der Ductus Cysticus wurden geclippt, aber noch nicht durchtrennt. Der Chirurg verwendet einen Clip-Applikator, um einen zweiten Clip am Ductus Cysticus zu setzen.“

Die Ausgangsbasis für die Modellerstellung bildet die Menge der zu berücksichtigenden anatomischen Strukturen. Diese kann manuell oder automatisch durch eine entsprechende Regel definiert werden. Im Anwendungsbeispiel der Cholezystektomie sind dies zwei Risikostrukturen: der nicht geclippte Ductus Cysticus und die nicht geclippte Arteria Cystica.

Die Repräsentation des geometrischen Situationsmodells erfolgt ebenfalls in der *Assertionalen Box*. Im Gegensatz zur Modellbildung beim semantischen Situationsmodell werden jedoch keine Hilfsinstanzen benötigt. Jede zu berücksichtigende Struktur und jedes momentan verwendete chirurgische Instrument wird durch eine Instanz repräsentiert. Mittels Rollen werden Beziehungen zwischen den Instanzen der Strukturen und der Instrumente modelliert. Hierzu werden Positions- und Geschwindigkeitsdaten der beteiligten Objekte ausgewertet und mittels unscharfer Mengen auf Rollen der Wissensrepräsentation abgebildet. Im Anwendungsbeispiel werden die Rollen *isNear* und *isFar* zur Abbildung einer Distanz und die Rollen *is-*



**Abb. 4.15:** a) Eine Schere nähert sich dem Ductus Cysticus und befindet sich in der Nähe der Arteria Cystica. b) Schematische Darstellung des zugehörigen geometrischen Situationsmodells.

*Approaching* und *isNotApproaching* zur Abbildung einer Annäherung verwendet. In Abbildung 4.15 ist ein geometrisches Situationsmodell schematisch dargestellt. In der zugehörigen Operationssituation nähert sich (*isApproaching*) eine Schere (*Scissor*) dem Ductus Cysticus (*Cystic Duct*). Die Schere befindet sich dabei in der Nähe (*isNear*) der Arteria Cystica (*Cystic Artery*).

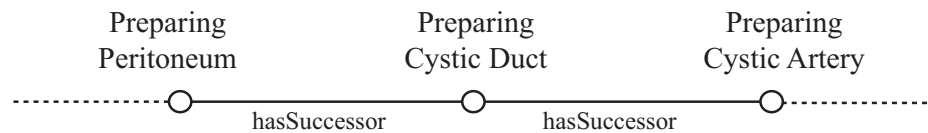
## 4.9 Modelle der Operationsplanung

Das Ziel eines kontextbezogenen Assistenzsystems ist die situationsangepasste Unterstützung des Chirurgen. Für die Interpretation der aktuell vorliegenden Operationssituation und für die Erzeugung einer geeigneten Visualisierung wird auf die patientenindividuelle Operationsplanung zurückgegriffen. In den folgenden Abschnitten wird erörtert, welche Daten benötigt werden und wie diese repräsentiert werden.

### 4.9.1 Ablaufmodell

Präoperativ erstellt der operierende Chirurg einen patientenindividuellen Ablaufplan. In diesem ist die Reihenfolge der einzelnen Operationsabschnitte festgelegt. Für eine kontextbezogene Assistenz muss dieser Ablaufplan in einer maschinenlesbaren Form zur Verfügung stehen. Die Abfolge der einzelnen Abschnitte ergibt sich anhand der patientenindividuellen Diagnose sowie aufgrund von Präferenzen des planenden Chirurgen. Die Einteilung in Abschnitte und deren Bezeichnung orientiert sich an der jeweiligen Zielsetzung, beispielsweise der Freilegung einer Struktur.

Die Repräsentation eines patientenindividuellen Ablaufplans erfolgt durch Instanzen und Rollen in der *Assertionalen Box*. Dazu werden einmalig für einen chirurgischen Eingriff die Menge der Operationsabschnitte in der *Terminologischen Box* der Applikationsontologie abgebildet. Die Definition des patientenindividuellen Ablaufplans erfolgt durch Instanziierung dieser *TBox*-Konzepte in der *Assertionalen Box*. Dabei werden nur die Abschnitte instanziiert, deren Umsetzung geplant ist. Benachbarte Operationsabschnitte werden durch die Rolle *hasSuccessor* gekennzeichnet. In Abbildung 4.16 ist ein Ausschnitt eines patientenindividuellen Ablaufplans für die Präparation des Calot'schen Dreiecks abgebildet, bei dem zunächst das Bauchfell (*Peritoneum*) und danach der Ductus Cysticus (*Cystic Duct*) und die Arteria Cystica (*Cystic Artery*) freigelegt werden.



**Abb. 4.16:** Schematische Darstellung eines patientenindividuellen Ablaufplans (Ausschnitt) für die Präparation des Calot'schen Dreiecks.

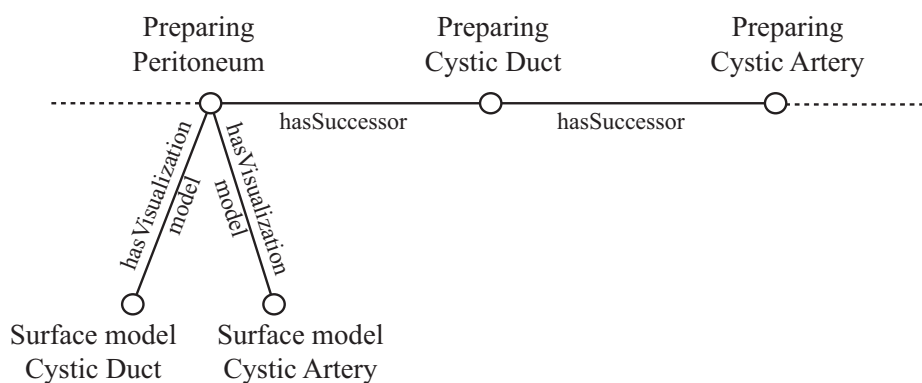
## 4.9.2 Geometrische Objektmodelle

Die präoperative rechnergestützte Verarbeitung patientenindividueller Datensätze ermöglicht die Erstellung dreidimensionaler Objektmodelle anatomischer und pathologischer Strukturen sowie die Erstellung weiterer Planungsdaten. Unter einem geometrischen Objektmodell wird in diesem Zusammenhang das Oberflächenmodell einer Struktur verstanden. Geometrische Objektmodelle erleichtern dem Chirurgen die Befundung und unterstützen ihn bei der Festlegung des Ablaufplans. Während der Operation werden sie für eine Visualisierung durch das kontextbezogene Assistenzsystem verwendet.

Die Erstellung patientenindividueller geometrischer Modelle erfordert den Einsatz bildgebender Verfahren. Die Modalität des eingesetzten bildgebenden Verfahrens hängt vom jeweiligen chirurgischen Eingriff ab. Am besten eignen sich Verfahren wie die Kernspintomografie und die Computertomografie, die die Erzeugung hochauflösender Schichtbilder erlauben. Mittels eines Vorverarbeitungsschritts und geeigneter Segmentierungsverfahren werden die eingriffsrelevanten anatomischen bzw. pathologischen Strukturen extrahiert. In einem weiteren Schritt wird aus den segmentierten Daten ein Oberflächenmodell erzeugt. Darüber hinaus kann die Arbeit des Chirurgen durch die Einblendung zusätzlicher Planungsdaten, wie beispielsweise einer Inzisionsplanung, unterstützt werden (vgl. Abschnitt 6.2).

### 4.9.3 Planungsmodell

Im Planungsmodell wird das Ablaufmodell mit den geometrischen Objektmodellen verknüpft. Dies erlaubt die Erzeugung einer kontextbezogenen Unterstützung des Chirurgen durch die Visualisierung der geometrischen Objektmodelle des aktuell vorliegenden Operationsabschnitts. Hierzu werden für sämtliche geometrische Objektmodelle und sämtliche Planungsdaten Instanzen in der *Assertionalen Box* erzeugt. Soll der Chirurg in einem Operationsabschnitt durch die Visualisierung dieser Daten unterstützt werden, so werden die zugehörigen Instanzen durch die Rolle *hasVisualizationModel* mit der Instanz des Operationsabschnitts verknüpft. Darstellungsparameter der Objektmodelle bzw. Planungsdaten, wie beispielsweise deren Farbe, werden durch entsprechende Instanzattribute definiert. Abbildung 4.17 verdeutlicht die Repräsentation eines Planungsmodells in der *Assertionalen Box* anhand des bereits aus Abbildung 4.16 bekannten Beispiels: Im Operationsabschnitt *Preparing Peritoneum* sollen die durch Gewebe verdeckten Strukturen *Cystic Duct* und *Cystic Artery* anhand präoperativ erstellter Oberflächenmodelle (*Surface model*) eingeblendet werden. Dies erleichtert dem Chirurgen die Orientierung und reduziert das Risiko einer unbeabsichtigten Verletzung dieser Strukturen.



**Abb. 4.17:** Schematische Darstellung eines Planungsmodells. Verknüpfung des Ablaufplans mit den geometrischen Objektmodellen der anatomischen Strukturen Ductus Cysticus und Arteria Cystica.

## 4.10 Zusammenfassung

Es wurden eine eingriffsspezifische Applikationsontologie sowie Modelle zur Abbildung der Operationssituation und der Operationsplanung entwickelt. Die Repräsentation der patientenindividuellen Modelle erfolgt in der *Assertionalen Box*, die Abbildung der patientenunabhängigen Sachverhalte in der *Terminologischen Box*. Zusammen mit der Anwendbarkeit von Schlussfolgerungsalgorithmen bildet diese Trennung den Grundstein für den wissensbasierten Ansatz zur Situationsinterpretation.

Erstmals wurde ein Ansatz für die Repräsentation einer Operationssituation untersucht, in dessen Fokus die Modellierung des Patientenzustands stand. Hierzu wurde ein Konzept entwickelt, dessen Schwerpunkt auf der Abbildung von strukturellen Beziehungen zwischen anatomischen Strukturen liegt. Das Modell der Operationsplanung assoziiert eine Beschreibung des geplanten Ablaufs mit den Daten der präoperativ durchgeführten Bildgebung und bildet die Ausgangsbasis für die Erzeugung einer kontextbezogenen Unterstützung des Chirurgen mittels der Erweiterten Realität.

Durch die Einbeziehung des *Foundational Model of Anatomy* stehen eine klinisch etablierte Nomenklatur und Taxonomie der menschlichen Anatomie zur Verfügung. Die Wahl des Repräsentationsformalismus ermöglicht ferner die Anwendbarkeit von Schlussfolgerungsalgorithmen und stellt die effiziente Organisation und Pflege des repräsentierten Wissens sicher. Auf die Vorteile dieser Aspekte wird im Rahmen der Situationsinterpretation im folgenden Kapitel näher eingegangen.

# Kapitel 5

## Interpretation der Operationssituation

### 5.1 Einführung

In Abschnitt 4.7 wurden die Modelle zur Abbildung der Operationssituation und der Operationsplanung erörtert. Diese Modelle bilden die Ausgangsbasis für die Ermittlung des Situationskontexts im Rahmen der Situationsinterpretation. Unter dem Situationskontext wird dabei die Zuordnung der Operationssituation zu einem Operationsabschnitt der Ablaufplanung bzw. zu einer Klasse von Sondersituationen verstanden. Unter der Annahme, dass sich der Unterstützungsbedarf anhand des Situationskontexts bestimmen lässt, kommt der Situationsinterpretation somit eine zentrale Bedeutung für den gesamten Lösungsansatz einer kontextbezogenen Assistenz zu.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept der wissensbasierten Situationsinterpretation orientiert sich dabei an der chirurgischen Vorgehensweise zur Bestimmung des Situationskontexts. Der Chirurg greift hierzu auf sein in der Aus- und Weiterbildung erlerntes theoretisches Wissen sowie seine praktische Erfahrung im Operationssaal zurück. Eine Nachahmung dieser Vorgehensweise erscheint vielversprechend.

Dies erfordert die Abbildung von theoretischem Faktenwissen, das durch die Applikationsontologie in Abschnitt 4.6 bereits teilweise vorhanden ist und das durch das Hinzufügen einer Regelbasis erweitert wird. Des Weiteren wird ein Konzept zur Abbildung der praktischen Erfahrung benötigt. Hierbei bietet sich der Einsatz eines fallbasierten Lösungsansatzes an. Für die Einbringung der Wissens-, Fall- und Regelbasis in den Interpretationsprozess wird jeweils ein Interpretationsverfahren entwickelt.

## 5.2 Anforderungen an die Situationsinterpretation

Die Anforderungen an die Situationsinterpretation leiten sich aus den Rahmenbedingungen des kontextbezogenen Assistenzsystems ab. Sie werden wie folgt definiert:

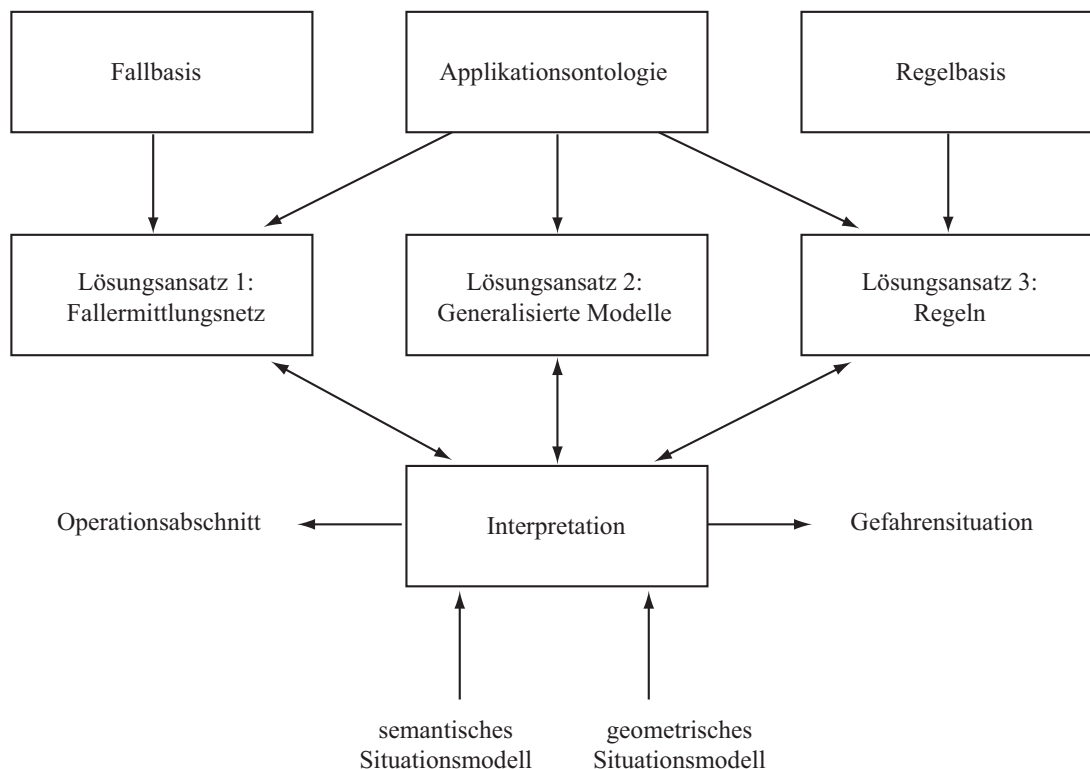
- **Determiniertheit und Nachvollziehbarkeit der Systementscheidungen**  
Die Forderung der Determiniertheit stellt sicher, dass für bestimmte Eingabedaten des Interpretationsprozesses stets dieselben Ausgabedaten erzeugt werden. Die dabei getroffenen Entscheidungen sollen für einen menschlichen Betrachter nachvollziehbar sein. Diese Forderung erschwert die Anwendung sogenannter Blackbox-Verfahren wie *Neuronale Netze* oder *Hidden-Markov-Modelle*. Bei diesen wird das notwendige Wissen anhand abstrakter Modellparameter repräsentiert.
- **Performanz des Interpretationsprozesses**  
Das Assistenzsystem muss die aktuell vorliegende Operationssituation sensorisch erfassen und analysieren, bevor eine Unterstützung für den Chirurgen erzeugt werden kann. Für diesen komplexen und aufwändigen Prozess steht jedoch nur ein beschränktes Zeitfenster zur Verfügung, um eine ausreichend schnelle Reaktion des Systems sicherzustellen. Dies erfordert den Einsatz zeiteffizienter Algorithmen zur Situationsinterpretation.
- **Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit des Situationswissens**  
Voraussetzung für eine erfolgreiche Situationsinterpretation ist das Wissen, wann ein bestimmter Operationsabschnitt bzw. eine bestimmte Sondersituation vorliegt. Dieses wird im Folgenden als Situationswissen bezeichnet. Unabhängig von der jeweiligen Repräsentation werden dessen Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit verlangt. Dies soll die Anpassungsfähigkeit an neue Gegebenheiten, wie weiterentwickelte Operationstechniken oder veränderte chirurgensindividuelle Präferenzen, sicherstellen.

## 5.3 Konzept der Situationsinterpretation

Die Situationsinterpretation verfolgt zwei Ziele:

- **Ermittlung des Operationsabschnitts**  
Die Kenntnis des Operationsabschnitts erlaubt die Erzeugung einer kontextbezogenen Unterstützung. Hierzu werden die in der Ablaufplanung assoziierten geometrischen Objektmodelle des aktuell vorliegenden Operationsabschnitts visualisiert. Die Voraussetzung hierfür ist die Ermittlung des Operationsabschnitts durch Interpretation des semantischen Situationsmodells.





**Abb. 5.1:** Lösungsansatz der Situationsinterpretation (aus Sudra et al. [SKB+09], © 2009 Gesellschaft für Informatik).

- **Ermittlung einer Sondersituation**

In der vorliegenden Arbeit werden Sondersituationen betrachtet, in denen eine unbeabsichtigte Verletzung bedeutender anatomischer Strukturen droht. Diese werden im Folgenden als Gefahrensituationen bezeichnet. Durch die frühzeitige Erkennung solcher Situation besteht die Möglichkeit zur Warnung des Chirurgen. Hierzu wird das geometrische Situationsmodell interpretiert.

Es werden drei Interpretationsverfahren entwickelt und untersucht. Diese sind in Schaubild 5.1 dargestellt. Sämtliche Verfahren eignen sich sowohl für die Interpretation des semantischen als auch für die Interpretation des geometrischen Situationsmodells. Unterschiede bestehen hinsichtlich der Repräsentation des Situationswissens und der methodischen Vorgehensweise:

1. **Interpretation durch ein Fallermittlungsnetz**

Diesem Ansatz liegt ein fallbasiertes Verfahren zugrunde, das Situationswissen wird dementsprechend in einer Fallbasis abgelegt. Für die Interpretation der Situationsmodelle wird ein Ähnlichkeitsmaß auf Basis der Applikationsontologie definiert. Das Verfahren bewertet das Interpretationsergebnis quantitativ.

## 2. Interpretation durch generalisierte Modelle

Bei diesem Verfahren wird das Situationswissen in der Applikationsontologie abgelegt. Hierzu werden generalisierte Modelle eines Operationsabschnitts bzw. einer Gefahrensituation erstellt. Die Interpretation erfolgt durch Schlussfolgerungsalgorithmen, wobei festgestellt wird, ob die Bedingungen eines generalisierten Modells durch die aktuell vorliegende Operationssituation erfüllt sind.

## 3. Interpretation durch Regeln

Mit dem dritten Verfahren wird die Anwendung eines regelbasierten Ansatzes untersucht. Dies bedingt die Abbildung des Situationswissens in einer Regelbasis. Die Interpretation erfolgt durch Ausführung der Regeln.

In den folgenden Abschnitten werden die drei Verfahren detailliert erläutert. Als Anwendungsbeispiel dient die Interpretation des semantischen Situationsmodells. Zur Verbesserung des Leseflusses bezeichnet der Begriff Situationsmodell das semantische Situationsmodell.

# 5.4 Interpretation durch ein Fallermittlungsnetz

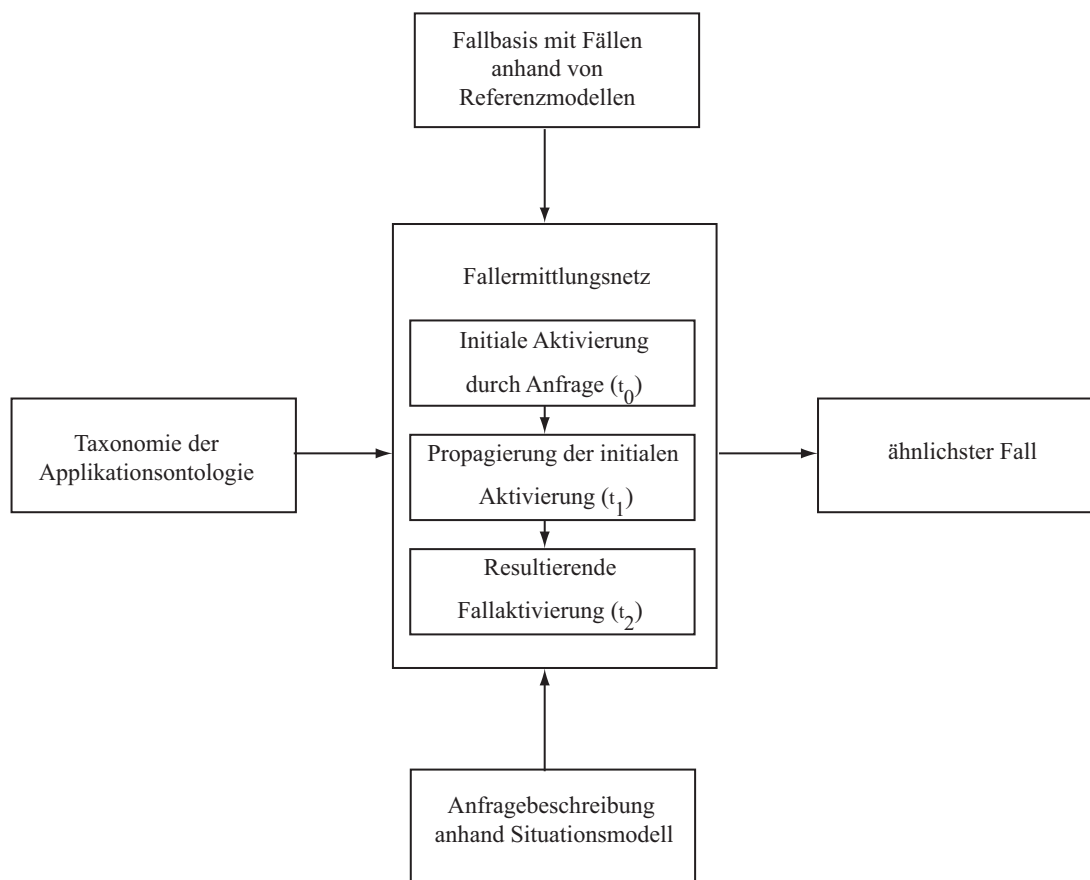
Die Interpretation des Situationsmodells durch ein Fallermittlungsnetz beruht auf dem Konzept des fallbasierten Schließens<sup>1</sup>, bei dem die Beschreibung und die Lösung eines Problems durch einen sogenannten Fall repräsentiert werden. Sämtliche Fälle sind in einer Fallbasis abgelegt. Für die Beantwortung einer Anfrage an das fallbasierte System wird zunächst die Anfragebeschreibung mit den Problembeschreibungen der abgelegten Fälle verglichen. Existiert eine ähnliche Problembe-  
schreibung in der Fallbasis, so wird die zugehörige Problemlösung zur Beantwortung der Anfrage herangezogen.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Lösungsansatz zur Situationsinterpretation mittels eines Fallermittlungsnetzes ist in Schaubild 5.2 dargestellt. Die Anfragebeschreibung wird dabei anhand des in Abschnitt 4.7 beschriebenen Situationsmodells definiert. Die Interpretation erfolgt durch das Auffinden einer Problembe-  
schreibung, die der Anfragebeschreibung möglichst ähnlich ist. Hierzu sind sämtliche Problembe-  
schreibungen in Form von sogenannten Referenzmodellen in einer Fallbasis abgelegt. Für das Auffinden des ähnlichsten Falles wird das Konzept des Fallermittlungsnetzes<sup>2</sup> von Lenz et al. [LB96] zur effizienten Fallermittlung er-  
weitert. Das Fallermittlungsnetz verknüpft das Situationsmodell mit den Referenz-  
modellen der Fallbasis durch eine Netzstruktur. Mittels einer dreistufigen Aktivie-  
rungsfunktion werden die Knoten des Fallermittlungsnetzes aktiviert. Anhand des

---

<sup>1</sup>engl.: Case-based reasoning.

<sup>2</sup>engl.: Case-retrieval net.



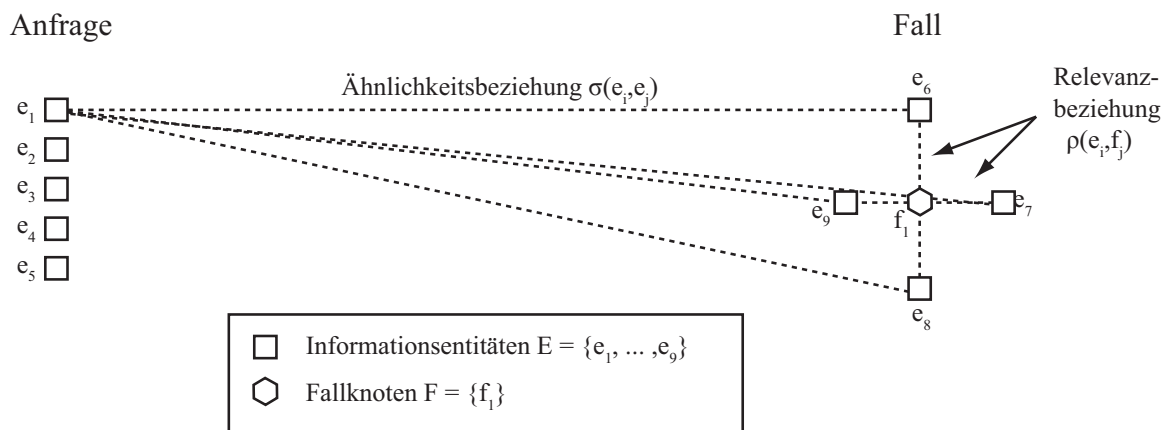
**Abb. 5.2:** Entwickelter Lösungsansatz zur Situationsinterpretation mittels eines Fallermittlungsnetzes.

Ergebnisses dieser Aktivierung lässt sich das Referenzmodell ermitteln, das dem Situationsmodell am ähnlichsten ist. In den folgenden Abschnitten wird die Situationsinterpretation mittels eines Fallermittlungsnetzes näher beschrieben. Details zu Entwurf und Umsetzung der Methodik sind in [SBS+09, SKB+09, Bec08] dokumentiert.

### 5.4.1 Netzstruktur und Knotenaktivierung

Ein Fallermittlungsnetz kann als Graph bestehend aus Knoten und Kanten aufgefasst werden. Ein Knoten repräsentiert eine Informationsentität oder einen Fall. Eine Kante steht für eine Ähnlichkeitsbeziehung oder eine Relevanzbeziehung. Im Rahmen der Situationsinterpretation wird ein Fallermittlungsnetz  $N = [E, F, \sigma, \rho, \pi]$  mit der folgenden Struktur<sup>3</sup> verwendet:

<sup>3</sup>Die Notation orientiert sich an der in der Literatur üblichen Zusammenfassung von  $\pi_e$  und  $\pi_f$  zu  $\pi$  (vgl. [LB96]).



**Abb. 5.3:** Struktur eines Fallermittlungsnetzes.

- $E$  = Menge der Informationsentitäten. Eine Informationsentität ist das elementare Element zur Repräsentation von Informationen in einem Fallermittlungsnetz. Mittels Informationsentitäten werden sowohl die Anfrage als auch die Fälle beschrieben.
- $F$  = Menge der Fallknoten. Ein Fallknoten repräsentiert eine Problembeschreibung.
- $\sigma: E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ . Ähnlichkeitsfunktion. Die Ähnlichkeitsbeziehung besteht zwischen Informationsentitäten.
- $\rho: E \times F \rightarrow \mathbb{R}$ . Relevanzfunktion. Die Relevanzbeziehung ist zwischen einem Fallknoten und dessen darstellenden Informationsentitäten definiert. Die Relevanz ist ein Maß für den Beitrag einer Informationsentität zur Fallaktivierung.
- $\pi_e: \mathbb{R}^E \rightarrow \mathbb{R}$ . Funktion, die eine Anfangsaktivierung der Informationsentitäten der Anfrage auf die Informationsentitäten eines Falles propagiert. Die Propagierung erfolgt unter Einbeziehung der Ähnlichkeitsfunktion  $\sigma$ .
- $\pi_f: \mathbb{R}^E \rightarrow \mathbb{R}$ . Funktion, die eine Aktivierung der Informationsentitäten eines Falls auf dessen Fallknoten propagiert. Die Propagierung erfolgt unter Einbeziehung der Relevanzfunktion  $\rho$ .

In Abbildung 5.3 ist die Struktur eines Fallermittlungsnetzes für eine Anfrage und einen Fall beispielhaft dargestellt. In diesem Beispiel werden die Anfrage durch fünf Informationsentitäten beschrieben, der Fall durch einen Fallknoten und vier Informationsentitäten. Zwischen den Informationsentitäten der Anfrage und des Falls existieren Ähnlichkeitsbeziehungen, zwischen den Informationsentitäten des Falls

und dem Fallknoten Relevanzbeziehungen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle Ähnlichkeitsbeziehungen abgebildet.

Die zu erkennende Netzstruktur bildet die Grundlage für die Berechnung der Ähnlichkeit zwischen Anfrage und Fall durch einen mehrstufigen Propagierungsprozess. Dazu wird zunächst eine initiale Aktivierung der im Netz repräsentierten Informationsentitäten anhand der Anfrage durchgeführt. Es folgt die zweistufige Propagierung dieser initialen Knotenaktivierung entlang der Ähnlichkeits- und Relevanzkanten. Dies führt zu einer Aktivierung der Fallknoten, anhand derer eine Aussage über die Ähnlichkeit zwischen der Problembeschreibung der Anfrage und des Falls getroffen wird. Dies wird formal wie folgt dargestellt:

Sei  $N = [E, F, \sigma, \rho, \pi]$  ein Fallermittlungsnetz und  $\alpha_t: E \cup F \rightarrow \mathbb{R}$  eine Aktivierungsfunktion, die jeder Informationsentität  $e \in E$  und jedem Fallknoten  $f \in F$  zum Zeitpunkt  $t$  einen Aktivierungsbetrag<sup>4</sup> zuweist. Dies ermöglicht eine Anwendung des Fallermittlungsnetzes wie folgt [LB96]: Sei  $\alpha_0$  eine Anfangsaktivierung ausgewählter Informationsentitätsknoten, die anhand der Anfrage definiert wird. Diese Anfangsaktivierung wird auf die restlichen Informationsentitätsknoten des Netzes entlang der Ähnlichkeitskanten anhand der Funktion  $\pi_e$  propagiert. Die resultierende Aktivierung aller Informationsentitäten  $e_i \in E$  wird durch die Funktion  $\alpha_1$  wie folgt bestimmt:

$$\alpha_1(e_i) = \pi_e(\sigma(e_1, e_i) \cdot \alpha_0(e_1), \dots, \sigma(e_n, e_i) \cdot \alpha_0(e_n)). \quad (5.1)$$

Die Aktivierung der Informationsentitätsknoten ist die Ausgangsbasis für die Berechnung der Fallaktivierung für jeden Fall  $f_i \in F$  durch Propagierung der Aktivierungen entlang der Relevanzkanten anhand der Funktion  $\pi_f$ :

$$\alpha_2(f_i) = \pi_f(\rho(e_1, f_i) \cdot \alpha_1(e_1), \dots, \rho(e_n, f_i) \cdot \alpha_1(e_n)). \quad (5.2)$$

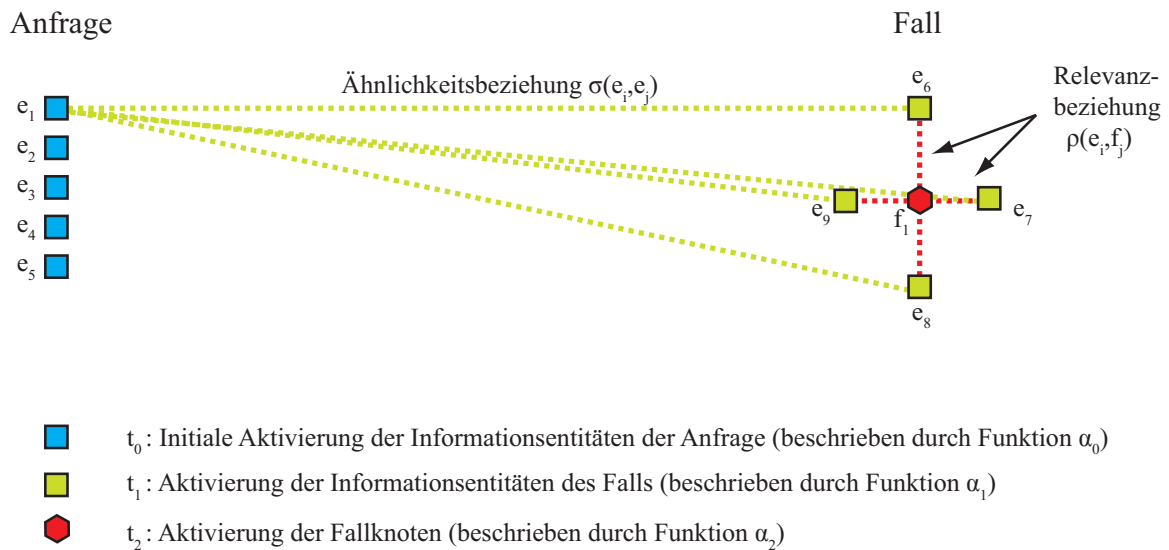
Dadurch wird jedem Fallknoten  $f$  eine Aktivierung  $\alpha_2(f)$  für die gegebene Anfrage zugewiesen. Der Aktivierungsbetrag stellt ein Maß für die Ähnlichkeit des Falles mit der gegebenen Anfrage dar. Eine hohe Aktivierung bedeutet eine hohe Ähnlichkeit. In Abbildung 5.4 ist die Aktivierung der Netzknoten im Schaubild dargestellt. Die durch die Funktionen  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  aktivierten Knoten sind blau, grün bzw. rot markiert<sup>5</sup>.

### 5.4.2 Fallermittlungsnetz und Situationsinterpretation

Die Anwendung des Fallermittlungsnetzes zur Interpretation der Operationssituation erfordert die Definition von dessen Komponenten und Funktionen in Bezug auf die gegebene Problemstellung.

<sup>4</sup>Die dreistufige Aktivierung erfolgt zu den Zeitpunkten  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  (vgl. Abbildung 5.2).

<sup>5</sup>Die Funktionen  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  gehören nicht zur Definition eines Fallermittlungsnetzes, beschreiben aber dessen Aktivierung zu den Zeitpunkten  $t_0$ ,  $t_1$  und  $t_2$ .



**Abb. 5.4:** Aktivierung eines Fallermittlungsnetzes.

- **Anfrage  $s$**

Eine Anfrage definiert eine Problembeschreibung, anhand derer das Fallermittlungsnetz ähnliche Problembeschreibungen in der Fallbasis ermittelt. Im Kontext der Situationsinterpretation wird die Problembeschreibung durch die Situationsmerkmale des Situationsmodells definiert.

- **Fall  $f \in F$**

Die Problembeschreibung eines Falles wird durch die Situationsmerkmale eines Referenzmodells definiert. Ein solches Referenzmodell beschreibt eine aufgezeichnete und klassifizierte Operationssituation. Die Darstellung der Situationsmerkmale im Referenzmodell ist identisch mit der Darstellung der Situationsmerkmale im Situationsmodell. Das Referenzmodell wird somit wie das Situationsmodell in der *Assertionalen Box* repräsentiert. Der Unterschied zwischen beiden Modellen besteht darin, dass beim Referenzmodell der zugehörige Operationsabschnitt bekannt ist (Klassifikation des Referenzmodells), wohingegen er beim Situationsmodell im Zuge der Situationsinterpretation erst noch bestimmt werden muss. Die Klassifikation des Referenzmodells stellt die Problemlösung des Falles dar.

- **Informationsentität  $e \in E$**

Mittels Informationsentitäten werden die Anfrage und die Fälle des Fallermittlungsnetzes näher beschrieben. Entsprechend der Definition von Anfrage und Fall werden Informationsentitäten für die Abbildung der Situationsmerkmale des Situations- und der Referenzmodelle verwendet. Es werden zwei Arten von Informationsentitäten unterschieden: atomare und aggregierte Informationsentitäten.

- **Ähnlichkeitsfunktion  $\sigma$**   
Die Ähnlichkeitsfunktion  $\sigma$  definiert die Ähnlichkeitskanten zwischen zwei Informationsentitäten  $e_1$  und  $e_2$  und wird anhand der Taxonomie der Applikationsontologie berechnet.
- **Relevanzfunktion  $\rho$**   
Die Relevanzfunktion definiert die Relevanzkanten zwischen Informationsentitäten und deren assoziiertem Fall. Die Berechnung erfolgt unter Einbeziehung der Informationsentitäten der Anfrage und des Falls.
- **Aktivierungsfunktionen  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$**   
In einem Fallermittlungsnetz wird eine initiale Aktivierung der Informationsentitäten der Anfrage auf die Informationsentitäten der Fälle übertragen. Hierzu wird die Funktion  $\pi_e$  definiert (vgl. Definition 5.1). Eine weitere Aktivierungsübertragung von den Informationsentitäten eines Falls auf den Fallknoten erfolgt durch die Funktion  $\pi_f$  (vgl. Definition 5.2). Dieser dreistufige Aktivierungsprozess wird durch die Funktionen  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  beschrieben.

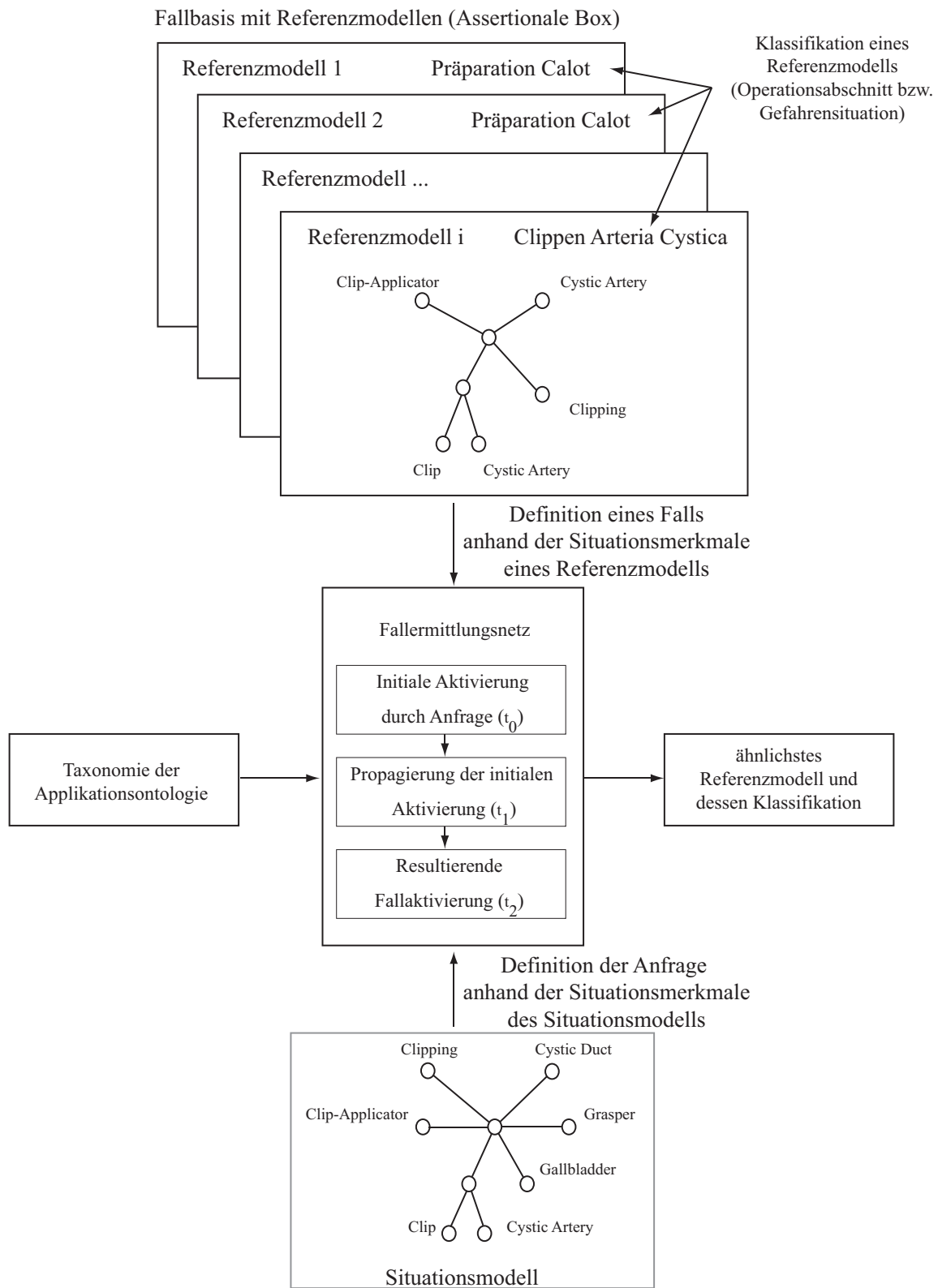
Zur Ermittlung des ähnlichsten Falles werden somit die Situationsmerkmale des Situationsmodells mit den Situationsmerkmalen der Referenzmodelle verglichen. Im Rahmen der Fallermittlung wird mittels der dreistufigen Aktivierungsfunktion das ähnlichste Referenzmodell der Fallbasis bestimmt (vgl. Abbildung 5.5).

### 5.4.3 Ähnlichkeit von Situationsmodell und Referenzmodell

Mithilfe des Fallermittlungsnetzes wird die Aktivierung  $\alpha_2(f)$  eines Falles  $f$  bezüglich einer gegebenen Anfrage  $q$  berechnet. Dieser Aktivierungswert gibt Auskunft, inwieweit die Problembeschreibung der Anfrage mit der Problembeschreibung des Falls übereinstimmt. Entsprechend der Definition aus Abschnitt 5.4.2 werden die Anfrage  $q$  anhand der Situationsmerkmale eines Situationsmodells und der Fall anhand der Situationsmerkmale eines Referenzmodells definiert. Der ermittelte Aktivierungswert ist somit ein Maß für die Ähnlichkeit zwischen Situationsmodell und Referenzmodell, anhand dessen eine Hypothese bezüglich des Situationskontexts generiert wird. In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der Ähnlichkeit von Situationsmodell und Referenzmodell erläutert.

#### Repräsentation der Situationsmerkmale durch Informationsentitäten

In einem ersten Schritt werden hierzu die Anfrage  $q$  und der Fall  $f$  anhand des Situationsmodells *Situation model* und des Referenzmodells *Reference model* erstellt. Hierzu müssen die durch Rollen und Instanzen abgebildeten Situationsmerkmale in eine Darstellung mittels Informationsentitäten überführt werden, wobei zwischen einstelligen und mehrstelligen Situationsmerkmalen wie folgt unterschieden wird:



**Abb. 5.5:** Referenzmodelle im Fallermittlungsnetz.



- **Einstellige Situationsmerkmale**

Ein einstelliges Situationsmerkmal  $s_u$  wird durch genau eine Rolle  $r$ , deren Rollenhalter  $I_1$  und deren Rollenfüller  $I_2$  repräsentiert, d. h. durch ein Tupel

$$s_u = (r, I_1, I_2). \quad (5.3)$$

Der Rollenhalter  $I_1$  eines einstelligen Situationsmerkmals ist die Instanz des Situationsmodells *Situation model* bzw. die Instanz des Referenzmodells *Reference model*. Das Situationsmerkmal wird somit durch die Rolle  $r$  und die Instanz  $I_2$  charakterisiert. Hierdurch lassen sich beispielsweise sämtliche Aspekte des chirurgischen Handlungsmodells abbilden.

- **Mehrstellige Situationsmerkmale**

Ein mehrstelliges Situationsmerkmal  $s_m$  wird durch die Rollen  $(r_1, r_2, r_3)$ , deren Rollenhalter  $(I_{r_1}, I_{r_2}, I_{r_3})$  und deren Rollenfüller  $(I_{r_{1_2}}, I_{r_{2_2}}, I_{r_{3_2}})$  repräsentiert, d. h. durch ein Tupel

$$s_m = (r_1, r_2, r_3, I_{r_1}, I_{r_{1_2}}, I_{r_{2_1}}, I_{r_{2_2}}, I_{r_{3_1}}, I_{r_{3_2}}). \quad (5.4)$$

Der Rollenhalter  $I_{r_1}$  der Rolle  $r_1$  ist die Instanz *Situation model* des Situationsmodells bzw. die Instanz *Reference model* des Referenzmodells. Der Rollenfüller  $I_{r_{1_2}}$  von  $r_1$  ist die Instanz  $H$  eines Hilfskonzepts. Diese Instanz  $H$  ist ebenso Rollenhalter  $I_{r_{2_1}}$  und Rollenhalter  $I_{r_{3_1}}$  der Rollen  $r_2$  und  $r_3$ . Das Situationsmerkmal wird somit durch die Rollen  $r_1, r_2$  und  $r_3$  sowie durch die Instanzen  $I_{r_{2_2}}$  und  $I_{r_{3_2}}$  charakterisiert. Mehrstellige Situationsmerkmale ermöglichen beispielsweise die Abbildung struktureller Beziehungen zwischen zwei Strukturen im Patientenzustandsmodell.

