

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg



Fakultät für Informatik  
Institut für Simulation und Graphik

Diplomarbeit

Haptische Interaktion zur Planung von  
Nasennebenhöhlen-Operationen

Kristina Stampe





Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Institut für Simulation und Grafik  
Fakultät für Informatik  
Postfach 4120  
39016 Magdeburg

Diplomarbeit

# Haptische Interaktion zur Planung von Nasennebenhöhlen-Operationen

<i>von:</i>	KRISTINA STAMPE
<i>geboren am:</i>	04.05.1981
<i>in:</i>	Berlin
<i>Matrikelnummer:</i>	160366
<i>1. Gutachter:</i>	Prof. Dr.-Ing. BERNHARD PREIM
<i>2. Gutachter:</i>	Dr.-Ing. MARCEL GÖTZE
<i>Betreuer:</i>	Prof. Dr.-Ing. BERNHARD PREIM Dipl.-Ing. ARNO KRÜGER
<i>Bearbeitungszeitraum:</i>	14.02.2006 - 14.08.2006



## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, Kristina Stampe (Matrikel-Nr. 160366), die vorliegende Arbeit allein und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen angefertigt zu haben.

Kristina Stampe, August 2006



## Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinen beiden Betreuern Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim und Dipl.-Ing. Arno Krüger bedanken, die mir während des gesamten Bearbeitungszeitraums eine hervorragende Betreuung zu kommen ließen. Mein Dank gilt darüber hinaus allen anderen Mitgliedern der Arbeitsgruppe Visualisierung, die immer ein offenes Ohr für Fragen und Bitten hatten. Weiterhin danke ich Dr. med. Ilka Hertel und Dr.med. Gero Strauß vom Universitätsklinikum Leipzig, die mir mit ihren fachlichen Ratschlägen zur Seite standen und Dr. Felix Ritter von MEVIS für die technische Unterstützung.

Besonderer Dank gilt meinen fleißigen Korrekturlesern Christian Schumann, Katharina Plugge und Reik Jarosch, die mit ihren wertvollen Ratschlägen zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern und Großeltern bedanken, die mich bei allem, was ich je tat, uneingeschränkt unterstützt haben.

Kristina Stampe, August 2006





# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Medizinischer Hintergrund</b>	<b>9</b>
2.1. Endoskopie und minimal-invasive Chirurgie . . . . .	9
2.1.1. Durchführung der Endoskopie . . . . .	9
2.1.2. Der Aufbau des Endoskops . . . . .	10
2.1.3. Anwendungsbereiche der Endoskopie . . . . .	11
2.1.4. Vorteile und Anforderungen minimal-invasiver Eingriffe . . . . .	12
2.1.5. Computergestützte Operationsplanung . . . . .	13
2.2. Minimal-invasive Nasennebenhöhlen-Operationen . . . . .	14
2.2.1. Anatomie der Nasennebenhöhlen . . . . .	14
2.2.2. Erkrankung der Nasennebenhöhlen . . . . .	15
2.2.3. Diagnostik . . . . .	16
2.2.4. Indikationsstellung und Planung der Operation . . . . .	18
2.2.5. Durchführung der Operation . . . . .	18
2.2.6. Computergestützte Therapieplanung für NNH-Eingriffe . . . . .	19
2.3. Zusammenfassung . . . . .	20
<b>3. Computergestützte Therapieplanung in der minimal-invasiven Chirurgie</b>	<b>21</b>
3.1. Virtuelle Endoskopie und computergestützte Operationsplanung . . . . .	21
3.1.1. Virtuelle Endoskopie für die Diagnose . . . . .	23
3.1.2. Computergestützte Therapie . . . . .	24
3.1.3. Computergestütztes Training . . . . .	25
3.1.4. Anwendbarkeit für die Operationsplanung . . . . .	28
3.2. Erstellung und Darstellung virtueller Modelle . . . . .	30
3.2.1. Bildgebende Verfahren . . . . .	30
3.2.2. Bildvorbereitung . . . . .	31
3.2.3. Segmentierung . . . . .	31
3.2.4. Visualisierung medizinischer Modelle . . . . .	33
3.2.5. Konsequenzen für Planungssysteme . . . . .	34
3.3. Interaktion für die Operationsplanung . . . . .	35
3.3.1. Die Benutzungsschnittstelle . . . . .	35
3.3.2. Interaktionstechniken für die 3D Interaktion . . . . .	37
3.3.3. Interaktionsmetaphern . . . . .	38
3.3.4. Eingabegeräte . . . . .	39
3.3.5. 3D-Interaktionsaufgaben . . . . .	41

3.3.6. Konsequenzen für die Interaktion . . . . .	43
3.4. Zusammenfassung . . . . .	44
<b>4. Haptische Interaktion</b>	<b>45</b>
4.1. Überblick . . . . .	45
4.2. „Human Haptics“ - psychologischer Hintergrund . . . . .	47
4.3. „Machine Haptics“ - technischer Hintergrund . . . . .	49
4.3.1. Kategorien haptischer Geräte . . . . .	49
4.3.2. Kraftrückkopplungsgeräte für die computergestützte Medizin . . . . .	50
4.4. „Computer Haptics“ - algorithmischer Hintergrund . . . . .	51
4.4.1. Die Kollisionserkennung . . . . .	52
4.4.2. Berechnung der Rückgabekräfte . . . . .	54
4.4.3. Das haptische Rendering von Volumendaten . . . . .	57
4.4.4. Haptisches Feedback für die Planung von NNH-Eingriffen . . . . .	60
4.5. Zusammenfassung . . . . .	61
<b>5. Entwurf</b>	<b>63</b>
5.1. Anforderungsanalyse . . . . .	63
5.2. Überblick . . . . .	64
5.3. Darstellung der medizinischen Datensätze . . . . .	66
5.3.1. 3D-Visualisierung . . . . .	66
5.3.2. Schichtbilder zur Orientierung . . . . .	68
5.4. Navigation . . . . .	69
5.4.1. Segmentierung . . . . .	72
5.4.2. Datenaufbereitung . . . . .	73
5.4.3. Berechnung des Distanzfeldes . . . . .	73
5.4.4. Gradientenberechnung . . . . .	76
5.4.5. Kraftberechnungen . . . . .	78
5.4.6. Die Steuerung der Kamera zur Laufzeit . . . . .	79
5.5. Zusammenfassung . . . . .	80
<b>6. Umsetzung</b>	<b>81</b>
6.1. Verwendete Hardware . . . . .	81
6.2. Verwendete Software . . . . .	83
6.2.1. Haptische Programmierung . . . . .	84
6.2.2. Programmierung mit der HDAPI . . . . .	85
6.2.3. Medizinische Visualisierung . . . . .	88
6.2.4. Erstellung von Modulen in MeVisLab . . . . .	89
6.2.5. Weitere Softwaretools . . . . .	90
6.3. Übersicht . . . . .	90
6.4. Vorverarbeitung der Voxeldaten . . . . .	92
6.5. Interaktion . . . . .	94
6.6. Visualisierung . . . . .	96

6.7. Ergebnis . . . . .	98
<b>7. Evaluierung</b>	<b>99</b>
7.1. Fragestellungen und Versuchsaufbau . . . . .	99
7.2. Durchführung und Auswertung . . . . .	100
7.3. Schlussfolgerungen . . . . .	102
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>103</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>105</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>113</b>



# 1. Einleitung

Seit Ende der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts ist ein Wandel in einem Teil der chirurgischen Praxis zu beobachten. Wo traditionelle Techniken der *Radikalchirurgie* eine breite Freilegung des Zielorgans erforderten, ist es das Ziel der neuen Verfahren, schonende Eingriffe durchzuführen, bei denen möglichst wenig Gewebe verletzt wird. Große operative Zugänge werden dabei durch mehrere kleinere Zugänge ersetzt. Durch diese führt der Chirurg das *Endoskop*, ein optisches Instrument, das Bilder aus dem Körperinneren nach außen überträgt, und weitere Spezialinstrumente zum eigentlichen Operationsort ein. Diese neuen Techniken werden als *minimal-invasive Chirurgie*, *Schlüsselloch-Chirurgie* oder *endoskopische Chirurgie* bezeichnet.

