

Auf dem Weg zu einer “Rechner- und Sensor-gestützten Herzchirurgie”

Darstellung der Projekte H1-H4 im SFB 414

Vahl CF

Klinik für Herzchirurgie der Universität Heidelberg

1 Einleitung

Jüngere Entwicklungen innerhalb der Herzchirurgie haben dazu geführt, daß mit dem Begriff ”Rechner- und sensorgestützte Chirurgie” im Fachgebiet der Herzchirurgie heute etwas anderes assoziiert wird, als das von den Initiatoren des SFB vor etwa 8 Jahren ursprünglich Gemeinte: so geht es in den Herzprojekten nicht darum, auf dem Markt angebotene “Chirurgie-Robotersysteme” klinisch oder experimentell zu testen, es geht nicht um die Applikation minimal invasiver Techniken und nicht um die Erprobung von anderen auf dem Markt aktuellen High-Tech-Geräten wie z.B. TML (transmyocardialer Laser).

Der wissenschaftliche Beweggrund der Gründung des SFB war radikaler: es sollte geprüft werden, ob die in rascher Entwicklung befindlichen rechner- und sensorgestützten Technologien geeignet sind, im Fachgebiet der Herzchirurgie diagnostische Lücken zu schließen und therapeutische Vorgehensweisen zu optimieren. Durch gezielte Neuentwicklungen sollten diese Technologien für Patienten mit Herzerkrankungen nutzbar gemacht werden. Nach Auffassung der Initiatoren des SFB ergibt sich die Chance einer qualitativ verbesserten Herzchirurgie durch konsequente Entwicklung und Nutzung geeigneter EDV-Technologie und des schrittweisen Einbringens ingenieurwissenschaftlicher Konzepte. Notwendige Neuentwicklungen betreffen vor allem die prä- und postoperativen Diagnostik, neue Konzepte des perioperativen Managements, neue chirurgische Denkweisen (Chirurgie von innen nach außen), ein verändertes Selbstverständnis des Chirurgen und auch veränderte manuelle, haptische und konzeptionelle Fertigkeiten des Herzchirurgen. Auch das Konzept der konsequenten Individualisierung der chirurgischen Therapie (anstelle des sogenannten Routineverfahrens) gehört in diesen Kontext zu den Kernzielen des SFB.

Diesen Vorstellungen entsprechend sollten die rechner- und sensorgestützten Strategien in der Startphase des SFBs vor allem eingesetzt werden im Dienste der Entwicklung neuer Instrumente zur Diagnostik, Simulation, Therapie und Evaluation chirurgischer Eingriffe. Ganz im Vordergrund standen daher Verfahren der Bildgebung: eine dreidimensionale, vier- und höherdimensionale (additive “Dimensionen” wie Haptik, Geschwindigkeit, Richtung, Temperatur, Wassergehalt etc) Erschließung eines

individuellen Operationssitus eröffnet tatsächlich die Möglichkeit einer hochdifferenzierten, individuellen Operationsplanung. Die angestrebte vierdimensionale Visualisierung bisher unbekannter Information (vierdimensionale Strömungsprofile über intrakardiale Klappen) gibt dem Chirurgen völlig neue Ansichten und Instrumente an die Hand, die funktionellen Auswirkungen des pathomorphologischen Substrates zu verstehen, sein Handeln nicht nur präzise zu planen, sondern auch zu evaluieren. Dem wissenschaftlichen Anspruch des SFBs entsprach es, daß keine der neuen Technologien nur deshalb eingesetzt werden sollte, allein weil neue Methoden zur Verfügung standen, sondern allein, weil sie auf der Basis wissenschaftlicher Prüfung eine Verbesserung im Prozeß der Patientenversorgung erwarten läßt.