Die Unterscheidung zwischen einstelligen und mehrstelligen Situationsmerkmalen erfolgt anhand der verwendeten Rollen im Situations- und Referenzmodell. Sei  $S$  die Menge aller Situationsmerkmale,  $S_u$  die Menge der einstelligen Situationsmerkmale und  $S_m$  die Menge der mehrstelligen Situationsmerkmale. Dann gilt:

$$S_u \cup S_m = S \text{ und } S_u \cap S_m = \{\}.$$

Das heißt, die Situationsmerkmale können disjunkt aufgeteilt werden. Dies ermöglicht die Definition von Vorschriften zur Abbildung der einstelligen und mehrstelligen Situationsmerkmale auf Informationsentitäten des Fallermittlungsnetzes. Einstellige Situationsmerkmale werden auf atomare Informationsentitäten  $e_{at} \in E_{at}$  und mehrstellige Situationsmerkmale werden auf aggregierte Informationsentitäten  $e_{ag} \in E_{ag}$  abgebildet. Es gilt ferner:

$$E_{at} \cup E_{ag} = E \text{ und } E_{at} \cap E_{ag} = \{\}.$$

Eine disjunkte Aufteilung der Informationsentitäten in atomare und aggregierte Informationsentitäten ist also möglich. Eine atomare Informationsentität  $e_{at}$  wird definiert als ein Tupel bestehend aus einer Rolle  $r$  und einer Instanz  $I$ , d. h.,

$$e_{at} = (r, I). \quad (5.5)$$

Dies erlaubt die Definition der Funktion  $\psi_u$  zur Abbildung einstelliger Situationsmerkmale auf atomare Informationsentitäten wie folgt:

$$\psi_u : S_u \rightarrow E_{at}, s_u \mapsto e_{at}, \text{ mit} \quad (5.6)$$

$$s_u = (r, I_1, I_2) \mapsto e_{at} = (r, I_2).$$

Eine aggregierte Informationsentität  $e_{ag}$  wird definiert als ein Tupel bestehend aus drei Rollen  $r_1, r_2$  und  $r_3$  sowie zwei Instanzen  $I_1$  und  $I_2$ , d. h.,

$$e_{ag} = (r_1, r_2, r_3, I_1, I_2). \quad (5.7)$$

Dies erlaubt die Definition der Funktion  $\psi_m$  zur Abbildung mehrstelliger Situationsmerkmale auf aggregierte Informationsentitäten wie folgt:

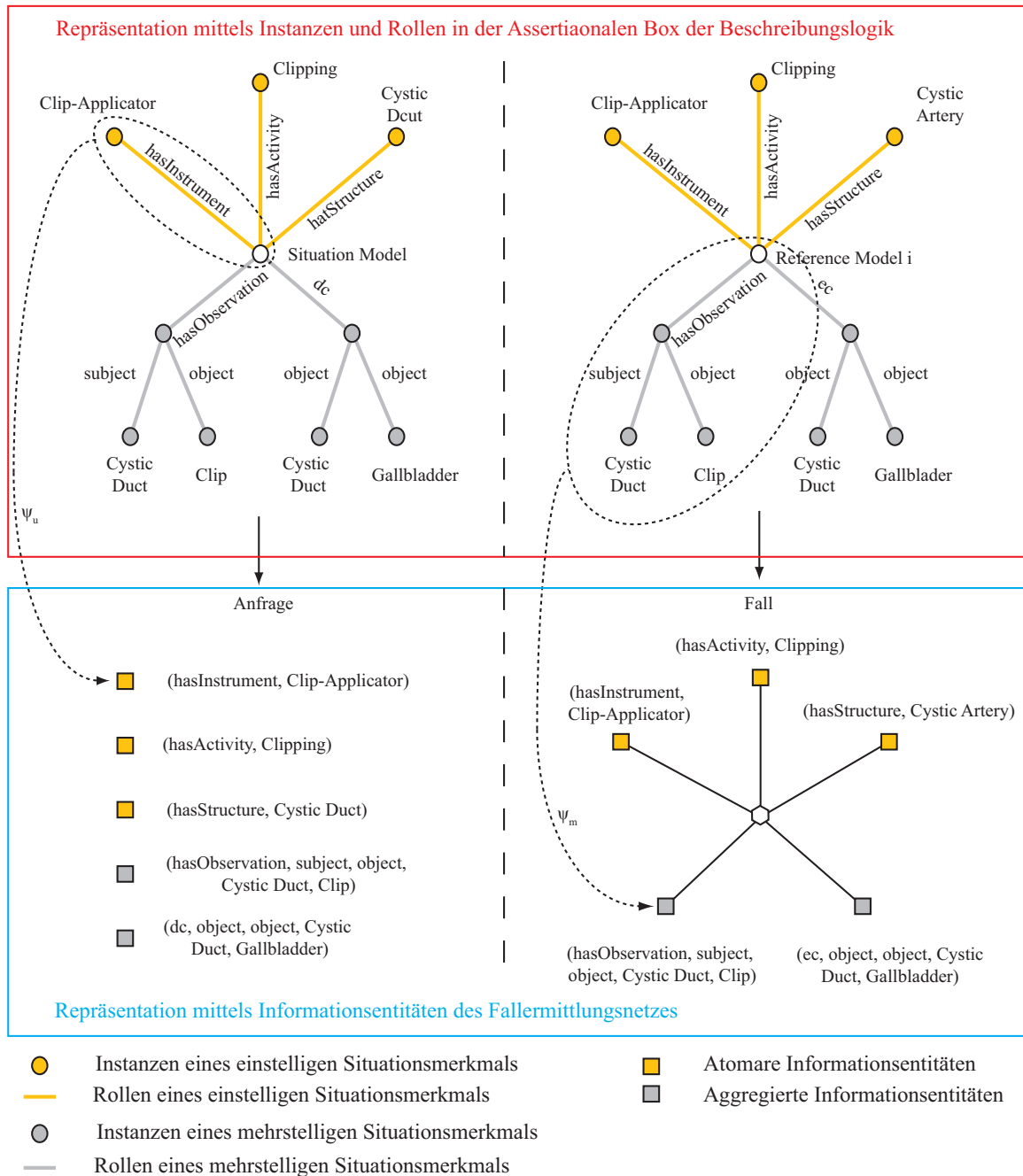
$$\psi_m : S_m \rightarrow E_{ag}, s_m \mapsto e_{ag}, \text{ mit} \quad (5.8)$$

$$s_m = (r_1, r_2, r_3, I_{r_1}, I_{r_2}, I_{r_2}, I_{r_2}, I_{r_3}, I_{r_3}) \mapsto e_{ag} = (r_1, r_2, r_3, I_{r_2}, I_{r_3}).$$

Das heißt, die Instanzen zur Repräsentation der Hilfskonzepte und des Situationsmodells werden nicht auf die aggregierte Informationsentität abgebildet. Abbildung 5.6 verdeutlicht die Abbildung der Situationsmerkmale auf Informationsentitäten anhand eines exemplarischen Situations- und Referenzmodells.

### Initiale Netzaktivierung anhand des Situationsmodells

Nach der Abbildung sämtlicher Situationsmerkmale auf entsprechende Informationsentitäten erfolgt die Interpretation der Operationssituation anhand des Fallermittlungsnetzes. In einem ersten Schritt wird das Fallermittlungsnetz hierzu anhand der Situationsmerkmale des Situationsmodells initialisiert, indem jeder Informationsentität  $e$  der Anfrage  $q$  eine Aktivierung von 1 zugewiesen wird. Der Aktivierungsbetrag basiert auf der Annahme, dass alle Beobachtungen durch die entsprechenden Sensoren und Verarbeitungsmechanismen korrekt erfasst und klassifiziert werden. Dies kann bei einem praktischen Einsatz des Assistenzsystems jedoch nicht sichergestellt werden. Eine umfassende Behandlung dieser Problematik sprengt jedoch den Rahmen dieser Arbeit. Um diesen Aspekt dennoch nicht unberücksichtigt



**Abb. 5.6:** Abbildung der Situationsmerkmale eines exemplarischen Situations- und Referenzmodells auf Informationsentitäten des Fallermittlungsnetzes. Farblich hervorgehoben ist die Fallunterscheidung bei Situationsmerkmalen und Informationsentitäten.

zu lassen, wird ein Gewichtungsfaktor  $0 \leq \varepsilon_e \leq 1$  eingeführt, mit dem sich der Einfluss des Situationsmerkmals auf das Interpretationsergebnis steuern lässt. Bezeichne  $E_q$  die Menge der Informationsentitäten der Anfrage  $q$ . Dann wird die initiale Aktivierungsfunktion  $\alpha_0$  wie folgt definiert:

$$\alpha_0(e) = \begin{cases} \varepsilon_e & , \text{ falls } e \in E_q \\ 0 & , \text{ sonst.} \end{cases} \quad (5.9)$$

Mittels der Propagierungsfunktionen werden die initialen Aktivierungen durch das Netz propagiert und fließen in die Aktivierung der Fallknoten ein.

### Aktivierung der Informationsentitäten des Referenzmodells

Die initiale Netzaktivierung wird entlang der Ähnlichkeitskanten des Fallermittlungsnetzes auf die Informationsentitäten der Fälle propagiert. Eine Ähnlichkeitskante drückt die Ähnlichkeitsbeziehung zweier Informationsentitäten aus und wird durch die Funktion  $\sigma$  berechnet. Seien  $e_q \in E_q$  die Informationsentitäten der Anfrage  $q$ , weiterhin bezeichne  $e_f \in E_f$  die Informationsentitäten eines Falls  $f$ . Die Aktivierung einer Informationsentität  $e_f$  ergibt sich wie folgt: In einem ersten Schritt wird die Informationsentität  $e_q$  ermittelt, die die größte Ähnlichkeit mit  $e_f$  aufweist. In einem zweiten Schritt errechnet sich die Aktivierung von  $e_f$ , indem die initiale Aktivierung von  $e_q$  entlang der durch  $\sigma(e_q, e_f)$  definierten Ähnlichkeitskante des Fallermittlungsnetzes auf  $e_f$  propagiert wird. Hierzu wird die Funktion  $\alpha_1$  wie folgt definiert:

$$\alpha_1(e_f) = \max_{e_q \in E_q} \{ \sigma(e_f, e_q) \} \alpha_0(e_q). \quad (5.10)$$

Im folgenden Abschnitt wird die Ähnlichkeitsfunktion  $\sigma$  definiert, die unter Einbeziehung der Applikationsontologie die Ähnlichkeit zweier Informationsentitäten  $e_1, e_2$  berechnet. In der einschlägigen Literatur finden sich zahlreiche Vorschläge zur Definition einer solchen Funktion [BR01]. Aufgrund der individuellen und domänenspezifischen Rahmenbedingungen existiert jedoch kein Goldstandard. Ein gemeinhin gültiger Konsens ist jedoch die Präferenz automatisch generierter Ähnlichkeitsfunktionen gegenüber manuell erstellten Abbildungsvorschriften. Dementsprechend wird in dieser Arbeit eine automatisch generierte Ähnlichkeitsfunktion verwendet.

Der gewählte Ansatz vereint das spezifische Wissen eines fallbasierten Systems mit dem allgemeinen Wissen der Applikationsontologie, indem die Ähnlichkeitsfunktion anhand der Konzepttaxonomie definiert wird. Die Repräsentation einer Informationsentität mittels Rollen und Instanzen ermöglicht hierbei die Einbeziehung der Konzepttaxonomie. Rollen und Instanzen werden in der *Assertionalen Box* abgebildet, die Konzepttaxonomie in der *Terminologischen Box*. Die Verknüpfung von

*Assertionaler Box* und *Terminologischer Box* ist durch die Beschreibungslogik gegeben, in der jede Instanz eindeutig einem Konzept der Konzepttaxonomie zugeordnet wird. Dies erlaubt die Definition eines Abstandsmaßes zweier Instanzen anhand der Konzepttaxonomie. Die Berechnung der Konzeptähnlichkeit erfolgt analog zu [BAL06]. Es gilt folgende Notation:

Seien  $C = \{c_1 \dots c_n\}$  die Konzepte der Applikationsontologie in der *Terminologischen Box*. Ferner sei  $\vec{v}_i$  ein Vektor zur Beschreibung der Position des Konzepts  $c_i$  in der Konzepttaxonomie wie folgt:

$$\vec{v}_i = \{k_1 \dots k_n\} \text{ mit } k_i = \begin{cases} 1, & \text{falls } c_j \text{ } c_i \text{ subsumiert} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Ähnlichkeit zweier Konzepte  $c_i$  und  $c_j$  wird nun berechnet, indem die *cos*-Funktion auf den Winkel  $\theta$  zwischen den zugehörigen Konzeptvektoren  $\vec{v}_i$  und  $\vec{v}_j$  wie folgt angewandt wird:

$$\text{sim}(c_i, c_j) = \cos(\theta) = \frac{\vec{v}_i \cdot \vec{v}_j}{\|\vec{v}_i\| \cdot \|\vec{v}_j\|}.$$

Durch Umformung ergibt sich folgende äquivalente Darstellung:

$$\text{sim}(c_i, c_j) = \frac{|\cap \text{super}(c_i, C), \text{super}(c_j, C)|}{\sqrt{|\text{super}(c_i, C)|} \cdot \sqrt{|\text{super}(c_j, C)|}}. \quad (5.11)$$

Die Funktion  $\text{super}(c_i, C)$  berechnet dabei sämtliche Konzepte aus  $C$ , die  $c_i$  subsumieren. Eine Anwendung der Funktion  $\text{sim}$  für die Berechnung der Ähnlichkeit zweier Informationsentitäten erfordert eine Funktion  $\zeta$ , die das zugehörige *TBox*-Konzept  $c$  einer Instanz  $i$  ermittelt. Sei  $I$  die Menge aller Instanzen der *Assertionalen Box* und  $C$  die Menge der Konzepte in der *Terminologischen Box*, dann gilt:

$$\zeta : I \rightarrow C, i \mapsto \zeta(i) = c. \quad (5.12)$$

Die Funktion  $\zeta$  ermittelt das spezifischste Konzept  $c$  einer Instanz  $i$ . Die Realisierung der Funktion erfolgt durch Schlussfolgerungsalgorithmen. Daraufhin kann die Funktion  $\sigma_{at}$  zur Berechnung der Ähnlichkeit zwischen atomaren Informationsentitäten und die Funktion  $\sigma_{ag}$  zur Berechnung der Ähnlichkeit zwischen aggregierten Informationsentitäten definiert werden. Die Ähnlichkeit  $\sigma_{at}(e_k, e_j)$  zweier atomarer Informationsentitäten  $e_k$  und  $e_j$  ist wie folgt definiert:

$$\sigma_{at}(e_k, e_j) = \sigma_{at}((r_k, i_k), (r_j, i_j)) = \begin{cases} \text{sim}(\zeta(i_k), \zeta(i_j)), & \text{falls } r_k = r_j \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.13)$$

Die Ähnlichkeit  $\sigma_{ag}(e_k, e_j)$  zweier aggregierter Informationsentitäten  $e_k$  und  $e_j$  wird daraufhin wie folgt definiert:

$$\sigma_{ag}(e_k, e_j) = \sigma_{at}((r_{k_1}, r_{k_2}, i_{k_1}, i_{k_2}, i_{k_3}), (r_{j_1}, r_{j_2}, i_{j_1}, i_{j_2}, i_{j_3})).$$

Bezeichne  $s_1$  die summierten Konzeptähnlichkeiten zwischen den Instanzenpaaren  $(i_{k_2}, i_{j_2})$  und  $(i_{k_3}, i_{j_3})$  unter Einbeziehung der Ähnlichkeitsfunktion für atomare Informationsentitäten wie folgt:

$$s_1 = \sigma_{at}((r_{k_2}, i_{k_2}), (r_{j_2}, i_{j_2})) + \sigma_{at}((r_{k_3}, i_{k_3}), (r_{j_3}, i_{j_3})). \quad (5.14)$$

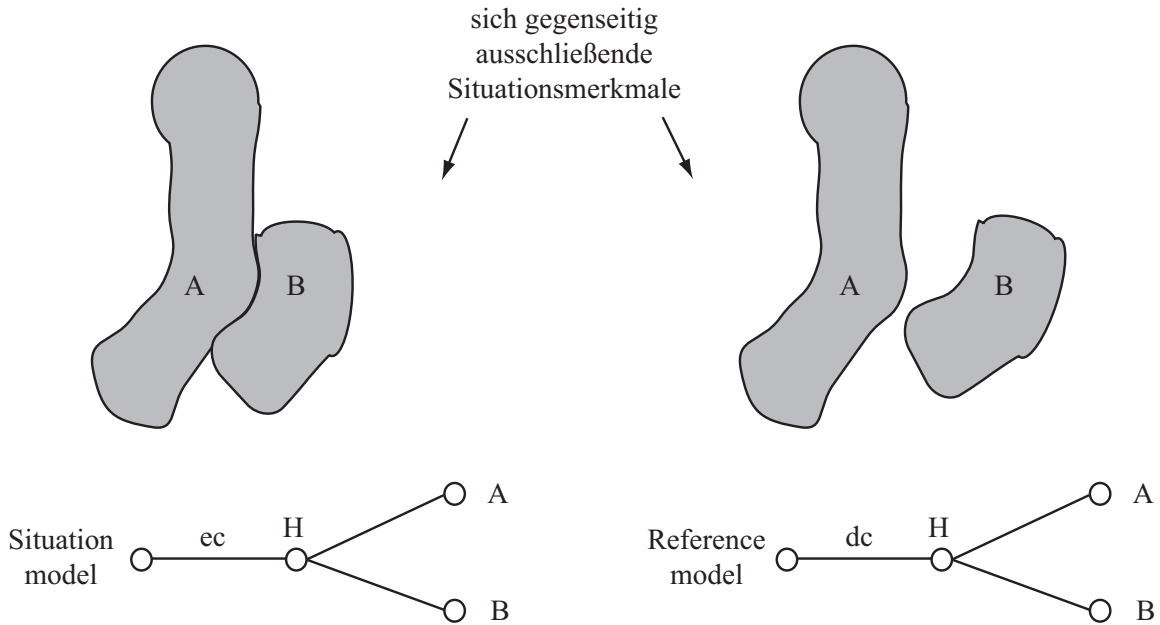
Analog hierzu bezeichne  $s_2$  die summierten Konzeptähnlichkeiten zwischen den Instanzenpaaren  $(i_{k_2}, i_{j_3})$  und  $(i_{k_3}, i_{j_2})$ :

$$s_2 = \sigma_{at}((r_{k_2}, i_{k_2}), (r_{j_3}, i_{j_3})) + \sigma_{at}((r_{k_3}, i_{k_3}), (r_{j_2}, i_{j_2})). \quad (5.15)$$

D. h., mittels  $s_1$  und  $s_2$  werden die Rollenfüller der zugrunde liegenden mehrstelligen Situationsmerkmale stellenweise verglichen und aufsummiert. Anhand von  $s_1$  und  $s_2$  wird eine Funktion  $\psi$  definiert, welche den aggregierten Informationsentitäten nur dann einen Wert zuweist, falls die betrachteten Instanzen paarweise vom gleichen Konzept abstammen.

$$\psi(s_1, s_2) = \begin{cases} 2, & \text{falls } \max\{s_1, s_2\} = 2 \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.16)$$

Dies bedeutet, dass identische mehrstellige Merkmale im Situations- und Referenzmodell durch einen Ähnlichkeitsbetrag von 2 ausgedrückt werden, in allen anderen Fällen beträgt die Ähnlichkeit 0. Dies führt jedoch zu einer suboptimalen Behandlung bei sich gegenseitig ausschließenden Merkmalen, wie das folgende Beispiel aus Abbildung 5.7 zeigt: Das Situationsmodell *Situation model* beschreibt das Situationsmerkmal „*Struktur A ist mit Struktur B verbunden*“ durch die räumliche Beziehung  $ec(A, B)$ . Im Referenzmodell *Reference model* wird das Situationsmerkmal „*Struktur A ist nicht mit Struktur B verbunden*“ auf dieselbe Weise durch die räumliche Beziehung  $dc(A, B)$  abgebildet. Eine Anwendung der Funktion  $\psi$  auf die zugehörigen Informationsentitäten liefert aufgrund der unterschiedlichen Rollen  $dc$  und  $ec$  einen Rückgabewert von 0. Daraus folgt, dass das betrachtete Situationsmerkmal des Referenzmodells keine Ähnlichkeit mit dem Situationsmerkmal des Situationsmodells aufweist. Dass sich diese Situationsmerkmale gegenseitig ausschließen, wird dabei jedoch nicht berücksichtigt. Um dies zu erreichen, wird ein Strafpunktsystem eingeführt. Dieses ermöglicht die Zuweisung negativer Ähnlichkeiten für sich gegenseitig ausschließende mehrstellige Situationsmerkmale des Situations- und Referenzmodells. Die Umsetzung des Strafpunktsystems erfordert für jede Rolle  $r_j \subseteq R$  die Bildung von drei disjunkten Klassen, in die alle anderen Rollen eingeteilt werden. Es handelt sich hierbei um die Klasse der vergleichbaren Rollen  $R_{j_v} \subseteq R$ , die Klasse der nicht vergleichbaren Rollen  $R_{j_n} \subseteq R$  und die



**Abb. 5.7:** Beispiel für sich gegenseitig ausschließende Situationsmerkmale: Struktur A ist mit Struktur B verbunden (links), Struktur A ist mit Struktur B nicht verbunden (rechts).

Klasse sich gegenseitig ausschließender Rollen  $R_{ja} \subseteq R$ . Sei  $r_k$  eine Rolle zur Beschreibung eines mehrstelligen Situationsmerkmals einer Informationsentität  $e_k$  des Situationsmodells. Ferner sei  $r_l$  eine Rolle zur Beschreibung eines mehrstelligen Situationsmerkmals einer Informationsentität  $e_l$  des Referenzmodells. Die Einteilung aller Rollen in die drei genannten Klassen erfolgt durch  $R_{k_v}, R_{k_n}$  und  $R_{k_a}$ . Dies ermöglicht die Bestimmung der Ähnlichkeit für eine aggregierte Informationsentität wie folgt:

$$\sigma_{ag}(e_k, e_l) = \begin{cases} \psi(s_1, s_2), & \text{falls } r_l \in R_{k_v} \\ -\psi(s_1, s_2), & \text{falls } r_l \in R_{k_a} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.17)$$

### Aktivierung der Fallknoten

Bei der Aktivierung  $\alpha_2(f)$  eines Falls  $f$  wird die Aktivierung  $\alpha_1(e_f)$  der zugehörigen Informationsentitäten  $e_f \in E_f$  entlang von Relevanzkanten  $(e_f, f)$  auf den Fallknoten gemäß 5.2 propagiert. Die Bestimmung des Wertes einer Relevanzkante erfolgt durch die Funktion  $\rho(e_f, f)$ . Dies ermöglicht eine Definition der Aktivierungsfunktion  $\alpha_2(e_f)$  wie folgt:

$$\alpha_2(f) = \sum_{e_f \in E_f} \rho(e_f, f) \alpha_1(e_f). \quad (5.18)$$

Mittels der Relevanz einer Informationsentität  $e_f$  wird festgelegt, inwiefern die Aktivierung  $\alpha_1(e_f)$  des Knotens  $e_f$  bei Aktivierung des Referenzmodells  $f$  berücksichtigt wird. Für die Anwendung zur Situationsinterpretation wird die Relevanzfunktion  $\rho(e_f, f)$  so definiert, dass kein Fall die Anfrage besser beschreibt als die Anfrage selbst, d. h.,  $\alpha_2(f) \leq \alpha_2(f = q)$ . Dies erfordert eine Beschränkung der betrachteten Informationsentitäten, um eine Präferenz von Fällen mit vielen, aber eventuell unähnlichen Informationsentitäten zu vermeiden. Diese Beschränkung erfolgt anhand der Relevanzfunktion aufgrund einer Betrachtung der vorhandenen Rollen im Situations- und Referenzmodell.

Bezeichne  $k_f$  die Anzahl der Rollen  $r_j$  im Referenzmodell und  $k_s$  die Anzahl der Rollen  $r_j$  im Situationsmodell. Dann dürfen maximal  $k_s$  Informationsentitäten  $e_j = (r_j, i_j)$  des Falls  $f$  eine Relevanz von  $\rho(e_j, f) = 1$  zugeordnet werden. Andernfalls kann nicht sichergestellt werden, dass der Fall eine höhere Aktivierung als die Anfrage erzielt. Dies wird wie folgt realisiert:

Die Menge aller Informationsentitäten, die durch die Rolle  $r_j$  mit dem Fall verbunden sind, wird mit  $E_{f_{r_j}} = \{e_{f_1}, \dots, e_{f_{k_f}}\}$  bezeichnet. Weiter bezeichne  $L$  eine geordnete Liste mit den  $k_s$  höchsten Knotenaktivierungen des Falls  $f$ , deren Informationsentität die Rolle  $r_j$  beinhaltet:

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_{k_s}\} \text{ mit } l_i \leq l_{i+1} \text{ und } l_i = \alpha_1(e_{f_i}).$$

Die Menge  $E_{f_{r_{j_p}}} \subseteq E_{f_{r_j}}$  enthält die zugehörigen  $k_s$  Informationsentitäten. Daraufhin wird die Relevanzfunktion wie folgt definiert:

$$\rho(e_f, f) = \begin{cases} 1, & \text{falls } e_f \in E_{f_{r_{j_p}}} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.19)$$

#### 5.4.4 Hypothese bezüglich des Situationskontexts

Die Grundlage für die Erzeugung der Hypothese bezüglich des Situationskontexts bildet der Fall  $f$  mit dem höchsten Aktivierungswert  $\alpha_2(f)$ . Dieser Aktivierungswert ist ein Maß für die Ähnlichkeit der Informationsentitäten des Falls und der Anfrage und somit auch ein Maß für die Ähnlichkeit der Situationsmerkmale des zugehörigen Referenz- und Situationsmodells. Die Hypothese bezüglich des Situationskontexts wird anhand des Operationsabschnitts bzw. der Gefahrenklasse des Referenzmodells  $r^*$  erzeugt, dessen Fall  $f^*$  die höchste Aktivierung aufweist und eine Minimalaktivierung  $a_{min}$  überschreitet. Hierzu werden in einem ersten Schritt sämtliche Fallaktivierungen bezüglich der Anfrage normiert, indem eine exakte Kopie des Situationsmodells  $s$  angefertigt und als Referenzmodell  $f_s$  in die Fallbasis eingefügt wird.



Die normierten Fallaktivierungen werden mit  $\alpha'_2(f)$  bezeichnet:

$$\alpha'_2(f) = \frac{\alpha_2(f)}{\alpha_2(f_s)}. \quad (5.20)$$

Aufgrund des Strafkostenverfahrens können negative Fallaktivierungen bei sich gegenseitig ausschließenden Situationsmerkmalen im Situationsmodell und Referenzmodell nicht ausgeschlossen werden. Durch einen Vergleich der höchsten Fallaktivierung  $\alpha'_2(f^*)$  mit der Minimalaktivierung  $a_{min}$  wird überprüft, ob eine Mindestähnlichkeit zwischen den Merkmalen des zugehörigen Referenz- und Situationsmodells vorliegt:

$$\alpha'_2(f^*) \geq a_{min}. \quad (5.21)$$

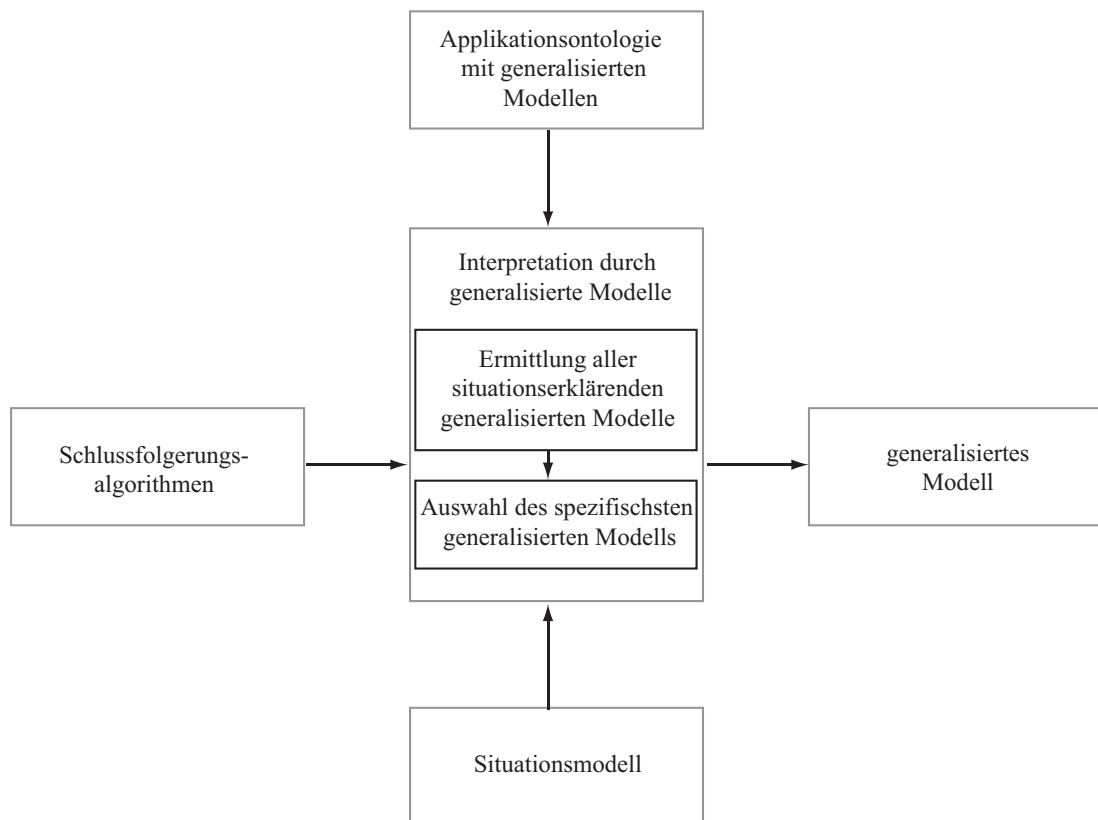
Ist diese Bedingung erfüllt, wird der Operationsabschnitt des Referenzmodells mit der höchsten Aktivierung ermittelt und die Hypothese aufgestellt, dass sich die Operation in genau diesem Operationsabschnitt befindet.

## 5.5 Interpretation durch generalisierte Modelle

Die Interpretation durch generalisierte Modelle orientiert sich an dem Ansatz von Neumann et al. zur Szeneninterpretation mittels Beschreibungslogiken [NM08]. Bei der Interpretation durch generalisierte Modelle wird dieses Konzept für die Anwendung zur Bestimmung des Kontexts einer Operationssituation angepasst und erweitert.

Neumann et al. definieren eine Szene durch die Gesamtheit der beteiligten Objekte und Handlungen. Die Beschreibung einer Szene erfolgt durch Aggregate. Ein Aggregat erlaubt dabei die Zusammenfassung von Objekten und Handlungen unter Angabe zusätzlicher Bedingungen. In der vorliegenden Arbeit bildet die Operationssituation das Äquivalent zur Szene, Situationsmerkmale können als Aggregate der Szenenbeschreibung aufgefasst werden.

Analog zur Vorgehensweise bei der Anwendung eines Fallermittlungsnetzes wird untersucht, inwiefern das aktuell vorliegende Situationsmodell durch ein Modell erklärt werden kann. Die eingesetzten Methoden und die Art und Weise, in der die Modelle abgebildet werden, unterscheiden sich jedoch erheblich. Abbildung 5.8 verdeutlicht das Konzept der Interpretation durch generalisierte Modelle. Im Schaubild ist zu erkennen, dass die Abbildung der Referenzmodelle nicht in der *Assertionalen Box*, sondern in der *Terminologischen Box*, d. h. in der Applikationsontologie erfolgt. Des Weiteren wird für die Interpretation kein Ähnlichkeitsmaß definiert. Stattdessen werden Schlussfolgerungsalgorithmen des beschreibungslogischen Systems eingesetzt. Es handelt sich somit um einen rein deduktiven Ansatz



**Abb. 5.8:** Konzept der Situationsinterpretation mittels generalisierter Modelle.

der Situationsinterpretation. Nachfolgend wird das Konzept der Situationsinterpretation mittels generalisierter Modelle erörtert. Details zu Entwurf und Anwendung sind in [SSM+07a, SSB+07, SKB+09] dokumentiert.

### 5.5.1 Beschreibungskonzepte und Funktionen

Eine Interpretation durch generalisierte Modelle erfordert die Definition folgender Beschreibungskonzepte und Funktionen:

- **Generalisiertes Modell  $g$**

In einem generalisierten Modell werden Beschreibungen mehrerer Operationssituationen zusammengefasst und abstrahiert. Dies geschieht hauptsächlich, indem konkrete Situationsmerkmale durch taxonomisch höher stehende Begriffe der Applikationsontologie ersetzt werden. Ziel dieser Generalisierung ist die Beschreibung einer Vielzahl konkreter Operationssituationen durch ein einziges Modell. Dies erlaubt die Beschreibung eines Operationsabschnitts bzw. einer Gefahrensituation durch ein solches generalisiertes Modell. Die Ausgangsbasis für die Erstellung eines generalisierten Modells bildet die Kenntnis der jeweiligen Situationsmerkmale. Die Repräsentation der

erstellten Modelle erfolgt in der *Terminologischen Box*. Aus diesem Grund wird auch von der Definition eines generalisierten Modells gesprochen.

- **Situationsmodell  $s$**

Das zu interpretierende Situationsmodell wird gemäß der Definition von Abschnitt 4.8.3 verwendet und beschreibt eine Operationssituation anhand ihrer Situationsmerkmale. Die Beschreibung erfolgt in der *Assertionalen Box*.

- **Interpretationsfunktion  $\tau$**

Die Interpretationsfunktion überprüft, ob ein aktuell vorliegendes Situationsmodell  $s$  durch ein generalisiertes Modell  $g$  erklärt werden kann. Die Umsetzung erfolgt durch Schlussfolgerungsalgorithmen des beschreibungslogischen Systems. Die Grundlage für die Anwendung dieser Algorithmen bildet die Repräsentation der Modelle in der *Terminologischen Box* und der *Assertionalen Box*.

### 5.5.2 Definition eines generalisierten Modells

Die Definition eines generalisierten Modells erfolgt in der *Terminologischen Box* anhand der zulässigen Syntaxregeln, wodurch die Ausdrucksmächtigkeit der Modellierung festgelegt wird. Die Ausgangsbasis hierfür bildet die Beschreibungssprache  $\mathcal{AL}$ . Diese ist wie folgt definiert:

Seien  $A, B, C, D$  Konzeptbeschreibungen,  $A$  und  $B$  weiterhin atomar. Außerdem sei  $R$  eine atomare Rolle. Dann werden Konzeptbeschreibungen der Beschreibungssprache  $\mathcal{AL}$  nach folgenden Regeln gebildet:

$C, D \longrightarrow$	$\perp$	(Leeres Konzept)
	$\top$	(Universelles Konzept)
	$A$	(Atomares Konzept)
	$\neg A$	(Negation atomarer Konzepte)
	$C \cap D$	(Schnitt zweier Konzepte)
	$\forall R.C$	(universelle Wertebeschränkung)
	$\exists R.\top$	(limitierte Wertauswahl)

Eine Erweiterung dieser Ausdrucksmächtigkeit entsteht durch das Hinzufügen weiterer Konstruktoren:

- Negation von beliebigen Konzepten  $\mathcal{C}$ :  $\neg C$
- Vereinigung  $\mathcal{U}$ :  $C \cup D$
- Volle Existenzquantifizierung  $\mathcal{E}$ :  $\exists R.C$
- Verwendung von Datentypattributen  $\mathcal{D}$

Anhand der Menge der zulässigen Konstruktoren setzt sich der Name der verwendeten Beschreibungssprache  $\mathcal{A} \mathcal{L}[\mathcal{C}][\mathcal{U}][\mathcal{E}][\mathcal{D}]$  zusammen. Eine Verwendung weiterer Konstruktoren erlaubt die Modellierung komplexerer Zusammenhänge, führt jedoch zu einem höheren Aufwand bei der Anwendung von Schlussfolgerungsalgorithmen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Konstruktoren findet sich in der einschlägigen Literatur [BCM03].

Die Repräsentation eines generalisierten Modells erfolgt durch ein *TBox*-Konzept, dessen Konzeptbeschreibung anhand der Situationsmerkmale der zu modellierenden Situation definiert wird. Dabei wird für jedes Situationsmerkmal ein Beschreibungselement nach den Regeln der verwendeten Syntax erstellt. Das Modellierungsprinzip soll anhand des folgenden Beispiels verdeutlicht werden:

**Beispiel 1:** Konzeptdefinition des generalisierten Modells *M1*:

$$M1 \equiv \exists \text{hasInstrument.Grasper} \\ \sqcap \exists \text{hasStructure.Fundus.}$$

Dieses sehr einfache Modell beschreibt folgenden Sachverhalt: Alle Instanzen des *TBox*-Konzepts *M1* besitzen mindestens eine Rolle vom Typ *hasInstrument*, dessen Rollenfüller eine Instanz des Konzepts *Grasper* (Fasszange) ist. Das zweite Beschreibungselement fordert das Vorhandensein mindestens einer Rolle vom Typ *hasStructure*, deren Rollenfüller ein Konzept des Typs *Fundus*<sup>6</sup> ist. Dieses Modell beschreibt damit einen Aspekt der chirurgischen Handlung und kann für die Abbildung von Situationen verwendet werden, in denen der Fundus von einer Fasszange gehalten wird. Ein komplexeres Modell, bei dem auch der Patientenzustand abgebildet wird, ist in Beispiel 2 dargestellt:

**Beispiel 2:** Konzeptdefinition des generalisierten Modells *M2*:

$$M2 \equiv \exists \text{hasInstrument.Grasper } (a) \\ \sqcap \exists \text{hasInstrument.Scissor } (b) \\ \sqcap \exists \text{hasActivity.Grasping } (c) \\ \sqcap \exists \text{hasActivity.Cutting } (d) \\ \sqcap \exists \text{hasStructure.Fundus } (e) \\ \sqcap \exists \text{hasStructure.Cystic Duct } (f) \\ \sqcap \exists \text{hasObservation.}((\text{hasObj.Cystic Duct}) \text{ and } (\text{hasObj.Clip})) (g) \\ \sqcap \exists \text{ec.}((\text{hasObj.Gallbladder}) \text{ and } (\text{hasObj.Liver})) (h) \\ \sqcap \exists \text{ec.}((\text{hasObj.Gallbladder}) \text{ and } (\text{hatObj.CysticArtery})) (i) \\ \sqcap \exists \text{dc.}((\text{hasObj.Gallbladder}) \text{ and } (\text{hatObj.CysticDuct})) (j).$$

Beschrieben wird folgender Sachverhalt: Bei den verwendeten Instrumenten handelt es sich um eine Fasszange (*Grasper*) sowie um eine Schere (*Scissor*). Dies

<sup>6</sup>Bezeichnung für einen Abschnitt der Gallenblase.

wird im Modell durch die mit (a) und (b) gekennzeichneten Beschreibungselemente ausgedrückt. Der Chirurg hält (*Grasping*) die Gallenblase am Fundus (c, e). Der geclippte Ductus Cysticus (*Cystic Duct*) wird mit einer Schere durchtrennt (b, d, f, g). Die Gallenblase (*Gallbladder*) ist noch nicht vom Leberbett (*Liver*) gelöst (h). Die Arteria Cystica (*Cystic Artery*) wurde weder geclippt noch durchtrennt (i).

Der vorgestellte Ansatz erlaubt die Definition eines generalisierten Modells, indem die zugehörigen Situationsmerkmale als Beschreibungselemente der Konzeptdefinition in der *Terminologischen Box* formuliert werden. Die Grundlage für die Modellierung bilden die Konstruktoren der verwendeten Beschreibungslogik. Die Generalisierung eines Modells erfolgt durch eine Erweiterung bzw. durch eine Modifikation der Konzeptdefinition. Ist für Beispiel 2 anstelle der Schere die alternative Verwendung eines elektrischen Koagulators (*Electrical Hook*) zulässig, so wird dies durch eine Erweiterung des Beschreibungselements (b) zu *hasInstrument.(Scissor or Electrical Hook)* im Modell abgebildet. Dasselbe Ergebnis wird durch eine Modifikation von Beschreibungselement (b) zu *hasInstrument.Cut Instrument* erzielt. Bei solch einer Modifikation wird ein Konzept zur Beschreibung eines Situationsmerkmals durch ein taxonomisch höher stehendes Konzept ersetzt<sup>7</sup>.

Die Modellierung mittels einer Beschreibungslogik basiert auf der Annahme der offenen Welt<sup>8</sup>. Diese Annahme besagt, dass alle Aussagen, deren Wahrheitsgehalt nicht bekannt ist, als wahr angenommen werden. In Bezug auf die Erstellung generalisierter Modelle bedeutet dies, dass ausschließende Aussagen explizit modelliert werden müssen. Beispielsweise, dass in einer Situation keine Schere (*Scissor*) verwendet werden darf. Beispiel 3 verdeutlicht dies:

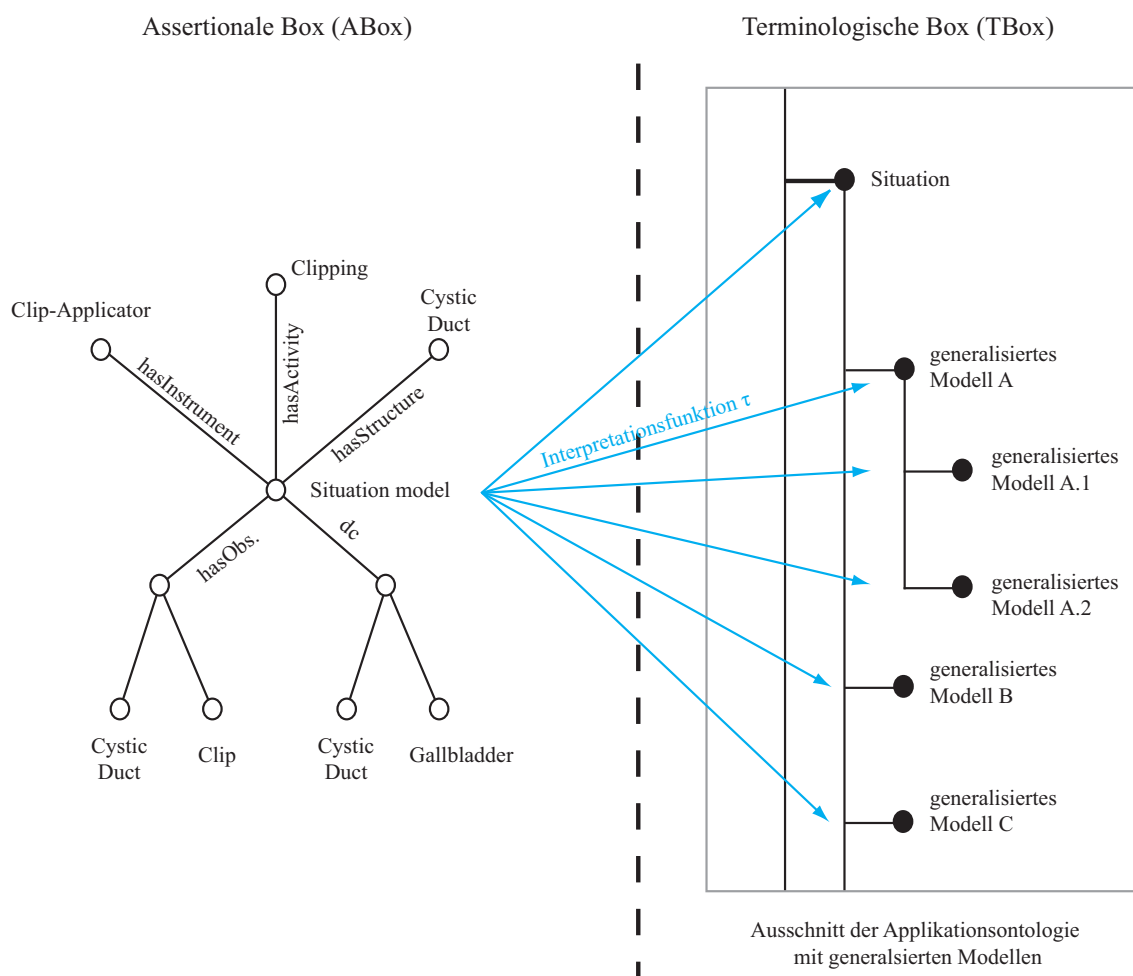
**Beispiel 6.3:** Konzeptdefinition des generalisierten Modells *M3*:

$$M3 \equiv \exists \text{hasInstrument}.(\neg \text{Scissor}).$$

Anhand der Beispiele wurde deutlich, dass die Ausschöpfung des vorhandenen Repertoires an Konstruktoren die Erstellung komplexer generalisierter Modelle durch eine entsprechende Gestaltung der Konzeptdefinitionen erlaubt. Die Definition der generalisierten Modelle erfolgt als Unterkonzept von *Situation* in der *Terminologischen Box*. Das Modellierungskonzept unterstützt hierbei die Bildung einer Situationshierarchie. Die Anwendung der generalisierten Modelle zur Situationsinterpretation bedingt die Definition eines generalisierten Modells für jeden Operationsabschnitt bzw. für jede Gefahrensituation. Im folgenden Abschnitt wird die Interpretation des Situationsmodells durch generalisierte Modelle erläutert.

<sup>7</sup>Das Konzept *Cut Instrument* subsumiert die Konzepte *Scissor* und *Electrical Hook*.

<sup>8</sup>engl.: Open-world assumption.



**Abb. 5.9:** Interpretation des Situationsmodells mittels generalisierter Modelle. Die Interpretationsfunktion überprüft, ob das Situationsmodell die Instanz eines generalisierten Modells ist.

### 5.5.3 Hypothese bezüglich des Situationskontexts

Ziel der Situationsinterpretation ist die Erstellung einer Hypothese bezüglich des Situationskontexts (vgl. Abschnitt 5.3). Bei dem Ansatz durch generalisierte Modelle wird hierbei folgendermaßen vorgegangen:

Voraussetzung für eine Interpretation durch generalisierte Modelle ist die Definition des Situationsmodells als Instanz *Situation model* des Konzepts *Situation*. Diese Bedingung ist erfüllt (vgl. Abschnitt 4.8.3). Die Situationsinterpretation durch generalisierte Modelle prüft nun gemäß Abbildung 5.9, ob das Situationsmodell die Instanz eines generalisierten Modells ist. Dies ist genau dann der Fall, wenn alle Bedingungen des generalisierten Modells erfüllt sind, d. h., alle Situationsmerkmale des generalisierten Modells werden bei der Operationssituation beobachtet. Dieser Sachverhalt wird durch die Interpretationsfunktion  $\tau$  (5.22) ausgedrückt.

Sei  $I$  die Menge der Instanzen in der *Assertionalen Box*,  $s \in I$  das Situationsmodell und  $C = \{c_1, \dots, c_n\}$  die Menge der Konzepte in der *Terminologischen Box*, dann ermittelt die Funktion  $\tau$  das spezifischste Konzept  $c_j$  der Instanz  $s$ :

$$\tau(s) : I \rightarrow C, s \mapsto c_j. \quad (5.22)$$

Die Berechnung der Funktion  $\tau$  erfolgt durch Schlussfolgerungsalgorithmen, die das implizit vorhandene Wissen in eine explizite Darstellung überführen. Für eine detaillierte Aufzählung und Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Schlussfolgerungsalgorithmen, wie beispielsweise die Erfüllbarkeitsprüfung, die Konsistenzprüfung oder die Konzeptzugehörigkeitsprüfung, sei auf [BCM03] verwiesen.

Liefert die Interpretation als Ergebnis das ursprünglich definierte *TBox*-Konzept *Situation*, existiert in der *Terminologischen Box* kein generalisiertes Modell, das  $s$  erklärt, und es handelt sich somit um eine unbekannte Operationssituation. In allen anderen Fällen wird die durch  $s$  beschriebene Operationssituation durch das generalisierte Modell  $c_j$  erklärt. In diesem Fall wird die Hypothese aufgestellt, dass der durch  $c_j$  beschriebene Operationsabschnitt bzw. die beschriebene Gefahrensituation vorliegt.

