

Eingabegeräte und Interaktions- techniken für die virtuelle Endoskopie

Arno Krüger, Kristina Stampe, Steffen Irrgang, Ilka Richter, Gero Strauß,
Bernhard Preim

Institut für Simulation und Graphik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; Innovation
Center for Computer Assisted Surgery (ICCAS) Leipzig; Abteilung für HNO-Heilkunde,
Universitätskrankenhaus Leipzig

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Interaktion mit 2D- und 3D-Eingabegeräten bei der Therapieplanung endoskopischer Eingriffe untersucht und evaluiert, wobei erstmals der systematische Vergleich unterschiedlicher Eingabegeräte den Fokus bildet. Außerdem werden Möglichkeiten zur Abbildung von sowohl einem Eingabegerät als auch einer Kombination aus verschiedenen Geräten auf eine Interaktionstechnik beschrieben. Dabei liegt der Schwerpunkt der Mensch-Computer-Interaktion auf der Steuerung des Betrachtungspunktes, also des virtuellen Endoskops.

1 Einleitung

Virtuelle Endoskopie gewinnt für die Diagnostik und Therapieplanung zunehmend an Bedeutung. Bedingt durch die stetig steigende Auflösung und damit auch Datenmenge bei den bildgebenden Verfahren ist eine rasche Betrachtung von bis zu mehreren hundert Schichtbildern mittlerweile deutlich komplizierter geworden. Im Gegenzug profitieren jedoch computergestützte Planungsansätze von eben jener hohen Auflösung, da der Detaillierungsgrad der generierten Bilder entsprechend ansteigt. In den letzten Jahren haben die Softwareassistenten bereits maßgeblich die medizinische Therapieplanung beeinflusst. Es wurden Systeme entwickelt, welche dem Arzt bereits vor der Operation die Möglichkeit geben, den Operationsablauf an dem Patienten virtuell zu planen. Ziel einer Operation ist es, den Patienten zu heilen und dabei, um Komplikationen zu vermeiden, möglichst schonend zu operieren. Die computergestützte, chirurgische Therapieplanung kann an dieser Stelle ansetzen, um mit Hilfe von optimierten Interaktionstechniken und ausgewählten Eingabegeräten präoperativ verschiedene Varianten der Operation zu erproben und in Bezug auf das mit ihnen verbundene Risiko zu analysieren.

2 Stand der Forschung und Zielstellung

Hauptanwendung für virtuelle Endoskopie war bislang vor allem die Diagnostik (Bartz 2005), für die eine Reihe effizienter Visualisierungen und Bildanalysetechniken entwickelt wurden (Hong et al. 1997; Neubauer et al. 2004). Bildanalyse ist wesentlich, wenn Risikostrukturen dargestellt werden sollen bzw. quantitative Aussagen, z.B. Maßangaben von Strukturen erforderlich sind. Die interaktive räumliche Repräsentation bei einer virtuellen Endoskopie kann nun zusätzlich als Landkarte für die Operation dienen und damit die intraoperative Orientierung unterstützen. Eine wesentliche Schwierigkeit stellt jedoch die Interaktion mit derartigen 3d-Visualisierungen dar.

Die Kamerasteuerung des virtuellen Endoskops ist dabei die Haupt-Interaktionsaufgabe. Durch die Vielzahl der interaktiven Möglichkeiten sollte die Wahl des Eingabegerätes für eine entsprechende Interaktionstechnik gut überlegt sein. Neben den herkömmlichen Eingabemedien, wie Tastatur oder Maus, gab es in den letzten Jahren viele Weiterentwicklungen. 3D-Eingabegeräte, welche für Interaktionen im dreidimensionalen Raum entwickelt wurden, werden in der Interventionsplanung noch selten eingesetzt. Einarbeitungszeit und Anschaffungskosten werden meist als Gründe gegen eine Neuanschaffung eines Eingabegerätes genannt.