Beispielsweise erbrachte die 4-D-Strömungsvisualisierung (Projekt H1) die Möglichkeit, bei asymptomatischen (NYHA I) Patienten eine Mitralinsuffizienz quantitativ exakt zu diagnostizieren und diesen Patienten auf der Grundlage von dynamischen 4D-Bilddaten ein präzises (klappenerhaltendes) Therapieangebot zu machen. Ist es aber wirklich sinnvoll, NYHA-I Patienten, die bisher nicht operiert werden, zu operieren? Innerhalb des SFB wurden daher muskelphysiologische Untersuchungen durchgeführt, die in der Tat belegten, daß bereits bei Mitralinsuffizienzen im NYHA II Stadium erhebliche (reversible/irreversible?) Veränderungen der Myocardfunktion vorlagen. Daher schien das Konzept berechtigt, die neuen Methoden zum Nutzen des Patienten einzusetzen und eine frühzeitige Korrektur anzustreben, die einen Funktionserhalt des Herzens gewährleisten kann. Auch Gegenbeispiele sind zu nennen: trotz rechnerunterstützt gut praktikabler Visualisierung der elektrischen Erregungsausbreitung im Vorhoffmyocard (z.B.: bei chronischem Vorhofflimmern) und Simulation rhythmischirurgischer Eingriffe (H4), zeigten die begleitenden Messungen an isolierten menschlichen Muskelpräparaten von Patienten mit chronischem Vorhofflimmern, daß zum Operationszeitpunkt erhebliche Veränderungen des Kontraktionsverhaltens vorliegen, so daß durch die Wiederherstellung der elektrisch korrekten Erregungsausbreitung eine Normalisierung der Muskelmechanik nicht sicher gegeben ist. Daher muß bei dem daraus resultierendem fraglichem hämodynamischen Erfolg sorgfältig zwischen dem Machbaren und dem Risiko für den Patienten abgewogen werden. Eine signifikante Risikoverminderung durch exakte rechnerunterstützte Simulation und Planung einer chirurgischen Intervention ist wesentliches Forschungsziel innerhalb des SFB und ist eines der wesentlichen Argumente, die es gestatten, diese Verfahren auch Patienten anzubieten.

Ein aus Sicht der Herzprojekte zentraler Aspekt der Zusammenarbeit von Chirurgen mit Informatikern und Ingenieuren im SFB besteht auch darin, daß es sich um ein für einen Chirurgen höchst anspruchsvolles Gebiet handelt, das bisher nicht Teil seiner Ausbildung ist. Neben seinem klinischen Wissen muß der Chirurg lernen, die Verfahren aus der Informatik zu verstehen, zu bewerten und mit ihnen selbstständig umzugehen. Umgekehrt müssen die Informatiker und Ingenieure lernen, die häufig sehr praxisorientierten Fragestellungen der chirurgischen Basis zu verstehen und ergebnisorientierte Entwicklungsarbeit zu leisten. Die im SFB gemachte Erfahrung, daß auch chirurgische Mitarbeiter im SFB nach entsprechender Einarbeitungszeit selbstständige Beiträge zur Programmentwicklung leisten können unterstreicht den Erfolg des Gesamtkonzeptes. Nur wenn auf Dauer mit diesen Techniken vertraute und trainierte Chirurgen in den klinischen Teams platziert und integriert werden können, haben die komplexen Verfahren eine Chance, auch wirklich Bestandteil der klinischen

Arbeit zu werden. Eine neue Art von Chirurgie erfordert nicht nur neue Instrumente, sondern auch "neue Chirurgen".

Der vorliegende SFB-Antrag hat im Teilbereich Herzchirurgie zum Ziel, mit Unterstützung von Ingenieuren und Informatikern ein methodisches Instrumentarium zu entwickeln und zu evaluieren, das es in der Klinik erlaubt, sich zur Diagnostik, Evaluierung und Therapieplanung rechnerunterstützter Modelle zu bedienen und Operationen am virtuellen Modell zu simulieren (virtuelle Realität), um sie dann im nächsten Schritt mit geeigneten Instrumenten am Patienten durchzuführen.