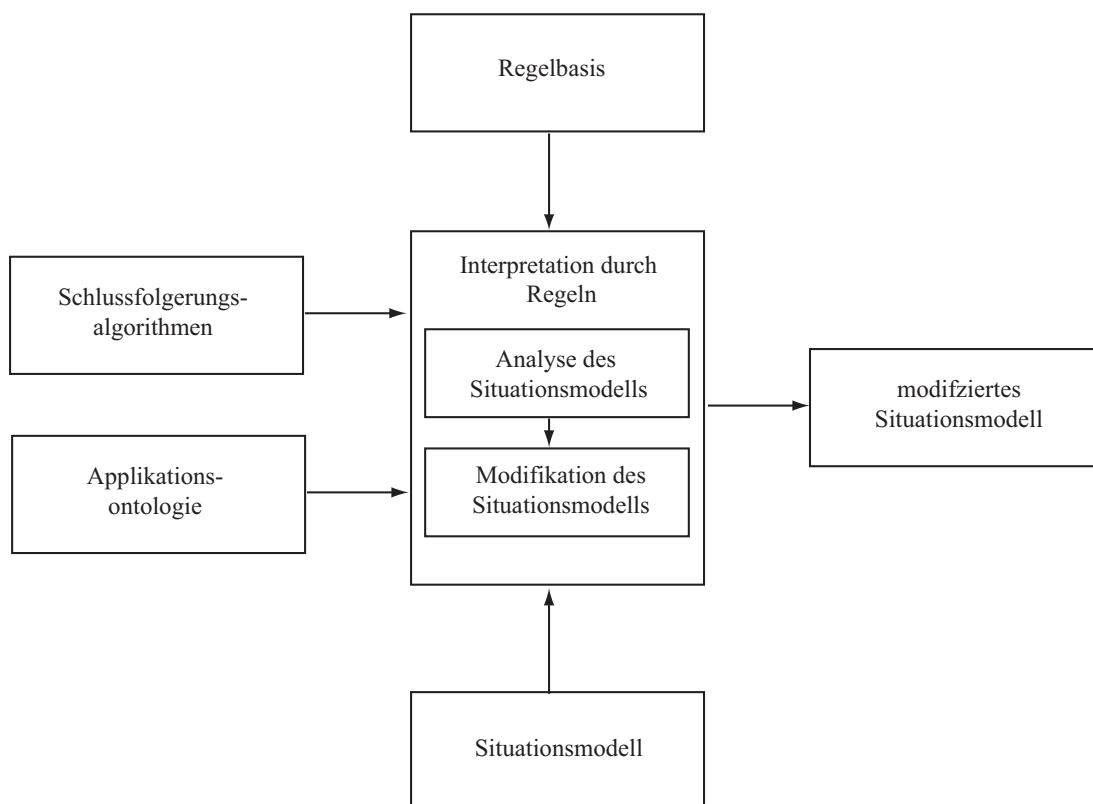
Dies bedeutet, dass das vorgestellte Verfahren ein Situationsmodell nur dann interpretieren kann, wenn alle im generalisierten Modell definierten Situationsmerkmale in der Operationssituation beobachtet und im Situationsmodell abgebildet wurden. Eine Anwendung des Verfahrens setzt weiterhin die explizite Definition aller zu interpretierenden Situationen voraus.

## 5.6 Regelbasierte Interpretation

Der regelbasierte Ansatz interpretiert ein Situationsmodell durch die Anwendung von Regeln in einer Regelbasis. Die Interpretation kann als zweistufiger Prozess aufgefasst werden, bei dem das Situationsmodell zunächst analysiert und daraufhin gegebenenfalls modifiziert wird, um implizit vorhandenes Wissen explizit darzustellen. Durch diese Modifikation kann beispielsweise die Zugehörigkeit zu einem bestimmten Operationsabschnitt ausgedrückt werden. Abbildung 5.10 verdeutlicht das Konzept der regelbasierten Interpretation im Schaubild.

Das Wissen über einen bestimmten Situationskontext wird durch eine Regel abgebildet. Eine solche Regel besteht aus einem Bedingungs- und einem Aktionsteil, der ausgeführt wird, wenn die Bedingung erfüllt ist. Die Analyse des Situationsmodells erfolgt durch eine Auswertung der in der Regel festgelegten Bedingungen. Anhand der definierten Aktion wird die Modifikation des Situationsmodells initiiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Regeldefinition die kommerziell verfügbare Regelsprache *nRQL*<sup>9</sup> verwendet. Diese erlaubt eine Analyse und Interpretation des Situationsmodells in der *Assertionalen Box* des beschreibungslogischen Systems. Details zu Entwurf und Umsetzung des regelbasierten Ansatzes zur Situationsinterpretation sind in [SKB+09, Bra09, Kat09] beschrieben. Nachstehend wird eine exemplarische Anwendung des Ansatzes zur Interpretation von Gefäßverschlüssen bei Cholezystektomien vorgestellt.



**Abb. 5.10:** Konzept der Situationsinterpretation mittels Regeln.

### 5.6.1 Definition einer exemplarischen Regelbasis

Das Ziel der entwickelten Regelbasis sind die Erfassung von clipinduzierten Gefäßverschlüssen und die explizite Abbildung der resultierenden Veränderungen im Situationsmodell. Die regelbasierte Interpretation bildet die Grundlage für eine Analyse der Operationssituation und die Generierung einer kontextbezogenen Visualisierung (vgl. Abschnitte 6.2.3 und 7.2.2).

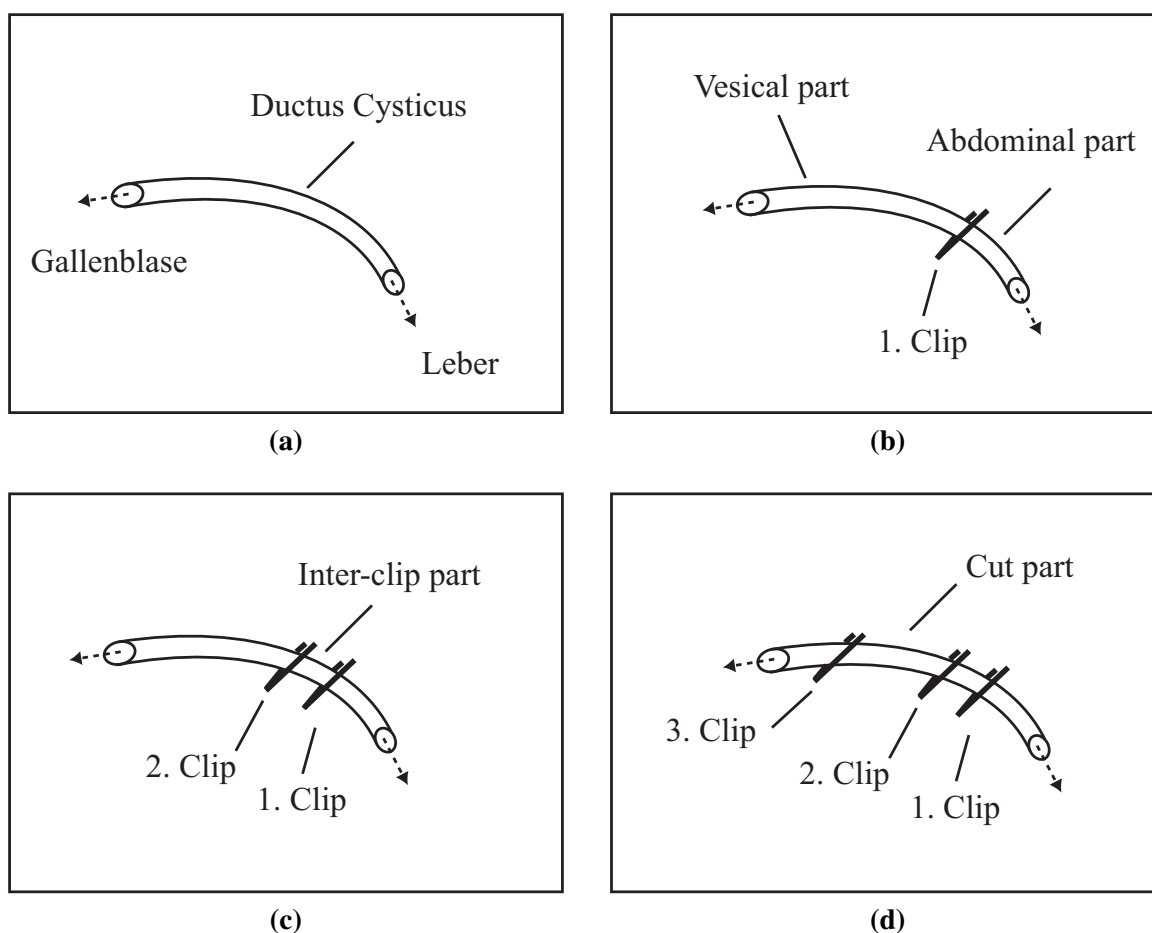
Im Rahmen einer Cholezystektomie werden die Arteria Cystica und der Ductus Cysticus durch das Setzen von drei chirurgischen Clips verschlossen. Hierdurch

<sup>9</sup>new Racer Query Language der Fa. Racer Systems GmbH.



werden die Gefäße in einzelne Segmente unterteilt, um eine gefahrlose Durchtrennung in dem Bereich zwischen zwei Clips zu ermöglichen. Die im folgenden Abschnitt vorgestellten Regeln bilden diese Segmente im Situationsmodell ab und markieren die Bereiche für eine sichere Gefäßdurchtrennung. Durch die Aufteilung der Gefäße in die einzelnen Segmente wird ein präziseres Abbild des Patientenzustands erstellt.

Die Markierung der Gefäßsegmente bildet die Basis für eine kontextbezogene Unterstützung des Chirurgen. Hierzu wird eine Regelbasis, bestehend aus sieben Regeln, erstellt. Anhand der ersten Regel werden alle Gefäße als Risikostrukturen definiert. Durch diese Definition kann der Chirurg vor einer unbeabsichtigten Verletzung dieser Struktur gewarnt werden. Weitere sechs Regeln werden zur Abbildung des Gefäßverschlusses der Arteria Cystica und des Ductus Cysticus benötigt.



**Abb. 5.11:** Clippen des Ductus Cysticus: a) Ausgangslage, b) Segmente nach Setzen des ersten Clips, c) nach Setzen des zweiten Clips, d) nach Setzen des dritten Clips.

Eine Erläuterung erfolgt am Beispiel der Regeln für den Ductus Cysticus (vgl. Abbildung 5.11):

- **Regel zur Abbildung von Modifikationen durch ersten Clip**

Der erste Clip wird in einem großen Abstand zur Gallenblase gesetzt und unterteilt den Ductus Cysticus in zwei Segmente. Das der Gallenblase zugewandte Segment wird als *Vesical part* bezeichnet, der abgewandte Teil als *Abdominal part* (5.11 a,b). Im Bedingungsteil der Regel wird abgefragt, ob genau ein Clip auf dem Ductus Cysticus gesetzt ist. Ist dies der Fall, wird das Situationsmodell durch den Aktionsteil der Regel wie folgt verändert: Für die Segmente *Vesical part* und *Abdominal part* werden Instanzen erstellt und durch die Rolle *has part* als Teil des Ductus Cysticus definiert. Beide Segmente werden als Risikostrukturen ausgezeichnet, da bei einer Verletzung nach wie vor Gallenflüssigkeit in den Bauchraum gelangen kann. Abbildung 5.12 verdeutlicht die Umsetzung der Regel mittels *nRQL*-Syntax.

(firerule (and	Bedingung
<pre>(?a #!:Cystic_duct) (?b #!:Clip) (?a ?b #!:has_modification) (neg (project-to (?a ?b)   (and     (?c #!:Clip)     (?a ?c #!:has_modification)     (neg (same-as ?b ?c))))))</pre>	<p>} Clip auf Cystic Duct</p> <p>} Genau ein Clip</p>
<pre>((instance (new-ind A_Abdominal_part_of ?a) #!:Cystic_duct) (instance (new-ind A_Abdominal_part_of ?a)   (some #!:risk_structure     (string= racer-internal%has-string-value "true")))) (related ?a (new-ind A_Abdominal_part_of ?a) #!:has_part) (instance (new-ind A_Vesical_part_of ?a) #!:Cystic_duct) (instance (new-ind A_Vesical_part_of ?a)   (some #!:risk_structure     (string= racer-internal%has-string-value "true")))) (related ?a (new-ind A_Vesical_part_of ?a) #!:has_part))</pre>	<p>} Definition Abdominal part als Risikostruktur</p> <p>} Definition Vesical part als Risikostruktur</p>
	Ausführung

**Abb. 5.12:** Regel (*nRQL*-Syntax) zur Abbildung von Modifikationen durch ersten Clip (vgl. [Bra09]). Oben: Bedingungsteil. Unten: Ausführungsteil.

- **Regel zur Abbildung von Modifikationen durch zweiten Clip**

Der zweite Clip wird zur Gallenblase hin gesetzt und führt zu einer weiteren Unterteilung des Ductus Cysticus. Voraussetzung für die Anwendung der

Regel ist die Repräsentation von genau zwei Clips auf dem Ductus Cysticus im Situationsmodell. Im Aktionsteil der Regel wird für das hinzugekommene Segment eine weitere Instanz *Inter-clip part* erzeugt und als Teil des Ductus Cysticus abgebildet (5.11c). Dieses Segment wird nicht als Risikostruktur definiert. Eine gefahrlose Durchtrennung ist somit möglich.

- **Regel zur Abbildung von Modifikationen durch dritten Clip**

Der dritte Clip wird zwischen Gallenblase und zweitem Clip gesetzt. Hierdurch wird ein weiteres Segment erzeugt. Die Durchtrennung des Ductus Cysticus erfolgt üblicherweise in diesem Segment. Die Regel feuert, falls mindestens drei Clips auf dem Ductus Cysticus gesetzt sind. Die Modifikation des Situationsmodells durch den Aktionsteil beinhaltet die Definition eines weiteren Segments *Cut part* in der *Assertionalen Box* analog zur Vorgehensweise bei der Definition des vorherigen Segments (5.11d). Zusätzlich wird die Instanz des Segments durch ein Attribut als Zielstruktur markiert.

## 5.6.2 Regelauswertung

Die Auswertung der Regeln erfolgt bei jeder Aktualisierung des Situationsmodells, indem die Regeln der Regelbasis einzeln abgearbeitet werden. Dabei wird für jede Regel überprüft, ob die jeweiligen Bedingungen erfüllt sind. Ist dies der Fall, wird die Regel ausgeführt, wodurch das Situationsmodell modifiziert wird.

## 5.7 Zusammenfassung

Die Ermittlung des Situationskontexts durch die Situationsinterpretation bildet die Ausgangsbasis für die Erzeugung einer kontextbezogenen, d. h. situationsangepassten Unterstützung des Chirurgen. Das Konzept der Situationsinterpretation vereint dabei drei unterschiedliche Lösungsansätze.

Der erste Ansatz basiert auf der Anwendung von Fallermittlungsnetzen und ermöglicht unter Einbeziehung der Applikationsontologie die Berechnung von Ähnlichkeiten zwischen dem Modell der aktuell vorliegenden Operationssituation und Referenzmodellen in einer Fallbasis. Bei dem zweiten Verfahren handelt es sich um einen Ansatz mittels generalisierter Situationsmodelle. Die Generalisierung erfolgt anhand der Konzepttaxonomie der Applikationsontologie. Das dritte Verfahren basiert auf der Anwendung eines Regelwerks. Dieser Ansatz erlaubt eine Modifikation des Situationsmodells, um implizit vorhandenes Wissen explizit darzustellen. Sämtliche Verfahren greifen auf die Applikationsontologie zurück, verwenden Schlussfolgerungsalgorithmen und nutzen somit die Vorzüge des verwendeten Repräsentationsformalismus.

Neuartig ist die Nachahmung der chirurgischen Vorgehensweise zur Situationsinterpretation durch die Einbeziehung von Fakten- und Erfahrungswissen im Rahmen des Interpretationsprozesses. Das Faktenwissen wird dabei in der Applikationsontologie und in der Regelbasis abgebildet, das Erfahrungswissen in der Fallbasis. Ein Schlüsselexperiment zur Interpretation von Operationssituationen bei Cholezystektomien wird in Abschnitt 7.2.1 vorgestellt. Eine Evaluation der Erkennungsrate beim Setzen von Dentalimplantaten wird in Abschnitt 7.3 präsentiert.

# Kapitel 6

## Kontextbezogene Visualisierung und Interaktion

### 6.1 Einführung

Im vorigen Kapitel wurde die Vorgehensweise zur Ermittlung des Situationskontexts erörtert. Die Kenntnis dessen bildet die Ausgangsbasis für die Erzeugung einer kontextbezogenen, d. h. situationsangepassten Unterstützung des Chirurgen mittels der Erweiterten Realität. Diese erfolgt durch die Bereitstellung von Visualisierungs- und Interaktionskomponenten.

Exemplarisch werden Verfahren für eine situationsangepasste Visualisierung bei der Umsetzung einer Inzision, beim Setzen von Gefäßclips und bei Gefahrensituationen präsentiert. Zudem soll auf Basis der Erweiterten Realität eine Mensch-Maschine-Schnittstelle entworfen und implementiert werden, welche die besonderen Rahmenbedingungen einer Interaktion im Operationssaal berücksichtigt. Bei der Entwicklung der Verfahren zur kontextbezogenen Visualisierung erfordert die Komplexität des zugrunde liegenden Sachverhalts eine gesonderte Modellierung jeder Visualisierungskomponente. Für die Umsetzung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist ein allgemeines Rahmenwerk zu entwickeln, anhand dessen Interaktionstechniken sowie Ein- und Ausgabegeräte flexibel kombiniert werden können.

Die nachfolgende Betrachtung erörtert den Unterstützungsbedarf und präsentiert die entwickelten Methoden zur kontextbezogenen Visualisierung und Interaktion mit *MediAssist*. Für eine Beschreibung der zugrunde liegenden Systemarchitektur *Karla*<sup>1</sup> [Gie05] und der verwendeten Algorithmen zur Registrierung und Kalibrierung sei auf die Literatur verwiesen (vgl. [Sal03, Spe09]).

---

<sup>1</sup>Karlsruhe Augmented Reality Application.

## 6.2 Kontextbezogene Visualisierung

Die Unterstützung des Chirurgen mittels der Erweiterten Realität birgt ein großes Potenzial, ist jedoch mit einem hohen Entwicklungsaufwand verbunden. Vor diesem Hintergrund soll die chirurgische Tätigkeit zunächst hinsichtlich des Unterstützungsbedarfs näher untersucht werden.

### 6.2.1 Analyse des Unterstützungsbedarfs

Insgesamt wurden drei Aspekte einer Unterstützung identifiziert: Unterstützung bei der Navigation, Unterstützung bei der Ausführung einer Tätigkeit und die Bereitstellung sonstiger Zusatzinformationen. Diese drei Aspekte werden im Folgenden näher beschrieben.

#### Unterstützung bei der Navigation

Der Begriff Navigation umfasst alle Aktivitäten des Chirurgen, um in das Zielgebiet des jeweiligen Eingriffs zu gelangen. In der Regel wird hierzu ein Zugangsweg geplant, der das Verletzungsrisiko des Patienten minimiert. Die Navigationsunterstützung hilft dem Chirurgen, das Zielgebiet entlang des geplanten Zugangswegs zu erreichen. Im Rahmen dieser Arbeit werden hierzu folgende Unterstützungsfunktionen unterschieden:

- **Visualisierung von Risiko- und Zielstrukturen**

Als Risikostruktur wird eine anatomische Struktur bezeichnet, die auf keinen Fall verletzt werden darf. Unter einer Zielstruktur wird eine anatomische oder pathologische Struktur verstanden, die im Rahmen des chirurgischen Eingriffs entfernt oder verändert wird. Risiko- und Zielstrukturen ergeben sich aus der patientenindividuellen Diagnose. Eine kontextbezogene Visualisierung von Risikostrukturen wird in Abschnitt 6.2.4 vorgestellt.

- **Visualisierung eines Navigationskorridors**

Ein Navigationskorridor ist der Bereich des Operationsgebiets, anhand dessen der Chirurg bei minimalem Verletzungsrisiko für den Patienten zum Zielgebiet der Operation vordringt. Für die Ermittlung risikominimaler Zugangswege wurde von [Sal03] ein Verfahren auf Basis eines patientenindividuellen Gewebemodells vorgeschlagen.

#### Unterstützung bei der Ausführung einer Tätigkeit

Ob bei der Ausführung einer chirurgischen Tätigkeit, wie beispielsweise dem Clippen oder Durchtrennen eines Gefäßes, eine Unterstützung benötigt wird, hängt von mehreren Aspekten ab. Insbesondere bei Tätigkeiten, deren Umsetzung eine hohe

Präzision erfordert, bietet sich der Einsatz eines Systems der Erweiterten Realität an, das die Übertragung rechnerbasierter Operationsplanungsdaten auf den Patientensitus ermöglicht. Für folgende Tätigkeiten wird exemplarisch eine kontextbezogene Unterstützung untersucht:

- **Unterstützung bei der Umsetzung einer Inzision**

Unter einer Inzision versteht man einen vom Chirurgen ausgeführten Schnitt zur Durchtrennung von Körpergewebe oder zur Eröffnung von Körperhöhlen. Inwieweit die Ausführung einer Inzision geplant wird, hängt von der Zielsetzung ab. Während das Abtragen hinderlichen Fettgewebes ohne Planung vonstattengeht, bedingt das Freilegen einer Zielstruktur in der Nähe von Risikostrukturen eine präzise Planung und deren Umsetzung. In Abschnitt 6.2.2 wird ein Verfahren zur kontextbezogenen Unterstützung für die Umsetzung einer Inzision vorgestellt.

- **Unterstützung beim Nähen**

Das Nähen einer Wunde dient dem langfristigen Wundverschluss und wird mittels Nadelhalter, Nadel und Faden durchgeführt. In der Literatur existieren zahlreiche Nahttechniken wie etwa die Rückstichnaht nach Donati oder Allgöwer. Für eine detaillierte Beschreibung sei hier auf die weiterführende Literatur verwiesen [SKS06]. Eine Nahtunterstützung berechnet die Einstichpunkte der Nadel und visualisiert diese dem Chirurgen. Eine präoperative Bestimmung der Nahtpunkte ist nicht möglich, sodass die Berechnung anhand intraoperativ erfasster Daten durchgeführt wird. Ein Verfahren zur kontextbezogenen Unterstützung beim Nähen wird in Abschnitt 6.2.2 vorgestellt.

- **Unterstützung beim Setzen von Gefäßclips**

Das Setzen eines Gefäßclips führt zu dessen temporärem oder permanentem Verschluss. Dies ermöglicht die rekonstruktive Behandlung beschädigter Gefäße oder die Abtrennung verbundener anatomischer Strukturen. Die Entscheidung, an welchen Stellen ein Clip positioniert wird, trifft der behandelnde Chirurg während der Operation. Eine Unterstützung beim Clippen muss somit auf intraoperativ ermittelten Daten basieren. In Abschnitt 6.2.3 wird ein Verfahren zur kontextbezogenen Unterstützung für das Setzen chirurgischer Clips konzipiert.

### **Unterstützung durch Bereitstellung sonstiger Zusatzinformationen**

Durch ein System der Erweiterten Realität können dem Chirurgen Informationen der unterschiedlichsten Art zur Verfügung gestellt werden. Unterschieden wird zwischen intraoperativ erfassten Daten wie beispielsweise Vitalwerten des Patienten und präoperativ erstellten Daten wie Landmarken und Annotationen. Prinzipiell unterliegt die Art der Daten jedoch keiner Beschränkung. Eine sparsame Verwendung

von Zusatzinformationen erscheint jedoch sinnvoll, um eine Ablenkung des Chirurgen vom Operationsgeschehen zu vermeiden.

- **Visualisierung von Annotationen**

Unter einer Annotation wird eine ergänzende Information zu einem räumlichen Objekt verstanden, die in Form einer Beschriftung vorliegt. Die Zuweisung einer Annotation zu einem Objekt erfolgt manuell durch einen Anwender oder anhand der Einträge in der Applikationsontologie. Die Verwendung von Annotationen erleichtert dem Chirurgen die Identifikation von Objekten, beispielsweise die Unterscheidung nahe beieinander liegender, ähnlicher anatomischer Strukturen.

- **Visualisierung von Landmarken**

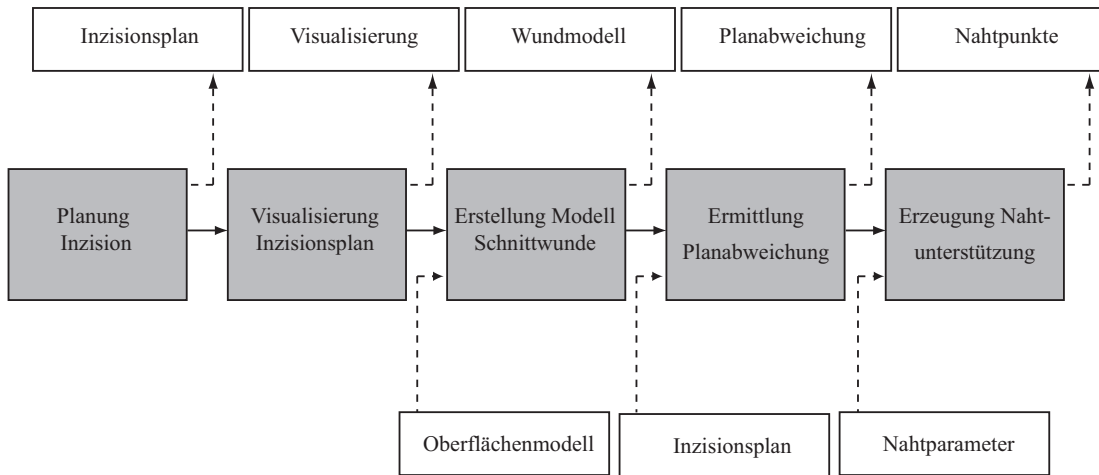
Landmarken dienen der Orientierung des Chirurgen im Operationsgebiet, beispielsweise zur Markierung von Abzweigungen eines Gefäßes. Die Anzahl und Position der verwendeten Landmarken richten sich nach der chirurgischen individuellen Präferenz und anatomischen und pathologischen Gegebenheiten. Die Definition der Landmarken erfolgt durch den Chirurgen. Für die Unterscheidung mehrerer Landmarken bietet sich neben einer farblichen Codierung die Verwendung von Annotationen an.

Nachfolgend wird exemplarisch die Vorgehensweise zur Erzeugung einer kontextbezogenen Visualisierung bei der Umsetzung einer Inzision, beim Setzen von Gefäßclips sowie in Gefahrensituationen erörtert.

## 6.2.2 Visualisierung bei der Umsetzung einer Inzision

Inzisionen werden häufig angewendet, beispielsweise zur Eröffnung des Operationsgebiets [SKS06]. In Abhängigkeit der betroffenen anatomischen Struktur erfolgt die Inzision ad-hoc oder anhand eines präoperativ erstellten Inzisionsplans. Die kontextbezogene Unterstützung bezieht sich auf Inzisionen, für die hohe Anforderungen bezüglich der Umsetzungsgenauigkeit gelten und die aufgrund dessen präoperativ geplant werden. Die Unterstützung umfasst die Visualisierung des Inzisionsplans, des Wundmodells, der Planabweichung und einer Nahtunterstützung. Für die Erzeugung der Visualisierungsdaten wird anhand präoperativ erfasster Daten ein Inzisionsplan erstellt. Anhand intraoperativ erfasster Daten werden ein Wundmodell erzeugt und eine Soll-Ist-Analyse der Planungsumsetzung durchgeführt. Zuletzt werden Nahteinstichpunkte für das Verschließen der Wunde berechnet. Der geschilderte Prozess samt Ein- und Ausgabedaten der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 6.1 dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden die Methoden zur Realisierung der beschriebenen Unterstützung vorgestellt [SEP+06, SSP+08]. Details zu Entwurf und Implementierung sind in [Pfe06, Pla07] dokumentiert.





**Abb. 6.1:** Prozessschritte und Daten bei der kontextbezogenen Unterstützung zur Umsetzung einer Inzision.

### Planung der Inzision

Die präoperativ durchgeführte Definition des auszuführenden Schnittes wird als Inzisionsplanung bezeichnet. Grundlage für den dabei erstellten Inzisionsplan bildet das Oberflächenmodell der betroffenen anatomischen Struktur. Auf diesem Oberflächenmodell plant der Anwender eine Inzision, indem er die Inzision durch ein oder mehrere, sogenannte Inzisionssegmente definiert. Die Planung erfolgt durch Benutzerinteraktion, indem der planende Chirurg für jedes Inzisionssegment einen Start- und einen Endpunkt auf dem Oberflächenmodell auswählt. Die Verbindung zwischen Start- und Endpunkt wird durch einen Planungsalgorithmus unter Berücksichtigung von Gewebeparametern, wie beispielsweise der Faserrichtung eines Gewebes, bestimmt. Der Inzisionsplan ergibt sich aus der Vereinigung der einzelnen Segmente.

Das Oberflächenmodell der anatomischen Struktur wird durch den Graphen  $O = [E, V]$  mit den Knoten  $V$  und den Kanten  $E$  repräsentiert. Für jedes Inzisionssegment  $s$  wird ein Startpunkt  $v_{s_s} \in V$  und ein Endpunkt  $v_{s_e} \in V$  definiert. Die Funktion

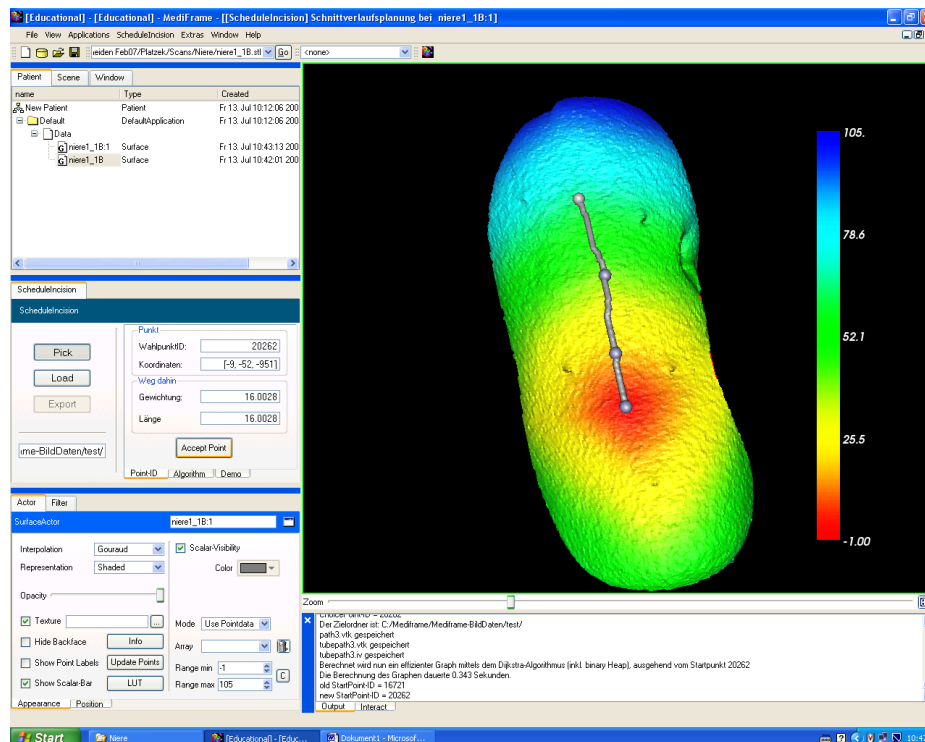
$$v : E \rightarrow R, e \mapsto c(e) \quad (6.1)$$

weist jeder Kante  $e = [i, j]$  des Oberflächenmodells einen Kantenparameter  $c(e)$  zu. Je höher dieser zugewiesene Parameter, desto weniger wird die zugehörige Kante bei der Inzisionsplanung berücksichtigt. Die Definition der Funktion  $c$  ermöglicht beispielsweise die Berücksichtigung von Faserrichtungen, indem hohe Werte für quer zur Faserrichtung laufende Kanten vergeben werden.

Anhand der Kantenparameter wird jeder Kantenfolge  $k = [v_0, \dots, v_n]$  des Oberflächenmodells  $O$  ein Inzisionswert  $I(k)$  wie folgt zugeordnet:

$$I(k) = \sum_{i=1}^n c[v_{i-1}, v_i]. \quad (6.2)$$

Zur Definition des Inzisionssegments  $k_s = [v_{s_s}, \dots, v_{s_e}]$  wird vom Chirurgen der zugehörige Start- und Endknoten festgelegt. Die dazwischenliegenden Knoten werden ermittelt, indem die Kantenfolge  $k_s$  des Oberflächenmodells  $O$  mit dem minimalen Inzisionswert  $I(k_s)$  unter Anwendung des Verfahrens von *Dijkstra* [Dij59] berechnet wird. Das vorgestellte Verfahren ermöglicht somit die Ermittlung des Inzisionssegments mit dem minimalen Inzisionswert anhand gegebener Kantenparameter des Oberflächenmodells. Für die Umsetzung der Planung wird ein hierfür entwickeltes Planungswerkzeug verwendet (vgl. Abbildung 6.2).



**Abb. 6.2:** Softwarewerkzeug für die Planung einer Inzision. Die farbliche Codierung des Oberflächenmodells repräsentiert den minimalen Inzisionswert eines Oberflächenpunktes ausgehend vom Endpunkt des letzten Inzisionssegments.

### Visualisierung des Inzisionsplans

Die Visualisierung des Inzisionsplans erfolgt durch Überlagerung mit den endoskopischen Bilddaten im Sichtfeld des Chirurgen. Voraussetzung für eine korrekte

Einblendung ist die Registrierung virtueller und realer Daten. Die Inzision wird durch Liniensegmente dargestellt und unterstützt den Chirurgen bei der präzisen Umsetzung des Inzisionsplans.

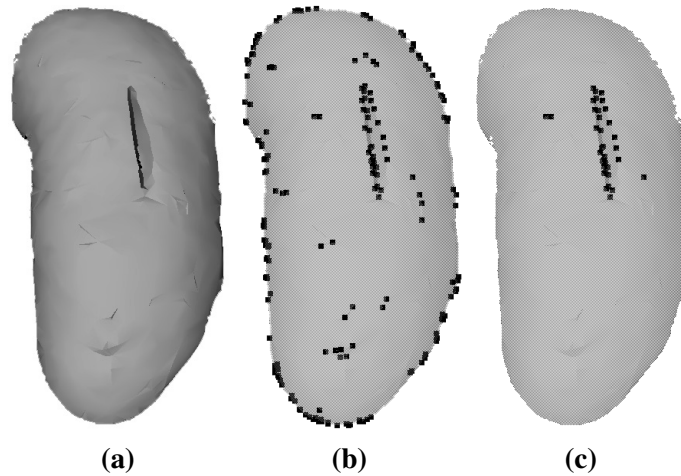
### Erstellung eines Modells der Schnittwunde

Durch die Umsetzung des Inzisionsplans entsteht in Abhängigkeit der Gewebespannung eine auseinanderklaffende Schnittwunde. Ausgangsbasis für die Erstellung des Wundmodells ist die intraoperative Erfassung der veränderten anatomischen Struktur. Das Verfahren zur Erstellung des Wundmodells setzt hierbei die Existenz eines Oberflächenmodells der veränderten Struktur voraus, anhand dessen die Wunde analysiert und auf ein Modell abgebildet wird. Im Folgenden wird das präoperativ erstellte Oberflächenmodell der anatomischen Struktur mit  $O_1$  und das intraoperativ erfasste Oberflächenmodell mit  $O_2$  bezeichnet. Des Weiteren liegen die Daten des Inzisionsplans  $S$  vor. Die Registrierung von  $O_1$  und  $O_2$  wird als bekannt vorausgesetzt.

**Detektion der Kantenpunkte.** Als Kantenpunkte werden die Punkte des Oberflächenmodells bezeichnet, anhand derer der Verlauf einer Wundkante beschrieben wird. Die Detektion eines Kantenpunkts geht von der Annahme einer großen Änderung des Oberflächenmodells im Bereich der Schnittwunde aus. Die Erfassung der Änderung erfolgt anhand des Winkels  $\theta$ , welcher zwischen den Ebenen  $E_{Pol_1}, E_{Pol_2}$  zweier benachbarter Polygone  $Pol_1 \neq Pol_2$  des Oberflächenmodells  $O_2$  berechnet wird. Benachbarte Polygone  $Pol_1, Pol_2$  sind definiert als Polygone, die genau zwei gemeinsame Knoten besitzen. Die Berechnung des Winkels  $\theta$  erfolgt mittels der Ebenennormalen  $\vec{m} \perp E_{Pol_1}$  und  $\vec{n} \perp E_{Pol_2}$  durch

$$\cos(\theta) = \frac{|\vec{m} \cdot \vec{n}|}{mn}. \quad (6.3)$$

Der berechnete Winkel  $\theta$  wird mit einem Winkelschwellwert  $\theta_{min}$  verglichen. Gilt  $\theta \geq \theta_{min}$ , so werden die gemeinsamen Knoten von  $E_{Pol_1}$  und  $E_{Pol_2}$  zur Menge der Kantenpunkte  $K$  hinzugefügt. Aus der präoperativ durchgeführten Planung sind die Start- und Endpunkte  $v_s, v_e$  der Inzision bekannt. Diese Informationen werden verwendet, um alle Punkte aus  $K$  zu entfernen, die nicht zwischen  $v_s$  und  $v_e$  liegen. Für jeden Knoten  $k \in K$  wird zusätzlich die Annahme einer maximalen Schnitttiefe  $h_{max}$  überprüft, indem der Abstand von  $k$  bezüglich der von  $v_s$  und  $v_e$  definierten Geraden berechnet wird. Punkte, welche dieses Kriterium nicht erfüllen, werden ebenfalls aus  $K$  entfernt. Abbildung 6.3 zeigt das Oberflächenmodell einer anatomischen Struktur, bei der eine Inzision umgesetzt wurde, sowie die detektierten Kantenpunkte  $K$  vor und nach der Filterung anhand einer Überprüfung der o. g. Bedingungen.



**Abb. 6.3:** Detektion der Kantenpunkte (aus [Pla07]). (a) Oberflächenmodell einer anatomischen Struktur. (b) Detektierte Kantenpunkte vor Filterung. (c) Detektierte Kantenpunkte nach Filterung.

**Detektion der Wundkanten.** Zu den Wundkanten zählen die beiden äußeren sowie die innere Wundkante (vgl. Abbildung 6.4). Der Wundkantenalgorithmus ermittelt eine Wundkante  $W = [k_0 \dots k_n]$  als Kantenfolge von Knoten  $k \in K$  zwischen Startpunkt  $k_0 := v_s$  und Endpunkt des Inzisionsplans  $k_n := v_e$ . Ausgehend vom Startpunkt  $v_s$  des Inzisionsplans wird die Kantenfolge der Wundkante sukzessiv bis zum Erreichen des Endpunktes  $v_e$  durch Hinzufügen von Punkten aus  $K$  erweitert. Sei  $W = [k_0 \dots k_i]$  die bislang ermittelte Kantenfolge einer Wundkante, dann wird der Knoten  $k_{i+1}$  hinzugefügt, falls die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

1. Die Distanz zwischen Punkt  $k_{i+1}$  und dem Endpunkt  $v_e$  darf nicht größer sein als die Distanz zwischen  $k_i$  und  $v_e$ , d. h.,

$$distance(k_{i+1}, v_{Ende}) \leq distance(k_i, v_{Ende}). \quad (6.4)$$

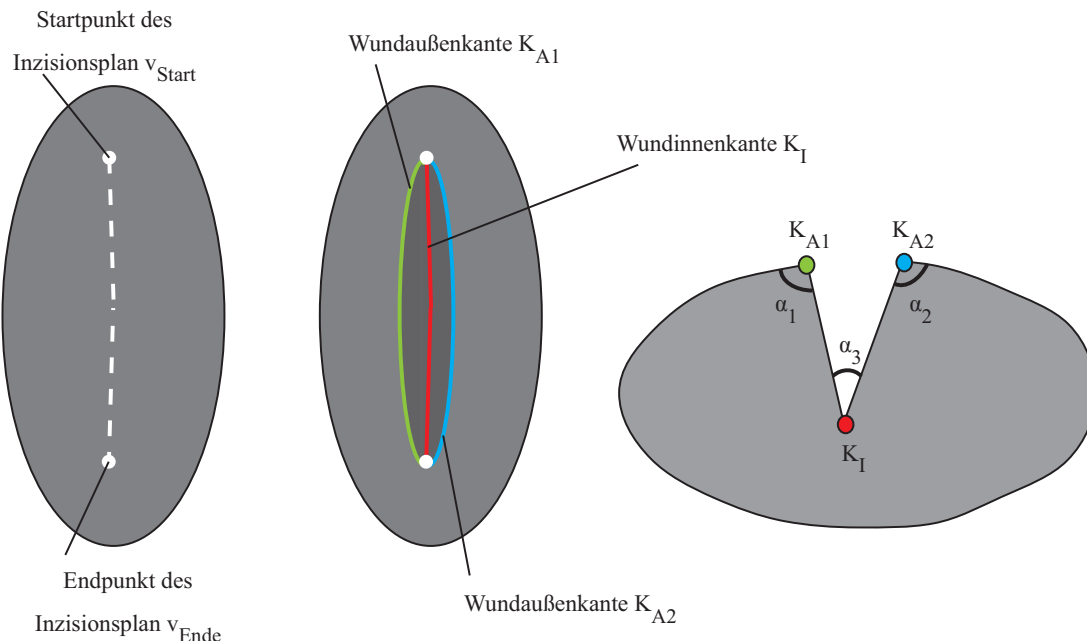
2. Der Winkel  $\beta$  zwischen der Kante  $a = [k_{i-1}, k_i]$  und  $b = [k_i, k_{i+1}]$  darf einen Maximalwinkel  $\beta_{max}$  nicht überschreiten. Dadurch wird die Erkennung unrealistisch stark gekrümmter Kanten wie folgt verhindert:

$$\cos(\beta) = \frac{|\vec{a} \vec{b}|}{ab} \leq \beta_{max}. \quad (6.5)$$

3. Zur Sicherstellung eines exakten Kantenverlaufs darf die Distanz zwischen Punkt  $k_i$  und  $k_{i+1}$  einen Maximalwert  $d_{max}$  nicht überschreiten:

$$distance(k_i, k_{i+1}) \leq d_{max}. \quad (6.6)$$

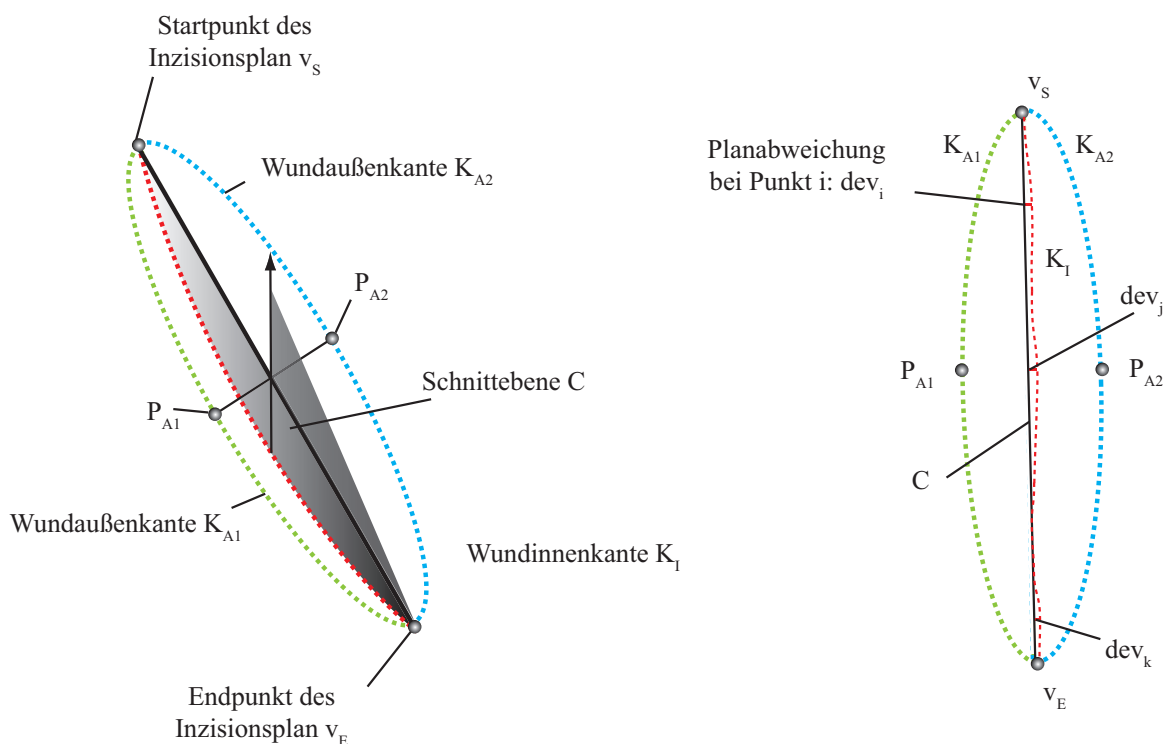
Sind alle Bedingungen erfüllt, wird die Kantenfolge um den Punkt  $k_{i+1}$  zu  $W = [k_0 \dots k_i, k_{i+1}]$  erweitert. Des Weiteren werden alle Punkte  $s \in K$ , deren Abstand zur Kante  $b = [k_i, k_{i+1}]$  geringer als  $r_{max}$  ist, entfernt. Dadurch soll die doppelte Erkennung einer Wundkante vermieden werden. Das Ergebnis ist eine Liste der detektierten Kantenfolgen. Für die Erstellung eines Wundmodells werden die drei Kantenfolgen mit den meisten Punkten verwendet.