Diese Barriere kann nur durch einen systematischen Vergleich von Eingabegeräten gegenüber anderen abgebaut werden. Das Ziel dieser Arbeit lag in der Entwicklung eines Systems zum objektiven Vergleich von Eingabegeräten für Interaktionstechniken zur Kamerasteuerung. Es ging dabei unter anderem um den Vergleich herkömmlicher Eingabemedien, wie Maus und Tastatur, mit alternativen Eingabegeräten, wie dem Grafik-Tablett, dem Trackball oder der Spacemouse. Ein Joystick, wie ihn das STEPS-System (Neubauer et al. 2004) nutzt, wurde hier aufgrund dort aufgeführter Probleme nicht betrachtet. Die Gegenüberstellung wurde mit Hilfe des hier entwickelten Vergleichssystems durchgeführt. Als Interaktionstechnik kam hierbei die Steuerung einer virtuellen Kamera in den Nasennebenhöhlen (NNH) zum Einsatz. Der Fokus lag hier bewusst auf der Kamerasteuerung, da gerade bei der Interventionsplanung dies die am häufigsten auftretende Interaktion mit einem Planungssystem ist. Dafür standen CT-Datensätze der NNH zur Verfügung.

Um abschätzen zu können, ob haptisches Feedback bei der Kamerasteuerung zusätzliche Vorteile bietet, wurde ein weiteres Testsystem konzipiert, welches das Phantom der Firma SensAble als Interaktionsgerät verwendet. Mit diesem stehen sechs Freiheitsgrade für die Eingabe und drei für die haptische Ausgabe (Raumpunkt) zur Verfügung. Ähnliche Ansätze sind bereits erfolgreich bei Chirurgiesimulatoren für endoskopische Eingriffe (Voss et al. 2000; Pöbneck et al. 2005) verwendet worden, da es hierbei vor allem auf eine bestmögliche Simulation einer realen Operation ankommt.

3 Umsetzung

Die Auswahl der zu untersuchenden Eingabegeräte erfolgte nach einer Einschätzung der potentiellen Eignung für die Steuerung der virtuellen Endoskopie und der klinischen Verfügbarkeit bzw. den Anschaffungskosten. Darüber hinaus wurde das Phantom betrachtet, obwohl es aufgrund der hohen Anschaffungskosten und der Zielrichtung der Entwicklung (Planungssystem vs. Chirurgiesimulation) vermutlich keinen praktischen Einsatz in Kliniken finden wird. Dennoch könnte es theoretisch besser für die hier vorliegende Interaktionsaufgabe geeignet sein, da es eine ähnliche Handhabung wie ein reales Endoskop bietet.

Untersucht wurden daher in erster Linie: Tastatur, Maus, Trackball, Spaceball und Graphiktablett sowie sinnvolle Kombinationen daraus. Die Implementierung der Testumgebung erfolgte mittels VTK¹ welches sich als günstig für die Anbindung der Gerätebibliotheken herausstellte. Das Phantom wurde mit dem SensAble OpenHaptics toolkit² angesteuert und das zugehörige Testsystem mit Hilfe der Bildverarbeitungs- und Visualisierungsbibliothek MeVisLab³ umgesetzt (näheres siehe Krüger et al. 2007). Hierbei ist eine besonders hohe Wiederholrate der Kraftberechnung entscheidend ($>1\text{kHz}$), da ansonsten eine Art Zittern spürbar würde. Abbildung 1 stellt die erforderlichen Beziehungen zwischen den visuellen und haptischen Ausgaben des Systems und den Eingaben des Benutzers dar. Wie auf der linken Seite des Schemas zu erkennen ist, werden Navigationsstrukturen (darunter sind hier Datenstrukturen wie z.B. Gradientenfelder zu verstehen) aus dem Patientendatensatz vorberechnet, um eine möglichst hohe haptische Berechnungsrate erreichen zu können. Die Visualisierung erfolgt mit Hilfe von direktem Volumenrendering, welches MeVisLab bereitstellt. In Abbildung 2 ist dies in dem finalen Interface des Phantom-Testsystems zu sehen.

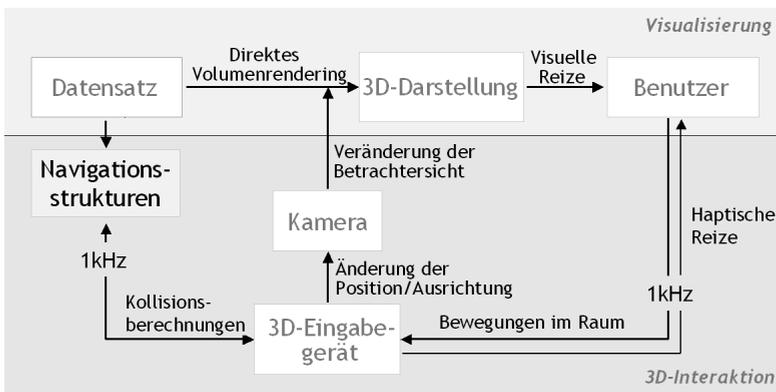


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Interaktion und Visualisierung mit dem Phantom-Testsystem

¹ <http://www.vtk.org>

² <http://www.sensable.com/products-openhaptics-toolkit.htm>

³ <http://www.mevislab.de>

Die anderen, weiter oben erwähnten Eingabegeräte, unterscheiden sich generell vor allem in der Anzahl der Freiheitsgrade und der Generierung von absoluten oder relativen Positionswerten. Um diese Eingabedaten in beliebigen Kombinationen zu erfassen, wurde in VTK ein Interface-Controller implementiert, welcher einerseits Daten für die Kamerasteuerung des virtuellen Endoskops, andererseits spezielle Informationen zur Evaluierung an die Analysemodule liefert. In dem Interface-Controller findet die Zuordnung der ankommenden Daten zu den Interaktionstechniken statt. Die gleichzeitige Verwendung mehrerer Eingabegeräte wird durch eine priorisierte Warteschlange realisiert. Zur Anwendung der Analysemethoden werden, neben der Geräte-ID, die Orientierung der Kamera und die Position der Kamera sowie die aktuelle Änderungsfrequenz dieser Werte aufgezeichnet. Abbildung 3 verdeutlicht diese Beziehungen und zeigt zusätzlich links unten im Bild einige mögliche Ausgaben, die der Interface-Controller liefern kann. Wesentlich ist dabei, dass nun generalisierte Werte von den unterschiedlichen Eingabegeräten zur Verfügung stehen und für vielfältige Aufgaben genutzt werden können.

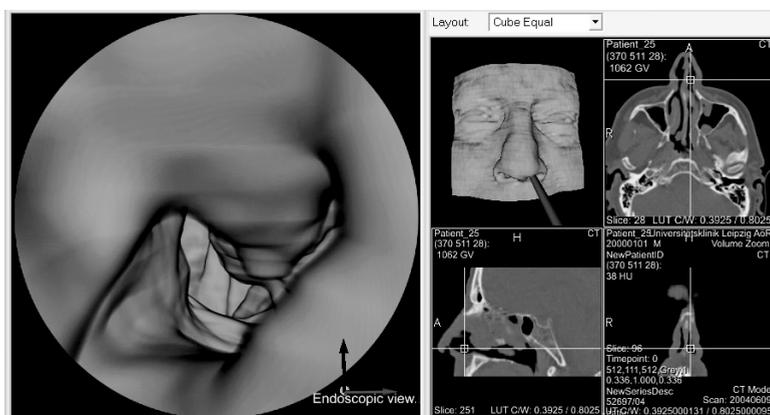


Abbildung 2: Nutzerinterface für das Phantom-System; links die virtuelle Endoskop-Darstellung, rechts orthogonale Schnitte des Volumens mit Positionsanzeige und exozentrischer Sicht auf den Patienten

