

Schlussbericht zum DFN-Projekt:

CoDiSP – Collaborative Distributed Surgery Planning

Planung, Simulation und Training von Operationen in einer netzverteilten VR-Umgebung am Beispiel der kraniofazialen Chirurgie

Auftragsnummer: **TK 602 – NT 202.2**

Beteiligte Einrichtungen: Hightech-Forschungszentrum (HFZ),
Center of Advanced Cranio-Maxillofacial Surgery,
am Klinikum rechts der Isar, TU München (TUM)
Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin (ZIB)
Universitätsspital Basel,
Klinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie, Schweiz

Projektverantwortliche: Prof. Dr. Dr. Hans-Florian Zeilhofer
HFZ/TUM, Basel (hfzeilhofer@uhbs.ch)
Prof. Dr. Dr. Robert Sader
HFZ/TUM, Basel (rsader@uhbs.ch)
Hans-Christian Hege, Hon. Prof. (hege@zib.de)
ZIB und Hochschule für digitale Medienproduktion Elstal,

Bearbeiter: Daniel Baum (ZIB - baum@zib.de)
Götz Bock (HFZ,TUM - bg@blacknet.de)
Dr. Dr. Katja Schwenzer (HFZ,TUM,Basel - kschwenzer@uhbs.ch)
Dr. Detlev Stalling (ZIB - stalling@zib.de)
Ph.D. Brygg Ullmer (ZIB - ullmer@zib.de)
Horst Wawrzyn (HFZ - wawrzyn@t-online.de)
Stefan Zachow (ZIB - zachow@zib.de)

Kontakt: HFZ – Hightech-Forschungszentrum
Center of Advanced Cranio-Maxillofacial Surgery
Klinikum rechts der Isar, TU München
Ismaningerstraße 22, D-81675 München
Tel.: 089/4140-6310
Fax.: 089/4140-6311

Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin (ZIB)
Takustraße 7
D-14195 Berlin
Tel.: 030/84185-141
Fax.: 030/84185-107

Förderzeitraum: 1. April 2002 – 30. Juni 2004*
* inkl. kostenneutraler Verlängerung

24. März 2005

1 Aufgabenstellung, Randbedingungen

Im ersten Abschnitt des Schlussberichtes zum CoDiSP-Projekt erfolgt eine allgemeine Zusammenfassung der Aufgabenstellung und der angestrebten Projektziele. Anschließend wird auf die Voraussetzungen eingegangen, unter denen das Projekt bearbeitet wurde. Nach einer kurzen Zusammenfassung des wissenschaftlichen und technischen Standes zum Projektbeginn erfolgt die Beschreibung des geplanten Projektverlaufes gemäß des Projektantrages. Im Abschluss werden die Kooperationen mit weiteren Stellen zusammengefasst.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des CoDiSP-Projekts war die Konzeption und die Entwicklung einer Software zur *netzverteilten, kooperativen* Planung skelettverlagernder Operationen in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie (MKG-Chirurgie). Für die chirurgische Korrektur komplexer Schädelfehlbildungen und Knochenfehlstellungen sollen in Kooperation mit räumlich entfernten Fachkollegen unterschiedliche Therapievarianten am individuellen 3D Patientenmodell geplant und Planungsergebnisse sowohl unter funktionellen als auch ästhetischen Gesichtspunkten gemeinsam beurteilt werden können. Komplexe Operationen der im Projektantrag beschriebenen Art erfordern eine besondere chirurgische Expertise sowie eine langjährige Erfahrung. Aus diesem Grund soll das kollektive Wissen räumlich entfernter Fachkollegen chirurgischer und orthopädischer Disziplinen im Verlauf der Planung direkt über audio-visuelle Kommunikationsverfahren abgerufen und die Ergebnisse unterschiedlicher Behandlungsstrategien allen Teilnehmern einer Planungssitzung zeitgleich demonstriert werden können. Teilnehmer sollen sich dabei anhand einer gemeinsamen Planungsansicht beraten und bei Bedarf aktiv an der Modellplanung beteiligen können, um auf diese Art *gemeinsam* das optimale Therapiekonzept zu erarbeiten. Da sich die Gesamtbehandlung vom ersten Patientengespräch bis hin zu dessen Abschluss über viele Monate erstrecken kann und die eigentliche Operation unter Umständen fernab der Heimat in Spezialkliniken durchgeführt wird, sollen auch Patienten und deren Angehörige sowie vor Ort behandelnde Ärzte (z.B. Kieferorthopäden) an der Planung teilnehmen und Planungsschritte- sowie Ergebnisse in anschaulicher Form auf entfernten Rechnersystemen präsentiert bekommen. Zu diesem Zweck müssen auch Teilnehmer berücksichtigt werden, die nicht über aufwändige Kommunikationseinrichtungen bzw. besondere Hard- und Software verfügen.

Eine entsprechende computergestützte Planung integriert Aspekte der geometrischen 3D Rekonstruktion verlässlicher Patientenmodelle aus tomografischen Bilddaten, der Operationsplanung am 3D Kopfmodell unter Berücksichtigung der chirurgischen Vorgaben und Möglichkeiten sowie der Simulation einer aus der Knochenumstellung resultierenden Gesichtsform. Des weiteren ergeben sich typische Anforderungen an eine netzverteilte, kooperativ nutzbare Software (*Collaborative Distributed Environment*). Am Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB) wird seit Ende 1999 an Verfahren zur Planung von chirurgischen Knochenschnitten (Osteotomien) und Knochensegmentverlagerungen an aus tomografischen Daten rekonstruierten Schädelmodellen sowie der Simulation der räumlichen Weichgewebedeformation gearbeitet. Im CoDiSP-Projekt erfolgte der Entwurf und die Entwicklung einer *praxisgerechten* Lösung zur kooperativen, netzverteilten Planung. Die wichtigsten Kriterien bei der Konzeption eines solchen Planungssystems waren dabei wie folgt:

- Interdisziplinäre Aufgabenteilung bei der Planungsvorbereitung, der Planung und der Planungsauswertung.

- Rekonstruktion von anatomisch korrekten Schädel- bzw. Kopfmodellen aus tomografischen Bilddaten (CT) als Dienstleistung für Kliniken.
- Falldiagnose unter Nutzung aller verfügbaren Bild- und Modelldaten bei geeigneter, ggf. auch kombinierter Darstellung in einem Referenzkoordinatensystem.
- Intuitive chirurgische Planung von Knochenschnitten und Knochenverlagerungen an individuellen 3D Schädelmodellen mittels geeigneter Planungswerkzeuge in Kooperation mit räumlich entfernten Fachkollegen.
- Simulation der aus einer Planung resultierenden Gesichtsform auf Basis physikalischer und mathematischer Weichgewebemodelle zur Bewertung des geplanten Eingriffs aus ästhetischer Sicht.
- Qualitativ hochwertige 3D Visualisierung des Planungsmodells sowie der Simulationsergebnisse für alle Teilnehmer bei freier und interaktiver Wahl der Modellansicht durch individuelle Teilnehmer.
- Export der Darstellung beliebiger Planungsergebnisse, ggf. in videoanimierter Form, zur verbesserten Patientenaufklärung sowie zur medizinischen Schulung und Ausbildung.

Klinische Anwender sollen dabei von allen technischen Belangen der Modellrekonstruktion und der Simulation bzw. der komplizierten Bedienung einer komplexen Software weitgehend befreit bleiben und sich ausschließlich auf die medizinischen Belange der Diagnose, der Schnitt- und der Umstellungsplanung sowie deren Bewertung, also der eigentlichen medizinischen Aufgabenstellung, konzentrieren können. Das zu entwickelnde Planungssystem war somit als gemeinsam nutzbares System für die interdisziplinäre Zusammenarbeit von räumlich verteilten Teilnehmern unterschiedlicher Fachrichtungen konzipiert und sollte in Form einer spezialisierten Dienstleistung, in Analogie zu radiologischen oder histologischen Abteilungen bzw. ausgelagerter Modell- und Implantatfertigung, Chirurgen bei der Findung eines optimalen Therapiekonzeptes unterstützen. Die Aufgabenstellung war dabei, ein am ZIB seit dem Jahr 2000 in der Entwicklung befindliches Planungssystem dahingehend zu erweitern, dass klinische Partner spezielle Planungsschritte mit eigens dafür entwickelten Werkzeugen selbst durchführen und direkt bewerten können, statt die Planung von eher technisch orientierten, jedoch medizinisch weniger versierten Planungsassistenten durchgeführt und lediglich die Ergebnisse präsentiert zu bekommen. Dazu bietet sich eine verteilte Planungssoftware unter Nutzung moderner Kommunikationsnetze an, auf die klinische Partner und ggf. auch Patienten mit ihren lokalen Rechnersystemen Zugriff haben. Zielvorstellung ist die transparente interaktive Nutzung einer Planungssoftware bei gleichzeitiger Kommunikation mit Planungsexperten, räumlich entfernten Fachkollegen und Patienten.

1.2 Voraussetzungen

Die medizinische Problemstellung besitzt eine hohe klinische Relevanz, und sowohl in München bzw. Basel als auch in Berlin sind die geeignete technische Infrastruktur sowie die personelle Expertise vorhanden, um die vorab genannte Aufgabenstellung erfolgreich zu bearbeiten, was u.a. durch die Vorarbeiten der Projektpartner deutlich belegt wird.

1.2.1 Vertragssituation

Der Hauptvertrag zwischen dem DFN-Verein (als Auftraggeber) und dem Hightech-Forschungszentrum (HFZ) – *Center of Advanced Studies in Cranio-Maxillofacial Surgery* am Klinikum rechts der Isar der TU München, vertreten durch Herrn Prof. Dr. Dr. Hans-Florian Zeilhofer und Herrn Prof. Dr. Dr. Robert Sader, sowie dem Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (jeweils als Auftragnehmer) trat zum 1. April 2002 mit einem Förderungszeitraum von 2 Jahren in Kraft. Auf Antrag wurde der Förderzeitraum kostenneutral bis zum 30. Juni 2004 verlängert.

1.2.2 Institutionen – Projektpartner

Am **Klinikum rechts der Isar, der TU München** wurden von Prof. Zeilhofer und Prof. Sader bereits seit 1994 computergestützte Methoden zur Planung skelettverlagernder Eingriffe am Gesichtsschädel evaluiert. Dabei wurden u.a. umfangreiche qualitätssichernde Untersuchungen zur Genauigkeit bei der Prognose der sagittalen Weichteilprofilinie verschiedener 2D Video-Imaging-Verfahren durchgeführt [39, 40]. Die Zweidimensionalität dieser Verfahren stellte sich dabei für den Großteil der Fälle als unzureichend heraus. Zur Planung komplexer Umstellungsosteotomien wurde weiterhin die Technik der dreidimensionalen OP-Planung anhand medizinischer RP-Modelle im Verlauf von ca. 350 Operationen etabliert und optimiert, wobei hierbei die Weichteilveränderungen *nicht* mit in die Planung einbezogen werden konnten [35]. Für die vorab genannten Techniken bei der Planung skelettverlagernder Eingriffe verfügt Prof. Zeilhofer über sehr umfassende Erfahrungen. Eine für das Projekt notwendige Voraussetzung, nämlich die interaktive verteilte Datenaufbereitung, wurde bereits im DFN-Projekt CAFCAS bearbeitet. Als Anwendung im Rahmen des Gigabit-Testbed Süd konnte gezeigt werden, dass die Nutzung breitbandiger Kommunikationsstrukturen eine Optimierung räumlich getrennter, komplexer medizinischer Prozessabläufe ermöglicht. Eine leistungsfähige Datenkommunikation verdeutlichte am Beispiel einer komplexen medizinischen Anwendung aus dem Bereich der computer-assistierten Chirurgie die Möglichkeit einer sofortigen, interaktiven Bearbeitung medizinischer Bilddaten auf räumliche Distanz. Dieses Szenario sollte im CoDiSP-Projekt auf eine netzverteilte OP-Planung und -Simulation in einer VR-Umgebung erweitert werden.

Das **ZIB**, eine außeruniversitäre, rechtsfähige Einrichtung des Landes Berlin, betreibt in fächerübergreifender Kooperation mit Hochschulen, wissenschaftlichen Einrichtungen und der Industrie Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Informationstechnik und der anwendungsorientierten algorithmischen Mathematik. Schwerpunkte des ZIB liegen u.a. auf den Gebieten *Scientific Computing* und *Computer Science*. Neben dem Ausbau und Betrieb des Berliner Landeshöchstleistungsrechners, inklusive fachwissenschaftlicher Betreuung der Projekte, wird am ZIB auch Forschung auf dem Gebiet der Architektur und Nutzung paralleler und verteilter Systeme betrieben. Im Bereich der Informatik liegen am ZIB besonders in der Entwicklung und Unterstützung von Supercomputer-Simulationen, dem Betrieb von Hochleistungs-Kommunikationsnetzen, der Entwicklung von Diensten und Anwendungen der interaktiven Breitbandkommunikation und der wissenschaftlichen Visualisierung umfangreiche Erfahrungen vor. Dies wird durch eine Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsprojekten in den oben genannten Gebieten sowie die wissenschaftlichen Dienstleistungen des ZIB belegt [10–14, ff.]. Ein besonderes *Know-how* liegt im Bereich der Entwicklung und Realisierung sogenannter "virtueller Labors", d.h. Arbeits- und Experimentierumgebungen, die Verfahren der Bildverarbeitung, Geometriekonstruktion, Numerik und Visualisierung in integrierter Weise für Computersimulationen bereitstellen. Diese erlauben es, komplexe Aufgaben, wie z.B. die Planung von medizinischen Thera-

pien, in einer einheitlichen Software-Umgebung durchzuführen. Als Entwicklungsplattform dient die am ZIB entwickelte Visualisierungs- und Modellierungssoftware AMIRA,¹ die im Rahmen diverser Projekte permanent weiterentwickelt wird [25]. Spezielle netzorientierte Projekte waren z.B.: DFN - TIKSL – „Tele-Immersion: Kollision schwarzer Löcher“, DFN - VisInfo – „Informationsdienst für die Wissenschaftliche Visualisierung“, DFN - BRTB – „Verteilte Visualisierung wissenschaftlicher Daten“ und DFN - GRIKSL – „Grid basierte Simulation und Visualisierung“. Durch die Berufung von Herrn Prof. Dr. Dr. Zeilhofer an das **Universitätsspital Basel** ergab sich im CoDiSP-Projekt in der Projektlaufzeit die Möglichkeit der Beteiligung einer weiteren Institution mit entsprechender Kompetenz und den erforderlichen medizinischen und technischen Voraussetzungen. Die Zusammenarbeit mit einer Schweizer Klinik ermöglichte, unter Berücksichtigung der bereits gesammelten Erkenntnisse, den Aufbau einer weiteren kollaborativen Planungsumgebung und kann gleichzeitig als wegweisender Schritt in Richtung eines europaweiten bzw. internationalen Netzwerkes für die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Chirurgen und assistierenden Planungsteams betrachtet werden.

Die Firma **Indeed - Visual Concepts GmbH** ist eine Ausgliederung der Abteilung *Scientific Visualization* des ZIB. Das zu entwickelnde Chirurgieplanungssystem beruht auf der Basissoftware AMIRA, deren Entwicklung von den entsprechenden Mitarbeitern maßgeblich vorangetrieben wurde und eine Vielzahl von grundlegenden Funktionen im Bereich der Bildsegmentierung, Geometrierekonstruktion und 3D Visualisierung bereitstellt. Die kommerziellen Rechte an der Software wurden vom ZIB an die Firma Indeed übergeben, die den vorhandenen Forschungscode zu einem professionellen Produkt weiterentwickelte und auf diverse Rechnerplattformen portierte. Die Software wird in enger Zusammenarbeit mit dem ZIB weiterentwickelt und kommt in unterschiedlichen medizinisch orientierten Forschungsprojekten zum Einsatz. Die Firma Indeed hat ebenfalls Expertise bei der Installation von Projektionssystemen und führte auch die Installation der 3D Planungsumgebung bei den klinischen Partnern durch. Anfang des Jahres 2004 wurde die Firma Indeed von dem amerikanischen Konzern **Mercury Computer Systems, Inc.** übernommen und in eine deutsche Niederlassung **Mercury Computer Systems GmbH** überführt, die den kompletten Entwicklungsbereich *Life Sciences* bildet. Sowohl die Firma Indeed als auch Mercury unterstützten das CoDiSP-Projekt durch Bereitstellung der jeweils aktuellsten Softwareversion für die Projektpartner.

1.2.3 Personalsituation

Eine, aus CoDiSP-Projektmitteln finanzierte BAT-IIa-Stelle wurde während des Förderungszeitraumes durch den am ZIB seit 1999 tätigen Mitarbeiter, Stefan Zachow, besetzt. Er befasste sich mit den Belangen der chirurgischen Anforderungen und deren Umsetzung für eine computergestützte, klinisch nutzbare Planung. Ende des Jahres 2001 wurde Herr Thilo Böhm, der bereits über Erfahrungen auf dem Gebiet netzverteilter Anwendungen verfügte, für das CoDiSP-Projekt als weiterer Mitarbeiter am ZIB eingestellt. Herr Böhm wurde in den ersten vier Monaten aus ZIB-Mitteln finanziert, arbeitete ca. ein Jahr im Projekt und verließ das ZIB vor Ablauf des Projektzeitraumes wieder. Anstelle von Herrn Böhm befasste sich Daniel Baum, als langjähriger ZIB-Mitarbeiter, weiter mit der Aufgabenstellung. Technische Aspekte der Benutzerschnittstellen in verteilten VR-Umgebungen wurden von Dr. Brygg Ullmer bearbeitet. Weitere aus ZIB-Eigenmitteln finanzierte Mitarbeiter sind Hans-Christian Hege (Projektleitung), Dr. Detlef Stalling und Olaf Paetsch (Weiterentwicklung der Basissoftware).

¹ amira.zib.de

Am HFZ, Klinikum rechts der Isar, war der Projektmitarbeiter Horst Wawrzyn (Mathematiker) mit der Hälfte der wöchentlichen Arbeitszeit im CoDiSP-Projekt beschäftigt. Er nutzte die Planungssoftware vor Ort und gab den klinischen Partnern technische Hilfestellung. Herr Wawrzyn bildete die technische Schnittstelle zwischen den Kooperationspartnern und führte in München auch selbstständig Planungen durch. Er betreute zusammen mit Herrn Götz Bock (Informatiker) die gerätetechnische Infrastruktur. Frau Dr. Dr. Katja Schwenzer (Medizinerin) unterstützte das Projekt seit dem 1. Okt. 2002 von medizinischer Seite und befasste sich mit der Vorbereitung der Planungen, der Erfassung von Planungsdaten sowie der klinischen Evaluierung. Auf Herrn Bock und Frau Dr. Dr. Schwenzer verteilten sich die verbleibenden 50% der Projekt bezogenen Personalmittel in München zu gleichen Teilen. Am ZIB wurden weiterhin zwei studentische Mitarbeiter mit jeweils 60 Stunden pro Monat für Programmieraufgaben zum CoDiSP-Projekt beschäftigt. Sie unterstützten die Entwicklung von Werkzeugen für die chirurgische Planung. Am HFZ in München wurde ebenfalls ein studentischer Mitarbeiter eingestellt.

1.2.4 Technische Infrastruktur

Als Ausgangsbasis für das CoDiSP-Projekt diente u.a. die bereits im CAFCAS-Projekt an der **TU München** realisierte breitbandige Kommunikations-Infrastruktur. Das Hightech-Forschungszentrum für Computer-assistierte Chirurgie und Virtuelle Realität (**HFZ**), sowie das Multimedia-Labor im **Klinikum rechts der Isar** sind über das Leibniz Rechenzentrum München (LRZ) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften am Gigabit-Netz angebunden. Bereits vor Projektbeginn erfolgten MCU-gesteuerte, hochwertige Videokonferenzsitzungen, während derer, durch gleichzeitige Rechnerkopplung (Einbindung der Rechner in ein hierarchisches PNNI-System), interaktiv Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden konnten. Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen, über alternative Zugangsnetze (ISDN, TDSL) angebundene Forschungsstandorte nicht nur in die Videokonferenzsitzungen sondern auch in die interaktive Datenbearbeitung mit einzubinden.

Das **Konrad-Zuse-Zentrum Berlin** ist seit 1998 Teilnehmer des DFN-Gigabit-Testbeds Süd, und fungiert seit dem 30. Juni 2000 als Kernnetzknoten des Deutschen Gigabit Wissenschaftsnetzes (G-WiN). Die folgenden, im CoDiSP-Projekt betrachteten Netzwerktechnologien (außer ADSL) standen bereits zu Projektbeginn zur Verfügung: ISDN, 10BaseT, 100BaseT, ATM-155 (OC12) und ATM-622 (OC3) und wurden in vorangehenden DFN-Projekten im Rahmen des Gigabit-Testbeds Süd-Berlin (Güte, TIKSL) erfolgreich eingesetzt. Diese gut ausgebaute Netzwerk-Infrastruktur des Institutes, die auch für Projekte des sogenannten *Grid-Computing* genutzt wird, bildete eine wesentliche Grundlage für das vorliegende Projekt.

Die Erkenntnisse aus vorangehenden Projekten (CAFCAS, TIKSL) und auch aus parallel laufenden Projekten (GRIKSL, INTER-FACE, ARSYS - TRICORDER) beider Projektpartner bildeten eine weitere wichtige Grundlage für die anwendungsorientierte Nutzung der verfügbaren Ressourcen im CoDiSP-Projekt.

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die computergrafische 3D-Planung und Simulation operativer Eingriffe besitzt für die Qualität chirurgischer Eingriffe in der operativen Medizin eine besondere Bedeutung, da bei komplexen Eingriffen ein hohes Maß an Vorausplanung und räumlicher Orientierung erforderlich ist. Pilotprojekte im Bereich der Endoskopie, Laparoskopie, Arthroskopie oder Angioskopie zeigen die Möglichkeiten einer breiten medizinischen Anwendung, sowohl für das Training und die Aus-

bildung von Chirurgen als auch für eine optimierte 3D Operationsplanung. Trotz intensiver Forschung existierte zu Projektbeginn noch kein klinisch einsetzbares System für die MKG-Chirurgie, das die unter 1.1 genannten Forderungen auch nur ansatzweise erfüllt. Entsprechende Konzepte und Prototypen waren bislang nicht über den Stand einer wissenschaftlichen Untersuchung bzw. einer Machbarkeitsstudie hinausgekommen [1, 2, 9, 18–20, 22, 24, 26, 30, etc.].

Am ZIB wurden mit Hilfe computergrafischer Modellierung und Visualisierung sowie physikalisch-mathematischer Simulationen Schlüsseltechniken erarbeitet, die es dem MKG-Chirurgen erstmals ermöglichen, komplexe Operationen sowohl unter Aspekten der funktionellen Rehabilitation als auch unter Berücksichtigung der Weichgewebeverlagerung am Computer dreidimensional zu planen [31–34]. Erste Konzepte für eine *verteilte* medizinische Planung wurden im Rahmen des DFN-Projektes CAFCAS erarbeitet. Durch Nutzung einer breitbandigen Kommunikations-Infrastruktur konnte ein interaktiver Verarbeitungsprozess auf räumliche Distanz realisiert werden, der neue Möglichkeiten der präoperativen Planung von komplexen chirurgischen Korrekturoperationen aufzeigt [23, 36, 38].

1.3.1 Arbeiten der Projektpartner

Im DFN-Projekt **CAFCAS** – „Nutzung breitbandiger Kommunikations-Infrastrukturen zur iterativen Qualitätskontrolle und -verbesserung am Beispiel der Planung und Simulation komplexer Operationen im Mund-Kiefer-Gesichtsbereich“ wurde die Nutzung einer breitbandigen Kommunikations-Infrastruktur für einen interaktiven Verarbeitungsprozess medizinischer Bilddaten auf räumliche Distanz getestet und etabliert. Durch die gemeinsame Ausnutzung von entfernten Ressourcen konnte die Prozesskette der Aufnahme und Weiterverarbeitung (Artefaktreduktion) medizinischer Bilddaten optimiert werden. Neben den Aspekten der Qualitätssicherung führte dies auch zu Kosteneinsparungen durch Vermeidung von unnötigen Iterationen bei radiologischen Untersuchungen. Die Ergebnisse von CAFCAS belegten, dass durch Nutzung einer breitbandigen Kommunikations-Infrastruktur ein interaktiver Verarbeitungsprozess von großvolumigen 3D Bilddaten durch Medizin-Physiker und Kliniker auf räumliche Distanz ermöglicht und sinnvoll durchgeführt werden kann [38]. Die in CAFCAS gesammelten Erfahrungen haben weiterhin dazu geführt, dass entstehende Krankenhauskommunikationssysteme auf die Belange einer entsprechenden Netzanbindung adaptiert werden. Die nachweisbare Vermeidung von Folgeuntersuchungen und auch Folgeoperationen durch eine optimierte Prozesskette hatte weiterhin zur Folge, dass Ärztekammern und Krankenkassen ihr Interesse an der Weiterentwicklung solcher Systeme bekundet haben und entsprechende erste klinische Machbarkeitsstudien unterstützen. Zu diesem Zweck stellte z.B. die Krankenhausverwaltung des Klinikums rechts der Isar für weitere Entwicklungsarbeiten dem Antragssteller, Prof. Zeilhofer, budgetneutral ein neues Gebäude für die angewandte Forschung und Erprobung im Bereich der verteilten VR-Umgebung zur Verfügung, in dem das HFZ, *Center of Advanced Cranio-Maxillofacial Surgery* eingerichtet wurde. Damit lieferte das Projekt CAFCAS eine geeignete Grundlage für das CoDiSP-Projekt, in dem das Nutzungsszenario der verteilten Datenaufbereitung zu einer verteilten Operationsplanungsumgebung weiterentwickelt werden sollte. Durch die Zusammenarbeit von Chirurgen, Medizin-Physikern, Informatikern und Mathematikern sollte ein deutlich verbessertes Endprodukt (Operationsplanung, Operationsdurchführung) erzielt werden. In jeder Stufe des Planungsprozesses ist neben dem zeitkritischen Datenaustausch und der Synchronisation der entsprechenden Bildinformation auch die audio-visuelle Kommunikation zwischen den Spezialisten an verschiedenen Orten gefordert. Die geplanten Entwicklungsergebnisse sind dabei nicht nur für die Operationsplanung in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie von Bedeutung, son-

dern lassen sich auch auf andere Anwendungsgebiete im Bereich der Medizin bzw. der Natur- und Ingenieurwissenschaften übertragen, in denen kooperative und interdisziplinäre Zusammenarbeit von räumlich entfernten Spezialisten gefordert sind.

Synergien ergaben sich des Weiteren durch das DFN-Projekt **Inter-Face** – „Entwicklung, Erprobung und Einsatz eines multimedialen telemedizinischen Videokonferenzsystems in heterogenen Umgebungen, am Beispiel einer interdisziplinären computerunterstützten Therapieplanung von Form- und Lageanomalien des Kiefer- und Gesichtsschädels“. Das Projekt INTER-FACE, mit dem die Kommunikations-Infrastruktur für die präoperative Planungsphase erheblich verbessert werden sollte, ist eine logische Weiterführung des Münchner DFN-Projektes CAFCAS und des Hannoveraner DFN-Projektes „Werkzeuge zur Unterstützung multimedialer Online-Konferenzen im MBone“. Durch die Weiterführung dabei gewonnener Erfahrungen konnte unter Einsatz moderner Hochleistungs-Kommunikationstechnologie die präoperative Behandlung des eigentlichen operativen Eingriffes weiter optimiert werden. Dazu wurde in einem Kommunikationsszenario ein *Front-End* entwickelt, das den Chirurgen eine intuitive Interaktion mit dem Bildszenario der Gegenseite erlaubt. Das INTER-FACE-Projekt bot durch seine Anlage eine ideale Plattform, um den Nutzen von fortschrittlicher Multimedia-Kommunikation zwischen Spezialisten in universitären Einrichtungen und der ärztlichen Praxis aufzuzeigen. Aus diesem Grund wurden in INTER-FACE sowohl verschiedene, technische Szenarien als auch mögliche Anwendungskonzeptionen erprobt. Ziel war es, eine multimediale Brückenbildung unter besonderer Berücksichtigung einer hochwertigen Videokonferenzumgebung zwischen dem Deutschen Wissenschaftsnetz (G-WiN) und schmalbandigen Zugangsnetzen zu schaffen [37]. Die Ergebnisse von INTER-FACE ergänzen somit die Entwicklungsarbeit im CoDiSP-Projekt, in dem auch niedergelassene Ärzte und Patienten mit schmalbandigen Kommunikationseinrichtungen an der kooperativen, netzverteilten Planung beteiligt werden sollen. Die aus INTER-FACE gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit der Vernetzung von ISDN- oder ADSL-basierten Videokonferenzsystemen und Breitbandsystemen lassen sich somit direkt nutzen.