**Abb. 6.4:** Schematische Darstellung eines Inzisionsplans und des durch die Umsetzung resultierenden Wundmodells.

**Erstellung eines Wundmodells.** Für das zu erstellende Wundmodell wird die Länge der beiden äußeren Wundkanten und der inneren Wundkante berechnet. Zusätzlich werden die Breite und die Tiefe der Inzision bestimmt. Dies bedingt in einem ersten Schritt die Zuordnung der ermittelten Kantenfolgen zu einer Kante des Wundmodells. Hierzu wird auf jeder Kantenfolge  $K_i$  der Punkt  $P_i$  mit dem maximalen Abstand zur Verbindungsgeraden zwischen  $v_s$  und  $v_e$  bestimmt. Aus Abbildung 6.4 ist ersichtlich, dass die Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  an den äußeren Wundflanken größer sind als der Winkel  $\alpha_3$  der Schnitttiefenkante. Die Berechnung von  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  für eine Schnittwunde erfolgt durch Bildung des Mittelwerts über die Winkel der mit  $P_i$  assoziierten Polygonpaare. Als Schnitttiefenkante  $K_I$  wird die Kantenfolge

definiert, auf der sich der Punkt  $P_i$  mit dem kleinsten ermittelten Winkel  $\alpha_3$  befindet. Die übrigen Kantenfolgen bezeichnen die äußeren Wundkanten  $K_{A1}$ ,  $K_{A2}$ . Die Länge einer Wundkante ergibt sich durch Summierung der Kantenelemente. Für das Wundmodell werden die Länge  $d_{A1}$  und  $d_{A2}$  der Kanten  $K_{A1}$  und  $K_{A2}$  berechnet sowie die Länge  $d_I$  der inneren Wundkante  $K_I$ . Als Referenzwert wird zusätzlich die Länge der Inzision  $d_{Inz} = v_e - v_s$  approximiert. Die Schnittbreite berechnet sich auf Basis der Punkte  $P_i$ . Für jeden dieser Punkte wird der nächstliegende Punkt auf den beiden anderen Kantenfolgen berechnet. Dadurch entstehen insgesamt drei Dreiecke, welche die drei Kantenfolgen miteinander verbinden. Für die Approximation der Inzisionsbreite wird der Mittelwert der Seitenlängen zwischen den äußeren Wundkanten berechnet. Anhand der verbleibenden zwei Seitenlängen der konstruierten Dreiecke wird die maximale Wundflankentiefe kalkuliert. Eine Approximation der Schnitttiefe ergibt sich durch Berechnung der entsprechenden Dreieckshöhe. Die ermittelten Werte beschreiben den am tiefsten und weitesten auseinanderklaffenden Bereich der Wunde.

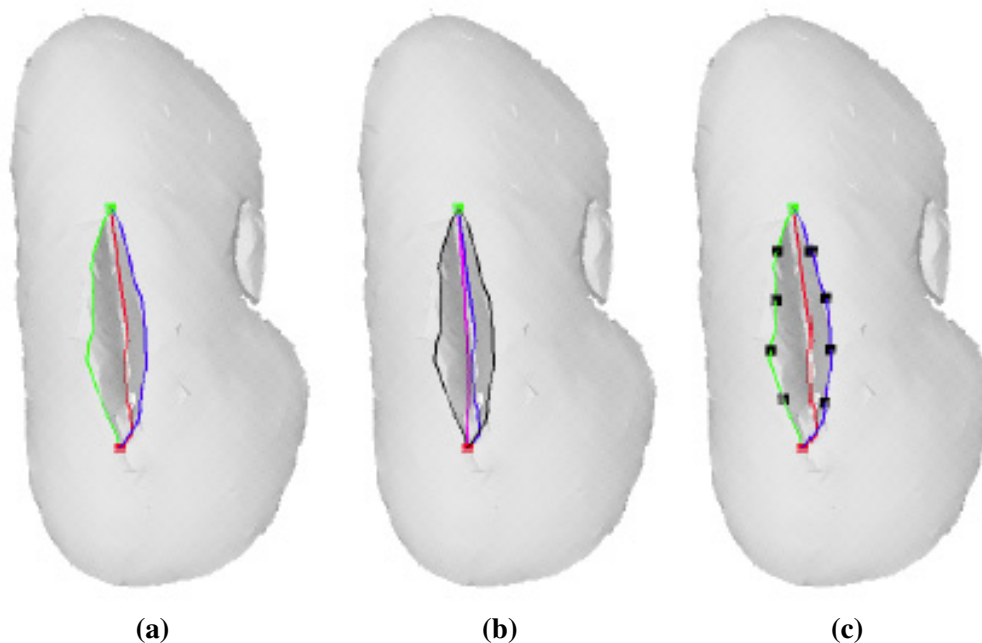


**Abb. 6.5:** Schematische Darstellung der Abweichung zwischen geplanter und ausgeführter Inzision (aus Sudra et al. [SSP+08], Fig. 1, © 2008, mit freundlicher Genehmigung von IOS Press).

### Ermittlung der Planabweichung

Die Visualisierung des Inzisionsplans mittels der Erweiterten Realität soll eine exakte Ausführung des chirurgischen Schnitts unterstützen. Zur Ermittlung der Ge-

nauigkeit der Planumsetzung wird die Abweichung für den Fall eines geraden, senkrecht zur Gewebeoberfläche ausgeführten Schnittes berechnet. Dazu wird eine ideale Schnittebene  $C$  durch die bereits bekannten Punkte  $P_{A1}$ ,  $P_{A2}$ ,  $v_e$  und  $v_s$  erstellt, sodass die  $\overrightarrow{P_{A1}P_{A2}}$  senkrecht auf  $\overrightarrow{v_s v_e}$  steht. Als Maß für die Abweichung wird der durchschnittliche Abstand  $dev_i$  aller Punkte  $i \in K_I$  in Bezug auf die ideale Schnittebene  $C$  berechnet. Abbildung 6.5 verdeutlicht diesen Zusammenhang.



**Abb. 6.6:** Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte am Beispiel (aus [Pla07]). (a) Extrahierte Wundkanten. (b) Abweichung vom Inzisionsplan. (c) Projizierte Nahtpunkte.

### Erzeugung der Nahtunterstützung

Für den Wundverschluss existiert eine Reihe verschiedener Nahttechniken. Dabei werden die beiden Wundränder nach Möglichkeit spannungsfrei aneinandergelagt und anschließend durch einen Faden verbunden<sup>2</sup>. Das kontextbezogene Assistenzsystem erstellt hierzu eine Unterstützung zur Visualisierung gleichmäßiger Nahteinstichpunkte, um die resultierende Wundspannung zu minimieren. Dazu werden die Wundaußenkanten des Wundmodells in gleichmäßige Kantensegmente einer vorher festgelegten Anzahl unterteilt. Der Berührungspunkt zweier Kantensegmente wird als Nahteinstichpunkt markiert und dem Chirurgen visualisiert. Abbildung 6.6 verdeutlicht die extrahierten Wundkanten, die Abweichung vom Inzisionsplan und die projizierten Nahtpunkte.

<sup>2</sup>Ausnahme: Elektrotomie.

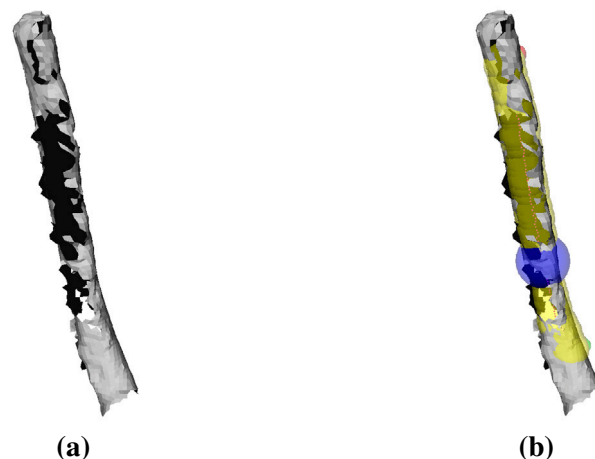
### 6.2.3 Visualisierung beim Setzen von Gefäßclips

Die kontextbezogene Unterstützung beim Clippen ermittelt anhand eines intraoperativ erfassten Gefäßmodells Vorschläge für eine Clippositionierung und visualisiert diese dem Chirurgen. Bei dem Gefäßmodell handelt es sich um ein Oberflächenmodell  $O$  der Operationsszene, in dem das Gefäß durch zwei möglichst weit auseinander liegende Punkte  $P_1$  und  $P_2$  markiert ist. Für die intraoperative Erfassung eines Oberflächenmodells wird in [Spe09] die Verwendung stereoskopischer Bilddaten vorgeschlagen. Bei diesem Modell handelt es sich um kein vollständiges Modell, da die Erstellung einer rückwärtigen Ansicht aufgrund der eingeschränkten Bewegungsfreiheit des für die Bildakquisition verwendeten Stereoendoskops nicht möglich ist. Eine Anforderung an den Algorithmus zur Ermittlung der Clippositionen ist somit die Verarbeitung unvollständiger Oberflächenmodelle. Nachfolgend wird ein Verfahren zur Gefäßapproximation und zur Bestimmung der Clippositionen vorgestellt. Details zu Entwurf und Implementierung sind in [Bra07] dokumentiert.

**Gefäßapproximation.** Für die Gefäßapproximation wird die Gefäßoberfläche des durch  $P_1$  und  $P_2$  definierten Gefäßabschnitts durch eine Folge eng beisammen liegender Kugeln in Anlehnung an [AK00] angenähert. Der Gefäßdurchmesser an einer bestimmten Position wird durch den Radius der zugehörigen Kugel approximiert. Die Länge des Gefäßabschnitts leitet sich aus der Länge der Gefäßmittellinie ab, die entlang der Kugelmittelpunkte durch lineare Interpolation erzeugt wird. Im Folgenden wird das Verfahren zur Approximation der Gefäßoberfläche näher beschrieben. Zunächst wird eine orthogonal zu  $\overrightarrow{P_1P_2}$  verlaufende Ebene  $E_1$  durch den Punkt  $P_1$  konstruiert. Darauf folgt die Markierung  $T$  aller Punkte aus  $O$ , die sich unterhalb einer definierten Distanz bezüglich dieser Ebene befinden. Für die Approximation des Gefäßmittelpunkts  $M_1$  am Gefäßabschnitt um  $P_1$  wird das arithmetische Mittel der markierten Punkte berechnet. Die Gefäßwand wird durch eine Kugel approximiert, deren Radius aus der mittleren Distanz zwischen dem Punkt  $M_1$  und den markierten Punkten  $T$  berechnet wird. Diese Vorgehensweise wird für eine festgelegte Anzahl von  $n$  Punkten entlang der Strecke  $\overrightarrow{P_1P_2}$  wiederholt, sodass die Gefäßwand durch insgesamt  $n + 1$  Kugeln approximiert wird.

**Bestimmung der Clippositionen.** Die Clippositionen werden anhand des approximierten Gefäßmodells bestimmt. Bei den Parametern der Positionsermittlung handelt es sich um die Anzahl der Clips  $m$ , den Mindestabstand zwischen zwei Clips  $d_{min}$ , den maximalen Gefäßdurchmesser  $r_{max}$  sowie die Mindestabstände  $d_1, d_2$  zu  $P_1$  und  $P_2$ . Abbildung 6.7 veranschaulicht das unvollständige Oberflächenmodell eines Gefäßes, die zugehörige Approximation der Gefäßwand sowie eine berechnete Clipposition.





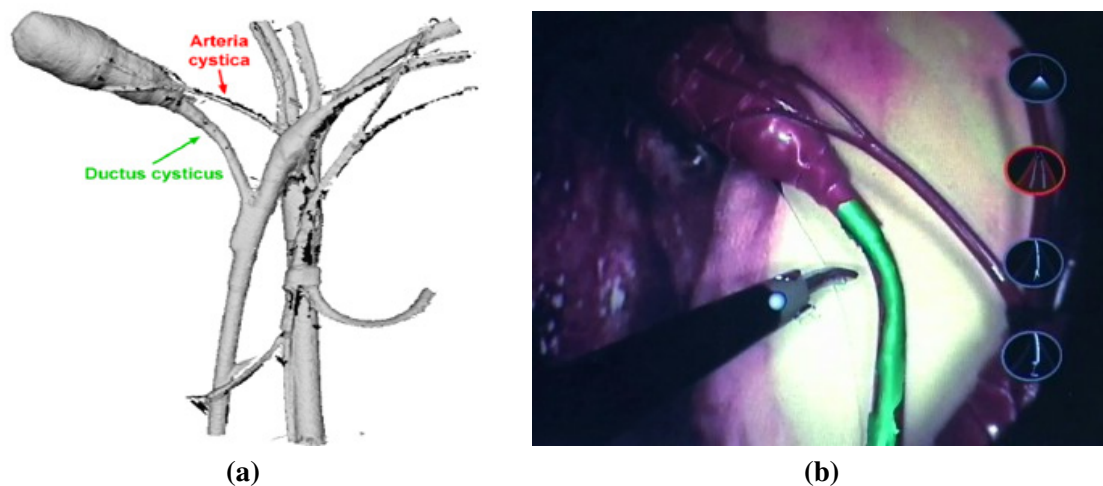
**Abb. 6.7:** Visualisierung beim Setzen von Gefäßclips (aus [Bra07]). (a) Unvollständiges Oberflächenmodell eines Gefäßes. (b) Gefäßapproximation (gelb) samt Clipposition (blau).

#### 6.2.4 Visualisierung bei Gefahrensituationen

Die Erfassung und Interpretation der vorliegenden Operationssituation ermöglichen die Warnung des Chirurgen bei etwaig auftretenden Gefahrensituationen. Im Rahmen dieser Arbeit wird exemplarisch die Visualisierung von Gefahrensituationen untersucht, in denen ein Schneideinstrument in die Nähe einer Risikostruktur gelangt. Die Warnung des Chirurgen erfolgt durch die Überlagerung des Oberflächenmodells der Struktur mit den endoskopischen Bilddaten und einen Hinweis auf das verursachende Instrument.

**Definition der Risikostrukturen.** Voraussetzung für die Erzeugung einer kontextbezogenen Visualisierung bei den aufgeführten Gefahrensituationen ist die Markierung der betrachteten Risikostrukturen in der *Assertionalen Box*. Fernerhin werden für jede Risikostruktur ein mit der Operationsszene registriertes Oberflächenmodell benötigt sowie ein Abstandsmaß, um festzulegen, wann sich ein Schneideinstrument in der Nähe einer Risikostruktur befindet. Die Markierung der Risikostrukturen erfolgt durch das Setzen eines entsprechenden Attributs der *ABox*-Instanz zur Repräsentation dieser Struktur. In Abschnitt 5.6 wurde hierzu ein regelbasierter Ansatz für die automatische Markierung von Gefäßsegmenten beim Setzen chirurgischer Clips erläutert. Das Oberflächenmodell wird anhand präoperativ akquirierter Daten erstellt und mit der Operationsszene registriert (vgl. [Spe09]).

**Visualisierung zur Warnung des Chirurgen.** Für die Visualisierung einer Risikosituation wird das Oberflächenmodell der Risikostruktur mit den endoskopischen Bilddaten überlagert. Dabei wird das Modell in Abhängigkeit des Abstandswerts ein-



**Abb. 6.8:** Visualisierung bei Gefahrensituationen (aus [SSS+08], © 2008 SPIE). (a) Oberflächenmodell für die Definition der Risikostrukturen. (b) Kontextbezogene Visualisierung des Ductus Cysticus (grün). Zusätzlich wird das Symbol des verursachenden Instruments rot umrandet.

gefärbt, falls das Abstandsmaß einen vorher festgelegten Schwellwert unterschreitet. Eine Erweiterung dieses Konzepts besteht in der Einbeziehung der Bewegungsrichtung und Geschwindigkeitswerte des chirurgischen Instruments für die Einfärbung der Risikostruktur. Bezüglich der Visualisierung wird neben der Einfärbung des Oberflächenmodells eine gepulste Einblendung untersucht, deren Frequenz in Abhängigkeit des Abstandswerts bzw. der Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Instruments ermittelt wird. Zusätzlich wird am Bildschirmrand ein Symbol des an der Risikosituation beteiligten chirurgischen Instruments farblich hervorgehoben. Abbildung 6.8 verdeutlicht die Unterstützung des Chirurgen in einer nachgestellten Gefahrensituation, bei der sich eine chirurgische Schere dem Ductus Cysticus annähert. Da dieser nicht geclippt ist, wird das zugehörige Oberflächenmodell eingeblendet. Zusätzlich wird das Symbol des verursachenden Instruments am rechten Bildrand rot umrandet.

### 6.3 Kontextbezogene Interaktion

Die Erfassung und Interpretation von Operationssituationen legt den Grundstein für den operationsbegleitenden Einsatz des Assistenzsystems während der gesamten Operation. Im Idealfall interpretiert das System dabei die auftretenden Situationen korrekt und präsentiert dem Chirurgen eine geeignete Unterstützung. Aufgrund vielfältiger Ursachen, wie Ambiguitäten bei der Situationsinterpretation oder einer ungünstigen Darstellung der eingeblendeten Informationen, kann in Ausnahmefällen jedoch ein Eingreifen des Chirurgen zur Systembedienung erforderlich werden.

Dies stellt eine Belastung für den Chirurgen dar, die ihn von der eigentlichen Aufgabe ablenkt oder gar an deren Ausführung hindert. Erforderlich ist die Entwicklung einer effizienten Interaktionsschnittstelle, um eine schnellstmögliche Fortführung der Operation zu gewährleisten. In einem ersten Schritt wird hierzu der Interaktionsbedarf analysiert. In einem zweiten Schritt werden die infrage kommenden Gestaltungsmöglichkeiten der Interaktion erörtert. Eine stetige Randbedingung ist hierbei die intraoperative Anwendbarkeit der resultierenden Interaktionstechnik mit dem Ziel, die Belastung für den Chirurgen so gering wie möglich zu halten.

### 6.3.1 Analyse des Interaktionsbedarfs

Der Chirurg interagiert auf vielfältige Weise mit dem kontextbezogenen Assistenzsystem. So stellt letztendlich auch die Visualisierung mit der Erweiterten Realität auf Basis erfasster und ausgewerteter Sensordaten eine Interaktion zwischen dem System und dem Benutzer dar. Für eine umfassende Darstellung des Forschungsgebiets Interaktion sei auf die einschlägige Literatur verwiesen [BKL04]. In der folgenden Betrachtung steht der Begriff Interaktion für eine Systembedienung durch den Chirurgen zur Wiederherstellung oder Verbesserung der Systemfunktionalität. Eine solche Interaktion ist notwendig zur Konfliktlösung im Rahmen der Situationsinterpretation, zur Anpassung der Darstellung und in seltenen Fällen zur Bearbeitung der Planungsdaten. Der folgende Abschnitt analysiert diese drei Anwendungsbereiche hinsichtlich ihres Interaktionsbedarfs.

- **Konfliktlösung im Rahmen der Situationsinterpretation**

Eine Konfliktlösung im Rahmen der Situationsinterpretation ist erforderlich, falls eine eindeutige Bestimmung des Operationsabschnitts nicht möglich ist. Dies tritt beispielsweise dann ein, wenn mehrere in der Fallbasis abgelegte Fälle aufgrund ähnlich hoher Aktivierungswerte für die Bestimmung des Operationsabschnitts infrage kommen oder keiner der abgelegten Fälle eine bestimmte Mindestaktivierung überschreitet. Eine Lösung dieser Problematik stellt die manuelle Bestimmung des Operationsabschnitts dar.

- **Anpassung der Darstellung**

Anhand der Darstellung wird die Art und Weise der Informationspräsentation festgelegt. Gründe für eine Anpassung der Darstellung liegen beispielsweise vor, wenn sich die eingeblendeten Daten aufgrund eines zu geringen Kontrasts nicht ausreichend vom realen Operationshintergrund abheben oder aufgrund chirurgenindividueller Präferenzen als störend empfunden werden. Die Anpassung der Darstellung erfolgt durch eine Veränderung der objektbezogenen Parameter. Als Beispiele werden die Transparenz des virtuellen Objekts und dessen Farbwert aufgeführt. Die Komplexität der Interaktion zur Änderung eines solchen Parameters hängt von dessen Wertebereich ab. Steht eine

überschaubare Menge nominaler Werte zur Auswahl, kann die Interaktion durch ein einfaches Selektionsmenü erfolgen. Die Veränderung eines quantitativen Parameters, wie die Festlegung der Objekttransparenz, erfordert hingegen komplexere Interaktionselemente und Eingabetechniken.

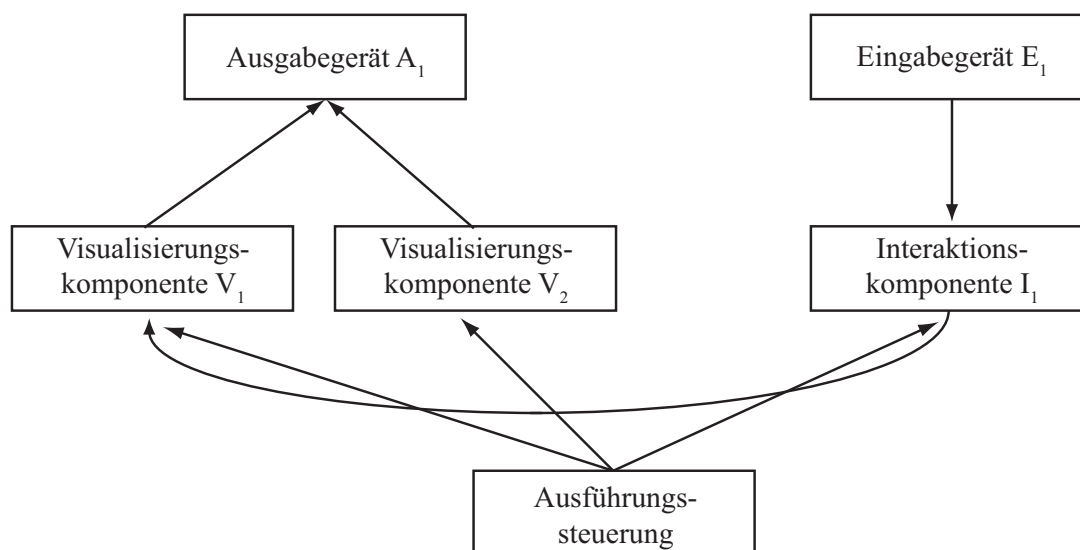
- **Bearbeitung von Planungsdaten**

Unter der Bearbeitung von Planungsdaten werden die virtuelle Objektexploration und die Modifikation der Planungsdaten verstanden. Die virtuelle Exploration ermöglicht eine Untersuchung der geometrischen Objektmodelle unabhängig von der Lage der realen Strukturen. Dies erlaubt beispielsweise die Betrachtung der Modellrückseite oder die Untersuchung von Details anhand eines virtuell vergrößerten Objektmodells. Sind für ein Objekt Daten mit unterschiedlichem Informationsgehalt bzw. Daten unterschiedlicher Modalität vorhanden, soll eine Interaktion die Möglichkeit zur Auswahl bieten. Beispielsweise die Auswahl zwischen der Visualisierung eines Oberflächenmodells und der Visualisierung der tomografischen Schichtbilder. Eine Modifikation der Planungsdaten ist notwendig, wenn die aktuell vorliegenden Planungsdaten aufgrund bislang nicht berücksichtigter Informationen unvollständig oder inkorrekt sind und der Nutzen einer Einblendung den Aufwand für eine intraoperativ durchgeführte Aktualisierung rechtfertigt. Dies beinhaltet beispielsweise die intraoperative Definition einer Schnitt- oder Bohrplanung oder die Definition von Landmarken zur Navigation. Die Komplexität der Interaktion zur Bearbeitung der Planungsdaten ist in der Regel höher als bei den zuvor genannten Anwendungsbereichen und erfordert eine Unterbrechung der Operation.

### 6.3.2 Bereitstellung von Interaktionstechniken

Anhand des ermittelten Interaktionsbedarfs müssen geeignete Interaktionstechniken entwickelt werden. In der vorliegenden Arbeit wird eine Interaktionstechnik anhand des verwendeten Eingabemediums, der Eingabetechnik und der Interaktionselemente charakterisiert. Dabei verwendet der Chirurg das Eingabegerät, um ein Interaktionselement mittels der zugehörigen Eingabetechnik auszuwählen. Die enge Beziehung zwischen diesen drei Komponenten wird durch die Definition von [BKL04] gestützt: *Dabei [Anm. Interaktionstechnik] handelt es sich um eine Methode, die es dem Benutzer erlaubt eine bestimmte Aufgabe im System zu erfüllen, wobei sowohl Hardware als auch Softwarebestandteile eingeschlossen sind.* Es sei jedoch angemerkt, dass in der Literatur zahlreiche, hiervon abweichende Begriffsdefinitionen existieren.

Eine Interaktionstechnik wird durch eine Interaktionskomponente implementiert. Neben dem Eingabemedium, der Eingabetechnik und den Interaktionselementen

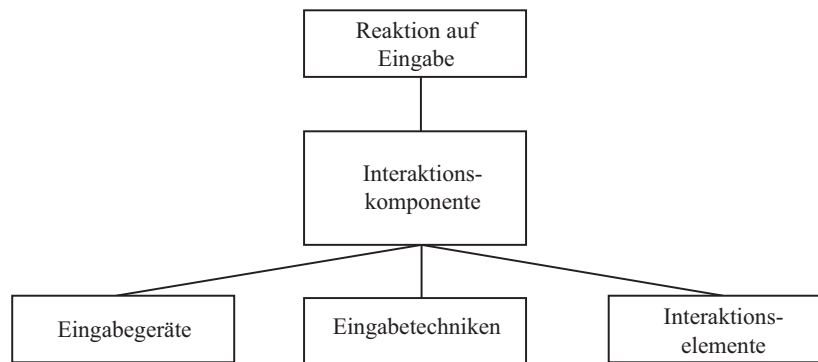


**Abb. 6.9:** Bereitstellung von Interaktionstechniken durch Interaktionskomponenten.

wird hierbei festgelegt, in welcher Art und Weise das System auf eine bestimmte Eingabe reagiert. Über die Ausführungssteuerung werden einzelne Interaktionskomponenten bereitgestellt und parametrisiert. Das Resultat einer Eingabe kann neben einer Parameterveränderung auch den Funktionsaufruf anderer Systemkomponenten, beispielsweise einer Visualisierungskomponente, beinhalten. Abbildung 6.9 verdeutlicht das Konzept zur Einbindung der Interaktionskomponenten. Interaktionskomponente  $I_1$  verwendet die Eingaben von Eingabegerät  $E_1$  und hat die Möglichkeit, Funktionen der Visualisierungskomponente  $V_1$  aufzurufen.

### 6.3.3 Konzeption von Interaktionskomponenten

Bei der Konzeption einer Interaktionskomponente müssen die Eingabegeräte, die Eingabetechniken, die Interaktionselemente und die Reaktion auf eine Eingabe festgelegt werden (vgl. Abbildung 6.10). Zu berücksichtigen sind hierbei zahlreiche Nebenbedingungen, die sich aus den speziellen Anforderungen des Einsatzumfeldes ergeben. Dies resultiert beispielsweise in einer eingeschränkten Auswahl möglicher Eingabegeräte aufgrund der geforderten Sterilität. Weitere Einschränkungen bezüglich der verwendbaren Eingabetechniken ergeben sich aus der begrenzten Bewegungsfreiheit des Chirurgen. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Eingabegeräte, Eingabetechniken und Interaktionselemente des kontextbezogenen Assistenzsystems *MediAssist* vorgestellt. Im Anschluss wird die Reaktion einer Interaktionskomponente auf eine Eingabe mithilfe eines Zustandsautomaten modelliert. Details zu Entwurf und Implementierung sind in [Web08] dokumentiert.



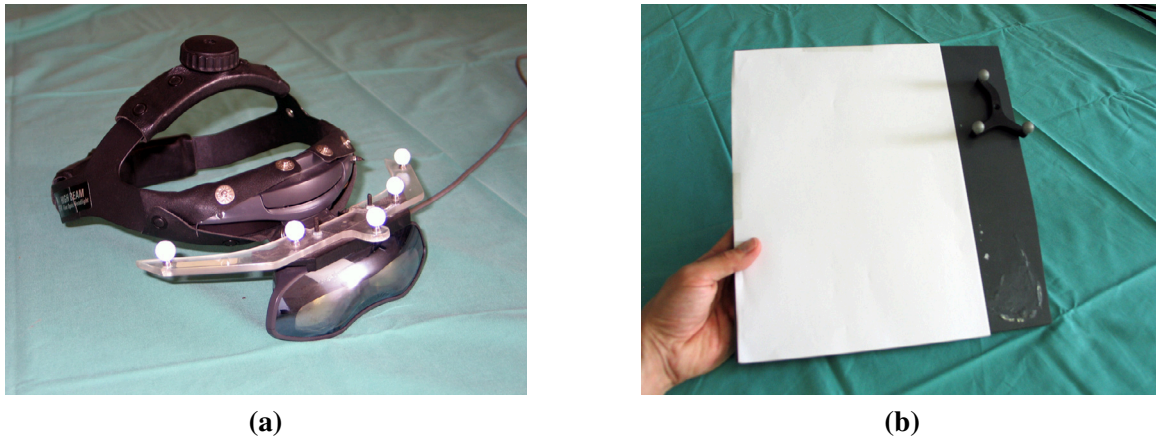
**Abb. 6.10:** Betrachtete Aspekte einer Interaktionskomponente.

### Eingabegeräte für den intraoperativen Einsatz

Jede Interaktion führt zu einer Ablenkung des Chirurgen von seiner wesentlichen Aufgabe und verzögert die Umsetzung des Operationsplans. Um diese unerwünschten Nebeneffekte so gering wie möglich zu halten, soll die Verwendung zusätzlicher Eingabegeräte, welche sich nicht im direkten Umfeld des Chirurgen befinden, vermieden werden. Durch diese Restriktion wird implizit sichergestellt, dass die verwendeten Eingabegeräte die Anforderungen bezüglich der Hygiene im Operationssaal erfüllen. Die Verwendung vorhandener Objekte als Eingabegeräte erfordert jedoch die Entwicklung dedizierter Interaktionstechniken. Das als Eingabemedium verwendete Objekt bekommt dabei eine neue, zusätzliche Rolle zugewiesen. Es wurden folgende Eingabegeräte untersucht (vgl. Abbildung 6.11):

- **Brillensystem**

Das kontextbezogene Assistenzsystem überlagert die reale Operationsszene mit rechnergenerierten virtuellen Informationen und präsentiert dem Chirurgen das Ergebnis in einem stereoskopischen Brillensystem. Das Gehirn des Chirurgen erstellt hieraus eine dreidimensionale Wahrnehmung der überlagerten Operationsszene. Die Akquisition der Bilddaten erfolgt bei einem minimalinvasiven Eingriffsszenario mit dem *MediAssist*-System über das Stereoendoskop. Dies ermöglicht eine Nutzung des Brillensystems als Eingabegerät für die Interaktion, indem die Position und Orientierung der Brille mittels eines angebrachten Markers durch das optische Positionsverfolgungssystem erfasst werden. Gezielte Kopfbewegungen des Chirurgen können als Interaktionsgesten gedeutet werden und ermöglichen somit eine Interaktion. Bei der Verwendung des Brillensystems als Eingabegerät entfällt die Installation zusätzlicher technischer Geräte im Operationssaal, da die Brille für die Darstellung der stereoskopischen Bilddaten Teil des *MediAssist*-Konzepts ist. Zusätzlich steht das Eingabegerät dem Chirurgen jederzeit zur Verfügung. Ein Nachteil ist jedoch die beschränkte Anzahl ausführbarer Gesten aufgrund der



**Abb. 6.11:** a) Eingabegerät Brillensystem. b) Interaktionstablett.

geringen Bewegungsfreiheit des Chirurgen. Dies prädestiniert das Brillensystem für Interaktionsaufgaben mit eher geringer Komplexität.

- **Interaktionstablett mit Zeigegerät**

Die Verwendung eines Interaktionstabletts zur Bearbeitung von Operationsplanungsdaten in der Erweiterten Realität wurde bereits von Reitinger et al. vorgeschlagen [Rei06]. Dabei handelt es sich um ein leichtes und handliches planares Objekt, dessen Oberfläche für die Darstellung virtueller Daten verwendet wird. Die Position und Orientierung des Tablett werden mittels eines angebrachten Markers durch das optische Trackingsystem erfasst. Zur Betrachtung der visualisierten Daten aus einer bestimmten Perspektive positioniert der Chirurg das Tablett in seinem Sichtfeld. Neben der Visualisierung von Planungsdaten eignet sich das Interaktionstablett für die Darstellung von Interaktionselementen, wie beispielsweise eines Menüs oder eines kontinuierlichen Wertgebers. Die Bedienung dieser Elemente kann durch verschiedene Eingabegeräte einschließlich des Brillensystems erfolgen. Für das kontextbezogene Assistenzsystem wird vor allem die Eingabe durch ein Zeigegerät untersucht. Dazu wird ein aktives Zeigegerät verwendet, dessen Position und Orientierung durch das optische Trackingsystem erfasst werden. Der Chirurg interagiert mit einem Bedienelement des Tablett durch eine entsprechende Ausrichtung des Zeigegeräts. Die Interaktion mittels des vorgestellten Eingabemediums erfordert zwar eine Unterbrechung der Operation, ermöglicht jedoch die Lösung komplexer Interaktionsaufgaben.

### **Eingabetechniken für den intraoperativen Einsatz**

Der Begriff Eingabetechnik bezieht sich auf die vorgeschriebene Handhabung eines Mediums zur Erzeugung einer Eingabe. Im Fall des kontextbezogenen Assistenz-

systems wird eine Eingabe anhand der Positions- und Orientierungsdaten des Brillensystems, des Interaktionstabletts und des Zeigegeräts realisiert. Sämtliche Daten werden vom optischen Positionsverfolgungssystem erfasst und für eine Auswertung an die Interaktionsschnittstelle weitergeleitet. Auf Basis dieser Eingabedaten werden folgende Eingabetechniken umgesetzt:

- **Eingabe durch Drehen und Neigen der Brille**

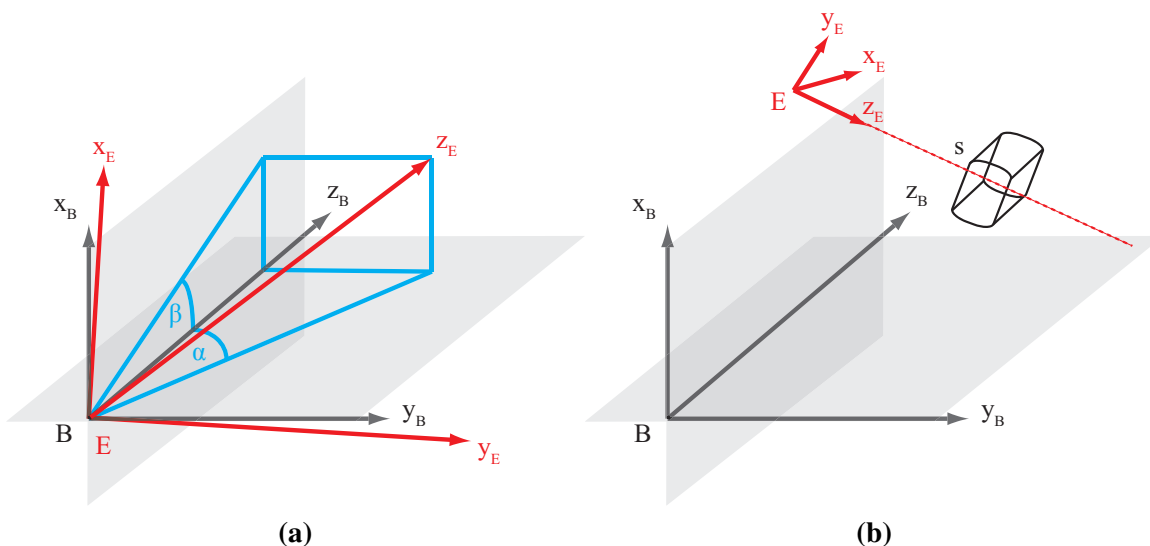
Eine Eingabe wird durch ein seitliches Drehen bzw. durch ein Heben und Senken des Kopfes realisiert. Eine Auswertung der horizontalen und vertikalen Drehwinkel erlaubt die Bestimmung der Blickrichtung der Brille, die für die Interaktion verwendet wird. In einer Ausgangsposition wird einmalig ein kartesisches Bezugskordinatensystem  $B$  definiert, bei dem die  $z$ -Achse mit der Blickrichtung der Brille übereinstimmt. Die Ausgangsposition ergibt sich anhand der Position und Orientierung der Brille, wenn der Chirurg die übliche Operationshaltung zur Handhabung der minimalinvasiven Instrumente einnimmt. Für die Auswertung der Eingabe wird die aktuelle Blickrichtung der Brille erfasst und durch die  $z$ -Achse eines Koordinatensystems  $E$  beschrieben, das in den Ursprung von  $B$  verschoben wird. Ausgehend von dem Bezugskordinatensystem  $B$  mit den Achsen  $x_B$ ,  $y_B$  und  $z_B$  und dem Koordinatensystem zur Beschreibung der aktuellen Blickrichtung  $E$  mit den Achsen  $x_E$ ,  $y_E$  und  $z_E$  werden der Horizontalwinkel  $\alpha$  und der Vertikalwinkel  $\beta$  bestimmt (vgl. Abbildung 6.12). Mittels  $\alpha$  wird die horizontale Auslenkung der  $z_E$ -Achse bezüglich der  $z_B$ -Achse ermittelt, indem der Winkel  $\alpha$  zwischen der Achse  $z_B$  und der Projektion von  $z_E$  auf die durch  $y_B$  und  $z_B$  aufgespannte Ebene bestimmt wird. Analog hierzu wird die vertikale Auslenkung durch den Winkel  $\beta$  bestimmt. Die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  stellen die Eingabe der Interaktion dar. Dreht der Chirurg seinen Kopf zur Seite, führt dies zu einer Änderung des Horizontalwinkels  $\alpha$ ; hebt oder senkt er den Kopf, drückt sich dies in einer Änderung des Vertikalwinkels  $\beta$  aus. Die Bestimmung der Blickrichtung erfolgt durch einen Vergleich der berechneten Winkel mit entsprechenden Schwellwerten.

- **Eingabe durch Andeuten mit einem Zeigegerät**

Beim Andeuten eines Objekts zeigt der Chirurg mit einem Eingabegerät auf das zu selektierende Objekt. Dies erfordert die Definition einer Zeigerichtung, beispielsweise entlang der Längsachse des aktiven Zeigegeräts. Diese Zeigerichtung entspricht der  $z$ -Achse eines zuvor definierten Koordinatensystems  $E$ . Während einer Eingabe wird ständig überprüft, welche Interaktionsobjekte von der durch die  $z_E$ -Achse definierten Gerade geschnitten werden. Hierzu muss die Position des Eingabegeräts und sämtlicher Interaktionsobjekte in einem Bezugskordinatensystem  $B$  bekannt sein. Existiert ein Schnittpunkt zwischen einem Interaktionsobjekt und der durch  $z_E$  definierten Geraden,



wird ferner überprüft, ob sich der Schnittpunkt vor oder hinter dem Eingabegerät befindet. Befindet sich der Schnittpunkt vor dem Eingabegerät, gelten die Interaktionsobjekte als angedeutet (vgl. Abbildung 6.12). Zur Erleichterung der Interaktion kann die Zeigerichtung als virtueller Strahl eingeblendet werden.



**Abb. 6.12:** Eingabetechniken für den intraoperativen Einsatz (vgl. [Web08]). (a) Eingabe durch Drehen und Neigen der Brille. (b) Eingabe durch Andeuten mit einem Zeigergerät.

### Interaktionselemente für den intraoperativen Einsatz

Durch die Visualisierung von Interaktionselementen weist das System den Benutzer auf vorhandene Eingabemöglichkeiten hin. Hierbei handelt es sich um Auswahlmenüs, Schaltflächen, Textfelder, Schieberegler sowie Oberflächenmodelle der Operationsplanung. Die Verwendung der vorgestellten Interaktionselemente wird als bekannt vorausgesetzt. Die Bedienung erfolgt anhand der vorgestellten Eingabetechniken unter Verwendung der Eingabegeräte.

### Modellierung der Reaktion auf eine Eingabe

Eine Interaktionskomponente stellt dem Anwender Interaktionselemente bereit und reagiert auf erfasste Eingaben entsprechend dem modellierten Verhalten. Der Entwurf solcher Komponenten erfolgt in Anlehnung an das Model-View-Controller-Konzept [GHJ+01] und basiert auf einer getrennten Modellierung des Verhaltens, der Darstellung und der Funktionen einer solchen Komponente.

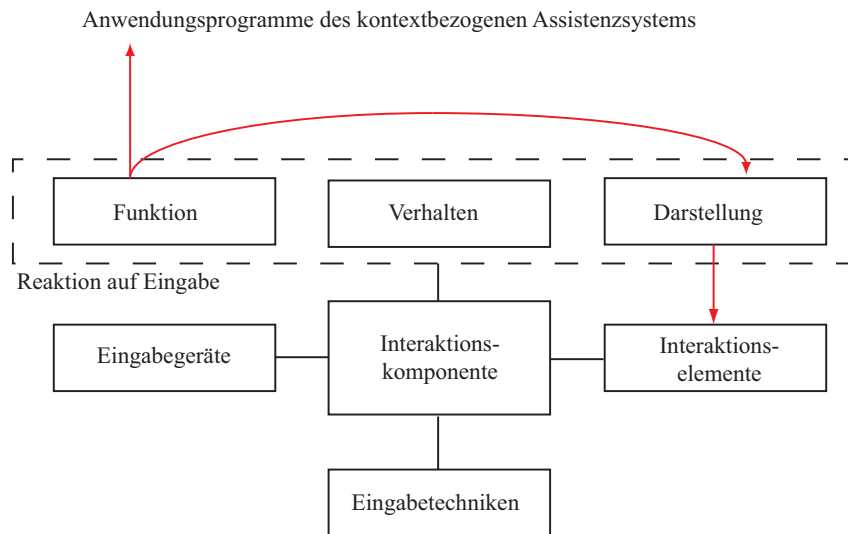
Für die Abbildung des Verhaltens wird ein Zustandsautomat  $A = (Q, F, E, \delta, A, \lambda)$  wie folgt definiert:

- $Q = \{q_1 \dots q_n\}$  ist eine Menge von Zuständen.  $q_1$  ist der Startzustand.
- $F \subseteq Q$  ist die Menge der Endzustände.
- $E = \{e_1 \dots e_m\}$  ist eine Menge von Eingaben. Eine Eingabe entsteht bei der Umsetzung einer Eingabetechnik durch den Benutzer.
- $\delta$ : die Zustandsübergangsfunktion  $\delta = Q \times E \rightarrow Q$ .
- $A = \{a_1 \dots a_k\}$  ist eine Menge von Ausgaben. Eine Ausgabe definiert die Ausführung einer Funktion.
- $\lambda$ : die Ausgabefunktion  $\lambda = Q \times Q \times \delta \rightarrow A$ .

Ausgehend von einem Zustand  $q_i \in Q$  erfolgt ein Zustandsübergang zu  $q_j \in Q$  bei einer als zulässig definierten Benutzereingabe  $e \in E$ . Durch die Ausgabefunktion  $\lambda$  wird die Ausführung einer Funktion als Reaktion auf die Benutzereingabe definiert. Folgende Reaktionsmöglichkeiten werden berücksichtigt:

- $\lambda(q_i \times * \times e)$ : Ausführung, falls in Zustand  $q_i$  die Eingabe  $e$  erfolgt.
- $\lambda(q_i \times q_j \times *)$ : Ausführung bei Zustandsübergang von  $q_i$  nach  $q_j$ .
- $\lambda(* \times q_j \times *)$ : Ausführung bei Erreichen des Zustands  $q_j$ .
- $\lambda(q_i \times * \times *)$ : Ausführung bei Verlassen des Zustands  $q_i$ .
- $\lambda(* \times * \times e)$ : Ausführung bei Eingabe  $e$ .

Das Aussehen des Interaktionselements wird anhand seiner Bestandteile und Parameter in der Darstellung festgelegt. So besteht eine Schaltfläche beispielsweise aus einem geometrischen Objekt zur grafischen Darstellung sowie einem Textfeld, um dem Anwender einen Hinweis auf die Schaltflächenfunktionalität zu geben. Die Objektfarbe kann dabei als Darstellungsparameter aufgefasst werden, anhand dessen der Zustand einer Schaltfläche wie *aktiviert*, *deaktiviert*, *angedeutet* oder *bestätigt* durch Einfärbung des geometrischen Objekts visualisiert wird. Diese zustandsbezogene Änderung der Darstellung wird durch entsprechende Funktionen realisiert, die Zugriff auf die Parameter der Darstellung besitzen. Mittels Funktionen wird auch die Ausführung von Anwendungsprogrammen des kontextbezogenen Assistenzsystems initiiert. Die Bedingungen, unter welchen solche Funktionen ausgeführt werden, werden durch den beschriebenen Zustandsautomaten festgelegt. Abbildung 6.13 verdeutlicht die beschriebenen Zusammenhänge schematisch. In Abschnitt 7.2.3 wird das vorgestellte Konzept für die Erstellung einer Interaktionskomponente zur Anpassung von Visualisierungsparametern und einer Interaktionskomponente zur Ein- und Ausblendung von Oberflächenmodellen präsentiert.



**Abb. 6.13:** Zusammenhang Funktion, Verhalten und Darstellung einer Interaktionskomponente.

## 6.4 Zusammenfassung

Es wurden exemplarische Verfahren zur Erzeugung einer kontextbezogenen Visualisierung bei der Umsetzung einer Inzision, beim Setzen von Gefäßclips und bei Gefahrensituationen vorgestellt. Anhand des Interaktionsbedarfs eines kontextbezogenen Assistenzsystems wurde eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Lösung der Interaktionsaufgaben konzipiert und realisiert.

Der Vorteil einer kontextbezogenen Assistenz liegt in der Bereitstellung genau der Informationen, die der Chirurg gerade benötigt. Hierdurch wird vermieden, dass dem Chirurgen teilweise unzureichende oder nicht benötigte Informationen zur Verfügung stehen, wodurch sich das Risiko einer unbeabsichtigten Verletzung anatomischer Strukturen verringert und eine Ablenkung des Chirurgen durch eine nicht benötigte Visualisierung vermieden wird. Als nachteilig erweist sich die aufwändige Konzeption der Visualisierungskomponenten aufgrund der zugrunde liegenden komplexen Sachverhalte. Demgegenüber ermöglicht die modulare Konzeption der Mensch-Maschine-Schnittstelle das Hinzufügen weiterer Interaktionskomponenten mit einem vergleichbar geringen Aufwand.



# Kapitel 7

## Evaluation

### 7.1 Einführung

Das vorliegende Kapitel ist in zwei Teile gegliedert: Der erste Teil bewertet die für das Gesamtkonzept der kontextbezogenen Assistenz besonders relevanten Verfahren anhand von Schlüsselexperimenten aus dem Anwendungsgebiet der minimalinvasiven Chirurgie; der zweite Teil demonstriert die Übertragbarkeit des Konzepts auf einen Eingriff in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie und evaluiert das hierbei entstandene Gesamtsystem.

An dieser Stelle sei auf die sich stark unterscheidende Vorgehensweise bei der Durchführung der Evaluation in den beiden Anwendungsgebieten hingewiesen. Die Gründe hierfür liegen in den Differenzen bezüglich der klinischen Rahmenbedingungen sowie dem Aufbau und technischen Entwicklungsstand der verwendeten Assistenzsysteme.

Das minimalinvasive Anwendungsszenario ist durch komplexe Veränderungen des Operationsgebiets gekennzeichnet. Hierunter fallen beispielsweise das Ablösen von Adhäsionen auf einer Struktur, das Clippen oder die Durchtrennung von Gefäßen. Die automatische Erfassung der zugehörigen Situationsmerkmale, beispielsweise durch die bildbasierte Analyse endoskopischer Bilddaten (vgl. Abschnitt 3.3), ist bislang nicht abgeschlossen [Spe09]. Für eine Visualisierung mittels der Erweiterten Realität ist ferner das Problem der intraoperativen Weichgeweberegistrierung zu lösen (vgl. [RSS+09]). Dies schließt eine Evaluation des Gesamtsystems *MediAssist* aus und legt eine Evaluation ausgewählter Aspekte anhand von Schlüsselexperimenten nahe.