4 Evaluierung

Für die Evaluierung wurde ein Testszenario mit einer 3D-Darstellung der Nasennebenhöhlen erstellt. Als Analysemethode fiel die Wahl einerseits auf die Auswertung der Bewegung selbst, also der Anzahl der Änderungen pro Zeittakt, andererseits auf einen Pfadvergleich. Dazu wurde ein Bewegungspfad vorgegeben, welcher einer typischen Endoskopie der Nasennebenhöhlen entspricht. Die Probanden hatten während der Studie die Aufgabe, Wegmarken abzufliegen und somit dem 3D-Pfad zu folgen. Für die Auswertung wurde der vorgegebene Pfad mit Kugeln versehen und jeweils der Schnitt mit dem aufgezeichneten Pfad des Probanden ermittelt (vgl. Abbildung 4). Der Algorithmus kann demzufolge mit dem Radius

und dem Distanzwert parametrisiert werden, um den Grad der Sensibilität einzustellen.

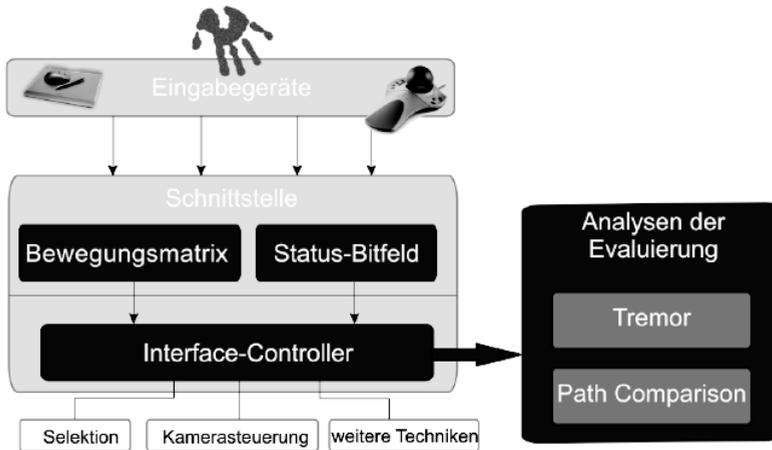


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Testsystems für Kombinationen von Eingabegeräten

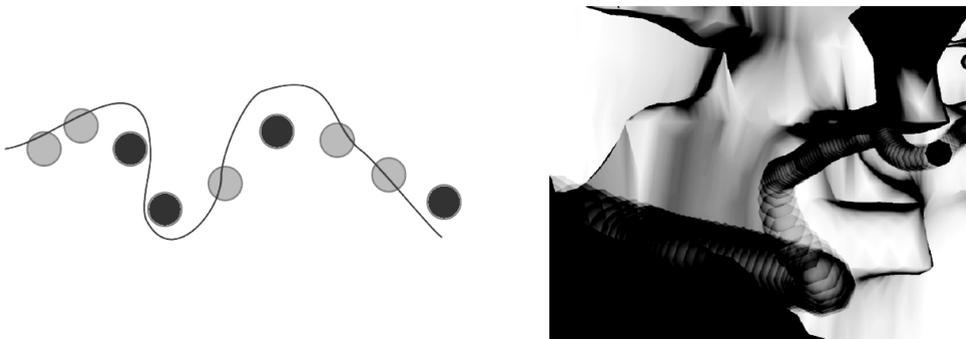


Abbildung 4: Links: Veranschaulichung des Vergleichsalgorithmus in 2D – der vorgegebene Pfad (Kreise) wird von dem tatsächlichen Pfad (Linie) nicht an allen Kontrollpunkten korrekt abgefahren (dunkle Kreise). Rechts: aufzeichneter 3D-Pfad eines Testdurchlaufs

Für die zweite Analyse, die Auswertung des „Zitterns“ bzw. des Tremors der Eingabe, wurden die getakteten Positions- und Orientierungsdaten genutzt. Die Aufgabe einer Kamerafahrt in der Interventionsplanung besteht meist in einer zielgerichteten Bewegung zu einer konkreten Stelle der Nasennebenhöhlen. Ein hoher Tremor-Wert sollte sich entsprechend negativ auf eine flüssige und gleichförmige Kamerabewegung auswirken (vgl. Abbildung 5).

Die Erfassung von Aussagen potentieller Nutzer erfolgte bei beiden Systemen mittels Fragebögen, welche Aspekte, wie die Einarbeitungszeit oder Zufriedenheit bei der Benutzung des Eingabegerätes oder die Effizienz bei einer Nutzung und die Erfüllung von Erwartungen an die Steuerung, abfragten.

Tremor-Wert

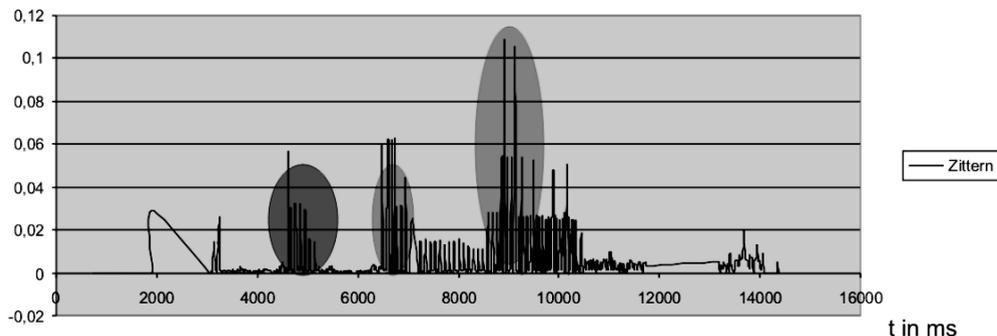


Abbildung 5: Bewegungsfrequenz über der Zeit. Die elliptischen Bereiche verdeutlichen starke kurze Bewegungen. Meist stellen diese unerwünschte Bewegungen oder Korrekturen bei der Kameraausrichtung dar

Um die Lernrate einer Eingabemethode einschätzen zu können, musste jeder der 11 Probanden die gestellte Aufgabe der Pfadverfolgung mehrfach lösen. Aus diesem explorativen ersten Teil der Evaluierung ergaben sich einige interessante Trends aus den Messungen für Pfadvergleich und Tremor. Die aufgestellten Thesen wurden im konfirmativen Teil der Evaluierung überprüft. Die 15 Probanden setzten sich hierbei vor allem aus Ärzten (4m/2w) und Experten der Medizintechnik (7m/2w) zusammen. Letztere haben beruflich mit der Geräte- und Systementwicklung im Bereich Medizin Erfahrung und kennen sich gut im Umgang mit dem Computer aus. Altersmäßig variieren die Testpersonen zwischen 23 und 52 Jahren. Abbildung 6 zeigt den Aufbau der beiden Systeme mit Probanden.

5 Auswertung

Es stellte sich heraus, dass die beidhändige Interaktion (vgl. Guiard 1987; Hinckley et al. 1998; Subramanian 2004), z.B. Tastatur + Maus, generell akzeptiert wird und gute Resultate liefert, was die Ausführung der gestellten Interaktionsaufgabe angeht. Gerade Anfängern bereitet jedoch die Koordination Schwierigkeiten. Weiterhin besitzt der Trackball im Vergleich zur Maus den Vorteil des geringeren Platzbedarfs und wurde auch in der Handhabung als subjektiv besser bewertet. Ein Nachteil dieses Gerätes ist die Tremor-Anfälligkeit, was sich anfangs in einem steten Übersteuern und damit Richtungsänderungen der Kamera widerspiegelt (ähnlich den Ergebnissen in MacKenzie et al. 1991).