2 H1

Im Projekt H1 wurden unter klinischen Bedingungen unterschiedliche physikalische Methoden zur Datenakquisition und 3D-Visualisierung eingesetzt und hinsichtlich ihrer Aussagekraft miteinander verglichen. Eine halbautomatische Segmentierung gestattet die Darstellung intracardialer Strukturen wie z.B. von Klappenringen, was für die chirurgische Strategie von wesentlicher Bedeutung ist. Auch die statische (enddiastolische) Darstellung der intracardialen Morphologie ist verwirklicht. Die für klinische Zwecke erreichte Programmoptimierung erlaubt heute eine für den klinischen Chirurgen praktikable zeitnahe perioperative Analyse (Echo-Analyser-System).

Innerhalb des bisherigen Antragszeitraumes waren Entwicklungen, die auf der perioperativ eingesetzten Echo(doppler)cardiographie beruhen, ein wichtiger Schwerpunkt. Die dreidimensionale Visualisierung vom Strömungsverhalten des Blutes im Herzen gelang durch eine optimierte weitgehend automatische Segmentierung. Die 3D-Visualisierung von Flußmustern gibt dem Chirurgen die entscheidende Information, die klappenerhaltende Eingriffe und intracardiale Rekonstruktionen gezielter durchführbar macht. Aus dem pathologischen Flußmuster kann der Chirurg auf die funktionelle Komponente des Klappendefektes zurückschließen und eine gezielte – nicht nur morphologische, sondern auch funktionelle - Klappenrekonstruktion durchführen. Der klinische Einsatz der Methode hat wesentlich dazu beigetragen, daß in Heidelberg auch asymptomatischen Patienten mit Mitralklappeninsuffizienz (NYHA-I Patienten) operative klappenerhaltende Korrekturoperationen angeboten werden.

Die systematische perioperative 3-D Visualisierung hat bei transplantierten Herzen das Auftreten auffälliger Störungen der Funktion der Klappen zwischen Vorhof und Kammer nach Implantation gezeigt (als Ausdruck der inkongruenten Vorhofanteile und daraus resultierender gestörter Klappengeometrie). Auf der Grundlage der Visualisierungsdaten wurde unter exakt kontrollierten Bedingungen die klinische Implantationstechnik von Spenderherzen vollständig umgestellt (bicavale, bipulmonalvenöse Implantation). Die Änderung der Operationsstrategie wird als erfolgreich eingestuft, da hämodynamisch relevante AV-Klappeninsuffizienzen danach nicht mehr gesehen worden sind (siehe auch Projekt H2: veno-atrio-ventrikuläre Kopplung).

Das Herz stellt als Weichteilorgan und als bewegtes Organ spezielle Anforderungen an Visualisierung und Segmentierung. Automatisierte Segmentierungsmethoden stehen - mit Ausnahme der Flußvisualisierung - noch nicht zur Verfügung, so daß die zuverlässige Messung und Darstellung der Veränderungen intracardialen Volumina

während eines Herzzyklus ein zentrales Forschungsziel in **H1** bleibt. Die Schwerpunkte des Projektes liegen weiterhin 1.) bei der Visualisierung und Quantifizierung intrakardialer Flüsse (Visualisierung der Strömungsdynamik), 2.) bei der dreidimensionalen Morphometrie isolierter kardialer Strukturen 3.) bei der 3D-Visualisierung bei angeborenen Herzfehlern bei Säuglingen (Miniaturisierung der Methoden) und 4.) bei der Analyse der regionalen Wandbewegung. Wesentlich scheint die Beschleunigung und Vereinfachung der Algorithmen in Anpassung an den klinischen Bedarf. Lücken, die einzelne physikalische Verfahren zur Datenakquisition haben, sollen wechselseitig geschlossen werden: so ergänzen sich z.B. bei Echoaufnahmen Dopplermethoden und MRT. Zur 4D-Darstellung des Herzens im dynamischen Modell wird von der Kombination des "tagging MRT" mit Echodaten ein wesentlicher Fortschritt bei den Visualisierungsergebnissen erwartet. Notwendig ist es hierbei, den physiologischen Bezug von Wandbewegung, Klappenbewegung und Flußmuster auch "on-line" dreidimensional zu visualisieren.