Die Rahmenbedingungen in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie sind, aufgrund der zumeist als starr angenommenen knöchernen Strukturen im Operationsgebiet, bedeutend einfacher. Somit entfällt eine Berücksichtigung der Weichgewebedeformation. Das *Inpres*-Konzept beschränkt sich ferner auf die Verwendung von Positionsdaten zur Erfassung der Situationsmerkmale. Hierdurch wird die robuste Erfassung

einfacher Operationssituationen sichergestellt, wodurch eine Evaluation des erweiterten *Inpres*-Gesamtsystems hinsichtlich quantitativer Kennzahlen zu Laufzeit, Erkennungsrate und Genauigkeit möglich ist.

## 7.2 Schlüsselexperimente bei minimalinvasiven Anwendungsszenarien

Anhand der nachfolgend vorgestellten Schlüsselexperimente mit dem *MediAssist*-System (vgl. Abschnitt 3.3) soll das Potenzial des wissensbasierten Lösungsansatzes für eine Anwendung in der minimalinvasiven Chirurgie aufgezeigt werden. Dies geschieht, indem Experimente mit den für das Gesamtkonzept besonders relevanten Verfahren durchgeführt und diskutiert werden. Die Umsetzung von Versuchen zur Beurteilung eines Gesamtsystems, beispielsweise zur Quantifizierung der auftretenden Latenzen, ist in Abschnitt 7.3 dokumentiert. Für das minimalinvasive Anwendungsszenario wurden folgende Schlüsselexperimente durchgeführt:

- **Schlüsselexperiment zur Situationsinterpretation**

Das erste Schlüsselexperiment verdeutlicht das Potenzial einer Situationsinterpretation durch ein Fallermittlungsnetz. Hierzu werden Modelle von Operationssituationen verglichen und durch einen Ähnlichkeitswert quantifiziert. Welche Aussagekraft diesen Ähnlichkeitswerten zugesprochen werden kann, wird anhand des Eingriffs Cholezystektomie näher untersucht.

- **Schlüsselexperiment zur kontextbezogenen Visualisierung**

Inwiefern die zur Verfügung gestellte kontextbezogene Visualisierung einen Mehrwert für den Chirurgen darstellt, wird anhand der vorgestellten Verfahren für das Setzen von Gefäßclips und für die Umsetzung einer Inzision im Rahmen des zweiten Schlüsselexperiments untersucht.

- **Schlüsselexperiment zur Mensch-Maschine-Interaktion**

Die Interaktion eröffnet dem Chirurgen vielfältige Möglichkeiten zur Bedienung des Assistenzsystems. Im Rahmen des dritten Schlüsselexperiments wird anhand von zwei Interaktionskomponenten das Potenzial des entwickelten Interaktionskonzepts erörtert.

### 7.2.1 Schlüsselexperiment zur Situationsinterpretation

Die Fähigkeit zur Interpretation der aktuell vorliegenden Operationssituation ist eine notwendige Voraussetzung für die Realisierung einer kontextbezogenen Assistenz. Im Fokus der nachstehenden Betrachtung steht die fallbasierte Situationsinterpretation. Mittels eines Fallermittlungsnetzes wird ein Ähnlichkeitswert zwischen

dem Modell der zu interpretierenden Operationssituation und den in einer Fallbasis abgelegten Modellen klassifizierter Operationssituationen (Referenzmodellen) ermittelt. Im Rahmen des Schlüsselexperiments wird untersucht, welche Aussagekraft diesen ermittelten Ähnlichkeiten zugesprochen werden kann. Die Betrachtung erfolgt anhand dreier unterschiedlicher Ähnlichkeitsmetriken (vgl. [SBS+09, Bec08]).

### Versuchsordnung

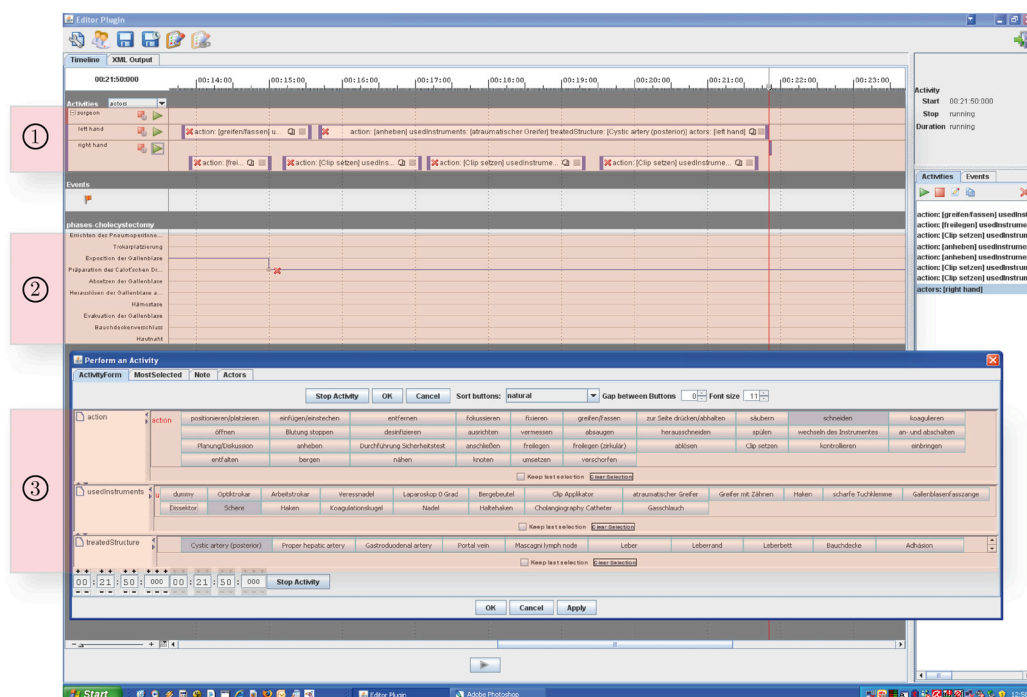
Für das Schlüsselexperiment wurden  $n = 41$  Operationssituationen zweier minimalinvasiv durchgeführter Cholezystektomien modelliert und analysiert. Die Betrachtung beschränkte sich hierbei auf die detaillierte Analyse einer für den Eingriff charakteristischen Operationssequenz, in der sowohl der Ductus Cysticus als auch die Arteria Cystica geclippt und durchtrennt werden (vgl. Abschnitt 3 und 4 des Operationsablaufs in Anhang A.1). Im Folgenden werden zunächst die beiden Operationssequenzen natürlichsprachlich beschrieben und die Unterschiede bezüglich der Vorgehensweise zur Erreichung desselben Operationsziels herausgearbeitet.

Bei Eingriff *A* geht der Chirurg nach dem in Abschnitt 4.2 vorgestellten Schema vor: Nach der Dissektion des Calot'schen Dreiecks wird zunächst der Ductus Cysticus und anschließend die Arteria Cystica geclippt. Daraufhin wird der Ductus Cysticus durchtrennt. Als letzten Schritt der betrachteten Operationssequenz durchtrennt der Chirurg die Arteria Cystica. Bei Eingriff *B* wurde eine andere Vorgehensweise gewählt: Zu Beginn der Operationssequenz erfolgt die Dissektion des Calot'schen Dreiecks. Daraufhin werden abwechselnd Clips auf dem Ductus Cysticus und der Arteria Cystica gesetzt. Im Anschluss werden der Ductus Cysticus und die Arteria Cystica durchtrennt.

Die Analyse der Operationssequenzen bezüglich der chirurgischen Handlung erfolgt mithilfe eines klinisch evaluierten Ablauferfassungswerkzeugs<sup>1</sup> [NSS+06]. Hierzu wurde das Softwarewerkzeug mit den Daten der Applikationsontologie für den Eingriff der Cholezystektomie entsprechend eingerichtet. Abbildung 7.1 zeigt die Benutzeroberfläche des Softwarewerkzeugs. In dem mit (1) markierten Bereich wird die Tätigkeit des Chirurgen auf einer Zeitachse abgetragen. Der aktuell vorliegende Operationsabschnitt wird in Bereich (2) erfasst. Das durch (3) markierte Fenster ermöglicht die Erfassung der chirurgischen Tätigkeit, des verwendeten Instruments und der behandelten Struktur. Das Patientenzustandsmodell wurde anhand der Operationsvideos manuell erstellt. Die Abbildung der Operationssituationen auf die Situationsmodelle erfolgte zu äquidistanten Zeitintervallen (5s). Abgebildet wurden die im Endoskopbild sichtbaren Merkmale. Zu diesen zählen die in Kapitel 4 beschriebenen Aspekte des semantischen Situationsmodells, d. h. Informationen über die verwendeten chirurgischen Instrumente, die Tätigkeit des Chirur-

---

<sup>1</sup>engl.: Workflow-Tool.

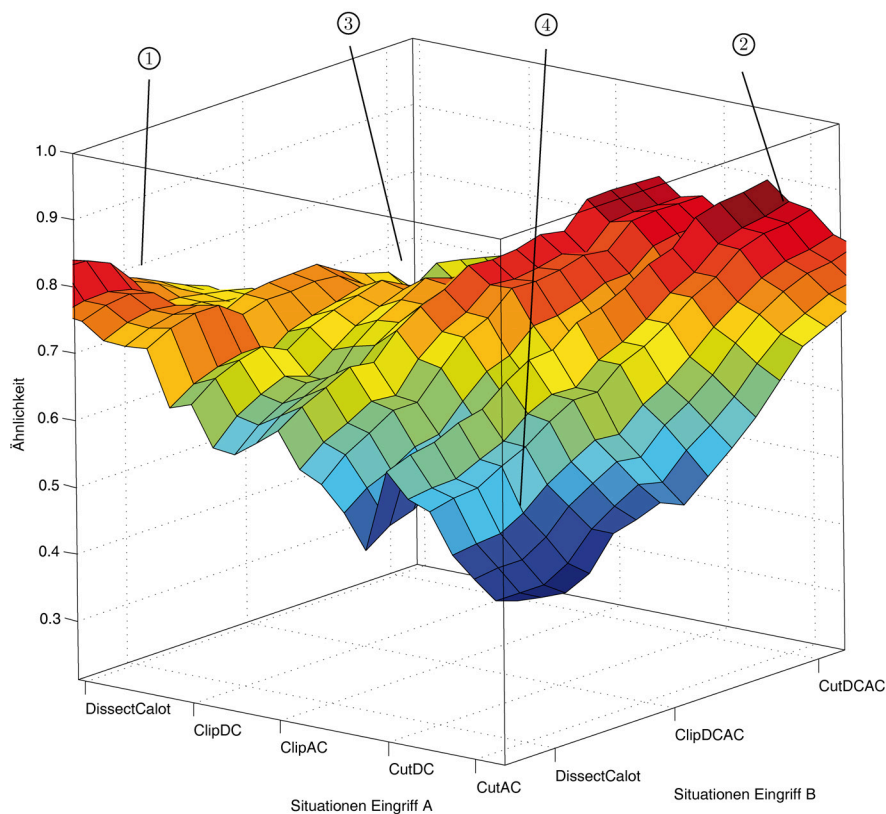


**Abb. 7.1:** Softwarewerkzeug [NSS+06] zur Erfassung des Handlungsmodells einer Cholezystektomie.

gen, die behandelte Struktur, strukturelle Beziehungen zwischen den anatomischen Strukturen sowie Zustände der Strukturen. Bei der folgenden Untersuchung dienen die Situationsmodelle des Eingriffs A als Eingabe für das Fallermittlungsnetz, wohingegen die Situationsmodelle des Eingriffs B als Fallbasis für die Situationsinterpretation verwendet werden. Das Schlüsselexperiment vergleicht die ermittelten Ähnlichkeitswerte bei Verwendung der folgenden Ähnlichkeitsmetriken:

- Metrik 1: Ähnlichkeit von Situationsmerkmalen anhand der Distanz in der Taxonomie (initialer Ansatz)**  
 Bei dem initialen Ansatz ergibt sich die Ähnlichkeit zweier Situationsmodelle anhand der Ähnlichkeit ihrer Situationsmerkmale unter Einbeziehung der Konzepttaxonomie.
- Metrik 2: Nichtberücksichtigung unähnlicher Situationsmerkmale**  
 Bei der Ermittlung der Ähnlichkeit zweier Situationsmodelle werden nur die Merkmalstupel berücksichtigt, die eine gewisse Mindestähnlichkeit aufweisen.
- Metrik 3: Strafkosten bei sich gegenseitig ausschließenden Situationsmerkmalen**  
 Die gesonderte Behandlung sich gegenseitig ausschließender Situationsmerkmale erfolgt durch das in Abschnitt 5.4 vorgestellte Ähnlichkeitsmaß.





**Abb. 7.2:** Ähnlichkeit der Situationsmodelle bei Verwendung von Metrik 1 (aus Sudra et al. [SBS+09], Fig. 1, © 2009, mit freundlicher Genehmigung von IOS Press).

### Metrik 1: Ähnlichkeit von Situationsmerkmalen anhand der Distanz in der Taxonomie (initialer Ansatz)

In Schaubild 7.2 sind die ermittelten Ähnlichkeitswerte des initialen Ansatzes grafisch dargestellt. Die Situationsmodelle der beiden Eingriffe A und B sind auf den Koordinatenachsen abgetragen, welche die Grundfläche des Graphen aufspannen. Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Operationsstrategien sind den Achsenbeschriftungen zusätzlich die einzelnen Abschnitte der beiden Operationssequenzen zu entnehmen. Bei Eingriff A handelt es sich um die Abschnitte *DissectCalot*, *ClipDC*, *ClipAC*, *CutDC* und *CutAC*. Bei Eingriff B erfolgt die Einteilung in *DissectCalot*, *ClipDCAC* und *CutDCAC*. Bei den dargestellten Ähnlichkeitswerten handelt es sich um normierte Ähnlichkeiten bezüglich der Anfrage, wodurch sämtliche Ähnlichkeitswerte für den initialen Ansatz im Intervall  $[0,1]$  liegen. Für eine bessere Ablesbarkeit der Ähnlichkeitswerte wurde die Darstellung des Graphen durch einen Farbverlauf von blau zu rot kodiert, wobei blau eine geringe und rot eine hohe Ähnlichkeit des verglichenen Situationstupels bedeutet.

Der Graph weist an den jeweils gegenüberliegenden Ecken ausgeprägte Senken bzw. Erhebungen auf. Zusätzlich ist eine Art Grat auf der Diagonalen zwischen den beiden Erhebungen zu erkennen. Im Bereich der ersten Erhebung, die in der Abbildung durch (1) markiert ist, werden Operationssituationen vom Beginn der analysierten Sequenzen verglichen. Es handelt sich hierbei um Operationssituationen aus dem Operationsabschnitt *DissectCalot*. Bei beiden Eingriffen sind ähnliche Voraussetzungen bezüglich der anatomischen Strukturen des Operationsfelds gegeben und es werden ähnliche Instrumente für die Freilegung des Calot'schen Dreiecks verwendet. Dies führt zu einer hohen Ähnlichkeit der betrachteten Situationstupel in diesem Bereich. Für die zweite Erhebung, die in der Abbildung durch eine (2) gekennzeichnet ist, gilt dieselbe Argumentation, da auch hier Situationen aus identischen Operationsabschnitten verglichen werden. In den durch (3) und (4) gekennzeichneten Senken des Graphen werden hingegen Situationsmodelle aus unterschiedlichen Operationsabschnitten verglichen. In der besonders stark ausgeprägten Senke von (3) werden Situationsmodelle vom Beginn der Operationssequenz von Eingriff A mit Situationsmodellen vom Ende der Operationssequenz von Eingriff B verglichen. Die geringe Ähnlichkeit ergibt sich hauptsächlich aufgrund der sich stark unterscheidenden anatomischen Gegebenheiten. So sind zu Beginn der betrachteten Sequenz die wesentlichen Strukturen Ductus Cysticus und Arteria Cystica noch nicht freigelegt, wohingegen sie gegen Ende der Sequenz freigelegt, geclippt und durchtrennt sind. Weitere Unterschiede bestehen bei den verwendeten Instrumenten. Das generell hohe Niveau der ermittelten Ähnlichkeitswerte lässt sich dadurch erklären, dass es sich bei beiden Eingriffen um minimalinvasiv durchgeführte Cholezystektomien handelt, deren Operationsgebiet prinzipiell durch dieselben anatomischen Strukturen beschrieben wird. Anhand der Argumentation zur Erläuterung der Senken und Erhebungen lässt sich auch der Grat auf der Diagonalen des Graphen interpretieren. Unter der Voraussetzung, dass bei beiden Eingriffen eine ähnliche Operationsstrategie verfolgt wird und zusätzlich ein gleichmäßiger Operationsfortschritt gegeben ist, werden entlang der Diagonalen Situationsmodelle aus ähnlichen Operationsabschnitten verglichen. Beide Voraussetzungen sind für das Schlüsselexperiment erfüllt, wie sich anhand der hohen Ähnlichkeitswerte im Schaubild ablesen lässt. Jedoch ist dieser Grat im mittleren Bereich der Diagonale weniger stark ausgeprägt als an den Enden. Dies lässt sich mit der bereits angesprochenen leicht unterschiedlichen Vorgehensweise beim Clippen und Durchtrennen des Ductus Cysticus und der Arteria Cystica bei beiden Eingriffen erklären.

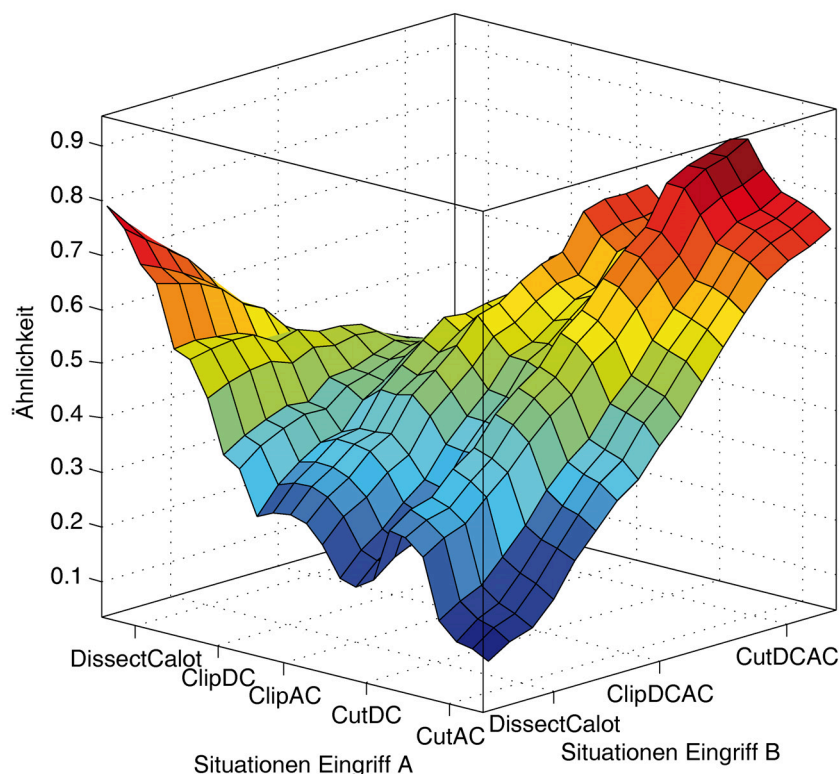
## **Metrik 2: Nichtberücksichtigung unähnlicher Situationsmerkmale**

Die zweite untersuchte Ähnlichkeitsmetrik berücksichtigt Tupel von Situationsmerkmalen nur dann, wenn die zugrunde liegende Konzeptähnlichkeit der verglichenen Merkmale einen vorher definierten Schwellenwert überschreitet. Dies kann so verstanden werden, dass zwischen den *TBox*-Konzepten der Merkmalstupel eine

Maximaldistanz in der Taxonomie nicht überschritten werden darf, falls das Merkmalstupel einen Beitrag zur Fallaktivierung leisten soll. Im Rahmen des Schlüsselexperiments wurde der Schwellwert für die Konzeptähnlichkeit auf eins festgelegt. Dadurch tragen nur Merkmalstupel zur Fallaktivierung bei, deren Konzepte identisch sind oder bei denen es sich um Geschwisterkonzepte in der Taxonomie handelt. Die berechneten Ähnlichkeiten der Situationstupel für die beiden Operationssequenzen sind in Abbildung 7.3 dargestellt. Im Vergleich zu dem initialen Ansatz weist der ermittelte Graph starke Abweichungen auf. Diese äußern sich in den hohen Gradienten, die im zugehörigen Schaubild zu erkennen sind. Auffallend ist einerseits die hohe Ähnlichkeit der verglichenen Situationsmodelle zu Beginn und gegen Ende beider Operationssequenzen. Des Weiteren fällt das Fehlen des Grades über der Diagonalen auf. Dies kann wie folgt erklärt werden: Die beiden betrachteten Operationssequenzen sind durch einen eindeutigen Anfangszustand, das bislang nicht freigelegte Calot'sche Dreieck, und einen eindeutigen Endzustand, die geclippte und durchtrennte Arteria Cystica sowie der geclippte und durchtrennte Ductus Cysticus, gekennzeichnet. Dies führt in diesen Abschnitten zu einer Vielzahl identischer Situationsmerkmale, was sich in einer hohen Ähnlichkeit der verglichenen Situationsmodelle niederschlägt. Fällt die anhand von Metrik 2 ermittelte Konzeptähnlichkeit eines Merkmalstupels unter den Schwellwert von eins, d. h., die verglichenen *TBox*-Konzepte sind nicht identisch und auch keine Geschwisterkonzepte, so trägt diese Konzeptähnlichkeit nicht zur Erhöhung der Situationstupelähnlichkeit bei. So wird beispielsweise anhand der Taxonomie der anatomischen Strukturen ein bestimmter Konzeptähnlichkeitsbetrag bei einem Vergleich der Arteria Cystica mit dem Ductus Cysticus ermittelt (vgl. Abschnitt 5.4.3). Bei Verwendung von Metrik 1 erhöht dieser Wert die Situationstupelähnlichkeit um genau diesen Betrag, wohingegen er bei Verwendung von Metrik 2 aufgrund des Schwellenwerts von eins nicht berücksichtigt wird. Dies erklärt einerseits die rasch abnehmende Ähnlichkeit und damit einhergehenden hohen Gradienten entlang des zeitlichen Verlaufs und andererseits das Fehlen eines ausgeprägten Grades aufgrund der unterschiedlichen Vorgehensweise beim Clippen des Ductus Cysticus und der Arteria Cystica.

### **Metrik 3: Strafkosten bei sich gegenseitig ausschließenden Situationsmerkmalen**

Durch die gesonderte Behandlung sich gegenseitig ausschließender Situationsmerkmale wird zusätzliches Wissen für die Ermittlung der Ähnlichkeit zweier Situationsmodelle verwendet. Die Evaluation dieses Konzepts erfolgte anhand der sich gegenseitig ausschließenden topologischen Beziehungen *grenzt an* und *getrennt* (vgl. Abschnitt 4.8.1), d. h., zwei Strukturen können entweder aneinander angrenzen oder es besteht keine Verbindung zwischen ihnen. Treten entsprechende Situationsmerkmale in den betrachteten Situationsmodellen auf, so verringert sich die ermittelte



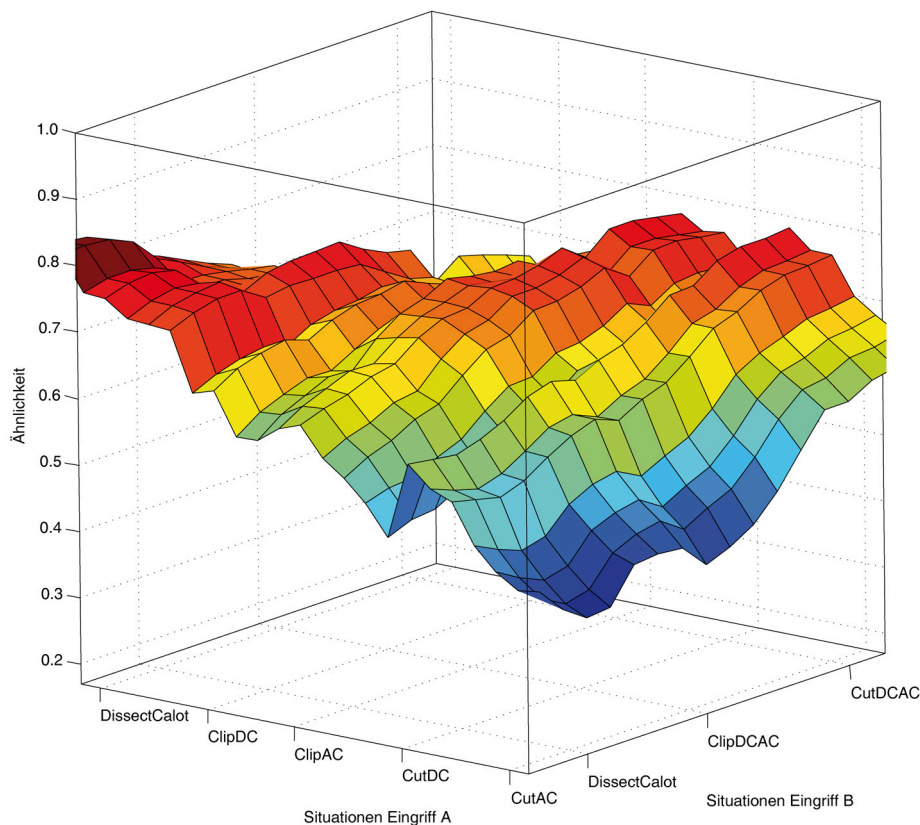
**Abb. 7.3:** Nichtberücksichtigung unähnlicher Situationsmerkmale (aus [Bec08]).

Ähnlichkeit gemäß der Beschreibung in Abschnitt 5.4. Daraus folgt weiter, dass die ermittelten Ähnlichkeiten nicht zwingend positiv sein müssen. Der Einfluss des Strafkostenverfahrens auf die Daten des Schlüsselexperiments ist in Schaubild 7.4 dargestellt. Im Gegensatz zum initialen Ansatz ist der Grat über der Diagonale hier deutlich besser zu erkennen. Das zusätzliche Wissen bezüglich der topologischen Beziehungen im Patientenzustandsmodell führt somit zu einer besseren Unterscheidung unähnlicher Situationen.

### Erkenntnis

Anhand des Schlüsselexperiments konnte gezeigt werden, dass die Ermittlung aussagekräftiger Ähnlichkeitswerte zur Unterscheidung komplexer Operationssituationen mithilfe des entwickelten Ansatzes auf Basis von Fallermittlungsnetzen möglich ist. Diese Aussage wird anhand der verwendeten Beispieldaten und Analysen wie folgt belegt:

- **Zuordnung von Operationsphasenbeginn und -ende:** Anhand der berechneten Ähnlichkeitswerte der betrachteten Operationssituationen konnte nachvollzogen werden, dass bei beiden Eingriffen sowohl der Zustand des Patienten als auch die chirurgische Vorgehensweise zu Beginn und gegen Ende der



**Abb. 7.4:** Gesonderte Behandlung sich gegenseitig ausschließender Situationsmerkmale (aus Sudra et al. [SBS+09], Fig. 1, © 2009, mit freundlicher Genehmigung von IOS Press).

betrachteten Operationsphase einander sehr ähnlich waren. Dieser Sachverhalt konnte unabhängig von der verwendeten Metrik festgestellt werden.

- **Ablesbarkeit des Operationsfortschritts:** Der Operationsfortschritt ist an den hohen Ähnlichkeitswerten entlang der Diagonalen aller betrachteten Graphen abzulesen. Diese Werte entstehen durch die sukzessive Veränderung der Patientenanatomie vom Anfangszustand hin zum Endzustand der betrachteten Operationsphase. Je mehr die Patientenanatomie zweier betrachteter Operationssituationen voneinander abweicht, desto geringer ist die ermittelte Ähnlichkeit der betrachteten Situationen. Aus diesem Grund ergeben sich an den gegenüberliegenden Ecken des Graphen sehr niedrige bzw. sehr hohe Ähnlichkeitswerte. Der Operationsfortschritt war bei allen verwendeten Metriken zu erkennen.
- **Erkennbarkeit unterschiedlicher Operationsstrategien:** Die Graphen aller betrachteten Metriken lassen zunächst ein Absinken und später einen Anstieg der Ähnlichkeitswerte entlang einer Diagonalen erkennen. Dies begrün-

det sich in den unterschiedlichen Operationsstrategien der beiden Eingriffe, wodurch die Zustände der betrachteten anatomischen Strukturen nicht exakt übereinstimmen und die Abfolge der chirurgischen Tätigkeiten variiert. Die resultierenden Abweichungen des zugehörigen Patientenzustands- und Handlungsmodells verringern die ermittelte Ähnlichkeit.

Anhand der analysierten Beispieldaten wird deutlich, welche Aussagekraft die ermittelten Ähnlichkeitswerte besitzen und wie mit diesen Operationssituationen bzw. Operationsabläufe verglichen werden können. Inwiefern das Konzept für einen klinischen Einsatz verwendet werden kann, ist jedoch zu prüfen. Die Durchführung weiterer Experimente zur fallbasierten Situationsinterpretation wird in Abschnitt 7.3 beschrieben.

## 7.2.2 Schlüsselexperiment zur kontextbezogenen Visualisierung

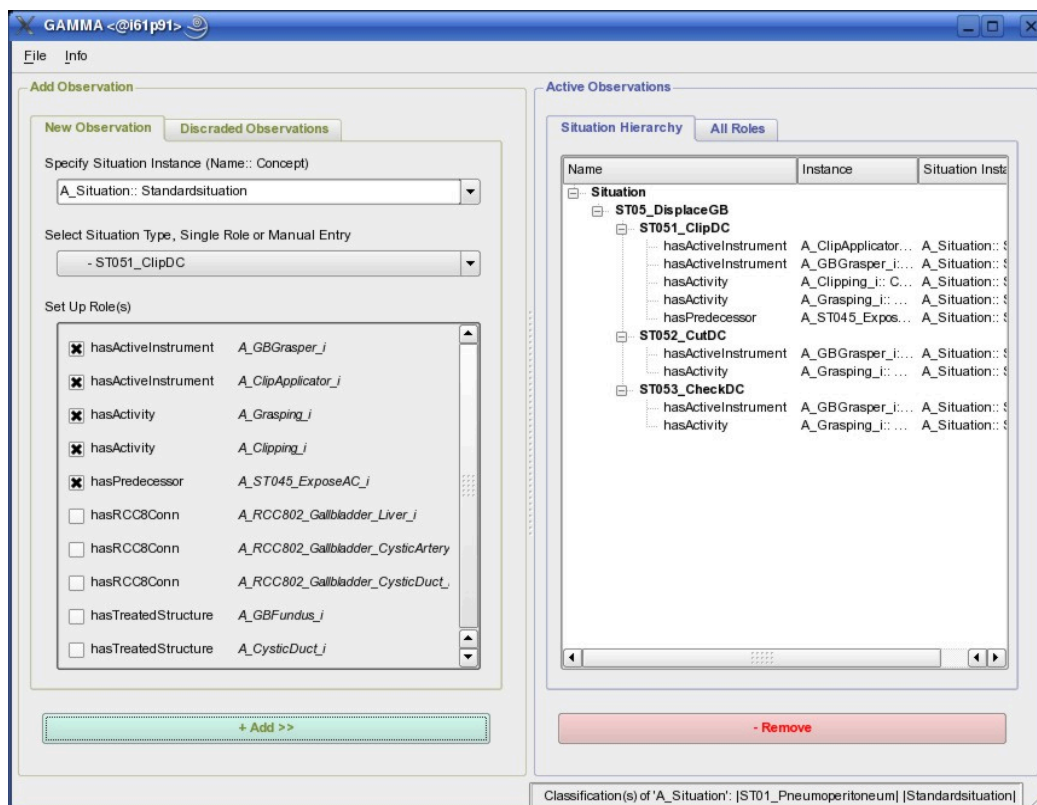
Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, erfassen und reagieren aktuelle chirurgische Assistenzsysteme der Erweiterten Realität nur bedingt auf den aktuellen Situationskontext. Zwar sind alle Systeme aufgrund der Positionserfassung von Patient und Instrument in der Lage, eine korrekte Überlagerung realer und virtueller Daten zu erzeugen, ein Problem stellt jedoch die Anpassung der Visualisierung an den aktuellen Zustand des Patienten dar. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept zur Erzeugung einer kontextbezogenen Assistenz soll einen Beitrag zur Lösung dieser Problematik leisten. Im nachfolgend erläuterten Schlüsselexperiment wird exemplarisch eine kontextbezogene Visualisierung beim Setzen von Gefäßclips und bei der Umsetzung einer Inzision untersucht (vgl. [SSM+07a, SSP+08]).

### Versuchsaufbau

Das kontextbezogene Assistenzsystem unterstützt den Chirurg durch die Bereitstellung von Zusatzinformationen mittels der Erweiterten Realität. Im Rahmen des Schlüsselexperiments wurden zwei Versuche durchgeführt:

- Versuch 1: Kontextbezogene Unterstützung beim Setzen von Gefäßclips.
- Versuch 2: Kontextbezogene Unterstützung bei der Umsetzung einer Inzision.

Der erste Versuch wurde anhand eines Patientenmodells in der *MediAssist*-Experimentierumgebung durchgeführt (vgl. hierzu Abschnitt 3.3). Zur Sicherstellung definierter Testbedingungen wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, die eine interaktive Definition von Situationsmodellen erlaubt (vgl. [Dre07]). Die Simulationsumgebung besitzt eine Anbindung an das kontextbezogene Assistenzsystem und ermöglicht eine interaktive Simulation von Situationsmerkmalen durch das Hinzufügen bzw. das Entfernen geeigneter Rollen und Instanzen des Situationsmodells.



**Abb. 7.5:** Grafische Benutzeroberfläche zur Bedienung der Simulationsumgebung (aus [Dre07]). Linkes Fenster: Auswahl der Rollen und Instanzen zur Definition der Situationsmerkmale eines Situationsmodells. Rechtes Fenster: Liste der momentan definierten Situationsmodelle.

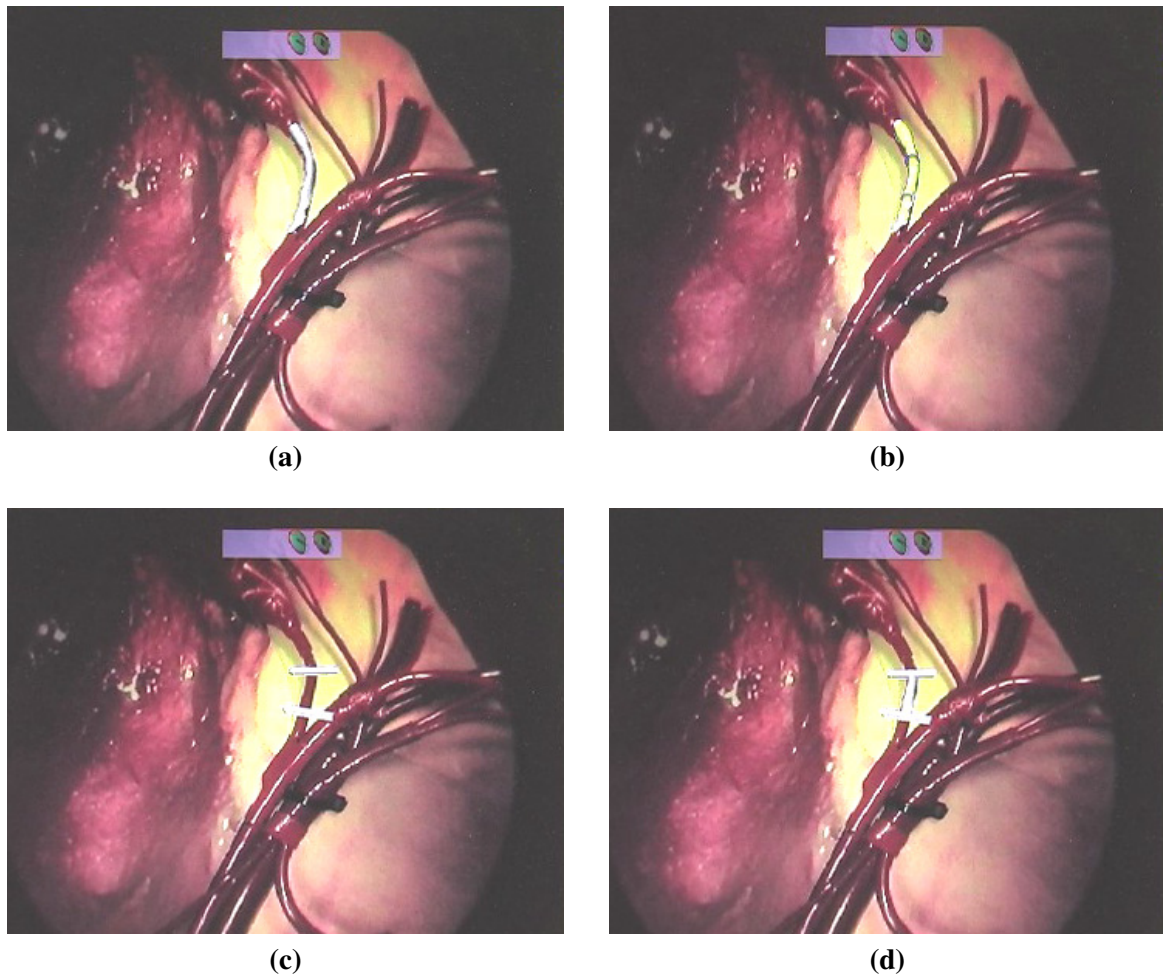
In Abbildung 7.5 ist die grafische Benutzeroberfläche zur Bedienung der Simulationsumgebung dargestellt.

Der zweite Versuch wurde anhand von Gewebe tierischen Ursprungs in der o. g. Experimentierumgebung durchgeführt. Dazu wurden insgesamt  $n = 50$  Schweine- nieren als Versuchsobjekte verwendet. Für jedes Versuchsobjekt wurde eine Inzision geplant und mithilfe eines Schneideinstruments<sup>2</sup> umgesetzt. Die Schnittlänge und -tiefe sowie die Position auf dem Versuchsobjekt wurden absichtlich stark variiert, um das Verhalten und die Robustheit des Verfahrens zu untersuchen.

### Kontextbezogene Unterstützung beim Setzen von Gefäßclips

Die Entfernung der Gallenblase erfordert die Durchtrennung der Arteria Cystica und des Ductus Cysticus. Beide Gefäße dürfen dabei erst nach dem Setzen von jeweils mindestens zwei chirurgischen Clips durchtrennt werden. Für die Visualisierung einer Unterstützung beim Setzen der Clips wurde in Abschnitt 6.2.3 die Berechnung möglicher Clippositionen auf Basis eines Oberflächenmodells vorgestellt.

<sup>2</sup>Skalpell.



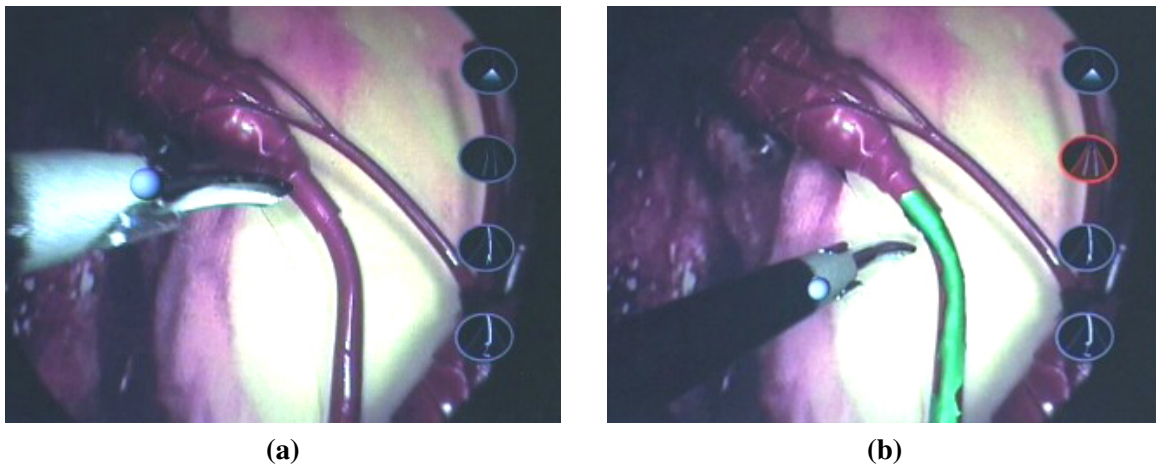
**Abb. 7.6:** Visualisierung der kontextbezogenen Assistenz beim Clippen am Patientenphantom (aus [Dre07]). a) Überlagerung des ungeclippten Ductus Cysticus (weiß). b) Einblendung der ermittelten Clippositionen. c) Visualisierung zweier simulierter Clips auf dem Ductus Cysticus. d) Visualisierung des gefahrlos durchtrennbaren Bereichs zwischen den Clips.

In Abschnitt 5.6 wurde weiterhin ein regelbasierter Ansatz präsentiert, der die situationsangepasste Festlegung von Risikobereichen ermöglicht. Dabei wird der Bereich zwischen zwei gesetzten Clips als gefahrlos durchtrennbar definiert, indem der Status als Risikostruktur aufgehoben wird. Abbildung 7.6 zeigt ein Experiment zur Darstellung der einzelnen Prozessschritte beim Clippen an einem Modell des Operationsgebiets. Die Definition des Situationsmodells erfolgte in der Simulationsumgebung. Zunächst wurde der ungeclippte Ductus Cysticus als Risikostruktur visualisiert (7.6a). Die Anwendung des Algorithmus zur Bestimmung der Clippositionen auf dem zugehörigen Oberflächenmodell ermöglichte die Bestimmung der Clippositionen, dargestellt durch die blauen Markierungen (7.6b). Mithilfe der Simulationsumgebung wurden virtuelle Clips auf dem Ductus Cysticus gesetzt und



mit den Endoskopbildern überlagert (7.6c). Nach dem Setzen der Clips wurde der gefahrlos durchtrennbare Bereich zwischen den Clips visualisiert (7.6d).

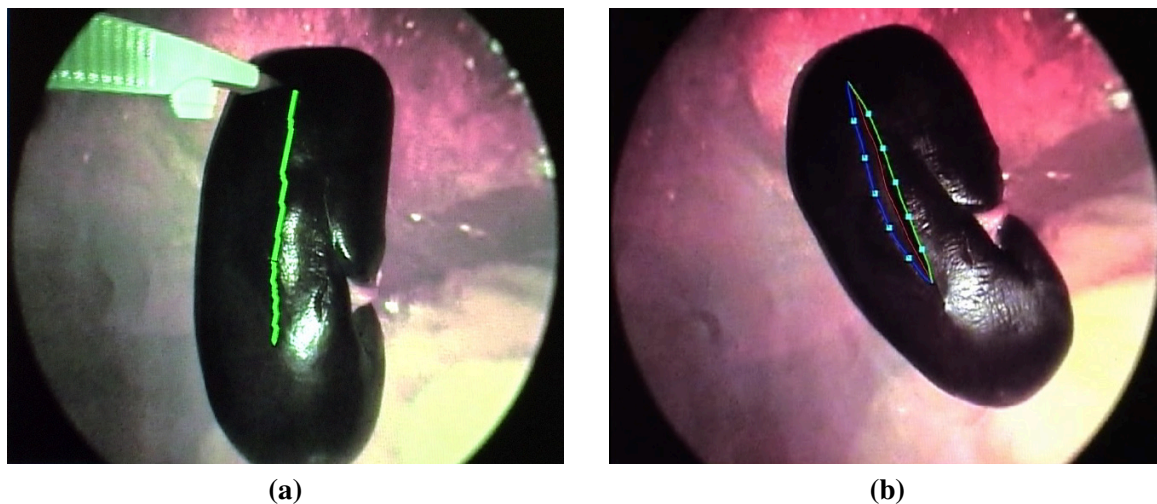
Im Rahmen des Experiments wurde zusätzlich untersucht, wie der Chirurg vor einer unbeabsichtigten Gefäßverletzung gewarnt werden kann. In Schaubild 7.7 ist eine Gefahrensituation dargestellt, bei der sich das Instrument (Schere) in die Nähe des Ductus Cysticus bewegt (7.7a). Die Einblendung beinhaltet das Oberflächenmodell dieser Struktur sowie das Symbol des verwendeten Instruments (7.7b). Als nachteilig erwies sich hierbei die flackernde Darstellung der Risikostruktur, wenn sich ein Instrument im Grenzbereich der als gefährdend eingestuften Distanz zur Risikostruktur befindet. Aus diesem Grund wurde ein Ansatz für die Visualisierung von Gefahrensituationen entwickelt, bei dem die Risikostrukturen permanent überlagert werden und der Grad der Gefährdung anhand der Einfärbung zu erkennen ist.



**Abb. 7.7:** Versuchsdurchführung mit *MediAssist*. a) Instrument nähert sich Ductus Cysticus. b) Einblendung des Oberflächenmodells des bedrohten Ductus Cysticus und eines Symbols des verursachenden Instruments.