Die Vorteile der minimal-invasiven Chirurgie für den Patienten - vor allem weniger Schmerzen und eine schnellere Genesung - gehen mit Umstellungen für den Operateur einher. Waren bei traditionellen Operationen die „goldenen Hände“ das wichtigste Instrument eines Chirurgen, kann sich dieser bei endoskopischen Operationen nur noch bedingt auf seinen visuellen Sinn und seinen Tastsinn verlassen, da ein direktes Sehen und Ertasten der Organe nicht möglich ist. Für die Durchführung der Eingriffe ist große Erfahrung, ein sehr gutes räumliches Vorstellungsvermögen sowie manuelle Geschicklichkeit notwendig. Durch die eingeschränkte Sicht auf das Operationsfeld muss sich der Chirurg bei der Navigation durch die Hohlräume an *Landmarken*, das sind markante Objekte der Anatomie, orientieren. Durch anatomische Variationen oder pathologische Veränderungen kann die Orientierung im Körperinneren erschwert werden. Eine Planung der Eingriffe ist deshalb unverzichtbar.

Der aktuelle Stand der bildgebenden Verfahren ermöglicht die Aufnahme von hochauflösenden 3D-Datensätzen. Diese werden zur Diagnose und Therapieplanung eingesetzt. Daneben ist unter Anwendung von Techniken aus der Bildverarbeitung und Bilddarstellung die Visualisierung der Bilddaten in Form von dreidimensionalen Modellen möglich. Damit können komplexe Lagebeziehungen, anatomische Strukturen oder funktionelle Informationen in einer vereinfachten und verständlichen Art und Weise repräsentiert werden. Bei der *Operationsplanung* ermöglichen die Visualisierungen von Patientendaten dem Chirurgen eine Abwägung verschiedener Methoden und die Minimierung von Risiken. Die räumliche Repräsentation kann zusätzlich als „Landkarte“ für die Operation dienen und damit die intraoperative Orientierung unterstützen.

Auch im Bereich der *Nasenbenhöhlen*-Eingriffe haben sich minimal-invasive Operationstechniken aufgrund ihrer schonenderen Eingriffe gegenüber der Radikalchirurgie durchgesetzt.

Bisherige computergestützte Systeme für dieses Gebiet, die Ansätze für den Entwurf eines Planungssystems bieten, lassen sich in zwei Kategorien einordnen.

- Der erste Bereich unterstützt die Visualisierung von realen Patientendaten für die Diagnose und Therapieplanung. Analog zu der optischen Endoskopie wird dieses Verfahren als *virtuelle Endoskopie* bezeichnet. Dazu wird aus MRT- oder CT-Schnittbildern des Patienten ein 3D-Modell generiert. Auf einem vordefinierten Pfad bewegt sich eine virtuelle Kamera durch das Organmodell und zeichnet diese Fahrt aus Sicht eines Endoskops auf. Die Aufnahmen können dann vom Arzt auf pathologische Veränderungen des Gewebes untersucht werden.
- Der zweite Bereich befasst sich mit endoskopischen Eingriffen unter dem Gesichtspunkt einer möglichst realistischen Simulation von Operationen in Echtzeit. Diese Systeme finden ihre Anwendung in der medizinischen Lehre und dem chirurgischen Training. Die dafür genutzten Modelle beruhen auf medizinischen Beispieldatensätzen, wie z.B. dem *VISIBLE HUMAN PROJEKT* (Visible Human 2006), die zuvor aufwendig aufbereitet wurden. Neben einer detaillierten Darstellung und Simulation realer Prozesse, wie der Verformung von Gewebe durch medizinische Instrumente und Blutungen bei der Verletzung von Adern, unterstützen diese Systeme das Training chirurgischer Handgriffe. Dazu werden *Kraftrückkopplungsgeräte* (engl.: force feedback device) eingesetzt, die aktiv Kräfte zurückgeben können und damit den Tastsinn des Benutzers ansprechen. Dadurch kann ein erfühlbarer Kontakt zwischen Instrumentenattrappe und simuliertem Gewebe nachgebildet werden.

Kraftrückkopplungsgeräte bieten sich neben der Simulation möglichst realistischer Eingriffe auch für die Diagnostik und Operationsplanung an computergenerierten Modellen auf der Basis von Patientendaten an. Da Ärzte oftmals keine oder nur wenig Erfahrung im Umgang mit 3D-Umgebungen besitzen und auch die Zeit knapp bemessen ist um sich diese Erfahrung durch Übungen anzueignen werden Werkzeuge, Eingabegeräte und Navigations- und Interaktionsansätze benötigt, die eine intuitive Handhabbarkeit gewährleisten. Sie sollen dem Mediziner bei der Exploration der Daten unterstützen, ohne ein großes Vorwissen zu erfordern. Um eine größere Akzeptanz der Verfahren zu erreichen, bietet es sich an, bereits bestehende Arbeitsweisen aus der medizinischen Praxis auf die virtuelle Umgebung zu übertragen. Hierfür eignen sich 3D-Eingabegeräte. Mit der größeren Anzahl an *Freiheitsgraden* steigt jedoch auch die Schwierigkeit diese zu kontrollieren. Ein zusätzliches Feedback wie bei den Kraftrückkopplungsgeräten, die gleichzeitig Eingabe- und Ausgabegerät sind, kann dazu genutzt werden, um die ansonsten freie Bewegung im dreidimensionalen Raum einzuschränken. Damit geben sie dem Benutzer eine Führung und helfen Fehler zu minimieren.

Es gilt zu untersuchen, inwieweit sich Kraftrückkopplungsgeräte für die medizinische Visualisierung einsetzen lassen, bzw. in der Praxis schon erfolgreich genutzt werden. In der vorliegenden Arbeit stehen dafür insbesondere die Möglichkeiten des Einsatzes für die Operationsplanung im Bereich der *Nasennebenhöhlen* (NNH) im Mittelpunkt. Die Anforderungen dafür wurden in Zusammenarbeit mit Hals-Nasen-Ohren(HNO)-Spezialisten des Universitätsklinikums Leipzig aufgestellt.

