

## Zum Konzept eines Tele-Trainers für die Minimal Invasive Chirurgie

Elmar Holler, Uwe Kühnapfel, Torsten Neck

Auf Realzeitsimulation und „virtueller Realität“ basierende Trainingssysteme auf modernen Hochleistungsrechnern bieten in Analogie zu einem Flugsimulator die Möglichkeit, bei der Aus- und Weiterbildung in der Minimal Invasiven Chirurgie höhere zeitliche Effizienz und Flexibilität bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten und Risiken zu erreichen. Auf die Ausbildung im Tier-OP kann weitgehend verzichtet werden. Über eine einfache Hand/Auge-Koordination und das Üben von Standardinteraktionen hinausgehend, lassen sich mit einem solchen System sowohl neuartige chirurgische Prozeduren als auch neuentwickelte Instrumente erproben und ihre Anwender schulen. Das gezielte Üben von Notfallsituationen (z.B. Rupturen von Gefäßen) ist am Operationssimulator gezielter möglich als am sog. Pelvi-Trainer mit tierischen Organpräparaten. Daneben läßt das Konzept auch eine statistische Erfassung der „Performance“ des Bedieners zu (Ausführungszeit, Exaktheit der manuellen Fertigkeit, ...), die zur Kontrolle des Trainings-erfolges herangezogen werden könnte.

Dementsprechend kommen für den Einsatz eines Teletrainers folgende **Zielgruppen** in Betracht:

- Bei **MIC-Ausbildungszentren** ist der Einsatz des VR-Trainers als Vorstufe oder Ergänzung der Schulung am Pelvitainer und im Tierversuch möglich; die völlige Ablösung der Ausbildung am Tier wird aus ethischen und wirtschaftlichen Gründen angestrebt.
- In der **Medizintechnik-Industrie** kann er als Demonstrations- und Ausbildungsinstrument vor und während der Markteinführung von Neuentwicklungen eingesetzt werden, aber auch bereits im Vorfeld bei der Konstruktion zur Erzeugung „virtueller Prototypen“ im Sinne des „Rapid-Prototyping“.
- In der MIC aktive Kliniken können mit dem Trainer ihren **praktizierenden Chirurgen** die Möglichkeit zur Übung von selten durchgeführten Operationen und zur Verbesserung des manuellen Geschicks bieten.

Ansätze in diesem Sinne wurden am Institut für Angewandte Informatik des Forschungszentrums Karlsruhe bereits realisiert (Bild 1) <sup>1</sup>:

---

1 [1] U. Kühnapfel et al. „*Grafische Echtzeit-Simulationstechniken zur Unterstützung der Ausbildung, Diagnostik und Therapie in der minimalinvasiven Chirurgie*“ in FZK-Nachrichten, Jahrgang 28, 2-3/96, S. 117-123

Für die laparoskopische Cholecystostomie bzw. Cholecystektomie wurde ein Operationssimulator auf Basis des Echtzeitsimulationssystemes KISMET beispielhaft entwickelt. Hierbei dienen übliche Handgriffe von Instrumenten, die in realitätsgemäßer Geometrie in die Bedienhardware integriert sind, als Eingabe für den auszubildenden Chirurgen. Die distalen Enden der Instrumente münden in eine Auswerteelektronik, die die momentane Bewegung bzw. die Position der Instrumente erfaßt, aufbereitet und zum Simulationsrechner überträgt. In der Simulation ist es hierbei möglich, ohne Veränderung an der Bedienhardware verschiedene Instrumente durch entsprechende Steuerungsfunktionen (derzeit als Pedal realisiert) auszuwählen und einzusetzen. Die eigentliche Simulation und Bilderzeugung für die virtuelle Realität geschieht mit einem Hochleistungs-Grafikrechner allein auf Grund der über die Instrumente gegebenen Stellvorgaben und die Auswahl bestimmter Instrumente. Beim Chirurgen wird das errechnete Simulationsbild auf einen üblichen Fernsehbildschirm (PAL oder NTSC) angezeigt; die Anzeige kann unter Verwendung einer Shutterbrille auch dreidimensional erfolgen.