### Kontextbezogene Unterstützung bei der Umsetzung einer Inzision

Mit dem kontextbezogenen Assistenzsystem wird das Ziel einer operationsbegleitenden Unterstützung verfolgt. In Bezug auf das exemplarische Anwendungsbeispiel beinhaltet dies neben der intraoperativen Visualisierung des Inzisionsplans die Detektion der Wundkanten, die Ermittlung der Planabweichung sowie die Erzeugung einer Nahtunterstützung (vgl. Abschnitt 6.2.2). Schwerpunkte dieses Versuchs liegen auf der Robustheit und Anwendbarkeit des Verfahrens. Die hierzu notwendige Oberflächenrekonstruktion erfolgte unter Einbeziehung eines *Minolta Vi-900*-Laserscanners (vgl. Anhang B.7). Die Auflösung der erfassten Oberflächenmodelle wurde auf 1250 Punkte reduziert, da zu erwarten ist, dass eine Oberflächenrekonstruktion auf Basis endoskopischer Bildpaare diese Auflösung erreicht bzw. sogar

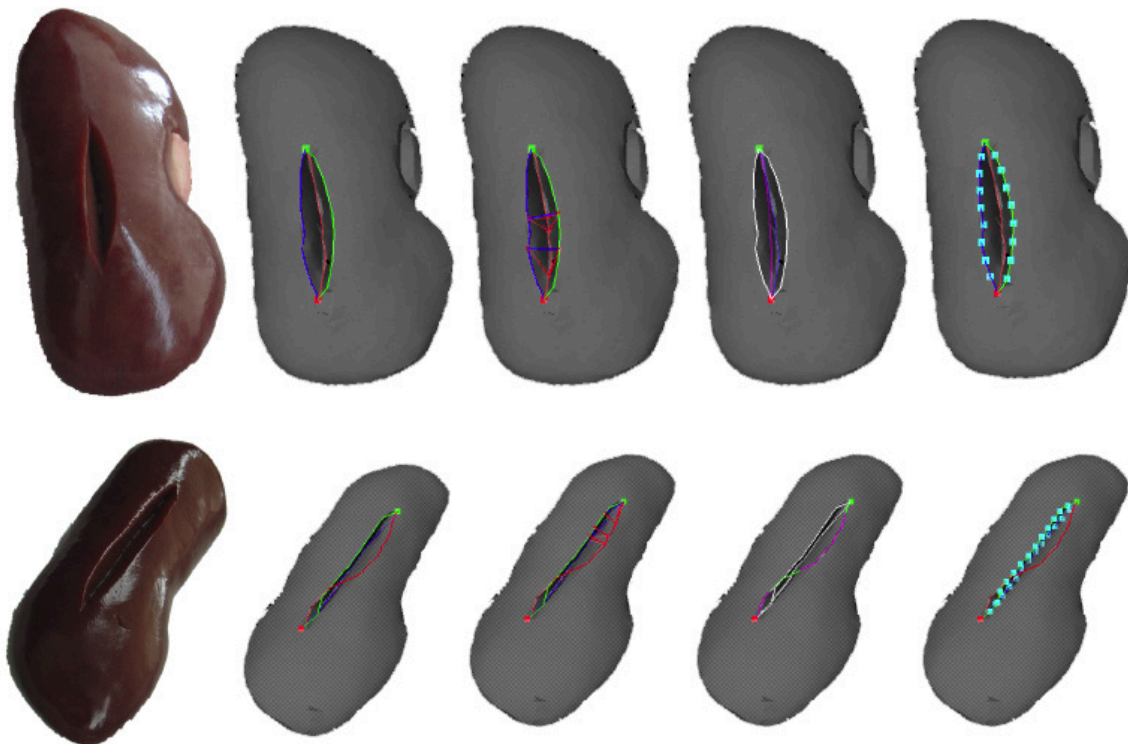


**Abb. 7.8:** Durchführung von Experimenten mit dem *MediAssist*-System (aus Sudra et al. [SSP+08], Fig. 2, © 2008, mit freundlicher Genehmigung von IOS Press). a) Visualisierung des Inzisionsplans. b) Visualisierung der Wundkanten und Nahtpunkte.

übertrifft. Anhand der Oberflächenmodelle erfolgten die Berechnung der Inzisionsbreite und Inzisionstiefe sowie die Berechnung der Abweichung von der idealen Schnittlinie. Zusätzlich wurden Nahtpunktpositionen bei einem Nahtpunktabstand von 5 mm berechnet. Abbildung 7.8 verdeutlicht die Visualisierung eines Inzisionsplans sowie der ermittelten Wundkanten mit dem *MediAssist*-System.

Im Rahmen des Versuchs wurde die Robustheit des Verfahrens bei Anwendung der empirisch ermittelten Parametrisierung untersucht (vgl. Abschnitt 6.2.2). Hierzu wurden Schnittlänge und -tiefe sowie die Position auf dem Versuchsobjekt stark variiert. Die automatische Bestimmung der Parameter zur Charakterisierung der Schnittwunde und zur Bestimmung der Nahtpositionen verlief bei 45 von 50 Versuchsobjekten erfolgreich. In Abbildung 7.9 ist jeweils eine erfolgreiche und fehlgeschlagenen Wundkantendetektion abgebildet.

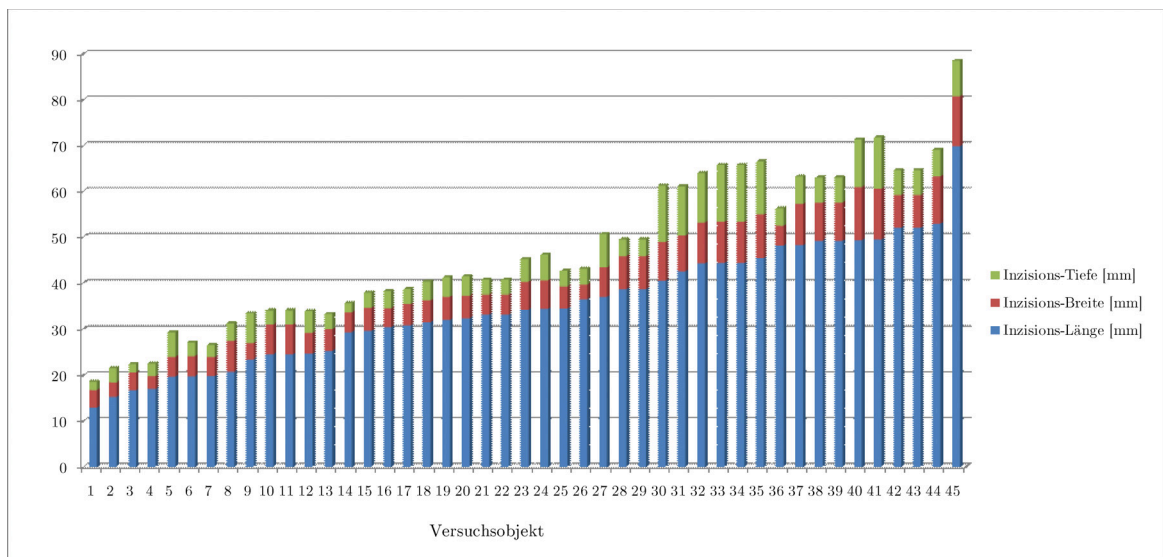
Als Ursache für die auftretenden Fehldetektionen wurde vor allem die geringe Auflösung der verwendeten Datensätze identifiziert. Dies macht sich besonders bei sehr kurzen Schnittwunden, d. h. einer Schnittwundlänge unter 15 mm, bemerkbar sowie bei Schnittwunden mit stark abgeflachten Wundkanten. Letztgenannter Effekt ist größtenteils auf eine ungünstige Reduktion der ursprünglich hochaufgelösten Scandaten zurückzuführen. Bei Verwendung der gleichen Datensätze mit einer höheren Auflösung bzw. durch eine Anpassung der Algorithmusparameter konnte eine Detektion dennoch realisiert werden. Abbildung 7.10 verdeutlicht Inzisionslänge, -breite, -tiefe bei den 45 auf Anhieb detektierten Schnittwunden. Die Anordnung der Daten im Schaubild erfolgt aufsteigend anhand der Inzisionslänge. Die Schnittwunde mit der größten Inzisionslänge beträgt 69,9 mm, die mit der kürzesten 12,9 mm.



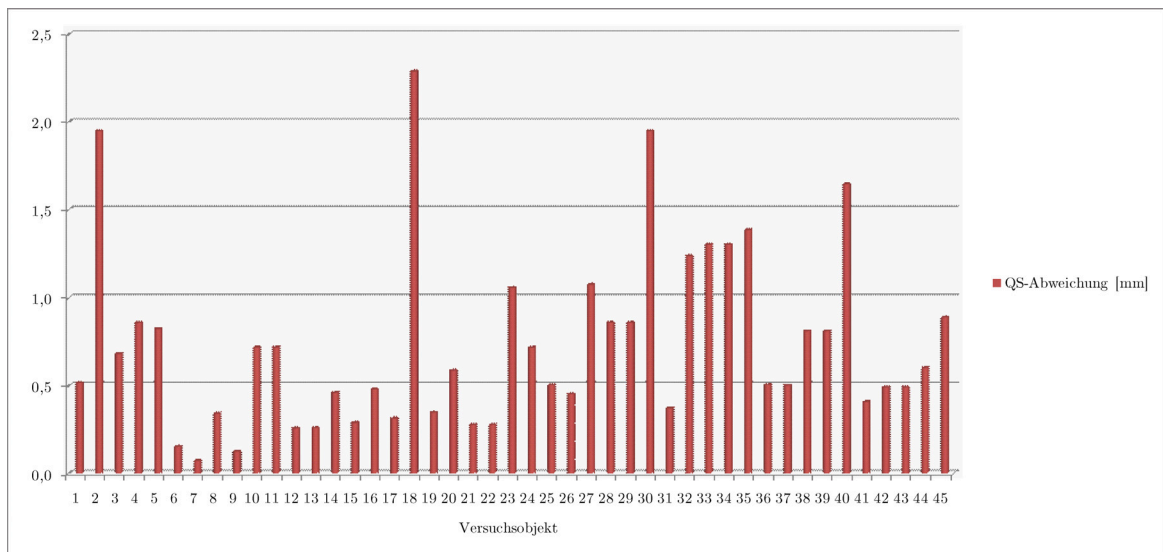
**Abb. 7.9:** Erfolgreiche (1. Reihe) und fehlgeschlagene (2. Reihe) Wundkantendetektion (aus [Pla07]). Von links nach rechts: Versuchsobjekt, Ergebnisse der Wundkantendetektion, Wundkantenanalyse, Abweichungsanalyse und Nahtpunktprojektion.

Die durchschnittliche Inzisionsbreite variiert zwischen 2,8 mm und 11,6 mm, die Inzisionstiefe zwischen 1,8 mm und 12,5 mm. Je nach Schnittwunde wurden 2 bis 13 Nahtpunkte berechnet. Die aufgeführten Spektren demonstrieren die Anwendbarkeit des Verfahrens auf variierende Schnittwunden. Die zugehörige Abweichung von der geradlinigen Schnittplanung (QS-Abweichung) beträgt 0,1 mm bis 2,3 mm und ist in Schaubild 7.11 dargestellt.

Die empirisch ermittelten Parameter ermöglichen eine Anwendung des Verfahrens bei geradlinigen Schnittwunden. Die Anwendbarkeit des Algorithmus zur Erkennung von Schnittwunden mit starken Formvariationen kann durch eine Anpassung der entsprechenden Parameter sichergestellt werden. Um dies zu belegen, wurde die Detektion gekrümmter, sichelförmiger, besonders weit aufklaffender sowie unsymmetrisch aufklaffender Schnittwunden untersucht. Schaubild 7.12 auf Seite 141 zeigt für jeden der genannten Schnittwundtypen ein exemplarisches Oberflächenmodell und die detektierten Schnittkanten. Ein weiterer im Rahmen des Schlüsselexperiments untersuchter Aspekt ist die Anwendbarkeit des Verfahrens bei einer unpräzisen Schnittausführung. Aufgrund der Vielfalt möglicher Abweichungen beschränkt sich die Untersuchung auf eine versetzte, verdrehte, verkürzte und verlängerte Schnittausführung bezüglich der Schnittplanung. Beim Versatz wurde der



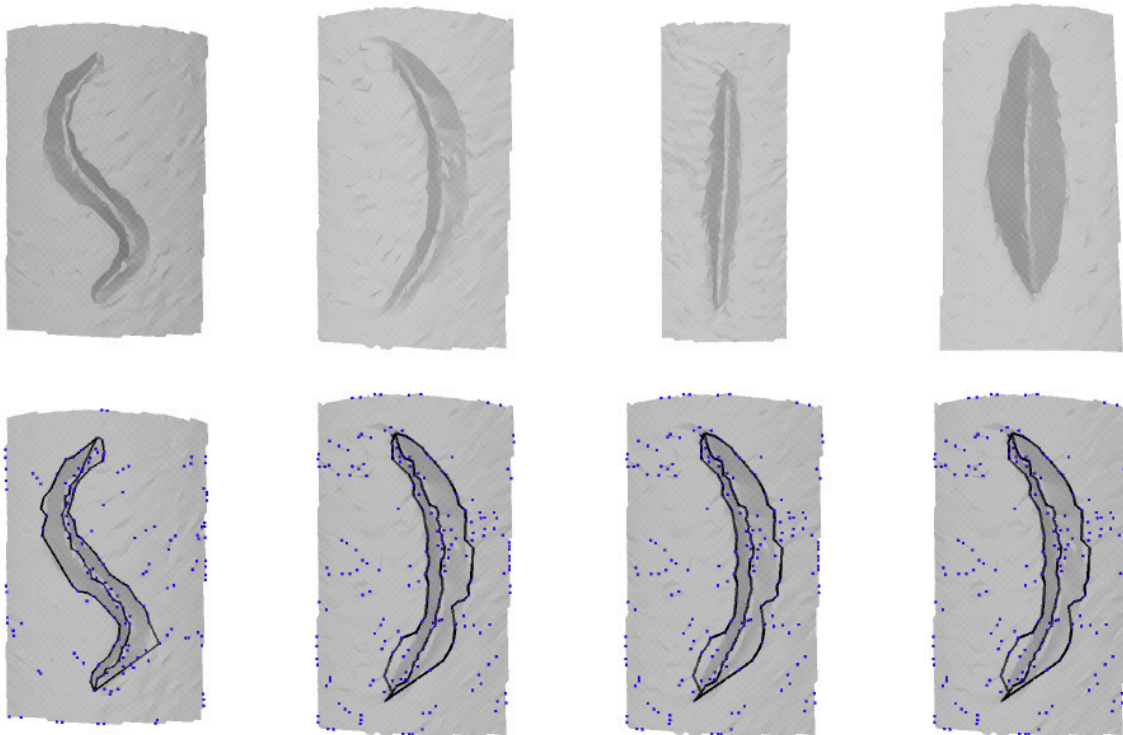
**Abb. 7.10:** Daten (Inzisionslänge, -breite, -tiefe) der 45 automatisch detektierten Schnittwunden. 5 Schnittwunden wurden nicht automatisch detektiert.



**Abb. 7.11:** QS-Abweichung der 45 automatisch detektierten Schnittwunden.

Schnitt um 5 mm nach links bzw. rechts verschoben. Bei der Verdrehung wiesen der Start- und Endpunkt der Schnittausführung eine Abweichung von 5 mm nach links bzw. rechts in entgegengesetzter Richtung auf. Bei der Verkürzung bzw. Verlängerung wurde der Schnitt mit einem um 5 mm nach innen bzw. nach außen verschobenen Start- und Endpunkt ausgeführt. Die Ausgangsbasis für die Detektion einer Schnittwunde bilden der Start- und der Endpunkt des Inzisionsplans. Unter der Annahme, dass die anatomische Struktur korrekt registriert ist, führt die unpräzise Umsetzung der Schnittplanung zu einer ungünstigen Initialisierung des Detektionsalgorithmus und hat zur Folge, dass die Wundkanten in der Nähe des Start- und

Endpunkts nur unzureichend detektiert werden. Im Falle einer versetzten oder verdrehten Schnittausführung liefert die Qualitätsanalyse aufgrund der hohen Schnittabweichung einen Hinweis auf die ungenaue Ausführung. Aufgrund der Übereinstimmung der Schnittausführung mit der geplanten Schnittebene liefert die Qualitätsanalyse im Falle einer verkürzten oder verlängerten Schnittausführung keinen Hinweis auf die unpräzise Ausführung.



**Abb. 7.12:** Oberflächenmodelle verschiedener Schnittwunden (oben) und detektierte Schnittwunden (unten) (aus [Pla07]).

### Erkenntnis

Die durchgeführten Versuche verdeutlichen die Anwendbarkeit des entwickelten Konzepts zur Erzeugung einer kontextbezogenen Visualisierung. Die Vorteile liegen hierbei in den flexiblen Gestaltungsmöglichkeiten der Visualisierung sowie in der einfachen Handhabung des Systems. Folgende Erkenntnisse wurden erzielt:

- Der erste Versuch, die kontextbezogene Unterstützung beim Setzen von Gefäßclips, verdeutlicht die Anpassung der Darstellung an den jeweiligen Situationskontext. Der Nutzen der Erweiterten Realität zur intraoperativen Unterstützung des Chirurgen wurde in zahlreichen Forschungsarbeiten bereits nachgewiesen. Vor diesem Hintergrund liefert das flexible Visualisierungskonzept des kontextbezogenen Assistenzsystems einen wertvollen Beitrag zur

Verbesserung des Status quo. Es wurden unterschiedliche Möglichkeiten zur Gestaltung der Visualisierung kombiniert, beispielsweise durch die Einfärbung von Oberflächenmodellen oder durch symbolische Darstellungen.

- Anhand des zweiten Versuchs, der kontextbezogenen Unterstützung bei der Umsetzung einer Inzision, wurde die Robustheit eines solchen Verfahrens exemplarisch untersucht. Dabei konnte durch die Verwendung einer Standardparametrisierung ein breites Spektrum geradliniger Schnittwunden detektiert werden. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Detektion nichtgeradliniger Schnittwunden durch eine Anpassung der verwendeten Parameter möglich ist. Abweichungen bei der Schnittausführung sowie eine versetzte oder verdrehte Schnittausführung konnten durch die Qualitätsanalyse teilweise erkannt werden.

### 7.2.3 Schlüsselexperiment zur Mensch-Maschine-Interaktion

In Abschnitt 6.3 wurde der Interaktionsbedarf für ein kontextbezogenes Assistenzsystem analysiert und ein Konzept zur Bereitstellung von Interaktionstechniken durch Interaktionskomponenten vorgestellt. Dieses Konzept ermöglicht die Entwicklung von Interaktionskomponenten nach dem Baukastenprinzip, indem die zur Verfügung stehenden Eingabegeräte, Eingabetechniken und Interaktionselemente geeignet miteinander kombiniert werden. Die Anstrengungen im Bereich der Interaktion fokussierten sich auf die Erstellung dieses flexiblen Gesamtkonzepts. Im Vordergrund stand somit nicht die Entwicklung von dedizierten Interaktionskomponenten. Dementsprechend wird auf eine Evaluation solcher Komponenten verzichtet und stattdessen das Potenzial des Interaktionskonzepts anhand von zwei exemplarisch ausgewählten Interaktionsszenarios verdeutlicht (vgl. [Web08]):

- Interaktionsszenario 1: Menüsteuerung durch Neigen und Drehen des Brillensystems.
- Interaktionsszenario 2: Exploration von Planungsdaten mittels des Interaktionstabletts.

#### Versuchsordnung der Menüsteuerung durch Neigen und Drehen des Brillensystems

Für das erste Szenario wurde eine Interaktionskomponente realisiert, die die Ein- und Ausblendung von Oberflächenmodellen durch Neigen und Drehen des Brillensystems ermöglicht. Hierzu wurden Oberflächenmodelle der drei Segmente Fundus (*Fundus*), Body (*Body*) und Infundibulum (*INF*) des Gallenblasenmodells sowie des Ductus Cysticus (*CD*) und der Arteria Cystica (*CA*) erstellt. Die Farbgebung

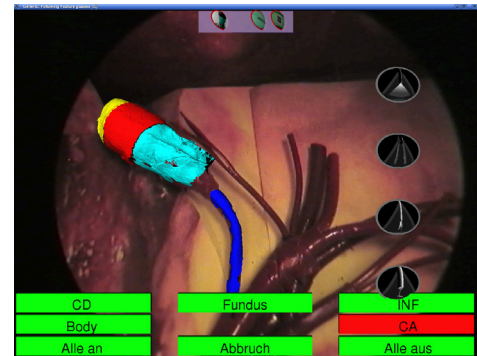
der Oberflächenmodelle wurde lediglich zur besseren Unterscheidung der einzelnen Segmente gewählt. Informationen über ausgewählte Oberflächenmodelle werden durch ein Menü bereitgestellt. Die Funktion und der Status eines Menüeintrags erschliessen sich dem Anwender durch dessen Bezeichner und dessen farbliche Kodierung:

- Grün: Der Menüeintrag ist selektiert. Das korrespondierende Oberflächenmodell wird angezeigt.
- Rot: Der Menüeintrag ist nicht selektiert. Das korrespondierende Oberflächenmodell wird nicht angezeigt.
- Gelb: Der Menüeintrag ist ausgewählt. Wird die Auswahl bestätigt, so wechselt der Zustand von selektiert zu nicht selektiert bzw. umgekehrt.

Die Auswahl eines Menüeintrags erfolgt, indem der Chirurg seinen Kopf mitsamt dem Brillensystems hebt, senkt oder zur Seite dreht (vgl. Abschnitt 6.11). Insgesamt werden neun Blickrichtungen des Brillensystems unterschieden, die sich durch eine Kombination der vertikalen Richtung (unten, mitte, oben) und der horizontalen Richtung (links, mitte, rechts) ergeben. Als Schwellwert wird ein Winkel von 30 Grad bezüglich der Referenzachse der üblichen Operationshaltung definiert. Für die Auswahl eines Menüeintrags muss der Chirurg das Brillensystem entsprechend ausrichten. Eine erfolgreiche Auswahl wird dem Chirurgen durch eine gelbliche Hintergrundfarbe des entsprechenden Menüeintrags signalisiert. Der Chirurg bestätigt die Auswahl, indem er für eine festgelegte Zeitspanne in diesem Sektor verweilt (eine Sekunde). Verweilt er länger als zwei Sekunden, so wird die Auswahl aufgehoben. Dies ermöglicht ihm, eine versehentliche Auswahl unmittelbar rückgängig zu machen. Abbildung 7.13 zeigt den Ablauf einer Interaktion zur Einblendung und Ausblendung der Oberflächenmodelle in der Experimentierumgebung. Zu Beginn (7.13b) sind alle Menüeinträge bis auf den Eintrag der Arteria Cystica (AC) selektiert und damit einheitlich grün eingefärbt. Die Oberflächenmodelle dieser selektierten anatomischen Strukturen werden mit den endoskopischen Bilddaten überlagert. Der Anwender blickt auf den mittleren Sektor (7.13a). Eine etwaig vorhandene Abweichung bezüglich der Referenzachse liegt unterhalb des festgelegten Schwellenwertes. Der Anwender dreht den Kopf zur linken Seite (7.13c) und wählt damit den Menüeintrag für das Oberflächenmodell des Ductus Cysticus (CD) aus (7.13d). Durch Verweilen in dieser Position für eine Sekunde (7.13e) wird der Menüeintrag selektiert (7.13f). Durch einen Wechsel der Blickrichtung in den mittleren Sektor (7.13g) wird die Auswahl bestätigt und damit das zugehörige Oberflächenmodell ausgeblendet (7.13h). Die analoge Vorgehensweise wird für das Einblenden der Oberflächenmodelle angewandt.



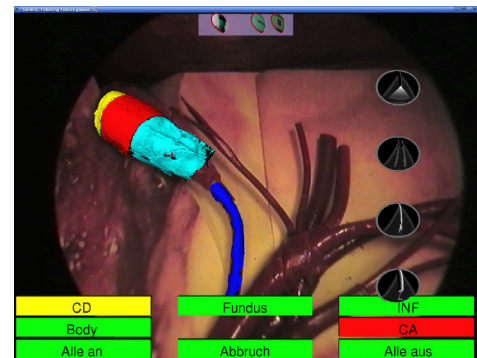
(a)



(b)



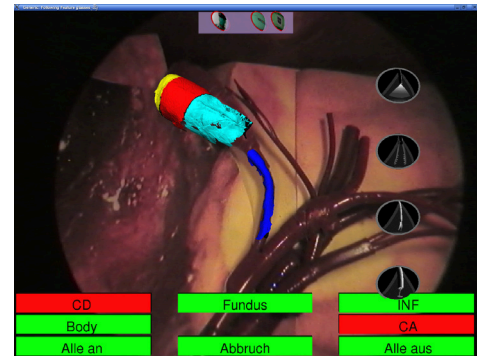
(c)



(d)



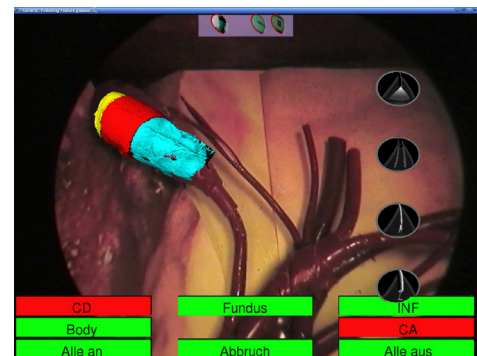
(e)



(f)



(g)



(h)

**Abb. 7.13:** Links: Aus- und Einblenden von Oberflächenmodellen durch Drehen und Neigen des Brillensystems. Rechts: Einblendung aus Sicht des Anwenders. Menüeinträge sind ausgewählt (gelb), selektiert (grün), nicht ausgewählt (rot).



### **Versuchsordnung der Exploration von Planungsdaten mittels ER-Interaktionstablett**

Das zweite Interaktionsszenario dient der Exploration von Planungsdaten mittels des in Abschnitt 6.3 vorgestellten ER-Interaktionstabletts. Aufgrund der vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten der Interaktion eignet sich dieses besonders für die Lösung komplexer Interaktionsaufgaben. Für das Schlüsselexperiment werden zwei Funktionalitäten bereitgestellt:

- **Objektskalierung mittels Zeigegerät**

Die Skalierungsfunktion ermöglicht eine Vergrößerung der Planungsdaten und erlaubt somit die intraoperative Analyse von Details (Abbildung 7.14). Für eine Veränderung der Objektskalierung interagiert der Anwender wie folgt mit dem System: Ausgehend von einem Anfangszustand muss zunächst die Skalierungsfunktion durch Auswahl und Bestätigung des zugehörigen Menüeintrags auf dem Interaktionstablett aufgerufen werden. Daraufhin kann ein kontinuierlicher Wertgeber für die Skalierung der Planungsdaten ausgewählt und bestätigt werden. Eine Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Planungsdaten wird durch die Verschiebung des Wertgebers nach rechts respektive links realisiert. Analog zur Interaktion mit dem Brillensystem werden Auswahl und Bestätigung durch eine farbliche Hinterlegung des jeweiligen Menüeintrags hervorgehoben. Die Auswahl erfolgt durch Andeuten des Menüeintrags mit einem Zeigegerät, die Bestätigung durch Betätigung des Druckschalters.

- **Veränderung der Objekttransparenz mittels Zeigegerät**

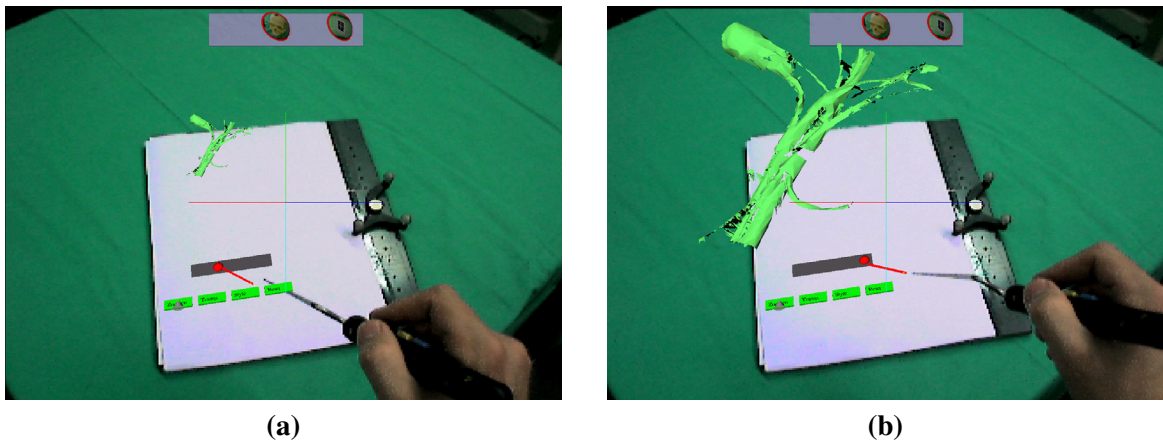
Die interaktive Veränderung der Objekttransparenz ist für die Darstellung innerer Strukturen hilfreich, beispielsweise wenn ein Oberflächenmodell durch ein weiteres vollständig umschlossen ist. Bei der Wahl der geeigneten Objekttransparenz trifft der Chirurg einen Kompromiss zwischen der Sichtbarkeit der Planungsdaten und den dahinterliegenden anatomischen und pathologischen Strukturen. Der Ablauf der Interaktion zur Veränderung der Objekttransparenz gestaltet sich wie folgt: Im Anfangszustand ist kein Menüeintrag selektiert, sodass der Chirurg die Transparenzfunktion durch Auswahl und Bestätigung des zugehörigen Menüeintrags auf dem Interaktionstablett aktivieren muss. Daraufhin kann analog zur Vorgehensweise bei der Objektskalierung ein kontinuierlicher Wertgeber ausgewählt und bestätigt werden. Eine Erhöhung bzw. Verringerung der Transparenz wird durch die Verschiebung des Wertgebers nach rechts bzw. links realisiert (vgl. Abbildung 7.14).

## Erkenntnis

Mittels der Erweiterten Realität bietet sich die Möglichkeit zur Nutzung neuartiger Interaktionstechniken im Operationssaal. In Bezug auf die beiden Interaktionskomponenten ergeben sich folgende Vorteile:

- Die Interaktion über das Brillensystem ermöglicht dem Chirurgen, die Anpassung der Einblendung ohne zusätzliche Geräte in den Operationssaal einzubringen. Der Chirurg ist dabei nicht auf die Hilfe einer weiteren Person, die das Gerät bedient, angewiesen.
- Komplexere Interaktionsaufgaben wurden mittels des Interaktionstabletts exemplarisch gelöst. Diese erfordern jedoch eine Unterbrechung der Operation, was nach Möglichkeit vermieden werden soll. Das Interaktionstablett ermöglicht fernerhin die Betrachtung virtueller Objektmodelle aus verschiedenen Raumrichtungen.

Die beiden Experimente zeigen, dass die Einbeziehung der Erweiterten Realität zur Lösung bestehender Interaktionsaufgaben ein hohes Verbesserungspotenzial für die Interaktion im Operationssaal bietet.



**Abb. 7.14:** Vergrößerung eines Oberflächenmodells durch Ziehen eines Schiebereglers von links (a) nach rechts (b).

## 7.3 Evaluation beim Setzen von Dentalimplantaten

Der wissensbasierte Ansatz einer kontextbezogenen Assistenz ist nicht auf Anwendungen in der minimalinvasiven Chirurgie beschränkt. Dies demonstriert die nachfolgende Evaluation an einem exemplarischen Eingriff aus der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. Für die Durchführung von Versuchen wurde das institutseigene

Assistenzsystem *Inpres* um Komponenten zur Modellbildung, Situationsinterpretation und Visualisierung erweitert [SKB+09, KSS+10]. Schwerpunkt der nachfolgenden Betrachtung bildet die Evaluation des dadurch entstandenen kontextbezogenen Assistenzsystems durch quantitative und qualitative Messgrößen.

### 7.3.1 Implantologie in der Zahnheilkunde

Bei dem exemplarisch gewählten Eingriff handelt es sich um das Setzen von Dentalimplantaten. Der folgende Abschnitt erörtert den medizinischen Hintergrund. Für weiter gehende Informationen sei auf die einschlägige Literatur verwiesen [Hei80, Kue98, SE02, Bor07].

Zielsetzung der Implantologie in der Zahnheilkunde ist der Ersatz fehlender Zähne im Ober- bzw. Unterkiefer durch Einfügen eines Implantats als Träger für einen künstlichen Zahnersatz. Neben kosmetischen können auch medizinische Gründe das Einsetzen eines Dentalimplantats befürworten. Beispielsweise wenn eine ungleichmäßige Verteilung des Kaudrucks vorliegt und infolgedessen mit weiteren Zahnschädigungen oder einer Schädigung des Kiefergelenks zu rechnen ist. In der Literatur existieren zahlreiche Techniken und Vorgehensweisen für das Setzen eines Dentalimplantats. Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich die Betrachtung auf das Setzen enossaler Implantate. Hierbei handelt es sich um eine Behandlungsmaßnahme, bei der das Implantat, z. B. über ein Schraubgewinde, in den Knochen eingebracht wird und innerhalb eines drei- bis sechsmonatigen Zeitraums einen Verbund mit dem umgebenden Knochengewebe eingeht<sup>3</sup>. Der folgende Abschnitt erläutert die Planung und Umsetzung des Eingriffs.

In der Planungsphase werden geeignete Implantatpositionen ausgewählt. Neben ästhetischen und funktionellen Kriterien ist hierbei die Beschaffenheit des Kieferknochens von Bedeutung, unter Umständen sind knochenvermehrnde Maßnahmen oder ein Knochentransplantat erforderlich. Zu Beginn der Operation wird zunächst der Knochen durch Einscheiden des Zahnfleisches an den geplanten Implantatpositionen freigelegt. In Abhängigkeit des verwendeten Implantatsystems werden nun mehrere Bohrungen im Kieferknochen durchgeführt. Der Prozess beginnt mit dem sogenannten Ankörnen des Knochens gefolgt von der Pilotbohrung. Danach werden sukzessiv Bohrer mit größer werdenden Durchmessern verwendet. Zuletzt wird das Implantat eingesetzt, wobei diverse Implantatarten unterschieden werden. Ein exemplarischer Operationsablauf ist in Anhang A.2 abgebildet.

Die Umsetzung der Bohrungen erfordert eine hohe Präzision, um eine unbeabsichtigte Verletzung wichtiger Strukturen, wie Nerven und Gefäße, zu vermeiden. So befindet sich im Unterkiefer der Alveolarnerv, dessen Verletzung zu Schmerzen und einem Taubheitsgefühl der Zähne und der Unterlippe führen kann. Durch eine exakte Planungsumsetzung soll des Weiteren die Stabilität des Implantats durch eine

---

<sup>3</sup>Osseointegration.

optimale Platzierung im Kieferknochen sichergestellt werden. Dies verringert die Gefahr eines Implantatausbruchs bei hohen Belastungen des zugehörigen Zahnersatzes. Zur Vermeidung der aufgezählten Risiken und Komplikationen bietet sich eine Unterstützung des Chirurgen an.

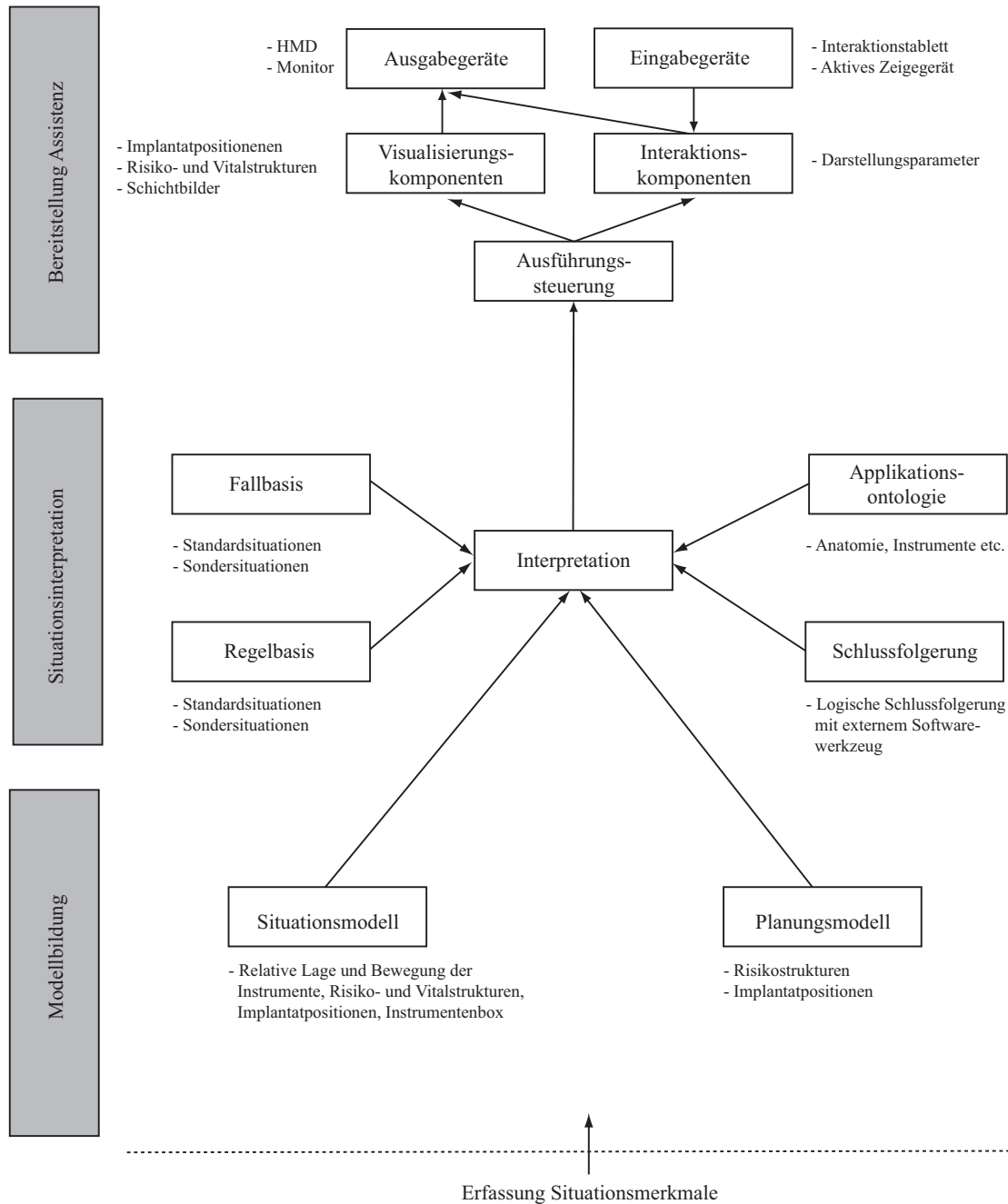
### 7.3.2 Erweiterungen von *Inpres*

In den vorangegangenen Kapiteln wurden das Konzept und die Methoden des wissensbasierten Lösungsansatzes erörtert. Als Beispiel diente die Assistenz bei minimalinvasiv durchgeführten Cholezystektomien. Die Anwendung des Lösungsansatzes für den Eingriff in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie erfordert die Entwicklung einer spezifischen Applikationsontologie, die Spezifikation des Situationsmodells anhand der verwendeten Sensoren, die Definition der Planungsaspekte, die Auswahl von Verfahren zur Situationsinterpretation sowie die Entwicklung von Visualisierungs- und Interaktionskomponenten. Abbildung 7.15 verdeutlicht das Konzept für die Assistenz bei Dentalimplantaten. Die einzelnen Aspekte werden nachfolgend erläutert. Die experimentelle Testumgebung des erweiterten *Inpres*-Systems wurde in Abschnitt 3.4.2 erläutert. Weiterführende Details zu Umsetzung, Implementierung und Evaluation sind in [SKB+09, Kat09] dokumentiert.

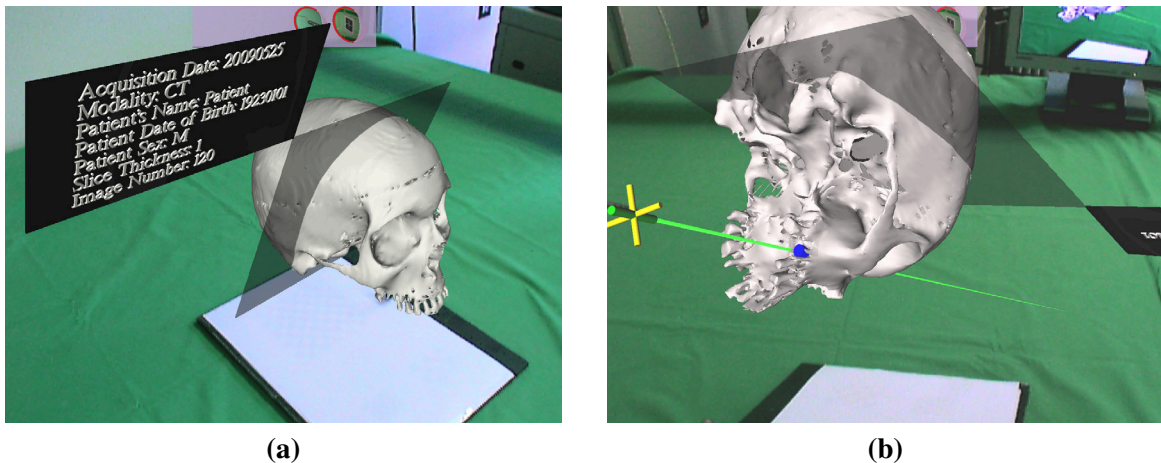
#### Modellbildung

Die Modellbildung des kontextbezogenen Assistenzsystems umfasst die präoperativ durchgeführte Erstellung des Planungsmodells sowie die intraoperative Erzeugung des geometrischen Situationsmodells. In den folgenden Abschnitten werden diese beiden Aspekte näher erörtert.

**Erstellung des Planungsmodells.** Die Ausgangsbasis für die Erstellung des Planungsmodells bilden die Daten einer präoperativ durchgeführten Computertomografie. In den Schichtbildern werden der Kieferknochen sowie Risikostrukturen segmentiert. Für die Positionierung der Implantate wurde ein Softwarewerkzeug entwickelt und implementiert. Dieses ermöglicht die Definition von Implantatpositionen durch die manuelle Positionierung eines Bohrzylinders im Oberflächenmodell des jeweiligen Kieferknochens. Hierzu wird das Oberflächenmodell des Kiefers auf dem in Abschnitt 6.11 erläuterten Interaktionstablett dargestellt. Mittels des aktiven Zeigegegeräts werden die Implantatpositionen festgelegt. Die Visualisierung erfolgt über die Durchsichtbrille. Aufgrund der Verwendung des Interaktionstabletts ist eine Betrachtung der Patientendaten aus allen Perspektiven möglich, das Brillensystem stellt zudem die dreidimensionale Darstellung der Szene sicher. Zusätzlich zu den Oberflächenmodellen des Kieferknochens und der Risikostrukturen können die präoperativ erfassten Schichtbilder visualisiert werden. Abbildung 7.16 verdeutlicht die Anwendung des Planungswerkzeugs.



**Abb. 7.15:** Konzept der kontextbezogenen Assistenz für das Setzen von Dentalimplantaten (vgl. Sudra et al. [SKB+09], © 2009 Gesellschaft für Informatik).



**Abb. 7.16:** Planung einer Implantatposition mit dem Planungswerkzeug. a) Darstellung des Oberflächenmodells des Kieferknochens sowie ausgewählter Schichtbilder auf dem Interaktionstablett. b) Definition einer Implantatposition durch Bedienung des Zeigegeräts.

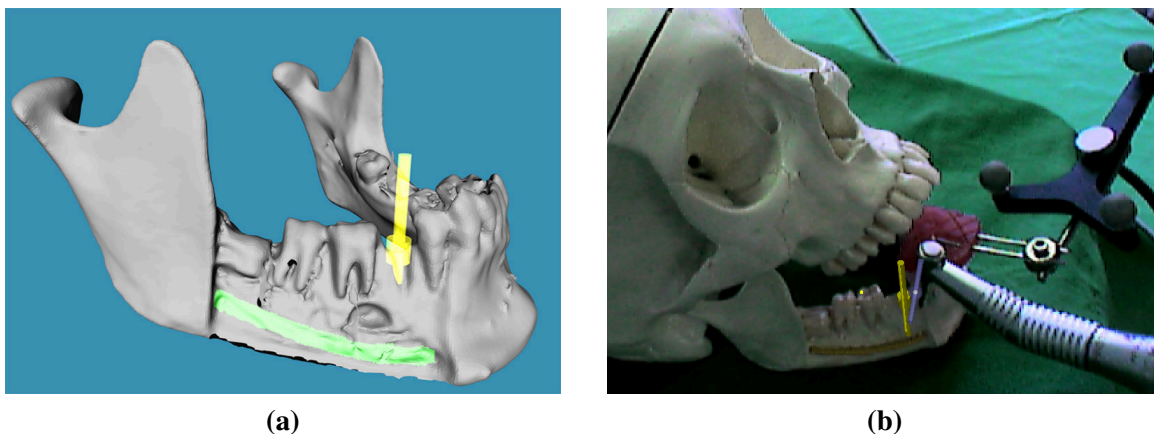
**Erstellung des Situationsmodells.** Das Situationsmodell beschreibt die relative Lage und Bewegung des chirurgischen Instruments bezüglich der Risikostrukturen, der geplanten Implantatpositionen und der Bohrer<sup>4</sup>. Jedes der aufgezählten Objekte wird durch eine Instanz in der *Assertionalen Box* repräsentiert. Zur Beschreibung der relativen Lage stehen die Daten des optischen Positionsverfolgungssystems zur Verfügung, anhand dessen die Pose der aufgezählten Objekte erfasst wird. Die Verarbeitung der Sensordaten erfolgt durch ein Schichtmodell. In der ersten Schicht werden quantitative Kenngrößen zur Beschreibung der Lage und der Bewegung ermittelt. Dies ermöglicht es beispielsweise, die Distanz zweier Objekte zu bestimmen, und liefert Hinweise auf eine bevorstehende Kollision dieser Objekte. In der zweiten Schicht werden die ermittelten Kenngrößen mittels unscharfer Mengen auf Rollen der Applikationsontologie abgebildet. Rollenhalter und Rollenfüller sind die bezugnehmenden und bezogenen Instanzen der eingangs aufgezählten Objekte.

### Situationsinterpretation

Das vorrangige Ziel der Situationsinterpretation in dem beschriebenen Szenario ist die Erkennung von Standard- und Gefahrensituationen. In einer Standardsituation setzt der Chirurg eine Implantatplanung um, in einer Gefahrensituation nähert er sich mit dem Bohrer einer Risikostruktur. Des Weiteren soll ein Wechsel des Bohrers durch Anfahren der entsprechenden Position in der Kunststoffkassette erkannt werden. Für die Situationsinterpretation wurden ein regelbasiertes Verfahren (vgl. Abschnitt 5.6) sowie ein Verfahren auf Basis eines Fallermittlungsnetzes (vgl. Ab-

<sup>4</sup>Diese befinden sich in einer Kunststoffkassette des verwendeten Dentalimplantatsystems.

schnitt 5.4) ausgewählt, um die chirurgische Vorgehensweise bei der Situationsinterpretation nachzuziehen. Der regelbasierte Ansatz erfordert die explizite Definition jeder zu erkennenden Situation. Aus diesem Grund eignet er sich besonders für die Beschreibung von Situationen, deren Situationsmerkmale im Voraus vollständig bekannt sind. Die Eignung des regelbasierten Ansatzes hängt somit vor allem von den Fähigkeiten des Entwicklerteams ab, die Situationen korrekt und vollständig zu beschreiben. Beim fallbasierten Ansatz müssen dem System klassifizierte Beispielsituationen zur Verfügung gestellt werden. Entscheidend für die Eignung des fallbasierten Ansatzes sind die Auswahl der Beispielsituationen sowie das verwendete Ähnlichkeitsmaß. Scheitert eine Interpretation durch den regelbasierten Ansatz, besteht immer noch die Möglichkeit, dass ein ausreichend ähnliches Fallbeispiel in der Fallbasis gefunden wird. Gelangen beide Verfahren zum gleichen Ergebnis, erhöht sich dessen Konfidenz.