Abbildung 6: Aufbau der Testsysteme am Innovation Center for Computer Assisted Surgery (ICCAS). links: Vergleich der kombinierten Eingabegeräte, rechts: Evaluierung der haptischen Steuerung mit dem Phantom

Das Graphiktablett stellt hier zwar eine relativ exotische Interaktionsmethode für dieses Anwendungsgebiet dar, bietet jedoch viele Freiheitsgrade und erlaubt es darüber hinaus mit zwei neigungssensitiven Stiften gleichzeitig zu interagieren. Wie die Evaluierung zeigte, kann das Tablett für die Navigation in den anatomischen Strukturen über die Stiftneigung eingesetzt werden, es ist jedoch noch Feinarbeit für die Justierung der Interaktionstechnik nötig. Die über die wiederholten Versuche ermittelte Lernrate war hier erfreulich hoch, so dass der Ansatz weiter verfolgt werden kann. Der Spaceball erfährt die höchste Akzeptanz bei den Benutzern, liefert auch die genauesten Übereinstimmungen bei der Pfadverfolgung und das bei geringem Tremor. Darüber hinaus ist hier die Lernkurve sehr steil, was aufgrund der direkten Abbildung der Kamerasteuerung auch zu erwarten war. Abbildung 7 stellt die Ergebnisse der beiden durchgeführten Tests noch einmal gegenüber. Beim Zittern (Tremor-Wert, Abbildung 7 links) ist ein besonders kleiner Wert angestrebt und bei dem Pfadvergleich repräsentieren hohe Werte auch einen hohen Grad an Übereinstimmung. Auch wenn die geringe Anzahl der Stichproben nicht zu einer signifikanten Aussage führt, kann dieses Ergebnis dennoch als Trend formuliert werden. Weitere Tests mit mehr Teilnehmern und einem noch klarer getrennten Teilnehmerfeld wären zukünftig anzustreben.

Test mit dem Phantom

Bei dem Phantom-Test haben sechs Probanden (4 männlich, 2 weiblich) im Alter zwischen 19 und 31 Jahren an der Evaluierung teilgenommen. Aufgrund der geringen Zahl werden die Ergebnisse vorwiegend qualitativ interpretiert. Die Probanden bewerteten ihre Erfahrungen mit Computern und den Eingabegeräten Maus und Tastatur als recht hoch (Durchschnitt 7; auf einer Skale von 1 bis 9). Die Erfahrung mit 3D-Eingabegeräten (Durchschnitt 2.7) und Force-Feedback-Geräten (Durchschnitt 3.3) wurden als wesentlich geringer eingeschätzt. Es wurde festgestellt, dass die Bewertung der durch das haptische Feedback unterstützten Navigation in fast allen Kriterien besser ausfiel, als bei den anderen Navigationstechniken. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 8 zusammenfassend dargestellt.

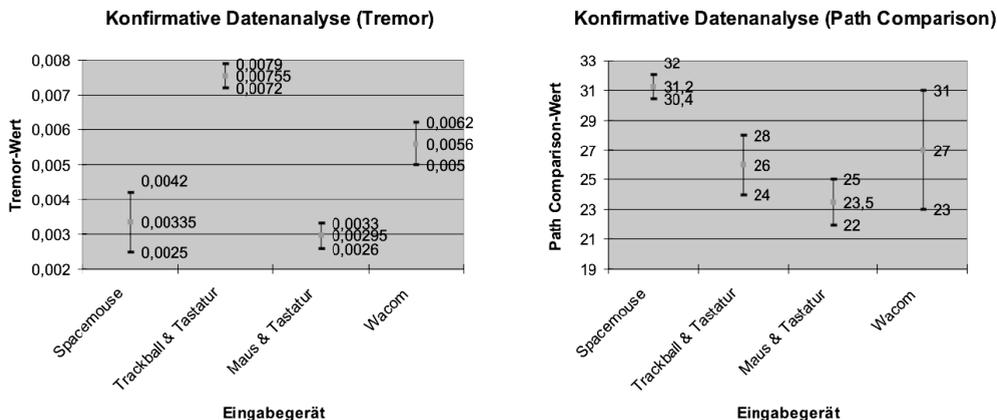


Abbildung 7: Auswertung der Tremor- und Pfadvergleich-Tests für die verschiedenen Eingabegeräte. Niedrige Werte für Tremor bzw. hohe für den Pfadvergleich repräsentieren besonders positive Messungen