Zielvorstellung ist es, weiteren Aufschluß zu gewinnen, welcher Anteil von kardialen Funktionsstörungen durch die pathologische Flußdynamik und welcher durch myokardiale Komponenten verursacht wird. Insgesamt soll in Zusammenarbeit zwischen Klinikern, Informatikern, Physikern und Radiologen eine Verbesserung der Darstellungsqualität erreicht werden, so daß die unterschiedlichen Organsysteme des Brustkorbes (knöchernes Skelett, Lunge, Herz) so differenziert dargestellt werden können, daß eine detaillierte OP-Planung auf dem Boden bereits präoperativ verfügbarer differenzierter Information möglich ist.

Zu den Aufgaben von H1 gehörte es auch, eine geeignete Patientendatenbank weiter zu entwickeln, die eine Integration von klinischen Daten und Bilddaten gestattet. Dazu wurde die bestehende Datenbank erweitert und vollständig neu in "ORACLE" programmiert. Dieser Vorgang ist nicht abgeschlossen. Daher sind auch die in H1 entwickelten multimedialen Instrumente (virtuelle Patienten zur Eichung klinischer Datenbanken; präoperative multimediale Patientenaufklärung; "der ökonomische Patient"; operative Lehr- und Trainingsprogramme) noch nicht in das Datenbanksystem integriert. Die in der Patientendatenbank verfügbare Information wird für eine patientenspezifische, risikoadjustierte Operationsplanung verwendet.

3 H2

Die Arbeit im Projekt H1 konzentrierte sich auf die Aspekte der Flußdynamik, Volumetrie und Morphometrie des Herzens. Gegenstand von H1 ist das Herz als isoliertes Organ. Darüber hinaus wird in **H2** der Funktionszustand des vor und nachgeschalteten Kreislaufsystemes untersucht. Der nach- und vorgeschaltete Kreislauf ist wesentliche Determinante der Funktion des Herzens selbst.

Da unter klinischen Bedingungen heute nur simple Widerstandsberechnungen für das nachgeschaltete System vorliegen, die bei pulsatilem Strömung in einem System variabler Elastizität nur grobe Schätzwerte darstellen, wurde zunächst zur systematischen Analyse die Kopplung zwischen Herz und nachgeschalteten arteriellen System vervollständigt (ventrikuloarterielle Kopplung). Umfangreiche Großtierexperimente lieferten die Eingangsdaten, die zur mathematischen Modellierung des Kreislaufsystemes verwendet

worden sind. Unter kontrollierten experimentellen Bedingungen wurden dabei definierte Änderungen in diesem System vorgenommen und deren Auswirkungen gemessen und dann mathematisch modelliert. Darauf aufbauend wurde die Prädiktion physiologischer und pathophysiologischer Auswirkungen von Interventionen möglich.

Beispielhaft seien Fragen von klinischer Relevanz genannt: was passiert wenn man die physikalischen Eigenschaften der Aorta durch Implantation einer Prothese oder Versteifung der Aortenwand verändert? Wie wirken sich multiple Defibrillationen auf die Kopplung aus? Für diese Situationen liegen jetzt mathematische Modellbildungen vor, die die Wirklichkeit widerspiegeln. Der Chirurg kann also jetzt z.B. virtuelle Prothesen implantieren und die Auswirkungen auf das Kreislaufsystem unmittelbar im Modell einsehen.

