

Deutsches Herzzentrum München  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
KLINIKUM RECHTS DER ISAR  
(Direktor: Univ.- Prof. Dr. R. Lange)

Evaluierung und Bedeutung der Krafrückkopplung in der  
roboterunterstützten Herzchirurgie

Christian Gärtner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen  
Grades eines

Doktors der Medizin  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr. E. J. Rummeny

Prüfer der Dissertation:

1. apl. Prof. Dr. R. F. Bauernschmitt

2. Univ.-Prof. Dr. K.-L. Laugwitz

Die Dissertation wurde am 13.12.2013 bei der Technischen  
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Medizin  
am 19.11.2014 angenommen.

# Inhaltsverzeichnis

## 1. Einleitung

1.1	Grundsätze der minimalinvasiven Chirurgie.....	7
1.2	Roboter in der Medizin.....	7
1.3	Bedeutung der Krafrückkopplung.....	9

## 2. Material und Methoden

2.1	Robotersystem für endoskopische Herzchirurgie.....	11
2.1.1	Die Roboter.....	11
2.1.2	Die Instrumente.....	12
2.1.3	Die Steuerung.....	12
2.2	Evaluation der Krafrückkopplung	
2.2.1	Vorstellung der Studienteilnehmer.....	14
2.2.2	Evaluationsparameter.....	14
2.2.3	Operationsversuche.....	15
2.2.3.1	Naht eines Herzmuskelrisses.....	16
2.2.3.2	Atrialer Septumverschluss.....	16
2.2.3.3	Sehnenfadenplastik an der Mitralklappe.....	17
2.3	Statistische Auswertung.....	19

### **3. Ergebnisse**

#### 3.1 Dauer der OP-Versuche für das Nähen

3.1.1 Nähen am Cut.....	20
3.1.2 Nähen am atrialen Septumdefekt .....	22
3.1.3 Nähen am Sehnenfadenabriss am Papillarmuskel.....	24
3.1.4 Nähen am SFA an der Mitralklappe.....	25

#### 3.2 Dauer der OP-Versuche für das Knoten

3.2.1 Knoten am Cut.....	27
3.2.2 Knoten am ASD.....	29
3.2.3 Knoten am SFA.....	31

#### 3.3 Vergleich der aufgewendeten Kraft beim Nähen

3.3.1 Mediankräfte beim Nähen am Cut.....	32
3.3.2 Maximalkräfte beim Nähen am Cut.....	33
3.3.3 Mediankräfte beim Nähen am ASD.....	34
3.3.4 Maximalkräfte beim Nähen am ASD.....	35
3.3.5 Mediankräfte beim Nähen am SFA.....	36
3.3.6 Maximalkräfte beim Nähen am SFA.....	37

#### 3.4 Vergleich der aufgewendeten Kraft beim Knoten

3.4.1 Medianwerte beim Knoten am Cut.....	38
3.4.2 Maximalkraft beim Knoten am Cut.....	39
3.4.3 Mediankraft beim Knoten am ASD.....	40

3.4.4	Maximalkraft beim Knoten am ASD.....	41
3.4.5	Kraftmessung beim Knoten am SFA.....	42
3.5	Gewebeschäden.....	43
3.6	Knotenqualität.....	44
3.7	Subjektives Empfinden der Probanden	
3.7.1	Empfinden bei der Nadelübergabe.....	45
3.7.2	Empfinden beim Nähen.....	46
3.7.3	Empfinden beim Knoten.....	47
<b>4.</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>48</b>
<b>5.</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>50</b>
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>51</b>
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>52</b>
<b>8.</b>	<b>Danksagung</b> .....	<b>55</b>

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Arbeiten vor dem 3D Monitor mit 3D Brille am Roboter.....	11
Abbildung 2: Nähen eines Cuts am Schweineherzen.....	16
Abbildung 3: Nähen eines ASD Defektes am Schweineherz.....	17
Abbildung 4: Naht eines Sehnenfadenersatz an der Mitralklappe am Schweineherz.....	18
Abbildung 5: Zeiten in Sekunden beim Nähen am Cut.....	21
Abbildung 6: Zeiten in Sekunden für das Nähen am ASD.....	23
Abbildung 7: Vergleich der Nahtzeiten aller Probanden im Median.....	26
Abbildung 8: Knotenzeiten in Sekunden am Cut.....	28
Abbildung 9: Knotenzeiten in Sekunden am ASD.....	30
Abbildung 10: Vergleich der Knotenzeiten in Sekunden im Median aller Probanden.....	31
Abbildung 11: Mediankräfte beim Nähen aller Probanden im Vergleich.....	37
Abbildung 12: Vergleich der Mediankräfte beim Knoten aller Probanden.....	42
Abbildung 13: Gewebeschäden.....	43
Abbildung 14: Empfinden bei Nadelübergabe.....	45
Abbildung 25: Empfinden beim Nähen.....	46
Abbildung 36: Empfinden beim Knoten.....	47

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Zeiten für das Nähen am Cut.....	20
Tabelle 2: Zeiten für das Nähen am ASD.....	22
Tabelle 3: Zeiten für das Nähen am Papillarmuskel des SFA.....	24
Tabelle 4: Zeiten für das Nähen am SFA an der Mitralklappe.....	25
Tabelle 5: Zeiten für das Knoten am Cut.....	27
Tabelle 6: Zeiten für das Knoten am ASD.....	29
Tabelle 7: Aufgewendete Mediankräfte beim Nähen am Cut.....	32

Tabelle 8: Aufgewendete Maximalkräfte beim Nähen am Cut.....	33
Tabelle 9: Aufgewendete Mediankräfte beim Nähen am ASD.....	34
Tabelle 10: Aufgewendete Maximalkräfte beim Nähen am ASD.....	35
Tabelle 11: Aufgewendete Mediankräfte beim Nähen am SFA.....	36
Tabelle 12: Aufgewendete Maximalkräfte beim Nähen am SFA.....	37
Tabelle 13: Mediankräfte beim Knoten am Cut.....	38
Tabelle 14: Maximalkräfte beim Knoten am Cut.....	39
Tabelle 15: Mediankräfte beim Knoten am ASD.....	40
Tabelle 16: Maximalkräfte beim Knoten am ASD.....	41
Tabelle 17: Knotenqualität.....	44

## Abkürzungen:

SFA	Sehnenfadenabriss
ASD	atrialer Septumdefekt
MIC	minimal invasive Chirurgie
mm	Millimeter
kg	Kilogramm
cm	Zentimeter
OP	Operation
z.B.	zum Beispiel
sec.	Sekunden
mH	mit Haptik
oH	ohne Haptik
N	Newton

# 1. Einleitung

## 1.1 Grundsätze der minimal invasiven Chirurgie

Die Medizin, in all ihren Facetten, ist wie so viele andere Bereiche in unseren Leben vom Fortschritt der Technik geprägt. Der Fortschritt in der Technik geht mit neuen, innovativen Errungenschaften der Medizin einher. Die erste laparoskopische Operation an einem Menschen fand bereits 1910 von einem Schweden Namens Hans Christian Jacobeus statt.

Zu Beginn der 90er Jahre etablierte sich die laparoskopische (vom griechischen lapare =die Weichen, skopein= betrachten) Medizin. Zunächst wurden Gallenblasen mit dieser Methode, später auch andere komplexe Operationen im Bauchraum durchgeführt.

Der Begriff der minimal invasiven Chirurgie (MIC), welcher zu Beginn noch als Synonym zur laparoskopischen Chirurgie verwendet wurde, setzte sich mit dem Bewusstsein der Vorteile dieses Operationsverfahren immer mehr durch.

Je kleiner der Zugang ist, desto geringer die Schmerzen und umso schneller die Erholung und Mobilisation des Patienten.

Durch eine kürzere Krankenhausverweildauer können auch die Krankenhauskosten gesenkt werden, auch wenn der Einsatz neuer Technologie zu Beginn natürlich mit höheren Kosten verbunden ist (Passlick, Born and Thetter 1997).

Zu Beginn der minimal invasiven Chirurgie wurde von Kritikern eine geringere Übersichtlichkeit des Operationsfeldes, die verlängerte Operationszeit und die verzögerte Zugriffsmöglichkeit bei einer bedrohlichen Komplikation wie z. B. einer starken Blutung im Operationsfeld angeführt. Diese Ansicht wird jedoch ein erfahrener laparoskopischer Chirurg nicht teilen.

Er würde vielmehr die Aussage treffen, dass er eine bessere Übersicht hat und für die Operation in MIC-Technik weniger Zeit benötigt, als für eine konventionelle Operation (Cristalli et al. 1990).

## 1.2 Roboter in der Medizin

Roboter wurden bisher hauptsächlich in der Industrie in Fabriken eingesetzt, um die menschliche Arbeitskraft zu unterstützen. Diese Roboter waren in ihrer Größe nicht für einen herkömmlichen Operationssaal geeignet.

Durch eine stetige Weiterentwicklung der Roboter ist es in den letzten 20 Jahren gelungen, diese auch in der Medizin zu verwenden.

Das bedeutet, dass der Operateur nicht mehr direkt am Patienten arbeitet, sondern dass ein computergesteuerter Roboter dem Patient und dem Operateur zwischengeschaltet ist.

Der Chirurg behält aber zu jedem Zeitpunkt die Kontrolle. Dieses Konzept wird als Master-Slave Prinzip beschrieben (Lytle 1996). Dies hat den Vorteil, dass die Arbeit des Arztes immer in gleicher Weise präzise und automatisiert ablaufen kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich durch die Automatie der Roboter die Operationszeiten in der Theorie verkürzen und der Chirurg entlastet wird (Wei G-Q 1997).

Es ist auch möglich, dass ein erfahrener Operateur einen weniger Erfahrenen anleiten kann. Das ist auch über große Entfernungen möglich. Hier kommt ein weiterer Aspekt der Roboterchirurgie zum Tragen, die Telemedizin. Telepräsenz bedeutet, dass der Bediener in einer entfernten Umgebung anwesend ist. Das sogenannte Lindbergh Experiment, wo eine Gallenblasenoperation in Straßburg von den USA aus durchgeführt wurde, war 2001 die erste Teleoperation weltweit (Marescaux et al. 2001). Zusätzlich kann über die Telemanipulatoren der natürliche Tremor des Menschen abgeschwächt werden (Suematsu and del Nido 2004). Dadurch kann der Operateur sehr präzise arbeiten, was gerade bei der Herzchirurgie von entscheidender Bedeutung ist.

Die fehlende Präzision und damit das Feingefühl könnte einer der Gründe sein, warum die robotergestützte Chirurgie in der Herzchirurgie noch nicht die Rolle spielt, wie es in anderen Fachbereichen bereits der Fall ist. Gerade in der Herzchirurgie ist absolute Präzision notwendig, Fehler bei einer Anastomosennaht einer Herzkranzarterie können nicht toleriert werden.

Vor allem in der Bauchchirurgie gibt es bereits eine Reihe von robotergestützten Operationen. Beispiele sind, Cholezystektomie, Fundoplikatio oder eine kolorektale Resektion (Gutt et al. 2004).

1998 führte Carpentier die erste Herzoperation am Menschen durch (Carpentier et al. 1999). Ein großer Nachteil der derzeit auf dem Markt befindlichen Roboter ist das Fehlen von Krafrückkopplung.



### 1.3 Bedeutung der Krafrückkopplung

Durch die Steuerung eines Roboters verliert der Operateur den direkten Zugriff zum Operationsgebiet. Dadurch können für den Chirurgen einige Nachteile entstehen.

Eine wesentliche Einschränkung besteht vor allem in der mangelnden Wahrnehmung von visuellem und taktilem Feedback. In dieser Arbeit soll der Fokus auf der taktilen Wahrnehmung liegen.

Nach Loomis und Ledermann (Loomis 1986) werden zwischen kinästhetischer und taktiler Wahrnehmung unterschieden. Die taktile Wahrnehmung ist dabei Bestandteil der Oberflächensensibilität, die kinästhetische Wahrnehmung Bestandteil der Tiefensensibilität. Als Oberflächensensibilität bezeichnet man die Wahrnehmung von Reizen über in der Haut liegende Rezeptoren. Diese Rezeptoren werden in Mechano-, Thermo- und Schmerzrezeptoren unterteilt, mit deren Hilfe Druck, Berührung und Vibration, sowie Temperatur und Schmerz wahrgenommen werden können.

Die Tiefensensibilität umfasst die Wahrnehmung bestimmter Reize aus dem Körperinneren, diese sind Lage-, Kraft- und der Bewegungssinn.

Die kinästhetische Wahrnehmung leitet eingehende Informationen wie Muskelspannung und die Gelenkstellung im Raum zum Gehirn, woraus die taktile Wahrnehmung aus Reizung von Druck- und Temperaturrezeptoren in der Haut besteht (Afferenzen). Die verarbeiteten Informationen werden dann über absteigende Bahnen zur Steuerung der Muskelaktivität geleitet (Efferenzen).

Erst durch die feine Abstimmung aller taktilen Eindrücke ist eine präzise Positionierung der Trokare möglich. Ein weiteres Beispiel um die Bedeutung der Krafrückkopplung deutlich zu machen ist:

Möchte ein Chirurg mit Hilfe eines Instruments die Beschaffenheit eines Gewebes prüfen, so wird seine Handbewegung unterschiedlich ausfallen, je nachdem ob er erwartet, dass das zu prüfende Gewebe der Druckbelastung standhält, oder ein entstehender Gewebeschaden durch die Prüfung zu erwarten ist. Die Ausführung der Bewegung hängt von der antizipierten Feedbackkontrolle ab. Diese Überlegungen waren Inhalt vieler Studien und konnten experimentell bestätigt werden (Hoffmann 1993 S.201, ff).

Eine weitere Hypothese, welche auch in dieser Arbeit untersucht wurde, ist der Zusammenhang von aufgewendeten Kräften während der Bedienung der Eingabegeräte am Roboter beim Arbeiten mit oder ohne Krafrückkopplung. Die Hypothese war, dass beim Arbeiten mit Haptik weniger Kraft aufgebracht wird als beim Arbeiten ohne Haptik.

Dies lässt die Annahme aufkommen, dass beim Arbeiten mit Haptik das Gewebe geschont werden kann. Durch eine Schonung des Gewebes sind weniger Verletzungen beim Operieren zu erwarten. Dieses korreliert auch eng mit dem Sicherheitsaspekt der Roboter, was für eine Akzeptanz beim Patienten eine wichtige Rolle spielt (Bethea et al. 2004).

Neben dem Sicherheitsaspekt konnte auch gezeigt werden, dass durch die Kombination von visuellem und haptischen Feedback die Ermüdung des Chirurgen positiv beeinflusst wird (Vitense HS 2003).

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Robotersystem für endoskopische Herzchirurgie

#### 2.1.1 Die Roboter

In diesem System werden drei Roboter der Firma Mitsubishi verwendet. Diese gehören zu der neuesten Generation von 6-Achsen Knickarmrobotern. Sie besitzen eine absolute Wiederholgenauigkeit von ca.  $\pm 1$  mm.

Das Gewicht dieses Roboters beträgt 60kg, dadurch ist die Montage über dem Operationstisch möglich.

Eine weitere Funktion ist die Möglichkeit, die Steuerung über eine schnelle Ethernet Verbindung anzuschließen. Das ermöglicht dem Operateur die Steuerung des Systems, auch wenn er nicht vor Ort ist.

Ein weiterer Bestandteil für unsere Versuche ist eine modellbasierte, sensorlose Kollisionserkennung, so dass eine Beschädigung der Geräte vermieden werden kann.



Abbildung 1: Arbeiten vor dem 3D Monitor mit 3D Brille am Roboter, auf dem Operationstisch befindet ein Schweineherz

### 2.1.2 Die Instrumente

Bisherige Robotersysteme sind nicht in der Lage, haptische Eigenschaften zu übermitteln.

Ziel unserer Arbeit war die Erforschung der Relevanz von Force Feedback (Krafrückkopplung) bei endoskopischen Operationen.

Da es derzeit noch keine Instrumente gibt, welche die auftretenden Kräfte messen können, mussten wir bestehende Instrumente erweitern. Diese sollten in der Lage sein, feinste Kräfte, wie zum Beispiel das Spannen eines Fadens beim Nähen, zu erfassen.

Wir verwendeten hierfür endoskopische Geräte der Firma Intuitive Surgical (Da Vinci).

Diese Instrumente wurden mit Dehnmessstreifen bestückt. Diese Streifen verändern den elektrischen Widerstand, wenn sie gedehnt und damit verformt werden. Die Änderung der Querschnittsfläche  $A$  führt zu einer Änderung des spezifischen Widerstandes.

Nach einer Kalibrierung mit Normgewichten kann aus der Widerstandsänderung die an den Dehnmessstreifen anliegende Kraft bestimmt werden.

### 2.1.3 Die Steuerung

Zur Steuerung des Systems werden zwei Arbeitsplätze verwendet, zum einen die Konsole für den Arzt und zum anderen einen Rechner, auf dem die Simulationsumgebung läuft.

Über diesen Rechner kann ein Assistent das ganze System steuern und konfigurieren.

Die Konsole des Arztes besteht aus zwei Steuereinheiten und einem 3D Monitor.

Als Steuereinheiten werden zwei so genannte PHANTOM Premium-Geräte der Firma SensAble Technologies verwendet. Diese können in allen sechs Freiheitsgraden bewegt werden.

Weiter ist es möglich auf der X-, Y- und Z-Achse Kräfte anzulegen, wofür Elektromotoren verwendet werden. Der Steuerrechner wandelt die während der Operation gemessenen Kräfte in entsprechende Steuerimpulse für diese Motoren um.

Dadurch ist es dem Bediener möglich, realistische Gefühlsempfindungen über die PHANTOMS zu erlangen. Diese Elektromotoren können wahlweise ein- und ausgeschaltet werden. Dadurch ist es möglich, mit oder ohne Krafrückkopplung zu arbeiten.

Der Arbeitsbereich der Eingabegeräte liegt bei etwa  $20 \times 25 \times 40$  cm, so dass der Bediener ausreichend Spielraum hat, seine Operationsschritte durchzuführen.

Durch Fußtasten ist es möglich, die aktive Bedienung der Roboterarme zu wechseln, so dass man zum Beispiel einen Arm als Haltearm verwenden kann.

Die anderen beiden Arme, die mit chirurgischen Instrumenten versehen sind, werden direkt mit den Eingabegeräten gesteuert.

Auf dem 3D Monitor werden die Bilder von einer endoskopischen Kamera, welche in unserem Versuchsaufbau an einem Stativ befestigt sind, angezeigt.

In naher Zukunft soll aber ein vierter Roboter in dem System integriert werden, so dass die Kamera über das PHANTOM bewegt werden kann. Dadurch wird es möglich, die Kamera über eine automatische Zielsteuerung zu lenken.

## 2.2 Evaluation der Krafrückkopplung

### 2.2.1 Vorstellung der Studienteilnehmer

An dieser Studie nahmen insgesamt 30 Personen teil. 15 dieser Testpersonen waren Medizinstudenten der TU München und 15 Studienteilnehmer waren Chirurgen des Deutschen Herzzentrum in München.

Die Geschlechterverteilung lag bei 4 Frauen und 26 Männern.

4 Probanden waren Linkshänder und 26 Rechtshänder.

Die Studenten hatten keine Vorerfahrung mit einem Telemanipulator, von den Chirurgen hatten insgesamt zwei Teilnehmer Erfahrung in der Roboterchirurgie (Da Vinci).

### 2.2.2 Evaluationsparameter

Die festgelegten Zielgrößen im Rahmen der Versuchsreihe waren:

- Benötigte Zeit für das Nähen (Sekunden)
- Benötigte Zeit für das Knoten (Sekunden)
- Ausgeübte Kraft beim Nähen (Newton)
- Ausgeübte Kraft beim Knoten (Newton)
- Knotenqualität in einer Punkteskala von null bis zwei
- Verursachte Gewebeschäden
- Subjektives Empfinden der Probanden beim Arbeiten mit oder ohne Haptik

Die Zeit wurde in Sekunden gemessen, die ausgeübte Kraft in Newton.

Die Knotenqualität wurde in einer Punkteskala von null bis zwei bewertet, null=kein Knoten durchgeführt, eins=Knoten locker, zwei=Knoten fest.

Als Gewebeschaden wurden durch die PHANTOMS induzierte Gewebeaussrisse und Beschädigungen des Vorhofseptums sowie der Mitralklappe definiert.

Um das Empfinden der Studienteilnehmer in Bezug auf die Haptik zu untersuchen, mussten die Probanden, nachdem sie eine Sequenz (einmal mit Haptik und einmal ohne Haptik)

bearbeitet hatten bewerten, bei welcher der beiden Durchgänge sie ein besseres, gleiches oder schlechteres Handling der PHANTOMS haben.

Hierbei wurden 3 Teilbereiche getrennt voneinander betrachtet.

Zuerst musste das Empfinden bei der Positionierung der Nadel im Nadelhalter, dann das Handling während des Nähens und schließlich das subjektive Empfinden beim Knoten bewertet werden.

### 2.2.3 Operationsversuche

Für die Operationssimulationen wurden ausschließlich isolierte Schweineherzen von einem lokalen Schlachthaus verwendet. Diese wurden für die jeweiligen Anforderungen der OP's präpariert. Als Nahtmaterial verwendeten wir einen geflochtenen 2-0 Faden mit einer selbstschneidenden Nadel.

Bei den ersten beiden Versuchen wurden alle Teilschritte zweimal durchgeführt, einmal mit und einmal ohne Kraftrückkopplung, um Unterschiede beim Arbeiten mit der Haptik zu evaluieren. Im letzten Versuch wurde nur noch ein Knoten mit Haptik durchgeführt.

Ein Knoten beinhaltete je 3 gegenläufige Schlingen.

Um einen Lerneffekt beim Arbeiten mit dem Roboter und daraus resultierende Verfälschungen im Bezug auf die Messwerte beim Arbeiten mit oder ohne Haptik auszuschließen, wurde die Abfolge der Sequenzen zufällig festgelegt .

Den Probanden wurde vor der jeweiligen Aufgabe nicht mitgeteilt, ob sie im jeweiligen Durchgang mit oder ohne Haptik arbeiten, um eine positive oder negative Erwartungshaltung auszuschließen (Verblindung).

Vor dem ersten Versuch konnten sich alle Studienteilnehmer insgesamt fünf Minuten mit und ohne Kraftrückkopplung einen Eindruck vom System verschaffen.

Im Folgenden werden nun die drei durchgeführten OP Schritte erläutert.

### 2.2.3.1 Naht eines Herzmuskelrisses

Im ersten Versuch mussten die Teilnehmer einen künstlichen Cut an der Außenseite des Herzmuskels mit 2 Einzelnähten zunähen.

Die Nadel wurde von uns im Arbeitsbereich neben dem Cut so positioniert, dass sie vom Probanden frei greifbar war. Jetzt musste der Proband die Nadel zunächst im Greifarm positionieren, mit dem zweiten Greifarm konnte er das Muskelgewebe stabilisieren.

Anschließend setzte der jeweilige Teilnehmer die Naht und zog den Faden bis etwa Fadenmitte durch den Herzmuskel. Anschließend wurde der zweite Faden wie beschrieben durch den Cut gezogen. Nachdem beide Fäden durch den Cut gezogen worden sind, wurden die beiden Knoten durchgeführt.

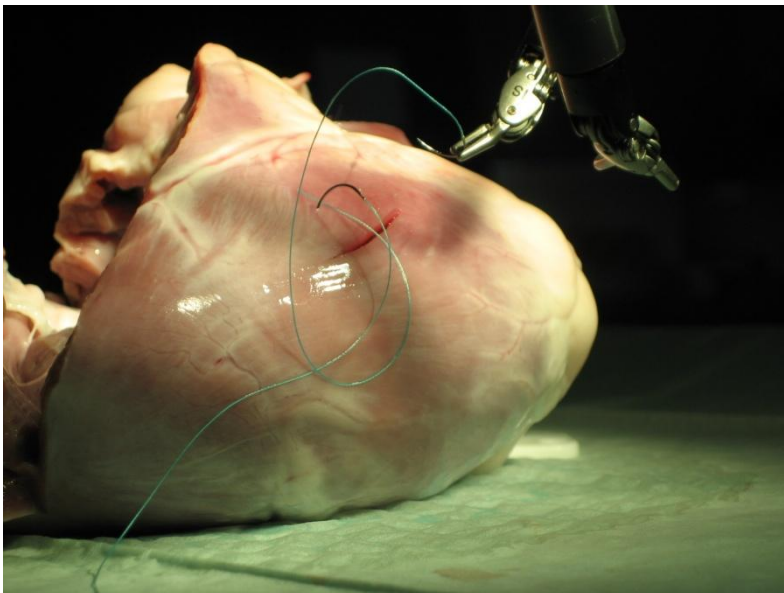


Abbildung 2: Nähen eines Cuts am Schweineherzen

### 2.2.3.2 Atrialer Septumverschluss

Für den zweiten Versuch wurde das Schweineherz an der linken Vorhofebene eröffnet und ein kleines Loch im Bereich der Fossa Ovalis präpariert.

Ziel war es wiederum, den Defekt mit zwei Nähten zu schließen.

Um bei dieser Simulation ein optimales Arbeitsumfeld zu haben, konnte hier der dritte Roboterarm als Haltearm verwendet werden. Dafür wurde zunächst der Haltearm mit dem



Eingabegerät (PHANTOM) bedient, so dass der Proband sich ein optimales Arbeitsfeld schaffen konnte, indem er das Vorhofseptum für die nachfolgende Naht aufspannte.

Anschließend wurde dieser Roboterarm in der entsprechenden Position geparkt und per Fußtasten wurden die beiden Arbeitsarme aktiviert. Der Proband konnte aber später die Stellung des Haltearms jederzeit wieder seinen Bedürfnissen anpassen.

Die Durchführung beider Nähte erfolgte analog zum ersten Versuch.

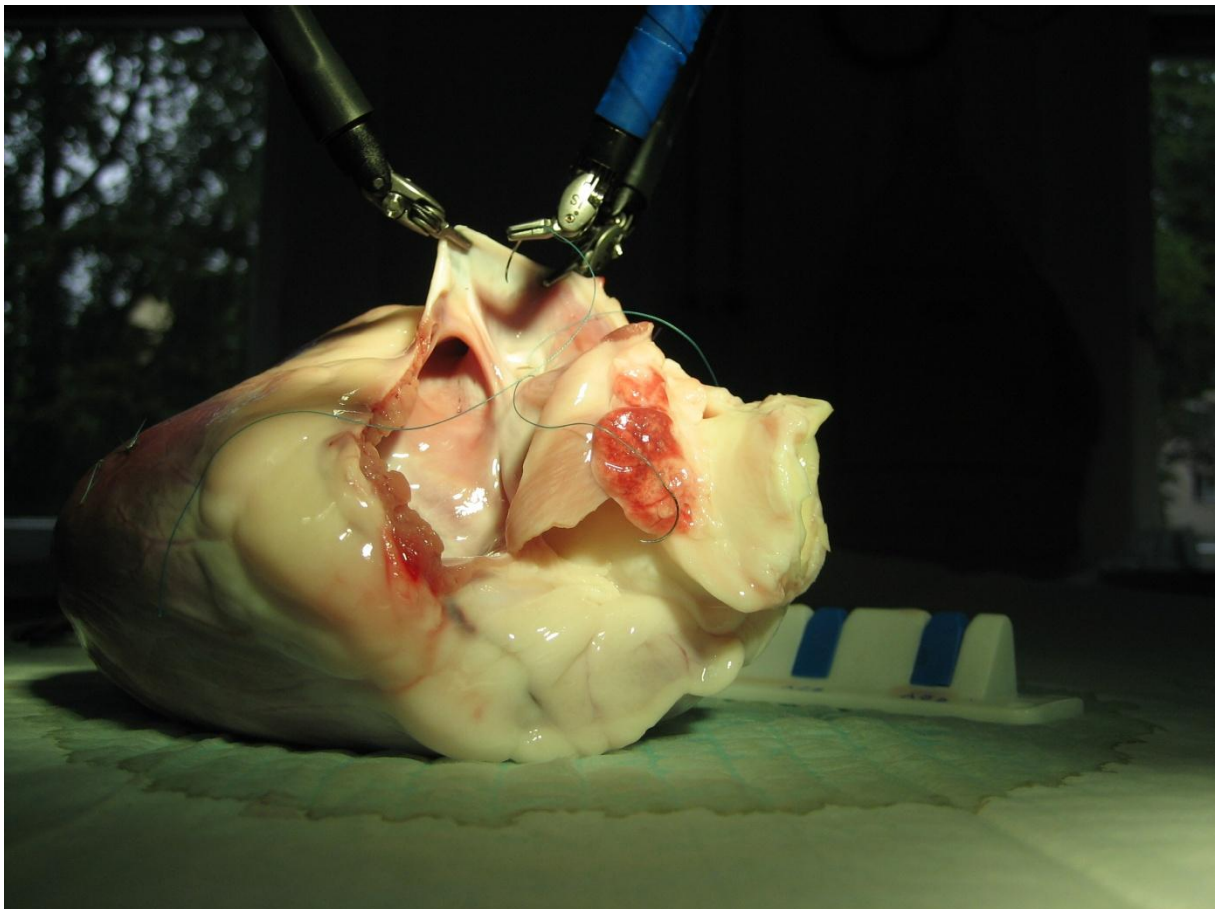


Abbildung 3: Nähen eines ASD Defektes am Schweineherz

### 2.2.3.3 Sehnenfadenplastik an der Mitralklappe

Im letzten Teil der Evaluation mussten die Probanden eine Sehnenfadenplastik an der Mitralklappe durchführen, wofür das Schweineherz auf Ventrikel Ebene geöffnet und ein Sehnenfaden vom Papillarmuskel abgetrennt wurde.

Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen wurde hier nur ein Faden verwendet, welcher aber an beiden Enden mit einer selbstschneidenden Nadel versehen war.

Zunächst wurde der Faden am Papillarmuskel fixiert, dann wurde das eine Fadenende vom Probanden aufgenommen und durch die Mitralklappe geführt. Anschließend musste noch das andere Fadenende durch die Mitralklappe gezogen werden.

Jetzt konnten die Studienteilnehmer den neuen Sehnenfaden aufspannen und mit einem Knoten kranial der Mitralklappenseite befestigen.

Auch hier bestand der Knoten wieder aus drei gegenläufigen Schlaufen.

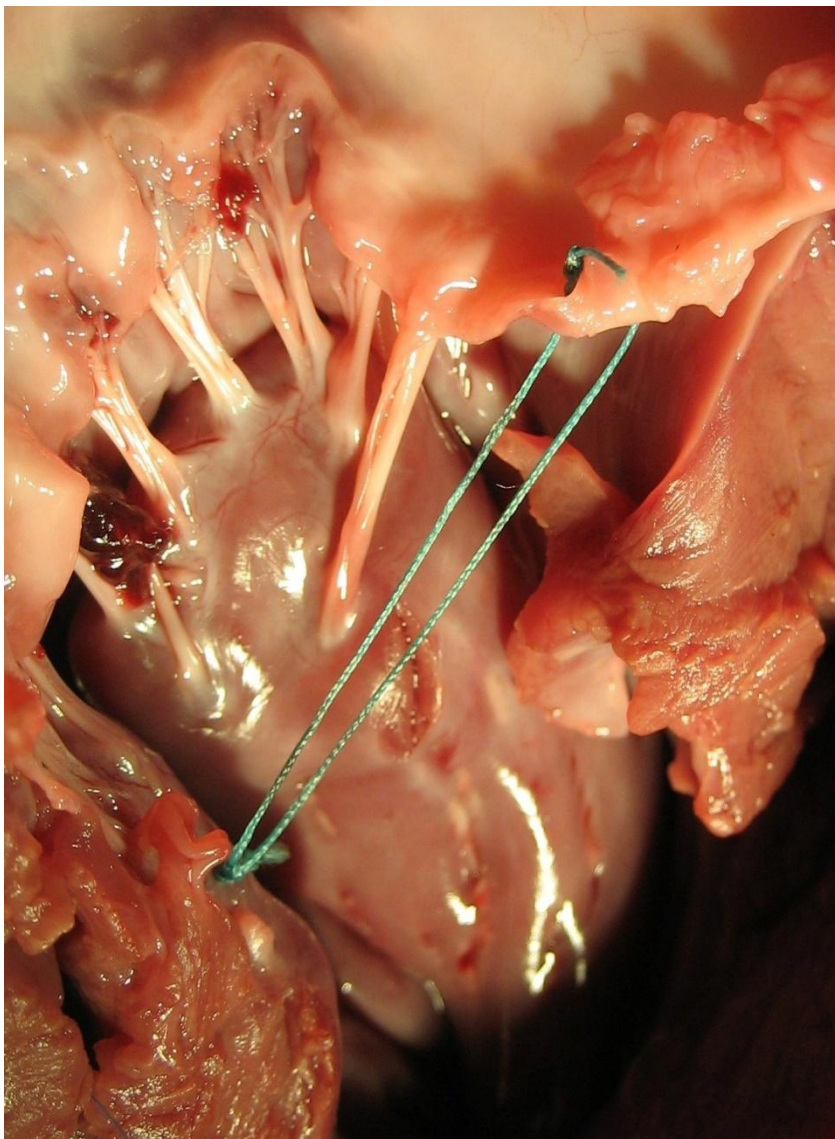


Abbildung 4: Fertige Naht eines Sehnenfadenersatz an der Mitralklappe am Schweineherz

## 2.3 Statistische Auswertung

Alle Daten wurden zunächst deskriptiv analysiert und auf fehlerhafte Eingaben wie z.B. Extremwerte und Ausreißer untersucht. Für quantitative Merkmale wurden Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet, sowie der Median und Maximalwert angegeben. Für kategoriale Daten wurden die absoluten Häufigkeiten einzelner Merkmalsausprägungen tabelliert und die entsprechenden Anteilswerte (relative Häufigkeiten) berechnet.

Um bivariate Assoziationen zwischen kategorialen Merkmalen zu prüfen, wurde der  $\chi^2$  – Test verwendet. Waren die asymptotischen Voraussetzungen für diesen Test nicht erfüllt, kam der Exakte-Test von Fisher zum Einsatz.

Es sollten zwei Untersuchungsgruppen hinsichtlich der Verteilung eines kontinuierlichen Merkmals verglichen werden. Mit Hilfe des Mann-Whitney-U Tests wurden Vergleiche vorgenommen.

Bei verbundenen Stichproben wurde der Wilcoxon-Rangsummentest verwendet, um intraindividuelle Unterschiede bezüglich quantitativer Messgrößen statistisch zu evaluieren.

Um Gruppenunterschiede bzgl. kontinuierlicher Merkmale graphisch zu veranschaulichen wurden Box-Quartil-Grafiken angefertigt. Individuelle Änderungen quantitativer Messgrößen wurden zudem in Streudiagrammen mit Referenzgeraden illustriert.

Alle statistischen Auswertungen erfolgten zu einem zweiseitigen Signifikanzniveau von 5%.

Die Auswertungen wurden mit SPSS Version 15 (SPSS Inc., Chicago, IL., USA) vorgenommen.

### **3. Ergebnisse**

#### 3.1 Dauer der OP-Versuche für das Nähen

##### 3.1.1 Nähen am Cut

Das Nähen am Cut des Schweineherzens ergab bei den Chirurgen einen Medianwert von 243 Sekunden mit Haptik und 282 Sekunden ohne Haptik, die Maximalwerte lagen bei 684 sec. mH und 627 sec. oH.

Im Vergleich dazu lag der Median bei den Studenten bei 288 sec. mH und 371 sec. oH, der Maximalwert bei 668 sec. mH und 1025 sec. oH.

Im Kollektiv betrachtet ergab sich ein Median von 255 sec. mH und 351 sec. oH, der Maximalwert ergab 684 sec. mH und 1025 sec. oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
Haptik	ja	nein	ja	nein	ja	nein
Medianwert	288	371	243	282	255	351
Maximalwert	668	1025	684	627	684	1025
Standardabweichung	172,1	269,4	173,2	174,3	169,8	231,2
P-Wert <sup>a</sup>	0,094					

**Tabelle 1: Zeiten für das Nähen am Cut (Angaben in Sekunden)**

<sup>a</sup> Vergleich aller Probanden (N=30)

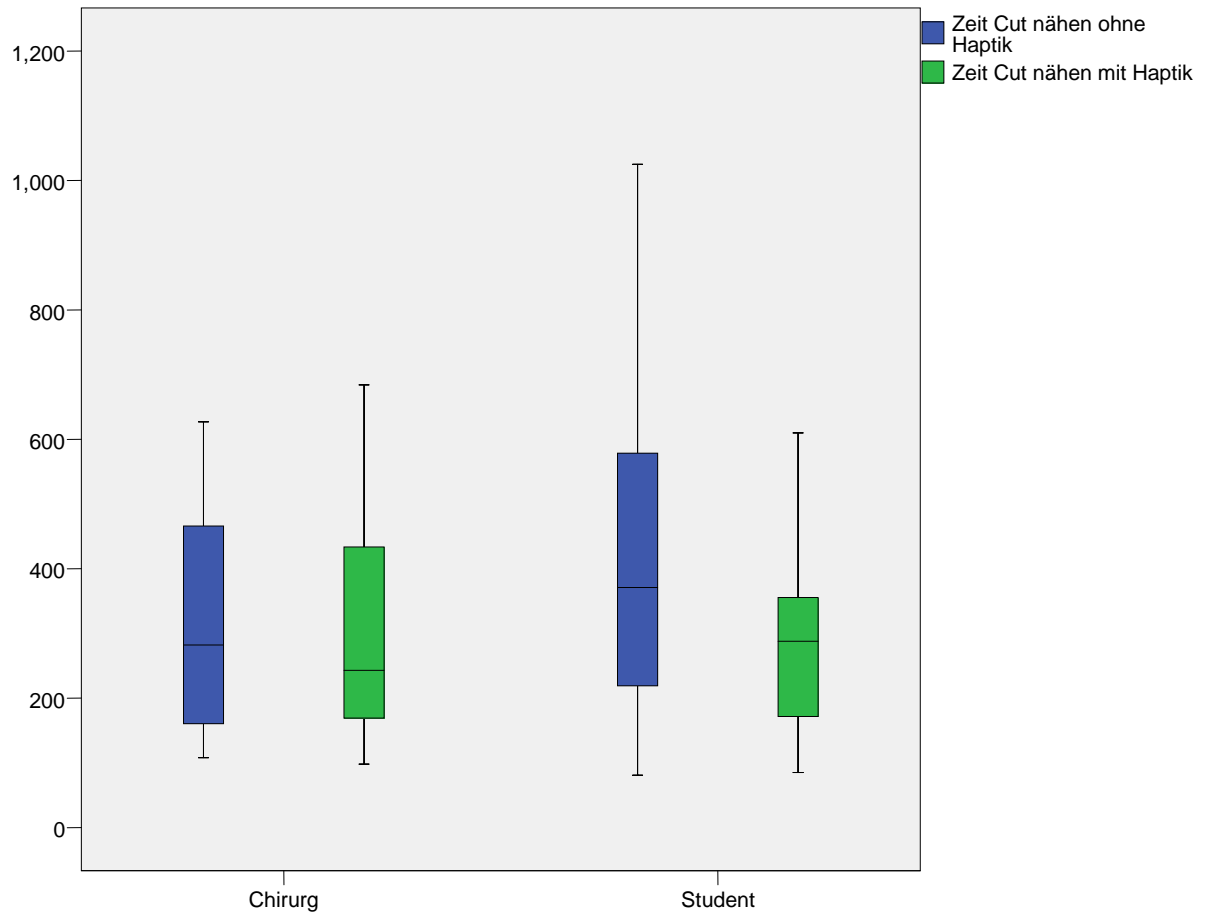


Abbildung 5: Zeiten in Sekunden beim Nähen am Cut

### 3.1.2 Nähen am ASD

Für das Nähen am ASD benötigten die Chirurgen im Median 289 sec. mH und 222 sec. oH, Maximal 799 sec. mH zu 758 sec. oH.

Die Studenten benötigten Median 272 sec. mH zu 360 sec. oH, bei einem Maximalwert von 466 sec. mH und 1032 sec. oH.

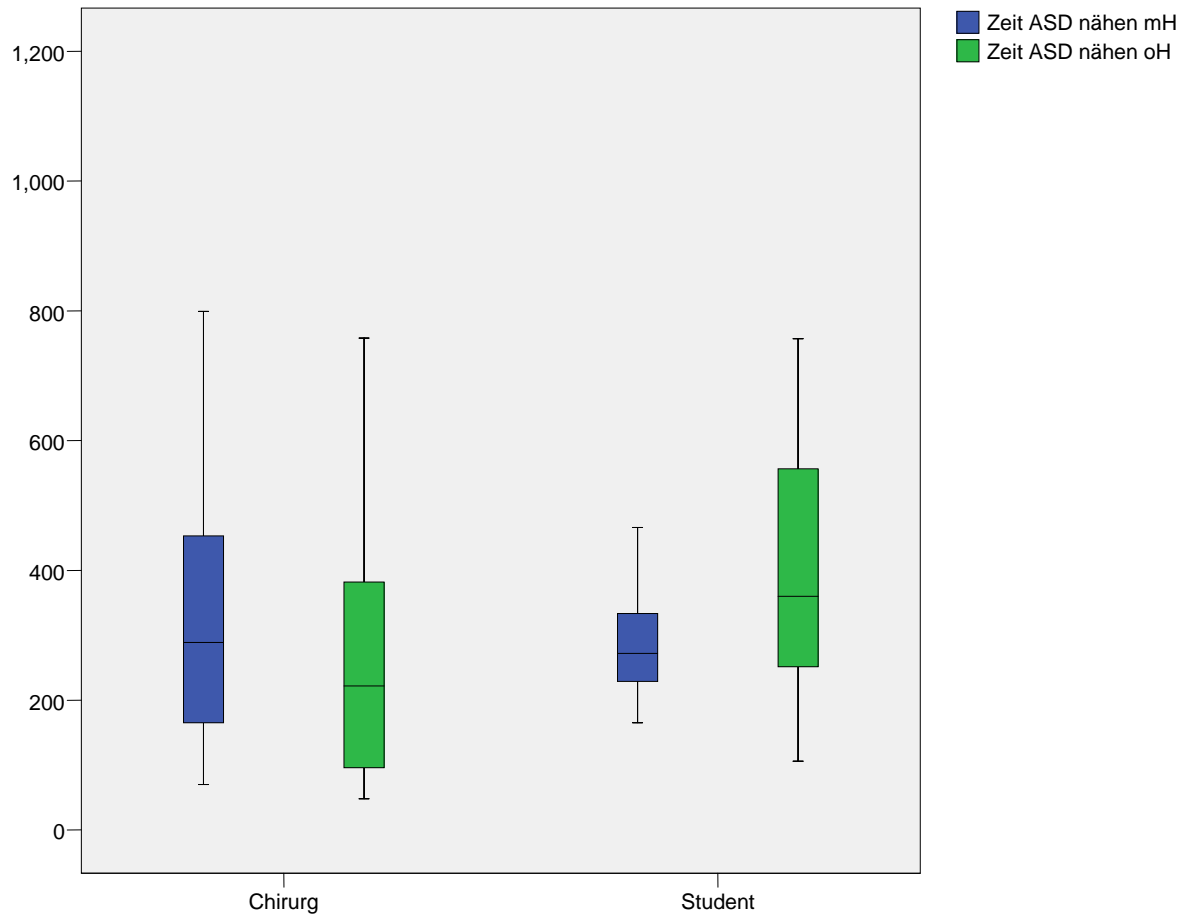
Im Kollektiv betrachtet ergab sich ein Median von 273,5 sec. mH zu 295,5 sec. oH.

Als Maximalwerte ergaben sich 799 sec. mH und 1032 sec. oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<b>Haptik</b>						
<b>Medianwert</b>	272	360	289	222	273,5	295,5
<b>Maximalwert</b>	466	1032	799	758	799	1032
<b>Standardabweichung</b>	91,4	249,7	198,9	233,1	153,1	248,7
<b>P-Wert<sup>a</sup></b>	0,39					

**Tabelle 2: Zeiten für das Nähen am ASD (Angaben in Sekunden)**

<sup>a</sup> Vergleich aller Probanden (N=30)



**Abbildung 6: Zeiten in Sekunden für das Nähen am ASD**

### 3.1.3 Nähen am SFA am Papillarmuskel

Für den Versuch Nähen am Papillarmuskel des SFA ergaben sich folgende Werte.

Die Chirurgen benötigten im Median 120 sec. mH und 115 sec. oH, Maximal 313 sec. mH zu 258 sec. oH.

Die Studenten benötigten im Median 131 sec. mH und 157 sec. oH, Maximal 669 sec. mH und 351 sec. oH

Insgesamt ergab sich ein Medianwert von 125,5 sec. mH und 132,5 sec. oH.

Maximal 669 sec. mH und 351 sec. oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
Haptik	ja	nein	ja	nein	ja	nein
Medianwert	131	157	120	115	125,5	132,5
Maximalwert	669	351	313	258	669	351
Standardabweichung	152,2	98,9	81,7	60,8	120	83
P-Wert <sup>a</sup>	0,465					

Tabelle 3: Zeiten für das Nähen am Papillarmuskel des SFA (Angaben in Sekunden)

<sup>a</sup> Vergleich aller Probanden (N=30)



### 3.1.4 Nähen am SFA an der Mitralklappe

Das Nähen an der Mitralklappe ergab folgende Ergebnisse.

Die Chirurgen benötigten Median 144 sec. mH und 133 sec. oH, Maximal 345 sec. mH und 745 sec. oH.

Bei der Studentengruppe ergaben sich folgende Werte. Medianwert von 165 sec. mH und 272 sec. oH,

Maximal 702 sec. mH zu 607 sec. oH.

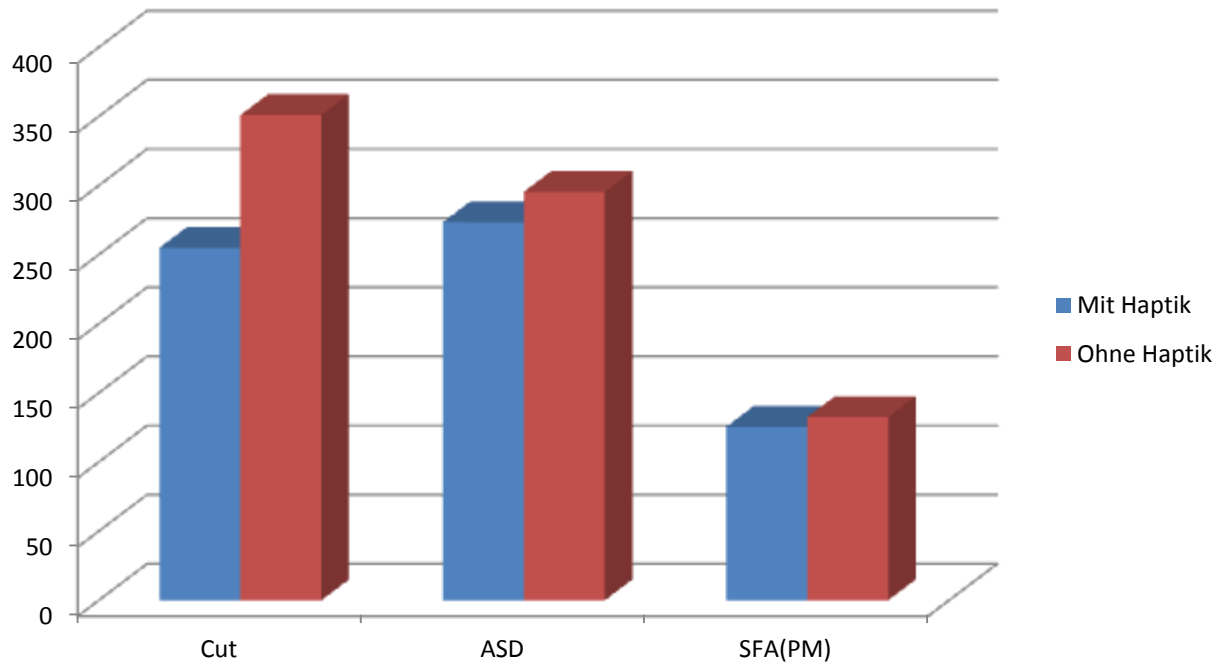
Gesamt ergab sich ein Median von 157,5 sec. mH und 192 sec. oH, der Maximalwert lag bei 702 sec. mH

zu 745 sec. oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
<b>Haptik</b>	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<b>Medianwert</b>	165	272	144	133	157,5	192
<b>Maximalwert</b>	702	607	345	745	702	745
<b>Standardabweichung</b>	168,3	180	79,8	180	182,6	237,1
<b>P-Wert<sup>a</sup></b>	0,314					

Tabelle 4: Zeiten für das Nähen am SFA an der Mitralklappe (Angaben in Sekunden)

<sup>a</sup> Vergleich aller Probanden (N=30)



**Abbildung 7: Vergleich der Nahtzeiten (sec.) aller Probanden im Median**

## 3.2 Dauer der OP- Versuche für das Knoten

### 3.2.1 Knoten am Cut

Die Chirurgen benötigten Median 241 sec. mH und 240 sec. oH, Maximal 827 sec. mH und 379 sec. oH.

Die Studenten benötigten Median 250 sec. mH und 184 sec. oH, Maximal 622 sec. mH zu 465 sec. oH.

Das Kollektiv benötigte Median 245,5 sec. mH und 194,5 sec. oH, Maximal 827 sec. mH und 465 sec. oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
<b>Haptik</b>	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<b>Medianwert</b>	250	184	241	240	245,5	194,5
<b>Maximalwert</b>	622	465	827	379	827	465
<b>Standardabweichung</b>	152,5	92,2	191	73,1	170,3	84
<b>P-Wert<sup>a</sup></b>	0,1					

Tabelle 5: Zeiten für das Knoten am Cut (Angaben in Sekunden)

<sup>a</sup> Vergleich aller Probanden (N=30)

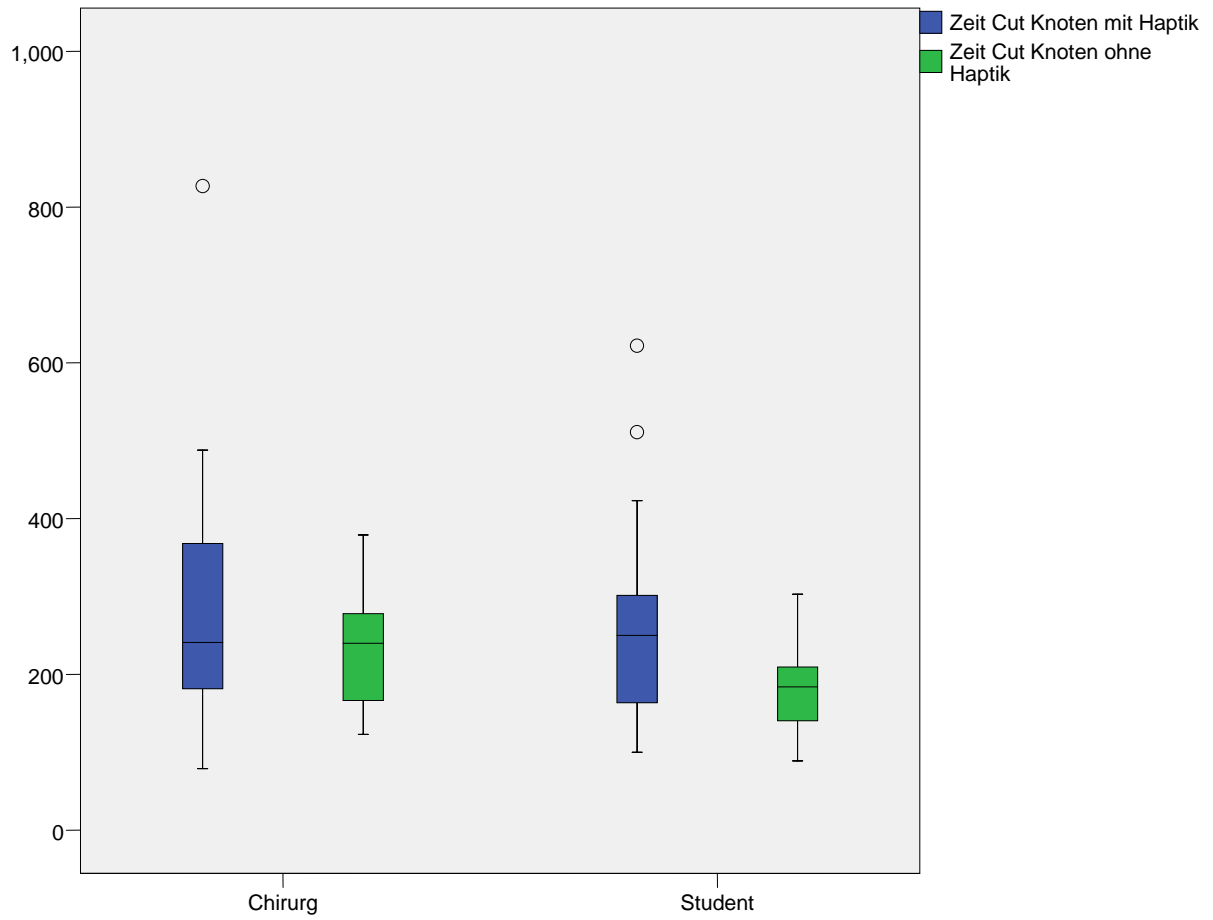


Abbildung 8: Knotenzeiten in Sekunden am Cut

### 3.2.2 Knoten am atrialen Septumdefekt

Die Chirurgen benötigten Median 179 sec. mH und 210 sec. oH, Maximal 475 sec. mH und 367 sec. oH.

Die Studenten benötigten Median 215 sec. mH und 164 sec. oH, Maximal 345 sec. mH zu 264 sec. oH.

Gesamt betrachtet ergab sich ein Median von 193,5 sec. mH und 178 sec. oH, ein Maximalwert von 475 sec. mH zu 367 sec. oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
Haptik	ja	nein	Ja	nein	ja	nein
Medianwert	215	164	179	210	193,5	178
Maximalwert	345	264	475	367	475	367
Standardabweichung	75,4	48	114,5	74,7	95,3	65,2
P-Wert <sup>a</sup>	0,156					

**Tabelle 6: Zeiten für das Knoten am ASD (Angaben in Sekunden)**

<sup>a</sup> Vergleich aller Probanden (N=30)

Die Probanden benötigten zwar im Median geringer Zeiten für die Durchführung der einzelnen Testreihen beim Arbeiten mit Haptik, eine statistische Signifikanz konnte allerdings nicht nachgewiesen. Nur bei der Durchführung der Knoten mit Haptik war überall die mediane Arbeitszeit höher als ohne Haptik.

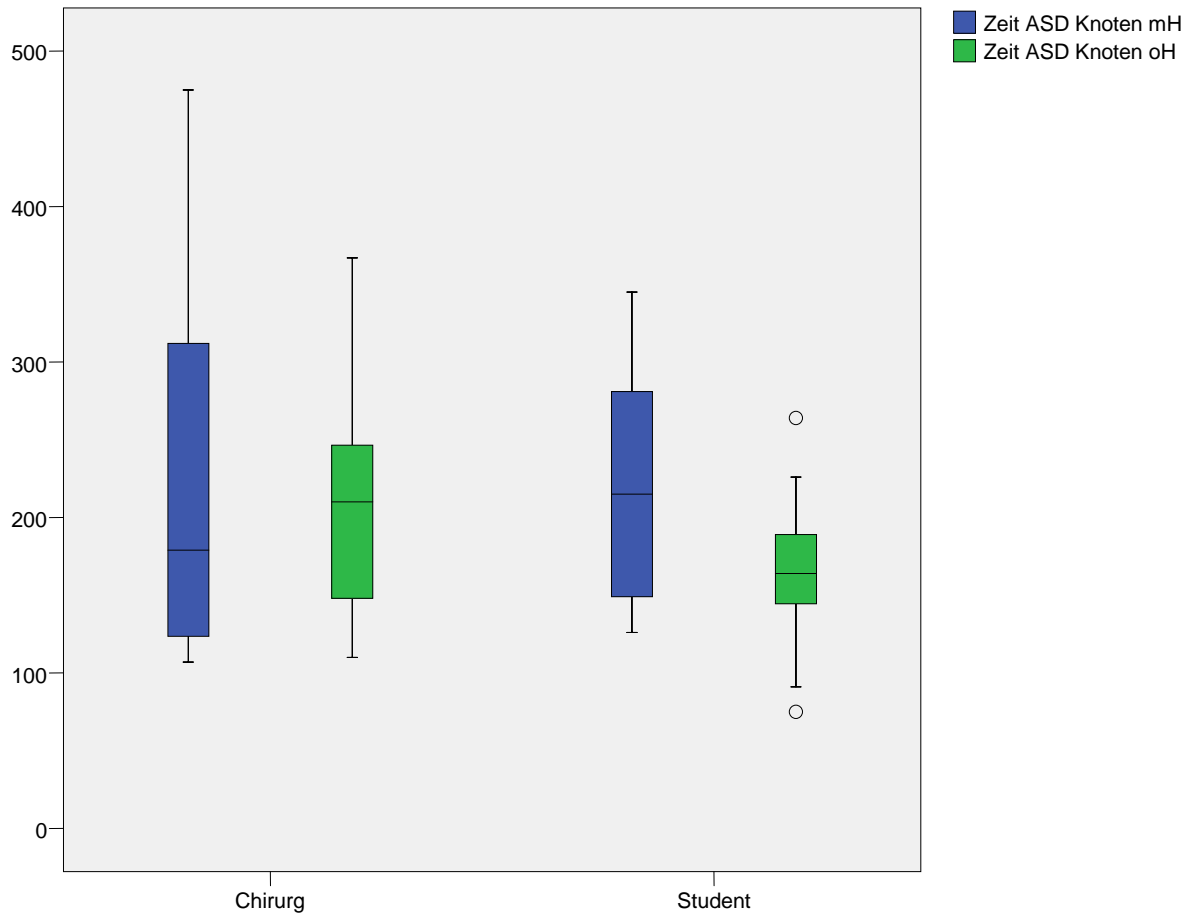


Abbildung 9: Knotenzeiten in Sekunden am ASD

### 3.2.3 Knoten am SFA

Für das Knoten am SFA konnte kein Vergleich der Zeiten erfolgen, da hier nur ein Knoten durchzuführen war.

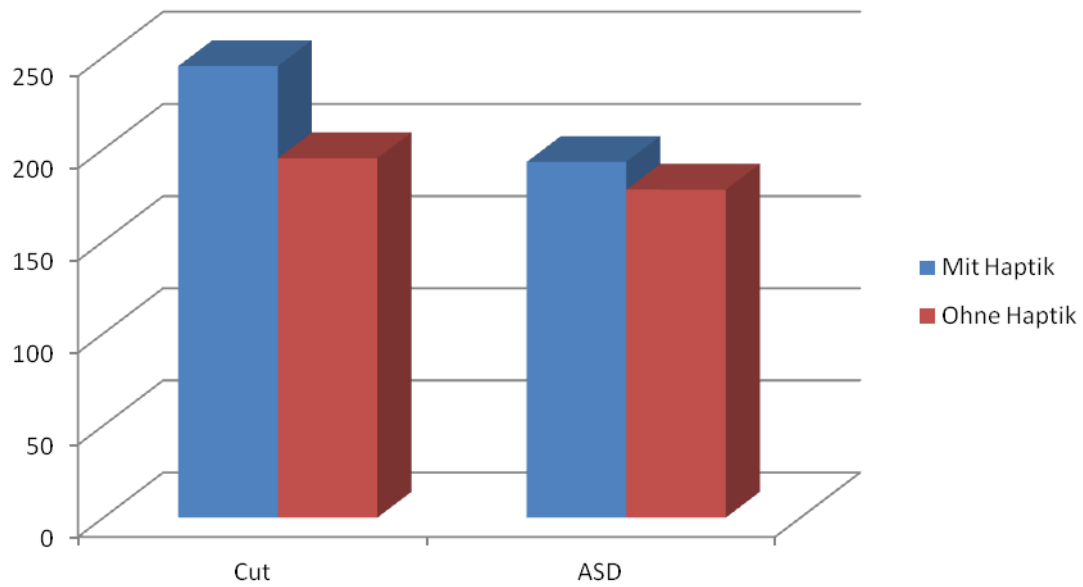


Abbildung 10: Vergleich der Knotenzeiten in Sekunden im Median aller Probanden

### 3.3 Vergleich der aufgewendeten Kräfte beim Nähen

#### 3.3.1 Mediankräfte beim Nähen am Cut

Die Chirurgen brachten eine mediane Kraft von 0,25N mH und 0,28N oH auf, die Maximalwerte lagen bei 0,39N mH und 0,48N oH.

Die Studenten brachten eine mediane Kraft von 0,21N mH und 0,26N oH, Maximal 0,35N mH und 0,46N oH auf.

Insgesamt betrachtet lag der Median bei 0,24N mH zu 0,26N oH, der Maximalwert bei 0,39N mH zu 0,48N oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
<b>Haptik</b>	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<b>Medianwert</b>	0,21	0,26	0,25	0,28	0,24	0,26
<b>Maximalwert</b>	0,35	0,46	0,39	0,48	0,39	0,48
<b>Standardabweichung</b>	0,07	0,08	0,09	0,10	0,08	0,09
<b>P-Wert<sup>b</sup></b>	0,078		0,10		0,018	

**Tabelle 7: Aufgewendete Mediankräfte beim Nähen am Cut (Angaben in Newton)**

<sup>b</sup>Vergleich Haptik ja vs. nein



### 3.3.2 Maximalkräfte beim Nähen am Cut

Die Maximalkräfte lagen bei den Chirurgen im Median bei 2,04N mH und 3,09N oH, der Maximalwert lag bei 6,52N mH und 6,34N oH.

Die Studenten lagen im Median bei 1,72N mH und 3,41N oH, ihr Maximalwert lag bei 5,79N mH und 6,46N oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<b>Haptik</b>						
<b>Medianwert</b>	1,72	3,41	2,04	3,09	1,83	3,10
<b>Maximalwert</b>	5,79	6,46	6,52	6,34	6,52	6,46
<b>Standardabweichung</b>	1,49	1,71	1,46	1,77	1,46	1,71
<b>P-Wert<sup>b</sup></b>	0,061		0,069		0,01	

**Tabelle 8: Aufgewendete Maximalkräfte(N) beim Nähen am Cut**

<sup>b</sup> Vergleich Haptik ja vs. nein

### 3.3.3 Mediankräfte beim Nähen am ASD

Die Chirurgen wendeten einen Medianwert von 0,27N mH und 0,24N oH auf. Der Maximalwert lag hier bei 0,41N mH und 0,31N oH.

Die Studenten wiesen folgende Werte auf. Medianwert 0,25N mH und 0,27N oH, Maximalwert 0,45N mH und 0,38N oH.

Im Vergleich aller Probanden ergab sich ein Median von 0,26N sowohl mit als auch ohne Haptik. Der Maximalwert lag bei 0,08N mH und 0,06N oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
Haptik	Ja	nein	ja	nein	ja	nein
Medianwert	0,25	0,27	0,27	0,24	0,26	0,26
Maximalwert	0,45	0,38	0,41	0,31	0,45	0,38
Standardabweichung	0,07	0,06	0,09	0,06	0,08	0,06
P-Wert <sup>b</sup>	0,629		0,078		0,118	

**Tabelle 9: Aufgewendete Mediankräfte(N) beim Nähen am ASD**

<sup>b</sup> Vergleich Haptik ja vs. nein

### 3.3.4 Maximalkräfte beim Nähen am ASD

Hier lagen die Maximalkräfte im Median bei 1,73N mH und 3,24N oH, die Maximalwerte bei 5,90N mH und 5,93N oH für die Chirurgen.

Die Studenten zeigten im Median Maximalkräfte von 1,54N mH und 2,53N oH, bei Maximalwerten von 3,30N mH und 3,98N oH.

	<i>Student (n=15)</i>		<i>Chirurg (n=15)</i>		<i>Gesamt (n=30)</i>	
<b>Haptik</b>	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<b>Medianwert</b>	1,54	2,53	1,73	3,24	1,65	2,83
<b>Maximalwert</b>	3,30	3,98	5,90	5,93	5,90	5,93
<b>Standardabweichung</b>	0,90	0,93	1,32	1,51	1,13	1,33
<b>P-Wert<sup>b</sup></b>	0,009		0,002		<0,0001	

**Tabelle 30: Aufgewendete Maximalkräfte(N) beim Nähen am ASD**

<sup>b</sup> Vergleich Haptik ja vs. nein

### 3.3.5 Mediankräfte beim Nähen am SFA

Hier lag der Medianwert bei den Chirurgen bei 0,31N mH und 0,34N oH, der Maximalwert bei 0,48N mH zu 0,76N oH.

Die Studenten erzielten Werte im Median von 0,27N mH und 0,29N oH, Maximal 0,55N mH und 0,60N oH.

Insgesamt lag der Median bei 0,28N mH und 0,33N oH, der Maximalwert bei 0,55N mH und 0,76N oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<b>Haptik</b>						
<b>Medianwert</b>	0,27	0,29	0,31	0,34	0,28	0,33
<b>Maximalwert</b>	0,55	0,60	0,48	0,76	0,55	0,76
<b>Standardabweichung</b>	0,10	0,10	0,09	0,14	0,09	0,13
<b>P-Wert<sup>b</sup></b>	0,281		0,005		0,004	

**Tabelle 11: Aufgewendete Mediankräfte(N) beim Nähen am SFA**

<sup>b</sup> Vergleich Haptik ja vs. nein

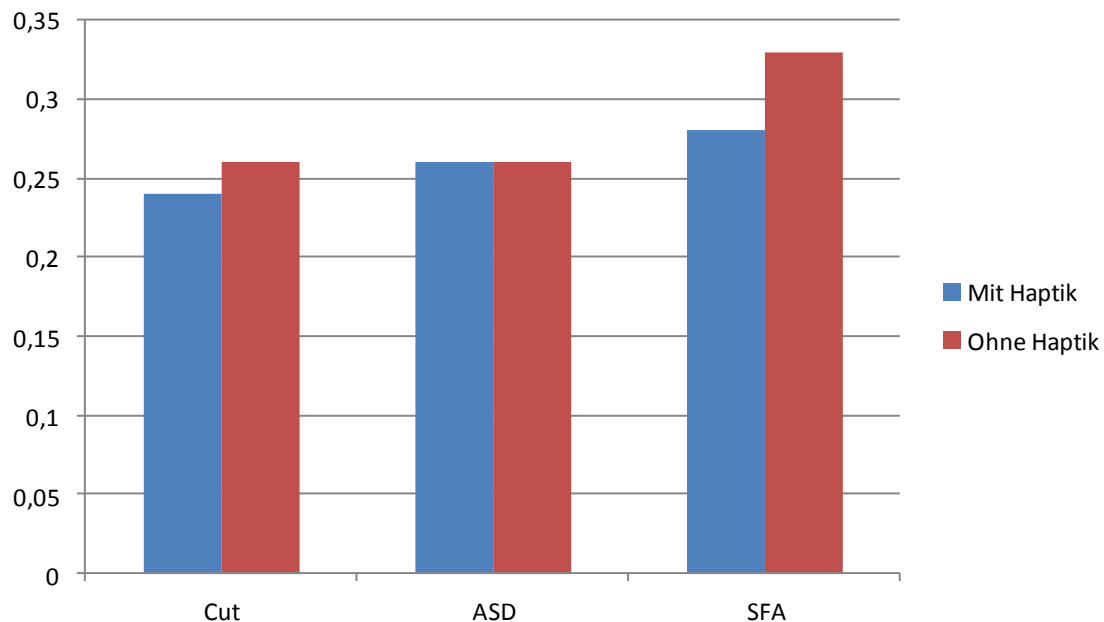
### 3.3.6 Maximalkräfte beim Nähen am SFA

Die Maximalkraft bei den Chirurgen lag bei 1,88N mH und 3,94N oH im Median, Maximal bei 4,60N mH und 7,09N oH. Die Studenten erzielten im Median 2,20N mH und 3,10N oH. Der Maximalwert betrug 3,60N mH und 6,76N oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<b>Haptik</b>						
<b>Medianwert</b>	2,20	3,10	1,88	3,94	2,07	3,31
<b>Maximalwert</b>	3,60	6,76	4,6	7,09	4,60	7,09
<b>Standardabweichung</b>	0,75	1,36	1,00	1,57	0,87	1,46
<b>P-Wert<sup>b</sup></b>	0,003		0,001		<0,001	

**Tabelle 14: Aufgewendete Maximalkräfte(N) beim Nähen am SFA**

<sup>b</sup> Vergleich Haptik ja vs. nein



**Abbildung 11: Mediankräfte(N) beim Nähen aller Probanden im Vergleich**

### 3.4 Vergleich der aufgewendeten Kraft beim Knoten

#### 3.4.1 Medianwerte beim Knoten am Cut

Der Medianwert bei den Chirurgen lag bei 0,48N mH und 0,41N oH, der Maximalwert bei 1,27N mH und 2,10N oH. Die Studenten lagen im Median bei 0,38N mH zu 0,48N oH und Maximal bei 0,99N mH zu 1,70N oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
<b>Haptik</b>	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<b>Medianwert</b>	0,38	0,48	0,48	0,41	0,38	0,47
<b>Maximalwert</b>	0,99	1,70	1,27	2,10	1,27	2,10
<b>Standardabweichung</b>	0,20	0,40	0,37	0,72	0,30	0,58
<b>P-Wert<sup>b</sup></b>	0,008		0,088		0,004	

Tabelle 13: Mediankräfte(N) beim Knoten am Cut

<sup>b</sup> Vergleich Haptik ja vs. nein

### 3.4.2 Maximalkräfte beim Knoten am Cut

Für die Chirurgen lag der Median bei 1,32N mH und 2,81N oH. Der Maximalwert war 3,05N mH und

5,06N oH. Die Studenten lagen im Median bei 1,56N mH und 2,12N oH. Ihr Maximalwert war 3,03N mH und 5,70N oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
Haptik	ja	nein	ja	nein	ja	nein
Medianwert	1,56	2,12	1,32	2,81	1,47	2,34
Maximalwert	3,03	5,70	3,05	5,06	3,05	5,70
Standardabweichung	0,75	1,40	0,58	1,28	0,66	1,33
P-Wert <sup>b</sup>	0,02		0,008		<0,001	

Tabelle 14: Maximalkräfte(N) beim Knoten am Cut

<sup>b</sup> Vergleich Haptik ja vs. nein

### 3.4.3 Mediankräfte beim Knoten am ASD

Die Chirurgen zeigten hier einen Median von 0,20N mH bzw. 0,32N oH und Maximal 1,04N mH bzw. 1,88N oH auf.

Die Studenten lagen bei 0,28N mH und 0,34N oH im Median und Maximal bei 0,56N mH und 0,98N oH.

	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
Haptik	ja	nein	ja	nein	ja	Nein
Medianwert	0,28	0,34	0,20	0,32	0,26	0,32
Maximalwert	0,56	0,98	1,04	1,88	1,04	1,88
Standardabweichung	0,17	0,22	0,34	0,43	0,22	0,33
P-Wert <sup>b</sup>	0,022		0,348		0,037	

**Tabelle 15: Mediankräfte(N) beim Knoten am ASD**

<sup>b</sup> Vergleich Haptik ja vs. nein



### 3.4.4 Maximalkräfte beim Knoten am ASD

Bei dem letzten Vergleich der ausgeführten Kräfte zeigte sich bei den Chirurgen ein Median von 1,48N mH und 2,32N oH, Maximal lag ihr Wert bei 2,43N mH und 5,40N oH.

Die Studenten benötigten 0,91N mH und 1,93N oH im Median und Maximal 3,92N mH bzw. 3,10 N oH.

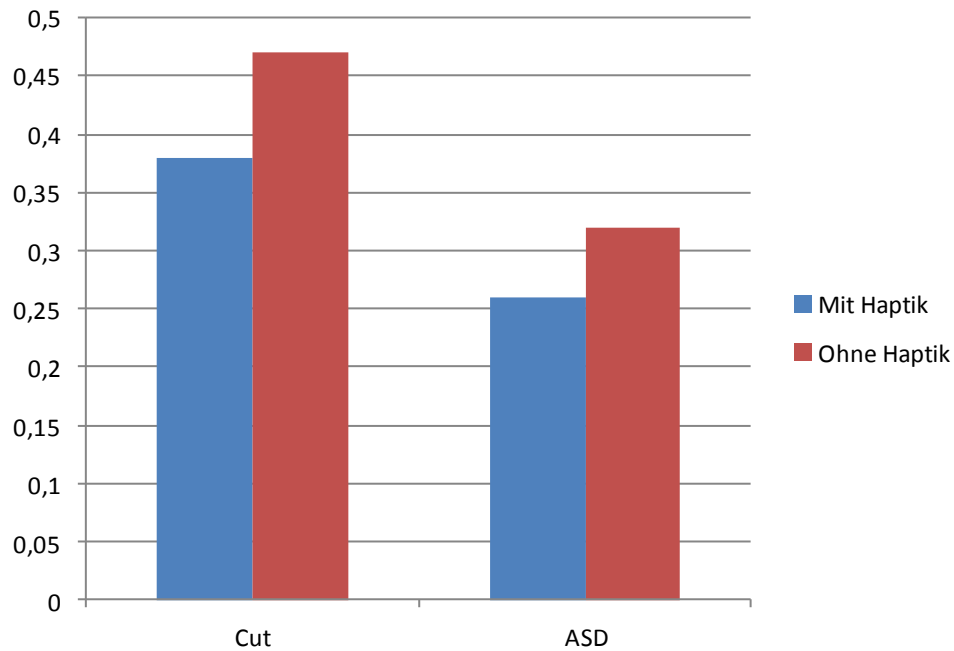
	Student (n=15)		Chirurg (n=15)		Gesamt (n=30)	
Haptik	ja	nein	ja	nein	ja	nein
Medianwert	0,91	1,93	1,48	2,32	1,28	2,12
Maximalwert	3,92	3,1	2,43	5,40	3,92	5,40
Standardabweichung	0,86	0,69	0,51	1,25	0,71	1,03
P-Wert <sup>b</sup>	0,009		0,008		<0,001	

Tabelle 16: Maximalkräfte(N) beim Knoten am ASD

<sup>b</sup> Vergleich Haptik ja vs. nein

### 3.4.5 Vergleich der Kraft beim Knoten am SFA

Hier konnte kein Vergleich beim Knoten ausgewertet werden, da bei der OP am SFA nur ein Knoten durchzuführen war und somit kein Vergleich stattfinden konnte.



**Abbildung 12: Vergleich der Mediankräfte(N) beim Knoten aller Probanden**

### 3.5 Gewebeschäden

Während der 3 Operationssimulationen wurden die von den Probanden verursachten Gewebeschäden gezählt. Während die Probanden beim Arbeiten mit eingeschalteter Haptik 3 Gewebsverletzungen induzierten, lag diese Zahl beim Arbeiten ohne Haptik bei insgesamt 10 (N=30). Hier lag ein signifikanter Unterschied von  $P=0,028$  vor.

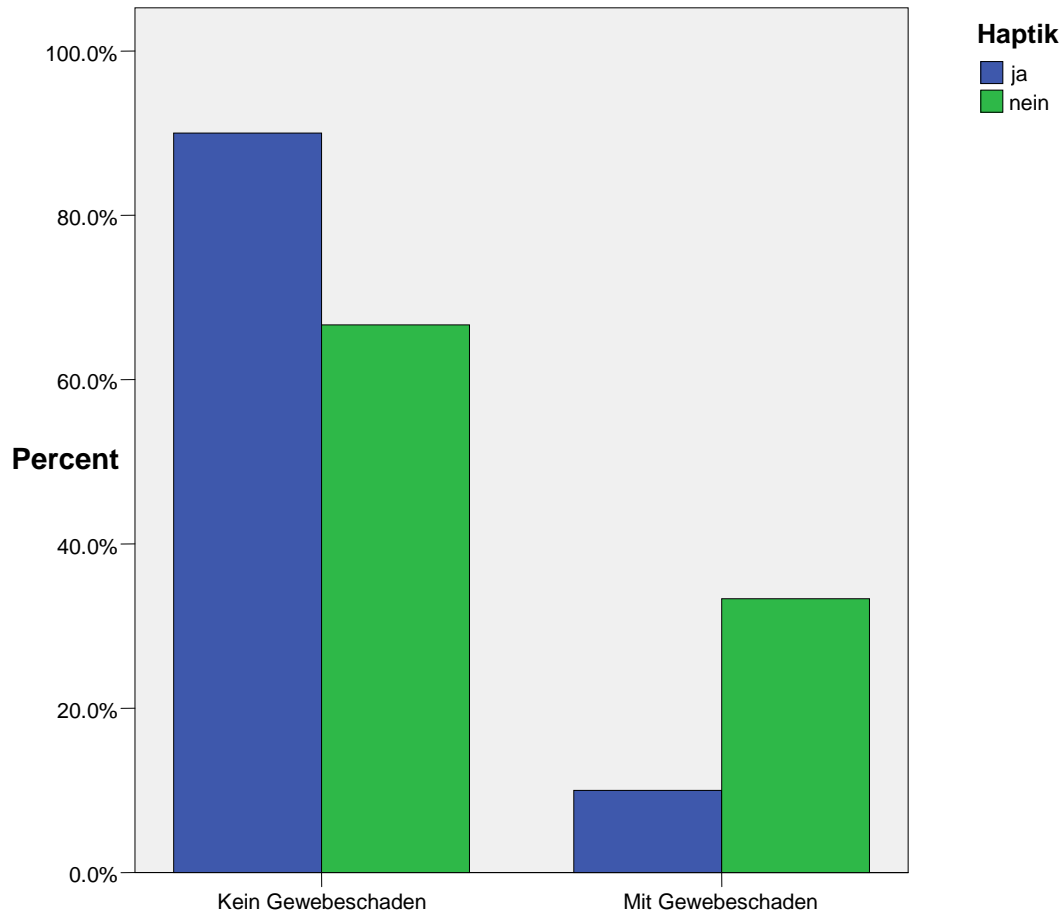


Abbildung 13: Gewebeschäden

### 3.6 Knotenqualität

Jeder Knoten wurde mit maximal 2 Punkten bewertet. Beim Arbeiten mit Haptik wurden insgesamt 3 Knoten durchgeführt, was einer Maximalpunktzahl von 180 bei 30 Probanden entspricht.

Erreicht wurde ein Wert von 169 Punkten.

Für das Arbeiten ohne Haptik ergab sich eine Punktzahl von 107 bei maximal 120 möglichen, da hier nur 2 Knoten vom jeweiligen Proband durchgeführt wurden.

	Mit Haptik	Keine Haptik
Erreichte Punktzahl	169	107
Maximale Punktzahl	180	120
Prozent	93,89%	89,17%

**Tabelle 17: Knotenqualität**

## 3.7 Subjektives Empfinden der Probanden

### 3.7.1 Empfinden bei der Nadelübergabe

Die Haptik bei der Nadelübergabe im ersten Simulationsversuch wurde von 14 Probanden als besser eingestuft, 13 Probanden spürten keine Unterschiede und 3 Probanden fanden die Haptik störend.

Bei dem 2. Versuch bewerteten 18 Probanden die Haptik als angenehmer, 8 stellten keinen Unterschied fest und 4 Teilnehmer fanden die Haptik schlechter.

Die Haptik beim letzten Versuch wurde von 16 Probanden positiv bewertet, 10 Probanden stellten keinen Unterschied fest und 4 Studienteilnehmer bewerteten die Haptik als störend.

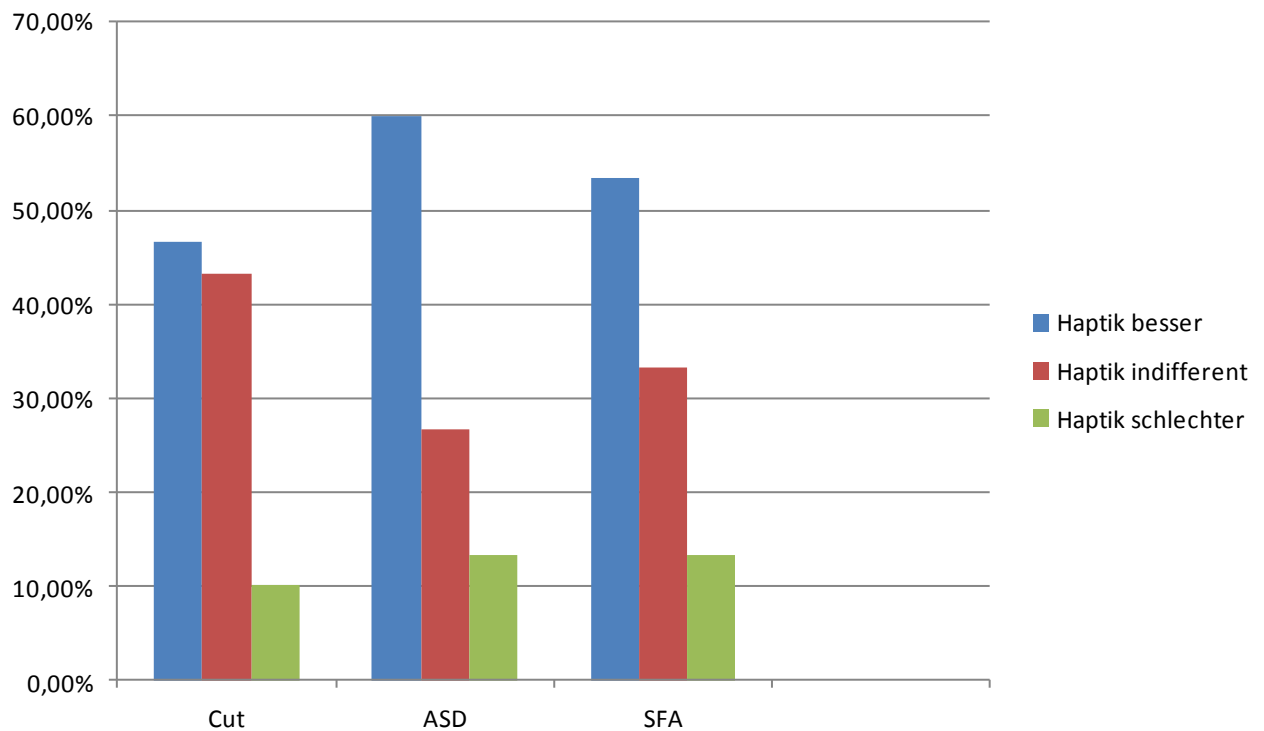


Abbildung 44: Empfinden bei Nadelübergabe

### 3.7.2 Empfinden beim Nähen

Das Empfinden der Haptik während des Nähens empfanden 19 Probanden im 1. Versuch gut, 7 Teilnehmer stellten keinen Unterschied fest und 4 fanden die Haptik schlechter.

Beim Nähen am ASD wurde die Haptik von 20 Probanden für gut befunden, 8 stellten keinen Unterschied fest und 2 bewerteten die Haptik mit unangenehm.

Die Haptik im letzten Versuch beim Sehnenfadenabriss wurde von 20 Probanden besser bewertet, 9 stellten keinen Unterschied fest und 1 Proband fand die Haptik störend.

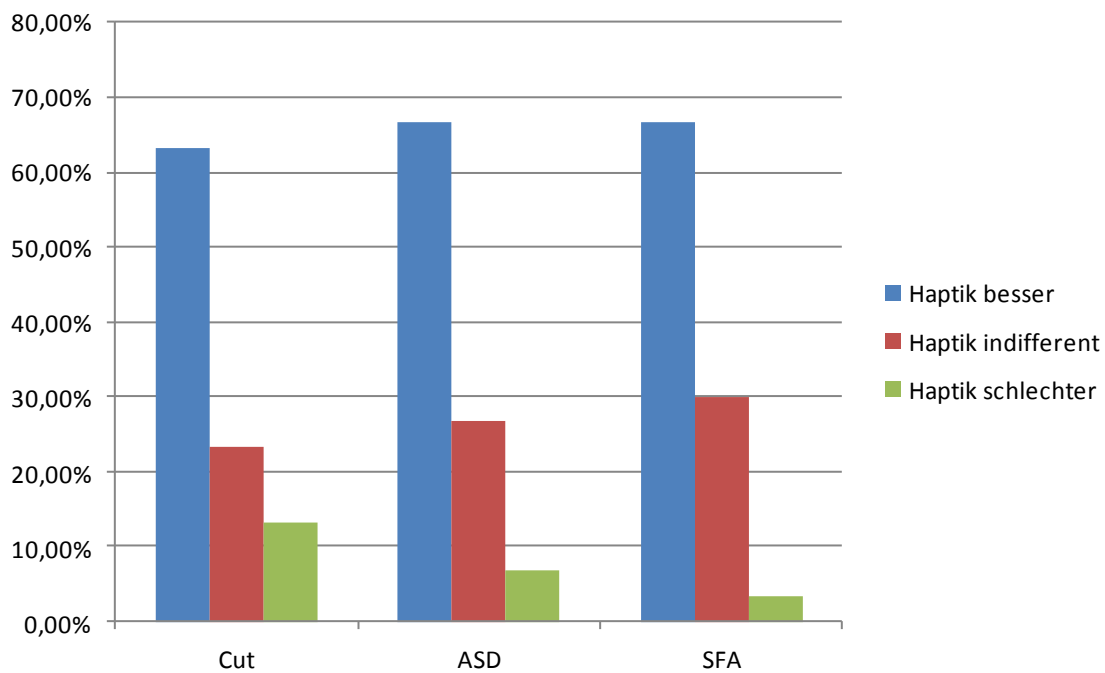


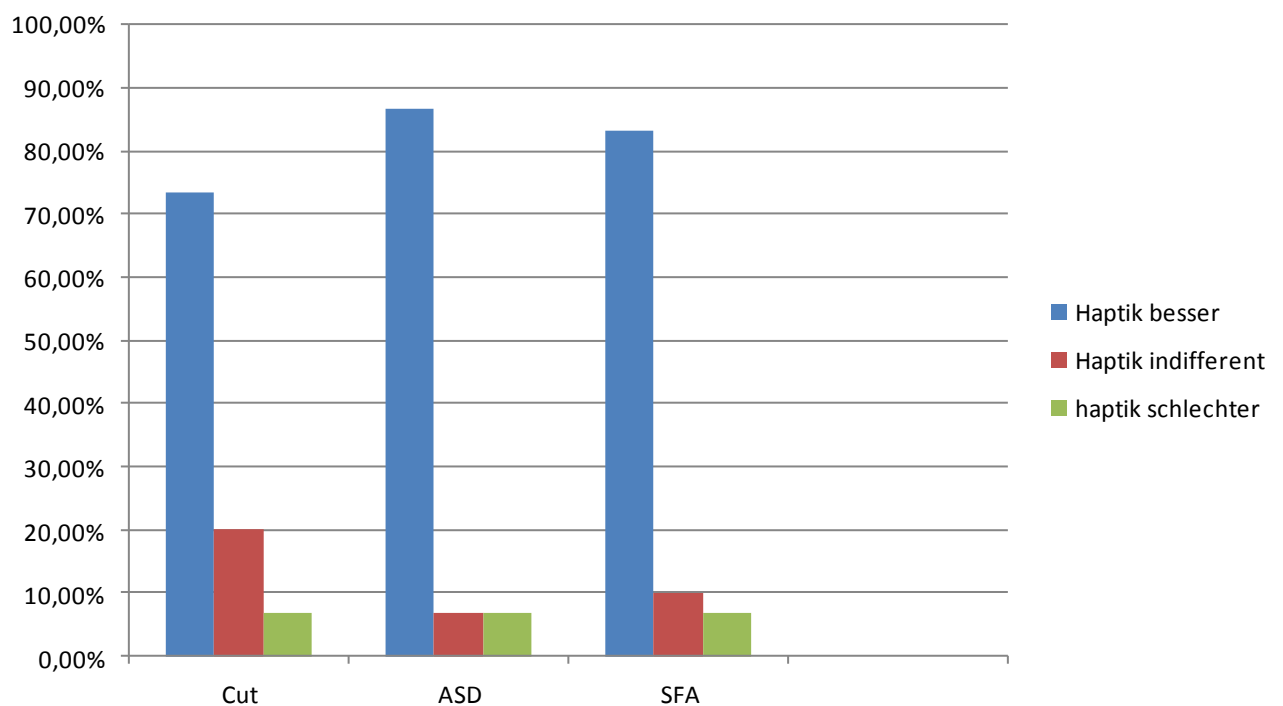
Abbildung 55: Empfinden beim Nähen

### 3.7.3 Empfinden beim Knoten

Während des Knotens empfanden 22 Probanden die Haptik im 1. Versuch als besser, 6 konnten keinen Unterschied erkennen und 2 empfanden die Haptik als schlechter.

Beim 2. Versuch am ASD wurde die Haptik von 26 Teilnehmern als positiv, von 2 als indifferent und von 2 Probanden als negativ bewertet.

Beim letzten Versuch empfanden 25 Probanden die Haptik besser, 3 konnten keinen Unterschied feststellen und 2 empfanden die Krafrückkopplung schlechter im Vergleich zu den ersten beiden Versuchen.



**Abbildung 66: Empfinden beim Knoten**

## 4. Diskussion

Robotersysteme haben im Vergleich zum Menschen Vorteile im Bezug auf die Genauigkeit und Wiederholbarkeit.

In den letzten Jahren wurde viel in der Weiterentwicklung der Robotersysteme investiert, geforscht und war Gegenstand vieler Arbeitsgruppen (Caratozzolo et al. 2005, Najarian, Fallahnezhad and Afshari 2011).

Untersucht wurde die Sicherheit und Wiederholbarkeit der durch die robotergestützten Operationstechniken (Eljamel 2009).

Die Durchführbarkeit einer roboterunterstützten Mitralklappenoperation zeigte Mohr et al. (F.W. Mohr\* and R. Krakor 1999).

Im Besonderen wurde die Bedeutung der Kraftrückkopplung von vielen Arbeitsgruppen untersucht (Kitagawa et al. 2004, Okamura 2004).

Nicht nur die haptische Rückkopplung, sondern auch das visuelle Feedback (3D) in Kombination mit der Erfahrung wird laut Tholey einen Einfluss auf die erfolgreiche Einführung der Kraftrückkopplung in den chirurgischen Alltag haben (Tholey, Desai and Castellanos 2005, Corcione et al. 2005).

Die 3 D Darstellung mit dem Robotersystem ist gerade bei schwierigen Mitralklappenrekonstruktionen von Bedeutung (Kypson, Nifong and Chitwood 2003, Yang et al. 2011). Auch wir verwendeten eine 3 D Darstellung.

In dieser Arbeit konnten die einzelnen Testreihen sowohl ohne wie auch mit Haptik ohne technische Probleme durchgeführt werden. Es gab kein Systemversagen oder potenziell gefährliche Situationen, in denen es zu schwerwiegenden Verletzungen des Gewebes kam. Insgesamt kam es zu 3 Gewebeaustrissen am Perikard beim Test mit Haptik.

Dem gegenüber standen insgesamt 10 Gewebeverletzungen beim Arbeiten ohne Haptik, hier bestand eine statistische Signifikanz mit einem P-Wert von 0,028.

Zudem konnte Giulianotti (Giulianotti et al. 2003) zeigen, dass das unmittelbare postoperative Outcome bei Roboter unterstützter Chirurgie im Vergleich zur konventionellen OP Technik besser war.

Die Wiederholbarkeit und der Sicherheitsaspekt mit dem in dieser Arbeit durchgeführten Robotersysteme konnte gezeigt werden, wenn auch die Arbeit mit Einschränkungen betrachtet werden muss, da es sich nicht um vitales Gewebe, sondern um einen Kadaversuch handelte. In Zukunft müssen klinische Studien die Durchführbarkeit und Sicherheit am Lebenden Versuchsobjekt bestätigen.

Nicht nur die Sicherheit, sondern auch ein weiterer ökonomischer Aspekt, nämlich die Zeit, spielte in unseren Untersuchungen eine große Rolle. Je geringer die Operationszeit, desto schneller die Rekonvaleszenz, desto kürzer der Aufenthalt für den Patienten auf der Intensivstation und somit auch geringere Klinikkosten (Lin et al. 2011).

Nicht nur eine schnellere Rekonvaleszenz, sondern auch eine geringere Infektionsrate kann durch einen minimal invasiven Zugang erreicht werden (Morgan et al. 2004).

Im Gegensatz zu einer schnelleren Rekonvaleszenz und der damit verbundenen Kostenreduktion stehen die initialen Investitionskosten der Robotergeräte.

Eine Studie im Jahr 2011 von Lin verglich die Kosten von Patienten, die eine roboterunterstützte Herzoperation hatten im Vergleich zu denen, die konventionell operiert wurden. Die Patienten, die mit Hilfe eines Robotersystems operiert wurden, verursachten geringere Kosten (Lin et al. 2011).



Wir untersuchten die jeweils benötigte Zeit der einzelnen Teilaufgaben, mit dem Ergebnis, dass die insgesamten Nahtzeiten im Median zwar leicht niedriger mit Haptik waren, allerdings ohne statistische Relevanz.

Interessant war, dass im Vergleich zu den Nahtzeiten die Durchführung der Knotensequenzen jeweils mit Haptik höher war als ohne Haptik. Unsere Vermutung ist, dass durch die Krafrückkopplung ein viel genaueres und feineres Arbeiten möglich ist. Speziell beim Knoten wird mehr Zeit beansprucht, da hier eine Summe auf sich abgestimmter Teilabläufen stattfinden muss.

Als geeignet erscheint und deshalb Interessant wäre in Zukunft die Einführung einer automatisierten Knotentechnik durch den Roboter, um damit diesen Teilschritt in der Operation zu beschleunigen.

Andere Arbeiten konnten bereits automatisierte Sequenzen in einem Robotersystem implementieren und evaluieren (Bauernschmitt R 2005, Nagy I 2004).

Die Tendenz einer geringeren Operationszeit konnten wir mit unserer Studie belegen, auch wenn sich keine statistisch relevanten Ergebnisse zeigten.

Ein Grund könnte zum einen in der nur kleinen Probandenzahl (insgesamt 30) liegen, zum anderen war über die Hälfte der Teilnehmer ohne Erfahrung mit einem Robotersystem.

Auch bei Wiedemann et al waren die OP Zeiten in einer roboterunterstützten OP länger (Wiedemann et al. 2012).

Es zeigte sich aber in unserer Studie, dass sich sowohl die Naht- als auch die Knotenzeiten im Verlauf mit und ohne Haptik deutlich reduzierten. Somit ist anzunehmen, dass durch kontinuierliches Training die Arbeitszeit beim Arbeiten mit Haptik sukzessive sinkt.

Eine Lernkurve mit statistischer Signifikanz konnte im Rahmen dieser Studie nicht gezeigt werden. Dafür waren die 3 Testreihen insgesamt zu gering. Andere Studien über einen längeren Zeitraum wie zum Beispiel bei Bonatti über 18 Monate konnten einen positiven Lerneffekt bestätigen (Bonatti et al. 2004).

Rashid bestätigte eine Lernkurve gerade für Anfänger beim Arbeiten mit einem Roboter (Rashid TG 2010).

In unserer Studie war das subjektive Empfinden der Probanden beim Arbeiten mit Krafrückkopplung in allen Teilbereichen überlegen. Durch das Empfinden beim Arbeiten mit den Eingabekonsolen wird dem Probanden eine zusätzliche Sinnesmodalität als Input bereitgestellt. Dadurch wird dem Probanden ein sichereres und angenehmeres Gefühl beim Arbeiten vermittelt, zusätzlich kann viel genauer und schneller gearbeitet werden (Seehusen, Brett and Harrison 2001, Dargahi and Najarian 2004).

Die Krafrückkopplung spielte in den bisherigen Arbeiten, Vergleich Roboter- versus nicht Roboter unterstützter Operationstechnik keine Bedeutung. Die meisten Studien wurden mit dem Da Vinci Roboter durchgeführt (Gao et al. 2012), mit dem Ergebnis einer sicheren Durchführbarkeit.

Genannte Studien beschäftigten sich mit der Frage der Notwendigkeit von Haptic Feedback.

Die Mehrheit der Autoren ist der Ansicht, mit Krafrückkopplung sicherer und effektiver arbeiten zu können, als ohne (Bethea et al. 2004, Tholey et al. 2005, Westbring-van der Putten et al. 2008, Czibik et al. 2002).

Heijnsdijk konnte dies allerdings in seiner Arbeit nicht bestätigen (Heijnsdijk et al. 2004).

Interessant und auch als These vor dem Test wurde von uns vermutet, dass bei allen Versuchsreihen sowohl die aufgewendeten Kräfte im Median, als auch die Maximalkräfte beim Arbeiten mit Haptik statistisch signifikant geringer waren, als beim Arbeiten ohne Haptik. Dies ist ein eindeutiges Indiz dafür, dass die Haptik einen deutlichen Einfluss auf den

Sicherheitsaspekt in der Zukunft nehmen kann, da Gewebeverletzungen so vermieden werden können.

Die Vermutung, dass der Haptik in Zukunft eine wichtige Rolle zukommen wird, unterstützt auch van der Meijden, der die Krafrückkopplung als wichtige Voraussetzung für das sichere Arbeiten mit dem Roboter einstuft (van der Meijden and Schijven 2009, Awad, Wolf and Gravlee 2002).

In unserer Versuchsreihe beim Arbeiten mit Haptik waren die verursachten Gewebeschäden wie bereits erwähnt statistisch signifikant geringer (P-Wert 0,028).

Wagner et al bestätigte wie auch wir, dass beim Arbeiten mit Krafrückkopplung die Fehlerrate geringer war als ohne Haptic Feedback (Wagner CR 2002).

Dieses könnte zum einen auf die geringeren Maximalkräfte beim Arbeiten mit Haptik zurückzuführen sein, als auch auf die bessere Ergonomie beim Arbeiten an der Konsole.

Die Anforderungen an die Operateure in Bezug auf Präzision sind gerade in der Herzchirurgie immens.

Eine gute ergonomische Sitzposition kann zudem im Vergleich zum Arbeiten am Operationstisch mit ständigen Haltungsänderungen einer Ermüdung vorbeugen (Berguer, Forkey and Smith 1999).

Anhand unserer Ergebnisse sind wir der Meinung, dass die Krafrückkopplung in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung der Roboterchirurgie zukommen wird, da es für den Anwender ein angenehmeres Arbeiten bietet und vor allem zu einer Risikoreduktion im Rahmen der Operation führen könnte.

Dies ist der wichtigste Aspekt, sowohl für den Patienten als auch für den Chirurg, um die nötige Akzeptanz und das Vertrauen in die neue Technologie zu erlangen.

## **5. Ausblick**

Wir haben in unserer Studie die Haptik in einem ersten Versuch am echten Gewebe untersucht und konnten zeigen, dass die Krafrückkopplung ein wichtiger Baustein in der roboterunterstützten Chirurgie ist. Vor allem der Sicherheitsaspekt des Patienten kann durch die Krafrückkopplung verbessert werden. Dies ist in der Medizin der entscheidende Faktor, um neue Technologien zu untersuchen und voranzutreiben. Weitere Forschungsarbeiten müssen folgen, um die bestehenden Systeme weiterzuentwickeln und die Durchführbarkeit und Sicherheit in vivo zu bestätigen.

## 6. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden der Einfluss und die Bedeutung der Haptik in der roboterunterstützten Herzchirurgie untersucht. In Teilbereichen der Chirurgie gibt es schon Anwendungen für Robotersysteme, noch ist aber gerade in der Herzchirurgie der Einsatz von Robotern sehr limitiert und die Indikationen beschränkt. Ein Grund dafür kann sein, dass es bislang noch kein Robotersystem gibt, welches dem Operateur taktile Rückmeldung gibt und er sich allein auf die Sicht und seine Erfahrung beschränken muss. Die Mehrzahl der Autoren befürwortet den Nutzen der Krafrückkopplung (Bethea et al. 2004). Es gibt aber auch die kontroverse Meinung, dass der Nutzen der Haptik überbewertet wird (Heijnsdijk et al. 2004).

Wir evaluierten die Bedeutung der Krafrückkopplung in insgesamt 3 Versuchsreihen am isolierten Schweineherz. Zum einen untersuchten wir die benötigte Zeit beim Nähen und der Knotendurchführung in den 3 verschiedenen Teilabschnitten mit:

Naht an einem Herzmuskelriss, Verschluss eines atrialen Septumdefektes und Durchführung einer Sehnenfadenplastik.

Zum Anderen untersuchten wir die aufgewendeten Kräfte im Median und die Maximalkräfte. Die Zeiten waren beim Arbeiten mit Haptik nicht schneller als beim Arbeiten ohne Krafrückkopplung, es zeigte sich aber die Tendenz, dass die Zeiten sowohl beim Nähen als auch beim Knoten in den folgenden Teilabschnitten geringer waren.

Bei der Kraftmessung zeigte sich in allen Teilbereichen eine statistisch signifikante ( $P < 0,05$ ) Reduktion beim Arbeiten mit Haptik, bis auf das Arbeiten beim Nähen am Herzmuskelriss ( $P = 0,118$ ). Sowohl die Mediankräfte beim Nähen am Cut ( $P = 0,004$ ) als auch die Maximalkräfte beim ASD Verschluss ( $P < 0,001$ ) waren beim Arbeiten mit Haptik statistisch signifikant geringer.

Bei der Durchführung der Knoten waren die aufgewendeten Kräfte sowohl im Median als auch die Maximalkräfte in allen Teilbereichen statistisch signifikant geringer mit Haptik.

Die These vor der Versuchsreihe, dass gerade die aufgewendeten Kräfte beim Arbeiten mit Haptik geringer waren, wurde bestätigt. Demzufolge zeigte sich auch eine messbare und statistisch signifikant geringere Gewebeverletzung beim Arbeiten mit Haptik ( $P = 0,028$ ).

Zudem beurteilten wir das subjektive Empfinden der Versuchsteilnehmer im Bezug auf das Handling des Robotersystems beim Arbeiten mit Haptik. Es zeigte sich ein für den Probanden angenehmeres Arbeiten beim Nähen und auch beim Knoten in allen Versuchsreihen.

Limitierend in unserer Studie ist, dass die Untersuchungen am Modell durchgeführt wurden. Den Nutzen und die Notwendigkeit der Implementierung von Krafrückkopplung konnten wir zeigen. Zukünftige Arbeiten müssen den Nutzen der Krafrückkopplung im in vivo Versuch bestätigen und belegen.

## 7. Literaturverzeichnis

- Awad, H., R. K. Wolf & G. P. Gravlee (2002) The future of robotic cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 16, 395-6.
- Bauernschmitt R, S. E., Knoll A, Mayer H, Nagy I, Wessel N, Wildhirt S and Lange R (2005) Toward Robotic heart surgery: Introduction of autonomous procedures into an experimental surgical telemanipulator system. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 1, 74-79.
- Berguer, R., D. L. Forkey & W. D. Smith (1999) Ergonomic problems associated with laparoscopic surgery. *Surg Endosc*, 13, 466-8.
- Bethea, B. T., A. M. Okamura, M. Kitagawa, T. P. Fitton, S. M. Cattaneo, V. L. Gott, W. A. Baumgartner & D. D. Yuh (2004) Application of haptic feedback to robotic surgery. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 14, 191-5.
- Bonatti, J., T. Schachner, O. Bernecker, O. Chevtchik, N. Bonaros, H. Ott, G. Friedrich, F. Weidinger & G. Laufer (2004) Robotic totally endoscopic coronary artery bypass: program development and learning curve issues. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 127, 504-10.
- Caratozzolo, E., A. Recordare, M. Massani, L. Bonariol, A. Jelmoni, M. Antoniutti & N. Bassi (2005) Telerobotic-assisted laparoscopic cholecystectomy: our experience on 29 patients. *J Hepatobiliary Pancreat Surg*, 12, 163-6.
- Carpentier, A., D. Loulmet, B. Aupecle, A. Berrebi & J. Relland (1999) Computer-assisted cardiac surgery. *Lancet*, 353, 379-80.
- Corcione, F., C. Esposito, D. Cuccurullo, A. Settembre, N. Miranda, F. Amato, F. Pirozzi & P. Caiazzo (2005) Advantages and limits of robot-assisted laparoscopic surgery: preliminary experience. *Surg Endosc*, 19, 117-9.
- Cristalli, B., P. Landowski, J. B. Bouquet de Joliniere, M. Levardon & J. Seneze (1990) [Value and advantages of laparoscopic surgery in the treatment of ectopic pregnancies]. *Ann Chir*, 44, 396-400.
- Czibik, G., G. D'Ancona, H. W. Donias & H. L. Karamanoukian (2002) Robotic cardiac surgery: present and future applications. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 16, 495-501.
- Dargahi, J. & S. Najarian (2004) Human tactile perception as a standard for artificial tactile sensing--a review. *Int J Med Robot*, 1, 23-35.
- Eljamel, M. S. (2009) Robotic neurological surgery applications: accuracy and consistency or pure fantasy? *Stereotact Funct Neurosurg*, 87, 88-93.
- F.W. Mohr\*, J. F. O., V. Falk, T. Walther, A. Diegeler, & F. S. R. Krakor, R. Autschbach (1999) The evolution of minimally invasive mitral valve surgery – 2 year experience. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 15, 233-239.
- Gao, C., M. Yang, C. Xiao, G. Wang, Y. Wu, J. Wang & J. Li (2012) Robotically assisted mitral valve replacement. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 143, S64-7.
- Giulianotti, P. C., A. Coratti, M. Angelini, F. Sbrana, S. Cecconi, T. Balestracci & G. Caravaglios (2003) Robotics in general surgery: personal experience in a large community hospital. *Arch Surg*, 138, 777-84.
- Gutt, C. N., T. Oniu, A. Mehrabi, A. Kashfi, P. Schemmer & M. W. Buchler (2004) Robot-assisted abdominal surgery. *Br J Surg*, 91, 1390-7.
- Heijnsdijk, E. A., A. Padeloup, A. J. van der Pijl, J. Dankelman & D. J. Gouma (2004) The influence of force feedback and visual feedback in grasping tissue laparoscopically. *Surg Endosc*, 18, 980-5.

- Kitagawa, M., D. Dokko, A. M. Okamura, B. T. Bethea & D. D. Yuh (2004) Effect of sensory substitution on suture manipulation forces for surgical teleoperation. *Stud Health Technol Inform*, 98, 157-63.
- Kypson, A. P., L. W. Nifong & W. R. Chitwood, Jr. (2003) Robotic mitral valve surgery. *Semin Thorac Cardiovasc Surg*, 15, 121-9.
- Lin, Y. K., C. P. Chen, W. C. Tsai, Y. C. Chiao & B. Y. Lin (2011) Cost-effectiveness of clinical pathway in coronary artery bypass surgery. *J Med Syst*, 35, 203-13.
- Loomis, J. M. L., S.J. (1986) Handbook of Perception and Human Performance. *New York: John Wiley y& Sons*.
- Lytle, B. W. (1996) Robotically-Assisted Coronary Artery Bypass Grafting. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 111, 554-5.
- Marescaux, J., J. Leroy, M. Gagner, F. Rubino, D. Mutter, M. Vix, S. E. Butner & M. K. Smith (2001) Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, 413, 379-80.
- Morgan, J. A., J. C. Peacock, T. Kohmoto, M. J. Garrido, B. M. Schanzer, A. R. Kherani, D. W. Vigilance, F. H. Cheema, S. Kaplan, C. R. Smith, M. C. Oz & M. Argenziano (2004) Robotic techniques improve quality of life in patients undergoing atrial septal defect repair. *Ann Thorac Surg*, 77, 1328-33.
- Nagy I, M. H., Knoll H, Schirmbeck EU und Bauernschmitt R. (2004) The Endo (PA)R System for Minimally invasive Robotic Surgery. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 3637-42.
- Najarian, S., M. Fallahnezhad & E. Afshari (2011) Advances in medical robotic systems with specific applications in surgery--a review. *J Med Eng Technol*, 35, 19-33.
- Okamura, A. M. (2004) Methods for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery. *Ind Rob*, 31, 499-508.
- Passlick, B., C. Born & O. Thetter (1997) [Cost comparison of minimal invasive surgery vs. standard operation exemplified by primary pneumothorax]. *Langenbecks Arch Chir Suppl Kongressbd*, 114, 1290-2.
- Rashid TG, K. M., Ind TE. (2010) Comparing the learning curve for robotically assisted and straight stick laparoscopic procedures in surgical novices. *Int J Med Robot.*, 6, 306-310.
- Seehusen, A., P. N. Brett & A. Harrison (2001) Human perception of haptic information in minimal access surgery tools for use in simulation. *Stud Health Technol Inform*, 81, 453-8.
- Suematsu, Y. & P. J. del Nido (2004) Robotic pediatric cardiac surgery: present and future perspectives. *Am J Surg*, 188, 98S-103S.
- Tholey, G., J. P. Desai & A. E. Castellanos (2005) Force feedback plays a significant role in minimally invasive surgery: results and analysis. *Ann Surg*, 241, 102-9.
- van der Meijden, O. A. & M. P. Schijven (2009) The value of haptic feedback in conventional and robot-assisted minimal invasive surgery and virtual reality training: a current review. *Surg Endosc*, 23, 1180-90.
- Vitense HS, J. J., Emery VK. (2003) Multimodal feedback: an assement of performance and mental workload. *Ergonomics*, 46, 68-87.
- Wagner CR, S. N., Howe (RD 2002) (2002) The role of force feedback in surgery: analysis of blunt dissection. *10th Symposium on haptic interfaces for virtual Environement and teleoperator Systems*, 24-28 March, 68-74.
- Wei G-Q, A. K., Hiringer G (1997) Real-time visual servoing for laparoscopic surgery. Controlling robot motion with color image segmentation. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 16, 40-45.

- Westebring-van der Putten, E. P., R. H. Goossens, J. J. Jakimowicz & J. Dankelman (2008) Haptics in minimally invasive surgery--a review. *Minim Invasive Ther Allied Technol*, 17, 3-16.
- Wiedemann, D., N. Bonaros, T. Schachner, F. Weidinger, E. J. Lehr, M. Vesely & J. Bonatti (2012) Surgical problems and complex procedures: issues for operative time in robotic totally endoscopic coronary artery bypass grafting. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 143, 639-647 e2.
- Yang, M., C. Q. Gao, G. Wang, J. L. Wang, C. S. Xiao & Y. Wu (2011) [Totally robotic mitral valve surgery in 60 cases]. *Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao*, 31, 1721-3.

## **8. Danksagung**

Bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Bauerschmitt, der mir immer mit seinem Rat zur Seite stand und mir hilfreiche Tipps während der Arbeit gegeben hat.

Für die Durchführung der Versuche möchte ich mich bei allen Studienteilnehmern bedanken, die sich die Zeit für die Versuche genommen haben.

Für die Durchführung der Versuche möchte ich mich vor allem bei Hermann Meier bedanken, der das Robotersystem während der Versuchsreihen betreute.

Mein größter Dank gilt aber meiner Familie und vor allem meiner Frau Ivonne, die mich in den Jahren der Doktorarbeit immer unterstützte und in den Zeiten meiner Abwesenheit, geistig und körperlich, sich immer um unsere Kinder Zoé und Lennart liebevoll kümmerte.