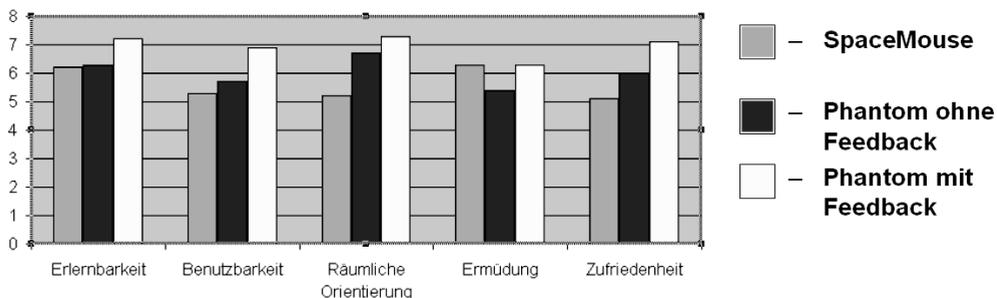


Abbildung 8: Durchschnittliche Bewertung der Interaktionstechniken. Hohe Werte repräsentieren bessere Wertungen, die Ermüdungswerte wurden zum besseren Vergleich invertiert

Eine weitere Evaluierung wurde mit HNO-Chirurgen und Experten im Bereich Computer Assisted Surgery durchgeführt. Die Abbildung 6 rechts zeigt den dortigen Versuchsaufbau. Die Auswertung erfolgte durch semistrukturierte Interviews. Die Navigation mit dem Phantom und Rückgabekräften konnte im Vergleich zur Navigation mit der Spacemouse die Exploration des NNH-Datensatzes noch besser unterstützen. Das Benutzerfeedback bezüglich der Eingewöhnungszeit und der Interaktion an sich war positiv. Die haptisch unterstützte Kamerasteuerung stellte sich bei den Tests im Vergleich zu den anderen beiden Navigationstechniken (Spacemouse bzw. Phantom ohne Force-Feedback) als die am besten geeignete 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 (siehe Abbildung 8). Die Benutzerführung, die durch die Vermeidung von Kollisionen mit dem Gewebe unterstützt wird, ermöglicht eine effizientere Exploration der Daten als mit der Spacemouse. Die Navigation mit

dem Phantom ohne Rückgabekräfte wurde von den Probanden in Punkten wie räumliche Orientierung und Bedienbarkeit besser bewertet als die Navigation mit der Spacemouse, jedoch ist die freie Positionierung im Raum als anstrengend eingeschätzt worden. Tabelle 1 fasste die gesamten Ergebnisse der Untersuchungen zusammen.

	Maus+Tastatur	Trackball+Tastatur	Spaceball	Graphiktablett	Phantom
Vorkenntnisse	+	o	-	-	-
Bedienung	+	+	+	-	+
Platzbedarf	o	+	+	-	-
Tremor	o	-	+	o	o
Lernkurve	+	o	+	+	+
Akzeptanz	+	o	+	-	+
Preis	+	o	-	-	-

Tabelle 1: Zusammenfassende Darstellung der Untersuchungsergebnisse. + = gut, o = akzeptabel, - = schlecht

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Methodenvergleiche für Eingabegeräte und Interaktionstechniken für das Anwendungsgebiet der virtuellen Endoskopie durchgeführt. Dafür wurde eine Schnittstelle konzipiert und umgesetzt, die verschiedenartige Techniken zusammenführt und Werte generalisiert. Wichtig war dabei unter anderem, dass mehrere Eingabegeräte gleichzeitig verwendet werden können, um auch Kombinationsmöglichkeiten zu untersuchen. Maus bzw. Trackball und Tastatur bilden hier nur triviale und in der Praxis häufig vorkommende Varianten, jedoch kann bei Bedarf nun jede Gerätekombination realisiert werden. Die Erstellung eines Testszenarios diente der Evaluierung der Eingabegeräte, welche hier untersucht wurden. Die Entwicklung von zwei Analysealgorithmen (Tremor und Pfadvergleich) ermöglichte die Auswertung des vorher definierten Testszenarios.