---

## Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Systems, das die interaktive Untersuchung von Modellen aufbauend auf realen Patientendaten unterstützt. Dazu bieten sich 3D-Eingabegeräte und Krafrückkopplungsgeräte an, die eine Interaktion im dreidimensionalen Raum ermöglichen. Die Navigation und Interaktion mit den Daten soll möglichst intuitiv sein. Eine genaue Abbildung der realen Welt, wie bei den angesprochenen Simulatoren, ist nicht nötig. Stattdessen wird eine Abstraktion der realen endoskopischen Untersuchung angestrebt, wobei der Fokus auf einer schnellen Aufbereitung der Datensätze und einer Unterstützung der Navigation liegt. Verschiedene Arbeiten behandeln bereits das Thema der „einfachen“ Segmentierung der verschiedenen Strukturen der Nasennebenhöhlen. Die vorliegende Arbeit hingegen beschäftigt sich mit dem Entwurf eines Navigationskonzeptes. Zu diesem gehört neben einer einfachen Bewegungskontrolle auch die Bereitstellung von Navigationshilfsmitteln.

## Gliederung der Arbeit

**Kapitel 2** dient dem Einstieg in die Thematik der optischen Endoskopie und minimal-invasiven Chirurgie und zeigt die veränderten Herausforderungen an das medizinische Personal und die Technik. Anschließend wird auf die speziellen Charakteristika von Nasennebenhöhlenoperationen eingegangen.

**Kapitel 3** befasst sich mit der virtuellen Endoskopie als Methode für die Operationsplanung. Bestehende Systeme unterscheiden sich in der Visualisierung und ihren Interaktionsmöglichkeiten. Ihre Anwendung für die Planung von Nasennebenhöhlenoperationen wird untersucht. Daran schließt sich die Vorstellung bestehender Anwendungen an, insbesondere in Hinblick auf die Interaktion und Navigation in medizinischen Systemen.

**Kapitel 4** behandelt die wahrnehmungspsychologischen Hintergründe der Haptik, die Geräte zur haptischen Interaktion, den Prozess des haptischen Rendering sowie die Algorithmen zur Berechnung der Rückgabekräfte.

**Kapitel 5** der Arbeit spannt mit der Ausarbeitung des Konzepts einen Bogen zwischen Theorie und Umsetzung. Anregungen, Probleme und Herausforderungen, die sich aus den vorhergehenden Kapiteln ergeben haben, werden zusammengefasst. Die Schlussfolgerungen aus ihnen bilden die Basis für das zu entwerfende Konzept. Aus dem allgemeinen Navigationsmodell und den medizinischen Anforderungen lässt sich dann ein konkretes Modell ableiten, das mit Hilfe einer Auswahl von Algorithmen zum haptischen Rendern umgesetzt wird.

**Kapitel 6** beinhaltet die Umsetzung des Konzeptes. Dazu gehört die Vorstellung der benutzen Software und Bibliotheken sowie die Begründung für die getroffene Auswahl. Daran anschließend wird die Implementierung des Entwurfs beschrieben.

Die Evaluierung, die in **Kapitel 7** vorgestellt wird, umfasst verschiedene Untersuchungen mit Probanden. In diesem Kapitel wird dazu auf die Vorbereitung sowie die Durchführung der Tests und die Auswertung der verschiedenen Messgrößen eingegangen.

Im **Kapitel 8** erfolgt eine Zusammenfassung der Arbeit. Daneben wird ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben und weitere Testszenarien und Entwicklungen vorgeschlagen.



## 7. Evaluierung

Die Evaluierung dient der Untersuchung, ob und in wiefern haptisches Feedback die Navigation in medizinischen Datensätzen zur Planung von NNH-Operationen verbessern kann. Eine Zusammenstellung der dafür relevanten Fragestellungen und den Versuchsaufbau beinhaltet der Abschnitt 7.1. Der anschließende Abschnitt 7.2 beschreibt die Durchführung der Evaluierung und die Ergebnisse. Abschnitt 7.3 enthält Überlegungen zur Weiterentwicklung der Technik.

Die vorliegende Arbeit zur computergestützten Planung von NNH-Eingriffen umfasst eine Anforderungsanalyse inklusive Benutzerbefragung und den Entwurf sowie die Umsetzung einer Navigationstechnik für die Kamerasteuerung. Zum Abschluss des Entwicklungsprozesses soll die Navigationstechnik potentiellen Anwendern vorgestellt werden. Eine empirische Evaluierung dient der Abschätzung der Akzeptanz und der Effizienz des haptischen Interface zur Kamerasteuerung. Das gewonnene Benutzerfeedback wird zur Bewertung des entwickelten Interface herangezogen und dient als Orientierung für zukünftige Erweiterungen der Interaktionsmöglichkeiten.

### 7.1. Fragestellungen und Versuchsaufbau

Die Effektivität einer Interaktionstechnik lässt sich über quantitative und qualitative Merkmale messen und vergleichen. Zu den quantitativen Messgrößen gehören u.a. die *Bearbeitungszeit* zwischen dem Beginn und der Beendigung der Aufgabenbewältigung und die *Genauigkeit* mit der das Ziel erreicht wurde. Die qualitativen Merkmale umfassen die *Benutzbarkeit* der Schnittstelle, die *Erlernbarkeit* der Interaktionstechniken, die *räumliche Orientierung* in der virtuellen Szene und die *Zufriedenheit* des Nutzers (Volbracht u. Domik, 2000).

Eine empirische Evaluierung soll die verschiedenen Parameter erfassen und auswerten. Bei der Auswertung der quantitativen Größen besteht dabei das Problem der Vergleichbarkeit der Interaktionstechniken. Im Idealfall unterstützt der Versuchsaufbau verschiedene Techniken und Interaktionsstile, die die Bewältigung derselben Interaktionsaufgabe unterstützen. Um Vergleiche zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine weitere Navigationstechnik in MEVISLAB implementiert. Diese unterstützt die Kamerasteuerung mit einer SPACEMOUSE und nutzt eine Rate Control Technik zur Bewegungskontrolle. Für die Evaluierung der haptischen Interaktion können damit drei verschiedene Interaktionstechniken im direkt-manipulativen Interaktionsstil genutzt werden. Dies sind

- die Navigation mit der SPACEMOUSE als 3D-Eingabegerät,
- die Navigation mit dem PHANTOM ohne die Generierung von Rückgabekräften und

- die Navigation mit dem PHANTOM unterstützt durch ein haptisches Feedback.

Mit diesem Aufbau lassen sich verschiedene Benutzerpräferenzen messen. Der Vergleich zwischen der Navigation mit der SPACEMOUSE und dem PHANTOM als reinem Eingabegerät, lässt Schlussfolgerungen auf die Anwendbarkeit von Rate Control bzw. Position Control Techniken zur egozentrischen Kamerasteuerung in der virtuellen Endoskopie der NNH zu. Der Vergleich zwischen der Kamerasteuerung ohne und mit der Rückgabe von Kräften ermöglicht Feststellungen über den Wirkungsgrad von haptischem Feedback zur Benutzerführung.

Bei der im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Evaluierung steht vor allem die qualitative Bewertung der Navigationstechniken durch den Benutzer im Mittelpunkt. Dazu gehören die subjektive Einschätzung der Benutzbarkeit, Erlernbarkeit, räumlichen Orientierung und Ermüdung sowie eine individuelle Einschätzung des Interface. Für jede der drei Navigationstechniken kann der Proband pro Kriterium eine Bewertung von *sehr hoch* (1) bis *nicht vorhanden* (9) angeben. Die individuelle Bewertung kann zum subjektiven Vergleich der Techniken und zur Angabe von Problemen oder Vorschlägen genutzt werden.