Im DFN-Projekt **TIKSL** – „Tele-Immersion – Kollision Schwarzer Löcher“ wurden grundlegende Netzwerkfähigkeiten für große, in Netzwerkkumgebungen auf Supercomputern laufende Simulationen aus dem Bereich der numerischen Relativität entwickelt. Dazu wurde u.a. ein Standard-Datenformat (HDF5) mit effizienten Streaming-Mechanismen auf Basis des Globus DataGrid ausgestattet. Diese Lösung gewährleistet einen sicheren Datentransport in Wide-Area-Netzwerken. Die Erweiterung der standardisierten HDF5 – I/O-Bibliothek um effiziente Möglichkeiten zum entfernten Datenzugriff unter Ausnutzung allgemeiner und sicherer Grid-I/O-Techniken, der Entwurf und die Entwicklung von Kontroll- und Steuermechanismen, welche Anwendern die direkte Interaktion mit laufenden verteilten Simulationen ermöglichen, sowie die Erweiterung vorhandener Visualisierungswerkzeuge um geeignete Techniken, die sowohl Echtzeitdaten von der laufenden Simulation für einen entfernten Beobachter visualisieren als auch Rohdaten aus entfernten Dateien darstellen können, lieferten wichtige Erkenntnisse für das CoDiSP-Projekt [3]. Insbesondere die Eignung des auf wissenschaftliche Daten orientierten HDF5 für medizinische Bilddaten sollte im Projektverlauf von CoDiSP überprüft werden.

Das vom DFN geförderte Projekt **GriKSL** – „Grid basierte Simulation und Visualisierung“ behandelte ähnliche Problematiken im Bereich grosser wissenschaftlicher Datenmengen. Insbesondere in Bezug auf Datenbeschreibungen und Interaktionsmechanismen, sowie der globalen Bemühungen zur Definition und Implementierung generischer Grid-Middleware ergaben sich Synergien mit dem CoDiSP-Projekt. Dies betraf nahezu alle kommunikationstechnischen Aspekte des Projektes. Mitarbeiter des ZIB waren dazu aktiv in den Grid-Standardisierungsgremien *Global Grid Forum* und *European Grid Forum* tätig, welche sich mit den o.g. Technologien

auseinandersetzen. Sie unterstützten damit auch die Arbeit des CoDiSP-Projektes.

Im Rahmen des BMBF - Förderprogrammes zur Virtuellen-Augmentierten Realität wurde das Projekt **ARSys - Tricorder** – „Entwicklung eines Augmented Reality Systems für die intraoperative Navigation am Beispiel des individuellen Transplantatdesigns in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie“ durchgeführt. Obwohl hierbei der Schwerpunkt auf der Entwicklung eines intraoperativen Navigationssystems in einer VR-Umgebung lag, kamen die gewonnenen Erfahrungen der Mediziner mit den Methoden der virtuellen Realität im medizinischen Umfeld der CoDiSP-Projektarbeit direkt zugute. Federführung im Projekt ARSYS- TRICORDER hatte die Abteilung Virtual Environments am Institut für Medienkommunikation der GMD, Forschungszentrum Informationstechnik GmbH in St. Augustin. Das HFZ war der medizinische Kooperationspartner.

1.3.2 Verwandte Arbeiten zum Projektthema

Das CoDiSP-Projekt kann in drei Themenbereiche gegliedert werden. Im Gesamtkonzept handelt es sich um eine verteilte Software zur kooperativen Bearbeitung komplexer Problemstellungen durch räumlich voneinander entfernte Teilnehmer. Aufgaben dieser Art werden in den Forschungsgebieten der *Collaborative Distributed Environments* bzw. der *Collaborative Virtual Environments* behandelt [7, 15]. Die Nutzung verteilter Rechnersysteme und die Bündelung technischer Ressourcen in Kombination mit geeigneten Verfahren zum *Scheduling*, zur Synchronisation und zum Datenmanagement sind u.a. Themen, die im sogenannten *Grid-Computing* bearbeitet werden. Als Anwendungsszenario dient die kooperative 3D Planung von komplexen Operationen in der Gesichtschirurgie. Erste Konzepte zur Entwicklung entsprechender, nicht-verteilter Planungssysteme sind auf Mitte bis Ende der 1980er Jahre zurückzuführen [8]. Seit Anfang der 1990er Jahre befassten sich diverse Arbeitsgruppen mit der computergestützten Operationsplanung (siehe 1.3 oben), darunter sogar zwei Sonderforschungsbereiche (SFB 414 und 603) in Deutschland. Kommerzielle Lösungen sind zwar noch nicht verfügbar, doch ein genereller Bedarf an einer verteilten Diagnose und Planung bzw. einer zum Teil ausgelagerten Planungsvorbereitung, ggf. auch in Form einer Dienstleistung, ist zunehmend erkennbar [6, 21, 28, 29].

Von informationstechnischer Seite sind verteilte Systeme seit vielen Jahren von großem Interesse. Die Rolle des Internets in Wirtschaft und Wissenschaft belegt dies nachdrücklich [27]. Dennoch ist es erst in jüngerer Zeit gelungen, geeignete Paradigmen zur Entwicklung verteilter Softwaresysteme zu entwickeln, welche die Applikationen von den Limitierungen bisheriger Lösungen (hinsichtlich Skalierbarkeit, Sicherheit, Kompatibilität, Portabilität, Code-Wiederverwendung usw.) befreien. Zu diesen Paradigmen gehören zum Beispiel Komponentenmodelle wie Corba, Java Beans, Jini, COM sowie das Grid-Computing. Komponentenmodelle haben sich im kommerziellen Umfeld bereits einen festen Platz gesichert. Ihr konsequent objektorientierter Ansatz macht sie vor allem für große Netzwerkprojekte interessant. Intrinsische Sicherheitsmechanismen sind standardisiert und anerkannt. Im wissenschaftlichen Umfeld konnten sich diese Programmiermodelle jedoch noch nicht durchsetzen. Hauptursachen dafür sind: (i) Schlechte Performance für große Datensätze, (ii) aufwändige Verwaltung der Infrastruktur sowie (iii) unzureichende Verfügbarkeit auf im wissenschaftlichen Umfeld typischen Architekturen (Unix, Supercomputer). Das noch sehr junge Modell des Grid-Computing erfährt gegenwärtig größere Aufmerksamkeit. Eine steigende Anzahl von Projekten widmet sich der Entwicklung von Konzepten, Standards und Protokollen zur Unterstützung der Entwicklung verteilter Applikationen (Globus, Condor, GGF, Egrid). Der Grid-Ansatz besteht im Wesentlichen darin, verteilte Services zu implementieren, die sich auf Applikationsebene als sogenannte *Grid Fabric Layer* darstellen und alle

benötigten Dienste über standardisierte Schnittstellen und Protokolle zur Verfügung stellen. Diese Schicht beinhaltet u.a. Komponenten zu *secure communication*, *resource brokering*, *remote job control*, *remote data access* und weitere mehr. Aber auch hier existieren (noch) keine universell einsetzbaren Lösungen. Daher ist es notwendig, die gegenwärtigen Entwicklungsbemühungen durch anwendungsnahe Forschung zu unterstützen und zu lenken. Entsprechende Konzepte werden z.B. im 2002 gestarteten EU Projekt GEMSS² – „Grid-Enabled Medical Simulation Services“ verfolgt, in dem Planungswerkzeuge über räumlich entfernte Server angeboten und numerische Simulationen, z.B. zur Weichgewebedeformation, durch Parallelisierung und Verteilung auf freie Ressourcen beschleunigt werden sollen [4, 5]. Weltweit ist in den letzten Jahren das Interesse an allgemeinen Lösungen insbesondere zum Datenmanagement in Grid-Umgebungen stark angewachsen. Das hängt nicht zuletzt mit den steigenden Anforderungen moderner naturwissenschaftlicher Experimente zusammen (Human-Genom-Projekt, LHC am CERN, Visible-Human-Projekt, Auswertung von Satellitendaten usw.). Es wurden neue, teilweise sehr komplexe Architekturen für das Grid-Datenmanagement entwickelt, die als Prototypen verfügbar sind. Zur Zeit findet insbesondere das Globus DataGrid Beachtung, das effiziente und sichere Datentransfers auf Standardprotokollen, Datenreplikation und bewährte SSL-Sicherheit kombiniert.

1.4 Planung und Ablauf

In einer Pilotstudie wurden komplette kooperative Planungen von chirurgischen Eingriffen mit dem am ZIB entwickelten Planungssystem auf der Basis konventioneller Kommunikationsmethoden (E-Mail, Briefversand, Videokonferenztechnik, Bildannotationen, Zeichnungen etc.) durchgeführt. Darüber wurden die Anforderungen an ein netzverteiltes Planungssystem erarbeitet, bei dem mehrere räumlich entfernte Teilnehmer bei identischer Planungssicht und unter Nutzung audio-visueller Kommunikationstechniken gemeinsam eine komplexe Planungsaufgabe bearbeiten. Dabei sollte nachgewiesen werden, dass ein netzverteiltes Planungssystem den Chirurgen eine verbesserte Operationsplanung unter Einbeziehung neuer Parameter (z.B. der postoperativen Weichteile) ermöglicht. Als wesentlicher Vorteil einer direkten Kommunikation wurde angesehen, dass Missverständnisse sofort ausgeräumt und freie Kapazitäten (sowohl personell als auch zeitlich) optimal genutzt werden können.

Die Komplexität der Gesamtaufgabe und die daraus resultierende hohe Spezialisierung des Fachpersonals ließ jedoch erwarten, dass solch ein Planungssystem nicht ausschließlich von Chirurgen bedient werden kann, sondern neue Dienstleistungsbereiche entstehen lässt, die entsprechende Planungsdienste mit speziell ausgebildetem medizinisch-technischem Personal über Datennetze anbieten. Dies würde den Chirurgen von fachfremden Aufgaben entlasten, ihm aber dennoch die Möglichkeiten einer modernen computergestützten Planung bieten. Wunschvorstellung war es, ein netzverteiltes chirurgisches Planungssystem zu entwickeln, mit dem klinische Anwender dedizierte Planungswerkzeuge über geeignete Benutzerschnittstellen intuitiv nutzen und auf diese Art fachspezifische Teilaspekte der Planung selbst am Rechner durchführen können. An der Planung sollen sich weitere medizinische Spezialisten, wie z.B. Radiologen, Orthopäden oder auch andere Chirurgen beteiligen können. Auf diese Art lassen sich direkt und ohne komplizierten und zeitraubenden Austausch von Text- und Bilddaten weitere Meinungen einholen. Letztendlich sollen auch die betroffenen Patienten, deren behandelnde Ärzte und ggf. Angehörige an der Planung beteiligt werden können und so der Gesamtprozess der Behandlung durch die direkte Kommunikation in Kombination mit anschaulichen Planungsergebnissen optimiert werden.

² www.ccrl-nece.de/gemss

Die Projektbearbeitung war dabei so konzipiert, dass Entwicklung und Nutzung der Planungs-umgebung parallel ablaufen. Die aus der Pilotstudie abgeleiteten Planungsschritte gliedern sich wie folgt:

- Datenakquisition, Datenhaltung und Datenaustausch
- Diagnose, Fallbesprechung, Planungsvorbereitung
- Erzeugung individueller dreidimensionaler Planungsmodelle
- Bewertung der Fehlbildungen, Erarbeitung eines Planungskonzeptes
- Intuitive Operationsplanung am 3D Planungsmodell
- Simulation und Bewertung der resultierenden Weichgewebeverhältnisse

Die Datenakquisition erfolgt üblicherweise in der Klinik oder in einem Radiologiezentrum. Die Daten müssen vor Zugriff Dritter geschützt in das Planungssystem übernommen werden. Anhand der initialen Planungsdaten (Fotos, Röntgen, CT usw.) erfolgt die Erarbeitung einer ersten Operationsstrategie. Die Erzeugung individueller 3D Planungsmodelle aus den tomografischen Daten erfordert in der Regel Zeit, die der planende Chirurg bzw. die Chirurgin nicht hat. Aus diesem Grund soll dieser Prozess von technisch-medizinischen Assistenten durchgeführt werden. Diese Arbeit ist geradezu prädestiniert für eine ausgelagerte Dienstleistung, wie sie z.B. von MeVis³ in Bremen erfolgreich im Rahmen der Leber-Resektionsplanung angeboten wird. Die Bewertung der präoperativen Situation und die Erarbeitung eines initialen Therapiekonzeptes obliegt wiederum dem behandelnden Chirurgen, der sich unter Umständen mit Fachkollegen beraten muss und ggf. weitere Meinungen von externen Spezialisten anfordern möchte. Die Möglichkeit einer anschaulichen Präsentation aller Planungsdaten aus frei wählbaren Ansichten in Kombination mit digitalen Annotationen bei gleichzeitiger Kommunikation vereinfacht die Abstimmung zwischen unterschiedlichen Planungsteilnehmern und beschleunigt die Einarbeitung weiterer Experten, die sich zu einer Planungssitzung anmelden können. Dabei soll eine integrierte audio-visuelle Kommunikationslösung die gemeinsame Bearbeitung eines komplexen Sachverhaltes erleichtern. Die letzten beiden der oben genannten Planungsschritte erfordern eine iterative Durchführung unterschiedlicher Operationsvarianten am 3D Planungsmodell, solange bis das gewünschte Planungsergebnis hinsichtlich der funktionellen und ästhetischen Rehabilitation aus Sicht aller Teilnehmer erzielt ist. Bei der Simulation der aus einer Planung resultierenden Weichgewebeanordnung sind, zumindest in der Phase der Entwicklung geeigneter Modellierungsansätze, mathematisch-physikalische Experten gefordert, die sich an der Planung beteiligen. Aus diesem Planungsszenario resultierten die folgenden unterschiedlichen Teilnehmeraktivitäten:

- **Einzelbenutzer Planungsmodus:** Ein einzelner Benutzer arbeitet mit dem Planungssystem, entweder lokal auf seinem Rechner oder als aktiver Hauptnutzer auf einem entfernten Rechner. Diese Betriebsart wird von Experten genutzt, die mit der vollen Funktionalität des Planungssystems vertraut sind.
- **Kollaborativer Planungsmodus:** Mehrere Teilnehmer arbeiten simultan an einem Planungsfall. Alle Teilnehmer haben eine identische Sicht auf die Planungsdaten. Unterschieden werden aktive und passive Benutzer. Aktive Benutzer können die Planungssicht verändern, Planungswerkzeuge auswählen und manipulierende Planungsschritte durchführen.

³ www.mevis.de

Passive Teilnehmer sehen zeitgleich alle Änderungen und erhalten Erläuterungen durch Annotationen bzw. audio-visuelle Kommunikation. Aktive Teilnehmer können jederzeit den Status von passiven Teilnehmern zum Zwecke der aktiven Mitarbeit ändern. Dies ist insbesondere dann erforderlich, wenn die erforderliche Expertise der jeweiligen Aufgabe wechselt oder eine Erklärung mit Worten nicht ausreicht, um dem aktiv planenden Teilnehmer eine Planungsalternative zu vermitteln.

- **Demonstrationsmodus:** Teilnehmer bekommen eine Darstellung der Planungsansicht auf ihrem entfernten Rechner visualisiert, können selbst jedoch nicht aktiv an der Planung teilnehmen. Die Präsentation kann entweder simultan zur Planung eines aktiven Teilnehmers erfolgen oder in Form einer Aufzeichnung für Schulungs- und Ausbildungszwecke. Dieser Modus ist für die Patientenaufklärung gedacht und kann in Kombination mit einer audio-visuellen Kommunikation erfolgen.

Konzeptionell kann das Planungssystem dabei entweder zentralisiert auf einem Rechner laufen und alle Teilnehmer erhalten eine verteilte jedoch synchronisierte Darstellung, oder es werden mehrere, auf verteilten Rechnern laufende Instanzen des Planungssystems synchronisiert. Die optimale Variante soll im Rahmen des CoDiSP-Projektes bestimmt werden. Für die Projektbearbeitung waren ferner drei unabhängige jedoch eng verzahnte Teilbereiche konzipiert. Ein Bereich behandelt die Aspekte der chirurgischen Planung im Sinne einer kompletten Einzelplatzlösung, in einem weiteren Bereich werden Lösungswege für eine netzverteilte Nutzung des Planungssystems erarbeitet und ein dritter dient der klinischen Nutzung und Bewertung der entwickelten Komponenten bei gleichzeitiger Rückmeldung von Verbesserungsvorschlägen. Durch den entwicklungsbegleitenden Einsatz der Planungswerkzeuge und der Kommunikationslösungen soll sichergestellt werden, dass eine *praxisgerechte* Lösung zur netzverteilten kooperativen Operationsplanung gefunden wird.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Entwicklung der Planungssoftware am ZIB in Berlin erfolgte eine Installation der jeweils aktuellen Version am HFZ in München, die von Münchener Projektmitarbeitern intensiv genutzt und somit gleichzeitig getestet wurde. Die ersten Untersuchungen zur Netzwerk-Performance bei unterschiedlichen Synchronisationskonzepten wurden dabei vom **Leibniz Rechenzentrum in München (LRZ)** unterstützt. Bei der Entwicklung von Planungswerkzeugen und der Bearbeitung von klinischen Fällen ergaben sich bereits kurz nach Projektbeginn weitere Kontakte zum **Universitätsklinikum Leipzig** (Dr. Hierl), zum **Karolinska Institut in Stockholm** (Dr. Westermark) und zur **Friedrich Alexander Universität in Erlangen** (Dr. Nkenke). In Erlangen wurde und wird im Sonderforschungsbereich 603 an ähnlichen, jedoch nicht-verteilten Fragestellungen der computergestützten Chirurgieplanung gearbeitet. Über Dr. Hierl ergaben sich weitere Kontakte zu einer Forschungsabteilung von **NEC**, die maßgeblich am EU-Projekt GEMSS beteiligt ist und sich ebenfalls mit Grid-basierten Services im Bereich der computergestützten Planung und Simulation befasst [16, 17]. Durch Konferenzpräsentationen wurde ein weiterer Kontakt zur Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie der **Medizinischen Universität Wien** hergestellt. Der dortige Klinikleiter Prof. Ewers ist ebenfalls sehr an einer netzverteilten, kooperativen Planung interessiert und eine entsprechende Installation ist angestrebt. Mit dem Wechsel von Prof. Zeilhofer und Prof. Sader an das **Universitätsspital in Basel** erfolgte eine weitere Installation der 3D Planungsumgebung in der Schweiz. Dazu wurden mit dem **Universitätsrechenzentrum in Basel (URZ)** erneute Untersuchungen zur Netzwerk-

Performance für die Strecke Berlin-Basel durchgeführt, die auf eine schnellere Route vom Schweizer Forschungsnetz SWITCH zum DFN über Lörrach / BelWü (dem regionalen Forschungsnetz in Baden-Württemberg) hinwies, statt wie bisher über Mailand oder Paris (Géant). Durch die Berufung von Prof. Sader an die **Universitätsklinik Frankfurt** ergibt sich eine weitere Möglichkeit der Ausdehnung des Planungsnetzwerkes, die allerdings erst nach Abschluss der Projektlaufzeit von CoDiSP erfolgen wird.

Im Rahmen der technischen Entwicklung ergaben sich weiterhin Kooperationen mit anderen Projekten:

- GRID LAB:⁴
In Kooperation mit dem Leibniz-Rechenzentrum München⁵ (LRZ) und dem Rechenzentrum Garching der Max-Planck-Gesellschaft⁶ (RZG) wurde die Integration der Globus-Dienste in das Visualisierungssystem AMIRA vorangetrieben. Die verteilte Visualisierung war ein Forschungsthema beider Projekte, sodass ein einheitliches Schnittstellendesign für AMIRA entwickelt wurde.
- GRIKSL:⁷
Die im Verlauf des GRIKSL-Projektes etablierten Testbettressourcen in Kombination mit der Globus Software waren ebenfalls für das CoDiSP-Projekt von Nutzen. Eine Entwicklung von entsprechenden Abstraktionsschichten, die einen vereinfachten Zugang zu der Globus Software und ihren Diensten erlaubt, war somit Schwerpunkt beider DFN-Projekte. Die projektspezifischen Anforderungen förderten dabei die Abstraktion und führten zu einer allgemeiner verwendbaren Softwarebibliothek.
- Globus:⁸
Im Rahmen des CoDiSP-Projektes setzte sich die bereits etablierte Kooperation mit dem Globus-Team fort. Mit dem GridFTP-Treiber gehörte auch CoDiSP zu den Alpha-Testern von Komponenten des Globus 2.0 Toolkits, das auf Rechnern in Basel und München installiert und genutzt wurde.

Literatur

- [1] D. E. Altobelli, R. Kikinis, J. B. Mulliken, H. Cline, W. Lorensen, and F. Jolesz. Computer-assisted three-dimensional planning in craniofacial surgery. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 92:576–585, 1993.
- [2] S. Barré. *Modélisation, fusion et reconstruction 3D pour l'aide à la chirurgie maxillo-faciale*. PhD thesis, Université de Poitiers, 2001.
- [3] W. Benger, H.-Chr. Hege, A. Merzky, Th. Radke, and E. Seidel. Abschlußbericht des tiksl-projektes. DFN – Abschlussbericht, Konrad-Zuse-Zentrum (ZIB) und Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (AEI), 2001. webdoc.sub.gwdg.de/ebook/ah/dfn/TIKSK.pdf.
- [4] S. Benkner, G. Englebrecht, G. W. Backfrieder, G. Berti, J. Fingberg, G. Kohring, J. G. Schmidt, S. E. Middleton, D. Jones, and J. Fenner. Numerical simulation for ehealth:

⁴ www.gridlab.org

⁵ www.lrz-muenchen.de

⁶ www.rzg.mpg.de

⁷ www.zib.de/Visual/projects/GriKSL

⁸ www.globus.org

- Grid-enabled medical simulation services. In *Proc. of Parallel Computing (PARCO)*, 2003. www.ccrl-nece.de/gemss/Presentations/parco2003.GEMSS.pdf.
- [5] G. Berti, S. Benkner, J.W. Fenner, J. Fingberg, G. Lonsdale, S.E. Middleton, and M. Surridge. Medical simulation services via the grid. In *Proc. of the 1st European Healthgrid Conference, Lyon, France, 2004*. www.ccrl-nece.de/gemss/Presentations/healthgrid.pdf.
- [6] H. Bourquain, A. Schenk, F. Link, B. Preim, G. Prause, and H.-O. Peitgen. HepaVision2: A software assistant for preoperative planning in living-related liver transplantation and oncologic liver surgery. In *Proc. of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS)*, pages 341–346, 2002.
- [7] E. F. Churchill, D. N. Snowdon, and A. J. Munro. *Collaborative Virtual Environments*. Springer-Verlag UK, 2001.
- [8] C. Cutting, F. L. Bookstein, B. Grayson, L. Fellingham, and J. G. McCarthy. Three-dimensional computer-assisted design of craniofacial surgical procedures: Optimization and interaction with cephalometric and CT-based models. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 77(6):877–885, 1986.
- [9] C. Cutting, B. Grayson, J. G. McCarthy, et al. A virtual reality system for bone fragment positioning in multisegment craniofacial surgical procedures. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 102(7):2436–2443, 1998.
- [10] Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin. Jahresbericht 1999. Rabe KG Buch- und Offsetdruck Berlin, 1999. www.zib.de/bib/pub/index.de.html.
- [11] Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin. Jahresbericht 2000. Rabe KG Buch- und Offsetdruck Berlin, 2000. www.zib.de/bib/pub/index.de.html.
- [12] Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin. Jahresbericht 2001. Rabe KG Buch- und Offsetdruck Berlin, 2001. www.zib.de/bib/pub/index.de.html.
- [13] Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin. Jahresbericht 2002. Rabe KG Buch- und Offsetdruck Berlin, 2002. www.zib.de/bib/pub/index.de.html.
- [14] Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin. Jahresbericht 2003. Rabe KG Buch- und Offsetdruck Berlin, 2003. www.zib.de/bib/pub/index.de.html.
- [15] Chr. Greenhalgh. *Large Scale Collaborative Virtual Environments*. Springer-Verlag UK, 1999.
- [16] Th. Hierl, S. Zachow, G. Wollny, G. Berti, and J. Fingberg. Concepts of computer-based simulation in orthognathic surgery. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 32(suppl 1):81–82, 2004.
- [17] Th. Hierl, S. Zachow, G. Wollny, G. Berti, J.-G. Schmidt, and J. Fingberg. Computer-based simulation in distraction osteogenesis. In *Proc. of 3rd Int. Oxford Distraction Symposium of the Craniofacial Skeleton*, pages 33–34, 2004.
- [18] E. Keeve. *Visualisierungs- und Simulationsverfahren zur interaktiven Planung kraniofazialer Korrekturoperationen*. Dissertation, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, November 1996.

- [19] R. M. Koch. *Methods for Physics Based Facial Surgery Prediction*. Dissertation No. 13912, ETH Zürich, 2000.
- [20] C. Kuhn. *Modellbildung und Echtzeitsimulation deformierbarer Objekte zur Entwicklung einer interaktiven Trainingsumgebung für die Minimal-Invasive Chirurgie*. PhD thesis, Universität Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 5872, 1997.
- [21] P. Le Mer, L. Soler, D. Pavy, A. Bernard, J. Moreau, D. Mutter, and J. Marescaux. Argonaute 3D: A real-time cooperative medical planning software on DSL networks. In *Proc. of Medicine meets Virtual reality (MMVR)*, pages 203–209, 2004.
- [22] S. D. Pieper. *CAPS: Computer-Aided Plastic Surgery*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Media Lab, Cambridge, MA, September 1991.
- [23] R. Sader, H.-F. Zeilhofer, V. Apostoloscu, K.-H. Hoffmann, W. Kalender, G. Sachs, and U. Poth. Die Bedeutung breitbandiger und leistungsfähiger Kommunikationsstrukturen für die operative Medizin. *Schriften des Arbeitskr. Mathematik in Forschung und Praxis*, Bad Honnef, 17, 1999.
- [24] A. Spiegl. *Mathematische Modellierung von menschlichem Gewebe zur präoperativen Planung in der Gesichtschirurgie*. Dissertation, Technische Universität München, 1998.
- [25] D. Stalling, M. Westerhoff, and H.-Chr. Hege. *The Visualization Handbook*, chapter 38, Amira: A Highly Interactive System for Visual Data Analysis, pages 749–767. Elsevier Science B.V., 2004.
- [26] M. Teschner. *Direct Computation of Soft-Tissue Deformation in Craniofacial Surgery Simulation*. PhD thesis, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2000. *Kommunikations- und Informationstechnik 22*, Shaker Verlag.
- [27] A. Umar. *Third Generation Distributed Computing Environments*. Nge Solutions, 2004.
- [28] J. D. Westwood, R. S. Haluck, H. M. Hoffman, G. T. Mogel, R. Phillips, and R. A. Robb, editors. *Medicine Meets Virtual Reality 12 – Building a better you: The next tools for medical education, diagnosis and care*, volume 98 of *Studies in Health Technology and Informatics*. IOS Press, 2004.
- [29] J. D. Westwood, H. M. Hoffman, G. T. Mogel, R. Phillips, R. A. Robb, and D. Stredney, editors. *Medicine Meets Virtual Reality 11 – NextMed: Health Horizon*, volume 94 of *Studies in Health Technology and Informatics*. IOS Press, 2003.
- [30] T. Yasuda, Y. Hashimoto, S. Yokoi, and J-I. Toriwaki. Computer system for craniofacial surgical planning based on CT images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 9(3):270–280, 1990.
- [31] S. Zachow. *Modellierung von Weichgewebe - Simulation von Deformation und Destruktion: Neue Möglichkeiten in der computergestützten Chirurgie*. Medizinische Informatik und Bioinformatik. Shaker Verlag, 1998.
- [32] S. Zachow. Entwurf und Implementierung eines chirurgischen Planungssystems für den Einsatz in der Epithetik. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin & Charité Campus Virchow Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, 1999.