Die Untersuchung verschiedener Eingabegeräte für den Einsatz in der virtuellen Endoskopie ergab, dass Unterschiede in der Akzeptanz und der Eignung bestehen. Für die gelegentliche Nutzung, z.B. bei seltener durchgeführten Planungen, ist der Spaceball bzw. die Spacemouse das Eingabegerät der Wahl, jedoch verbunden mit höheren Anschaffungskosten. Tastatur und Maus sind ebenfalls geeignet, jedoch bedarf es hier einer gewissen Einarbeitungszeit bzw. einer häufigeren Nutzung. Der Trackball kann die Maus ersetzen, was den Platzbedarf, z.B. im OP, minimiert. Das Graphiktablett, welches sehr großes Potenzial etwa für Annotationen oder beidhändige Bedienung mit zwei Stiften bietet, kann bei entsprechender Weiterentwicklung der Interaktionstechnik ebenfalls eingesetzt werden.

Der entwickelte Interface-Controller wird derzeit in ein Operationsplanungssystem für Nasennebenhöhlen integriert und dort um bereits entwickelte Techniken für haptisches Feedback erweitert. Somit ist das Endoskopiesystem dann zukünftig mit einer Vielzahl von Eingabegeräten steuerbar und kann je nach Vorlieben der Nutzer bzw. der Geräteausstattung der Klinik verwendet werden. Weiterführende Studien, z.B. auch in verwandten Bereichen der Endoskopie und mit einer größeren Anzahl an Teilnehmern, sollen helfen die gefundenen Trends zu untermauern. Dies sollte dann vor allem mit statistischen Methoden geschehen, um Signifikanzen korrekt zu ermitteln. Subjektive Präferenzen bei der Kamerasteuerung, beispielsweise die Vertauschung der Abbildung von links und rechts, die während der Untersuchungen ebenfalls zu Tage traten, sollten außerdem weiter untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- Bartz, D. (2005). Virtual Endoscopy in Research and Clinical Practice. *Computer Graphics Forum 24, Nr. 1*, S. 111-126.
- Guiard Y. (1987). Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The kinematic chain as a model. *Journal of Motor Behavior*, Vol. 19, No. 4, S. 485-517.
- Hinckley, K., Pausch, R., Proffitt, D. & Kassell, N. (1998). Two-handed virtual manipulation. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), Volume 5, Issue 3*, S. 260-302.
- Hong, L., Muraki, S., Kaufman, A., Bartz, D. & He, T. (1997). Virtual Voyage: Interactive Navigation in the Human Colon. *Proc. of ACM SIGGRAPH*, S. 27-35.
- Krüger, A., Stampe, K., Hertel, I., Strauss, G. & Preim, B. (2007). Haptische Interaktion zur Planung von Nasennebenhöhlen-Operationen. In: *Bildverarbeitung für die Medizin, Informatik aktuell*, S. 303-307, Springer, 2007.
- MacKenzie, I., Sellen, A. & Buxton, W. (1991). A comparison of input devices in element pointing and dragging tasks. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Reaching through technology table of contents*, Pages: 161-166.
- Neubauer, A., Wolfsberger, S., Forster, M., Mroz, L., Wegenkittl, R. & Bühler, K. (2004) STEPS – An Application for Simulation of Transsphenoidal Endonasal Pituitary Surgery. In: *IEEE Visualization*, S. 513-520.
- Pößneck, A., Nowatius, E., Trantakis, C., Cakmak, H., Maass, H., Kühnapfel, U., Dietz, A. & Strauß, G. (2005). A virtual training system in endoscopic sinus surgery. In: *Proc. of CARS 2005, Elsevier*, S. 527–530.
- Subramanian, S. (2004). *Tangibles interfaces for volume navigation*. PhD Thesis, Technical University Eindhoven.
- Voss, G., Ecke, U., Bockholt, U., Müller, W.K. & Mann, W. (2000). How to become the high score cyber surgeon – endoscopic training using the nasal endoscopy simulator (nes). In: *Proc. of CARS 2000, Elsevier*, S. 290–293.