Neben den die Navigation betreffenden Fragestellungen ist ebenfalls die Erhebung persönlicher Daten wichtig. Diese umfassen die persönliche Einschätzung bereits vorhandener Erfahrungen mit verwandten Systemen, Interaktionsstilen und -techniken. Eine Kopie des Fragebogens ist im Anhang A.1 zu finden.

Bei der Evaluierung sollen die Versuchspersonen an einem Modell der NNH verschiedene Navigationstechniken testen. Die Wahl der Hand zur Benutzung der 3D-Eingabegeräte ist dem Probanden überlassen. Auf dem Monitor werden die Sicht des virtuellen Endoskops und die orthogonalen Schichtbilder zur Orientierung präsentiert. Nach einer kurzen Einarbeitungszeit haben die Probanden die Aufgabe, das Modell mit einer der drei vorgeschlagenen Techniken zu untersuchen. Zuerst soll dabei die SPACEMOUSE, dann das PHANTOM ohne Kraftrückkopplung und zuletzt das PHANTOM mit Kraftrückkopplung zur Navigation genutzt werden. Nach jedem Versuch bewertet der Benutzer subjektiv die verschiedenen Kriterien der Interaktion in dem bereits vorgestellten Fragebogen.

### 7.2. Durchführung und Auswertung

Die Evaluierung wurde zunächst in einem kleinen Rahmen an der Universität Magdeburg durchgeführt. Sechs Probanden im Alter zwischen 19 und 31 Jahren haben an der Evaluierung teilgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst. Die Tabelle zeigt die durchschnittliche sowie die minimale und maximale Bewertung der einzelnen Kriterien der Navigationstechniken an. Die Probanden bewerteten ihre Erfahrungen mit Computern und den Eingabegeräten Maus und Tastatur als recht hoch (Durchschnitt 2). Die Erfahrung mit 3D-Eingabegeräten (Durchschnitt 6.3) und Force-Feedback-Geräten (Durchschnitt 5.7) wurden ihrerseits als wesentlich geringer eingeschätzt. Es konnte festgestellt werden, dass die Bewertung der durch das haptische Feedback unterstützten Navigation in fast allen Punkten positiver ausfiel, als bei den anderen Navigationstechniken.

Eigenschaft	SpaceMouse	PHANToMo. K.	PHANToMm. K.
	$\bar{O}(\text{Min/Max})$	$\bar{O}(\text{Min/Max})$	$\bar{O}(\text{Min/Max})$
Erlernbarkeit	2.8 (2/4)	2.7 (1/5)	1.8 (1/4)
Benutzbarkeit	3.7 (3/5)	3.3 (2/5)	2.1 (1/3)
Räuml. Orientierung	3.8 (3/6)	2.3 (1/4)	1.7 (1/2)
Ermüdung	2.7 (1/5)	3.6 (1/7)	2.7 (1/8)
Zufriedenheit	3.9 (2/6)	3 (1/5)	1.9 (1/3)

**Tabelle 7.1.:** Durchschnittliche Bewertung der Navigationstechniken. Die Wertung ging dabei von 1 (sehr hoch) bis 9 (nicht vorhanden). Die neuen Werte für die Ermüdung ergeben sich aus den ursprünglichen Werte, die von 9 abgezogen wurden, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erreichen.

Ein weitere Evaluierung wurde am INNOVATION CENTER COMPUTER ASSISTED SURGERY (ICCAS) in Leipzig mit HNO-Spezialisten durchgeführt. Die Abbildung 7.1 zeigt den dortigen Versuchsaufbau. Die Bewertung der Tests erfolgte durch ein mündlichen Feedback. Die Navigation mit dem PHANTOM und Rückgabekräften konnte im Vergleich zur Navigation mit der SPACEMOUSE die Exploration des NNH-Datensatzes besser unterstützen. Daneben wurden Anregungen für Verbesserungen gegeben, die im folgenden Abschnitt diskutiert werden.



**Abbildung 7.1.:** Die Durchführung der Evaluation am ICCAS in Leipzig.

### 7.3. Schlussfolgerungen

Das Benutzerfeedback war allgemein positiv. Die haptisch unterstützte Kamerasteuerung stellte sich bei den Tests im Vergleich zu den anderen beiden Navigationstechniken als geeignetste Technik heraus. Die direkte Steuerung erleichterte die Orientierung und Positionierung des virtuellen Endoskops im NNH-Modell. Dieses äußerte sich in der Bewertung der Kriterien räumliche Orientierung, Zufriedenheit und Erlernbarkeit. Die Benutzerführung, die durch die Vermeidung von Kollisionen mit dem Gewebe unterstützt wird, ermöglicht eine effiziente Exploration der Daten als mit der SPACEMOUSE. Die Navigation mit dem PHANTOM ohne Rückgabekräfte wurde von den Probanden in einigen Punkten besser bewertet als die Navigation mit der SPACEMOUSE, jedoch ist die freie Positionierung im Raum als anstrengend eingeschätzt worden. Für die weitere Entwicklungen können die folgenden Verbesserungsvorschläge genutzt werden.

- *Anzahl der Freiheitsgrade*

Für die direkte Übertragung der Benutzeraktionen auf die Steuerung des virtuellen Endoskops wurden alle sechs DOF für die Eingabe ausgewertet. Die Ausgabe der Kräfte bezog sich jedoch nur auf die Position. Vor allem die Rotation um die Achse des Stiftes erschwerte eine ruhige Führung der Kamera und die Konzentration auf die Navigationsaufgabe. Die daraufhin durchgeführte Begrenzung der Bewegungen auf die drei DOF zur Veränderung der Position erleichterte zwar die Navigation, schränkte aber die zu untersuchenden Bereiche ein. Ein PHANTOM mit sechs Ausgabegraden würde die aktive Einschränkung der Drehungen und eine stabilere Kameraführung ermöglichen.

- *Kollisionsvermeidung*

Der Effekt der Kollisionsvermeidung für die Exploration der Hohlräume war eine Ursache für die gute Bewertung der entwickelten Navigationstechnik. Für aussagekräftigere Tests, müsste für die Kamerasteuerung mittels der SPACEMOUSE eine Kollisionsvermeidung umgesetzt werden.

Da die Kamerasteuerung selber keine eigenständige Anwendung darstellt, sollte die Einbindung in ein Planungssystem erfolgen. Dafür ist vor allem aussagekräftigeres visuelles Modell notwendig. Dieses sollte nach den Angaben der HNO-Spezialisten die Darstellung von pathologischem Gewebe, wie einem Tumor oder Polyp, von Risikostrukturen und von charakteristischen Landmarken ermöglichen.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Eine wachsende Anzahl von computergestützten Systemen zur Diagnostik, Therapie und Lehre halten Einzug in den medizinischen Alltag. Ein Teil der Anwendungen nutzt 3D-Visualisierungen der Patientendaten, um medizinische Sachverhalte informativ und leicht verständlich darzustellen. In der Therapieplanung von NNH-Eingriffen dient die räumliche Darstellung der anatomischen Strukturen neben den koronaren Schichtbildern als „Landkarte“ für die anstehende Operation. Die Möglichkeit zur interaktiven Exploration fördert dabei die Aufnahme von Informationen über die Größe, die Lage und den Zusammenhang verschiedener anatomischer Strukturen und erleichtert die intraoperative Orientierung. Bestehende Systeme zur virtuellen Endoskopie und zum computergestützten Operationstraining bieten zwar Anregungen für den Entwurf eines Planungssystems, stellen aber aufgrund mangelnder Interaktivität bzw. zu langer Vorbearbeitungsphasen keine wirklichen Alternativen dar. Der Hauptaspekt dieser Arbeit lag deshalb in der Entwicklung von Interaktionstechniken, die eine intuitive und effiziente Exploration der NNH-Datensätze ermöglichen.