Die Arbeiten zur ventrikoloarteriellen Kopplung wurden ergänzt durch Analysen der veno-atrialen-ventrikulären Kopplung, also der systematischen Analyse des dem Herzen vorgeschalteten venösen Systemes. Der Funktionszustand des venösen Systemes ist ebenfalls eine wesentliche Determinante für die Funktion des Herzens selbst. Bei inadäquatem Füllungsverhalten durch eine nicht abgestimmte Vorhofaktivität ist eine adäquate Auswurfleistung nicht gegeben und erhebliche Rhythmusstörungen können unmittelbare Folge sein. Gegenwärtig wird diskutiert, ob und in welcher Weise eine Störung des Füllungsverhaltens des Herzens (Compliance, Frank-Starling Mechanismus) entscheidend an den klinisch beobachteten Auffälligkeiten bei unterschiedlichen Herzerkrankungen beteiligt ist.

Während die Pulsatilität im arteriellen System von zentraler Bedeutung ist, ist die Pulsatilität im venösen System nicht untersucht. Auch der Einfluß von Erkrankungen der Klappen zwischen Vorhof und Ventrikel auf das Gesamtsystem ist nicht systematisch untersucht. Die Interaktion von Vorhof und Kammer wird – wie im Projekt H2 belegt – durch die Implantation einer Klappenprothese gestört: a) durch die Versteigung des Myocards zwischen Vorhof und Ventrikel und b) durch die von der physiologischen Situation abweichenden Öffnungs- und Schließungscharakteristiken einer Klappenprothese.

Auch der Sonderfall einer veno-atrio-arteriellen Kopplung bei univentrikulären Herzen (Fontanmodell) wurde untersucht. Die treibende Kraft der Lungendurchblutung ist nicht der rechte Ventrikel, sondern der Gradient zwischen venösen, pulmonalarteriellen bzw. linksatrialen Druck.

Die Auswirkungen des Klappenersatzes mittels unterschiedlicher Prothesen sind im Einzelfall nicht vorherzusagen. Hier wurden im Großtiermodell Daten gewonnen und zur Modellierung verwendet. So kann der Chirurg heute als ein Ergebnis von H2 eine virtuelle Interposition von Prothesen vornehmen und Auswirkungen von Klappeneingriffen bzw bestimmter Interventionen bei angeboren Herzfehlern modellieren. Die Forschungsarbeiten schlossen akute funktionelle Änderungen auf Vorhofseite (Vorhofflimmern als wesentliche Rhythmusstörung) ein.

Jede Klappeneingriff macht bewußt, daß auch heute – präoperativ – für einen spezifischen Patienten eine entscheidende Frage nicht geklärt ist: durch den Ersatz (die Rekonstruktion) des Ventils (Klappe) ist das Problem des Herzens nicht gelöst, da jede Veränderung der Flußdynamik auch zu Veränderungen im Bereich des Herzmuskels und der Ventrikelarchitektur und –geometrie führt (Steifigkeiten, Narben etc). Die grundsätzliche Frage: was ist reine Hämodynamik und was ist myocardiiale Funktionsstörung läßt sich präoperativ oft nicht beantworten. Jede AV-Klappenoperation

verändert die veno-atrio-ventrikuläre Kopplung. Eine jahrelang bestehende Druck- und/oder Volumenbelastung des Herzens durch einen Klappenfehler führt häufig zu teils irreversiblen Myocardschäden auf Vorhof- und Ventrikelenebene. Durch die Operation an der Herzklappe wird zwar die Druck-Fluß-Beziehung über dem Ventil in weiten Grenzen korrigiert und die Ventrikelfunktion unter muskelmechanischen Gesichtspunkten verbessert, die bestehende Myocardstruktur auf Vorhof- und Ventrikelseite jedoch nicht beeinflusst.

4 H3

Im Projekt **H3** wird die Brücke zur Robotik und Informatik geschlagen. Operationen am offenen Herzen verlangen den Einsatz der Herz-Lungen-Maschine. Die Herz-Lungen Maschine übernimmt bei Herz-Operationen die Funktion von Herz und Lunge und besteht aus Blutpumpen und einem Oxygenator (künstliche Lunge). Die Perfusionstechnik ist international auch heute noch nicht standardisiert. Entscheidend ist jedoch, daß Unterschiede zwar zwischen unterschiedlichen Zentren bestehen mögen, daß aber innerhalb einer Klinik jeder Patient auf eine annähernd gleiche Weise perfundiert wird. Die extracorporale Zirculation stellt sich daher noch heute als eine eher starre Methode dar, die die individuellen Bedürfnisse und hämodynamischen Eigenschaften von Patienten wenig berücksichtigt.

Der Einsatz der Herz-Lungen-Maschine allein kann unter den gegebenen Bedingungen für die Patienten bereits per se eine erhebliche Belastung darstellen. Eine Weiterentwicklung der gegenwärtigen Perfusionstechnik im Sinne eines intelligenten "Kreislauf-Roboters", der auf spezifische individuelle Patientenbedürfnisse reagiert, ist im Sinne einer Verminderung des Operationstraumas notwendig. Durch differenzierte Erfassung metabolischer und hämodynamischer Parameter (die in H2 erarbeitet werden) soll ein frühzeitiges Erkennen von pathophysiologischen Regulationen (Trendanalyse) möglich werden, um eine frühzeitige gezielte Korrektur durch Modulation der Perfusionstechnik und der Oxygenierung zu ermöglichen. Dabei soll die "intelligente Herz-Lungen-Maschine" den Cardiotechner keinesfalls ersetzen, sondern ihm differenzierte Handlungsvorschläge unterbreiten.

Für die Erarbeitung entsprechender Steuerungsalgorithmen wird das mathematische Kreislaufmodell aus H2 verwendet, welches in H3 den klinischen Bedürfnissen entsprechend weiterentwickelt wurde. Als erster praktischer Schritt sollte auf der Grundlage der in den anderen Herzprojekten erarbeiteten Ergebnisse ein "automatisches Kreislaufbeobachtungssystem" entwickelt und eingesetzt werden, das einen ersten Schritt für den intraoperativen Einsatz automatisierter Steuerungen der Herz-Lungen Maschine bietet. Das in H3 zur Steuerung der Herz-Lungen-Maschine entwickelte Kreislaufmodell und das in dieses Modell zu integrierende Wissen soll es gestatten, die akuten und längerzeitigen Folgen gezielter hämodynamischer Interventionen am Modell zu simulieren und abzuschätzen, um ihnen gegebenenfalls zu begegnen. In das System sollen Sensoren integriert werden. So lange keine geeigneten Sensoren (z.B. für metabolische Parameter wie intrazelluläre Elektrolyte, Sauerstoffspannungen in den unterschiedlichen Organsystemen) zur Verfügung stehen, wurde in das Modell eine "Parameterschätzung" integriert. Die Entwicklung einer adäquaten Mensch - Maschinen

Schnittstelle zwischen dem Kreislaufanalyse-System und dem klinischen Nutzer ist für die Einführung in die klinische Praxis von zentraler Bedeutung und Gegenstand von H3. Nicht nur der Kardiotechniker, sondern auch ein intelligenter "Herz-Kreislauf-Roboter", die neue HLM, beobachtet den Patienten und ist in der Lage, negative Trendentwicklungen frühzeitig zu erkennen und abzufangen.

In dem Projekt H3 wird darüber hinaus der Versuch unternommen, das innerhalb des SFB in den unterschiedlichen Herz- und Q-Projekten gewonnene Wissen zu bündeln und in ein übergeordnetes Modell zu integrieren, was den Chirurgen bei seiner Entscheidungsfindung unterstützen soll. Dieses Beobachtersystem des menschlichen Kreislaufes wird die Ergebnisse aus den bisherigen Projekten aufnehmen wobei eine fortschreitende Entwicklung des Modelles angestrebt wird, die parallel mit dem Kenntnisstand anderer Forschungsprojekte weiterschreiten wird.

5 H4

Das Herz ist ein bewegtes Organ. Die Bewegungen werden initiiert durch geregelte elektrische Abläufe im Herzmuskel, denen eine mechanische Aktivität des Herzmuskels folgt. Die häufigste Rhythmusstörung des Herzens ist das Vorhofflimmern.

Patientenspezifische, auf individuellen Meßwerten und mathematischen Modellierungen der elektrischen Erregungsausbreitungen und der Morphologie basierende Therapieverfahren für das Vorhofflimmern liegen nicht vor. Im Projekt H4 wurde erstmals der Versuch unternommen, durch bessere pathophysiologische Kenntnisse und auf der Grundlage einer patientenspezifischen Modellierung und Simulation konkrete, wirksame Therapiekonzepte für diese Erkrankung anzubieten. Hierbei stand die "individualisierte, kontrollierte, zielgerichtete und pathophysiologisch begründete Intervention" am Patienten im Vordergrund, und nicht, wer sie durchführte (Chirurg oder Kardiologe).

Durch Nutzung von Synergieeffekten gelang es tatsächlich, sowohl im komplexen Modell des isoliert schlagenden "Langendorffherzens", im Großtiermodell und am Patienten die Erregungsausbreitung z.T. gemeinsam mit der mechanischen Aktivität der Vorhöfe zu messen, zu visualisieren und Simulationen chirurgischer Interventionen durchzuführen. Die konkreten Erfolge bei dem Einsatz des Verfahrens am Patienten (und die gute Akzeptanz beim Patienten) werden kontrastiert von den ernüchternden Befunden bei der muskelphysiologischen Analyse des Vorhofmyocards von Patienten mit chronischem Vorhofflimmern. Die erhobenen muskelmechanischen und metabolischen Daten legen den Verdacht auf eine schwerwiegende Störung nahe, über deren Reversibilität noch keine Aussagen getroffen werden können. Es könnte sein, daß die Rhythmisierung, die von den Patienten subjektiv als spürbarer Erfolg erlebt wird, auf lange Sicht objektiv muskelmechanisch und hämodynamisch nicht zu den erwarteten Ergebnissen führt.

Charakteristisches Merkmal – und wesentlich für den Gesamterfolg – ist die enge Kooperation mit den anderen Gruppen innerhalb des SFB. Beispielhaft sei genannt, daß jede Neuentwicklung vor allem im zentralen Evaluationsprojekt Q2 am Großtier systematisch erprobt wurde. Der im SFB 414 eingeschlagene Weg scheint sich – im Tempo der Entwicklung der Technologie – von Jahr zu Jahr zu beschleunigen, so daß

vieles dafür spricht, daß die in Angriff genommenen Projekte nicht nur zu neuen Instrumenten, sondern auch zu einem neuen Anspruchsprofil von Chirurgen führt. Aus Sicht des Patienten ist es noch kein Fortschritt, wenn Handlungsabläufe, die auch ein Mensch mit Geschick durchführen kann, durch ein Robotersystem abgewickelt werden, das im wesentlichen auf der konzeptionellen Ebene eines Telemanipulators angesiedelt ist. Die Information, die den heute eingesetzten Robotersystemen zur Verfügung steht und die während der Intervention aufgenommen wird, ist die selbe Information, die auch konventionell operierenden Chirurgen visuell und taktil zur Verfügung steht. Wenn allerdings ein vieldimensionaler, individualisierter Patientendatensatz vorläge, der aus "gematchten" Daten (CT, MRT, Ultraschall, Temperatur, Stoffwechsel, etc) besteht und wenn auf Basis dieses Datensatzes eine Operation durchzuführen wäre, dann würde der Roboter – sinnvollerweise durch ein "tracking-System" unterstützt – zum notwendigen Instrument, um die virtuell im Datensatz bereits durchgespielte Operation unter kontrollierten Bedingungen am Patienten zu realisieren. Es könnte auch ein erheblicher Gewinn für den Patienten sein, wenn eine Minimierung des Operationstraumas durch eine robotergeführte, intelligente und patientenspezifische extrakorporale Zirkulation erreicht würde, die auch kosmetisch durch miniaturisierte Zugangswege ergänzt wird. Dieses ist der Weg, auf dem sich der SFB 414 im Moment befindet.