- [33] S. Zachow, E. Gladilin, H.-C. Hege, and P. Deuffhard. Finite-element simulation of soft tissue deformation. In H. U. Lemke, M. W. Vannier, K. Inamura, A. G. Farman, and K. Doi, editors, *Computer Assisted Radiology and Surgery*, pages 23–28, San Francisco, June 2000. Elsevier Science B.V.
- [34] S. Zachow, T. C. Lueth, D. Stalling, A. Hein, M. Klein, and H. Menneking. Optimized arrangement of osseointegrated implants: A surgical planning system for the fixation of facial prostheses. In H. U. Lemke, M. W. Vannier, K. Inamura, and A. G. Farman, editors, *Proceedings of the International Symposium CARS'99*, pages 942–946, Paris, June 1999. Elsevier Science B.V.
- [35] H.-F. Zeilhofer. *Innovative dreidimensionale Techniken - Medizinische Rapid Prototyping (RP)-Modelle für die Operationsplanung und daraus resultierende neue Entwicklungen in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie*. Habilitationsschrift, Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie der Technischen Universität München, 1998.
- [36] H.-F. Zeilhofer, R. Sader, V. Apostoloscu, K.-H. Hoffmann, U. Poth, and U. Kliegis. Cybernavigation in cranio-maxillofacial surgery. In *Proc. of TERENA NordUnetNetworking Conference, The challenge of gigabit networking*, pages 20–21, 1999.
- [37] H.-F. Zeilhofer, R. Sader, and M. Fromme. Inter-Face – Entwicklung, Erprobung und Einsatz eines multimedialen telemedizinischen Videokonferenzsystems in heterogenen Umgebungen. DFN – Abschlussbericht, Hightech-Forschungs-Zentrum (HFZ) Center of advanced studies in cranio-maxillofacial surgery, 2003. webdoc.sub.gwdg.de/ebook/ah/dfn/interface.pdf.
- [38] H.-F. Zeilhofer, R. Sader, K.-H. Hoffmann, P. Gerhardt, W. Kalender, U. Poth, and G. Sachs. CAFCAS – Computertomography with artefact elimination and finite element modelling in cybernavigational assisted surgery. DFN – Abschlussbericht, Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie der Technischen Universität München, 2000. webdoc.sub.gwdg.de/ebook/ah/1999/dfn/cafcas.pdf.
- [39] H.-F. Zeilhofer, R. Sader, H.-H. Horch, and H. Deppe. Preoperative visualization of aesthetic changes in orthognatic surgery. In H. U. Lemke, K. Inamura, C. C. Jaffe, and M. W. Vannier, editors, *Proceedings of the International Symposium CAR'95*, pages 1369–1374, Berlin, June 1995. Springer-Verlag.
- [40] H.-F. Zeilhofer, R. Sader, H.-H. Horch, et al. Computer assisted individual osteotomy design for mandibular reconstruction. In *SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 2178, pages 197–205, 1994.

2 Ergebnisbericht

Grundlage für das CoDiSP-Projekt waren die unter 1.3.1 aufgeführten Vorarbeiten der Projektpartner. Dabei stellte insbesondere die unter dem Projektnamen FACELAB am ZIB in der Entwicklung befindliche und auf der CeBIT 2002 in Hannover vorgestellte Software zur Planung chirurgischer Knochenumstellungen an dreidimensionalen Schädel- / Kopfmodellen die Basis für die Entwicklung einer netzverteilten, kollaborativen Planungsumgebung dar [29]. Bei der Beantragung des CoDiSP-Projektes wurden drei wesentliche Entwicklungsbereiche identifiziert: (i) Die Weiterentwicklung des Planungssystems unter Berücksichtigung klinischer Fragestellungen in Kooperation mit Chirurgen, (ii) die Schaffung der Möglichkeit einer netzverteilten Nutzung des Planungssystems für mehrere Teilnehmer und (iii) die Integration einer audio-visuellen Kommunikationsmöglichkeit in das Planungssystem. Hierfür galt es konventionelle Techniken des verteilten, kooperativen Arbeitens (remote access, Videokonferenz) mit neuen Techniken zu kombinieren, die synchronisierte Aktionen an gemeinsam genutzten Daten in einer sogenannten *Distributed Shared Virtual Environment* ermöglichen. Das System soll dabei sowohl von technischen als auch von medizinischen Teilnehmern im Rahmen der Planung interdisziplinär und intuitiv genutzt werden können. Teilnehmer sollen die Möglichkeit haben sich aktiv oder passiv an einer Planungssitzung zu beteiligen und dabei audio-visuell miteinander zu kommunizieren.

2.1 Erzielte Ergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse des CoDiSP-Projektes und die bei der Konzeption eines praxistauglichen, verteilt nutzbaren Planungssystems gesammelten Erkenntnisse zusammengefasst [3–5].

2.1.1 Planungsdaten und Datenaustausch

Grundlage für die 3D Planung an individuellen Patientenmodellen sind Röntgen-Computertomogramme (RCT). Diese werden typischerweise von der radiologischen Abteilung einer Klinik akquiriert und müssen in digitaler Form zur Verfügung stehen. Ein Bildstapel umfasst dabei je nach Anzahl der Schichten zwischen 50 und mehreren 100 Megabytes. Innerhalb der Klinik können die Daten mit speziellen Programmen direkt von einer Bilddatenbank angefordert und als Einzelbilder dargestellt werden. Speicherformat und Datenbankzugriff sind über den internationalen DICOM⁹ Standard geregelt. Diese Daten müssen in gesicherter Form in das Planungssystem geladen werden, dessen Ausführung nicht notwendigerweise auf Rechner im Klinik-internen Netzwerk beschränkt ist. Für den Datenaustausch wurden typischerweise magneto-optische Datenträger (MOD) verwendet, die in den letzten Jahren verstärkt durch Compact Discs (CD) abgelöst werden. Da ein wesentlicher Anteil der Daten mit denen im netzverteilten Chirurgieplanungssystem gearbeitet wird personenbezogen ist, wurde für den Zugriff auf diese Daten und deren Transport über offene Datennetze ein Sicherheitskonzept entwickelt, das zwei wesentliche Bedingungen an den Datenverkehr stellt:

- Vor dem Transport der Daten müssen sich die Kommunikationspartner gegenseitig eindeutig identifizieren (mutual authentication), und
- während des Datentransportes sind die Daten durch geeignete kryptografische Methoden zu verschlüsseln (public key encryption).

⁹*Digital Imaging and Communications in Medicine*

In einem ersten Schritt wurde ein portables Programm zur Anonymisierung der DICOM-Daten geschrieben, das personenbezogene Inhalte aus den Metadaten entfernt. Dieses Programm wurde von allen Kooperationspartnern eingesetzt. Ferner wurde das Ziel formuliert, direkt mit den klinik-internen DICOM-Servern zu kommunizieren und Bilddaten direkt von dort anzufordern. Innerhalb der Kliniken ist dies über sogenannte DICOM-Klienten möglich, wobei der Schutz personenbezogener Daten durch Zugangs- und Zugriffskontrolle (Authentifizierung, Authorisierung) sowie entsprechende *Fire Wall*-Rechner erfolgt. Für den Export der Daten an externe Rechner muss demzufolge ebenfalls ein gesicherter Datenaustausch gewährleistet sein. Dazu sollte die Erweiterung 15 des DICOM Standards (*Security Profiles, PS 3.15-2004*) implementiert werden, die bereits an der FU Berlin (Universitätsklinikum Benjamin Franklin) von der Arbeitsgruppe Tolxdorff/Bernarding untersucht wurde. Eine Realisierung erfolgte letztendlich jedoch nicht, da ein externer Zugriff auf DICOM Server der kooperierenden Kliniken aus Datenschutzgründen nicht durchsetzbar war. Eine solche Lösung wäre somit lediglich für klinik-interne Planungssysteme in Frage gekommen und entsprach nicht dem Konzept einer netzverteilten Nutzung.

Zusätzlich zu den tomografischen Daten kommen noch weitere Daten für Diagnostik und Operationsplanung in Frage. Dazu gehören konventionelle Fern-Röntgenbilder, Fotografien und digitalisierte Oberflächenmesspunkte von der Zahn- bis hin zur gesamten Gesichtstopografie. Für ein verteilt nutzbares Planungssystem können die folgenden Daten unterschieden werden:

- **Planungsdaten:** 2D und 3D Bilddaten, 3D Modelle
- **Steuerdaten:** Kommandos und Ereignisse (Benutzereingaben)
- **Annotationen:** 2D Overlay (Text, Markierungen, Zeiger)
- **Multimediate Daten:** Bild und Ton (Videokonferenz)

Um einen kontrollierten Zugang zum Planungssystem und einen gesicherten Zugriff auf die Daten zu ermöglichen wurde ein Sitzungsmanager entworfen und implementiert. Dieser verwaltet innerhalb einer Planungssitzung die Klienten (Teilnehmersitzungen) und ist für deren Synchronisation verantwortlich. Gleichzeitig obliegt es dem Sitzungsmanager den Klienten die notwendigen Daten zur Laufzeit bereitzustellen, bzw. den Zugriff auf diese zu regulieren, d.h. bei Bedarf die entsprechenden Daten für einen Klienten zu replizieren und gesichert zu übertragen sowie diese Daten bei Abmeldung eines Teilnehmers oder nach Beendigung einer Planungssitzung auch wieder zu löschen. Für das Datenmanagement wurde am ZIB, am HFZ in München und in Basel auf mehreren Rechnern das Globus Toolkit (Version 2.0.1) als einheitliche Grid-Computing Infrastruktur eingerichtet, die insbesondere für den effizienten Transport großer Datenmengen konzipiert ist. Auf Basis des Globus Toolkits erfolgte die Entwicklung und Evaluation von Komponenten der Datenverwaltung in der kooperativen Umgebung. In AMIRA¹⁰ wurde ein Grid FTP-Client integriert, der eine optimierte Version des FTP darstellt, bei der soviel Netzwerkbandbreite wie möglich reserviert wird. Dies wird u.a. durch *multicast*, *reliable UDP* und parallele Ströme für den Dateitransfer realisiert, wobei die Puffergröße des darunter liegenden TCP optimiert wird. Jede Globus-Installation stellt somit die folgenden für CoDiSP relevanten Dienste bereit:

- GSI-SSH Service zum Einloggen auf Grid-Ressourcen
- Grid FTP Service zum flexiblen Datenzugriff
(partial file access, third-party file transfer, secure file copy)

¹⁰ amira.zib.de

Für die gesicherte Datenübertragung wurde eine GridFTP Variante implementiert, die auf der Grid Security Infrastructure (GSI) aufsetzt. Die Kommunikation zwischen dem Sitzungsmanager und allen Instanzen des Planungssystems wurde auf Transportebene durch die GSI realisiert. Jede Anfrage eines Klienten, die über einen Socket empfangen wird, *muss* dabei autorisiert sein, bevor sie weiter verarbeitet werden kann (Abb. 1). Dafür wird intern der lokale *grid maple* verwendet, eine Globus spezifische Datei, in der alle autorisierten Benutzer gespeichert sind. Auf allen Kommunikationsseiten ist dazu ein Security Proxy erforderlich, der von der GSI zur gegenseitigen Authentifizierung genutzt wird. Bevor eine Klientenanwendung gestartet werden kann, muss der Globus Security Proxy erfolgreich initialisiert worden sein. Dazu muss sich ein Teilnehmer durch sein persönliches Passwort beim Starten des Proxys identifizieren. Zur Vereinfachung wurde das von GSI bereitgestellte *single sign on* verwendet, das es ermöglicht, ohne *ständig wiederholte* Passworteingaben mit dem Sitzungsmanager während einer Planungssitzung innerhalb einer zeitlich begrenzten Dauer oder bis zur vorzeitigen Abmeldung zu kommunizieren.

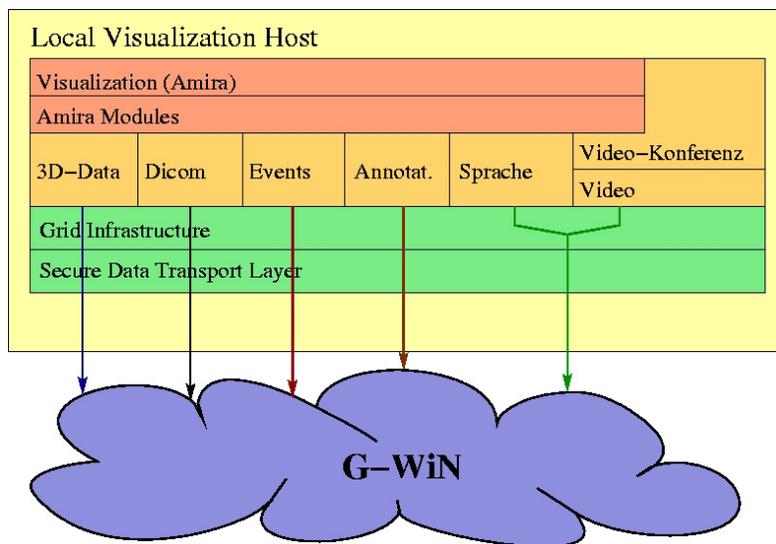


Abbildung 1: CoDiSP-Architektur

Für den autorisierten Zugriff wurden X.509 Zertifikate sowie die sogenannte *public key encryption* genutzt, die durch den Secure Socket Layer (SSL) bzw. die Globus Security Infrastructure (GSI) bereit gestellt werden. Über gültige und im System registrierte Zertifikate erfolgt die Anmeldung an einer Planungssitzung bei der sich die Klienten und der Sitzungsmanager gegenseitig identifizieren. Auf diese Art können ausschließlich autorisierte Teilnehmer auf das verteilte Planungssystem zugreifen, vorausgesetzt, dass lokal eine Zugriffskontrolle erfolgt und sich Teilnehmer ordnungsgemäß abmelden. Zur Verifikation der Zertifikate wurde der Zertifizierungsdienst (*Certificate Authority, CA*) des Globus-Projektes genutzt. Da der DFN-Verein nur Hostzertifikate und keine Benutzerzertifikate ausstellt, wurden Zertifikate von verschiedenen europäischen und auch internationalen Zertifizierungsstellen akzeptiert. Anlaufstelle war z.B. Douglas Engert vom Argonne National Laboratory der University of Chicago, an dem auch das Globus Toolkit entwickelt wird.

Um die vorab genannten Dienste (GSI und GridFTP) für CoDiSP bereitzustellen, wurden hinsichtlich der Anforderungen an eine netzverteilte Planung geeignete Schnittstellen entworfen und implementiert, die die Nutzung der über die Globus-Software angebotene Funktionalität auf einfache und einheitliche Weise ermöglichen. Die dazu erforderlichen Komponenten wurden in Form

eines Schichtenmodells implementiert, das die Kommunikationsgrundlage aller an einer kooperativen Sitzung beteiligten Komponenten bildet und die in den unteren Schichten angesiedelte *low level* Funktionalität durch Abstraktion für die Anwendungsschicht vereinfacht (Abb. 2).

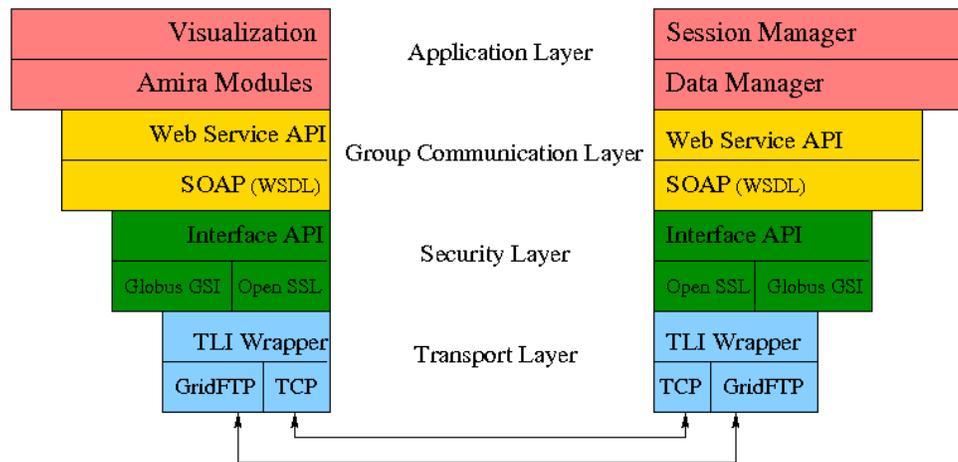


Abbildung 2: CoDiSP-Kommunikationsprotokoll

Der gesicherte Datentransfer und der autorisierte Zugriff auf Planungsdaten wird durch die Verwendung des Grid FTP gewährleistet. Standard-Dateizugriffe wie (open, close, read, write und seek) wurden durch äquivalente Methoden ersetzt, die den transparenten Zugriff sowohl auf lokale als auch entfernte Dateisysteme ermöglichen. Der am ZIB entwickelte *Remote Data Access* bildete gleichzeitig auch die notwendige Erweiterung des Grid FTP-Protokolls. Aufsetzend auf dieses Datenzugriffskonzept wurde für das CoDiSP-Projekt der bestehende Import medizinischer Bilddaten im DICOM-Format auf die Grid FTP-Schnittstelle angepasst, sodass sowohl der Import lokaler als auch entfernter Daten in das Planungssystem unter Zugriffskontrolle gewährleistet ist. Die Mechanismen zum Zugriff auf die DICOM-Daten wurden in Kooperation mit dem DFN Projekt GRIKSL entwickelt und sind allgemein verwendbar. Sie bieten einen effizienten Zugriff auf beliebige Dateiformate, die regulär strukturierte, großvolumige Daten beinhalten.

Sowohl der Sitzungsmanager selbst als auch alle Teilnehmerinstanzen des Planungssystems erhalten über das Web Service API Zugriff auf die Mechanismen zur Gruppenkommunikation. Über einfache Funktionsaufrufe werden in der darunter liegenden SOAP Schicht die XML Nachrichten erzeugt, die die zu übermittelnden Daten enthalten (siehe auch Abschnitt 2.1.6). Diese Daten werden an den Security Layer übergeben, der die beschriebenen Sicherheitsmechanismen (Authentifizierung und Verschlüsselung) realisiert und auf entsprechende Transportprotokolle aufsetzt. Zugriff auf den Security Layer erhält man über ein zusätzliches Interface das ein API zu den eigentlichen Security Services bietet (Globus-GSI oder Open SSL). Der TLI Wrapper stellt die Schnittstelle zum Transportprotokoll zur Verfügung. Während großvolumige Daten mittels Grid FTP transportiert werden, lässt sich für XML Nachrichten TCP verwenden. Das API ist als Middleware konzipiert und wurde als separate Bibliothek implementiert. Im CoDiSP-Projekt erfolgte zudem eine SSL-kompatible Implementierung (GSI-FTP, DataGrid).

Die verwendete, auf der Grid Security Infrastructure basierende Umgebung wurde in der ersten Hälfte der Projektlaufzeit ausgiebig mit den Projektpartnern getestet. Eine erhebliche Einschränkung stellte allerdings die mangelnde Verfügbarkeit des Globus Toolkits für Microsoft Windows und Macintosh Plattformen dar, wodurch der Test zum erweiterten Teilnehmerkreis (Praxen, Patienten etc.) nicht praxismäßig durchgeführt werden konnte. Für schmalbandige

Netzanbindungen (DSL, ISDN) ließ sich zudem keine optimale Lösung zum Transfer und zur Synchronisation großer Datenmengen finden. Die Hauptaufgabe der Entwicklung bestand hier im Wesentlichen darin, Datentransfer zumindest während der Interaktionen zu vermeiden, ohne die grundlegende Funktionalität des Systems zu sehr einzuschränken. Aufgrund dieser Umstände wurde in der zweiten Hälfte des Projektzeitraumes ein alternatives Verteilungskonzept gesucht. Die Wahl fiel dabei auf das mittlerweile deutlich weiter entwickelte VNC,¹¹ sodass die Variante der Synchronisation mehrerer Instanzen des Planungssystems unter Nutzung eines Datenreplikationsdienstes nicht bis zum Projektende verfolgt wurde.

2.1.2 Visualisierung und Diagnose

Nach dem Import der Planungsdaten in das Planungssystem galt es, diese für eine erste Diagnose geeignet zu visualisieren, d.h. relevante Information zu extrahieren und computergrafisch darzustellen. Die Methoden zur Aufbereitung und Visualisierung der Daten liegen mit der Software AMIRA vor [15] und lassen sich für die lokale Arbeit mit dem Planungssystem nutzen. Voraussetzung für eine *netzverteilte*, kooperative Begutachtung der Daten von mehreren, räumlich voneinander entfernten Teilnehmern war die synchronisierte Darstellung bei freier Wahl der Perspektive von beliebiger Seite. Auf diese Art sollen sich alle Teilnehmer, bei gleichzeitiger Möglichkeit der audio-visuellen Kommunikation, beraten und somit eine gemeinsame Planungsgrundlage verschaffen können. Die synchronisierte Visualisierung mit verteilter Interaktionsmöglichkeit lässt sich dabei auf zwei unterschiedliche Arten realisieren:

1. Synchronisation mehrerer Instanzen des Planungssystems
2. Verteilung der Darstellung einer Instanz des Planungssystems

Im ersten Fall müssen die Daten auf allen Instanzen des Planungssystems abgeglichen und konsistent gehalten werden und alle Aktionen die ein Benutzer einer Instanz durchführt auf alle anderen Instanzen abgebildet werden. Diese Variante entspricht der im CoDiSP-Projekt zuerst angestrebten Lösung eines verteilten Planungssystems mit zentralem Sitzungsmanager (Abschnitt 2.1.1 und 2.1.6). Im zweiten Fall läuft lediglich eine Instanz des Planungssystems, die von weiteren Rechnern ferngesteuert werden kann. Eine zusätzliche Software (SGI VizServer, X11-Server, VNC-Server etc.) ist dafür zuständig, die Bildschirmanzeige auf die anderen Rechner zu transferieren und die dortigen Benutzerinteraktionen an den Planungsrechner zurück zu übertragen.

Beide Varianten wurden im Verlauf des CoDiSP-Projektes realisiert und getestet und besitzen Vor- und Nachteile. Aus Sicht der Visualisierung erscheint es zuerst einmal überflüssig, und bei geringer Netzbandbreite sogar extrem ineffizient, permanent den kompletten Bildschirminhalt aus dem Bildspeicher zu kopieren, ggf. zu komprimieren und schritthaltend über das Netz zu verteilen. Existierende Ansätze und auch eine eigene Lösung wurden hinsichtlich der Performance auf unterschiedlichen Netzwerken überprüft [9]. Eine große Rolle spielte dabei anfänglich der Open GL VizServer von Silicon Graphics, da die Grafikhardware (SGI Onyx bzw. Octane) am ZIB und am HFZ eine entsprechende Möglichkeit bereitstellte. Über den VizServer ist es möglich, die Grafikhardware auf entfernten, weniger leistungsfähigen Client-Rechnern zu nutzen. Dabei wird der aktuell dargestellte Inhalt des Grafikspeichers auf dem Server über eine Netzwerkverbindung zu angemeldeten Klienten übertragen. Messungen ergaben dabei, dass bereits ein 100 MBit/s-Anschluss bei geringer Netzauslastung ausreicht, um ein interaktives Arbeiten

¹¹ Virtual Network Computer, www.realvnc.com

auf einer entfernten Konsole zu ermöglichen. Der Nachteil dieser Lösung ist jedoch, dass spezielle Anforderungen an die Serverarchitektur gestellt werden. Zu Projektbeginn existierte zudem keine Client-Version für gängige Rechnerplattformen wie Linux oder Microsoft Windows, sodass die Beteiligung von beliebigen externen Partnern stark eingeschränkt war. Weitere Varianten, wie z.B. die Nutzung der Netzwerkfähigkeit des X11-Protokolls oder der ursprünglich von AT&T und der University of Cambridge entwickelte Virtual Network Computer (VNC) wurden ebenfalls untersucht. In beiden Fällen ist es zwar auch möglich, die Grafikausgabe auf einem entfernten Host (Display) zu betrachten und die Software von dort interaktiv zu bedienen, die X11-Lösung erfordert allerdings eine OpenGL Erweiterung des X-Servers und VNC war anfänglich noch nicht ausreichend entwickelt. VNC fand jedoch im Projektzeitraum breites Interesse und wurde, da der Quellcode öffentlich zugänglich ist, auf alle gängigen Rechnerplattformen portiert. Auch eine SSH-basierte Version wurde geschaffen und am ZIB projektübergreifend genutzt. Die dabei gesammelten Erfahrungen waren durchweg positiv und führten zu einer klaren Entscheidung für das VNC-Konzept zur *Remote*-Visualisierung.

2.1.3 3D Modellrekonstruktion

Gemäß der Anforderungen aus Abschnitt 1.1 sind für die Operationsplanung individuelle, anatomisch korrekte 3D Planungsmodelle gefordert, deren Rekonstruktion aus tomografischen Bilddaten einen weiteren wesentlichen Arbeitsschritt in der gesamten Prozesskette darstellt. Typischerweise ist die damit verbundene Aufgabe der sogenannten Segmentierung (Gewebeklassifikation) sehr zeitaufwändig und erfolgt in der Regel nicht von den Chirurgen selbst. Stattdessen ist eine medizinisch-technische Assistenz gefordert, die diese Aufgabe unter Zuhilfenahme geeigneter Werkzeuge durchführt. Das Planungssystem auf Basis der Software AMIRA bietet solche Werkzeuge über einen 3D Segmentierungsditor an. Bei der Segmentierung durch medizinische Laien¹² treten allerdings häufig Abweichungen zu den realen anatomischen Gegebenheiten auf. In einem nicht-verteilten Planungsszenario muss das jeweilige Segmentierungsergebnis deshalb mittels geeigneter 2D Ansichten aus unterschiedlichen 3D Perspektiven belegt und per E-Mail an den jeweiligen Arzt gesendet werden, sodass Fehlsegmentierungen erkannt und entsprechende Korrekturhinweise gegeben werden können. Diese Vorgehensweise ist jedoch sehr ineffizient.

Ein weiteres Entwicklungsziel im CoDiSP-Projekt war daher die Bereitstellung von geeigneten Methoden zur kooperativen Segmentierung medizinischer Bilddaten. In diesem Zusammenhang mussten die vorhandenen Segmentierungswerkzeuge verteilt nutzbar gemacht werden, sodass mehrere Personen gemeinsam an einem Datensatz arbeiten können. Die Nutzung eines Systems zur verteilten, kooperativen Durchführung der Segmentierungsarbeiten bietet dabei die Möglichkeit, vorhandene Kompetenzen auf verschiedenen Fachgebieten (Methoden und Algorithmen, medizinische Fachkenntnis) zu bündeln und so auf effiziente Weise zu korrekten anatomischen Modellen zu gelangen. Auch die Konsultation radiologischer Experten ist dabei vorstellbar, sodass Zweifelsfälle durch Hinzuziehen weiterer Meinungen sicherer geklärt werden können. Die flexible Zusammensetzung der Planungsteilnehmer mit den daraus resultierenden unterschiedlichen Zugangsvoraussetzungen erfordert allerdings auch die Unterstützung vielfältiger Netzwerktechnologien. Eine ähnliche Aufgabenstellung wurde von den klinischen Projektpartnern bereits im Projekt CAFCAS erfolgreich bearbeitet [31]. Dabei ging es allerdings um eine Vorverarbeitung der tomografischen Bilddaten zur Reduktion sogenannter Metallartefakte. Auch hier musste die von Medizin-Physikern und Informatikern durchgeführte Bildverarbeitung von medizinischer Seite im Ergebnis bewertet und akzeptiert werden. Die kooperative Segmentierung ist somit eine logische Fortführung des CAFCAS-Projektes zur verlässlichen Rekonstruktion von adäquaten

¹²Die Segmentierung erfolgt überwiegend von den Entwicklern der Systeme.

3D Patientenmodellen aus tomografischen Bilddaten.

Für die Operationsplanung müssen aus den segmentierten Daten sowohl Oberflächenmodelle erzeugt werden, die alle relevanten anatomischen Strukturen für die Planung der chirurgischen Eingriffe korrekt repräsentieren, als auch Volumengitter der weichgewebigen Strukturen mit größtmöglicher Auflösung für eine schnelle Finite-Elemente Simulation der resultierenden Gesichtsforn [21, 22]. Diese Modellrekonstruktion erfolgt derzeit noch nicht vollautomatisch und gehört nicht in den Aufgabenbereich eines Mediziners. Die Modellierung wird somit von mathematisch-technischer Seite durchgeführt. Lediglich der zulässige Grad der Vergrößerung wird durch die medizinische Aufgabenstellung bestimmt. Bereiche, die für die jeweilige Planung nicht relevant sind können stärker vergrößert werden als planungsrelevante anatomische Strukturen, die so genau wie möglich durch das Modell repräsentiert werden müssen. Die Festlegung dieser Strukturen erfolgt durch den planenden Arzt, der Teilbereichen des Modells eine planungsrelevante Bedeutung zuordnet. Zu diesem Zweck wurden Werkzeuge entwickelt, mit denen Modellbereiche (*Regions of interest*, ROI) zur lokal adaptiven Vergrößerung interaktiv festgelegt werden können. Diese Werkzeuge lassen sich intuitiv anwenden und fernsteuern, sodass sie direkt vom räumlich entfernten, planenden Arzt verwendet werden können.



Abbildung 3: 3D Planungsmodell

Die Generierung der 3D-Schädelmodelle aus segmentierten Bilddaten ist insgesamt ein sehr zeitaufwändiger Prozess, der aufgrund der Anforderungen, die an das Modell bezüglich der Planung gestellt werden, derzeit noch nicht vollautomatisch abläuft [10]. Die erforderlichen Arbeitsschritte zur Generierung von Planungsmodellen sind zu komplex als dass sie vom Arzt vorgenommen werden sollten. Außerdem erfordert dieser Prozess je nach gewünschter Güte des Modells noch mehrere Stunden manuelle Arbeit, was einem Arzt in seiner klinischen Routine nicht zuzumuten ist. Aus diesem Grund sollen alle für die Modellerzeugung notwendigen Arbeitsschritte als Dienstleistung für den planenden Arzt erfolgen, wobei dieser das Planungsmodell jederzeit überprüfen und erforderliche Änderungen veranlassen kann. Ein verteiltes Planungssystem bietet dazu die optimale Voraussetzung. Im Ergebnis liegt eine individuelle dreidimensionale Planungsgrundlage vor, an der die Chirurgen die eigentliche Operationsplanung durchführen können.

2.1.4 Operationsplanung

Die eigentliche Operationsplanung sieht vor, dass ein Chirurg am 3D Planungsmodell, in Analogie zur Planung an medizinischen Rapid-Prototyping Modellen [30], Schädeldefektbildungen und Kieferfehlstellungen bewerten und durch Verlagerung von mobilisierten Knochensegmenten kor-

rigieren kann. Neben der rein funktionellen Bewertung, d.h. der Wiederherstellung einer korrekten Kiefer- und Kiefergelenksstellung, sollen im Rahmen der Planung auch ästhetische Aspekte berücksichtigt werden und zwar nicht nur in der seitlichen Profilansicht sondern dreidimensional aus beliebigen Ansichten. Im Gegensatz zur konventionellen, kostenintensiven 3D Modellplanung am Stereolithografiemodell sollen hierbei auch unterschiedliche Therapievarianten bewertet werden können. Die Planung soll dabei vom Chirurgen computergestützt am individuellen Kopf- bzw. Schädelmodell mittels geeigneter Werkzeuge intuitiv durchgeführt werden. Simulationsverfahren sollen ihn und kooperierende Kollegen bei der Bewertung unterstützen und Patienten sowie deren Angehörigen den geplanten Eingriff sowie das prognostizierte Ergebnis anschaulich verdeutlichen. Zu den wesentlichen Planungsschritten gehören die

- Vermessung des Schädelmodells zur Quantifizierung der Fehlstellung bzw. zur Bestimmung der erforderlichen Korrekturmaßnahme
- Festlegung der Schnittlinien zur Trennung knöcherner Strukturen (Osteotomie) direkt am 3D Planungsmodell, ggf. unter Zuhilfenahme frei wählbarer 2D Projektionsansichten
- Trennung knöcherner Modellstrukturen
- Umstellung mobilisierter Strukturen unter Zuhilfenahme geeigneter Werkzeuge zur Beurteilung und Quantifizierung von Lageänderungen.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung eines Systems zur computergestützten Operationsplanung war die strenge Orientierung an der medizinischen Aufgabenstellung und an den klinischen Randbedingungen. Daher wurde das Planungssystem im gesamten Zeitraum der Entwicklung lokal (auch kooperativ mit Chirurgen) für die Operationsplanung genutzt. Im Falle der nicht-verteilten Planung erfolgten Anmerkungen und Planungskorrekturen direkt auf den Bilddaten (z.B. durch Einzeichnen von Linien oder Einfügen von Texten bzw. Markierungen wie in Abb. 4 gezeigt). Diesen iterativen Planungsprozess, bei dem kontinuierlich Vorschläge und Zwischenergebnisse in Form von Bildern und Zeichnungen ausgetauscht werden, galt es im CoDiSP-Projekt durch verteilt nutzbare Planungswerkzeuge und Videokonferenz zu optimieren.

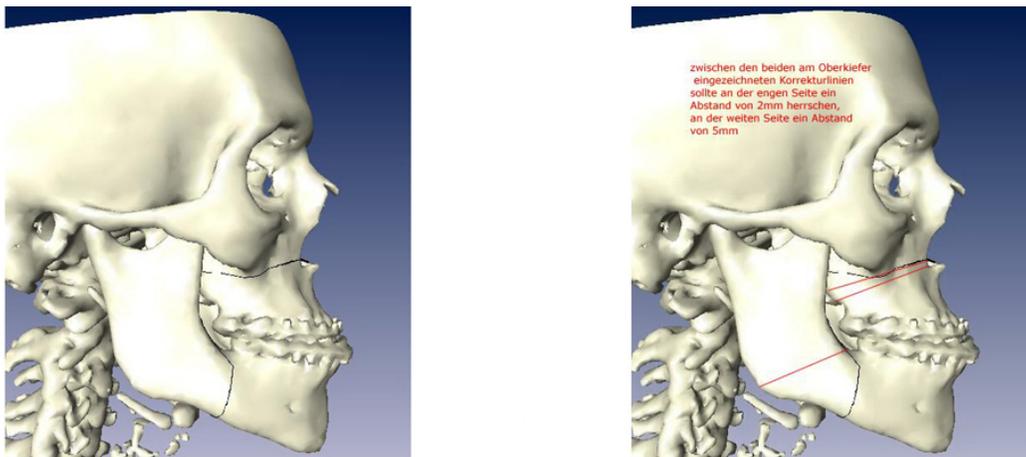


Abbildung 4: *Offline* Korrektur einer geplanten Ober- und Unterkieferosteotomie

Neben der bereits vorab beschriebenen Visualisierung der Planungsdaten bei freier Wahl der Darstellungsparameter wurden Knochenschnitt (Osteotomie) und Segmentverlagerung als wichtigste Planungshandlungen angesehen, die direkt vom planenden Chirurgen durchzuführen sind.

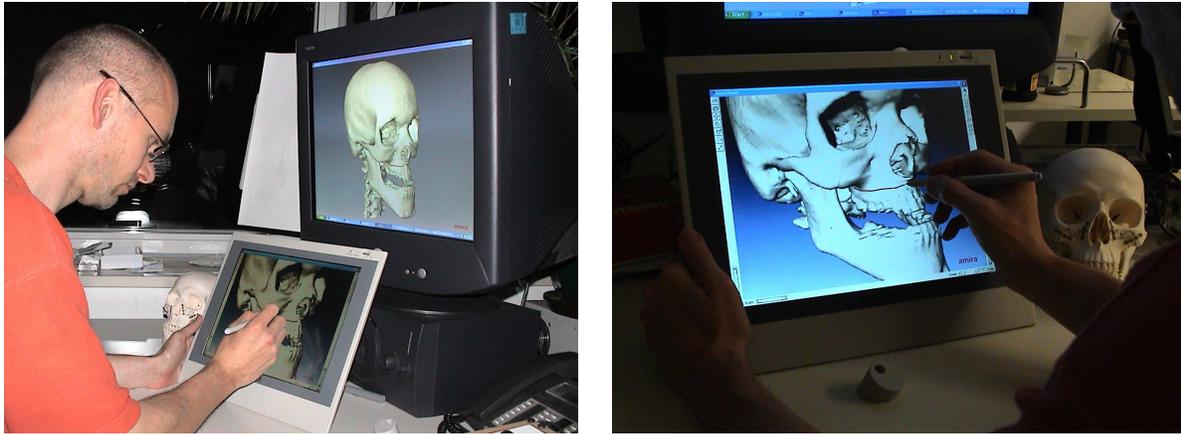


Abbildung 5: Intuitive 3D Osteotomieplanung

Im Rahmen der Entwicklung wurden verschiedene Osteotomieplanungskonzepte untersucht und implementiert. Dabei hat sich eine freie und intuitive Knochenschnittplanung als optimale Variante erwiesen, bei der Schnittlinien direkt auf dem 3D Planungsmodell mit der Maus am Bildschirm oder mit einem elektronischen Stift auf einem Grafiktablett angezeichnet (Abb. 5) und vor dem Schnitt hinsichtlich vorhandener Risikostrukturen bewertet werden können (Abb. 6).

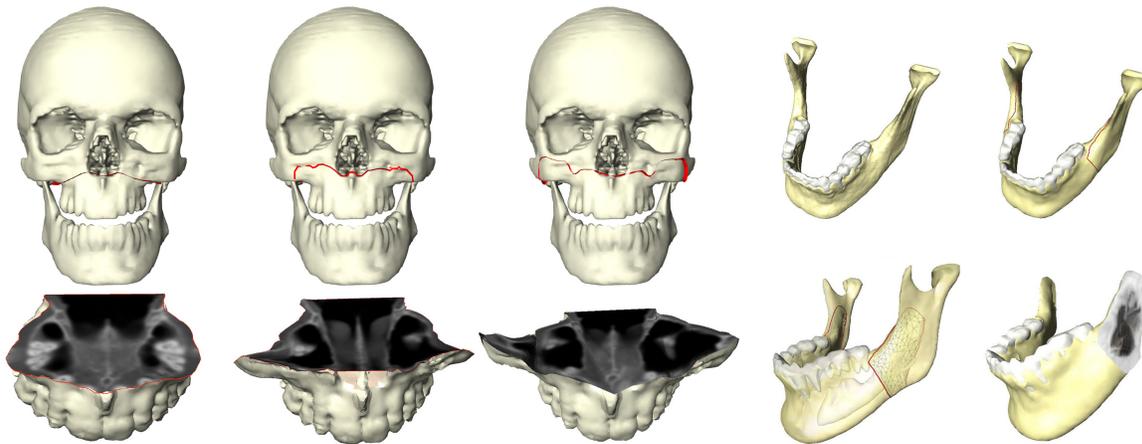


Abbildung 6: Bewertung der Osteotomie bzgl. innerer Risikostrukturen

Die dreidimensionale Planung von Knochensegmentverlagerungen wurde ebenfalls praxisgerecht realisiert. Mobilisierte Knochensegmente können frei verschoben und um beliebig wählbare Punkte rotiert werden (Abb. 7). Die Transformationen lassen sich weiterhin auf definierte Planungsebenen einschränken und auch unter Kollisionskontrolle durchführen. Im Ergebnis erhält der planende Chirurg die resultierenden Transformationsparameter für jedes Knochensegment.

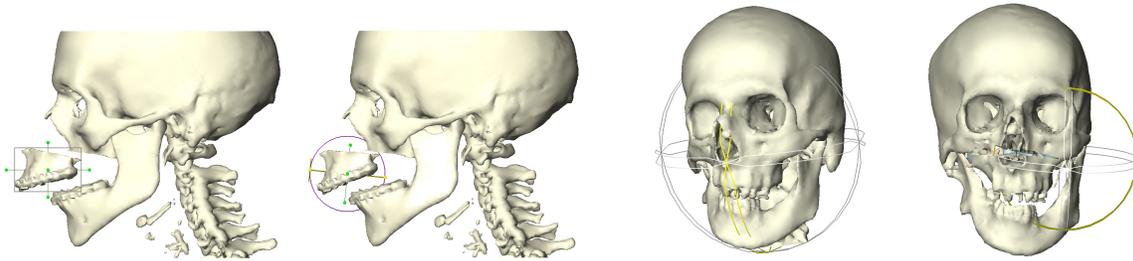


Abbildung 7: Planung der Knochensegmentverlagerung

Durch die zusätzliche Nutzung digitalisierter Kieferabdrücke in Kombination mit aus CT-Daten rekonstruierten 3D Schädelmodellen kann eine deutlich exaktere Einstellung der Kauflächen zueinander erfolgen. Die Knochenverlagerung unter Kontaktbedingungen erlaubt die Berücksichtigung der ordnungsgemäßen Zahnstellung (dentale Okklusion) zur Herstellung einer Neutralverzahnung bei Kiefer verlagernden Eingriffen. Aus der Planung resultieren zudem kieferorthopädische Vorgaben für die optimale Zahnlage, sodass sich hier im Rahmen der Planung eine Zusammenarbeit mit Kieferorthopäden anbietet, die als Teilnehmer einer Planungssitzung konsultiert werden können.

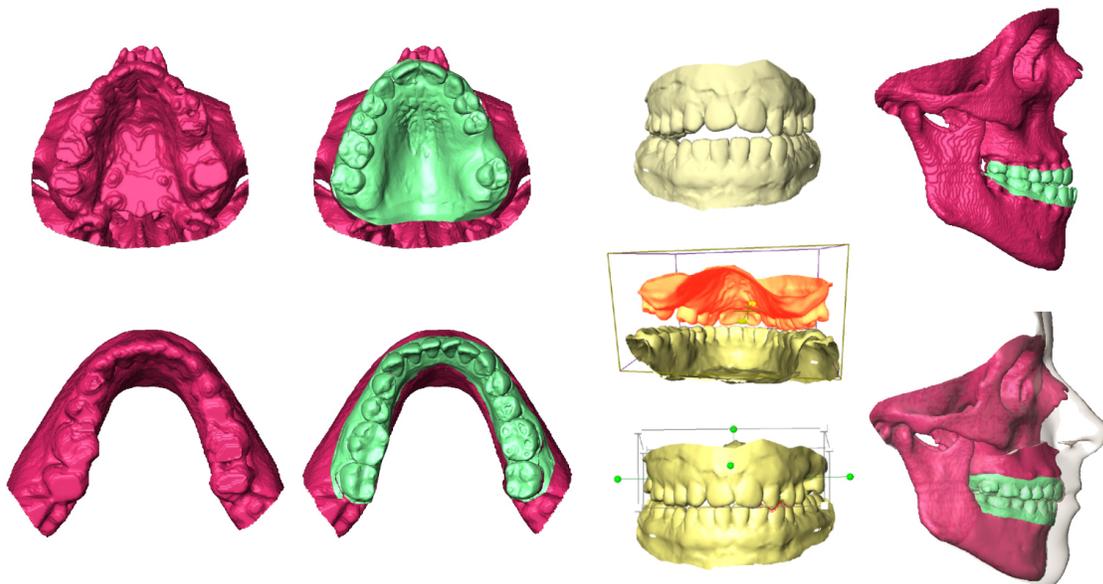


Abbildung 8: Umstellungsplanung unter Berücksichtigung der Zahnlage

Ziel war es, einem planenden Arzt die Möglichkeit zu geben, alle erforderlichen Schritte (Vermessung, Osteotomie- und Umstellungsplanung) mit geeigneten Eingabegeräten von seinem Standort aus, computerunterstützt am individuellen 3D Planungsmodell durchzuführen. Die Bearbeitung realer klinischer Fälle war dabei eine wesentliche Voraussetzung, um den praktischen Einsatz des Planungssystems kontinuierlich zu testen und dessen volle Funktionalität sicherzustellen [20]. Unabhängig von der Entwicklung der Verteilungsmechanismen erfolgten im Projektverlauf mit den Kooperationspartnern über 15 Planungen zu klinisch relevanten Fällen unterschiedlicher Kom-

plexität. Hinzu kamen weitere sechs Planungen mit der Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie und Plastische Chirurgie des Universitätsklinikums Leipzig (Dr. Dr. Hierl), sowie zwei Planungen mit der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (Dr. Dr. Nkenke) und acht Planungen mit der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie des Karolinska Hospitals Stockholm (Dr. Westermark). Insgesamt wurden somit im Projektzeitraum mehr als 30 Planungen durchgeführt. Einige Ergebnisse sind z.B. auf der CAS-Projektseite¹³ dokumentiert.

Zusätzlich zur Planung der Knochenschnitte und Knochenverlagerungen ermöglicht das am ZIB entwickelte Planungssystem eine physikalisch-mathematische Simulation der aus der Umstellungsplanung resultierenden Gesichtsförmung [6–8]. Die Abschätzung der räumlichen Weichgewebeerlagerung erlaubt es, unterschiedliche Therapievarianten, die zu einer guten funktionellen Rehabilitation führen, hinsichtlich des ästhetischen Ergebnisses dreidimensional zu bewerten. Auf diese Weise lässt sich die Gesichtsästhetik im Rahmen der Planung berücksichtigen. Erst mit dieser Option kommt einem verteilt nutzbaren Planungssystem die volle Bedeutung zu, da unterschiedliche Operationstechniken mit Fachkollegen diskutiert und am 3D Modell ausprobiert werden können und deren unterschiedliche Auswirkungen sowohl den planenden Ärzten als auch den betroffenen Patienten und ihren Angehörigen bereits vor der Operation, anschaulich dreidimensional visualisiert werden können.

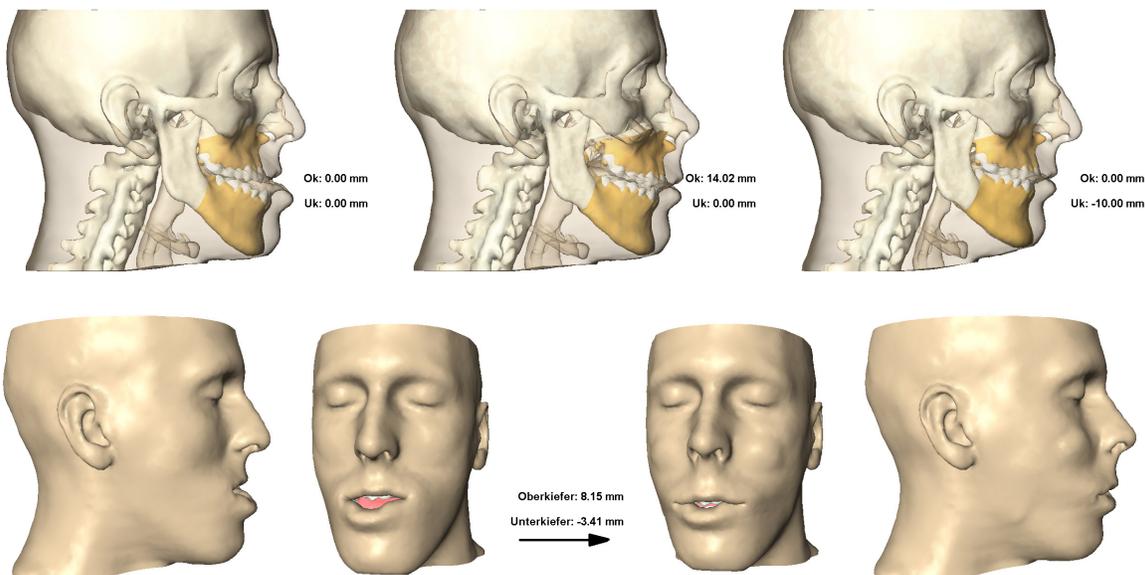


Abbildung 9: Umstellungsplanung unter Berücksichtigung der Weichgewebe

Das Planungssystem wurde im Projektverlauf zunehmend für komplexere Fragestellungen genutzt, bei denen eine intensive chirurgische Vorplanung und interdisziplinäre Bearbeitung zwingend erforderlich war. Planungen inklusive Weichgewebesimulation lieferten dabei Ergebnisse, die für die Chirurgen eine völlig neue, zusätzliche Planungsgrundlage darstellen [25–28]. Sowohl für die Mediziner als auch für die Patienten erwies sich eine genaue 3D Planung einschließlich der räumlichen Weichgewebebeurteilung von großer Bedeutung. Der dazu erforderliche Modellierungs- und Simulationsaufwand gehört jedoch nicht in den Aufgabenbereich eines praktizierenden Arz-

¹³ www.zib.de/visual/projects/cas/cas-gallery.html

tes. Deshalb ist hier eine medizinisch-technische Planungsassistenz erforderlich, die gemeinsam mit den Chirurgen Planungen durchführt. Im Projektverlauf wurden dazu die Daten von klinischen Partnern via Datenträger oder SSH-FTP ans ZIB transferiert und dort zu einem 3D Planungsmodell aufbereitet. Anschließend erfolgte eine erste Diagnose und eine kephalometrische Analyse unter Zuhilfenahme computergrafischer Visualisierungstechniken. Die Planungsdaten wurden in Form von Bilddateien bzw. MPEG-Animationssequenzen an die Klinik übermittelt. In gemeinsamer Absprache erfolgte die Therapieplanung, die direkt am 3D-Planungsmodell durchgeführt wurde. Kooperative Planungen mit dem nicht-verteilten Planungssystem erfolgten u.a. mit Dr. Hierl und Dr. Westermarck am Konrad-Zuse-Zentrum in Berlin. Mit München und Basel wurden Planungen durchgeführt, die im Projektverlauf zunehmend mit dem verteilten Planungssystem bearbeitet wurden.

2.1.5 Kollaborative Planung

Aus der lokalen Arbeit mit dem Planungssystem wurden die zu verteilenden Aktivitäten mit Kooperationsbedarf abgeleitet (Abb. 10). Potenzielle Teilnehmer einer Planungssitzung sind in erster Linie Chirurgen und die medizinisch-technischen Planungsassistenten. Aber auch Radiologen, Kieferorthopäden und natürlich die Patienten stellen mögliche Teilnehmer dar. Geht man ferner von einer Behandlung in einer Spezialklinik aus, dann kommen auch behandelnde Ärzte am Heimatort der Patienten in Betracht. Für Schulungs- und Demonstrationszwecke sollen letztendlich auch Studierende der Medizin an einer Planungssitzung teilhaben können.

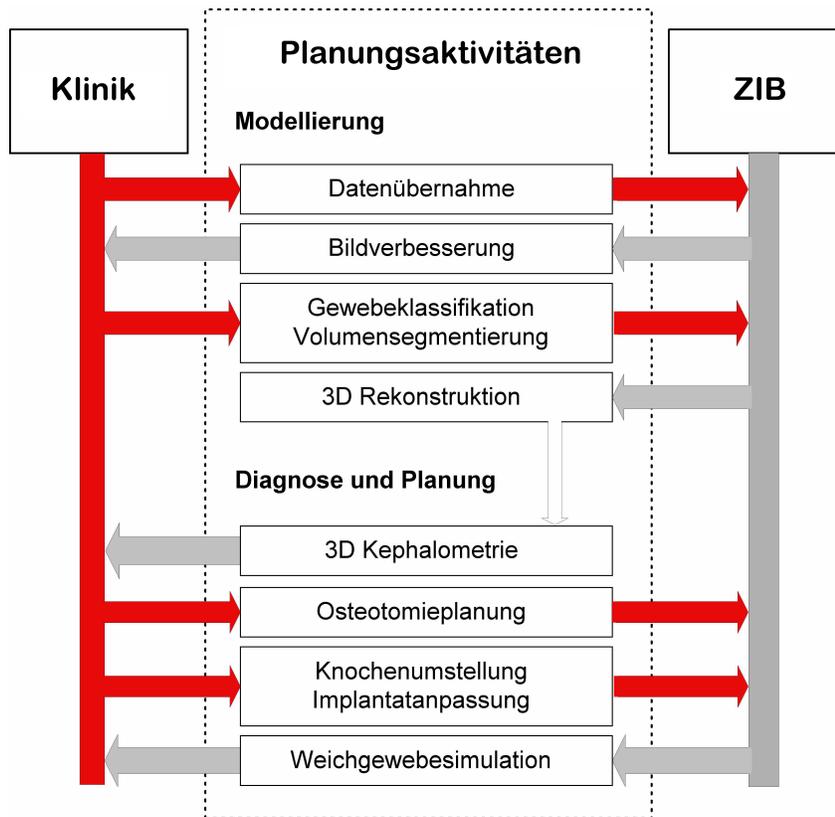


Abbildung 10: Anwendungsorientiertes Schema einer verteilten kooperativen Planung

Die Minimalforderung einer netzverteilten Planungsumgebung ist, dass ein Arzt im Verlauf einer Planung räumlich entfernten Fachkollegen seinen Fall anschaulich präsentieren und sich dabei mit diesen Teilnehmern beraten kann. Dafür ist zumindest die synchrone Darstellung der lokalen Ansicht auf weiteren netzverteilten Rechnern erforderlich. Eine Beteiligung soll natürlich nur selektiv und nach expliziter Einladung möglich sein. Die Kommunikation könnte im einfachsten Fall über konventionelle Telefonverbindungen erfolgen. Optimal ist jedoch die Nutzung einer Videokonferenzeinrichtung, über die die Teilnehmer audio-visuell miteinander kommunizieren können. Stellt man die Videokonferenz auf dem Bildschirm dar, auf dem auch das Planungssystem läuft, und präsentiert man allen Teilnehmern die gleiche Darstellung der Planungsansicht, dann ist damit bereits ein erstes kooperatives Planungsszenario beschrieben.

In einer weiteren Ausbaustufe können Teilnehmer nicht nur die aktuelle Planungsansicht anschauen sondern diese auch verändern, d.h. aktiv das entfernte Planungssystem steuern. Dies könnte sowohl nach expliziter Aufforderung als auch konkurrierend der Fall sein. Unterschieden werden somit aktive und passive Teilnehmer. Der Status eines Teilnehmers sollte kontrolliert beeinflusst werden können, und zwar von der Teilnehmerseite, die die aktuelle Planungssitzung eröffnet hat. In einer maximalen Ausbaustufe hat man es dann mit einer beliebigen Anzahl von Teilnehmern zu tun, von denen einige eine aktive Rolle bei der Planung übernehmen und andere lediglich zuschauen und sich, falls sie über eine Videokonferenzeinrichtung verfügen, ggf. an der audio-visuellen Kommunikation beteiligen. Für Teilnehmer ohne solche Einrichtung¹⁴ könnte die Videokonferenz zusammen mit der Planungsansicht als AV-Datenstrom exportiert werden, der mit konventionellen Multimedia-Programmen wiedergegeben werden kann.

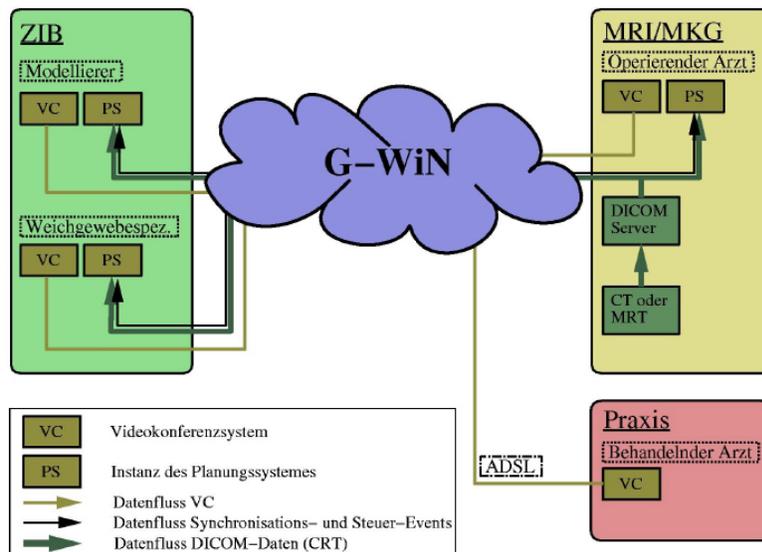


Abbildung 11: Kommunikationsszenario mit mehreren Teilnehmern

Mit diesen Szenarien sind alle geplanten Entwicklungsstufen des CoDiSP-Projektes beschrieben. Ein wichtiges Kriterium für die Entwicklung eines verteilt nutzbaren Planungssystems war die Definition unterschiedlicher Interaktionsmodi für mehrere räumlich entfernte Benutzer. Bei zwei oder mehr Teilnehmern muss zwischen aktiver und passiver Bedienung unterschieden werden. Passive Teilnehmer sind Beobachter der Planung mit der Möglichkeit einer aktiven, unaufgefor-

¹⁴Minimalforderung sind Soundkarte und WebCam

dernten Kommentierung des Geschehens. Aktive Teilnehmer können entweder eine vollständige Kontrolle über den Planungsvorgang besitzen, d.h. sie können alle Funktionen des Planungssystems nutzen und Daten beliebig manipulieren, oder sie sind untergeordnete Nutzer und können nur auf eingeschränkte Funktionen des Planungssystems zugreifen. Aktive Nutzer sollen ihre Rolle bei Bedarf an passive Teilnehmer übergeben können. Mindestens ein Teilnehmer sollte dabei immer die vollständige Steuerung haben. Im Folgenden werden drei Nutzungsmodi beschrieben, die jeweils unterschiedliche Ansprüche an die Ausstattung des Planungsrechners, die Synchronisation, den Datentransport und die Netzwerkanbindung stellen:

- Lokaler Modus (Einzelarbeitsplatz)
- Präsentationsmodus (Schulung, Patientenaufklärung / mehrere Arbeitsplätze)
- Kollaborativer Modus (Master-Slave, Multiple-Master / mehrere Arbeitsplätze)

Im **lokalen Modus** wird das Planungssystem von einer oder mehreren Personen am selben Arbeitsplatz benutzt. Dieser Modus benötigt weder eine Netzwerkanbindung noch eine Videokonferenz und ist über Abschnitt 2.1.4 in seiner Funktionalität vollständig beschrieben. Im lokalen Modus erfolgten sowohl Auftragsplanungen am Konrad-Zuse-Zentrum in Berlin, die zur Entwicklung der Planungswerkzeuge beitrugen, als auch kooperative Planungen mit Chirurgen, die das Planungssystem kennen lernen wollten, bzw. noch keine Gelegenheit fanden, geeignete Rechnerarbeitsplätze für den kollaborativen Modus einzurichten.

Im **Präsentationsmodus** wird das Planungssystem von einem aktiven Teilnehmer wie im lokalen Modus genutzt. Die Planungsansicht wird dabei als Videodatenstrom exportiert oder über Event-Mechanismen mit anderen Instanzen synchronisiert, die jedoch keine aktiven Eingriffe in das Planungsgeschehen erlauben. Eine Videokonferenz ist für diesen Modus nicht unbedingt notwendig aber durchaus sinnvoll. Der Präsentationsmodus eignet sich insbesondere zur Darstellung von Planungs- und Simulationsergebnissen zur Patientenaufklärung und zu Ausbildungszwecken.

Der **kollaborative Modus** ermöglicht es mehreren Teilnehmern sich aktiv an der Planung zu beteiligen. Dabei kann zwischen einer *Master-Slave* und einer *Multi-Master* Betriebsart unterschieden werden. Im Master-Slave Modus hat immer nur ein Teilnehmer den Fokus, d.h. kann aktiv das Planungsgeschehen beeinflussen. Alle anderen Instanzen befinden sich derweil im Demonstrationsmodus. Der Fokus kann an andere Teilnehmer übergeben werden. Zur Abstimmung empfiehlt sich der Einsatz eines Telekonferenzsystems. Im Multi-Master Modus können alle Teilnehmer gleichzeitig aktiv sein. Diese Betriebsart stellt die höchsten Anforderungen an die Synchronisation und auch an die Disziplin der Benutzer. Die gleichzeitige Verwendung einer Videokonferenz zur Abstimmung der Aktivitäten erscheint hierbei unverzichtbar.

Im Projektverlauf wurden kooperative Planungen für konkrete klinische Fragestellungen vorgenommen und darüber detaillierte praktische Anforderungen für die Entwicklung von Werkzeugen, Methoden und Planungshilfen abgeleitet. Die entwickelten Planungswerkzeuge wurden dabei für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt. Planungsschritte, die eine medizinische Kompetenz erfordern, sollen auch direkt von den Chirurgen ausgeführt bzw. zumindest kontrolliert werden. Dazu gehören die kooperative Segmentierung, die freie Wahl der Planungsansicht, sowie die interaktive Festlegung von Osteotomielinien und die Transformation separierter Modellteile (siehe Abb. 10). Die entwicklungsbegleitende Nutzung des Planungssystems half den Ärzten die Idee der Planungswerkzeuge zu verstehen und ermöglichte es den Entwicklern, diese auf die Anforderungen der medizinischen Anwender anzupassen. Die Kommunikation zwischen Medizinern und Technikern erfolgte somit auf Ausführungsebene, die beiden Seiten oft leichter verständlich ist als die jeweilige Fachsprache.

2.1.6 Verteilungskonzepte

Wie bereits in den vorangehenden Abschnitten erwähnt, lagen zur verteilten Nutzung eines computergrafischen Planungssystems anfänglich zwei Konzepte vor: (i) Die Synchronisation *mehrerer* verteilt laufender Instanzen des Planungssystems einschließlich Replikation aller Daten und (ii) eine kollektive Planung unter Nutzung nur *einer* Instanz des Planungssystems mit synchronisierter Darstellung und verteilter Benutzerschnittstelle. Nachfolgend werden sowohl die Entwicklungen zur Nutzung einer zentralen Synchronisationskomponente für die erste Variante beschrieben, als auch die erforderlichen Anpassungen für die zweite Variante. Die Zielvorstellung blieb in beiden Fällen gleich: Alle Teilnehmer des verteilten Planungssystems sollen eine identische Ansicht der aktuellen Planungssituation erhalten, und jede Änderung der Darstellung bzw. der Daten durch einen Teilnehmer soll für alle anderen Teilnehmer unmittelbar ersichtlich sein.

Bei der Entwicklung von verteilten interaktiven Systemen ist typischerweise das Problem der verzögerungsarmen Synchronisation zu lösen. Für eine *Remote*-Steuerung sind dazu eine hohe Bandbreite und möglichst kurze Latenzzeiten gefordert. Trotz permanenter Verbesserung der Netzwerktechnologien sind z.B. Dateizugriffe über Netzwerke im Allgemeinen langsamer als Zugriffe auf lokale Dateisysteme (vergleichbare Hardware vorausgesetzt). Dieser Unterschied basiert auf dem *Overhead* durch die verwendeten Netzwerkprotokolle, der Netzauslastung, der Übertragungstrecke und der zu Grunde liegenden Übertragungstechnik. Je größer das zu übertragende Datenvolumen und die im Netz zu überwindende Strecke, inklusive der Anzahl aller beteiligten Zwischenstationen, desto größer wird die Diskrepanz zwischen der Arbeit auf lokalen und entfernten Systemen. Der Einfluss einer langsamen Netzanbindung (Ethernet 10 Base 2, DSL, ISDN) wird bei der interaktiven Bedienung einer netzverteilten Software in *Wide-Area* Netzwerken mit heterogenen Zugängen und einer Vielzahl von Teilnehmern immer eklatanter.

Die unter 2.1.5 beschriebenen Szenarien zur verteilten Operationsplanung gehen zwar von einer relativ geringen Anzahl teilnehmender Parteien aus (2–4), doch bereits bei diesen kleinen Teilnehmerzahlen ist, auf Grund der hohen Anforderungen an die Darstellungsqualität, die Interaktion, die Kommunikation und die Sicherheit, mit Skalierungsproblemen zu rechnen. Im CoDiSP-Projekt wurde deshalb untersucht, ob eine zentralisierte Verwaltung der Patienten- und Steuerdaten zu einer besseren Skalierbarkeit des Gesamtsystems führt. Dazu wurde eine entsprechende Architektur entworfen, die auch eine Replikation nicht lokal generierbarer Planungsdaten vorsieht, durch die Zugriffszeiten reduziert und die Verfügbarkeit und Fehlertoleranz im verteilten System erhöht werden soll [1]. Die zentrale Komponente dieser Architektur ist ein Sitzungsmanager, dem die Verwaltung aller teilnehmenden Klienten (Instanzen des Planungssystems), also die Datenverwaltung, die Synchronisation und die Zugriffssteuerung obliegt.

Gängige, für verteilte Software eingesetzte Middleware ist die *Common Object Request Broker Architecture* (CORBA) unter Verwendung von *Remote Procedure Calls* (RPC). Eine mittlerweile weit verbreitete Sprache zur allgemeinen Datenbeschreibung ist die *Extensible Markup Language* (XML) mit daraus abgeleiteten Nachrichtenformaten. Das *Simple Object Access Protocol* (SOAP) beispielsweise benutzt XML, um CORBA mit bewährten Transportmechanismen wie http(s) zu verbinden. SOAP definiert dabei lediglich ein Nachrichtenaustauschformat, legt aber kein spezielles Transportprotokoll fest. Für den Nachrichtenaustausch zwischen Instanzen des Planungssystems und dem Sitzungsmanager wurde XML gewählt. Die Struktur der Nachrichten (Events) sollte mit dem durch SOAP definierten und standardisierten Format konform sein, um maximale Kompatibilität sowie eine mögliche Integration weiterer Komponenten in das System zu gewährleisten. Alle Events sind durch einen Typ definiert und über eine Beschreibung, wie das Event ausgelöst wurde und welche zusätzlichen Parameter es benötigt, mittels entsprechend

definierter *Tags* spezifiziert.

Listing 1: Syntax einer in XML eingebetteten Nachricht

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>

<SOAP-ENV:Envelope
xmlns:SOAP-ENV="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
xmlns:SOAP-ENC="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
xmlns:ns="urn:codisp">

<SOAP-ENV:Body SOAP-ENV:encodingStyle=
" http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/">
<ns:amira>[ load /tmp/lobus.am ] setLabel lobus</ns:amira>
</SOAP-ENV:Body>

</SOAP-ENV:Envelope>
```

Grundsätzlich werden in CoDiSP zwei verschiedenen Gruppen von Events unterschieden. Events der ersten Gruppe werden durch Interaktionen des Anwenders mit dem Planungssystem ausgelöst (z.B. durch Tastatureingabe oder die Aktivierung grafischer Benutzerschnittstellen mit der Maus). In Tabelle 1 sind einige der für die Interaktion spezifizierten Events aufgelistet.

Tabelle 1: Durch Benutzeraktionen initiierte Ereignisse

Event-Name	Parameter	Beschreibung
load	File	Laden von Daten
save	File	Speichern von Daten
create	Name	Ein Objekt erzeugen
remove	Name	Ein Objekt entfernen
setValue	Object, Parameters	Parameter eines Objektes setzen
getValue	Object, Parameters	Parameter eines Objektes abfragen

Die zweite Gruppe von Events dient der Teilnehmerverwaltung und der Synchronisation des verteilten Systems und wird vom Sitzungsmanager generiert. Über diese Events werden auch die in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen Betriebsarten des Planungssystems realisiert. In Tabelle 2 sind einige, für die Sitzungssteuerung konzipierte Events aufgeführt.

Die Implementierung des Sitzungsmanagers ermöglichte den initialen Datenabgleich zwischen allen angemeldeten Teilnehmersystemen sowie die Verteilung registrierter, lokal ausgeführter Benutzeraktionen. In einem ersten Entwicklungsschritt wurde die Steuerung der grafischen Darstellung auf entfernten Instanzen des Planungssystems realisiert. Dadurch wird es mehreren Teilnehmern ermöglicht, unter gemeinsamer Betrachtung der Planungsdaten über den optimalen Eingriff zu beraten und dabei im Wechsel relevante anatomische Strukturen visuell hervorzuheben. Hierzu mussten die Interaktionsmechanismen des 3D Darstellungsfensters (Rotation, Translation, Zoom etc.) verteilt werden, d.h. die Benutzeraktionen, die lediglich die Planungsansicht verändern. Bei der dazu erforderlichen Übertragung der Kameraparameter handelt es sich

Tabelle 2: Vom Sitzungsmanager generierte Ereignisse

Event-Name	Parameter	Beschreibung
connect	User, Host	Einfügen eines neuen Teilnehmers
disconnect	User, Host	Ausscheiden eines Teilnehmers
register-file	File, Path, Host	Registrieren (Veröffentlichen) einer Datei
unregister-file	File, Path, Host	Registrierung einer Datei zurücknehmen
load-file	File	Laden einer veröffentlichten Datei
stop	User, Host	Unterbrechen der Arbeit einer Instanz
continue	User, Host	Unterbrechung aufheben
lock	User, Host	Fokus einer Instanz entziehen
unlock	User, Host	Fokus einer Instanz zuweisen

um relativ einfache Steuerungsdaten, die keine hohe Bandbreite erfordern, sodass eine Synchronisation der Ansicht problemlos realisiert werden konnte. Für die kooperative Operationsplanung waren neben der Einstellung von Visualisierungsparametern weitere Aktionen, wie das Zeichnen der Schnittlinien auf der Oberfläche des Knochenmodells sowie die Transformation von separierten Knochenteilen zu verteilen. Zeiger und Annotationswerkzeuge wurden zum Zwecke der Kommunikationsverbesserung ebenfalls verteilt. Für die wechselseitige Spezifikation von Knochenschnittlinien am 3D Modell und die Transformation von separierten Modellteilen wurden die entsprechenden Planungsmodule dahingehend erweitert, dass sie ebenfalls über den zentralen Sitzungsmanager gesteuert werden können.

Die Synchronisation mehrerer, auf unterschiedlichen Rechnern laufender Instanzen des Planungssystems erfordert die Verfügbarkeit einer kompatiblen Version der Software auf jeder Teilnehmerseite. Diese Bedingung galt zwar für Tests in einem lokalen Netzwerk (am ZIB) und zwischen den Kooperationspartnern; die kollektive Planung mit *beliebigen* Partnern war auf diese Art allerdings nicht zu gewährleisten, da vorher eine Installation der Software erforderlich war, die aus Gründen der Übertragungsdauer, des lokal verfügbaren Speicherplatzes, der Zugriffsrechte uvm. in den seltensten Fällen erfolgreich durchgeführt werden konnte. Damit war das geplante Szenario der *spontanen* Beteiligung beliebiger Fachkollegen zur Planungsunterstützung nicht realisierbar. Weiterhin stellte die Replikation der Planungsdaten bereits für normale *Wide-Area* Netzwerke ein Zeitproblem dar. Für DSL und insbesondere für ISDN-Anbindungen von Teilnehmersystemen war diese Vorgehensweise nicht mehr praktikabel.

Aus diesen beiden Gründen wurde nach ca. der Hälfte der Projektlaufzeit die zweite Variante der netzverteilten Planung verfolgt, bei der lediglich eine Instanz des Planungssystems auf einem Rechner läuft und nur dessen Darstellung an andere Rechner verteilt wird (siehe Abschnitt 2.1.2). Für die Synchronisation der Ansichten stand ursprünglich der Open GL VizServer von SGI sowie eine eigene Implementierung zur Diskussion. Im Verlauf des Projektes wurde jedoch auch der sogenannte *Virtual Network Computer* (VNC) wesentlich weiter entwickelt¹⁵. Tests der zu diesem Zeitpunkt aktuellen Version des VNC-Servers und des plattformunabhängigen VNC-Viewers unter Berücksichtigung der Anforderungen an das verteilte Planungssystem führten zu einem positiven Ergebnis.

Mit dem Wechsel auf eine VNC-basierte Verteilung der Planungssoftware entfielen die vorab genannten Nachteile. Die Installation eines VNC-Klienten ist schnell und problemlos möglich und

¹⁵ www.realvnc.com

die Interaktionsgeschwindigkeit lässt sich über die Darstellungsqualität steuern, sodass auch für langsamer angebundene Rechnersysteme eine Teilnahme prinzipiell möglich ist. Es müssen keine umfangreiche Software und auch keine großvolumigen Daten verteilt werden. Ein initialisiertes System ist nach Freigabe und Anmeldung von anderen Teilnehmern sofort bedienbar. Von den anwendungsspezifischen Events wird dabei vollständig abstrahiert, da alle I/O-Events auf Betriebssystemebene über den VNC-Server gesammelt und verteilt werden. Gegenüber unseren bisherigen Entwicklungen mit einer applikationsspezifischen Event-Transportschicht hat diese Lösung den Vorteil der leichten Wart- und Erweiterbarkeit – sie erschwert jedoch eine feinere Granulation von Sicherheitskonzepten. Dieses Problem musste für den kollaborativen Modus gesondert behandelt werden. Die Nutzung des VNC-Konzeptes bot außerdem für die verteilte Nutzung des Planungssystems während der Entwicklung den Vorteil, dass neu implementierte oder geänderte Funktionen direkt von den Anwendern ausprobiert werden konnten, ohne dass die Software beim jeweiligen Teilnehmer aktualisiert werden musste. Die zentrale Pflege und Wartung des Planungssystems ist damit deutlich vereinfacht.

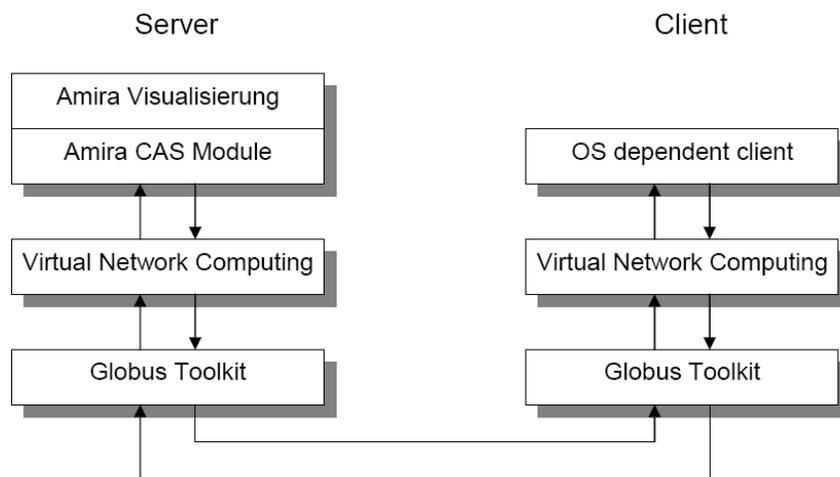


Abbildung 12: Schema der VNC-basierten Architektur

Die in Abschnitt 2.1.5 spezifizierten Betriebsarten des Planungssystems konnten auch über VNC realisiert werden. Der lokale Modus ist dabei nur am Installationsort der Software möglich. Der Präsentationsmodus wurde dadurch realisiert, dass auf dem Rechner, auf dem die zentrale Instanz des Planungssystems läuft, die Funktionalität des VNC-Servers derart eingeschränkt wird, dass keine Events von angemeldeten Teilnehmern ausgewertet werden. Dadurch haben alle angemeldeten Teilnehmer lediglich einen Zuschauerstatus bzgl. der aktuellen Planungsansicht. Für den kollaborativen Modus können entweder nur Maus- oder Maus- und Tastaturevents von angemeldeten VNC-Klienten (Teilnehmern) auf dem Server interpretiert und somit die Software von mehreren Teilnehmern fernbedient werden. Ohne zusätzliche Einschränkungen ergibt sich daraus der kollaborative Modus mit uneingeschränkten Teilnehmern. Diese Betriebsart wurde u.a. auf der CeBIT 2003 zum DFN Future Talk¹⁶ demonstriert, bei der eine gemeinsame, verteilte OP-Planung zwischen Berlin und Hannover exemplarisch durchgeführt wurde [32].

Der 'Multiple-Master'-Modus stellt erhöhte Anforderungen an die Disziplin der aktiven Teilnehmer, die aber mittels Videokonferenz durch akustische als auch visuelle Abstimmung (Blickkon-

¹⁶ www.zib.de/visual/projects/codisp/pictures.html

takt) gewährleistet werden kann. Für den 'Master-Slave'-Modus, bei dem stets ein Teilnehmer die volle Kontrolle über das Planungssystem besitzt und diese bei Bedarf an einen anderen Teilnehmer übergeben kann, musste der Code des VNC-Servers modifiziert und erweitert werden. Die Master- und Slave-Rollen wurden zunächst statisch für jede Sitzung über VNC vergeben. Durch eine Erweiterung von VNC wurde diese Rollenverteilung auch dynamisch ermöglicht, d.h. sie konnte während der Laufzeit der Planung geändert werden. Mittels eines Teilnehmermanagements konnte ein aktiver Nutzer (Master) im Verlauf der kooperativen Planung entweder seinen Fokus an einen anderen Teilnehmer übergeben, der bisher als Zuschauer (Slave) an der Sitzung teilnahm, oder weiteren passiven Teilnehmern einen zusätzlichen Aktionsfokus zuteilen. Jeder aktive Teilnehmer konnte seinen Status auch wieder zurücksetzen, allerdings nur solange noch weitere aktive Teilnehmer an der Planungssitzung beteiligt waren.

Das Teilnehmermanagement wurde als Prototyp im VNC-Server implementiert. Jeder angemeldete Teilnehmer wird beim Server registriert und erhält initial keine aktive Steuerungsberechtigung. Diese kann aber von einem aktiven Teilnehmer zugeteilt werden. Entzogen werden können diese Berechtigungen allerdings nur vom Teilnehmer, der die zentrale Instanz des Planungssystems mit dem VNC-Server nutzt. Somit besteht die Möglichkeit, für jeden Teilnehmer dynamisch zwischen dem aktiven und passiven Modus umzuschalten. Realisiert wurde dies über Tastaturkombinationen und ein einfaches Kontrollfenster, in dem die aktuell angemeldeten Teilnehmer einschließlich ihrer Berechtigungen aufgelistet werden. Für einen professionellen Einsatz der Teilnehmerkontrolle sollte eine grafische Benutzerschnittstelle in den VNC-Server integriert werden, über die angemeldete Teilnehmer aufgelistet, deren aktueller Status angezeigt und einfach modifiziert werden kann. Zur erweiterten Differenzierung könnten auch Benutzer- und Aktionsgruppen unterschieden werden. So wäre es z.B. möglich, entweder nur Tastatur- oder Mauseingaben oder beides selektiv für Teilnehmer oder Teilnehmergruppen zuzulassen bzw. zu sperren.

Die verschiedenen Elemente der Kommunikations-Infrastruktur wurden im Projektverlauf ausgiebigen Tests unterzogen und waren zumindest teilweise im täglichen Einsatz. So wurde VNC in den beteiligten Einrichtungen routinemäßig auf unterschiedlichen Plattformen (Irix, Linux, Windows etc.) und mit verschiedenen Netzwerkanbindungen (Modem, DSL, 10/100/1000 MBit Ethernet; LAN, WAN, VLAN) genutzt. VNC ist dabei zu einem nützlichen und stabilen Werkzeug in der täglichen Arbeit geworden.

2.1.7 Videokonferenz

Im klinischen Einsatz lassen sich die von unterschiedlichen Orten steuerbaren Funktionen eines verteilten Planungssystems vielfältig nutzen. So kann z.B. die gesamte technische Planungsvorbereitung außerhalb einer Klinik an einem eigens dafür eingerichteten Dienstleistungszentrum erfolgen. Dabei auftretende Fragen und Absprachen lassen sich per Videokonferenz in Kombination mit den Planungsdaten sehr viel schneller und effizienter klären bzw. durchführen als mit konventionellen Verfahren (Telefon, E-Mail usw.). Auch die spontane Konsultation weiter entfernt angesiedelter Experten ist ein wesentlicher Teil des Konzeptes für eine kollaborative Planung. Die Verfügbarkeit eines Videokonferenzsystems war deshalb integraler Bestandteil des im CoDiSP-Projekt zu entwickelnden verteilten Planungssystems.

Videokonferenzen in Weitverkehrsnetzen sind seit einigen Jahren eine bewährte Kommunikationsform mit steigendem Einsatz. Es existieren zahlreiche kommerzielle Systeme, die eine Übertragung audio-visueller Daten über Telefonverbindungen oder das Internet in hervorragender Qualität ermöglichen, und auch einige freie Softwarepakete, die aber qualitativ oft nicht mit den proprietären kommerziellen Lösungen konkurrieren können. Leider sind viele dieser Sys-

teme zueinander nicht kompatibel, wodurch eine Kommunikation von beliebigen Teilnehmern erschwert ist. Aus diesem Grund sollte eine qualitativ hochwertige Videokonferenzlösung auf der Basis des H.32x Standards aufgebaut werden, über die beliebige Teilnehmer im Rahmen einer kollaborativen Planungssitzung miteinander kommunizieren können.

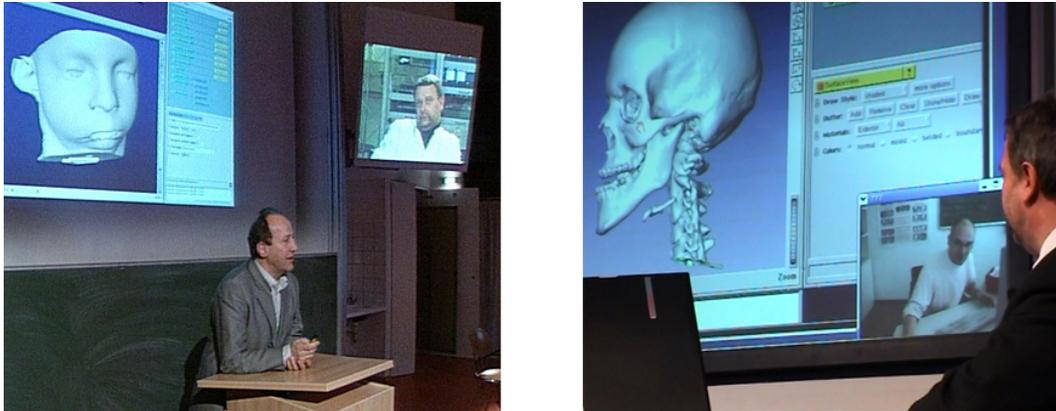


Abbildung 13: Szenarien zur kollektiven Planung auf großen Projektionsflächen

In einer Pilotstudie wurden, unter Verwendung von *Stand Alone* Videokonferenzsystemen, kooperative Planungen durchgeführt. Am ZIB standen dazu u.a zwei Polyspan Viewstation SP zur Verfügung, die jeweils in der Lage sind, über ISDN-Verbindungen mit 128 kBit/s Bandbreite, einen Videostrom mit 15 Bildern/s zu übertragen. Auf H.32x-Basis sind mit dem Polyspan Datenraten bis zu 768 kBit/s möglich. Entsprechende Untersuchungen erfolgten auch im DFN-Projekt INTER-FACE, sodass hier Synergieeffekte genutzt werden konnten. Im CoDiSP-Projekt wurden die folgenden Videokonferenzlösungen getestet.

- **VCAN Falcon** (Rechenzentrum Erlangen): Zusammen mit einem Polyspan Gerät am ZIB konnte hier eine sehr gute Verbindung etabliert und betrieben werden.
- **Polypan** (München, Rechenzentrum Hannover): Über identische Polyspan Geräte wurden regelmäßige Konferenzen durchgeführt, die Bestandteil der normalen Arbeitsprozesse sind.
- **NetMeeting** (ZIB intern): In Kombination mit einem Polyspan am ZIB wurde eine Verbindung mit einer Software-Lösung realisiert und getestet.
- **GnomeMeeting** (DSL-Verbindung): Es wurden Telekonferenzsitzungen zu externen Rechner über DSL aufgebaut und die Bedingungen getestet, unter denen z.B. behandelnde Ärzte oder auch Patienten an einer Planungsbesprechung teilnehmen können.
- **Cisco-MCU** (München): Eine Hardware-basierte *Multipoint Conference Unit* (MCU), die zusammen mit Polyspan Geräten des ZIB erfolgreich getestet wurde.

Das Polyspan besitzt eine integrierte Kamera und fungiert typischerweise als *Stand Alone* System in Kombination mit einem TV-Monitor. Für eine verteilte Planung mit begleitender Videokonferenz ist diese Konfiguration nicht optimal. Die Planung erfolgt typischerweise auf einem bzw. zwei parallel genutzten Monitoren oder auf einer großen Projektionsfläche. Ein zusätzlicher Monitor zur Kommunikation ist bei einem Desktop-Arbeitsplatz noch möglich, bei einer Projektionsfläche allerdings eher hinderlich. Für eine praktikable Lösung wurde die frei positionierbare Darstellung der Videokonferenz auf dem Planungsbildschirm favorisiert (Abb. 13 und 14 rechts).



Abbildung 14: Szenarien zur kollektiven Planung am Bildschirmarbeitsplatz

Die Beleuchtungssituation an den Bildschirmarbeitsplätzen stellt ebenfalls ein Problem dar. Oft sind die Räume abgedunkelt und die Teilnehmer lediglich durch die Monitore oder die Projektionsfläche angestrahlt (Abb. 14). In einem Praxistest wurden verschiedene Kameras verglichen. Darunter das Polyspan selbst, einfache USB-Kameras, wie z.B. die Philips PCVC 740K bzw. die Logitech QuickCam bis hin zu einer semi-professionellen Sony DCR-PC 120E HandyCam. Letztere lieferte selbst bei schwierigster Beleuchtung eine konstante Bildqualität. Alle getesteten Kameras waren dabei grundsätzlich geeignet, wobei am ZIB, zur Bereitstellung der Planungsdienstleistung überwiegend die Sony DCR-PC 120E verwendet wurde, deren Signal auch in das Polyspan eingespeist werden konnte. In der nächsten Ausbaustufe wurde die Darstellung der Videokonferenz direkt in der Planungsansicht realisiert. Dadurch werden störende, sich überlappende Fenster vermieden, und es kann sich bei gleichzeitiger Kommunikation vollständig auf das Planungsgeschehen konzentriert werden. Zu diesem Zweck wurden Module entwickelt, die den Import des Video-Datenstroms über spezielle Hardware direkt in das Planungssystem ermöglichen und diesen in der Planungsansicht frei positionierbar und skalierbar auf sogenannten Videotexturen darstellen (Abb. 15). Auf diese Art können alle Teilnehmer in die Planungsszene integriert werden, d.h. es ist kein zusätzlicher Monitor bzw. Fenster zur Darstellung der Konferenzteilnehmer erforderlich.

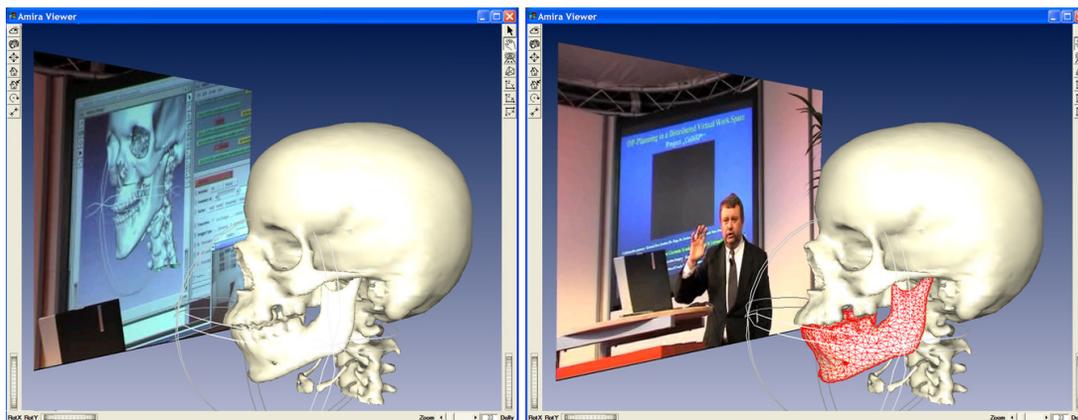


Abbildung 15: In die Planungsansicht integrierte, frei platzierbare Videokonferenz

Die Aufnahme der Kommunikationspartner kann dabei mit Hilfe der sogenannten *blue screen*- bzw. *chroma keying*-Technik, also mit einem einfarbigen, sich deutlich vom Sprecher abheben-

den Hintergrund erfolgen, der bei der Darstellung über eine geeignete Farbuordnungstabelle transparent visualisiert d.h. ausgeblendet werden kann. Auf diese Art lassen sich die Teilnehmer vom Hintergrund freistellen und beliebig in der 3D Szene platzieren.

Die realisierte Videokonferenzlösung erfolgt über das H.32x Protokoll und unterstützt unterschiedliche Hardware (Philips PCVC740K, Polyspan, Sony DCR-PC 120E) und Software (NetMeeting, GnomeMeeting, Open H.323). Da die Auflösungen und Audio-Bitraten in H.32x flexibel sind, ließen sich die jeweiligen Parameter an die vorhandene Verbindungsqualität anpassen. Tests in LANs, WANs und über Dial In-Verbindungen (T-DSL) haben zufrieden stellende Ergebnisse geliefert (siehe Abschnitt 2.1.9). In keinem der Tests traten Kompatibilitätsprobleme mit den verschiedenen CoDecs auf. Die Integration in das Planungssystem erfolgte dabei folgendermaßen:

- Hardware-H.32x Endpunkt (Polyspan etc.): Der Output des Decoders wird über einen Video-Grabber in einen Videostrom umgesetzt, dieser wird auf eine Textur projiziert und damit innerhalb der 3D-Szene angezeigt.
- Software-H.32x Endpunkt (NetMeeting, GnomeMeeting etc.): Für NetMeeting wird das Bild nicht direkt in die Szene integriert, sondern in einem eigenen Fenster dargestellt. Bei Verfügbarkeit eines Software-H.32x-Decoders könnte der Video-Datenstrom ebenfalls direkt in die 3D-Szene integriert werden (z.B. über einen Open H.323 Video-Treiber).

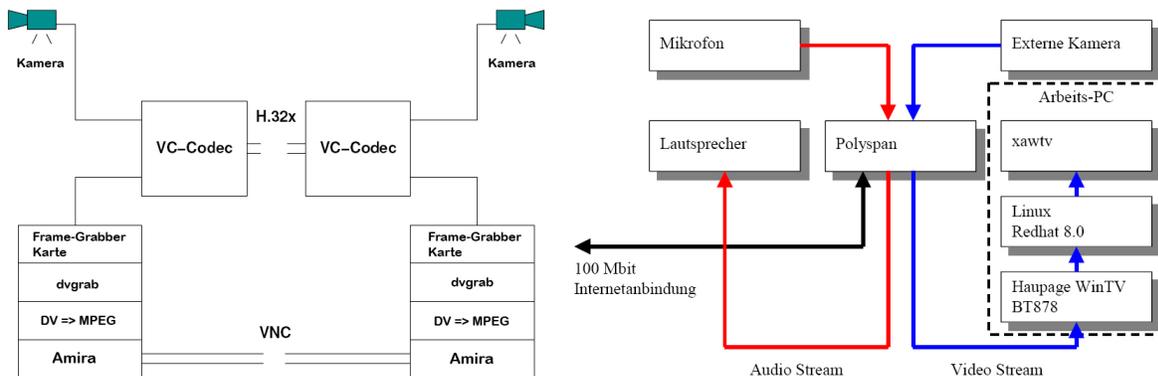


Abbildung 16: Schema der Videokonferenzverbindung

Im Projektverlauf wurden fast ausschließlich Videokonferenzen mit zwei Kommunikationspartnern abgehalten. Das entspricht dem typischen Szenario einer von Kliniken in Auftrag gegebenen Planung mit Beteiligung des jeweiligen Chirurgen. Vorstellbar sind aber auch Mehrbenutzer-Videokonferenzen, für die *Multipoint Conference Units* (MCU) eingesetzt werden müssen. Getestet wurden dazu (i) Hardware-Lösungen, die allerdings sehr teuer sind, (ii) eine MCU, die vom DFN bereit gestellt wird und (iii) eine Software-MCU aus dem Open H.323 Projekt,¹⁷ die allerdings zum Zeitpunkt der Tests noch nicht ausgereift war. Für die zukünftige Entwicklung wird sich vermutlich die Open MCU durchsetzen, die sich mittlerweile erheblich verbessert hat. Alternativ kann natürlich auch der DFN-Service genutzt werden. Sollte sich ein zentralisierter Standort für eine Planungsdienstleistung etablieren und sich weltweit Spezialkliniken herausbilden, die diesen Service intensiv nutzen, dann empfiehlt sich die Anschaffung von Hardware-MCUs ggf. auch für qualitativ hochwertige, IP-basierte Videokonferenzen (MPEG2 over IP).

¹⁷ www.openh323.org

Sicherheitsaspekte werden im Bereich von Telekonferenzanwendungen im Allgemeinen nicht gesondert beachtet. Somit liegen kaum ausgereifte Sicherheitsmodelle für solche Umgebungen vor. Da die Sicherheitsanforderungen im medizinischen Bereich gesetzestbedingt sehr hoch sind, müssen im realen Einsatz entsprechende Sicherheitsanforderungen berücksichtigt werden. Um die Videokonferenz nahtlos in die verwendete Sicherheitsinfrastruktur integrieren zu können, wurde auf eine spezifische Lösung für H.32x verzichtet, statt dessen wird die Sicherheit der Videokonferenzdaten über GSI-SSH-Tunnel gewährleistet, da SSH/SSL mittlerweile ohnehin defacto-Standard für verschlüsselte Verbindungen ist. Auch der Einsatz spezieller VLANs kann in Betracht gezogen werden.

2.1.8 Videoexport der Planungsansicht

Für Schulungs- und Ausbildungszwecke sowie für die Information von Patienten soll die 3D Ansicht des Planungssystems auch als kontinuierlicher AV-Datenstrom exportiert werden können. Teilnehmer erhalten auf diese Art, ohne besondere Hard- und Softwarevoraussetzungen, einen universellen Zugang zum Planungsgeschehen. Zu diesem Zweck wurden Module entwickelt, die es ermöglichen, die dynamische Planungsansicht als Video-Datenstrom via *Real Time Streaming Protocol*¹⁸ (RTSP) und Multicast zu exportieren. Das Planungssystem fungiert somit quasi als Streaming-Server, wobei durch die Verwendung von Multicast-Protokollen ein sehr gutes Skalierungsverhalten erreicht wird. Der Videostream ist dabei in seiner Auflösung und in der Wahl des CoDecs (Qualität) an die verfügbare Bandbreite anpassbar. Beim Videoexport werden unterschiedliche Formate, wie MPEG I, II oder IV, bzw. H.263 unterstützt. Die beste Performance und Qualität wird mit RTSP-tauglichen Encodern erreicht (MPEG IV, H.263). Tests lieferten Datenraten zwischen 800 KB/s und 6,3 MB/s. Der Videoexport erfolgt über eine URL der Form `rtsp://codisp.zib.de:12345`.

Dieser Video-Datenstrom kann von einer Vielzahl verbreiteter RTSP-Klienten, wie z.B. dem Microsoft MediaPlayer,¹⁹ dem QuickTime Player,²⁰ dem RealPlayer²¹ etc., verarbeitet und angezeigt werden (Abb. 17), wodurch der Demonstrationsmodus für mehrere Zuschauer unter minimaler Hardware-Anforderung, plattformunabhängig realisiert wird. Somit können behandelnden Ärzte und Patienten auf einfache Art Ergebnisse präsentiert, oder Planungen zu Schulungszwecken an eine beliebige Zahl von Teilnehmern exportiert werden.

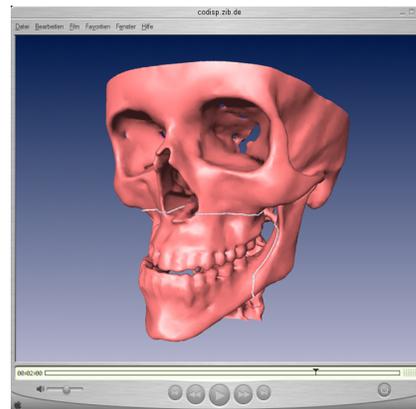


Abbildung 17: Videoexport der Planungsansicht

In Kombination mit der Möglichkeit der Darstellung von Videokonferenzteilnehmern in der 3D Planungsansicht bietet der Videoexport gleichzeitig eine Verteilung der Videokonferenz, allerdings derzeit noch ohne Übertragung der Audio-Daten.

¹⁸ www.rtsp.org

2.1.9 Netztechnische Untersuchungen

Im Verlauf der CoDiSP-Entwicklungsarbeit wurde das verteilte Planungssystem einschließlich der Videokonferenz auf unterschiedlichen Plattformen und Netzwerken genutzt und die Performance getestet. Unterschieden wurden Hochgeschwindigkeits- und Standardnetzwerke unter zusätzlicher Berücksichtigung von Teilnehmern mit schmalbandigen Zugängen. Wichtig war es herauszufinden, wie flexibel auf die jeweiligen netz- und gerätetechnischen Gegebenheiten reagiert werden kann und unter welchen Bedingungen die wesentliche Funktionalität des Planungssystems noch gewährleistet ist. Die folgenden vier Konstellationen wurden eingehender untersucht.

- Ein *Local Area Network* (**LAN**) diene als Grundlage für die Entwicklung und die Tests des verteilten Systems am ZIB. Wegen der breitbandigen Verbindung (≥ 100 Mb/s) bei relativ geringer Auslastung und kurzen Netzsegmenten wurden hier die besten Resultate hinsichtlich des Datendurchsatzes bei nahezu vernachlässigbaren Latenzen erzielt.
- Der Betrieb des Planungssystems unter Nutzung des Gigabit-Wissenschaftsnetzes (**G-WiN**) des DFN erfolgte zwischen den Kooperationspartnern in Berlin und München. Auch mit der Uni-Klinik Erlangen sowie über die Strecke Berlin-Hannover im Rahmen einer Präsentation auf der CeBIT 2003 wurden entsprechende Tests durchgeführt.
- Die verteilte Nutzung des Planungssystems in *Wide Area* Netzwerken (**WAN**) ergibt sich immer dann, wenn keine komplette Gigabit-Ethernet Verbindung vorliegt, wie z.B. nach Stockholm, Leipzig oder im Projektzeitraum auch zum Klinikum in Basel.
- Zur Überprüfung eines Anwendungsszenarios, bei dem sich ein niedergelassener Arzt oder auch ein Patient an der Planung beteiligt, wurde weiterhin der Zugang via **DSL** getestet, wie er u.a. von der Deutschen Telekom angeboten wird (T-DSL).

In der ersten geplanten Variante, also der Kopplung und Synchronisation mehrerer netzverteilt laufender Instanzen des Planungssystems (Abschnitt 2.1.5), muss zwischen Daten und Ereignissynchronisation unterschieden werden. Für den Abgleich der Daten sind die auf den unterschiedlichen Netzen erzielbaren Dateitransferzeiten, d.h. die verfügbare Bandbreite maßgeblich (Tab. 3). Zum Abruf der medizinischen Bilddaten vom Datenserver in der Klinik wurde, wie bereits in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, das Grid FTP-Protokoll eingesetzt. Der Abgleich der Daten zwischen den angemeldeten Instanzen erfolgt über den Replikaserver des Sitzungsmanagers. Zur optimalen Ausnutzung der verfügbaren Netzwerkanbindung müssen Übertragungsparameter angepasst werden, wie z.B. die Anzahl der genutzten parallelen Datenströme und die Größe der TCP-Buffer. In Zusammenarbeit mit dem GRID LAB-Projekt kamen dabei adaptive Methoden zum Einsatz, die diese Parameter abhängig von den gemessenen (und historischen) Netzwerkeigenschaften konfigurieren.

Tabelle 3: Durchschnittliche Übertragungszeiten für eine Datei der Größe 18 MB

Netzwerk	Transportzeit	KByte/s	mit Verschlüsselung	KByte/s
LAN	1,6 s	11437,8	9,0 s	1982,6
G-WiN	6,3 s	2838,3	68 s	262,4
WAN	17,4 s	1028,0	187 s	98,0
DSL	207 s	86,9	207 s	86,9

Die Übertragungstests erfolgten mit `ftp` bzw. `wget` und `iperf`, wobei mit `iperf` der TCP-Durchsatz gut getestet werden kann, da es von sonstigen Effekten (z.B. Plattenzugriffszeit etc.) und höheren Protokollebenen abstrahiert. Zur Optimierung der Datenübertragung sollte nach Aussage von Herrn Stoy vom *Network Operation Center* (NOC) des DFN²² das Produkt aus Bandbreite und RTT zur Abschätzung der optimalen *TCP-Window Size* bestimmt werden. Diese lässt sich bei `iperf` über den Parameter `-w` angeben und sollte bei einer Latenz von 40 ms und einer verfügbaren Bandbreite von z.B. 60 Mb/s ($0,04\text{ s} \times 60\text{ Mb/s} = 2,4\text{ Mb/s}$) mindestens 300 kB betragen. Als Beispiel für einen Datentransfer zwischen Berlin und Basel ergab sich zwischen einer *Window Size* von 512 Byte und 512 kByte eine Änderung der Bandbreite von 3,5 Mbit/s zu 13 Mbit/s. Um die Einstellung der *TCP-Window Size* systemweit wirksam werden zu lassen, kann diese auch über das Betriebssystem voreingestellt werden.²³

Da im Rahmen der Planung mit Datenvolumen von mehreren 100 MB gearbeitet wird, führte der Datenabgleich zwischen den Instanzen des Planungssystems zu inakzeptablen Verzögerungen, sodass eine Nutzung der Replikadienste nur für den kooperativen Betrieb des Planungssystems im lokalen Netzwerk oder komplett über Gigabit-Ethernet sinnvoll erscheint. Mit zunehmender Beteiligung von Kliniken, die keine schnelle Anbindung an das G-WiN haben, bzw. bei denen die Routen nicht komplett über Gigabit-Ethernet verlaufen, sowie unter Berücksichtigung der Anforderung, dass für spontane Kooperationen auch DSL-Teilnehmerzugänge unterstützt werden sollen, war die Variante der Synchronisation mehrerer netzverteilter Instanzen des Planungssystems mit entsprechender Datenreplikation nicht praktikabel. Aus diesem Grund wurde im weiteren Projektverlauf die Variante eines verteilten Planungssystems verfolgt, bei der lediglich eine Instanz auf einem Rechner läuft, auf dem die Daten lokal verfügbar sind und dessen Darstellung an alle weiteren Instanzen via VNC verteilt wird (Abschnitt 2.1.5). Verwendet wurde dazu das für alle erforderlichen Plattformen frei verfügbare `tightVNC`.²⁴

Mit dem Wechsel des Verteilungskonzeptes zur VNC-Variante entfiel die Notwendigkeit der Datensynchronisation, sodass sich in weiteren Untersuchungen im Wesentlichen mit den Netzwerklatenzen befasst und die Synchronisation der Bildschirmdarstellung optimiert werden musste. Maßgebend für die Akzeptanz des gemeinsamen Arbeitens ist vor allem eine kurze Latenz der jeweiligen IP-Verbindungen. Zu diesem Zweck wurden die unter realistischen Bedingungen vorliegenden Latenzen für die verschiedenen Netzwerke (LAN, G-WiN, WAN, DSL) zu unterschiedlichen Zeitpunkten und zwischen unterschiedlichen Rechnern über die *Round Trip Time* (RTT) gemessen. In Tabelle 4 sind die gemittelten Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 4: *Round Trip* Zeiten auf verschiedenen Netzwerken

Netzwerk	RTT _{min}	RTT _{mean}	RTT _{max}
LAN	0,5 ms	0,7 ms	0,8 ms
G-WiN (München)	12 ms	14 ms	15 ms
G-WiN (Basel)	36 ms	42 ms	47 ms
DSL	570 ms	621 ms	700 ms

Bei den gemessenen Werten handelt es sich wohlbemerkt um die reinen Transportzeiten, ohne Berücksichtigung weiterer Verzögerungen, die sich in höheren Protokollschichten bis hin zur

²² www.noc.dfn.de

²³ www.psc.edu/networking/perf_tune.html

²⁴ www.tightvnc.com

Interpretation der Daten durch die Anwendung ergeben. Ein bis zu 1000-facher Unterschied zwischen der schnellsten und der langsamsten Verbindung ist bereits ein Indikator dafür, dass für unterschiedlich angebundene Teilnehmer nicht mit der Bereitstellung einer vergleichbaren Funktionalität zu rechnen ist.

Im lokalen Netzwerk am ZIB konnte die VNC-Variante des verteilten Planungssystems ohne subjektiv erkennbare Unterschiede zur Arbeit auf dem Server-Rechner betrieben werden, d.h. in praktischen Tests ergaben sich bei der Arbeit in einem lokalen Netzwerk (LAN) keine merklichen Verzögerungen. Auch zwischen Berlin und München hielten sich die Latenzen in akzeptablen Grenzen, sodass am HFZ ebenfalls noch eine interaktive Arbeit mit dem am ZIB laufenden Planungssystem erfolgen konnte. In Basel zeigten sich hingegen schon deutliche Verzögerungen, die ein flüssiges Arbeiten durch stark verzögerten Bildaufbau verhinderten. Auch eine stärkere Komprimierung der Bilddaten mit daraus resultierender Qualitätseinbuße half auf einem Uni-prozessorsystem nicht. Lediglich bei einem Betrieb auf einem Mehrprozessorsystem stiegen die Raten für den Bildaufbau in einen interaktiven Bereich, was dafür spricht, dass Bildkomprimierung und Geometrieverarbeitung um den Prozessor konkurrieren. Als Alternative kann eine VNC-Verbindung mit reduzierten Farben eingerichtet werden, aus der eine Steigerung der Performance um nahezu 75% resultiert. DSL-Verbindungen stellen jedoch immer einen Kompromiss dar, bei dem starke Einbußen bei der Interaktion hingenommen werden müssen. DSL ist somit eher für den Demonstrationsmodus geeignet, bei dem die Latenzen keine Rolle spielen.

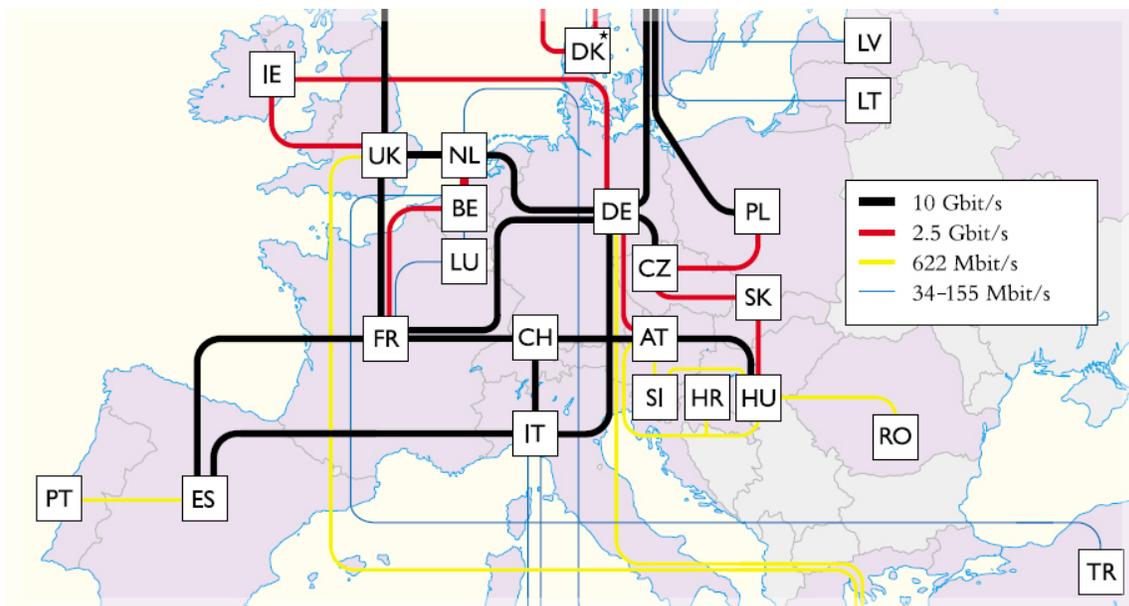


Abbildung 18: Ausschnitt aus der Topologie des europäischen Wissenschaftsnetzes Géant

Nach Einrichtung einer Planungsumgebung an der Uniklinik Basel, die über das lokale Universitätsrechenzentrum am Schweizer Forschungsnetz SWITCH²⁵ angebunden ist, zeigten ausgiebige Tests, dass eine interaktive gemeinsame Planung nicht möglich war. Lag die RTT zwischen München und Berlin noch in der Größenordnung von 12 – 15 ms, die eine subjektiv flüssige Interaktionsgeschwindigkeit erlaubte, so wurden zwischen Basel und Berlin Zeiten nicht unter 36 ms erzielt, die zu deutlichen Verzögerungen führten. Dieser Unterschied liegt vermutlich darin begründet, dass die G-WiN-Verbindung nach Genf über das europäische Forschungsnetz

²⁵ www.switch.ch

Géant²⁶ realisiert ist, das lediglich Routen über Mailand oder Paris in die Schweiz anbietet (siehe Abb. 18). Der Flaschenhals lag dabei nach Analyse der Routen (Tab. 5) zwischen Frankfurt (5) und Basel (10). Über Géant werden dazu 23 ms benötigt, wohingegen über BelWü lediglich 7 ms erforderlich wären. Insgesamt könnte die Zeit somit schon auf 20 ms reduziert werden. Das sich dieser Unterschied letztendlich so gravierend auf die Performance auswirkt liegt vermutlich auch am VNC-Protokoll, bei dem der VNC-Client für jede Aktualisierung eine Anfrage an den VNC-Server schicken muss (*request/response*).

Tabelle 5: Traceroute vom ZIB nach Basel

Hop	Host	RTT _{min}	RTT _{mean}	RTT _{max}	
1	swrout1.zib.de (130.73.68.111)	0	0	0	ms
2	rout1.zib.de (130.73.4.110)	1	1	1	ms
3	ar-berlin1.g-win.dfn.de (188.1.32.33)	1	1	1	ms
4	cr-berlin1-ge8-0.g-win.dfn.de (188.1.20.33)	1	1	1	ms
5	cr-frankfurt1-po9-2.g-win.dfn.de (188.1.18.185)	10	10	10	ms
6	dfn.de1.de.geant.net (62.40.103.33)	10	10	10	ms
7	de1-2.de2.de.geant.net (62.40.96.53)	10	10	20	ms
8	de.it1.it.geant.net (62.40.96.62)	19	19	19	ms
9	it.ch1.ch.geant.net (62.40.96.33)	32	32	32	ms
10	swiCE2-P6-1.switch.ch (62.40.103.18)	37	32	33	ms
11	swiBE2-G2-1.switch.ch (130.59.36.110)	35	35	34	ms
12	swiBA2-G1-2.switch.ch (130.59.36.113)	36	38	37	ms
13	131.152.89.225	36	36	36	ms
14	131.152.89.225	36	37	36	ms
15	131.152.89.225	36	36	36	ms

Die Verzögerungen zwischen Berlin und Basel ließen sich selbst durch Optimierung der TCP-*Window Size* (> 512 kB) und den Einsatz eines Mehrprozessorsystems, bei dem die erforderliche Bildkomprimierung und die Geometrierverarbeitung getrennt erfolgen, nicht auf ein zufriedenstellendes Maß senken. Verläuft die Route zwischen Basel und Berlin hingegen nicht über Géant sondern z.B. über TeliaSonera International Carrier,²⁷ der sowohl für das DFN als auch für SWITCH Transit bereitstellt, dann sinkt die RTT nach Aussage von Simon Leinen, Mitglied des *Performance Enhancement and Response Teams* (PERT), auf ca. 24 ms. Betrachtet man eine Verbindung nach Lörrach (z.B. ba-loerrach.de bzw. BA-Loerrach1.belwue.de), die über G-WiN und das Baden-Württembergische Landeshochschulnetz BelWü²⁸ fast nach Basel reicht und über die eine RTT von ca. 18 ms von Berlin, über Frankfurt, Stuttgart und Freiburg möglich ist, und berücksichtigt man ferner, dass Basel über SWITCH per Gigabit-Ethernet an BelWü angeschlossen ist (Abb. 19), dann sollte aus einer Direktanbindung SWITCH-G-WiN über Frankfurt bzw. einem Transit über BelWü nach Lörrach eine deutlich bessere Netzperformance resultieren. Bei einer Verbindungsstrecke von etwa 900 km liegt die theoretische Untergrenze für die Latenz bei 9 ms, was ungefähr dem erreichbaren Wert zwischen München und Berlin über G-WiN entspricht. Tests dieser Art zeigen auf jeden Fall deutlich, dass für eine netzverteilte, interaktive Anwendung wie dem beschriebenen Planungssystem Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsnetze eine wesentliche Voraussetzung darstellen.

²⁶ www.geant.net

²⁷ www.teliasonera.com

²⁸ www.belwue.de

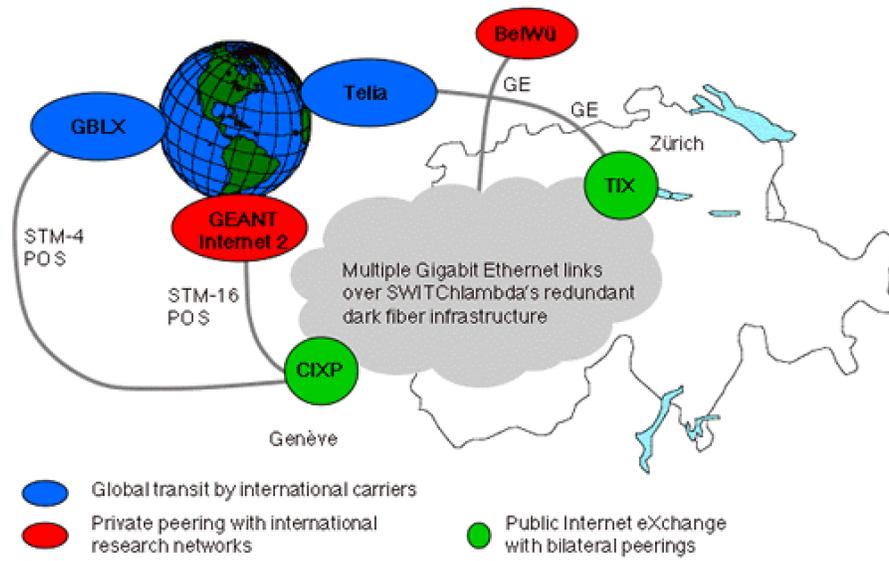


Abbildung 19: Internationale Anbindung des Schweizer Forschungsnetzes SWITCH

Zur interaktiven Benutzung des Planungssystems von einem entfernten Rechner kommt zusätzlich die Anforderung der gleichzeitigen **Videokonferenz**. Das verwendete H.32x kann dabei über Auflösung und Kompressionsverfahren an verschiedene Bandbreiten angepasst werden. Die Qualität der Übertragung hängt von der verfügbaren Bandbreite der jeweiligen Teilnehmer ab. Der gleichzeitige **Videoexport** der Planungsansicht erfolgt in einem festgelegten Format mit wählbarer Auflösung. Ist diese Auflösung zu gross gewählt, so kann es zu Engpässen bei schmalbandiger Anbindung kommen. Die Anforderungen an die Endsysteme sind dabei jedoch eher gering. An den Server-Rechner wird mit dem Betrieb des Planungssystems, der Bereitstellung der Videokonferenz und dem Videoexport allerdings eine erhebliche Anforderung gestellt, die mit Uniprozessorsystemen nicht erfüllt werden kann.

Für die Videokonferenz spielt die Latenz praktisch keine Rolle. Hier ist wieder nur die verfügbare Bandbreite von Bedeutung. Die genutzten H.32x-Endsysteme boten alle die Möglichkeit, die Daten über die geeignete Wahl von Auflösung (Video) und Samplingrate (Audio) an die verfügbare Anbindung anzupassen. Für einige Endsysteme erfolgt dies auch halbautomatisch.

LAN-Test: Im ZIB wurden über das lokale Netzwerk zwei Polyspan-Geräte zu einer Videokonferenz verbunden sowie eine Konferenz über ein Polyspan-Gerät und einem GnomeMeeting hergestellt. Dabei konnten sehr gute Verbindungen aufgebaut und genutzt werden.

DSL-Test: Um ein typisches Szenario einer Verbindung zu einem Hausarzt zu testen, wurde eine DSL-Verbindung getestet, bei der auf Seiten des ZIB das Polyspan-Gerät zum Einsatz kam und auf der Gegenseite GnomeMeeting eingesetzt wurde. Die H.32x Verbindung konnte problemlos aufgebaut werden. Aufgrund der Datenkompression des Video-Datenstroms (hierbei optimiert auf Videoqualität) konnten ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

WAN-Test: Mit dem Rechenzentrum Erlangen konnte eine Videokonferenzverbindung erfolgreich zwischen einem Polyspan Gerät auf Seiten des ZIB und einem VCAN Falcon auf Seiten des RZ Erlangen etabliert und genutzt werden. Sowohl Audio als auch Videoverbindung entsprechen den Erwartungen. Der Audio-Datenstrom wird dabei mit konstanten 64 kBit/s übertragen,

die Videodaten beim Senden mit 400–500 kBit/s (abhängig von den Bildinhalten) und beim Empfang mit 175 kBit/s.

G-WiN-Test: Ein G-WiN-Test erfolgte u.a. im Zusammenhang mit der Demonstration des CoDiSP-Projektes auf der CeBIT in Hannover am 18.03.2003 (Abb. 20). Sowohl die VNC-basierte Nutzung des Planungssystems in Berlin als auch die Videokonferenz zwischen Hannover und Berlin mittels einer Polyspan Kombination waren verzögerungsfrei, von hoher Qualität und entsprachen somit in jeder Hinsicht den Projektvorstellungen.



Abbildung 20: Präsentation des CoDiSP-Projektes auf der CeBIT 2003 ;-)

Für die netztechnische Untersuchung wurden wir von diversen Experten unterstützt, denen wir an dieser Stelle danken möchten. Dazu gehört als erstes Tobias Marquart (Universitätsrechenzentrum Basel), der mit uns erste Tests durchgeführt und nach gemeinsamer Erkennung der Probleme weitere Kontakte vermittelt hat. Weiterhin geht ein großer Dank an Simon Leinen und Christian Schlatter (beide SWITCH) sowie an Robert Stoy (DFN-NOC). Möglicherweise führt diese Untersuchung ja zu einer schnelleren Interkonnektion Berlin-Basel.

2.1.10 Klinischer Einsatz

Das Planungssystem wurde im gesamten Projektzeitraum für klinische Fragestellungen genutzt und dabei kontinuierlich am ZIB weiter entwickelt. Insgesamt wurden mehr als 30 Fälle mit Kliniken in München, Basel, Leipzig, Erlangen und Stockholm bearbeitet. Im Rahmen der Planung gibt es eine klare Aufgabenteilung zwischen Modellerzeugung und Operationsplanung. Die Modellerzeugung sollte von einer medizinisch-technischen Planungsassistenz (MTPA) vorgenommen werden und die eigentliche Planung von den jeweiligen Operateuren, die dabei nicht nur eine optimale Operationsstrategie entwickeln, sondern sich auch gleichzeitig mental auf den bevorstehenden Eingriff vorbereiten können. Für den klinischen Einsatz des Planungssystems gibt es jedoch zwei Möglichkeiten:

- Installation eines Planungssystems in der Klinik
- Etablierung einer externen Planungsdienstleistung

Bei der ersten Variante befinden sich die Planungsassistenten und Chirurgen am selben Ort. Es kann mit dem Planungssystem jederzeit problemlos auf die medizinischen Bilddaten zugegriffen werden, da sich Datenbank und Planungssystem im Kliniknetz hinter einer *Fire Wall* befinden. Kurze Wege und spontane Verfügbarkeit ermöglichen dabei ein sehr effektives Arbeiten.

Die Konzepte der verteilten Planung werden entweder intern genutzt oder zur kooperativen Arbeit mit Fachkollegen anderer Kliniken. Die *Planungshoheit* verbleibt an der jeweiligen Klinik. Die Installation eines Planungssystems in den Kliniken erfordert allerdings (i) eine stabile, benutzerfreundliche Software, (ii) eine ausführliche Bedienungsanleitung (Benutzerhandbuch) und (iii) eine professionelle Kundenbetreuung. Dabei handelt es sich um Anforderungen, die typischerweise nicht im Rahmen eines Forschungsprojektes bearbeitet werden, sondern erst mit der wirtschaftlichen Verwertung der Ergebnisse.

Im Verlauf des CoDiSP-Projektes wurde aufgrund der kontinuierlichen Entwicklung überwiegend die zweite Variante gewählt. Dabei stehen externe Expertenbenutzer den Klinikern als Planungsassistenten zur Verfügung und kooperieren mit den Ärzten über das verteilte Planungssystem bei gleichzeitiger Kommunikation mittels Videokonferenz. Diese zentralisierte Planungsdienstleistung hat den Vorteil, dass das Planungssystem in seiner vollen Funktionalität stets effizient genutzt wird und dass erforderliche Verbesserungen schnell erkannt und vorgenommen werden, sodass sie für weitere Planungen auch schnell zur Verfügung stehen. Solche Verbesserungen würden bei einer Installation in den Kliniken den Anwendern nur mit Verzögerung und zusätzlichen Kosten für *Updates*, Installation und Schulung zu Gute kommen. Ein zentralisierter Planungsservice hat weiterhin den Vorteil, dass durch die Kooperation mit einer Vielzahl von Kliniken auch sehr vielfältige Fragestellungen bearbeitet werden, was zur Folge hat, dass sich die Funktionalität des Planungssystems schneller und praxisgerechter erhöht.

Für den klinischen Einsatz wurden im CoDiSP-Projekt erste Konzepte für eine praxisgerechte Nutzung des Planungssystems untersucht, die auf Resultaten eines anderen Forschungsprojektes am ZIB basieren. Diese betreffen die Anmeldung an das Planungssystem, das Laden und Speichern von Patientendaten und Planungsergebnissen, die Bedienung der Planungswerkzeuge sowie die Steuerung der Videokonferenz. Auf die intuitive Nutzung Problem-angepasster Planungswerkzeuge wurde bereits in Abschnitt 2.1.4 eingegangen. Für den Zugang und die Verwaltung von Patienten- und Planungsdaten wurden spezielle *Data Cards* eingesetzt, die via *Radio Frequency Identification* (RFID) beschrieben und ausgelesen werden können. Diese Karten finden problemlos in der Kitteltasche des Arztes Platz und können mit einem preiswerten Verfahren bedruckt und auf dafür vorgesehenen Feldern mit einem Stift beschrieben werden (Abb. 21 links). Über die Karten kann sich ein Arzt identifizieren und auf die zugehörigen Patientendaten via gespeicherter URL zugreifen.

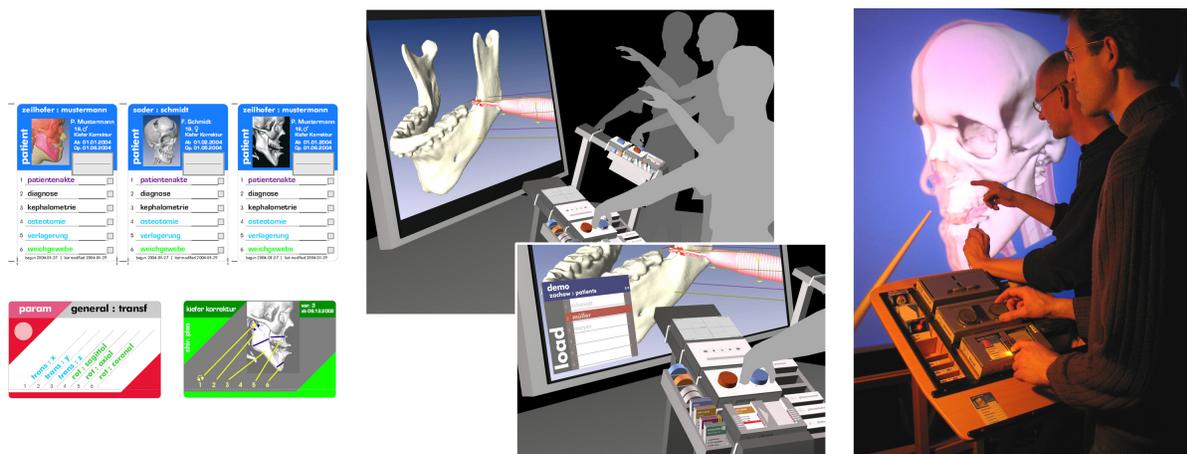


Abbildung 21: links: *Data Cards*, mitte: Bedienungskonzept, rechts: praktischer Einsatz

Mittels neuartiger Benutzerschnittstellen (sogenannter *Tangible User Interfaces*), deren Entwicklung u.a. von Brygg Ullmer am MIT, am ZIB und seit Ende des Jahres 2005 an der *Louisiana State University*²⁹ (LSU) vorangetrieben wird, lassen sich Planungswerkzeuge auswählen und intuitiv nutzen (Abb. 21 mitte und rechts). Dabei wird insbesondere die beidhändige Interaktion unterstützt, sodass z.B. mit der einen Hand eine Modelltransformation und mit der anderen eine Schnittlinienspezifikation vorgenommen werden kann. Auch die intuitive Steuerung der Videokonferenz ist mit solchen Konzepten möglich, wobei jedem potenziellen Kommunikationspartner eine Karte zugeordnet ist, deren Platzierung und Positionierung auf einem sensitiven Feld die Videokonferenz startet und das Videobild an der entsprechenden Stelle auf dem Bildschirm bzw. in der Szene anordnet. Neu eingerichtete Videokonferenzen lassen sich mit Rufnummer, Teilnehmerinformation und aktuellen Darstellungsparametern auf einer *Data Card* speichern und anschließend mit geeigneten Angaben (Bild und Text) bedrucken. Solche neuartigen, benutzerfreundlichen Bedienkonzepte werden die allgemeine Akzeptanz von komplexen Software-Systemen erhöhen und deren Integration in alltägliche Arbeitsprozesse beschleunigen [2].

2.1.11 Abschlusspräsentation

Im Rahmen einer Abschlusspräsentation wurden dem DFN-Verein, vertreten durch Frau Roesler-Lass und Frau Maiss, die vorab beschriebenen Ergebnisse des CoDiSP-Projektes anhand eines kompletten Planungsszenarios demonstriert. Das Planungssystem lief dabei am ZIB auf einem PC und die grafische 3D Darstellung erfolgte auf einer $2 \times 1,5$ m Rückprojektionswand mittels Stereoprojektion. Ein Kanal der Darstellung wurde via VNC-Server exportiert und dem HFZ in München über Port- und Passwortvereinbarung zugänglich gemacht. Für die Videokonferenz wurde eine Polyspan-Konfiguration verwendet, wobei am ZIB eine externe Sony Digitalkamera für eine qualitativ hochwertige Bildaufnahme im weitgehend abgedunkelten Raum sorgte. Das AV-Signal aus München wurde sowohl auf einen separaten TV-Monitor als auch über eine *Frame-Grabber* Karte frei positionierbar in der 3D Planungsszene dargestellt.

Demonstriert wurde an zwei unterschiedlichen Patientendatensätzen die interaktive Spezifikation der Knochenschnitte und die interaktive Verlagerung von mobilisierten Knochengsegmenten am 3D Planungsmodell, die einmal am ZIB und einmal von München aus durchgeführt wurden. Die aus der Knochenumstellung resultierende Weichgewebeanordnung wurde berechnet und konnte sowohl am ZIB als auch von den Münchener Teilnehmern bei freier Wahl der Darstellungsparameter visuell bewertet werden. Simultan wurde die 3D Planung als Video-Datenstrom per Multicast exportiert und auf einem Notebook via *Wireless* LAN zeitgleich mittels eines RTSP-Klienten (Quick Time Player) abgespielt.

2.2 Nutzen und Verwertbarkeit

Die Ergebnisse der Arbeit wurden kontinuierlich auf Fachtagungen und Kongressen präsentiert [14, 16, 18, 19, 24, 33, 34]. Auch in den Medien wurde wiederholt über das Projekt berichtet, was zu verstärkten Patientennachfragen führte. Das inzwischen weltweite Interesse MKG-chirurgischer Kliniken zeigt sich durch regelmäßige Kooperationsanfragen, von denen einige im Projektverlauf realisiert wurden, und bestätigt den Bedarf an einem computergestützten Planungssystem der hier vorgestellten Art. Momentan liegen Anfragen aus Wien und aus den USA vor, die Präsentation auf einer speziellen Fachtagung in Banff / Kanada im März 2005 wird für weitere internationale Aufmerksamkeit sorgen [13, 17, 23]. Als zentrale Punkte für eine klinische

²⁹ www.cct.lsu.edu

Akzeptanz erwiesen sich der einfache Zugang zu gemeinsamen Planungsansichten, die Kommunikation zur Klärung offener Fragen und die kooperative Planung der Operation einschließlich der neuen Möglichkeiten einer präoperativen Bewertung des zu erwartenden ästhetischen Ergebnisses. Die Praxiserfahrungen bestärken uns in der Ansicht, dass – angesichts der Komplexität der zu bewältigenden Planungsschritte – ein Angebot als Planungsdienstleistung über Kommunikationsnetze sinnvoll ist.

2.2.1 Planungsdienstleistung

Mit dem im CoDiSP-Projekt entwickelten Planungssystem für operative Eingriffe in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie steht eine Software zur Verfügung, die für komplexe chirurgische Fragestellungen eingesetzt werden kann. Das Konzept einer verteilten kooperativen Planung ermöglicht dabei die direkte Beteiligung der klinischen Auftraggeber zu beliebigen Zeitpunkten, ohne die Notwendigkeit einer physischen Präsenz. Durch Auslagerung der zeitintensiven 3D Modellrekonstruktion und Inanspruchnahme professioneller Planungsassistenz wird den knappen zeitlichen Ressourcen entsprochen, die den Klinikern üblicherweise zur Verfügung stehen. Diese Ressourcen können durch die Verteilung spezifischer Planungsaufgaben optimal genutzt werden. Generell resultiert daraus der Eindruck, dass zwischen der Radiologie und der Chirurgie eine klinische Abteilung für die Aufbereitung dreidimensionaler Planungsmodelle zur computergestützten Diagnostik und Planung erforderlich ist. Da eine solche klinikinterne Dienstleistung nicht existiert, ist eine Verteilung des Planungsprozesses, und damit die Einbeziehung externer Kompetenzen, sinnvoll und wünschenswert. Zu klären ist einzig, ob eine solche Planungsdienstleistung kommerziell tragfähig ist, da Planungsleistungen bei den Krankenkassen derzeit noch nicht gesondert abrechenbar sind. Eine ähnliche Dienstleistung für die Operationsplanung in der Leberchirurgie wird von der im März 2004 gegründeten MeVis Distant Services AG³⁰ in Bremen angeboten, allerdings derzeit noch ohne verteilt kooperatives Arbeitskonzept. Auch dort ist die Abrechnung von Planungsleistungen über die Versicherungsträger sicherlich ein Problem – der größte Teil der Planungsaufträge kommt derzeit aus dem Ausland.

2.2.2 Patientenaufklärung

Ein weiterer wichtiger Vorteil einer computergestützten Planungsumgebung der beschriebenen Art ist die Möglichkeit der anschaulichen Präsentation aller Planungsergebnisse, sowohl statisch als auch in der 3D Animation. Die computergrafische 3D Darstellung der individuellen Ausgangssituation, aller möglichen Therapievarianten unter funktionellen Aspekten sowie die zu erwartenden Auswirkungen auf das Gesicht des Patienten liefern eine deutlich erhöhte Qualität für die Patientenaufklärung und führen nach gemeinsamer Absprache der Behandlungsstrategie zwischen Arzt, Patient und dessen Angehörigen zu einer motivierteren Kooperation der Patienten im Verlauf der Therapie, die letztendlich in einem verbesserten Gesamtergebnis resultiert. Alle Darstellungen dienen zusätzlich einer verbesserten Qualitätssicherung und Dokumentation. Im Projektzeitraum hatten interessierte Patienten die Möglichkeit, im Rahmen der Planung selbst mittels immersiver Visualisierungstechniken die Knochenumstellung am individuellen Planungsmodell auszuprobieren und die funktionellen und ästhetischen Auswirkungen der Umstellung mit Hilfe der Weichgewebeprognoze zu begutachten und zu bewerten (Abb. 22). Die Patienten fühlten sich durch diese Art der Operationsplanung nach eigenen Aussagen sehr gut aufgeklärt, waren hoch motiviert und mit dem jeweils erzielten Ergebnis auch sehr zufrieden.

³⁰ www.mevis-distant-services.com

Ein Patient bestand vor einer Folgeoperation für eine Kinnplastik sogar auf eine präoperative Darstellung des zu erwartenden Ergebnisses.



Abbildung 22: Patientenaufklärung durch computergestützte 3D Planung

2.2.3 Schulung und Ausbildung

Für Patienten, von denen eine Freigabe der Daten für Veröffentlichungszwecke vorlag, wurden Planungsergebnisse nicht nur auf Fachtagungen präsentiert sondern auch Bilder und Animationen im Netz bereitgestellt.³¹ Insbesondere die Animationen verdeutlichen dabei sehr anschaulich den geplanten operativen Eingriff und in der Simulation die daraus resultierende Gesichtsform. Unterschiedliche Therapievarianten werden an konkreten Beispielen demonstriert und die Resultate dreidimensional dargestellt. Von diversen Kliniken und Fachärzten wurde im Projektzeitraum die Genehmigung eingeholt, diese Ergebnisse zur anschaulichen Darstellung in der Vorlesung oder auf Kongressen verwenden zu dürfen. Aus einer Vielzahl an Planungen resultiert mit der Zeit ein recht umfangreiches Anschauungsmaterial, das u.a. zu Lehrzwecken eingesetzt werden kann.

2.3 Allgemeiner Entwicklungsfortschritt

Im Rahmen des CoDiSP-Projektes wurden erstmals computergestützte 3D-Operationsplanungen komplexer Schädeldefehlbildungen unter Berücksichtigung aller relevanten Planungskriterien in der klinischen Routine durchführbar [20]. Durch Realisierung einer netzverteilten Planung ließen sich vorhandene Kompetenzen bündeln und so auch bei sehr komplexen chirurgischen Aufgaben bestmögliche Ergebnisse erzielen. Die dazu erforderlichen Arbeitsabläufe zur Modellerzeugung und Simulation sind für klinische Anwender allerdings momentan noch zu komplex und zeitintensiv, als dass sie von ihnen selbst durchgeführt werden können bzw. sollten. Bis zur Entwicklung automatischer Methoden zur 3D Modellrekonstruktion und der Integration aller erforderlichen Planungswerkzeuge werden solche Planungen vermutlich auch noch in den nächsten Jahren nur durch enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Fachleuten der Informationstechnik und den medizinischen Anwendern möglich sein.

³¹ www.zib.de/visual/projects/cas/cas-gallery.html

2.3.1 Europäisches Projekt – GEMMS

Ein weiteres wichtiges Projekt mit vielen Parallelen zu CoDiSP ist das sogenannte GEMMS-Projekt³² (*Grid-Enabled Medical Simulation Services*), das am 1. September 2002 gestartet ist und bis zum 28. Februar 2005 läuft. Das Projekt wird von der EU über das Programm *Information Society Technologies* (IST) gefördert und beschäftigt sich insbesondere mit Grid-Anwendungen im Bereich der Medizin. Ansprechpartner ist [Dr. Jochen Fingberg](#), von den C&C Research Laboratories, NEC Europe Ltd. in St. Augustin. Ein Teilprojekt befasst sich dabei exakt mit der gleichen klinischen Anwendung wie das CoDiSP-Projekt, wobei Grid-Ressourcen primär für die Echtzeitsimulation der Weichgewebedeformation genutzt werden sollen. Im Bereich der Modellrekonstruktion und der Operationsplanung sind allerdings keine verbesserten Ansätze erkennbar. Im GEMMS-Projekt kooperiert Dr. Hierl aus Leipzig, mit dem auch das ZIB kooperative Planungen durchführt. Simulationen werden dabei an identischen Datensätzen durchgeführt, sodass sich eine übergreifende Kooperation anbietet [11, 12].

2.3.2 Nordamerikanisches Projekt – BIRN

Ein amerikanisches Projekt, das sich mit der netzverteilten kooperativen Arbeit in biomedizinischen Anwendungen befasst, ist das sogenannte *Biomedical Informatics Research Network*³³ (BIRN), das sich aus einem Konsortium von 19 Universitäten und 26 Forschungsgruppen zusammensetzt (Abb. 23). Im BIRN sollen durch die Zusammenarbeit diverser Einrichtungen und die daraus resultierende Bündelung von Kompetenzen neue Erkenntnisse im Bereich der neurologischen Forschung gewonnen werden. Dazu wird eine IT-Infrastruktur entwickelt, in der eine interdisziplinäre, netzverteilte Zusammenarbeit von Neurowissenschaftlern, Medizinern, Informatikern und Ingenieuren auf gemeinsamen Daten ermöglicht werden soll.

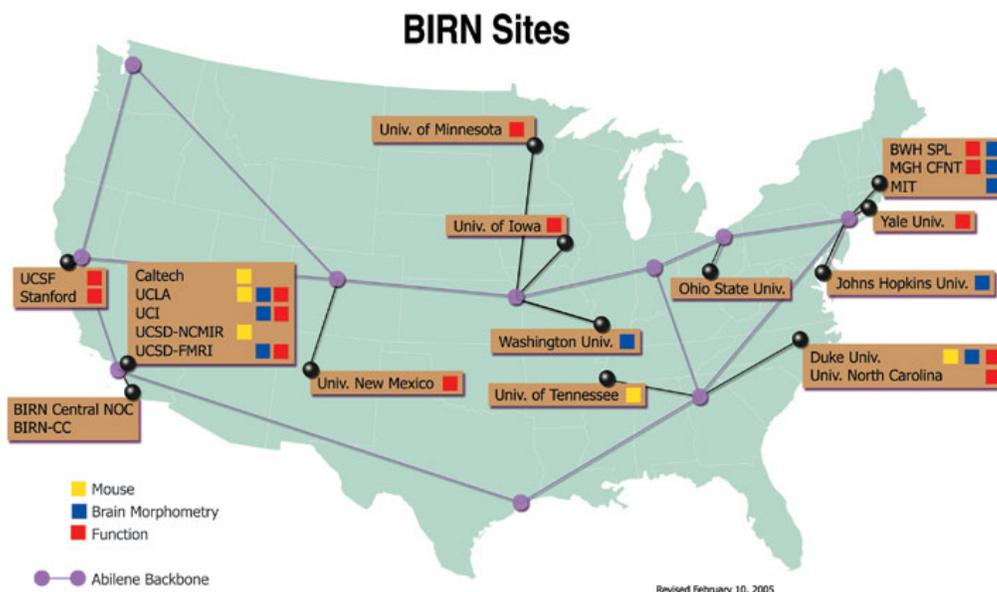


Abbildung 23: *Biomedical Informatics Research Network* in Nordamerika

³² www.gemss.de

³³ www.nbirn.net

Veröffentlichungen und Präsentationen

- [1] T. Böhm. Web service based data management for grid applications. In *Proc. of Euroweb 2002, St Anne's College Oxford, UK*, pages xx–yy, December 16.–18. 2002.
- [2] D. A. Bowman, E. Kruijff, and J. J. LaViola. *3D User Interfaces*. Addison Wesley Publishing Company, 2004.
- [3] Erster Zwischenbericht zum Projekt CoDiSP: Collaborative Distributed Surgery Planning, Nov 2002. TK 602 – NT 2002.2.
- [4] Zweiter Zwischenbericht zum Projekt CoDiSP: Collaborative Distributed Surgery Planning, Mai 2003. TK 602 – NT 2002.2.
- [5] Dritter Zwischenbericht zum Projekt CoDiSP: Collaborative Distributed Surgery Planning, Nov 2003. TK 602 – NT 2002.2.
- [6] E. Gladilin, S. Zachow, P. Deuffhard, and H.-C. Hege. A biomechanical model for soft tissue simulation in craniofacial surgery. In *Medical Imaging and Augmented Reality*, pages 137–141, 2001.
- [7] E. Gladilin, S. Zachow, P. Deuffhard, and H.-C. Hege. Adaptive nonlinear elastic FEM for realistic prediction of soft tissue in craniofacial surgery simulations. In Seong K. Mun, editor, *Medical Imaging 2002: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display*, volume 4681 of *Proc. of SPIE*, pages 1–8, 2002.
- [8] E. Gladilin, S. Zachow, P. Deuffhard, and H.-C. Hege. A comparison of physical models of deformable soft tissue for craniofacial surgery. In H. U. Lemke, M. W. Vannier, K. Inamura, A. G. Farman, K. Doi, and J. H. C. Reiber, editors, *Computer Assisted Radiology and Surgery*, pages 343–348, London, June 2003. Elsevier Science B.V.
- [9] H.-C. Hege, A. Merzky, and S. Zachow. Distributed visualization with Open GL VizServer. ZIB-Report 00-31, Zuse-Institute Berlin (ZIB), nov 2000. <ftp.zib.de/pub/zib-publications/reports/ZR-00-31.pdf>.
- [10] H.-C. Hege, H. Schirmacher, M. Westerhoff, Lamecker H., Prohaska S., and S. Zachow. From image data to three-dimensional models: Case studies on the impact of 3D patient models. In *Proc. of the Japan Korea Computer Graphics Conference*, Kanazawa University, Ishikawa, Japan, 2002. CD ROM.
- [11] Th. Hierl, S. Zachow, G. Wollny, G. Berti, and J. Fingberg. Concepts of computer-based simulation in orthognathic surgery. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 32(suppl 1):81–82, 2004.
- [12] Th. Hierl, S. Zachow, G. Wollny, G. Berti, J.-G. Schmidt, and J. Fingberg. Computer-based simulation in distraction osteogenesis. In *Proc. of 3rd Int. Oxford Distraction Symposium of the Craniofacial Skeleton*, pages 33–34, 2004.
- [13] H. Lamecker, M. Zöckler, S. Zachow, and H. Haberl. Statistical shape modeling for cranio-synosthosis planning. In *2. Int. Conf. on Advanced Digital Technology in Head and Neck Reconstruction*, Banff, Alberta, CA, March 10.–13. 2005.

- [14] E. Nkenke, S. Zachow, M. Benz, et al. Dreidimensionale Analyse des Mittelgesichts nach LeFort I-Osteotomie und Vorverlagerung des Oberkiefers. 53. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Krefeld, June 18.–21. 2003.
- [15] D. Stalling, M. Westerhoff, and H.-Chr. Hege. *The Visualization Handbook*, chapter 38, Amira: A Highly Interactive System for Visual Data Analysis, pages 749–767. Elsevier Science B.V., 2004.
- [16] D. Stalling, M. Zöckler, R. Brandt, and S. Zachow. Chirurgieplanung mit Amira – Software Demonstration. 119. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie, Berlin, May 7.–10. 2002.
- [17] A. Westermarck, S. Zachow, and B. Eppley. 3d osteotomy planning in maxillofacial surgery including 3d soft tissue prediction. In *2. Int. Conf. on Advanced Digital Technology in Head and Neck Reconstruction*, Banff, Alberta, CA, March 10.–13. 2005.
- [18] S. Zachow. Computer assisted 3d osteotomy planning in cranio-maxillofacial surgery, jun 13. 2002. 16. Treffpunkt Medizintechnik, Charité Berlin, Campus Virchow Klinikum.
- [19] S. Zachow. Computerassistierte 3D Planung in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. 7. Kongress der Union Schweizerischer Chirurgischer Fachgesellschaften, Lausanne, Schweiz, June 19.–22. 2002.
- [20] S. Zachow, E. Gladilin, A. Trepczynski, R. Sader, and H.-F. Zeilhofer. 3D osteotomy planning in cranio-maxillofacial surgery: Experiences and results of surgery planning and volumetric finite-element soft tissue prediction in three clinical cases. In H. U. Lemke, M. W. Vannier, K. Inamura, A. G. Farman, K. Doi, and J. H. C. Reiber, editors, *Computer Assisted Radiology and Surgery*, pages 983–987, Paris, June 2002. Springer-Verlag.
- [21] S. Zachow, E. Gladilin, H.-F. Zeilhofer, and R. Sader. 3D Osteotomieplanung in der MKG-Chirurgie unter Berücksichtigung der räumlichen Weichgewebeanordnung. In H. Wörn, J. Mühlhling, C. Vahl, and H.-P. Meinzer, editors, *Rechner- und sensorgestützte Chirurgie*, GI Lecture Notes in Informatics, pages 217–226, Heidelberg, July 19.–20. 2001. Gesellschaft für Informatik.
- [22] S. Zachow, E. Gladilin, H.-F. Zeilhofer, and R. Sader. Improved 3D osteotomy planning in cranio-maxillofacial surgery. In W. Niessen and M. A. Viergever, editors, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, number 2208 in Lecture Notes in Computer Science, pages 473–481. Springer-Verlag, October 14.–17. 2001.
- [23] S. Zachow, H.-C. Hege, and P. Deuffhard. Maxillofacial surgery planning with 3d soft tissue prediction - modeling, planning, simulation. In *2. Int. Conf. on Advanced Digital Technology in Head and Neck Reconstruction*, Banff, Alberta, CA, March 10.–13. 2005.
- [24] S. Zachow, H.-Chr. Hege, and P. Deuffhard. Advances in 3d osteotomy planning with soft tissue prediction. 2nd International Symposium on Computer Aided Surgery around the Head, Bern, Switzerland, September 17.–19. 2004.
- [25] S. Zachow, H.-Chr. Hege, and P. Deuffhard. Computergestützte Operationsplanung in der Gesichtschirurgie. In *Proc. VDE Kongress 2004 – Innovationen für Menschen*, volume 2 of *Fachtagungsberichte DGBMT - GMM - GMA*, pages 53–58, oct 2004.

- [26] S. Zachow, Th. Hierl, and B. Erdmann. On the predictability of tissue changes for osteotomy planning in maxillofacial surgery: A comparison with postoperative results. In H. U. Lemke, M. W. Vannier, K. Inamura, A. G. Farman, K. Doi, and J. H. C. Reiber, editors, *Computer Assisted Radiology and Surgery*, pages 648–653, Chicago, June 2004. Elsevier Science B.V.
- [27] S. Zachow, Th. Hierl, and B. Erdmann. A quantitative evaluation of 3D soft tissue prediction in maxillofacial surgery planning. In *Proc. 3. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboter-assistierte Chirurgie (curac)*, pages xxx–yyy, oct 2004.
- [28] S. Zachow, Th. Hierl, and B. Erdmann. Über die Qualität einer 3D Weichgewebeprädiktion in der Gesichtschirurgie: Ein quantitativer Vergleich mit postoperativen CT-Daten. In T. Tolxdorff, J. Braun, H. Handels, A. Horsch, and H.-P. Meinzer, editors, *Proc. Bildverarbeitung für die Medizin*, volume XXI of *Informatik aktuell*, pages 75–79. Springer-Verlag, mar 2004.
- [29] S. Zachow, H.-F. Zeilhofer, H.-Chr. Hege, and P. Deuffhard. FaceLab: Computergestützte Chirurgieplanung. Forschungsmarkt Berlin auf der Cebit Hannover, 2002. www.zib.de/visual/projects/cas/cas-flyer.pdf.
- [30] H.-F. Zeilhofer. *Innovative dreidimensionale Techniken - Medizinische Rapid Prototyping (RP)-Modelle für die Operationsplanung und daraus resultierende neue Entwicklungen in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie*. Habilitationsschrift, Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie der Technischen Universität München, 1998.
- [31] H.-F. Zeilhofer, R. Sader, K.-H. Hoffmann, P. Gerhardt, W. Kalender, U. Poth, and G. Sachs. CAF-CAS – Computertomography with artefact elimination and finite element modelling in cybernavigational assisted surgery. DFN – Abschlussbericht, Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie der Technischen Universität München, 2000. webdoc.sub.gwdg.de/ebook/ah/1999/dfn/caf-cas.pdf.
- [32] H.-F. Zeilhofer and S. Zachow. CoDisp: Collaborative Distributed Surgery Planning. DFN – Future Talk auf der Cebit Hannover, 2003. www.dfn.de/content/fileadmin/5Presse/DFNMitteilungen/heft60.pdf.
- [33] H.-F. Zeilhofer, S. Zachow, R. Sader, H.-C. Hege, K. Schwenzer, and P. Deuffhard. FaceLAB-Simulation der ästhetischen Veränderung nach Umstellungsosteotomien in der virtuellen Arbeitsumgebung. 53. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Krefeld, June 18.–21. 2003.
- [34] H.F. Zeilhofer, S. Zachow, R. Sader, et al. Funktionelle und ästhetische Planung von kraniofazialen Operationen in einer virtuellen Simulationsumgebung. 40. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Plastische und Wiederherstellungschirurgie, Aachen, October 17.–19. 2002.

3 Erfolgskontrollbericht

Nachfolgend werden die unter Abschnitt 2 aufgeführten Ergebnisse des CoDiSP-Projektes zusammenfassend bewertet und die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit diskutiert. Im Gesamtergebnis war das CoDiSP-Projekt sehr erfolgreich und besitzt in der Anwendung große Nutzungsperspektiven.

3.1 Wissenschaftlich-Technische Ergebnisse

Im CoDiSP-Projekt entstand ein chirurgisches Planungssystem, mit dem Korrekturen komplexer Schädeldefektbildungen intuitiv am dreidimensionalen Patientenmodell geplant und die Planungsergebnisse hinsichtlich der funktionellen und ästhetischen Rehabilitation dreidimensional bewertet werden können. Mit dem Planungssystem lassen sich alle Einzelschritte vom Datenimport über die Modellrekonstruktion bis hin zur Planung inklusive der Weichgewebesimulation durchführen, wobei das Planungssystem sowohl lokal als auch netzverteilt genutzt werden kann. Das wesentliche Ziel des CoDiSP-Projektes, eine **netzverteilte, kollaborative Planungsumgebung** bereitzustellen, wurde damit erreicht. Jeder autorisierte, d.h. erfolgreich angemeldete Teilnehmer kann mit dem Planungssystem interagieren und sich dabei mit anderen aktiven oder passiven Teilnehmern via audio-visueller Kommunikation abstimmen. Die Anforderungen an die Hardware und die netztechnische Anbindung der Teilnehmerrechner wurden dabei so allgemein wie möglich definiert, um einen einfachen Zugang für alle potenziellen Teilnehmer (Kliniken, Arztpraxen, Patienten) zu gewährleisten.

Der **sichere Zugang zum Planungssystem** erfolgt über den Secure-Socket Layer (SSL) mit vor jeder Planungssitzung ausgehandelten Ports. Die geplante Nutzung eines gesicherten Zugriffs auf klinikinterne DICOM-Server scheiterte an den Sicherheitsrichtlinien der radiologischen Kliniken, sodass ein autorisierter Zugriff auf Planungsdaten lediglich über dedizierte Rechner *vor* der jeweiligen Klinik-Firewall bzw. Rechner innerhalb der Testumgebung erfolgen konnte. Der gesicherte bzw. **sichere Datentransfer** wird durch die Verwendung des Grid FTP gewährleistet. Standard-Dateizugriffe wurden dabei durch äquivalente Methoden ersetzt, die den transparenten Zugriff sowohl auf lokale als auch entfernte Dateisysteme ermöglichen. Die am ZIB entwickelten *Remote Data Access*-Erweiterungen bildeten gleichzeitig eine Erweiterung des Grid FTP-Protokolls. Aufsetzend auf dieses Datenzugriffskonzept wurde für das CoDiSP-Projekt der bestehende Import medizinischer Bilddaten im DICOM-Format auf die Grid FTP Schnittstelle angepasst, sodass sowohl der Import lokaler als auch entfernter Daten in das Planungssystem unter Zugriffskontrolle gewährleistet ist.

Für die Realisierung einer **verteilten Nutzung des Planungssystems** wurden zwei unterschiedliche Ansätze untersucht:

1. Synchronisation mehrerer verteilt laufender Instanzen des Planungssystems und Synchronisation aller Daten und Ereignisse.
2. Nutzung einer Instanz des Planungssystems und Synchronisation der Planungsansicht für alle Teilnehmer einschließlich der Bereitstellung von lokalen Steuerungsmechanismen.

Nach Implementierung und Test der erforderlichen Mechanismen fiel die Wahl auf das 2. Konzept, also der Nutzung lediglich einer Instanz des Planungssystems. Die Synchronisation mehrerer, parallel laufender Instanzen führte insbesondere in *Wide-Area* Netzwerken, aber auch in hoch ausgelasteten lokalen Netzwerken zu einer deutlichen Abhängigkeit der Interaktionsrate von der verfügbaren Bandbreite. Die anfängliche Synchronisierung aller Teilnehmer sowie

jede Neuanmeldung führte aufgrund der erforderlichen Datenreplikation zu nicht akzeptablen Wartezeiten. Ferner erfordert die Teilnahme an einer Planungssitzung die Installation der Planungssoftware auf dem jeweiligen Rechner, was dem eigentlichen Nutzungsszenario mit möglichst einfachem und schnellem Zugang widerspricht. Stattdessen wurde mit VNC eine weit verbreitete Standardlösung zur verteilten Nutzung von Rechnersystemen gewählt, die aufgrund der freien Verfügbarkeit problemlos auf die Belange der kontrollierten An- und Abmeldung von Planungsteilnehmern sowie deren Zugriffssteuerung (*view only, mouse input, full interaction*) erweitert werden konnte. Eine mögliche Steuerung und Kontrolle dieser Betriebsarten fand in den entsprechenden Entwickler- und Nutzerforen von VNC auch deutliches Interesse, sodass weiterentwickelte Lösungen mit Sicherheit zukünftiger Bestandteil von VNC sein werden.

Zur Einbindung der **Videokonferenz** in das Planungssystem wurden Module entwickelt, die es erlauben, die dynamische Planungsansicht als Videostrom via RTP über ein Multicast-Netzwerk zu exportieren. Der Videostrom kann dabei derzeit von einer Vielzahl verbreiteter RTP-Klienten (Quick Time Player, MPlayer etc.) verarbeitet und angezeigt werden, wodurch der passive Modus unter minimaler Hardwareanforderung unterstützt wird. Auf diese Art können behandelnde Ärzte partizipieren oder Planungen zu Schulungszwecken an eine beliebige Zahl von Teilnehmern in effizienter Weise exportiert werden. Beim Videoexport werden unterschiedliche Formate, wie MPEG I, II oder IV, bzw. H263 unterstützt. Die beste Performance und Qualität wurde mit RTP-tauglichen Encodern erzielt (MPEG IV, H263) Umgekehrt wurde auch die Möglichkeit geschaffen, Videokonferenzdaten direkt in das Planungssystem zu importieren und in der Planungsansicht frei positionierbar und skalierbar zu visualisieren. Auf diese Art können Teilnehmer, die über eine Videokonferenzeinrichtung verfügen, in die Planungsszene integriert werden, d.h. es ist kein zusätzlicher Monitor bzw. kein extra Fenster zur Darstellung der Konferenzteilnehmer erforderlich. Externe Teilnehmer erhalten so einen universellen Zugang zu dem Planungsgeschehen im sogenannten Demonstrationsmodus, ohne dass zusätzliche Software installiert werden muss. Für Schulungszwecke stellt ein AV-Datenstrom eine bewährte und effiziente Lösung dar.

Im Projektzeitraum wurden entwicklungsbegleitend mehr als **30 klinische Fälle** mit unterschiedlichen Kliniken bearbeitet. Dabei erfolgten sowohl netzverteilte als auch nicht-verteilte Planungen, an denen entweder die Chirurgen direkt vor Ort mitwirkten oder bei denen Befunde, Planungsanweisungen, Bild- und Textdaten sowie Zwischenergebnisse via elektronischer bzw. konventioneller Post ausgetauscht wurden. Im Vergleich zeigte sich, dass eine netzverteilte Planung in Kombination mit direkter audio-visueller Kommunikation wesentlich effizienter ist und zu deutlich kürzeren Bearbeitungszeiten führt als eine Auftragsplanung mit anschließender Präsentation der Planungsergebnisse und ggf. erforderlichen Iterationen. Noch deutlicher ist die Einsparung von Reisekosten und Zeit im Falle einer gemeinsamen, nicht-verteilten Planung. Mit dem Planungssystem können Chirurgen durch einen Planungsassistenten von den technischen Aspekten der Modellrekonstruktion befreit werden und sich ausschließlich mit den planungsrelevanten Aufgaben der Knochenschnitt- und -umstellungsplanung sowie der Bewertung der funktionellen und der resultierenden ästhetischen Ergebnisse befassen. Für die Planungsschritte, die direkt von Chirurgen durchgeführt werden sollen, wie z.B. die Knochenschnittplanung und die Knochenumstellung, wurden intuitiv nutzbare Werkzeuge entwickelt. Alle Planungsschritte können dabei von anderen Teilnehmern visuell verfolgt, bei Bedarf kommentiert und in der Ausführung zwischen aktiven Teilnehmern übergeben werden.

Im letzten Viertel der Projektlaufzeit wurden zusätzlich neue, **innovative Konzepte zur Benutzerinteraktion** untersucht. Es zeigte sich im Verlauf des Projektes, dass die Handhabung einer komplexen Planungssoftware, insbesondere in der Entwicklungsphase, nicht immer intuitiv und für den Laien unmittelbar verständlich ist. Neue Teilnehmer konnten durch die Videokonfe-

renztechnik zwar problemlos in die Benutzung eingewiesen und Fehlbedienungen von versierten Teilnehmern schnell korrigiert werden, doch für klinische Installationen sind klare und einfache Bedienkonzepte gefordert. Zu diesem Zweck wurden sowohl neue Zugangskonzepte als auch intuitive Bedienkonzepte getestet, die im GRID LAB-Projekt entwickelt wurden. Dazu gehören personalisierte, wiederbeschreibbare DATACARDS über die ein Chirurg Zugriff auf seine Planungsdaten hat und auf denen er Ansichten und Planungsschritte speichern und wieder in das Planungssystem laden kann. Die Auswahl und die Bedienung von Planungswerkzeugen, das Starten und Beenden von Videokonferenzen und die Auswahl und Positionierung von Ansichten kann über sogenannte *Tangible User Interfaces* (TUI) erfolgen. Dabei handelt es sich um physische Objekte, die Problem angepasst herkömmliche Ein- bzw. Ausgabetechniken einer grafischen Benutzerschnittstelle ersetzen. Diese lassen sich sogar miteinander kombinieren, sodass z.B. eine intuitive Zweihand-Interaktion mit den Planungsdaten bzw. dem Planungssystem möglich ist.

3.2 Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Im CoDiSP-Projekt wurden bislang keine Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen und es sind derzeit auch keine geplant. Konzepte und Algorithmen wurden in wissenschaftlichen Zeitschriften und auf Fachkonferenzen publiziert. Für die im Rahmen des GRID LAB-Projektes entwickelten Hard- und Softwarekonzepte zu intuitiven Benutzerschnittstellen ist in Ergänzung zu den bereits existierenden amerikanischen Patenten: US06164541³⁴ und US06263507³⁵ eine Patentierung geplant. Die Ergebnisse des CoDiSP-Projektes bleiben davon aber unberührt.

3.3 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Im CoDiSP-Projekt wurde eine Aufgabenstellung behandelt, die auch von besonderer wirtschaftlicher Relevanz ist. Allein an der TU München werden ca. 100 Operationen der beschriebenen Art pro Jahr durchgeführt. Fasst man alle Operationen von Patienten mit Kieferfehlstellungen und Schädelfehlbildungen zusammen, so beläuft sich deren Gesamtzahl in Deutschland auf über 100 pro Tag! Eingriffe dieser Art werden dabei nicht nur regelmäßig weltweit in jeder MKG-Klinik, sondern auch in einer Vielzahl von Praxen mit Belegarztztätigkeit durchgeführt.

Die momentane Entwicklung zeigt dabei bereits deutlich welches Potenzial in computergestützten Planungssystemen und der Operationsunterstützung steckt. Durch die Möglichkeit einer echten dreidimensionalen Planung komplexer Umstellungsosteotomien werden Operationstechniken objektivierbar bzw. modifizierbar, die bisher allein der Empirie des Operateurs vorbehalten blieben. Durch die aus der Planung resultierenden neuen Therapiemöglichkeiten ergeben sich zwangsläufig auch neue Anforderungen an das chirurgische Instrumentarium (Osteosynthesplatten, Kallusdistraktoren). Auf diesem Gebiet der Medizintechnik hat Deutschland bereits international eine Führungsrolle inne, die durch entsprechende Innovationen seitens der Medizin-Informatik weiter ausgebaut werden kann. Ein Planungssystem der beschriebenen Art, das alle für die MKG-Chirurgie wesentlichen Planungsschritte vereint, bisherige Planungsmöglichkeiten um ein Vielfaches übertrifft und diese über eine intuitive Benutzerschnittstelle einem oder auch mehreren Ärzten zugänglich macht, ist weltweit nicht verfügbar. Dem Entwicklungsstandort Deutschland könnte somit auch eine internationale Führungsrolle auf dem Gebiet der verteilten 3D Planungen in der MKG-Chirurgie zukommen. Dies würde entweder dazu führen, dass auch ausländische Patienten vermehrt eine operative Versorgung in Deutschland anstreben, wie es be-

³⁴ www.delphion.com/details?pn=US06164541...

³⁵ www.delphion.com/details?pn=US06263507...

reits durch den Einsatz von medizinischen RP-Modellen der Fall ist, oder dass sich ausländische Kliniken an einem internationalen Planungsnetzwerk beteiligen, das in Deutschland betrieben wird. Kliniken, die ein derartiges Planungssystem einsetzen bzw. sich an diesem Netzwerk beteiligen, verfügen über einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil. Dies wird umso deutlicher wenn man berücksichtigt, dass nicht an jedem Ort der Welt solche komplexen Operationen durchgeführt werden können, wodurch sich die internationale Nachfrage für eine Operation bei verbesserter Planung erhöht. Neben der Erschließung neuer Therapiewege hat eine quantifizierbare und somit exakt umsetzbare Planung auch eine deutliche Steigerung im Bereich der Qualitätssicherung medizinischer Leistungen zur Folge.

Ein entsprechendes Planungssystem ließe sich auch problemlos in anderen chirurgischen Disziplinen einsetzen, die modellierend oder umformend an knöchernen oder weichgewebigen Strukturen arbeiten (z.B. Plastische Chirurgie, HNO-Heilkunde). Es stellt somit eine Schlüsseltechnologie dar, auf der andere computerunterstützte Methoden wie z.B. „intelligente Instrumente“ und intraoperative Navigationsverfahren aufbauen. Der zukünftige Markt ist sogar noch bedeutend größer einzuschätzen. Durch die in CoDiSP durchgeführte Demonstration der erfolgreichen Anwendung einer netzbasierten verteilten Planung ist davon auszugehen, dass auch weitere medizinische Bereiche, in denen präoperative 3D Planungen durchgeführt werden, geeignet adaptierte Planungssysteme einsetzen bzw. entsprechende Planungsnetzwerke etablieren wollen. Dies sind vor allem die Bereiche der zahnärztlichen Implantologie, der Neurochirurgie, der Orthopädie sowie der Unfallchirurgie. Die in diesen Bereichen geplanten und durchgeführten operativen Eingriffe gehen jährlich in die Hunderttausende.

Fazit ist, dass viele medizinische Arbeitsplätze bis hin zum OP verstärkt als High-Tech-Arbeitsplätze zu bezeichnen sind und diese Entwicklung in allen medizinischen Bereichen kontinuierlich voranschreitet. Der Einzug der Informatik in die Medizin wird in Zukunft sogar noch deutlich ansteigen. Berücksichtigt man den zeitlichen Aufwand, der durch die Entwicklung und den Test neuer Techniken entsteht und zieht man in Betracht, dass Ärzte in ihrer Arbeit entlastet werden müssen, damit sie maximale Qualität erzielen, dann sind folgende Trends abzusehen:

- Computergestützte Planungssysteme müssen sich leicht und intuitiv bedienen lassen, damit die medizinische Aufgabenstellung für den Arzt im Vordergrund steht.
- Aufgaben der Datenaufbereitung, Modellierung und Simulation müssen in Form einer medizinisch-technischen Dienstleistung erbracht werden.

Somit könnten neue medizinische Dienstleistungsberufe entstehen, die von Kliniken oder auch niedergelassenen Ärzten in Anspruch genommen werden. Die Entwicklung und Pflege medizinischer Planungssysteme wird an wenigen Stellen gebündelt und dort effizient vorangetrieben. Ärzte nutzen diesen informationstechnischen Dienst zur optimalen Erfüllung ihrer Aufgaben.

Die kommerzielle Verfügbarkeit des Planungssystems wurde im Projektverlauf bereits von diversen Kliniken abgefragt. Oft verfügen Kliniken auch schon über die Basissoftware AMIRA zur 3D Modellrekonstruktion und sind durch Kollegen, Fachkonferenzen oder Publikationen auf die Möglichkeiten der MKG-Planung aufmerksam geworden, die sie als zusätzliches *Plugin* erwerben möchten. Für die kommerzielle Verwertung stünden zwei Optionen zur Wahl, die sich nicht gegenseitig ausschließen:

- Weiterentwicklung der Planungssoftware zu einem Produkt, dass in Kombination mit der Software AMIRA verkauft werden kann.
- Bereitstellung einer Planungsdienstleistung auf Basis des CoDiSP-Projektes.

Einen potenziellen wirtschaftlichen Verwerter stellt natürlich die Mercury Computer Systems GmbH dar (siehe 1.2.2), die das CoDiSP-Projekt durch Bereitstellung von Softwarelizenzen und Know-How unterstützt hat. Schwerpunkt der derzeitigen Entwicklung liegt allerdings noch im Bereich der bildgestützten medizinischen Diagnostik. Eine Ausdehnung auf den therapeutischen Bereich wird momentan evaluiert. Ein grundlegendes Problem für eine kommerzielle Verwertung liegt derzeit darin begründet, dass solche Planungsleistungen nicht über die Versicherungsträger abgerechnet werden können. Somit beschränkt sich diese auf Privatpatienten, die sich eine aufwändigere Planung leisten können und wollen. Sollten Planungsleistungen in Zukunft gesondert abrechenbar werden, so wie das z.B. bei der Inanspruchnahme radiologischer Leistungen der Fall ist, dann sind die vorab genannten Varianten durchaus von großem wirtschaftlichen Interesse.

3.4 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse der 3D Modellrekonstruktion, der Schnittplanung und der Weichgewebesimulation sind von grundlegender Bedeutung für jegliche Art von chirurgischer Simulation. Ein Planungssystem, das es ermöglicht, in einer komplexen Prozesskette aus medizinischen Schichtdaten ein individuelles, qualitativ hochwertiges Planungsmodell zu generieren, an dem eine interaktive und vor allem exakte 3D Planung unter Berücksichtigung der Weichgewebeverlagerung vorgenommen werden kann, ist auch für andere chirurgischen Fächer von höchstem klinischen Interesse. Mit ähnlichen Anwendungen beschäftigen sich die plastische Chirurgie, die Hals-Nasen-Ohrenheilkunde und die kosmetische Chirurgie. Die funktionelle Planung, bei der Knochenmodelle geschnitten, mobilisierte Strukturen verlagert und neu fixiert werden, ist ebenso für medizinische Anwendungen der Orthopädie oder der Neurochirurgie von Bedeutung.

3.5 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die CoDiSP-Testphase zwischen München und Berlin zeigte, dass eine transparente Nutzung eines verteilten Planungssystems über schnelle Datennetze möglich ist. Auch die Kooperation mit Basel verlief erfolgreich, wobei eine direktere und somit schnellere Kopplung des Schweizer und des Deutschen Forschungsnetzes angestrebt werden sollte. Geplant ist eine Ausweitung des Netzwerkes nach Wien und Stockholm. Der Ausbau zu einem interkontinentalen Planungssystem mit breitbandiger Kopplung wäre eine Zukunftsperspektive. Dazu wären Weiterentwicklungen, Zugangsvereinfachungen und ggf. Standardisierungen erforderlich. Vorstellbar ist auch die Nutzung der UMTS-Technologie. Auf diese Art könnten sich internationale Experten mit Standard-Kommunikationseinrichtungen an einer Planungssitzung beteiligen und z.B. Planungsvorschläge anhand von übermitteltem Bildmaterial oder kurzen Filmsequenzen abgeben bzw. diese aktiv ändern.

Wenn sich ein 3D Planungssystem der beschriebenen Art etabliert und eine Vielzahl von chirurgischen Planungen damit vorgenommen wurde, liegen Referenzdaten vor, die auch für die chirurgische Ausbildung von großer Bedeutung sind. Durch das Prinzip der kooperativen Nutzung des Planungssystems mit seinen unterschiedlichen Interaktionsmodi ist darüber auch ein klassisches Ausbildungsszenario möglich, bei dem unter der Kontrolle eines erfahrenen Chirurgen, Ärzte in ihrer Ausbildung an den vorliegenden Fällen die chirurgische Vorgehensweise trainieren (*computer based training*, CBT). Auszubildende und Ausbilder können auf diese Art sogar räumlich voneinander getrennt arbeiten. Dadurch wird es möglich, dass Experten unterschiedlicher Disziplinen und Operationstechniken einen Beitrag zur chirurgischen Ausbildung leisten, ohne am Ausbildungsort präsent sein zu müssen.

Das CoDiSP-Projekt zeigte ferner, dass Software-Infrastrukturen wie das Globus-Toolkit noch weit von den tatsächlichen Anwendungen entfernt sind. Eine einfache Integration in unterschiedliche Anwendungen auf beliebigen Hardware-Plattformen ist derzeit nicht möglich. Dies gilt insbesondere für das weit verbreitete Windows Betriebssystem von Microsoft. Hier liegt noch eine deutlicher Entwicklungsbedarf vor.

Die Simulation von Deformationsvorgängen an biologischen Geweben bietet ebenfalls noch genügend offene Fragen für die weitere Forschung. Robuste und verlässliche Simulationen an geeigneten Modellen liefern Erkenntnisse, die sich z.B. in der Biomechanik, der Orthopädie und der Unfallchirurgie für unterschiedliche Fragestellungen nutzen lassen. An der Verbesserung der mathematisch-physikalischen Weichgewebemodellierung wird am ZIB weiterhin gearbeitet. Medizinische Fragestellungen in denen eine Expertise in geometrischer, physikalischer und mathematischer Modellierung gefordert ist, wird es auch in Zukunft noch genügend geben.

3.6 Arbeiten, die zu keiner Lösung führten

Anfänglich wurde bei der Entwicklung sehr stark auf die Funktionalität des Globus-Toolkit aufgesetzt. Dabei konnte die Planungssoftware nur auf Unix Systemen (Linux, IRIX) getestet und verwendet werden, da die Globus Entwicklung für Microsoft Windows Systeme nicht forciert verfolgt wird. Eine eigene Erweiterung im Rahmen des CoDiSP-Projektes war nicht vorgesehen. Entsprechende Installationen erfolgten lediglich auf Linux Systemen in München, Basel und Berlin. Aufgrund der weiten Verbreitung von Microsoft Windows Plattformen und dem Interesse an einer möglichen Teilnahme der entsprechenden Benutzer wurde das Globus-Konzept im Projektverlauf nachrangig behandelt und zum Teil zurückgestellt.

3.7 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, wurden die im Projekt entwickelten Verfahren auf zahlreichen internationalen Fachkonferenzen präsentiert und auf chirurgischen Fachtagungen potenziellen Anwenderkreisen vorgestellt. Das CoDiSP-Konzept selbst ermöglicht es zudem neuen Teilnehmern die Leistungsfähigkeit jederzeit direkt zu demonstrieren, wobei diese Teilnehmer sofort aktiv mit ihren Planungsdaten arbeiten können. Erforderlich ist dazu lediglich die Installation von VNC bzw. für eine reine Demonstration genügt bereits die Installation eines RTP-Klienten (Media Player, Quick Time Viewer), der auf den meisten Rechnersystemen bereits installiert ist.

3.8 Einhaltung der Kosten-, und Zeitplanung

Der Budgetplan wurde eingehalten, die Projektdauer wurde auf Antrag um 3 Monate kostenneutral verlängert, da durch den Wechsel der klinischen Projektpartner von München nach Basel Maßnahmen ergriffen werden mussten, um auf den in technischer Hinsicht hervorragenden Stand in München zu gelangen. Auch mussten dazu erst die erforderlichen Kontakte, u.a. zum hiesigen Rechenzentrum geknüpft werden. Die Aufbauphase ist dabei auch nach dem Projektabschluss noch nicht beendet. Die Berufung von Dr. Sader an die Universitätsklinik in Frankfurt lässt einen weiteren Ausbau des Planungsnetzwerkes erwarten.