Das entwickelte Konzept der Kamerasteuerung basiert auf einer Endoskop-Metapher, die bekannte Elemente aus dem Arbeitsbereich des HNO-Chirurgen auf die virtuelle Umgebung überträgt. Zwei Dinge charakterisieren dabei die dazugehörige Interaktionstechnik: zum einen die Übertragung von physikalischen Bewegungen des Benutzers für die „natürliche“ Positionierung und Ausrichtung des virtuellen Endoskops und zum anderen ein haptisches Feedback zur Benutzerführung. Als Ein- und Ausgabegerät dient dabei ein PHANTOM Desktop, welches die sich aus den Charakteristika ergebenden Anforderungen erfüllt. Die Bestimmung der erfühlbaren Rückgabekräfte basiert auf Distanzfeldern, die den Abstand zur Schleimhautoberfläche kodieren, und Gradientenfeldern für die Richtung der Kraft. Die generierten Abstoßungskräfte verhindern einen direkten Kontakt der Kamera mit dem Gewebe, geben jedoch dem Benutzer genügend Freiraum für die Exploration der Nasenhaupt- und Nasennebenhöhlen.

Die Umsetzung des beschriebenen Konzepts erfolgte mit MEVISLAB, das die Erstellung einer Visualisierungsumgebung aus bereits bestehenden Komponenten ermöglichte. Der entstandene Prototyp diente dazu, eine empirische Evaluierung im kleinen Rahmen zur Akzeptanz und Anwendbarkeit der Interaktionstechnik durchzuführen. Die Ergebnisse der Evaluierung umfassten ein überwiegend positives Feedback der Probanden, welches die intuitive Bedienbarkeit der Benutzungsschnittstelle bestätigt. Das haptische Feedback zur Benutzerführung ermöglichte eine effiziente Steuerung der Sicht des virtuellen Endoskops.

Für die weitere Entwicklung des haptisch unterstützten Planungssystems sind zwei Richtungen denkbar. Während der eine Ansatz auf der *Erhöhung des Realitätsgrades* des hap-

tischen Feedbacks für die Kamerasteuerung beruht, verfolgt der andere Ansatz die *Erweiterung der* haptisch unterstützten *Funktionalitäten*.

### **Erhöhung des Realitätsgrades**

Eine Erhöhung des Realitätsgrades des haptischen Renderings würde speziell die präoperativen Simulation eines Eingriffs unterstützen, beispielsweise für die Analyse von Zugangswegen zu den Nasennebenhöhlen. Die Verwendung eines haptischen Geräts mit sechs Freiheitsgraden für die Ein- und Ausgabe, ermöglicht eine realistischere haptische Darstellung der medizinischen Instrumente und des Endoskops, da es neben der Einschränkung der Position auch die Begrenzung der Drehung erlaubt. Damit müsste jedoch auch eine genauere Modellierung des Endoskops, beispielweise über ein zylindrisches 3D-Modell (McNeely u. a., 1999) oder eine Linie (Neubauer, 2005), erfolgen.

Auch eine Unterscheidung zwischen weichem bzw. knorpeligem Gewebe und starren Knochenstrukturen beim haptischen Rendering würde dazu dienen einen realistischeren Eindruck beim Benutzer zu erzeugen. Während die verformbare Strukturen eine eingeschränkte Bewegung zulassen, stellen Knochen undurchdringbare Barrieren dar. Diese Umsetzung setzt zunächst einen komplexen Segmentierungsprozess voraus, der eine Klassifizierung der verschiedenen Gewebe zulässt. Ebenfalls wäre ein Ansatz auf Basis einer haptischen Transferfunktion denkbar. Zusätzlich zum haptischen Rendern erfordert die Simulation von deformierbaren Oberflächen eine adäquate Anpassung der Visualisierung.

### **Erweiterung der Funktionalitäten**

Für die Erweiterung der Funktionalitäten läge die Realisierung haptischer Interaktionstechniken zur Vermessung anatomischer Strukturen nahe. Es wird angenommen, dass eine ähnliche Steigerung der Effizienz bei der Objektpositionierung wie bei der Kamerasteuerung beobachtet werden kann. Für die Umsetzung des haptischen Feedbacks müsste jedoch der implementierte Algorithmus angepasst werden, um eine genaue Kollision zwischen Objekt und Oberfläche darzustellen.

Andere Szenarien, die auf der gleichzeitigen Verwendung von zwei Eingabegeräten basieren (Hinckley u. a., 1998), beispielsweise für eine simultane Kamera- und Objektpositionierung, sind vorstellbar. Gerade Chirurgen sind die zweihändige Interaktion gewöhnt bzw. könnten durch einen solchen Aufbau die Aneignung manueller und kognitiver Fähigkeiten trainieren. Eine umfangreiche Testreihe zu verschiedenen 2D-/3D-Eingabegeräten und Interaktionstechniken sollte am Anfang einer solchen Entwicklung stehen.

Die Betrachtungen in dieser Arbeit bezogen sich auf einen sehr kleinen Anwendungsbereich. Darüber hinaus ist die Nutzung von haptisch unterstützten Interaktionstechniken für die Gestaltung einer natürlichen Interaktion zwischen Anwender und Computersystem in weiteren medizinischen Anwendungen denkbar. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, muss dazu nicht in jedem Fall ein möglichst realistisches haptisches Feedback umgesetzt werden.

## Literaturverzeichnis

- [Agus u. a. 2002] AGUS, M. ; BETTIO, F. ; GIACHETTI, A. ; GOBBETTI, E. ; ZANETTI, G. ; ZORCOLO, A.: Real-time Haptic and Visual Simulation of Bone Dissection. In: *Proc. of IEEE VR 2002*, 2002, S. 209–216
- [Apelt 2003] APELT, D.: *Computergestützte Bildanalyse und Visualisierung für die Planung chirurgischer Eingriffe an den Nasennebenhöhlen*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diplomarbeit, 2003
- [Avila u. Sobierajski 1996] AVILA, R. S. ; SOBIERAJSKI, L. M.: A Haptic Interaction Method for Volume Visualization. In: *Proc. IEEE Visualization*, 1996, S. 197–204
- [Bachert u. a. 2003] BACHERT, C. ; HÖRMANN, K. ; MÖSGES, R. ; RASP, G. ; RIECHELMANN, H. ; R. MÜLLER, H. L. ; STUCK, B.A. ; RUDACK, C.: Empfehlungen zur Diagnose und Therapie der Sinusitis und Polyposis Nasi. In: *Allergologie* 26 (2003), Nr. 2, S. 52–71
- [Bakker u. a. 2005] BAKKER, N. H. ; FOKKENS, W. J. ; GRIMBERGEN, C. A.: Investigation of Training Needs for Functional Endoscopic Sinus Surgery (FESS). In: *Rhinology* 43 (2005), Nr. 2, S. 104–108
- [Bartz 2003] BARTZ, D.: Möglichkeiten und Grenzen der virtuellen Endoskopie. In: *Proc. of Simulation und Visualisierung*, 2003, S. 249–357
- [Bartz 2005] BARTZ, D.: Virtual Endoscopy in Research and Clinical Practice. In: *Computer Graphics Forum* 24 (2005), Nr. 1, S. 111–126
- [Bartz u. Gürvit 2000] BARTZ, D. ; GÜRUIT, Ö.: Haptic Navigation in Volumetric Datasets. In: *Proc. of PHANTOM User Research Symposium*, Springer, 2000
- [Bartz u. Meiner 1999] BARTZ, D. ; MEINER, M.: Voxels versus Polygons: A Comparative Approach for Volume Graphics. In: *Proc. of Volume Graphics*, 1999, S. 33–48
- [Bartz u. Skalej 1999] BARTZ, D. ; SKALEJ, M.: VIVENDI - A Virtual Ventricle Endoscopy System for Virtual Medicine. In: GRÖLLER, E. (Hrsg.) ; LÖFFELMANN, H. (Hrsg.) ; RIBARSKY, W. (Hrsg.): *Data Visualization '99*. Springer, 1999, S. 155–166
- [Basdogan u. Srinivasan 2002] BASDOGAN, C. ; SRINIVASAN, M. A.: Haptic Rendering in Virtual Environments. In: STANNEY, K. M. (Hrsg.): *Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation, and Applications*. Mahwah, New Jersey [u.a.] : Erlbaum, 2002, S. 117–134