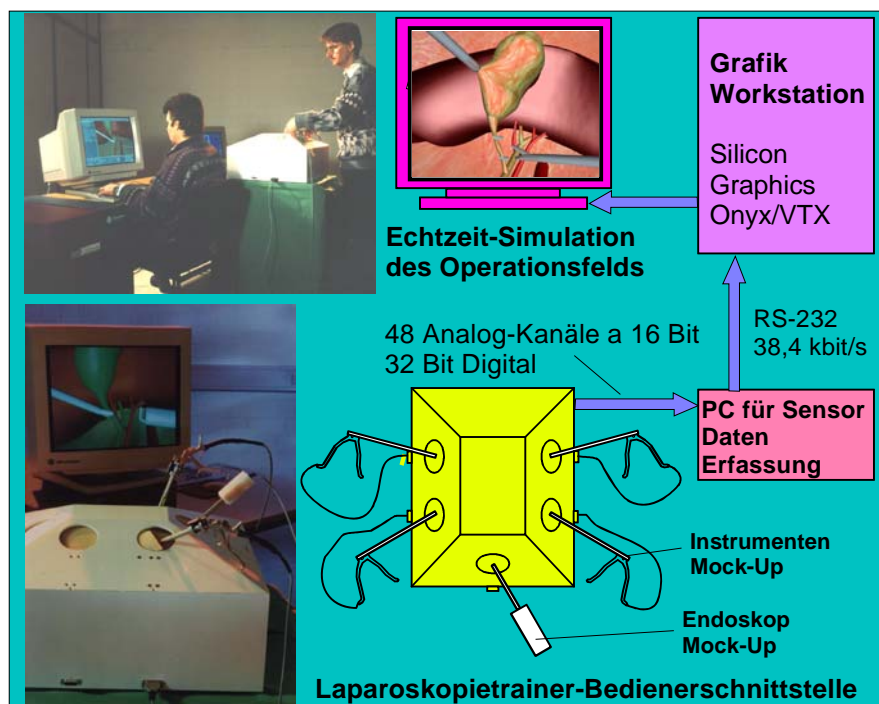


Bild 1: Schematischer Aufbau des „Karlsruher Endoskopietrainers“ (aus [1]).

Ein auf diesen Prinzipien basiertes Trainingssystem für die Laparoskopie wird in den nächsten Jahren soweit entwickelt sein, daß es das realistische Üben von **allen** für einen chirurgischen Eingriff relevanten Interaktionstechniken – Greifen, Klammern, Schneiden von Gefäßen, Präparieren von Gewebe mit Wundeffekt, Nähen, Spülen, Koagulieren – zwischen Patient bzw. Gewebe und Operationsinstrumenten gestattet. Weiterhin werden Sekundäreffekte – wie Pulsschlag, Atmung (zyklische Geometrieänderung), Bluten oder die Änderung der Geweboberflächen-Texturierung durch Koagulieren – simulationstechnisch beherrschbar sein. Ebenso werden kraftrückführende Eingabegeräte integraler Bestandteil eines MIC-Simulators sein.

Die hohen Investitionskosten für die erforderliche Recherausstattung und die mit einer Anschaffung häufig einhergehende Inflexibilität der Systemkonfiguration („Never-

Change-A-Running-System“-Philosophie: das System wird einmal installiert und anschließend nur noch im notwendigen Umfang gewartet und selten erweitert) führen zu dem Konzept des Tele-Trainers, der die erforderliche Rechenleistung über ein Dienstleistungszentrum zentral, mit allen Vorteilen der zentralen Systempflege bietet und der die Teilnehmer, mit preisgünstiger Bedienhardware und entsprechenden Telekommunikationseinrichtungen versehen, auf die zentrale Dienstleistung zugreifen läßt (Bild 2).