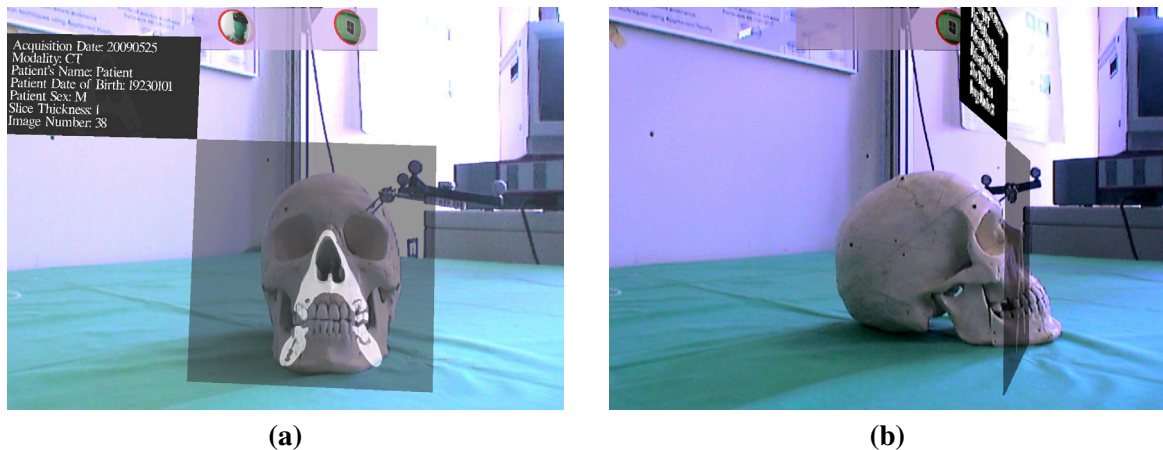


**Abb. 7.17:** Visualisierung einer Implantatposition (aus Sudra et al. [SKB+09], © 2009 Gesellschaft für Informatik). a) Geplante Implantatposition (gelb) und Risikostruktur Alveolarnerv (grün). b) Visualisierung der Implantatposition (gelb) und der Bohrachse (blau).

### Bereitstellung der Assistenz

Bei einer Standardsituation, d. h. der Umsetzung einer Implantatplanung, werden die Implantatposition und deren Mittelachse eingeblendet. Abbildung 7.17a verdeutlicht hierzu eine exemplarische Implantatplanung an einem Patientenphantom, bei der zusätzlich die Risikostruktur Alveolarnerv dargestellt ist. Zur Feststellung einer etwaig vorhandenen Abweichung wird weiterhin die Bohrachse des verwendeten Bohrers visualisiert (vgl. Abbildung 7.17b). In Gefahrensituationen wird das Oberflächenmodell der gefährdeten Struktur eingeblendet. Die farbliche Darstellung variiert hierbei in Abhängigkeit der Bedrohung durch das Instrument. Einflussfaktoren hierfür sind die Distanz und die Annäherungsgeschwindigkeit des In-

strumente bezüglich der gefährdeten Struktur. Zusätzlich wird die Möglichkeit einer Einblendung der präoperativ erfassten Schichtbilder zur Verfügung gestellt. Der Chirurg bedient hierzu das aktive Zeigegerät, um zwischen den einzelnen Schichtbildern vor- bzw. zurückzuschalten (vgl. Abbildung 7.18).



**Abb. 7.18:** Einblendung eines präoperativ erfassten Schichtbilds. a) Frontalansicht. b) Seitenansicht.

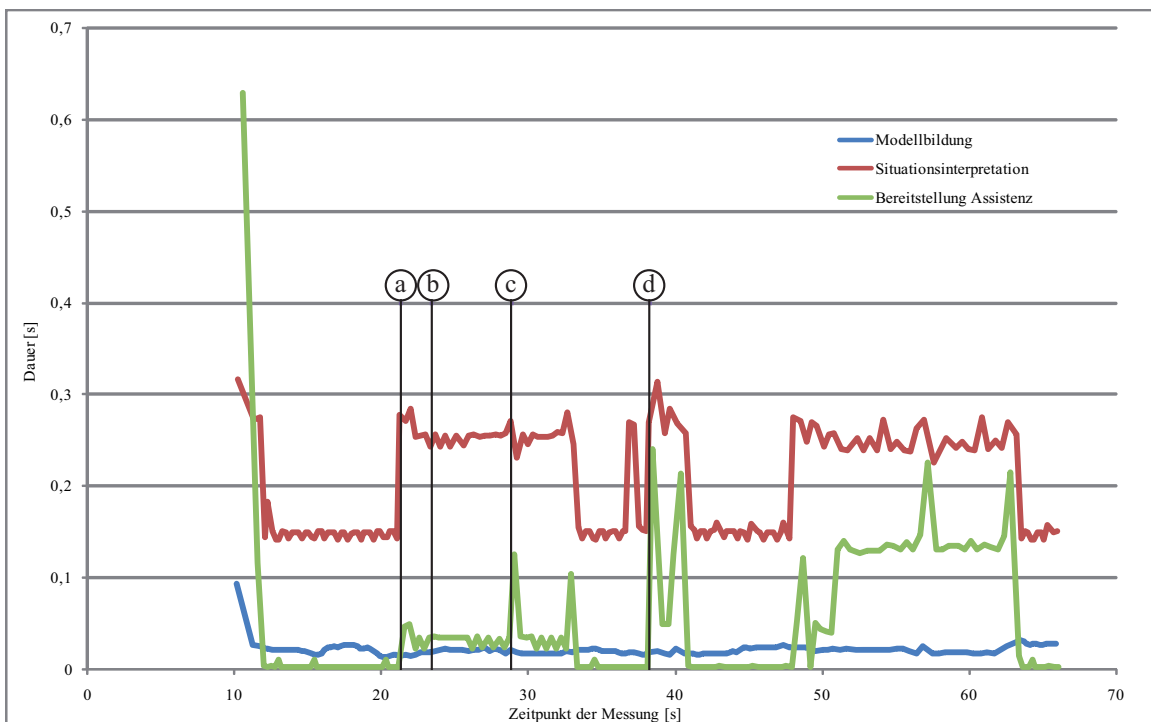
### 7.3.3 Evaluation der Latenz

Eine wichtige Kenngröße für die Bewertung des kontextbezogenen Assistenzsystems ist dessen Latenz. Hierunter wird die Zeitdauer verstanden, die zwischen dem Eintritt eines Ereignisses und der Reaktion des Systems vergeht. Im vorliegenden Anwendungsfall also die Zeitdauer zwischen dem Eintreten einer Operationssituation und der Erzeugung einer situationsangepassten Visualisierung.

Zur Ermittlung der Latenz wird das Laufzeitverhalten der einzelnen Systemkomponenten zur Modellbildung, Interpretation und Visualisierung näher untersucht. Die Modellbildung beinhaltet die Erstellung des Situationsmodells durch die Erfassung und Verarbeitung der Sensordaten. Die Komponente zur Situationsinterpretation verwendet den regelbasierten und den fallbasierten Ansatz zur Analyse des aktuell vorliegenden Situationsmodells und fusioniert die Interpretationsergebnisse. Die Bereitstellung der Assistenz erfolgt durch Erzeugung einer Visualisierung anhand der aktuell gültigen Parameter. Für die Durchführung von Experimenten wurden drei Evaluationsszenarien an einem Patientenphantom definiert:

- Szenario 1: Ein Implantat für einen einzelnen Zahnersatz.
- Szenario 2: Zwei Implantate zur Überbrückung einer Zahnücke.
- Szenario 3: Vier Implantate für eine Stegkonstruktion.

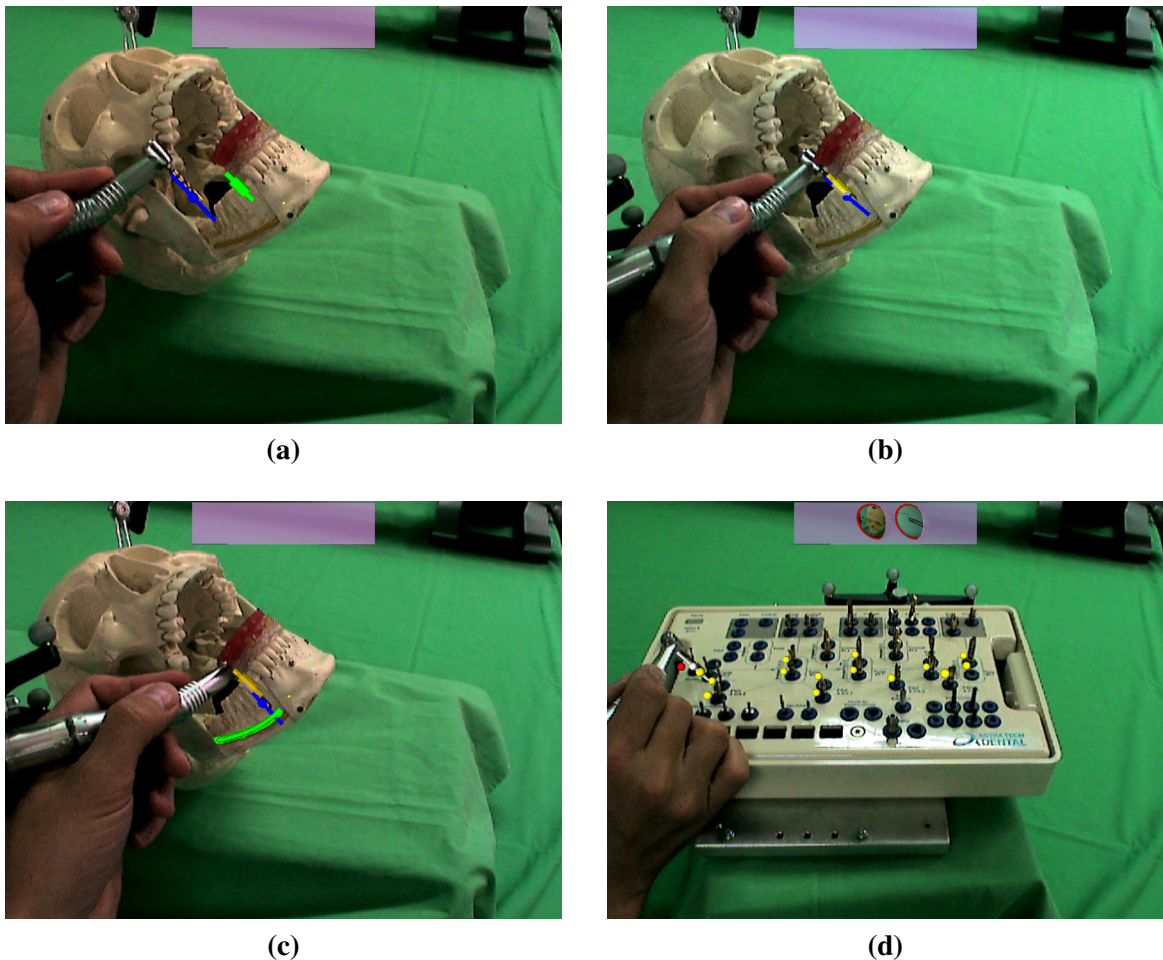




**Abb. 7.19:** Gemessene Laufzeit der Modellbildung, Situationsinterpretation und Bereitstellung einer Assistenz (Szenario 1). a) Erkennung einer Annäherung an Implantatposition. b) Erkennung eines Bohrvorgangs an Implantatposition. c) Erkennung einer Gefahrensituation. d) Wechsel des Bohrers.

Zusätzlich wurde der Alveolarnerv in allen Szenarien als Risikostruktur definiert. Als Grundlage für die Erstellung der Planungsdaten diente eine Computertomografie des Phantomschädels. Für die Untersuchung des Laufzeitverhaltens zur Modellbildung, Situationsinterpretation und Bereitstellung der Assistenz wurden verschiedene Positionen des Patientenphantoms in einer einmalig festgelegten Reihenfolge mit dem Bohrer angefahren. Dieser Vorgang wurde für jedes Szenario mehrfach wiederholt ( $n = 15$ ). Diagramm 7.19 verdeutlicht die gemessenen Laufzeiten einer Vorführung für das erste Szenario. Der durch (a) gekennzeichnete Zeitpunkt markiert die Erkennung einer Annäherung des Bohrers an die geplante Position des ersten Implantats. Kurz darauf wird ein Bohrvorgang an dieser Implantatposition erkannt (b). Die Erkennung einer Gefahrensituation aufgrund einer Bedrohung des Alveolarnervs durch den Bohrer ist zum Zeitpunkt (c) gegeben. Ein Wechsel des Bohrers ist durch (d) markiert. Abbildung 7.20 verdeutlicht die vier Situationen.

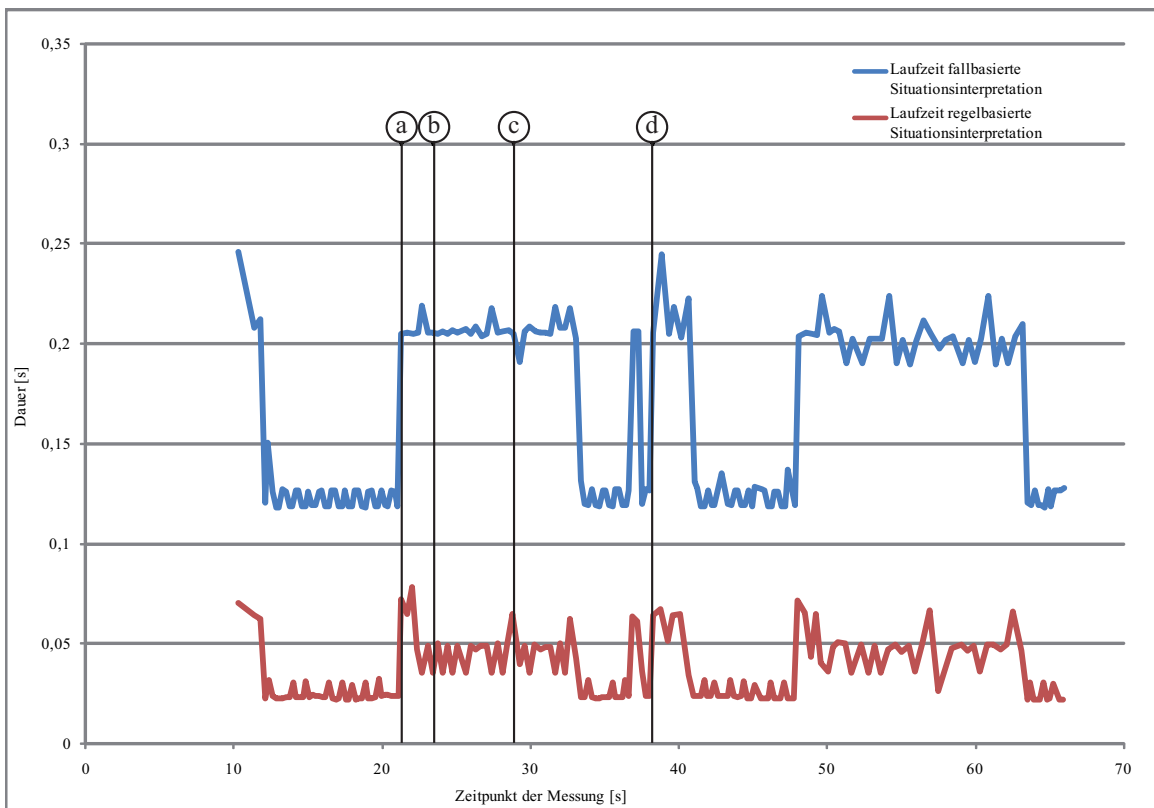
Bei der Analyse des Laufzeitdiagramms fallen zunächst die anfänglich hohen Werte sowie der verzögerte Beginn der Aufzeichnung auf. Dies lässt sich durch die Initialisierung sämtlicher Systemkomponenten erklären. Es wird ersichtlich, dass die Modellbildung durch relativ konstante und niedrige Messwerte gekennzeichnet ist. Da sich die Anzahl der betrachteten Instanzen des Situationsmodells während der



**Abb. 7.20:** Situationsinterpretation am Phantom (Szenario 1). a) Visualisierung bei Erkennung einer Annäherung an Implantatposition. b) Visualisierung bei Erkennung eines Bohrvorgangs an Implantatposition. c) Visualisierung bei Erkennung einer Gefahrensituation. d) Visualisierung bei Wechsel des Bohrers.

Ausführung nicht verändert, sind die Laufzeitschwankungen auf die Berechnungen zur Ermittlung der situationsbeschreibenden Rollen zurückzuführen. Diese werden jedoch unabhängig von der aktuell vorliegenden Situation durchgeführt, wodurch sich die insgesamt eher geringen Schwankungen erklären lassen.

Demgegenüber steht der stärker situationsabhängige Berechnungsaufwand zur Bereitstellung der Assistenz. Der Aufwand steigt hier vor allem dann, wenn sich die Visualisierung verändert. So ist der Aufwand bis zur Bereitstellung der ersten Assistenz bei (a) zu vernachlässigen, steigt dann jedoch sprunghaft an. Erklären lässt sich dies durch die zusätzlichen Verarbeitungsschritte zur Erzeugung der Assistenz. Der Aufwand bleibt erhöht, solange die Assistenz bereitgestellt wird, fällt jedoch rapide ab, sobald keine Unterstützung mehr benötigt wird.



**Abb. 7.21:** Laufzeit der fall- und regelbasierten Situationsinterpretation (Szenario 1). a) Erkennung einer Annäherung an Implantatposition. b) Erkennung eines Bohrvorgangs an Implantatposition. c) Erkennung einer Gefahrensituation. d) Wechsel des Bohrers.

Anhand der aufgeführten Messwerte wird außerdem ersichtlich, dass die Erstellung des Situationsmodells und die Erzeugung der Visualisierung im Durchschnitt sehr viel weniger Rechenzeit in Anspruch nehmen als die Situationsinterpretation. Dies legt eine weiter gehende Analyse des Berechnungsaufwands für die Situationsinterpretation nahe. Das Diagramm 7.21 schlüsselt hierzu das Laufzeitverhalten der Situationsinterpretation des Experiments aus Diagramm 7.19 in die Komponenten zur fall- und regelbasierten Situationsinterpretation auf. Es ist ersichtlich, dass der hohe zeitliche Aufwand der Situationsinterpretation größtenteils auf den Aufwand des fallbasierten Verfahrens zurückzuführen ist. Das regelbasierte Verfahren benötigt hingegen nur ein Sechstel der Laufzeit des fallbasierten Ansatzes. Eine Korrelation des Laufzeitverhaltens der beiden Verfahren bezüglich der aktuell vorliegenden Situation ist nicht zu erkennen. Die Laufzeit der Interpretation des fallbasierten Ansatzes unterliegt jedoch starken Schwankungen. Weitere Analysen ergaben, dass hierfür vor allem die umfangreiche Kommunikation mit der verwendeten Schlussfolgerungssoftware verantwortlich war. Der Vergleich des Situationsmodells mit den Referenzmodellen der Fallbasis unterlag demgegenüber nur sehr geringen Schwankungen. Eine Ausnahme hiervon bildet der Ausreißer zu Beginn

Szenario	Komponente	min	∅	max
1	Modellbildung	0,007 s	0,019 s	0,079 s
	Situationsinterpretation	0,152 s	0,241 s	2,593 s
	Bereitstellung Assistenz	0,002 s	0,067 s	2,680 s
2	Modellbildung	0,013 s	0,022 s	0,103 s
	Situationsinterpretation	0,200 s	0,315 s	4,351 s
	Bereitstellung Assistenz	0,003 s	0,086 s	0,726 s
3	Modellbildung	0,013 s	0,027 s	0,135 s
	Situationsinterpretation	0,271 s	0,453 s	2,348 s
	Bereitstellung Assistenz	0,012 s	0,026 s	0,142 s

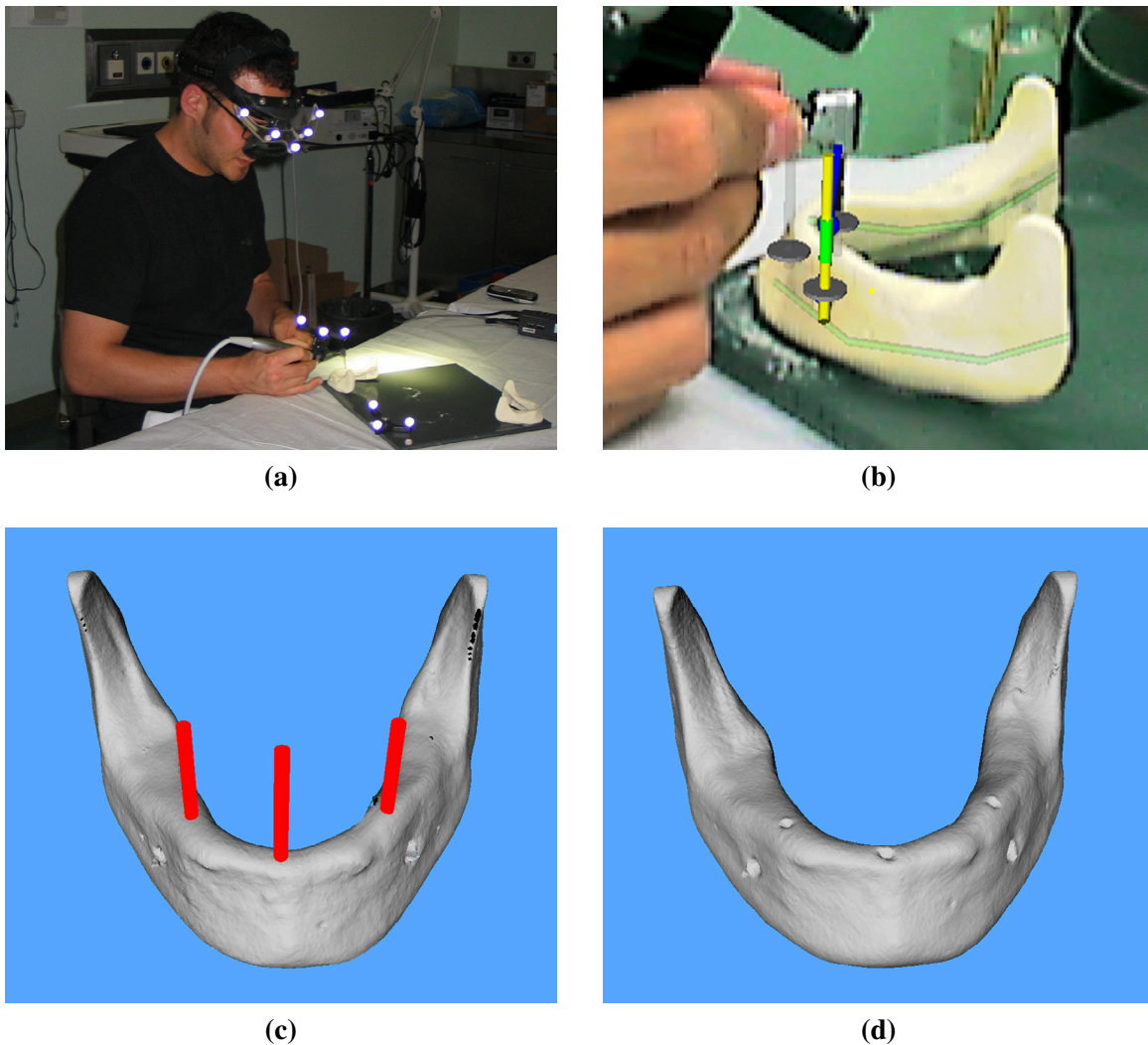
**Tab. 7.1:** Laufzeiten Modellbildung, Situationsinterpretation und Visualisierung.

der Sequenz, der auf die Initialisierung der Verfahren zurückzuführen ist. Ergänzend zu den Diagrammen sind in Tabelle 7.1 die minimalen, durchschnittlichen und maximalen Laufzeiten für alle Szenarien und Wiederholungen aufgelistet.

### 7.3.4 Evaluation der Genauigkeit

Die Genauigkeit von *Inpres* wurde bereits im Jahr 2003 im Rahmen einer Anwendung zur Risikoreduktion experimentell untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass mit dem System vertraute Anwender eine translatorische Abweichung von ca. 2 mm erzielten. Unerfahrene Anwender erzielten mit ca. 6 mm translatorischer Abweichung ein deutlich schlechteres Ergebnis [Sal03]. Die Abweichung der Überlagerung bei drei mit *Inpres* durchgeführten klinischen Eingriffen wurde mit 1-2 mm geschätzt [SEP+05b].

In dem 2003 vorgestellten *Inpres*-System war die Erfassung chirurgischer Instrumente nicht vorgesehen. Die Erweiterung des Systemkonzepts für eine kontextbezogene Assistenz beim Setzen von Dentalimplantaten erfordert jedoch die Einbeziehung des Bohrers und der Kunststoffkassette des Dentalimplantatsystems. Für die Evaluation der Bohrergenauigkeit wurden im Rahmen von Phantomversuchen insgesamt  $n = 12$  Implantate geplant und mit dem *Inpres*-System umgesetzt. Die Visualisierung erfolgte dabei mit der *Sony Glasstron*-Durchsichtbrille. Pro Implantat wurde genau eine Bohrung durchgeführt. Für die Auswertung der Umsetzungsgenauigkeit wurde die Oberfläche der verwendeten Patientenphantome vor und nach der Umsetzung der Bohrungen mit einem *Minolta Vi-900*-Laserscanner erfasst. Dies ermöglichte eine Registrierung der Datensätze und einen Vergleich der Bohrungen mit den geplanten Implantatpositionen. Abbildung 7.22 zeigt die Versuchsdurchführung und das Oberflächenmodell eines Patientenphantoms samt Planungsdaten und Bohrungen. Tabelle 7.2 auf Seite 158 fasst die gemessenen Abweichungen zusammen.



**Abb. 7.22:** a) Versuchsdurchführung mit optischer Durchsichtbrille. b) Nachgestellte Visualisierung mittels Videodurchsicht. c) Oberflächenmodell des Patientenphantoms mit Planungsdaten. d) Oberflächenmodell nach Versuchsdurchführung.

Die Auswertung der gemessenen Abweichungen zeigt eine starke Variation hinsichtlich der erreichten Umsetzungsgenauigkeiten bei den vier Phantommodellen. Anhand der Messdaten ist jedoch erkennbar, dass sich die Präzision der Umsetzung mit zunehmender Anzahl durchgeführter Bohrungen aufgrund zunehmender Übung des Anwenders verbessert. So konnte die durchschnittlich erreichte Abweichung beim vierten und letzten Phantommodell um ca. 75 % gegenüber der Umsetzung beim ersten Phantommodell gesenkt werden. Des Weiteren wurde beim vierten Phantommodell eine durchschnittliche Abweichung von 0,82 mm statt von 3,59 mm gegenüber dem ersten Phantommodell festgestellt. Die durchschnittliche Abweichung der gemessenen Tiefe verringerte sich von 2,73 mm auf 0,54 mm. Die

Phantom	Planungsposition	$\Delta$ Position	$\Delta$ Tiefe	$\Delta$ Ausrichtung
1	1	2,24 mm	2,75 mm	6,71°
1	2	3,99 mm	0,71 mm	4,85°
1	3	4,51 mm	4,74 mm	8,03°
1	∅	3,59 mm	2,73 mm	6,54°
2	1	2,01 mm	0,32 mm	6,93°
2	2	0,97 mm	0,33 mm	4,32°
2	3	1,79 mm	-0,16 mm	5,43°
2	∅	1,61 mm	0,27 mm	5,56°
3	1	1,84 mm	0,81 mm	1,99°
3	2	2,02 mm	-0,96 mm	4,65°
3	3	2,91 mm	-1,9 mm	3,39°
3	∅	2,26 mm	0,58 mm	3,35°
4	1	0,23 mm	-0,26 mm	0,47°
4	2	0,93 mm	1,23 mm	3,11°
4	3	1,31 mm	-0,12 mm	1,44°
4	∅	0,82 mm	0,54 mm	1,68°
1 - 4	∅	2,07 mm	0,87 mm	4,28°

**Tab. 7.2:** Gemessene Abweichungen ( $\Delta$  Position,  $\Delta$  Tiefe,  $\Delta$  Ausrichtung) der 12 Bohrungen am Patientenphantom.

gemessene Abweichung der Ausrichtung von 6,54° auf 1,68°. Betrachtet man die durchschnittlichen Abweichungen aller vier Phantommodelle, ist zu konstatieren, dass eine Abweichung in der Position um ca. 2 mm unter den theoretischen Möglichkeiten des *Inpres*-Systems liegt<sup>5</sup>. Die erzielte Abweichung liegt zudem knapp über der Abweichung früherer klinischer Studien (vgl. [SEP+05b]). Demgegenüber stehen die vielversprechenden Ergebnisse, die beim vierten Phantommodell erzielt wurden.

### 7.3.5 Evaluation der Erkennungsrate

Die Situationsinterpretation bildet durch die Ermittlung des Situationskontexts die Grundlage für die Erzeugung einer kontextbezogenen Assistenz. Für das klinische Anwendungsbeispiel der Dentalimplantate wird unter dem Situationskontext die Zugehörigkeit der aktuell vorliegenden Operationssituation zu einer der folgenden Situationen verstanden:

- **Annäherung des Bohrers an ein geplantes Implantat**

Diese Situation liegt vor, falls sich die Distanz zwischen Bohrer und Implan-

<sup>5</sup>Theoretisch erreichbare Abweichung von 0,59 mm nach [Sal03].

tat verringert. Gleichzeitig muss sich der Bohrer in der Nähe des Implantats befinden. Zur Unterstützung des Chirurgen wird die geplante Implantatposition visualisiert (grün).

- **Umsetzung einer Implantatplanung**

Die Umsetzung einer Implantatplanung wird angenommen, falls Bohrer und Implantat eine Maximaldistanz nicht überschreiten. Die Unterstützung umfasst die Visualisierung der geplanten Implantatposition (gelb) sowie eine Visualisierung zur Beurteilung der Bohrtiefe.

- **Annäherung des Bohrers an den Alveolarnerv**

Die Annäherung des Bohrers an den Alveolarnerv wird angenommen, falls sich die Distanz zwischen Bohrer und Nerv verringert und eine Maximaldistanz nicht überschritten wird. Diese Maximaldistanz wird in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Bohrers dynamisch berechnet. Der Chirurg wird durch die Visualisierung der Nervenstruktur auf die Situation hingewiesen.

- **Auswahl eines Bohrers**

Ein Bohrer gilt als ausgewählt, wenn das Winkelstück eine Maximaldistanz zur Position des Bohrers in der Kunststoffkassette nicht überschreitet. Das Andeuten und die Bestätigung einer Auswahl werden farblich hervorgehoben.

Für die Interpretation des Situationsmodells wurde das regel- und das fallbasierte Verfahren verwendet. Hierdurch soll die chirurgische Vorgehensweise zur Situationsinterpretation nachgeahmt werden. Durch den regelbasierten Ansatz wird das Faktenwissen des Chirurgen abgebildet, mittels des fallbasierten Verfahrens sein Erfahrungswissen. Die Ergebnisse der beiden Verfahren werden fusioniert, wobei eine Situation dann als erfolgreich erkannt gilt, wenn die Situation von mindestens einem Verfahren erkannt wird und das andere Verfahren keine davon abweichende Situation favorisiert. Auf die Erkennung einer Situation folgt die Erzeugung einer Unterstützung mittels der Erweiterten Realität. Diese wird dem Chirurgen in dem Brillensystem präsentiert.

Zur Evaluation der Situationsinterpretation wurde eine Studie an der Universitätsklinik Heidelberg durchgeführt. Dazu wurden Operationsszenen des betrachteten Eingriffs im Labor nachgestellt und mittels einer Videokamera<sup>6</sup> aufgezeichnet. Daraufhin wurde das Verhalten des Systems durch eine Analyse des Videomaterials von klinischen Experten beurteilt. Die Bewertung erfolgte zu äquidistanten Zeitpunkten, insgesamt wurden  $n = 275$  Operationssituationen analysiert. Dabei wurde anhand der eingeblendeten Unterstützung entschieden, ob das System die Situation korrekt interpretiert hat. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um die Interpretationsergebnisse des kontextbezogenen Assistenzsystems von mehreren Chirurgen

---

<sup>6</sup>Erzeugung der Erweiterten Realität mittels Video-Durchsicht.

beurteilen zu lassen. Die Ergebnisse der Beurteilung sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

Bei der Evaluation der Situationsinterpretation sollten die Chirurgen anhand der Visualisierung beurteilen, ob das System die aktuell vorliegende Operationssituation ihrer Einschätzung nach korrekt interpretiert hat. Die unterschiedlichen Bewertungen der Chirurgen (vgl. Tabelle 7.3) verdeutlichen dabei die grundsätzliche Problematik einer Situationsinterpretation: Aufgrund der Subjektivität der Beurteilung existiert kein allgemeingültiger Konsens, wann eine bestimmte Situation vorliegt. Im vorliegenden Anwendungsfall betraf dies vor allem Situationen, in denen sich der Bohrer einer Implantatposition annähert. Die Fragestellung hierbei lautet: Beabsichtigt der Chirurg die Umsetzung einer Implantatplanung oder nicht? Das Assistenzsystem bewertet dies anhand der Bewegungsrichtung und der Geschwindigkeit des Instruments. Der Chirurg aufgrund seiner Erfahrung. Eine Anpassung des Systemverhaltens an die chirurgische Bewertung wäre beispielsweise durch das Hinzufügen chirurgensindividueller Situationsbeispiele in der Fallbasis zu erreichen. Eine Auswertung der von den Chirurgen als falsch klassifizierten Situationen ermöglichte die Identifizierung der Ursachen der Fehlinterpretation, beispielsweise aufgrund unvollständiger Sensordaten. Dies ist dann der Fall, wenn sich einer der Marker des Instruments, der Brille oder des Patienten nicht im Sichtfeld des optischen Positionsverfolgungssystems befindet. Des Weiteren führte die Latenz des Systems bei schnellen Instrumentbewegungen zu einer verzögerten Visualisierung. Diese wurde von den Chirurgen ebenfalls als Fehlinterpretation gewertet. Verbesserungspotenzial liegt somit in der Verwendung eines alternativen Positionsverfolgungssystems sowie in der Verringerung der systemeigenen Latenzen.

Versuchsteilnehmer	Sequenz 1	Sequenz 2
Klinischer Experte A	90,07 %	81,34 %
Klinischer Experte B	86,52 %	84,32 %

**Tab. 7.3:** Erkennungsrate der Situationsinterpretation bei nachgestellten Operationssituationen in der Experimentierumgebung unter Verwendung des erweiterten *Inpres*-Systems. Sequenz 1 ( $n_1 = 141$  Situationen), Sequenz 2 ( $n_2 = 134$  Situationen).

## 7.4 Zusammenfassung

Die experimentelle Evaluation umfasst drei Schlüsselexperimente aus der minimalinvasiven Chirurgie, die mit dem *MediAssist*-System durchgeführt wurden, sowie die Evaluation des erweiterten *Inpres*-Systems beim Setzen von Dentalimplantaten. Die Gründe für die sich stark unterscheidende Vorgehensweise bei der Durchführung der Evaluation in den beiden Anwendungsgebieten wurden in der Einfüh-



rung des Kapitels genannt. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass es sich bei dem wissensbasierten Konzept um einen flexiblen Lösungsansatz handelt, dessen Anwendbarkeit nicht auf eine chirurgische Disziplin beschränkt ist.

Im ersten Schlüsselexperiment des minimalinvasiven Anwendungsszenarios wurde die Situationsinterpretation durch ein Fallermittlungsnetz untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass dieser Ansatz in der Lage ist, Hinweise zu liefern, die zur Bestimmung der Operationsphase beitragen. Im zweiten Schlüsselexperiment wurde die kontextbezogene Visualisierung exemplarisch untersucht. Am Patientenphantom konnte eine Visualisierung beim Setzen von Gefäßclips unter Verwendung einer hierfür entwickelten Simulationsumgebung demonstriert werden. Bei der Umsetzung von Inzisionen wurde die Anpassung der Visualisierung an den jeweiligen Situationskontext untersucht und die Robustheit des Verfahrens festgestellt. Gegenstand des dritten Schlüsselexperiments war die Untersuchung von Interaktionstechniken für das minimalinvasive Anwendungsszenario. Im Zuge dessen erwies sich die brillenbasierte Interaktion, bei der keine zusätzlichen Geräte in den Operationsaal eingebracht werden müssen, als ein vielversprechender Ansatz für die Bedienung des Assistenzsystems.

Für eine kontextbezogene Unterstützung beim Setzen von Dentalimplantaten wurde das *Inpres*-System um Komponenten zur Modellbildung, Situationsinterpretation und Visualisierung erweitert. Die Evaluation des dabei entstandenen Systems umfasst Untersuchungen bezüglich der Latenz, der Genauigkeit und der Erkennungsrate der Situationsinterpretation. Die Analyse des Laufzeitverhaltens ergab, dass die benötigten Rechenzeiten zur Erstellung des Situationsmodells und zur Erzeugung der kontextbezogenen Visualisierung im Vergleich zum Zeitaufwand für die Situationsinterpretation zu vernachlässigen sind. Für den gegebenen Anwendungsfall wurde ein Interpretationskonzept untersucht, das den regel- und fallbasierten Ansatz kombiniert. Dabei entfallen mehr als 75 % der benötigten Rechenzeit auf den fallbasierten Ansatz. Für die Evaluation der Genauigkeit wurden zwölf Implantatpositionen geplant und mittels des erweiterten *Inpres*-Systems am Patientenphantom umgesetzt. Im Anschluss wurden die dabei durchgeführten Bohrungen vermessen und mit den Planungsdaten verglichen. Hierbei konnte die im Rahmen früherer Patientenversuche erreichte Genauigkeit des *Inpres*-Systems experimentell bestätigt werden. Bei der Evaluation der Situationsinterpretation bewerteten zwei Chirurgen die kontextbezogene Visualisierung anhand von Videoaufzeichnungen. Dabei wurden ca. 85 % der Situationen korrekt interpretiert. Häufigste Ursachen für eine Fehlinterpretation sind Latenzen der Situationsinterpretation sowie Verdeckungen der verwendeten Positionsmarker.

Die Schlüsselexperimente verdeutlichen das Potenzial einer Anwendung in der minimalinvasiven Chirurgie. Der aktuelle Entwicklungsstand des *MediAssist*-Systems erlaubt jedoch noch keinen klinischen Einsatz. Das erweiterte *Inpres*-System demonstriert die Anwendbarkeit des wissensbasierten Lösungsansatzes für eine kon-

textbezogene Chirurgieassistenz. Dennoch ist die Entwicklung eines klinisch einsetzbaren Prototyps nicht abgeschlossen. Gegenstand weiterer Untersuchungen sind die Verbesserung der Systemgenauigkeit sowie die Verringerung der Latenzen.

# Kapitel 8

## Schlussbetrachtung

### 8.1 Zusammenfassung

Ein Ziel zukünftiger Assistenzsysteme ist die Bereitstellung einer kontextbezogenen Unterstützung des Chirurgen. Die Motivation solch einer situationsangepassten und operationsbegleitenden Unterstützung besteht in der Bereitstellung genau der Informationen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt auch tatsächlich benötigt werden. Dies erfordert die Erfassung und Interpretation der aktuell vorliegenden Operationssituation unter Berücksichtigung der patientenindividuellen Operationsplanung sowie Methoden zur Erzeugung einer geeigneten Unterstützung. Das Anliegen dieser Arbeit war es, diesbezüglich einen Beitrag zu leisten. Leitgedanke des entwickelten Lösungsansatzes ist die starke Einbeziehung einer Wissensbasis. Im Rahmen dieser Arbeit wurden hierzu drei Aufgabenfelder näher betrachtet.

Das erste Aufgabenfeld, die Wissensrepräsentation und Modellbildung, umfasst die Abstraktion des Diskursbereichs sowie den Entwurf von Modellen zur Abbildung der Operationssituation und der Operationsplanung. Dabei wurde eine Wissensbasis entwickelt, die das Vokabular für die Abbildung der Modelle bereitstellt.

Gegenstand des zweiten Aufgabenfelds ist die Interpretation der aktuell vorliegenden Operationssituation. Das Interpretationskonzept orientiert sich an der chirurgischen Vorgehensweise zur Interpretation einer Operationssituation: der Kombination aus Faktenwissen und praktischer Erfahrung. Insgesamt wurden drei Interpretationsverfahren konzipiert.

Im dritten Aufgabenfeld erfolgte die exemplarische Auseinandersetzung mit Ansätzen zur Erzeugung einer kontextbezogenen Assistenz mittels der Erweiterten Realität. Ferner wurde eine Benutzungsschnittstelle zur Bedienung des Systems entworfen.

## 8.2 Diskussion

Neuartig sind die starke Einbeziehung einer Wissensbasis sowie die Nachahmung der chirurgischen Vorgehensweise zur Situationsinterpretation. Bezüglich der Aspekte Modellbildung, Situationsinterpretation und Bereitstellung einer Assistenz ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Die Ausgangsbasis des Lösungsansatzes bildet die Verwendung einer Beschreibungslgik für die Repräsentation der Wissensbasis und der Modelle. Dies ermöglicht unter anderem den Rückgriff auf bestehende Wissensrepräsentationssysteme wie das *Foundational Model of Anatomy* und führt zu einer Reduktion des Modellierungsaufwands sowie zur Vermeidung von Fehlern, die durch eine Ad-hoc-Modellierung entstehen können. Anhand der Evaluation in der minimalinvasiven Chirurgie und in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie konnte gezeigt werden, dass die Definitionen des semantischen und geometrischen Situationsmodells zu einem weitreichenden Verständnis der Operationssituation führen. Ferner wurde die Anwendbarkeit der Modelle für die Situationsinterpretation und die Erzeugung einer kontextbezogenen Visualisierung demonstriert.
- Die drei Interpretationsverfahren ermöglichen eine Nachahmung der chirurgischen Vorgehensweise zur Situationsinterpretation durch die Kombination aus Fakten- und Erfahrungswissen. Medizinisches Faktenwissen wird in einer Wissens- und Regelbasis abgebildet, das chirurgische Erfahrungswissen in einer Fallbasis. Es konnte gezeigt werden, dass der fallbasierte Ansatz eine differenzierte Analyse komplexer Operationssituationen erlaubt, anhand derer Rückschlüsse auf den Operationsverlauf möglich sind. Das Verfahren auf Basis generalisierter Modelle sowie das regelbasierte Verfahren eignen sich insbesondere für die Erkennung sogenannter Sondersituationen, wie beispielsweise Gefahrensituationen, deren Situationsmerkmale im Rahmen der Modellierung definiert werden können. Anhand der Evaluation in den beiden Anwendungsszenarien konnten das Potenzial und die praktische Anwendbarkeit der Verfahren demonstriert werden. Als optimierungsbedürftig erwies sich das Laufzeitverhalten der Situationsinterpretation.
- Die kontextbezogene Unterstützung mittels der Erweiterten Realität konnte exemplarisch gezeigt werden. Für das minimalinvasive Szenario wurden Verfahren für eine kontextbezogene Visualisierung bei der Umsetzung einer Inzision, beim Setzen von Gefäßclips und bei Gefahrensituationen entwickelt. Beim Setzen von Dentalimplantaten wird der Chirurg durch eine kontextbezogene Visualisierung bei Standard- und Gefahrensituationen unterstützt. Von Vorteil erwies sich das flexible Visualisierungs- und Interaktionskonzept, das eine einfache Erweiterung der Assistenzsysteme um neue Visualisierungs- und Interaktionskomponenten sicherstellt.

Das Potenzial des wissensbasierten Lösungsansatzes für eine kontextbezogene Assistenz in der minimalinvasiven Chirurgie wurde anhand von Schlüsselexperimenten mit dem *MediAssist*-System demonstriert. Eine Evaluation des Gesamtsystems *MediAssist* ist, anders als beim erweiterten *Inpres*-System, bislang jedoch nicht möglich. Aufgrund der günstigen Rahmenbedingungen ist der klinische Einsatz des erweiterten *Inpres*-Konzepts in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie hingegen denkbar, falls das System die Genauigkeitsanforderungen erfüllt und die Laufzeit der Situationsinterpretation verkürzt werden kann.

Erstmalig wurde ein umfassender Ansatz für eine kontextbezogene Chirurgieassistenz mittels der Erweiterten Realität entwickelt. Die Anwendbarkeit der Modelle und Verfahren konnte für zwei Eingriffe unterschiedlicher chirurgischer Disziplinen gezeigt werden. Laufzeituntersuchungen brachten jedoch zutage, dass die konzeptbedingt auftretenden Latenzen der Situationsinterpretation vor einem klinischen Einsatz reduziert werden müssen. Inwiefern sich der wissensbasierte Ansatz auf weitere Eingriffe übertragen lässt, muss geprüft werden.

### 8.3 Ausblick

Das vorgestellte Konzept bildet die Grundlage für weiter gehende Untersuchungen des Themenkomplexes der kontextbezogenen Chirurgieassistenz. Für zukünftige Erweiterungen und Ergänzungen ergeben sich folgende Anknüpfungspunkte:

- Bei der Wahl des Abstraktionsgrads der entwickelten Modelle galt es, einen Kompromiss zwischen Mächtigkeit und Anwendbarkeit der Modelle zu finden. Im Zuge einer Erweiterung des Systemkonzepts zur Behandlung von Weichgewebedeformationen ist zu untersuchen, wie eine solche Deformation im Situationsmodell abgebildet werden kann. Notwendig ist somit eine stärkere Verknüpfung semantischer und geometrischer Daten.
- Das Thema Unsicherheit wird im Rahmen der Situationsinterpretation bislang vernachlässigt. Vor einem klinischen Einsatz der kontextbezogenen Assistenzsysteme sollten entsprechende Verfahren integriert und evaluiert werden. Zur Verifikation der gemessenen Sensordaten bietet sich weiterhin die Einbeziehung der Wissensbasis, beispielsweise zur Durchführung von Plausibilitätstests, an.
- Das modulare Konzept der Situationsinterpretation könnte um weitere Verfahren ergänzt werden. Hierbei kommen vor allem die im Stand der Forschung aufgeführten Verfahren auf Basis von *Hidden-Markov-Modellen* infrage. In Kombination mit der Entwicklung eines Konzepts zur Fusion der einzelnen Interpretationsergebnisse ist eine verbesserte Erkennungsrate zu erwarten.

Ungeachtet der aufgeführten Anknüpfungspunkte für eine Erweiterung und Ergänzung des Konzepts ist die technische Entwicklung eines klinisch einsetzbaren Prototyps bislang nicht abgeschlossen. Die durch den wissensbasierten Ansatz gewonnenen Erkenntnisse skizzieren jedoch einen möglichen Pfad auf dem Weg zu einer kontextbezogenen Chirurgieassistenz.

# Anhang A

## Operationsablauf der betrachteten Eingriffe

### A.1 Cholezystektomie

Bei dem folgenden Ablauf einer minimalinvasiv durchgeführten Cholezystektomie handelt es sich um einen idealtypischen Verlauf (vgl. [Bra09]). Für weitere Informationen sei auf die einschlägige Fachliteratur wie beispielsweise [BW97] verwiesen.