- [Becker 1983] BECKER, W.: *Atlas der Hals-Nasen-Ohren-Krankheiten*. 1. Aufl. Stuttgart : Thieme, 1983
- [Becker-Carus 1981] BECKER-CARUS, C.: *Grundriß der Physiologischen Psychologie*. 1. Aufl. Quelle & Meyer, 1981
- [Behrbohm u. a. 1997] BEHRBOHM, H. (Hrsg.) ; KASCHKE, O. (Hrsg.) ; NAWKA, T. (Hrsg.): *Endoskopische Diagnostik und Therapie in der HNO*. 1. Aufl. Stuttgart [u.a.] : Gustav Fischer, 1997
- [van den Bergen 2004] BERGEN, G. van d.: *Collision Detection in Interactive 3D Environments*. 1. Aufl. Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 2004
- [Biggs u. Srinivasan 2002] BIGGS, S. J. ; SRINIVASAN, M. A.: Haptic Interfaces. In: STANNEY, K. M. (Hrsg.): *Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation, and Applications*. Mahwah, New Jersey [u.a.] : Erlbaum, 2002, S. 93–116
- [Bisdas u. a. 2004] BISDAS, S. ; VERINK, M. ; BURMEISTER, H. P. ; STIEVE, M. ; BECKER, H.: Three-Dimensional Visualization of the Nasal Cavity and Paranasal Sinuses: Clinical Results of a Standardized Approach Using Multislice Helical Computed Tomography. In: *Journal of Computer Assisted Tomography* 28 (2004), Nr. 5, S. 661 – 669
- [Bowman u. a. 2004] BOWMAN, D. A. ; KRUIJFF, E. ; LAVIOLA, J. J. ; POUPYREW, I.: *3D User Interfaces: Theory and Practice*. 1. Aufl. Boston [u.a.] : Addison-Wesley, 2004
- [Burdea 1996] BURDEA, G. C.: *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. 1. Aufl. New York [u.a.] : Wiley, 1996
- [Faller u. a. 2004] FALLER, A. ; SCHÜNKE, M. ; SCHÜNKE, G.: *Der Körper des Menschen. Einführung in Bau und Funktion*. 14. Aufl. Stuttgart : Thieme, 2004
- [Foley u. a. 1990] FOLEY, J. D. ; DAM, A. van ; FEINER, S. K. ; HUGHES, J. F.: *Computer Graphics: Principles and Practice*. 2. Aufl. Addison-Wesley, 1990
- [Gibson 1962] GIBSON, J. J.: Observations on Active Touch. In: *Psychological Review* 69 (1962), November, Nr. 6, S. 477–491
- [Gilani u. a. 1997] GILANI, S. ; NORBASH, A. M. ; RINGL, H. ; RUBIN, G. D. ; NAPEL, S. ; TERRIS, D. J.: Virtual Endoscopy of the Paranasal Sinuses Using Perspective Volume Rendered Helical Sinus Computed Tomography. In: *Laryngoscope* 107 (1997), Nr. 1, S. 25–29
- [Goldstein 2002] GOLDSTEIN, E. B.: *Wahrnehmungspsychologie*. 2. Aufl. Heidelberg Berlin : Spektrum, 2002
- [Hahn 1998] HAHN, J.-M.: *Checkliste Innere Medizin*. 2. Aufl. Stuttgart [u.a.] : Georg Thieme Verlag, 1998



- [Han u. a. 2000] HAN, P. ; PIRSIG, W. ; ILGEN, F. ; GORICH, J. ; SOKIRANSKI, R.: Virtual Endoscopy of the Nasal Cavity in Comparison with Fiberoptic Endoscopy. In: *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* 257 (2000), Nr. 10, S. 578–83
- [Hand 1997] HAND, C.: A Survey of 3D Interaction Techniques. In: *Computer Graphics Forum* 16 (1997), Nr. 5, S. 269–281
- [Handels 2000] HANDELS, Heinz: *Medizinische Bildverarbeitung*. 1. Aufl. Stuttgart [u.a.] : Teubner, 2000
- [Hilbert u. a. 1998] HILBERT, M. ; MÜLLER, W. ; STRUTZ, J.: Entwicklung eines Operationssimulators für Eingriffe an den Nasennebenhöhlen. In: *Laryngo-Rhino-Otologie* 77 (1998), Nr. 3, S. 153–156
- [Hinckley 2003] HINCKLEY, K.: Input Technologies and Techniques. In: JACKO, J. A. (Hrsg.) ; SEARS, A. (Hrsg.): *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications*. 1. Aufl. New Jersey : Lawrence Erlbaum, 2003, S. 151–168
- [Hinckley u. a. 1998] HINCKLEY, K. ; PAUSCH, R. ; PROFFITT, D. ; KASSELL, N.: Two-Handed Virtual Manipulation. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 5 (1998), Nr. 3, S. 260–302
- [Hong u. a. 1997] HONG, L. ; MURAKI, S. ; KAUFMAN, A. ; BARTZ, D. ; HE, T.: Virtual Voyage: Interactive Navigation in the Human Colon. In: *Computer Graphics* 31 (1997), S. 27–34
- [Immersion 2006 ] IMMERSION CORPERATION (Hrsg.): *Endoscopy*. <http://www.immersion.com/medical/products/endoscopy/>, Abruf: 16.07.2006. – Einstiegsseite zur Produktbeschreibung des Endoscopy AccuTouch System
- [Intuitive Surgical 2006 ] INTUITIVE SURGICAL (Hrsg.): *The da Vinci Surgical System*. [http://www.intuitivesurgical.com/products/davinci\\_surgicalsistem/index.aspx](http://www.intuitivesurgical.com/products/davinci_surgicalsistem/index.aspx), Abruf: 16.07.2006. – Einstiegsseite zur Produktbeschreibung des da Vinci Surgical System
- [Joesz u. a. 1998] JOESZ, F. A. ; KIKINIS, R. ; III, W. M. W. ; LORENSEN, W. E. ; KETTENBACH, J.: Virtual Reality for Image-Guided Surgery. In: BROOKS, D. C. (Hrsg.): *Current Review of Minimally Invasive Surgery*. New York, NY [u.a.] : Springer, 1998, S. 201–210
- [Kirk 1996] KIRK, R. M.: *Chirurgische Techniken*. 3. Aufl. Stuttgart [u.a.] : Thieme, 1996
- [Lorensen u. Cline 1987] LORENSEN, W. E. ; CLINE, H. E.: Marching Cubes: A High Resolution 3-D Surface Construction Algorithm. In: *Computer Graphics* 21 (1987), Nr. 4, S. 163–169

- [Massie u. Salisbury 1994] MASSIE, T. H. ; SALISBURY, J. K.: The Phantom Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects. In: *In Proc. of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, IL, USA, 1994*
- [McNeely u. a. 1999] MCNEELY, W. A. ; PUTERBAUGH, K. D. ; TROY, J. J.: Six Degrees-of-Freedom Haptic Rendering Using Voxel Sampling. In: *Proc. of Siggraph '99, 1999*, S. 401–408
- [Messerklinger 1966] MESSERKLINGER, W.: Über die Drainage der menschlichen Nasennebenhöhlen unter normalen und pathologischen Bedingungen. In: *1. Mitt. Mon.schr. Ohrenheilk.* 100 (1966), S. 56–68
- [Messerklinger 1972] MESSERKLINGER, W.: Technik und Möglichkeiten der Nasenendoskopie. In: *HNO* 20 (1972), S. 133–135
- [MevisLab 2006 ] MEVISLAB (Hrsg.): *MeVisLab*. <http://www.mevislab.de/index.php?id=6>, Abruf: 16.07.2006. – Einstiegsseite zur Produktbeschreibung von MeVisLab
- [Naumann 1972] NAUMANN, H. H.: *Kopf- und Halschirurgie*. 1. Band. Stuttgart : Thieme, 1972
- [Neale u. Carroll 1997] NEALE, D. C. ; CAROLL, J. M.: The Role of Metaphors in User Interface Design. In: HELANDER, M. G. (Hrsg.) ; LANDAUER, T. K. (Hrsg.) ; PRABHU, P. V. (Hrsg.): *Handbook of Human-Computer Interaction*. 2. Aufl. Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 1997, S. 441–462
- [Neubauer 2005] NEUBAUER, A.: *Virtual Endoscopy for Preoperative Planning and Training of Endonasal Transsphenoidal Pituitary Surgery*, Technische Universität Wien, Diss., 2005
- [Neubauer u. a. 2004] NEUBAUER, A. ; WOLFSBERGER, S. ; FORSTER, M.-T. ; MROZ, L. ; WEGENKITTL, R. ; BUHLER, K.: STEPS - An Application for Simulation of Transsphenoidal Endonasal Pituitary Surgery. In: *VIS '04: Proc. of the Conference on Visualization '04*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2004, S. 513–520
- [Oeken u. a. 1993] OEKEN, F. W. ; PLATH, P. ; FEDERSPIL, P.: *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 7. Aufl. Ullstein Mosby, 1993
- [OnVista Media GmbH 2005] ONVISTA MEDIA GMBH (Hrsg.): *Endoskopie (Spiegelung)*. Version: 2005. <http://www.onmeda.de/arztbesuch/untersuchung/endoskopie.html>, Abruf: 16.07.2006. – Artikel zum Thema Endoskopie
- [Petersik u. a. 2003] PETERSIK, A. ; PFLESSER, B. ; TIEDE, U. ; HÖHNE, K. H. ; LEUWER, R.: Realistic Haptic Interaction in Volume Sculpting for Surgery Simulation. In: AYACHE, N. (Hrsg.) ; DELINGETTE, H. (Hrsg.): *Surgery Simulation and Soft Tissue Modeling*,

- Proc. IS4TM 2003*. Berlin [u.a.] : Springer, 2003 (Lecture Notes in Computer Science 2673), S. 194–202
- [Pöbneck u. a. 2002] PÖSSNECK, A. ; NOWATIUS, E. ; TRANTAKIS, C. ; ÇAKMAK, H. ; MAASS, H. ; KÜHNAPFEL, U. ; DIETZ, A. ; STRAUSS, G.: A Virtual Training System in Endoscopic Sinus Surgery. In: *Proc. of CARS 2005*, Elsevier, 2002, S. 527–530
- [Preim 1999] PREIM, B.: *Entwicklung interaktiver Systeme*. 1. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 1999
- [Preim u. a. 2002] PREIM, B. ; TIETJEN, C. ; SPINDLER, W. ; PEITGEN, H.-O.: Integration of Measurement Tools in Medical Visualizations. In: *Proc. of IEEE Visualization*. Boston, USA : IEEE Computer Society, 2002, S. 21–28
- [Reachin Technologies 2006 ] REACHIN TECHNOLOGIES (Hrsg.): *Reachin API*. <http://www.reachin.se/products/ReachinAPI/>, Abruf: 26.07.2006. – Einstiegsseite zur Produktbeschreibung der Reachin API
- [Richard 2000] RICHARD, C.: *On the Identification and Haptic Display of Friction*, Stanford University, Diss., 2000
- [di Rienzo u. a. 2003] RIENZO, L. di ; TIRELLI, G. C. ; TURCHIO, P. ; GARACI, F. ; GUZZARONI, M.: Comparison of Virtual and Conventional Endoscopy of Nose and Paranasal Sinuses. In: *The Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology* 112 (2003), Nr. 2, S. 139–142
- [Rogalla 2001] ROGALLA, P.: Virtual Endoscopy of the Nose and Paranasal Sinuses. In: ROGALLA, P. (Hrsg.) ; SCHELTINGA, J. T. (Hrsg.) ; HAMM, B. (Hrsg.): *Virtual Endoscopy and Related 3D Techniques*. Berlin [u.a.] : Springer, 2001, S. 17–39
- [Rogalla u. a. 1998] ROGALLA, P. ; NISCHWITZ, A. ; GOTTSCHALK, S. ; HUITEMA, A. ; KASCHKE, O. ; HAMM, B.: Virtual Endoscopy of the Nose and Paranasal Sinuses. In: *European Radiology* 8 (1998), Nr. 6, S. 946–50
- [Ruspini u. a. 1997] RUSPINI, D. C. ; KOLAROV, K. ; KHATIB, O.: The Haptic Display of Complex Graphical Environments. In: *Computer Graphics (SIGGRAPH 97 Conference Proceedings)* ACM SIGGRAPH, 1997, S. 345–352
- [Saito u. Toriwaki 1994] SAITO, T. ; TORIWAKI, J.: New Algorithms for Euclidean Distance Transformation of an n-Dimensional Digitized Picture with Applications. In: *Pattern Recognition* 27 (1994), Nr. 11, S. 1551–1556
- [Salah u. a. 2005] SALAH, Z. ; BARTZ, D. ; DAMMANN, F. ; SCHWADERER, E. ; MAASSEN, M. ; STRASSER, W.: A Fast and Accurate Approach for the Segmentation of the Paranasal Sinus. In: *Bildverarbeitung für die Medizin 2005*, Springer, 2005, S. 93–97

- [Satava 1998] SATAVA, R. M. (Hrsg.): *Cybersurgery : Advanced Technologies for Surgical Practice*. 1. Aufl. New York [u.a.] : Wiley-Liss, 1998
- [Satava u. Jones 2002] SATAVA, R. M. ; JONES, S. B.: Medical Applications of Virtual Environments. In: STANNEY, K. M. (Hrsg.): *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation and Applications*. New Jersey [u.a.] : Lawrence Erlbaum, 2002, S. 937–957
- [Sen 2004] SENSABLE TECHNOLOGIES (Hrsg.): *3D Touch SDK: Open Haptics Toolkit - Programmer's Guide*. Version 1.0. Cambridge: SensAble Technologies, 2004
- [SenseGraphics 2006 ] SENSEGRAPHICS (Hrsg.): *SenseGraphics H3DAPI*. [http://www.sensegraphics.se/products\\_whatish3dapi.html](http://www.sensegraphics.se/products_whatish3dapi.html), Abruf: 26.07.2006. – Einstiegsseite zur Produktbeschreibung der H3D API
- [Shneiderman u. Plaisant 2005] SHNEIDERMAN, B. ; PLAISANT, C.: *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. 4., intern. ed. Boston [u.a.] : Addison Wesley, 2005
- [Simmen u. Jones 2005] SIMMEN, D. ; JONES, N.: *Chirurgie der Nasennebenhöhlen und der vorderen Schädelbasis*. 1. Aufl. Stuttgart [u.a.] : Thieme, 2005
- [Srinivasan 1996] SRINIVASAN, M. A.: Haptics Research at the MIT Touch Lab. In: SALISBURY, J. K. (Hrsg.) ; SRINIVASAN, M. A. (Hrsg.): *Proc. of the First PHANToM User's Group Workshop*, AI Technical Report no. 1596 and RLE Technical Report no. 612. Cambridge,MA: MIT., 1996
- [Srinivasan u. a. 1999] SRINIVASAN, M. A. ; BASDOGAN, C. ; HO, C.-H.: Haptic Interactions in the Real and Virtual Worlds. In: DUKE, D.J. (Hrsg.) ; PUERTA, A. (Hrsg.): *Design, Specification, and Verification of Interactive Systems '99*, Springer, 1999
- [Sensable Open Haptics 2006 ] TECHNOLOGIES, SensAble (Hrsg.): *Open Haptics Toolkit*. [http://www.sensable.com/products/phantom\\_ghost/OpenHapticsToolkit-intro.asp](http://www.sensable.com/products/phantom_ghost/OpenHapticsToolkit-intro.asp), Abruf: 10.05.2006. – Einstiegsseite zur Beschreibung des Open Haptics Toolkit
- [SensAble Phantom 2006 ] TECHNOLOGIES, SensAble (Hrsg.): *PHANTOM Devices*. [http://www.sensable.com/products/phantom\\_ghost/phantom.asp](http://www.sensable.com/products/phantom_ghost/phantom.asp), Abruf: 10.05.2006. – Einstiegsseite zur Beschreibung der PHANTOM Serie
- [Boeing Company 2006 ] THE BOEING COMPANY (Hrsg.): *Voxmap PointShell Software*. <http://www.boeing.com/assocproducts/vps/>, Abruf: 26.07.2006. – Einstiegsseite zur Produktbeschreibung der Voxmap PointShell (VPS) Software Library
- [Tiede u. a. 1998] TIEDE, U. ; SCHIEMANN, T. ; HÖHNE, K. H.: High Quality Rendering of Attributed Volume Data. In: EBERT, D. (Hrsg.) ; HAGEN, H. (Hrsg.) ; RUSHMEIER, H. (Hrsg.): *Proc. of IEEE Visualization '98*. Los Alamitos, CA : IEEE Computer Society Press, 1998, S. 255–262

- [Toriwaki u. Mori 2003] TORIWAKI, J. ; MORI, K.: Distance Transformation and Skeletonization of 3D Pictures and Their Applications to Medical Images. In: BERTRAND, G. (Hrsg.) ; IMIYA, A. (Hrsg.) ; KLETTE, R. (Hrsg.): *Digital and Image Geometry*. Berlin [u.a.] : Springer, 2003 (Lecture Notes in Computer Science 2243), S. 412–428
- [Visible Human 2006 ] U.S. NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE (Hrsg.): *The Visible Human Project*. [http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible\\_human.html](http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html), Abruf: 16.07.2006. – Einstiegsseite zum Visible Human Projekt
- [Vilanova i Bartrolí u. a. 1999] VILANOVA I BARTROLÍ, A. ; KÖNIG, A. ; GRÖLLER, M. E.: VirEn: a Virtual Endoscopy System / Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna University of Technology. 1999 (TR-186-2-99-06). – Forschungsbericht
- [Volbracht u. Domik 2000] VOLBRACHT, V. ; DOMIK, G.: Developing Effective Navigation Techniques in Virtual 3D Environments. In: MULDER, J.D. (Hrsg.) ; LIERE, R. van (Hrsg.): *Virtual Environments 2000: Proc. of the Eurographics workshop in Amsterdam*, Springer, 2000
- [Voss u. a. 2000] VOSS, G. ; ECKE, U. ; BOCKHOLT, U. ; MÜLLER, W. K. ; MANN, W.: How to Become the „High Score Cyber Surgeon“ - Endoscopic Training Using the Nasal Endoscopy Simulator (NES). In: *Proc. of CARS 2000*, Elsevier, 2000, S. 290–293
- [Weghorst u. a. 1997] WEGHORST, S. ; AIROLA, C. ; OPPENHEIMER, P.: Formal Evaluation of the Madigan Endoscopic Sinus Surgery Simulator / Seattle: University of Washington, Human Interface Technology Laboratory. Technical Report R-97-34. 1997. – Forschungsbericht
- [CHAI 3D 2006 ] WWW.CHAI3D.ORG (Hrsg.): *CHAI 3D - Home*. <http://www.chai3d.org/>, Abruf: 26.07.2006. – Einstiegsseite des Open Source Projekts CHAI 3D
- [Yagel u. a. 1996] YAGEL, R. ; STREDNEY, D. ; WIET, G. ; SCHMALBROCK, P. ; ROSENBERG, L. ; SESSANNA, D. ; KURZION, Y.: Building a Virtual Environment for Endoscopic Sinus Surgery Simulation. In: *Computers and Graphics* 20 (1996), December, Nr. 6, S. 813–823
- [Zylka-Menhorn u. Koch 1996] ZYLKA-MENHORN, V. ; KOCH, K.: *Endoskopische Operationen. Weniger Schmerzen, schneller gesund*. 1. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 1996



## A. Anhang

### Fragebogen – „Haptische Interaktion zur Planung von endoskopischen NNH-Operationen“

#### Allgemeine Fragen

Alter :

Geschlecht :

Physische Besonderheiten :

	sehr hoch								nicht vorhanden
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Computererfahrung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erfahrung mit virtuellen Welten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erfahrung mit Tastatur/Maus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erfahrung mit 3D-Eingabegeräten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erfahrung mit Force-Feedback-Geräten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

#### Navigation mit der Spacemouse

	sehr hoch								nicht vorhanden
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Erlernbarkeit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Benutzung / Effektivität	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Räumliche Orientierung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ermüdung / Anstrengung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zufriedenheit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Individuelle Bewertung :  
 (interessant, erfreulich, befriedigend,  
 vorhersagbar, langweilig, frustrierend,  
 willkürlich, flexibel)

Abbildung A.1.: Ausschnitt des Fragebogens zur Evaluierung der Navigationstechnik.