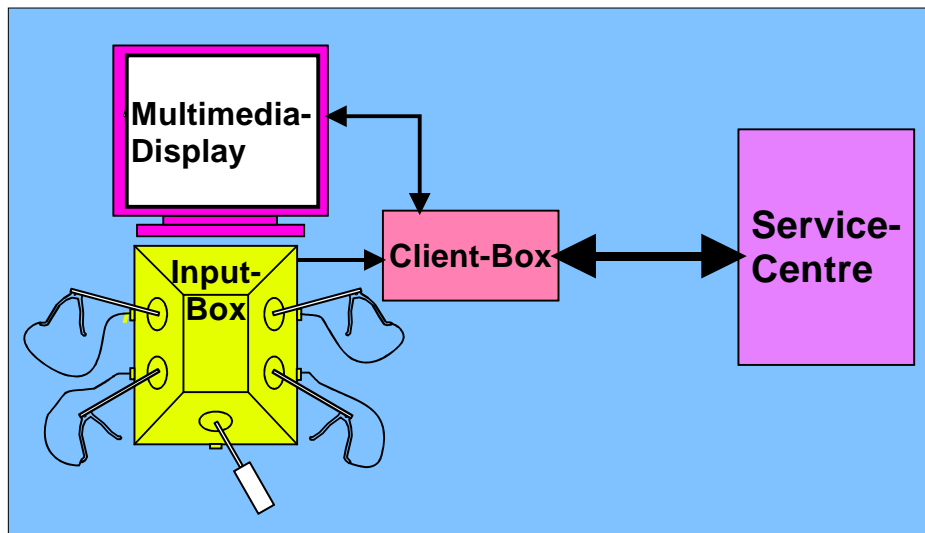


Bild 2: Schema eines **Tele-Operationssimulators**

Daneben ist auch denkbar, vom Service-Centre zeitlich limitierte Versionen der Trainings-Software zum Download anzubieten (Bild 3), die dann bei entsprechend ausgestatteten Benutzern für eine festgelegte Frist **lokal** ablauffähig sind. Durch diese Möglichkeit wird der Systembetrieb im Service-Centre entlastet aber dennoch der Wartungsaufwand für „gekaufte Vollsysteme“ reduziert.

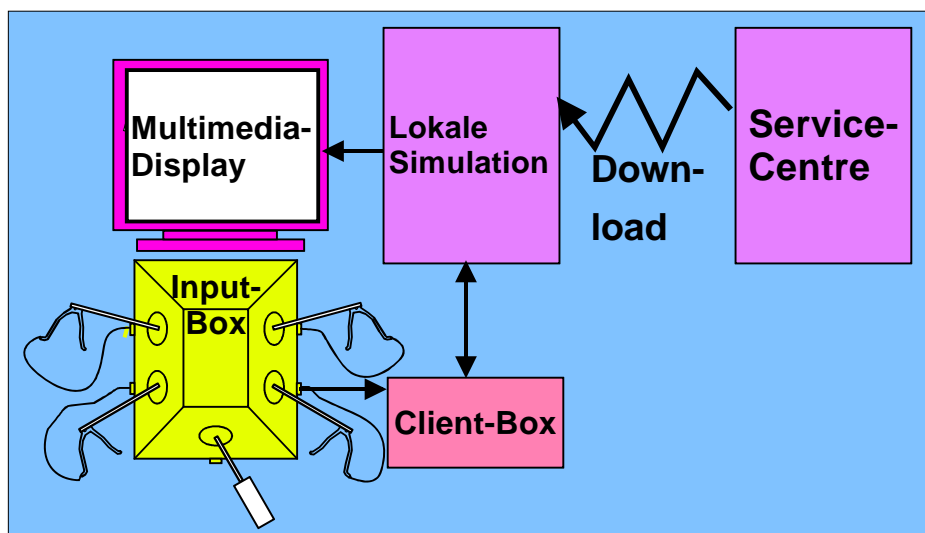


Bild 3: Eigenständiger Operationssimulator mit Download-Möglichkeit vom Service-Centre

Im Hinblick auf ein **Teletraining-System** sind gegenüber dem zuvor beschriebenen Laparoskopietrainer folgende Erweiterungen notwendig:

- Ein **Hypermedia-System** mit erläuternden Texten (Hintergrund, Historie, Umfeld, ...), Grafiken (physiologische Karten, Abnormitäten, Instrumente, ...), Anleitungen (übliche Schritte, ...), Video-Beispielen (real abgelaufene OPs, ...), einem elektronischen Lexikon etc. zum realisierten, medizinischen Einsatzgebiet. Dies erfordert einerseits die Implementierung eines angemessenen Hypermedia-Browsers, der über sog. Links den Zugriff auf die multimedialen Informationen und auf die Trainings-Session ermöglicht, andererseits die beispielhafte Integration des genannten Materials.
- Ein **Session-Management**, das neben Identifikation, Authentifikation und Autorisierung der Benutzer das **Accounting** (Abrechnung der benutzten Dienstleistungsressourcen und ggfs. der Netzwerknutzung) übernimmt und den Benutzern die Navigation in und Auswahl aus den angebotenen Dienstleistungen spontan und intuitiv ermöglicht. Hierbei ist der Einsatz von Benutzerprofilen möglich, um den Teilnehmern die Möglichkeit zu geben, sich ein angepaßtes Bedienumfeld zu erstellen und z.B. eine unterbrochene Sitzung an einer bestimmten Stelle später wieder aufzunehmen. Anzustreben ist ein Session-Management, das für den Benutzer als Einheit mit dem multimedialen Informationssystem erscheint. Es muß darüber hinaus auf der Seite des Dienstleistungszentrums die notwendigen Ressourcen belegen und die Informationskanäle zuordnen.
- Die Integration der vorhandenen Echtzeit-Simulation in die Bedienung des Dienstleistungssystemes und die Bereitstellung preisgünstiger und kompakter Eingabegeräte für die Benutzer. Der Teletrainer ist nicht auf ein einziges Einsatzgebiet festgelegt, neben dem beispielhaft implementierten Szenario „Laparoskopie“ eignet er sich ebenso für andere medizinische Felder (Neurochirurgie, Thoraxchirurgie, Kardiologie, Urologie, Gynäkologie, HNO, Zahnmedizin, ...) und nichtmedizinische Anwendungen. Für die jeweiligen Szenarien muß neben der Modellierung für die Simulation auch ein entsprechendes, realitätsnahes Eingabegerät erstellt werden.
- Einrichtung eines „**Bulletin-Board-Systems**“ zum asynchronen Informationsaustausch mit anderen Systembenutzern und den Dienstleistern, ggfs. durch eine synchrone, elektronische „**Hotline**“ erweitert.
- Schließlich kann das „Teletrainer“-Konzept auch noch in Richtung des „**Tele-Teaching**“ erweitert werden: ein voll ausgebildeter Chirurg könnte (z.B. auf Anforderung eines Auszubildenden über das Bulletin-Board oder die Hotline) spezielle Arbeitsgänge demonstrieren und so auf gemeinschaftliche und individuelle Belange eingehen.
- Gegebenenfalls können in einer späteren Phase **telechirurgische Möglichkeiten** integriert werden, so daß beispielsweise in einzelnen Fällen zum Abschluß einer Trainingsphase von der virtuellen Operation auf den realen OP übergegangen wird.

Aus informationstechnischer Sicht sind für die Realisierung des Dienstleistungszentrums auf der erprobten Basis für einen Benutzer 3(+1) Prozessoren (Mips R10000), 128 Mbyte Hauptspeicher und eine „InfiniteReality“-Grafik-Pipeline vorzusehen. Die erprobte Basis ist hierbei eine Maschine des Herstellers Silicon Graphics Incorporate (SGI) vom Typ „Onyx“. Bei der augenblicklichen Realisierung arbeiten 3 Prozessoren ausschließlich an der Simulation, 1 CPU führt die übrigen Tasks des IRIX-Systembetriebes aus. Im Hinblick

auf ein Service-Centre, das mehrere Benutzer simultan unterstützt, muß eine geeignete, größere Maschine eingesetzt werden; eine entsprechend ausgestattete Maschine von SGI mit vier CPUs Mips R10000, 512 MB Hauptspeicher, 16 GB Plattenkapazität und einer InfiniteReality Grafik-Pipeline mit 64 MB Texture-Memory ist mit Anschaffungskosten von ca. 700 000 DM zu veranschlagen.

Die einzurichtenden Informationskanäle sind von ihren Anforderungen her ausgeprägt asymmetrisch (Tabelle 1): in Richtung vom Benutzer zum Service-Centre sind asynchrone Kanäle relativ geringer Übertragungskapazität für den erforderlichen Datenverkehr – Sitzungssteuerung, Hypermedia-Kommandos, Stellvorgaben für die Simulation – ausreichend, sofern auf kraftrückführende Eingabe verzichtet wird (Kraftrückführung stellt besonders an die Übertragungsverzögerung höchste Anforderungen, da Delays unter etwa 100 ms garantiert werden müssen). Die Rückrichtung wird hingegen von den Video-Kanälen für Simulation und Hypermedia dominiert, wofür zum Einen deutlich höhere Datenraten anzusetzen sind, zum Anderen eine Isochronität bei der Übertragung gewährleistet oder zumindest mit hinreichender Wahrscheinlichkeit erzielbar sein muß. Insgesamt muß die Übertragungsverzögerung möglichst gering gehalten werden.