1. Errichtung des Pneumoperitoneums (Anheben der Bauchdecke durch Gas):
  - (a) Inzision periumbilikal
  - (b) Fassen und Anheben der Haut mit einer scharfen Tuchklemme
  - (c) Einführen der Veressnadel durch die Unterhaut, das vordere Fasziensblatt, den Rektusmuskel und das hintere Fasziensblatt
  - (d) Durchführen der Sicherheitstests
  - (e) Anschließen des Gasschlauches
2. Trokarplatzierung:
  - (a) Optiktrokar platzieren (periumbilikal)
  - (b) Arbeitstrokare platzieren:
    - i. Epigastrisch (d. h. in der Oberbauchregion<sup>1</sup> liegend) für ein Arbeitsinstrument
    - ii. Rechts lateral für die Gallenblasenfasszange
    - iii. Subxyphoidal (unterhalb des Brustbeins) für ein Arbeitsinstrument
3. Exposition der Gallenblase:

---

<sup>1</sup>Epigastrium: Oberbauch, zwischen Nabel und Rippenbogen

- (a) Fassen des Fundus mit der Gallenblasenfasszange
  - (b) Gallenblase anheben und über den Leberrand spannen
  - (c) Herunterlösen von Gallenblasenadhäsionen, sofern vorhanden
4. Präparation des Calot'schen-Dreiecks:
- (a) Eröffnen des Peritoneums (Bauchfells) im Bereich des Infundibulums
  - (b) Verfolgen des Infundibulums bis zum Ductus Cysticus
  - (c) Zirkuläres Freilegen des Ductus Cysticus
  - (d) Identifizieren der Arteria Cystica dorsocranial
  - (e) Zirkuläres Freilegen der Arteria Cystica
5. Absetzung der Gallenblase:
- (a) Verschließen des Ductus Cysticus mit drei Clips
  - (b) Durchtrennen des Ductus Cysticus zwischen dem zweiten und dritten Clip
  - (c) Kontrolle des Cysticuslumens
  - (d) Verschließen der Arteria Cystica mit drei Clips
  - (e) Durchtrennen der Arteria Cystica zwischen dem zweiten und dritten Clip
  - (f) Kontrolle des Cysticuslumens
6. Herauslösung der Gallenblase aus dem Leberbett:
- (a) Umsetzen der Gallenblasenfasszange vom Fundus auf das Infundibulum
  - (b) Infundibulum nach vorne rechts oben wegspannen
  - (c) Wechselnd Inzision des Peritoneums zum Leberrand und Lösen der Adhäsionen zum Leberbett von zentral nach peripher mit monopolarer Strom (Schere oder Haken) – stets dort, wo am meisten Spannung besteht
  - (d) Gallenblase entfällt und die Leber fällt zurück
  - (e) Platzieren der Gallenblase hinter der Leber
7. Hämostase (Blutstillung):
- (a) Spülen des Leberbettes
  - (b) Verschorfen des Leberbettes mit monopolarer Strom (Koagulationshaken, -Kugel oder -Schere)



- (c) Wiederholen der Schritte 7a und 7b, bis sämtliche Blutungen gestoppt sind

8. Evakuierung der Gallenblase:

- (a) Umsetzen der Optik in den epigastrischen Trokar
- (b) Umsetzen des Gasschlauches an den epigastrischen Trokar
- (c) Bergebeutel über den periumbilikalen Trokar einbringen und entfalten
- (d) Gallenblase hinter der Leber aufsuchen und im Bergebeutel platzieren
- (e) Fassen und Zurückziehen des Bergebeutels über den periumbilikalen Zugang
- (f) Einsetzen der Haltehaken in die Unterhaut
- (g) Ziehen am Bergebeutel bis zum Anschlag
- (h) Wenn nötig, erweitern der Faszienlücke mit der Schere, bis der Beutel entfällt

9. Bauchdeckenverschluss:

- (a) Aufsuchen des vorderen Faszienblattes
- (b) Fassen der linken Lefze und Einstich mit der Nadel
- (c) Fassen der rechten Lefze und Ausstich mit der Nadel
- (d) Wiederholen der Schritte 9b und 9c im Sinne einer Z-Naht
- (e) Verknoten

10. Hautnaht

## **A.2 Setzen eines Dentalimplantats**

Im Folgenden wird der schematische Ablauf beim Setzen eines SCREW-Line-Dentalimplantats der Größe 4,3 / 13 im lateralen Unterkiefer zusammengefasst. Für eine ausführliche Beschreibung sei auf die Literatur verwiesen [Cam09].

1. Schnittführung (durch Spaltlappenpräparation):

- (a) Lingual versetzter parakrestaler Mukosaschnitt
- (b) Streng epiperiostale Lappenpräparation nach vestibulär
- (c) Durchtrennung des Muskels
- (d) Präparation der Mukosa nach lingual
- (e) Markierung der Implantatposition

- (f) Kreisförmige Entfernung des Periost in diesem Bereich
- 2. Ankörnung der Kortikalis:
  - (a) Ankörnung Kortikalis mit innengekühltem Rosenbohrer ( $\varnothing$  2,3 mm)
  - (b) Einsenken der Kugel bis zum Äquator (Drehzahl 800 U/min)
- 3. Pilotbohrung:
  - (a) Bestimmung Tiefe und Achse des Implantatlagers mit innengekühltem Pilotbohrer (Drehzahl 800 U/min)
  - (b) Aus Sicherheitsgründen Verwendung eines Tiefenstopps
  - (c) Kontrolle der Tiefe und Ausrichtung
- 4. Vorbohrung:
  - (a) Vorbohrung mit innengekühltem konischem Vorbohrer
  - (b) Aus Sicherheitsgründen Verwendung eines Tiefenstopps
- 5. Formbohrung (schonende Präparation durch schrittweise Durchmessererweiterung):
  - (a) Formbohrung mit  $\varnothing$  3,3 mm (Drehzahl 550 U/min)
  - (b) Formbohrung mit  $\varnothing$  3,8 mm (Drehzahl 500 U/min)
  - (c) Formbohrung mit  $\varnothing$  4,3 mm (Drehzahl 400 U/min)
- 6. Implantatbettkontrolle:
  - (a) Feststellung, ob eine Fenestration des Bohrstollens in benachbartes Gewebe vorliegt
  - (b) Dokumentation des Sondierungsbefunds
- 7. Implantatgewinde schneiden:
  - (a) Gewindeschneider ( $\varnothing$  3,3 mm bis 5,0 mm)
  - (b) maximale Drehzahl 15 U/min (empfohlen: manuelles Gewindeschneiden)
- 8. Implantatinsertion:
  - (a) Einführung Implantat in Implantatbett
  - (b) Positionierung der Gewindeansätze in Kortikalis (falls vorgeschritten) und Implantat

(c) Eindrehen des Implantats

9. Einheilung:

(a) Gedeckte Einheilung

(b) Alternativ: Offene Einheilung



# Anhang B

## Technische Daten der verwendeten Geräte

Typbezeichnung	NDI Polaris
Hersteller	Northern Digital Inc.
Kameratyp	P4 (hybrid)
Verfolgbare Marker	12
Datenübertragungsrate	115 kBaud
Schnittstellen	RS-232 / RS-422
Abmessungen B × H × T	7,6 cm × 58,5 cm × 11,5 cm
Gewicht (Kamerakopf)	2 kg

**Tab. B.1:** Merkmale des Positionsverfolgungssystems *Polaris* nach [Nor02].

Typbezeichnung	Sony Glasstron LDI-D100BE
Hersteller	Sony Corporation
Anzeige	2 LCD-Bildschirme
Durchsichtmodus	Bildschirmverdunkelung
Bildschirmgröße (B × H)	14,21 mm × 10,61 mm
Bildschirmdiagonale	0,7“
Auflösung	832 × 624 Pixel
Sichtfeldöffnung (horizontal)	28°
Abmessungen B × H × T	149 mm × 48 mm × 36 mm
Gewicht	120 g

**Tab. B.2:** Merkmale der Durchsichtbrille *Sony Glasstron LDI-D100BE* nach [Son98].

Typbezeichnung	Stereoendoskop 8934.501
Hersteller	Richard Wolf GmbH
Durchmesser	10 mm
Nutzlänge	301 mm
Blickrichtung	25°
Bildwinkel	75°

**Tab. B.3:** Merkmale des *Stereoendoskops 8934.501* nach [Wol01].

Typbezeichnung	3D Endoscam 5535.901
Hersteller	Richard Wolf GmbH
TV-Norm	PAL
Frequenz	50/60 Hz
Abmessungen B × H × T	457 mm × 127 mm × 493 mm
Bildwandler	2 × 1/2“ Interline Transfer
Bildpunkte pro Bildwandler	752(H) × 582(V)
Farbregelung	Automatischer Weißabgleich
Shutter control	Automatische Blendenregelung 1/50–1/1000
Abmessungen Kamerakopf L × Ø	92 mm × 50 mm
Video (BNC)	2 × 1,0 V <sub>p-p</sub> /75 Ohm Composite
S-Video (Mini DIN)	2 × Y:1,0 V <sub>p-p</sub> /75 Ohm 2 × C:0,3 V <sub>p-p</sub> /75 Ohm

**Tab. B.4:** Merkmale des Kamerasystem *Endoscam 5535.901* nach [Wol00].

Typbezeichnung	Lichtprojektor
Hersteller	Richard Wolf GmbH
Abmessungen B × H × T	320 mm × 120 mm × 255 mm
Farbtemperatur im Maximum	3200 K
Lichtleiter Ø, Nutzlänge	3,5 mm, 2,3 m

**Tab. B.5:** Merkmale des *Lichtprojektors* nach [Wol97].

Typbezeichnung	Video-to-Firewire Konverter DFG/1394-1e
Hersteller	The Imaging Source GmbH
Videoformate	PAL/NTSC, RS-170/CCIR
Max. Auflösung	PAL: 768 × 576 bei 25 fps NTSC: 640 × 480 bei 30 fps
Analog-Eingänge	2 × RCA (cinch) 1 × Y/C (S-Video)
Bus-Interface	Gemultiplexed IEEE 1394-1995/1394a, 6-pin, 400 Mb/s
Farbformate	UYVY, RGB 32, RGB 24, RGB 8

**Tab. B.6:** Merkmale des *Video-to-Firewire-Konverters DFG/1394-1e* nach [Ima09].

Typbezeichnung	Vi-900
Hersteller	Fa. KonicaMinolta
Messmethode	Lasertriangulation
Objektgröße	max. 130 cm x 110 cm
geometrische Genauigkeit (bei 60 cm)	x=0,17 mm, y=0,17 mm z=0,047 mm
Messdauer	0,3 s (schnell), 0,7 s (normal)
Abmessungen B × H × T	213 mm × 413 mm × 271 mm
Gewicht	11 kg

**Tab. B.7:** Merkmale des Laserscanners *Vi-900* nach [Kon07].

Typbezeichnung	Intra C3-C09
Hersteller	KaVo Dental GmbH
Gesamtuntersetzung	27:1
Kühlung	Außen- und Innenkühlung
Max. Drehmoment	55 Ncm
Max. Arbeitsdrehzahl	11-1500 rpm
Einsatzbereich	Glätten Alveolarkamm bis Einschrauben Implantate

**Tab. B.8:** Merkmale des Winkelstücks *Intra C3-C09* nach [Kav09].





# Abbildungsverzeichnis

2.1	Hierarchisches Ablaufmodell . . . . .	9
2.2	Prozessmodell . . . . .	11
2.3	Bausteine zur Erzeugung eines Ablaufplans . . . . .	13
2.4	Klassendiagramm eines Ablaufmodells . . . . .	14
2.5	Aggregation von Arbeitsschritten eines Prozessmodells . . . . .	17
2.6	Komponenten eines Systems der Erweiterten Realität . . . . .	19
2.7	Assistenzsystem der Erweiterten Realität . . . . .	22
2.8	Interaktion mittels Erweiterter Realität . . . . .	24
3.1	Wissensbasierter Ansatz einer kontextbezogenen Assistenz . . . . .	29
3.2	<i>MediAssist</i> -System . . . . .	31
3.3	<i>Inpres</i> -System . . . . .	34
4.1	Operationssituation einer Cholezystektomie . . . . .	40
4.2	Beschreibungslogisches System . . . . .	45
4.3	<i>METHONTOLOGY</i> . . . . .	48
4.4	Taxonomie der nicht anatomischen Begriffe . . . . .	50
4.5	Diagramm binärer Ad-hoc-Relationen . . . . .	51
4.6	Taxonomie der anatomischen Begriffe . . . . .	55
4.7	Modelle für eine kontextbezogene Chirurgieassistenz . . . . .	57
4.8	Modellierung mit dem beschreibungslogischen System . . . . .	57
4.9	Patientenzustandsmodell 1 . . . . .	60
4.10	Strukturelle Beziehungen im Patientenzustandsmodell . . . . .	61
4.11	Patientenzustandsmodell 2 . . . . .	63
4.12	Patientenzustandsmodell 3 . . . . .	64
4.13	Handlungsmodell . . . . .	65
4.14	Semantisches Situationsmodell . . . . .	66
4.15	Geometrisches Situationsmodell . . . . .	67
4.16	Patientenindividueller Ablaufplan . . . . .	68
4.17	Planungsmodell . . . . .	69
5.1	Lösungsansatz für die Situationsinterpretation . . . . .	73
5.2	Situationsinterpretation mittels Fallermittlungsnetze . . . . .	75

5.3	Struktur eines Fallermittlungsnetzes . . . . .	76
5.4	Aktivierung eines Fallermittlungsnetzes . . . . .	78
5.5	Referenzmodelle eines Fallermittlungsnetzes . . . . .	80
5.6	Abbildung der Situationsmerkmale auf Informationsentitäten . . . . .	83
5.7	Gegenseitig ausschließende Situationsmerkmale . . . . .	87
5.8	Situationsinterpretation mittels generalisierter Modelle . . . . .	90
5.9	Interpretationsfunktion generalisierter Modelle . . . . .	94
5.10	Situationsinterpretation mittels Regeln . . . . .	96
5.11	Segmente des Ductus Cysticus beim Setzen von Gefäßclips . . . . .	97
5.12	Regeln für das Setzen von Gefäßclips auf dem Ductus Cysticus . . . . .	98
6.1	Prozessschritte zur Umsetzung einer Inzision . . . . .	105
6.2	Planung einer Inzision . . . . .	106
6.3	Detektion von Kantenpunkten . . . . .	108
6.4	Wundmodell . . . . .	109
6.5	Planabweichung . . . . .	110
6.6	Projektion von Nahtpunkten . . . . .	111
6.7	Gefäßapproximation und Clipposition . . . . .	113
6.8	Gefahrensituation . . . . .	114
6.9	Interaktionskonzept . . . . .	117
6.10	Interaktionskomponente 1 . . . . .	118
6.11	Eingabegeräte . . . . .	119
6.12	Eingabetechniken . . . . .	121
6.13	Interaktionskomponente 2 . . . . .	123
7.1	Erfassung des Handlungsmodells bei Cholezystektomien . . . . .	128
7.2	Ähnlichkeit der Situationsmodelle bei Metrik 1 . . . . .	129
7.3	Ähnlichkeit der Situationsmodelle bei Metrik 2 . . . . .	132
7.4	Ähnlichkeit der Situationsmodelle bei Metrik 3 . . . . .	133
7.5	Simulationsumgebung . . . . .	135
7.6	Visualisierung beim Setzen von Gefäßclips . . . . .	136
7.7	Visualisierung bei Gefahrensituationen . . . . .	137
7.8	Visualisierung bei der Umsetzung einer Inzision . . . . .	138
7.9	Wundkantendetektion . . . . .	139
7.10	Detektion von Schnittwunden 1 . . . . .	140
7.11	QS-Abweichung . . . . .	140
7.12	Detektion von Schnittwunden 2 . . . . .	141
7.13	Interaktion mit Brillensystem . . . . .	144
7.14	Interaktion mit ER-Tablett . . . . .	146
7.15	Konzept der Assistenz beim Setzen von Dentalimplantaten . . . . .	149
7.16	Planung einer Implantatposition . . . . .	150
7.17	Visualisierung einer Implantatposition . . . . .	151
7.18	Visualisierung von Schichtbildern . . . . .	152

---

7.19 Laufzeitanalyse 1 . . . . .	153
7.20 Kontextbezogene Visualisierung 1 . . . . .	154
7.21 Laufzeitanalyse 2 . . . . .	155
7.22 Kontextbezogene Visualisierung 2 . . . . .	157



# Tabellenverzeichnis

4.1	Axiome zur Beschreibung eines Instrumentenklassifikators . . . . .	52
4.2	<i>METHONTOLOGY</i> und <i>OWL</i> . . . . .	53
7.1	Laufzeiten kontextbezogene Assistenz . . . . .	156
7.2	Abweichungen der Bohrungen am Patientenphantom . . . . .	158
7.3	Erkennungsraten der Situationsinterpretation . . . . .	160
B.1	Merkmale des Positionsverfolgungssystems . . . . .	173
B.2	Merkmale der Durchsichtbrille . . . . .	173
B.3	Merkmale des Stereoendoskops . . . . .	174
B.4	Merkmale des Kamerasystems . . . . .	174
B.5	Merkmale des Lichtprojektors . . . . .	174
B.6	Merkmale des Video-to-Firewire-Konverters . . . . .	175
B.7	Merkmale des Laserscanners . . . . .	175
B.8	Merkmale des Winkelstücks . . . . .	175



# Literaturverzeichnis

- [AK00] N. AMENAT, R. KOLLURI: The medical axis of a union of balls. In: *Proceedings of the Canadian Conference on Computational Geometry, 2000*
- [ARS+06] T. AKINBIYI, C. REILEY, S. SAHA, D. BURSCHKA, C. HASSER, D. YUH, A. OKAMURA: Dynamic Augmented Reality for Sensory Substitution in Robot-Assisted Surgical Systems. In: *Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference, 2006*
- [ASS+06] S. AHMADI, T. SIELHORST, R. STAUDER, M. HORN, H. FEUSSNER, N. NAVAB: Recovery of Surgical Workflows Without Explicit Models. In: *Lecture Notes in Computer Science, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI, Volume 4190, 420-428, 2006*
- [Azu97] R. Azuma: A survey of augmented reality. In: *Presence, Volume 6, 355-385, 1997*
- [BAL06] P. BELTRAN-FERRUZ, B. DIAZ-AGUDO, O. LAGERQUIST: Retrieval over Conceptual Structures. In: *Lecture Notes in Computer Science, Advances in Case-Based Reasoning, Volume 4106, 443-457, 2006*
- [BCM03] F. BAADER, D. CALVANESE, D. MCGUINNESS, D. NARDI, P. SCHNEIDER: The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications. *Cambridge University Press, 2003*
- [Bec08] A. BECKER: Interpretation von Operationssituationen mit Case Retrieval Nets. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Diplomarbeit, 2008*
- [BI05] C. BORST, A. INDUGULA: Realistic virtual grasping. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality, 2005*
- [Bib93] W. BIBEL: Wissensrepräsentation und Inferenz. Eine grundlegende Einführung. *Vieweg-Verlag, 1993*
- [Bim05] O. BIMBER: Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds. A Modern Approach to Augmented Reality. *Peters Verlag, 2005*

- [BFH+02] W. BIRKFELLNER, M. FIGL, K. HUBER, F. WATZINGER, F. WANSCHITZ, J. HUMMEL, R. HANEL, W. GREIMEL, P. HOMOLKA, R. EWERS, H. BERGMANN: A head-mounted operating binocular for augmented reality visualization in medicine - design and initial evaluation. In: *IEEE Transactions on Medical Imaging, Volume 21, Number 8, 2002*
- [BHW+00] W. BIRKFELLNER, K. HUBER, F. WATZINGER, M. FIGL, F. WANSCHITZ, R. HANEL, D. RAFOLT, R. EWERS, H. BERGMANN: Development of the Varioscope AR - A See-through HMD for Computer-Aided Surgery. In: *IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR), 2000*
- [BKL04] D. BOWMAN, E. KRUIJFF, I. J. LAVIOLA: 3D User Interfaces: Theory and Practice. *Addison-Wesley, 2004*
- [BL85] R.J. BACHMANN, H.J. LEVESQUE: Readings in Knowledge Representation. *Morgan Kaufmann Publishers, 1985*
- [BLN+07] S. BLECHA, D. LINDNER, T. NEUMUTH, C. TRANTAKIS, O. BURGERT, J. MEIXENSBERGER: Workflow von intrakraniellen Hirntumoroperationen ohne und mit Neuronavigation. In: *Tagungsband der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie (CURAC), 2007*
- [Bor07] P. BORSAY: Zahnimplantate & Co.: die Implantologie in der modernen Zahnheilkunde. *Trias, 2007*
- [BR01] H.D. BURKHARD, M. RICHTER: On the Notion of Similarity in Case-Based Reasoning and Fuzzy Theory. In: *Soft Computing in Case-Based Reasoning, Springer, 29 - 46, 2001*
- [Bra07] M. BRAUN: Analyse und exemplarische Umsetzung von Operationsplanungstechniken für MediAssist. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Studienarbeit, 2007*
- [Bra09] M. BRAUN: Wissensbasierte Modellierung eines chirurgischen Eingriffs für ein kontextbezogenes Assistenzsystem. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Diplomarbeit, 2009*
- [BPF+08a] T. BLUM, N. PADOY, H. FEUSSNER, N. NAVAB: Workflow mining for visualization and analysis of surgeries. In: *International Journal of Computer Aided Radiology and Surgery, Volume 3, Number 5, 379-386, 2008*
- [BPF+08b] T. BLUM, N. PADOY, H. FEUSSNER, N. NAVAB: Modeling and Online Recognition of Surgical Phases Using Hidden Markov Models. In: *Lecture Notes in Computer Science, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI, Volume 5242, 627-635, 2008*



- [BSM+08] M. BAUMHAUER, T. SIMPFENDÖRFER, B. MÜLLER-STICH, D. TE-  
BER, C. GUTT, J. RASSWEILER, H. MEINZER, I. WOLF: Soft tissue na-  
vigation for laparoscopic partial nephrectomy. In: *International Journal of  
Computer Aided Radiology and Surgery, Volume 3, Numbers 3-4, 2008*
- [BSN07] T. BLUM, T. SIELHORST, N. NAVAB: Advanced Augmented Reality  
Feedback for Teaching 3D Tool Manipulation. In: *New Technology Frontiers  
in Minimally Invasive Therapy, 223-236, 2007*
- [BSN06] C. BICHLMEIER, T. SIELHORST, N. NAVAB: The Tangible Virtual Mir-  
ror: New Visualization Paradigm for Navigated Surgery. In: *Proceedings In-  
ternational Workshop on Augmented Reality environments for Medical Im-  
aging and Computer-aided Surgery, 2006*
- [BSP+93] A. BIER, M. STONE, K. PIER, W. BUXTON, T. DEROSE: Toolglass  
and magic lenses: The see-through interface. In: *Proceedings of the 20th an-  
nual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1993*
- [BRS06] M. BOEKER, D. RAUFI, S. SCHULZ: Deskriptions-Logik basierte  
räumlich-topologische Repräsentation anatomischer Strukturen mit dem Re-  
gion Connection Calculus In: *Tagungsband 51. Jahrestagung der Gesellschaft  
für Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie, 2006*
- [BW97] H. BOCKHORN, R. WEINER: Manual der laparoskopischen Chirurgie:  
Ein Ratgeber für den Chirurgen. Chapman & Hall, 1997
- [BZ06] O. BODENREIDER, S. ZHANG: Comparing the representation of anatomy  
in the FMA and SNOMED CT. In: *AMIA Symposium Proceedings, 46-50,  
2006*
- [Cam09] CAMLOG BIOTECHNOLOGIES AG. Online-Quelle: Chirurgisches Vor-  
gehen mit dem SCREW-Line Implantat. <[http://www.camlog.de/downloads-  
links/anwenderinformationen](http://www.camlog.de/downloads-links/anwenderinformationen)>, 2009.10.15
- [CK05] K. CLEARY, A. KINSELLA: OR 2020: The Operating Room of the Future.  
In: *Journal of Laparoendoscopic and Advanced Surgical Techniques, Part A,  
495-500, 2005*
- [Dac04] R. DACHSELT: Eine deklarative Komponentenarchitektur und Interak-  
tionsbausteine für dreidimensionale multimediale Anwendungen. *Technische  
Universität Dresden, Lehrstuhl für Multimedialechnik, Dissertation, 2004*
- [DBT+04] C. DICKHAUS, C. BURGHARDT, C. TEMPANY, A. D'AMICO, S. HA-  
KER, R. KIKINIS, H. WÖRN: Workflow Modeling and Analysis of Computer  
Guided Prostate Brachytherapy under MR Imaging Control. In: *Proceedings  
of Medicine Meets Virtual Reality 12, 2004*

- [Dij59] E. DIJKSTRA: A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik*, 269-271, 1959
- [Don04] M. DONNELLY: On Parts and Holes: The Spatial Structure of the Human Body. In: *Proceedings of the 11th World Congress on Medical Informatics*, 2004
- [Dor07] O. DORNBLÜTH: Pschyrembel®: Klinisches Wörterbuch. 261. Auflage, De Gruyter, 2007
- [Dre07] M. DRENTSCHEW: Entwurf und Realisierung eines Visualisierungsmoduls für ein situationsbezogenes System der Erweiterten Realität. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Studienarbeit*, 2007
- [FBS05] J. FISCHER, D. BARTZ, W. STRASSER: Intuitive Lightweight User Interaction for Medical Augmented Reality. In: *Proceedings of vision, modeling and visualization*, 2005
- [FGJ97] M. FERNANDEZ-LOPEZ, A. GOMEZ-PEREZ, N. JURISTO: METHONTOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering. In: *AAAI Technical Report*, 1997
- [FLR+98] H. FUCHS, M. LIVINGSTON, R. RASKAR, D. COLUCCI, K. KELLER, A. STATE, J. CRAWFORD, P. RADEMACHER, S. DRAKE, A. MEYER: Augmented Reality Visualization for Laparoscopic Surgery. In: *Lecture Notes in Computer Science, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI, Volume 1496, 934-944*, 1998
- [GC99] J. GROSJEAN, S. COQUILLART: The magic mirror: A metaphor for assisting the exploration of virtual worlds. In: *Proceedings Spring Conference on Computer Graphics*, 1999
- [GHJ+01] E. GAMMA, R. HELM, R. JOHNSON, J. VLISSIDES: Entwurfsmuster. Elemente wiederverwendbarer Software. Addison Wesley, 2001
- [Gie05] B. GIESLER: Brillenbasierte Erweiterte Realität zur Unterstützung der kommandierenden und kommentierenden Zusammenarbeit mit Servicerobotern. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Dissertation*, 2005
- [GLB05] R. GRASSET, J. LOOSER, M. BILLINGHURST: A step towards a multi-modal ar interface: A new handheld device for 3d interaction. In: *Proceedings Fourth IEEE and ICM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2005

- [Gom04] A. GOMEZ-PEREZ: Ontology Evaluation. In: *Handbook on Ontologies*, 251-273, 2004
- [GP77] I. GOLDSTEIN, S. PAPERT: Artificial Intelligence, Language and the Study of Knowledge. In: *Cognitive Science: A Multidisciplinary Journal, Volume 1, Issue 1*, 84-123, 1977
- [Gru93] T. GRUBER: A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. In: *Knowledge Acquisition Volume 5, Issue 2*, 199-220, 1993
- [Gua98] N. GUARINO: Formal Ontology and Information Systems. In: *Formal Ontology in Information Systems*, 3-15, 1998
- [Hac09] V. HACKENBROCH: Im chirurgischen Cockpit. In: *Die neue Kunst des Heilens, Spiegel Wissen, Nr. 2*, 2009
- [Hei80] G. HEIMKE: Dental implants: materials and systems. *Hanser*, 1980
- [HWE+02] H. HOPPE, J. RACZKOWSKY, H. WÖRN, S. HASSFELD, J. MOCTEZUMA: Ein Prototyp zur Realisierung projektorbasierter Erweiterter Realitäten in der Chirurgie. In: *Tagungsband Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik*, 2002
- [HWE+06] S. HEINING, S. WIESNER, E. EULER, N. NAVAB: Pedicle screw placement under video-augmented fluoroscopic control. First clinical application in a cadaver study. In: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Volume 1*, 189-190, 2006
- [Ima09] THE IMAGING SOURCE GMBH. Online-Quelle: Produkte: Spezifikation. <[http://www.theimagingsource.com/de\\_DE/products/converters/dfg13941e](http://www.theimagingsource.com/de_DE/products/converters/dfg13941e)>, 2009.10.15
- [Int08] INTERNATIONAL HEALTH TERMINOLOGY STANDARDS DEVELOPMENT ORGANISATION. Online-Quelle: SNOMED Clinical Terms User Guide. <<http://www.ihtsdo.org>>, 2008.08.10
- [JM07] P. JANNIN, X. MORANDI: Surgical models for computer-assisted neurosurgery. In: *NeuroImage, Volume 37, Issue 3*, 783-791, 2007
- [JVL+07] A. JAMES, D. VIEIRA, B. LO, A. DARZI, G. YANG: Eye-Gaze Driven Surgical Workflow Segmentation. In: *Lecture Notes in Computer Science, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI, Volume 4792*, 110-117, 2007

- [JRM+01] P. JANNIN, M. RAIMBAULT, X. MORANDI, E. SEIGENEURET, B. GIBAUD: Design of a Neurosurgical Procedure Model for Multimodal Image-Guided Surgery. In: *International Congress Series, Volume 1230, Computer Assisted Radiology and Surgery, June 2001, 102-106, ISSN 0531-5131, DOI: 10.1016/S0531-5131(01)00025-5*.
- [Kat09] D. KATIC: Entwurf und Implementierung eines wissensbasierten Ansatzes für eine kontextbezogene Assistenz beim Setzen von Dentalimplantaten. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Diplomarbeit, 2009*
- [Kav09] KAVO DENTAL GMBH. Online-Quelle: Winkelstücke: C3-C09 (ohne Licht). <<http://www.kavo.com>>, 2009.10.15
- [KH03] D. KRAGIC, G. HAGER: Task modelling and specification for modular sensory based human-machine cooperative systems. In: *Proceedings International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003*
- [Kue98] A. KUEBLER, J. MUEHLING: Leitlinien für die Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. *Springer, 1998*
- [Kon07] KONICAMINOLTA: Online-Quelle: Optische 3D-Messtechnik. <<http://www.konicaminolta-3d.com>>, 2007.01.15
- [LB96] M. LENZ, H.D. BURKHARD: Case retrieval nets: Basic ideas and extensions. In: *Lecture Notes in Computer Science, KI-96: Advances in Artificial Intelligence, Volume 1137, 227-239, 1996*
- [LSM+06] H. LIN, I. SHAFRAN, T. MURPHY, A. OKAMURA, D. YUH, G. HAGER: Automatic Detection and Segmentation of Robot-Assisted Surgical Motions. In: *Lecture Notes in Computer Science, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI, Volume 3749, 802-810, 2006*
- [MIC+01] C. MACKENZIE, A. IBBOTSEN, C. LOMAX: Hierarchical Decomposition of Laparoscopic Surgery: A Human Factors Approach to Investigating the Operating Room Environment. In: *Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies, Volume 10, Issue 3 May 2001, 121-127, 2001*
- [Min75] M. MINSKY: A Framework for representing knowledge. In: *The Psychology of Computer Vision, 211-277, 1975*
- [MNS+07] R. MUDUNURI, T. NEUMUTH, G. STRAUSS, A. DIETZ, O. BURGERT: Ontological Enhancement for Computer Assisted Functional Endoscopic Sinus Surgery. In: *Tagungsband der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie (CURAC), 2007*

- [Mun01] J. MUENCHENBERG: Rechnergestützte Operationsplanung in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. *Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2001*
- [NBM99] N. NAVAB, A. BANI-HASHEMI, M. MITSCHKE: Merging visible and invisible: two camera-augmented mobile C-arm (CAMC) applications. In: *Proceedings 2nd International Workshop on Augmented Reality (IWAR), 1999*
- [NDM+06] T. NEUMUTH, N. DURSTEWITZ, M. FISCHER, G. STRAUSS, A. DIETZ, J. MEIXENSBERGER, P. JANNIN, K. CLEARY, H. LEMKE, O. BURGERT: Structured Recording of Intraoperative Surgical Workflows. In: *Proceedings SPIE, Volume 6145, 61450A, doi: 10.1117/12.653462, 2006*
- [NM08] B. NEUMANN, R. MÖLLER: *On Scene Interpretation with Description Logics*. In: *Image and Vision Computing, Volume 26, Issue 1, 82-101, 2008*
- [NMS+07] T. NEUMUTH, R. MUDUNURI, G. STRAUSS, J. MEIXENSBERGER, H. LEMKE, O. BURGERT: SWAN-Suite: Ein Software-Framework für Chirurgische Prozessmodelle. In: *Tagungsband der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie (CURAC), 2007*
- [NMS+08] T. NEUMUTH, S. MANSMANN, M. SCHOLL, O. BURGERT: Data Warehousing Technology for Surgical Workflow Analysis. In: *Proceedings International Symposium on Computer-Based Medical Systems, 2008*
- [NSS+06] T. NEUMUTH, S. SCHUMANN, G. STRAUSS, P. JANNIN, J. MEIXENSBERGER, A. DIETZ, H. LEMKE, O. BURGERT: Visualization Options for Surgical Workflows. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery, 2006*
- [NTE+07] T. NEUMUTH, C. TRANTAKIS, F. ECKHARDT, M. DENGL, J. MEIXENSBERGER, A. DIETZ, O. BURGERT: Supporting the Analysis of Intervention Courses with Surgical Process Models on the Example of Fourteen Microsurgical Lumbar Disectomies. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery, 2007*
- [Nor02] NORTHERN DIGITAL INC (NDI). Online-Quelle: NDI products: Polaris, 2002. <<http://ndigital.com/polaris.html>>, 2002.08.02
- [NR08] N. NOY, L. RUBIN: Translating the Foundational Model of Anatomy into OWL. In: *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, Volume 6, Issue 2, 133-136, 2008*
- [Pfe06] S. PFEIFFER: Interaktive graphische Schnittplanung mit Mediframe zur Visualisierung in Inpres. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Studienarbeit, 2006*

- [PHF+07] N. PADOY, M. HORN, H. FEUSSNER, M. BERGER, N. NAVAB: Recovery of Surgical Workflow: A Model-based Approach. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery, 2007*
- [Pla07] S. PLATZEK: *Modellbasierte Inzisions-Erkennung für ein chirurgisches Assistenzsystem. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Diplomarbeit, 2007*
- [RBC+01] M. ROSENTHAL, A. STATE, J. LEE, G. HIROTA, J. ACKERMAN, K. KELLER, E. PISANO, M. JIROUTEK, K. MULLER, H. FUCHS: Augmented reality guidance for needle biopsies: A randomized, controlled trial in phantoms. In: *Lecture Notes in Computer Science, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI, Volume 2208, 240-248, 2001*
- [RCC92] D.A. RANDELL, Z. CUI, A.G. COHN: A spatial logic based on regions and connection. In: *Proceedings 3rd International Conference on Knowledge Representation and Reasoning, 1992*
- [Rei92] U. REIMER: Einführung in die Wissensrepräsentation. *B.G. Teubner, 1992*
- [Rei06] B. REITINGER, A. BORNIK, B. REICHEL, D. SCHMALSTIEG: Liver Surgery Planning using Virtual Reality. In: *Proceedings IEEE Computer Graphics and Applications, Volume 26, Number 6, 2006*
- [Ren02] J. RENZ: The Region Connection Calculus. In: *Qualitative Spatial Reasoning with Topological Information, 2002*
- [RM03] C. ROSSE, J. MEJINO: A reference ontology for biomedical informatics: the Foundational Model of Anatomy. In: *Journal of Biomedical Informatics, Volume 36, Issue 6, 478-500, 2003*
- [RM08] C. ROSSE, J. MEJINO: The Foundational Model of Anatomy Ontology. In: *Computational Biology, Anatomy Ontologies for Bioinformatics, 59-117, 2008*
- [RSH+02] J. ROSEN, M. SOLAZZO, B. HANNAFORD, M. SINANAN: Objective Evaluation of Laparoscopic Skills Based on Haptic Information and Tool/Tissue Interactions. In: *Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality 10, 2002*
- [RBC+06] J. ROSEN, J. BROWN, L. CHANG, M. SINANAN, B. HANNAFORD: Generalized Approach for Modeling Minimally Invasive Surgery as a Stochastic Process Using a Discrete Markov Model. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Volume 53, Number. 3, 399-413, 2006*

- [RSS+09] S. RÖHL, S. SPEIDEL, G. SUDRA, T. GEHRIG, B. P. MÜLLER-STICH, C. GUTT, R. DILLMANN: A Surface Model for Intraoperative Soft Tissue Registration. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery, 2009*
- [Sal03] T. SALB: Risikoreduktion in der Mund-Kiefer-Gesichts-Chirurgie mittels rechnerbasierter Modellierung und Erweiterter Realität. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Dissertation, 2003*
- [SBN05] T. SIELHORST, T. BLUM, N. NAVAB: Synchronizing 3D movements for quantitative comparison and simultaneous visualization of actions. In: *Proceedings Fourth IEEE and ICM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2005*
- [SBR97] R. STUDER, V. BENJAMINS, V. RICHARD, D. FENSEL: Knowledge Engineering: Principles and Methods. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren, Bericht, 1997*
- [SBS+08] S. SPEIDEL, J. BENZKO, G. SUDRA, P. AZAD, B. MÜLLER-STICH, C. GUTT, R. DILLMANN: Automatic classification of minimally invasive instruments based on endoscopic image sequences. In: *Proceedings SPIE, Volume 7261, 2008*
- [SBS+09] G. SUDRA, A. BECKER, S. SPEIDEL, M. BRAUN, B. MÜLLER-STICH, R. DILLMANN: Estimating Similarity of Surgical Situations with Case-Retrieval-Nets. In: *Proceedings Medicine Meets Virtual Reality 17, 2009*
- [Sch05] O. SCHORR: Operationsplanung und -steuerung in der Chirurgie. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Prozessrechentchnik, Automation und Robotik, Dissertation, 2005*
- [SCH03] R.M. SATAVA, A. CUSCHIERI, J. HAMDORF: Metrics for objective Assessment. In: *Journal Surgical Endoscopy, Volume 17, Number 2, 220-226, 2003*
- [SE02] N. SCHWENZER, M. EHRENFELD: Spezielle Chirurgie, Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde (2). *Georg Thieme, 2002*
- [SEP+05b] G. SUDRA, R. MARMULLA, T. SALB, T. GOCKEL, G. EGGERS, B. GIESLER, S. GHANAI, R. DILLMANN, S. HASSFELD: Technical Experience from Clinical Studies with INPRES and a Concept for a Miniature Augmented Reality System. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery, 2005*

- [SEP+06] G. SUDRA, G. EGGERS, S. PFEIFFER, S. ULBRICH, R. MARMULLA, J. MÜHLING, R. DILLMANN: Exploring Virtual Objects with a See-Through-Based Augmented Reality System in Craniofacial Surgery. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery, 2006*
- [SKB+09] G. SUDRA, D. KATIC, M. BRAUN, S. SPEIDEL, G. CASTRILLON-OBERNDORFER, G. EGGERS, R. MARMULLA, R. DILLMANN: Wissensbasierte Modellbildung und Situationsinterpretation für eine kontextbezogene Chirurgieassistenz. In: *Proceedings Lecture Notes in Informatics, 2009*
- [KSS+10] D. KATIC, G. SUDRA, S. SPEIDEL, G. CASTRILLON-OBERNDORFER, G. EGGERS, R. DILLMANN: Context-aware augmented reality for dental implant surgery. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery, 2010*
- [SKS06] V. SCHUMPELICK, R. KASPERK, M. STUMPF: Operationsatlas Chirurgie. *Georg Thieme, 2006*
- [SKS+08] S. SPEIDEL, M. KLEINERT, G. SUDRA, S. SCHALCK, B. MÜLLER-STICH, C. GUTT, R. DILLMANN: 3D-Reconstruction from endoscopic image sequences for intraoperative assistance. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery, 2008*
- [SMS+05a] G. SUDRA, R. MARMULLA, T. SALB, S. GHANAI, G. EGGERS, B. GIESLER, S. HASSFELD, J. MÜHLING, R. DILLMANN: First Clinical Test with the Augmented Reality System INPRES. In: *Proceedings Medicine Meets Virtual Reality 13, 2005*
- [Son98] SONY CORPORATION. *Personal LCD Display LDI-100B/100BE, 1998*
- [Spe09] S. SPEIDEL: Analyse endoskopischer Bildsequenzen für ein laparoskopisches Assistenzsystem. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Dissertation, 2009*
- [SSB+07] G. SUDRA, S. SPEIDEL, A. BECKER, G. AL-MAKADSI, B. MÜLLER-STICH, R. DILLMANN: Modellierung des Operationsablaufs für ein chirurgisches Assistenzsystem. In: *Tagungsband der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie (CURAC), 2007*
- [SSM+07a] G. SUDRA, S. SPEIDEL, B. MÜLLER-STICH, R. DILLMANN: Situation Modelling and Situation Recognition for a Context-Aware Augmented Reality System. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery, 2007*



- [SSM+07b] G. SUDRA, S. SPEIDEL, B. MÜLLER-STICH, C. GUTT, R. DILLMANN: MEDIASSIST - Medical Assistance for Intraoperative Skill Transfer in Minimally Invasive Surgery. In: *Proceedings SPIE, Volume 6509, 2007*
- [SSP+08] G. SUDRA, S. SPEIDEL, S. PLATZEK, B. MÜLLER-STICH, R. DILLMANN: Augmented Reality Assistance for Realization of Incision Planning and Model-based Analysis of the Modified Surface Model. In: *Proceedings Medicine Meets Virtual Reality 16, 2008*
- [SSS+01] S. STAAB, R. STUDER, H.P. SCHNURR, Y. SURE: Knowledge Processes and Ontologies. In: *IEEE Intelligent Systems, Volume 16, Issue 1, 26-34, 2001*
- [SSS02] S. STOEV, D. SCHMALSTIEG, W. STRASSER: The through-the-lens metaphor: taxonomy and application. In: *Proceedings IEEE Virtual Reality Conference, 2002*
- [SSS+03] M. SCHNAIDER, H. SEIBERT, B. SCHWALD, T. WELLER, S. WE-SARG, P. ZOGAL: Medarpa - Ein Augmented Reality System für Minimal-Invasive Interventionen. In: *Proceedings Medicine Meets Virtual Reality 11, 2003*
- [SSS+08] S. SPEIDEL, G. SUDRA, J. SENEMAUD, M. DRENTSCHEW, B. MÜLLER-STICH, C. GUTT, R. DILLMANN: Recognition of Risk Situations Based on Endoscopic Instrument Tracking and Knowledge Based Situation Modeling. In: *Proceedings SPIE, Volume 6918, 2008*
- [SVK+06] F. SAUER, S. VOGT, A. KHAMENE, S. HEINING, E. EULER, M. SCHNEBERGER, K. ZUERL, W. MUTSCHLER: Augmented Reality Visualization for Thoracoscopic Spine Surgery. In: *Proceedings SPIE, Volume 6141, 2006*
- [SWM04] M. SMITH, C. WELTY, D. MCGUINNESS: OWL Web Ontology Language Guide. Online-Quelle: W3C Recommendation, <<http://www.w3.org/TR/owl-guide/>>, 2009.10.15
- [SZS+07] S. SPEIDEL, M. ZENS, G. SUDRA, K. WELKE, B. MÜLLER-STICH, C. GUTT, R. DILLMANN: Bildbasierte Erkennung chirurgischer Materialien für ein situationsbezogenes Assistenzsystem in der minimalinvasiven Chirurgie. In: *Tagungsband der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie (CURAC), 2007*
- [SZS+09] S. SPEIDEL, T. ZENTEK, G. SUDRA, T. GEHRIG, B. MÜLLER-STICH, C. GUTT, R. DILLMANN: Recognition of surgical skills using Hidden Markov Models. In: *Proceedings SPIE, Volume 7261, 2009*

- [TAP+08] J. TRAUB, S. AHMADI, N. PADOY, L. WANG, S. HEINING, P. JANIN, N. NAVAB: Workflow Based Assessment of the Camera Augmented Mobile C-arm System. In: *Proceedings International Workshop on Augmented Reality for Medical Imaging and Computer-aided Surgery*, 2008
- [TF05] M. TADDEO, L. FLORIDI: Solving the symbol grounding problem: A critical review of fifteen years of research. In: *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, Volume 17, Issue 4, 419-445, 2005
- [TFB+04] J. TRAUB, M. FEUERSTEIN, M. BAUER, E. SCHIRMBECK, H. NAJAFI, R. BAUERNSCHMITT, G. KLINKER: Augmented Reality for Port Placement and Navigation in Robotically Assisted Minimally Invasive Cardiovascular Surgery. In: *Proceedings Computer Assisted Radiology and Surgery*, Volume 1268, 735-740, 2004
- [TVM+03] D. TREVISAN, J. VANDERDONCKT, B. MACQ, C. RAFTOPOULOS: Modeling Interaction for Image-Guided Procedures. In: *Proceedings SPIE*, Volume 5029, 2003
- [Web08] D. WEBER: Entwicklung eines Interaktionsframeworks für ein ER-basiertes chirurgisches Assistenzsystem. *Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Informatik, Lehrstuhl Prof. Dillmann, Diplomarbeit*, 2008
- [WMB03] E. WOODS, P. MASON, M. BILLINGHORST: Magicmouse: an inexpensive 6-degree-of-freedom mouse. In: *Proceedings of the first international conference on computer graphics and interactive techniques*, 2003
- [Wol97] RICHARD WOLF GMBH: Gebrauchsanweisung Lichtprojektor 4220 (GA-A 089), 2000
- [Wol00] RICHARD WOLF GMBH: Gebrauchsanweisung 3D Endocam 5535 (GA-A 183), 2000
- [Wol01] RICHARD WOLF GMBH: Gebrauchsanweisung Stereo-Endoskope (GA-A 132), 2001
- [ZSG+03] F. ZEILHOFER, R. SADER, G. GOEBBELS, E. KEEVE, Z. KROL, F. HASENBRINK, A. GRA: Entwicklung und Einsatz eines Augmented Reality-Systems (AR-SysTricorder) für die intraoperative Navigation am Beispiel des individuellen Transplantatdesigns. In: *Proceedings International Symposium on Computer Aided Surgery around the Head*, 2003





Chirurgische Assistenzsysteme unterstützen den Chirurgen bei der Durchführung einer Operation. Durch ihren Einsatz sollen das Patientenrisiko gesenkt und die chirurgische Belastung verringert werden. Ein Ziel zukünftiger Assistenzsysteme ist die Bereitstellung einer kontextbezogenen Unterstützung des Chirurgen. Dies erfordert die Erfassung und Interpretation der aktuell vorliegenden Operationssituation unter Berücksichtigung der patientenindividuellen Operationsplanung sowie Methoden zur Erzeugung einer geeigneten Unterstützung. Das Anliegen dieser Arbeit ist es, diesbezüglich einen Beitrag zu leisten. Leitgedanke des entwickelten Lösungsansatzes sind die starke Einbeziehung einer Wissensbasis sowie die Verwendung eines brillenbasierten Visualisierungssystems.

ISBN 978-3-86644-552-9