Tabelle 1: Anforderungen der logischen Datenströme an die Kommunikationsdienste

Dienstgüte Datenstrom	erforderl. Bandbreite (geschätzt)	Empfindlkt. ggü. Übertragungsver- zögerung	Empfindlkt. ggü. Datenverlust u. Über- tragungsfehlern	Isochrone Übertragung erforderlich?
„Terminal“-Daten zum Service-Centre	≤ 64 kbps	sehr gering	sehr gering	nein
„Terminal“-Daten zum Benutzer	≤ 2 Mbps	gering	hoch	nein
Steuerdaten zum Service-Centre	≤ 64 kbps	hoch	hoch	nein
Steuerdaten mit Kraftreflexion zum Service-Centre	≤ 2 Mbps	sehr hoch	sehr hoch	ja
Steuerdaten zum Benutzer (nur bei Kraftreflexion)	≤ 2 Mbps	sehr hoch	sehr hoch	ja
audiovisuelle Da- ten zum Benutzer	≤ 34 Mbps	hoch	gering	ja

Vor diesem Hintergrund wird ein Tele-Trainingskonzept auch aus wirtschaftlicher Sicht interessant, da selbst bei einer „kleineren“ Hardwareausstattung (Größenordnung um 300 000 DM) der Break-Even-Point mit den Telekommunikationskosten erreicht werden kann. (Die Deutsche Telekom berechnet für die Überlassung eines B-ISDN-Anschlusses von bis zu 34 Mbps derzeit monatlich für den ersten km der Anschlußleitung 19 220 DM und für jeden weiteren km 2 410 DM, für die Einrichtung werden einmalig 16 000 DM berechnet. Der Betrieb wird nach Verbindungszeit, Entfernung und Datenrate abgerech-

net, beispielsweise im Normaltarif für 34 Mbps in der Nahzone mit 117 DM für die ersten fünf Minuten und 23,40 DM für jede weitere Minute.)

In Richtung vom Benutzer zum Service-Centre genügen nach augenblicklichen Überlegungen drei serielle Kanäle nach V.24/RS-232c mit Schrittgeschwindigkeiten von 2400 baud (Maus), 9600 baud (Tastatur) und 38400 baud (Bediengerät). Die Rückrichtung läßt sich voraussichtlich mit nur einem digitalisierten Video-Kanal realisieren, der bei Verwendung von komprimierenden Codecs mit Datenraten von garantiert 384 Kbit/s (H.320), 1,5 Mbit/s (MPEG I), 5,5 Mbit/s (MPEG II) oder 20 Mbit/s (mJPEG) auskommt.

Die Kanäle müssen im Sinne eines flexiblen Netzwerkzugangs – wahlweise schmalbandiges oder breitbandiges ISDN – „getunnelt“ werden: als Kommunikationsmedium kommt S-ISDN oder B-ISDN (ATM) zum Einsatz, die seriellen und audiovisuellen Datenströme werden über entsprechende Modems bzw. Codecs über das gewählte Kommunikationsmedium geführt und bei der Gegenstelle wieder zurückgewandelt. Dabei übernimmt die sog. „Client-Box“ – denkbar ist ein in einem Kompaktgehäuse untergebrachter PC – die separaten Bediendaten und versendet sie wahlweise über die verfügbaren Netze, vom Service-Centre übernimmt sie die audiovisuellen Daten und zeigt sie am Bedienmonitor an. Für die mechanische Input-Box in der augenblicklichen Bauweise sind Herstellungskosten von ca. 35 000 DM zu veranschlagen, durch intensives Redesign (Einsatz von Microcontroller-Technik, Vereinfachung und serielle Herstellung mechanischer Komponenten) ist eine Kostenreduktion auf ca. 8 000 DM denkbar.

Nach provisorischer Kalkulation lassen sich die beiden Nutzungsszenarien (Tele-Training und Download-Lizenz) wie folgt den Zielgruppen zuordnen:

- MIC-Ausbildungszentren und die Medizintechnik-Industrie werden aufgrund hoher Nutzungszeiten bei den derzeit außergewöhnlich hohen Kommunikationskosten der DTAG ein eigenständiges System anschaffen und den Download-Service in Anspruch nehmen.
- MIC-Kliniken werden in Abhängigkeit von der Zahl der praktizierenden Ärzte und zu erwartenden Nutzungszeiten das Tele-Training wählen. Die Größe der Klinik spielt dabei die entscheidende Rolle, denn überschlagsmäßig ist für einen Arzt bei 20 Stunden Training pro Jahr (ca. 2 Stunden pro Monat) mit reinen Kommunikationskosten von 25 000 DM zu rechnen. Zusammen mit den Anschlußkosten im B-ISDN (346 000 DM/Jahr bei 5 km Anschlußweg) ist bereits bei etwa 5 trainierenden Ärzten die Download-Variante günstiger.

Die Preise der DTAG können jedoch insbesondere im Hinblick auf die Aufgabe des Monopols im Wettbewerb mit anderen Carriern nicht bestehen; eine rasche Normalisierung bleibt abzuwarten.

Bilder:

