

Evolution von Distanzmaßen für chirurgische Prozesse

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Dr. rer. med.

an der Medizinischen Fakultät
der Universität Leipzig

eingereicht von: Dipl. Wirtschaftswissenschaftler, Dipl. Phys. Sandra Schumann
geboren: 12. März 1979 in Gotha

angefertigt an: Universität Leipzig, Medizinische Fakultät
Innovation Center Computer Assisted Surgery (ICCAS)

Betreuer: PD Dr. Thomas Neumuth
PD Dr. Ulf Bühligen

Beschluss über die Verleihung des Doktorgrades vom:
29. April 2014

Bibliographische Beschreibung

Schumann, Sandra

Evolution von Distanzmaßen für chirurgische Prozesse

Universität Leipzig, Dissertation

101 Seiten gesamt, 75 Seiten Textteil, 73 Literatur, 35 Abbildungen, 14 Tabellen

Referat:

Der Operationssaal ist ein hochkomplexes System mit dem Ziel patientenindividuelle Therapien zum Erfolg zu führen. Schwerpunkt dieser Arbeit ist der Arbeitsablauf des Chirurgen. Ein chirurgischer Prozess beinhaltet die durchgeführten Arbeitsschritte des Operateurs während eines Eingriffs. Der protokollierte chirurgische Prozess ist Ausgangspunkt der Untersuchungen.

Es wurde eine Methodik entwickelt, die mit statistischen und standardisierten Verfahren Unterschiede zwischen dem Ablauf verschiedener chirurgischer Prozesse messen kann. Dazu wurden die vier Distanzmaße Jaccard, Levenshtein, Adjazenz und Graphmatching auf chirurgische Prozesse angewandt. Eine Evaluation anhand von Daten einer Trainingsstudie zur Untersuchung laparoskopischer Instrumente in der minimalinvasiven Chirurgie bildet die Grundlage zur Bestimmung von Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz als die Maße, die optimal geeignet sind Unterschiede zwischen chirurgischen Prozessen zu messen.

Die Retrospektivität der Distanzanalyse wird aufgehoben indem folgende Hypothese untersucht wird: Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Distanz zur Laufzeit eines chirurgischen Eingriffs mit der Distanz nach kompletten Ablauf des Eingriffs. Die Hypothese konnte bestätigt werden.

Der Zusammenhang zwischen Prozessablauf und Qualität des Prozessergebnisses wird mit folgender Hypothese untersucht: Je größer die Distanz eines chirurgischen Prozesses zum Best Practice, desto schlechter ist das Prozessergebnis. In der Chirurgie ist der Best Practice der chirurgische Prozess, der als die beste Prozedur angesehen wird, um das angestrebte Therapieziel zu erreichen. Auch diese Hypothese konnte bestätigt werden.

Die Anwendung der Distanzmaße in der klinischen Praxis erfolgte beispielhaft an Eingriffen aus der Neurochirurgie (zervikale Diskektomie) und der HNO (Neck Dissection).

Insgesamt wurde mit der in dieser Arbeit dargelegten grundlegenden Methodik der Distanzmaße bei der Analyse chirurgischer Prozesse ein Grundstein für vielfältige weitere Untersuchungen gelegt.

Danksagung

Ich möchte allen herzlich danken, die mich bei der Durchführung und Fertigstellung dieser Arbeit unterstützt haben:

Meinem Betreuer, PD Dr. Thomas Neumuth für die anregenden Diskussionen und die gewährten Impulse, die das Thema dieser Dissertation herausarbeiteten und bis zum Schluss begleiteten, sowie die intensive Betreuung durch kompetenten Rat und Hilfe.

PD Dr. Ulf Bühligen für die Betreuung der Arbeit und immerwährende Diskussionsbereitschaft. Außerdem für die Förderung, sowie sachkundige und tatkräftige Unterstützung bei der Planung und Durchführung der klinischen Studie.

Außerdem allen Kolleginnen und Kollegen am Iccas für die gute Zusammenarbeit während meiner Zeit am Institut. Sie bildeten das Grundgerüst für die Erstellung dieser Arbeit. Insbesondere Michael Thiele und Tony Kurth für die Unterstützung bei der Auswertung der Daten und anregende Diskussionen. Außerdem danke ich Dr. Stefan Bohn für wertvolle Hinweise beim Feinschliff der Arbeit.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Freunden für ihre moralische Unterstützung bedanken, denn ohne sie wäre diese Arbeit niemals möglich gewesen. Mein ganz besonderer Dank geht an Bernadett Nicolai, Dayana Neumuth und Udo Pankratz, die mir im Entstehungsprozess durch anregende Diskussionen und auch bei der Korrektur der Dissertation sehr hilfreich zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Problem der Unterschiede zwischen Prozessen	4
1.3	Ziele und Aufbau der Arbeit	7
2	Aktueller Forschungsstand	10
2.1	Einordnung in die Forschungslandschaft	10
2.2	Modellierung chirurgischer Prozesse	13
2.3	Distanzmaße	14
3	Einführung und Evaluation von Distanzmaßen	18
3.1	Distanzmaße für chirurgische Prozesse	18
3.1.1	Formale Grundlagen	18
3.1.2	Jaccarddistanz	20
3.1.3	Levenshteindistanz	21
3.1.4	Adjazenzdistanz	22
3.1.5	Graphmatchingdistanz	23
3.1.6	Zusammenfassung der Distanzmaße	24
3.2	Evaluationsstudie	26
3.2.1	Klinischer Kontext	26
3.2.2	Studienaufbau zur Evaluation der Distanzmaße	27
3.2.3	Ergebnisse der Evaluation	31
3.3	Diskussion	34
4	Prognose der Distanz von laufenden chirurgischen Prozessen	36
4.1	Motivation zur Prognose der Distanz	36
4.2	Stand der Forschung	37
4.3	Material und Methoden	38
4.4	Ergebnisse	39
4.5	Diskussion	41
5	Prozessdistanzen und chirurgische Ergebnisqualität	43
5.1	Motivation zur Untersuchung der Prozessqualität	43
5.2	Stand der Forschung bei Methoden zur Verbesserung der Prozessqualität	45
5.3	Material und Methoden	46
5.4	Ergebnisse	49

5.5	Diskussion	53
5.6	Fazit	54
6	Anwendungen in der klinischen Praxis	56
6.1	Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen Neurochirurgen bei zervikalen Diskektomien	56
6.1.1	Klinischer Studienaufbau	56
6.1.2	Konventionelle Workflowanalysen	57
6.1.3	Distanzanalysen	59
6.1.4	Prognose des Distanzmaßes für zervikale Diskektomien	62
6.2	Vergleich der einfachen und komplexen Neck Dissection	63
6.2.1	Klinischer Studienaufbau	63
6.2.2	Konventionelle Workflowanalysen	66
6.2.3	Distanzanalysen	67
6.2.4	Prognose des Distanzmaßes der Neck Dissection	71
7	Diskussion und Fazit	73
7.1	Zusammenfassung	73
7.2	Zielerreichung	75
7.3	Ausblick	76
7.4	Fazit	78

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Entwicklung des Operationssaals der Zukunft schreitet immer weiter voran. Ein Hauptmerkmal dabei ist die fortschreitende Digitalisierung. Technologien, die im Operationssaal Einzug halten und sich stetig entwickeln, sind Medizingeräte (z.B. Signalerfassung, Navigationssysteme), Systeme der IT-Infrastruktur (zur Speicherung, Integration, Verarbeitung und Übermittlung von patientenspezifischen Daten), Assistenz-Funktionalitäten (z.B. patientenspezifische Modellierung, Optimierung von chirurgischen Workflows) und Visualisierung (z.B. Verarbeitung, Übertragung, Anzeige und Speicherung von Röntgenbildern) (Niederlag *et al.*, 2012; Cleary u. Kinsella, 2005; Sandberg *et al.*, 2003). Zusammengenommen ist der Operationssaal ein hochkomplexes System mit dem Ziel patientenindividuelle Therapien zum Erfolg zu führen (Abbildung 1). Die Qualität spielt dabei eine enorme Rolle, aber auch betriebswirtschaftliche Kriterien, da der Operationssaal der höchste Kostenfaktor einer Klinik ist (Archer u. Macario, 2006; Geldner *et al.*, 2002).



Abbildung 1: Ein Operationssaal aus dem Bereich der Neurochirurgie. Eine Vielzahl medizinischer Geräte und Personen bilden ein komplexes System mit gegenseitigen Abhängigkeiten.

Die Subsysteme im System Operationssaal (OP) sind nicht losgelöst voneinander, sondern bilden ein komplexes Netzwerk mit gegenseitiger Abhängigkeit und Beeinflussung. Um das System lenken zu können, ist es wichtig die Subsysteme zu kennen und zu verstehen. Ein Fokus aktueller Forschungen ist es, eine digitale IT-Infrastruktur zur Vernetzung relevanter Medizingeräte und Assistenzsysteme innerhalb des OP-Saals bereitzustellen, sowie den OP-Saal mit den klinischen Informationssystemen im Krankenhaus zu vernetzen (Bohn *et al.*, 2009). Der Hauptakteur in diesem komplexen System gegenseitiger Beeinflussung ist der Chirurg. Das Ziel neu zu entwickelnder Technologien ist es, den Operateur in seiner Tätigkeit bei der Therapie des Patienten optimal zu unterstützen. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist, dass ein Verständnis über die chirurgischen Arbeitsabläufe vorhanden ist. Nur so ist die Entwicklung digitaler Technologien möglich, die Hand in Hand mit dem Chirurgen gehen und ihn während des chirurgischen Eingriffs unterstützen. Dies soll zum bestmöglichen Therapieergebnis für den Patienten führen, sowie ökonomische Faktoren und Prozesse optimieren.

Schwerpunkt in dieser Arbeit ist der Arbeitsablauf des Chirurgen. Um die chirurgischen Prozesse zu verstehen sind mehrere Schritte notwendig. Zunächst werden die einzelnen Prozessschritte der chirurgischen Tätigkeiten auf feingranularer Ebene erfasst. Daraufhin wird eine Analyse des Prozesses angeschlossen. Analysen können (statistische) Untersuchungen der Schritte oder des Arbeitsablaufs beinhalten. Erst dann ist es möglich, den chirurgischen Prozess durch neue Assistenzsysteme optimal zu unterstützen.

1.2 Problem der Unterschiede zwischen Prozessen

Ein chirurgischer Prozess beinhaltet die durchgeführten Arbeitsschritte des Operateurs während eines Eingriffs. Lehrbuchbeschreibungen eines Eingriffs geben einen Überblick über die OP, sind aber sehr allgemein gehalten und auf einem hohen Abstraktionsniveau verfasst. Zur Erfassung der Schritte in einer feinen Granularität sind andere Methoden notwendig.

Neumuth (Neumuth *et al.*, 2006c) entwickelte eine Methodik zur strukturierten Erfassung chirurgischer Prozesse durch externe Beobachter. Diese verwenden zur Aufzeichnung der Prozesse eine spezielle Software auf einem Tablet-PC, den Surgical Workflow-Editor (Abbildung 2). Geschultes Personal kann dadurch während einer Operation in Echtzeit die Arbeitsschritte des Chirurgen detailliert protokollieren.

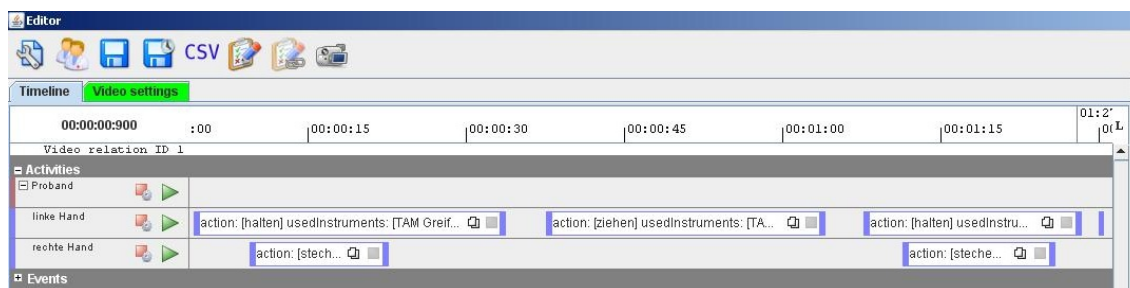


Abbildung 2: Screenshot des Workflow-Editors. Die Zeitleiste ist zu sehen und die Aktionen, die der Chirurg mit der linken sowie der rechten Hand durchgeführt hat.

Je nach Fragestellung werden neben den Tätigkeiten auch das verwendete chirurgische Instrument und die behandelte anatomische Struktur aufgenommen. Für jeden Arbeitsschritt gibt es eine sekundengenaue Start- und Stopzeit. Zusammengekommen entsteht dadurch ein detailliertes patienten-individuelles chirurgisches Prozessmodell. Die Visualisierung dieses Prozessmodells (Abbildung 3) kann genutzt werden, um einen ersten Überblick über den speziellen chirurgischen Eingriff an einem Patienten zu erhalten.

In der aktuellen Forschung bestehen Ansätze, chirurgische Prozesse automatisiert durch Trackingtechnologien zu akquirieren. Dazu gehören u.a. Methoden der automatischen Video-Erkennung (Blum *et al.*, 2010) sowie RFID-Technologie (Radiofrequenz Identifikation) zur Erkennung der verwendeten Instrumente (Neumuth u. Meissner, 2012).

Der protokollierte chirurgische Prozess ist Ausgangspunkt und Basis für die Untersuchungen dieser Arbeit. Bei der konventionellen Workflowanalyse werden Häufigkeiten und Zeitdauern der Arbeitsschritte des zugrundeliegenden chirurgischen Prozesses statistisch ausgewertet. Ein Blick auf den Ablauf der chirurgischen Prozesse als Ganzes bleibt dadurch verwehrt. Eine Untersuchung über den Fluss der Handlung chirurgischer Prozesse kann die Workflowanalyse, wie sie bisher angewendet wurde, nicht liefern.

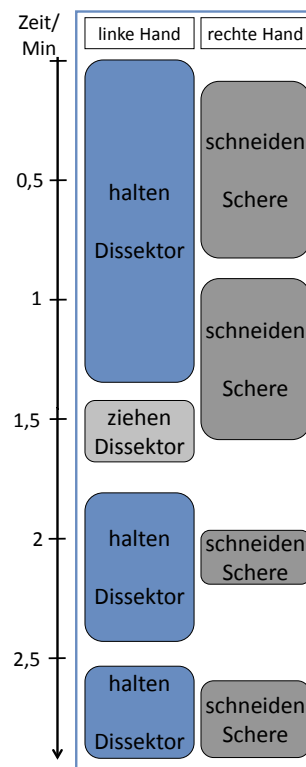


Abbildung 3: Visualisierung eines chirurgischen Prozesses eines minimalinvasiven Eingriffs. Unterscheidung nach linker und rechter Hand des Chirurgen, sowie die Darstellung der Aktivitäten mit den durchgeführten Tätigkeiten, dem benutzten Instrument sowie der zeitlichen Ausdehnung.

Die Analyse chirurgischer Prozesse als Ganzes kann mit bekannten Management-Methoden, wie z.B. Prozess-Benchmarking und Expertenwissen auf qualitativer Ebene durchgeführt werden. Beim Prozess-Benchmarking werden Prozesse als Ganzes miteinander verglichen. Kerngedanke ist der Vergleich der eigenen Prozesse mit dem besten Prozess (Camp, 1998). Dies geschieht auf einem hohen Abstraktionsniveau. Der Vergleich von fachspezifischen Prozessen kann deshalb auch auf fachübergreifende Vergleiche ausgedehnt werden. Es können Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Operationen erfasst und ausgewertet werden. Nachteil des Prozess-Benchmarking sind die hohen Kosten, die durch das Expertenwissen und die projektbezogene spezifische und kaum standardisierte Informationsgewinnung entstehen. Großer Vorteil ist, dass damit der Ablauf der Eingriffe als Einheit im Mittelpunkt steht und analysiert werden kann.

Die Motivation dieser Arbeit besteht darin, die Vorteile der Methoden der konventionellen Workflowanalyse und des Prozess-Benchmarking miteinander zu

kombinieren, um den Ablauf chirurgischer Prozesse quantitativ zu vergleichen. Es wird eine Methodik entwickelt, die mit statistischen und standardisierten Verfahren Unterschiede im Ablauf verschiedener chirurgischer Prozesse misst. Mit dieser sogenannten Distanzanalyse kann ein Vergleich von Prozessen stattfinden, ohne den Aufwand und die Kosten einer spezifischen Expertenanalyse. Außerdem erlaubt die quantitative Distanz-Analyse eine vergleichende Einordnung der Größe der Distanz, während die qualitativen Beschreibungen der Abläufe nur erläuternde Darstellungen sind.

1.3 Ziele und Aufbau der Arbeit

Aus dem aktuellen Stand der Entwicklung der Workflowanalyse heraus ergibt sich folgendes Problem:

Problem 1:

Der Ablauf von verschiedenen chirurgischen Prozessen ist aufgrund fehlender Maße nicht quantitativ vergleichbar.

Um das Problem zu beheben, werden folgende Ziele definiert:

Ziel 1.1: Evolution von Distanzmaßen zur Messung der Variationen im Ablauf von chirurgischen Prozessen.

Ziel 1.2: Evaluierung verschiedener Maße zur Bestimmung eines optimalen Distanzmaßes, um Unterschiede im Ablauf von chirurgischen Prozessen messen zu können.

Bisher werden Workflowanalysen retrospektiv durchgeführt. Zukünftige Assistenzsysteme zur Unterstützung des Chirurgen werden intraoperativ eine Analyse des laufenden Eingriffs durchführen und diesen mit einem relevanten Pool vorhandener chirurgischer Prozessmodelle vergleichen, um sofort Informationen über den Verlauf anzubieten (z.B. voraussichtlich folgende Arbeitsschritte oder noch benötigte Ressourcen).

Problem 2:

Sofortige Informationen über den Verlauf des gegenwärtigen Eingriffs fehlen.

Daraus ergeben sich folgende Ziele:

Ziel 2.1: Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Distanz am Ende und der Distanz zur Laufzeit einer Operation.

Ziel 2.2: Analyse des Zusammenhangs zwischen Veränderungen im Ablauf des chirurgischen Prozesses zur Qualität des Prozessergebnisses.

Insgesamt ist es wichtig, neue Verfahren nicht nur theoretisch zu entwickeln, sondern in einer weiteren Ausbaustufe der praktischen Nutzung zuzuführen.

Problem 3:

Sind die entwickelten Methoden reproduzierbar und ebenfalls in der klinischen Praxis von Nutzen?

Ziel 3: Anwendung der Distanzmaße anhand von relevanten Beispieldaten aus der klinischen Praxis.

In Tabelle 1 werden die Ziele zusammengefasst aufgelistet und den Kapiteln dieser Arbeit zugeordnet.

Ziel	Ziel-Beschreibung	Kapitel
1.1	Entwicklung von Distanzmaßen zur Messung der Variationen im Ablauf von chirurgischen Prozessen.	2
1.2	Evaluierung verschiedener Maße zur Bestimmung eines optimalen Distanzmaßes, um Unterschiede im Ablauf von chirurgischen Prozessen messen zu können.	3
2.1	Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Distanz am Ende und der Distanz zur Laufzeit einer Operation.	4
2.2	Analyse des Zusammenhangs zwischen Veränderungen im Ablauf des chirurgischen Prozesses zur Qualität des Prozessergebnisses.	5
3	Anwendung der Distanzmaße anhand von relevanten Beispieldaten aus der klinischen Praxis.	6

Tabelle 1: Übersicht über die Ziele dieser Arbeit und deren Zuordnung zu den Kapiteln.

Diese Arbeit gliedert sich folgendermaßen: In Kapitel 2 werden die untersuchten Distanzmaße vorgestellt. Dazu werden die vier Distanzmaße Jaccarddistanz, Levenshteindistanz, Adjazenzdistanz und Graph Matching eingeführt und erläutert. Danach werden in Kapitel 3 die Trainingsdaten, die während einer Studie zur Untersuchung von minimalinvasiven Zugangsarten und laparoskopischen Instrumenten in der Kinderchirurgie erhoben wurden, erläutert. Im Anschluss werden die Distanzmaße einer Evaluationsstudie mit den Trainingsdaten unterzogen und das Distanzmaß ermittelt, das die Unterschiede zwischen chirurgischen Prozessen am besten ausdrückt.

Eine Analyse zur Prognose des Distanzmaßes zur OP-Laufzeit anhand der Trainingsdaten wird in Kapitel 4 durchgeführt. Die Vorhersage der Qualität des Prozessergebnisses wird in Kapitel 5 untersucht. Im sechsten Kapitel wird das Distanzmaß auf Daten der klinischen Praxis angewandt. Dazu werden Unterschiede zwischen erfahrenen und unerfahrenen Neurochirurgen bei zervikalen Diskektomien analysiert, sowie zwei Typen von Neck Dissections miteinander verglichen. Im Anschluss werden Diskussionspunkte und zukünftige Fragestellungen dargelegt.

2 Aktueller Forschungsstand

2.1 Einordnung in die Forschungslandschaft

Ähnlichkeit von Prozessen im medizinischen Bereich

In der Vergangenheit basierte die Analyse von chirurgischen Prozessen hauptsächlich auf der Aufnahme und Verarbeitung von Kennzahlen (Archer u. Macario, 2006; Geldner *et al.*, 2002), die sich auf isolierte Aspekte der chirurgischen Arbeitsschritte wie Häufigkeiten und Dauern konzentrierte. Die Abfolge von Aktionen spielte kaum eine Rolle. Es existieren nur vereinzelte Analysen darüber. Beispielsweise entwickelte Meng (Meng *et al.*, 2005) eine Methode, um aus dem chronologischen Auftreten der behandelten anatomischen Strukturen im OP-Bericht eine Abfolge der chirurgischen Aktionen zu generieren. Die Aktionen wurden dann als gerichtete Graphen dargestellt und Ähnlichkeiten wurden durch den Jaccard-Index (vgl. Kapitel 3.1.2) der Schlüsselworte berechnet. Verschiedene ähnliche Graphen wurden dann in ein Modell überführt.

Neumuth (Neumuth *et al.*, 2012b) entwickelte ein Set von Ähnlichkeitsmetriken für chirurgische Prozessmodelle. Diese Metriken beziehen sich auf verschiedene Dimensionen der Prozess-Compliance (Übereinstimmung) in der Chirurgie, wie Granularität, Inhalt, Zeit, Reihenfolge und Häufigkeit von chirurgischen Aktivitäten. Diese Metriken wurden experimentell durch verschiedene klinische Datensätze validiert. Das Ziel der Metriken war es, den Vergleich der Genauigkeit verschiedener Datenakquisitionsmethoden des selben Prozesses zu ermöglichen. Der Vergleich chirurgischer Prozesse basierte nur auf zusammengehörigen Paaren von Aktionen. Es wurde eine Registrierung durchgeführt, um zusammengehörige Aktivitäten der chirurgischen Prozessmodelle zu identifizieren. In der vorliegenden Arbeit werden demgegenüber Distanzmessungen mit dem Ziel entwickelt, verschiedene Prozesse mit nicht aufeinander registrierten Aktionsfolgen miteinander zu vergleichen.

Nelson (Nelson *et al.*, 2012) analysierte die Abfolge von chirurgischen Instrumenten bei minimalinvasiven Eingriffen, um wiederkehrende Muster durch Nutzung von graphentheoretischen Methoden zu erkennen. Weil signifikante Ähnlichkeiten in der Nutzung chirurgischer Instrumente abhängig vom Typ des Eingriffs nachgewiesen werden konnten, können die Autoren einen Vorschlag zum Anreichen des nächsten Instruments machen. Weiterhin wurde der positive Einfluss dieser Methodik numerisch simuliert.

Forestier (Forestier *et al.*, 2012) entwickelte die automatische Klassifikation von einem Pool chirurgischer Prozesse basierend auf dem *Dynamic Time Warping* (DTW) Algorithmus und demonstrierte, dass es damit möglich ist, Gruppen von unerfahrenen und erfahrenen Chirurgen zu identifizieren. Das DTW wird auf zeitabhängige Signale angewendet. Es basiert auf der Levenshteindistanz, aber im Gegensatz zu den Distanzmaßen, die in der vorliegenden Arbeit eingeführt werden, basiert das DTW nicht nur auf den Aktionen die während eines chirurgischen Eingriffs durchgeführt werden, sondern minimiert auch Zeitdifferenzen.

Evaluation in der minimalinvasiven Chirurgie

Um chirurgische Fertigkeiten in der minimalinvasiven Chirurgie zu entdecken und zu evaluieren, haben einige Autoren, wie Megali, Speidel, Reiley und Datta (Megali *et al.*, 2006; Speidel *et al.*, 2009; Reiley u. Hager, 2009; Datta *et al.*, 2002), Bewegungsdaten genutzt. Mit Hilfe der Trajektorien und Bewegungsdaten der chirurgischen Instrumente in Kombination mit Hidden Markov Modellen haben sie die Performance in laparoskopischen Trainings evaluiert. Um Trajektorien und Bewegungsdaten zu messen, sind Tracking-Technologien unabdingbar. Diese werden hauptsächlich in Trainingsszenarien verwendet, da der Aufwand für die Implementierung im OP-Saal sehr hoch ist. Claus (Claus *et al.*, 1995) hat zusätzlich Videostreams standardmäßig ausgewertet. Kombinierte visuelle und haptische Darstellung von Trainingsszenarien wurde von Payandeh (Payandeh *et al.*, 2002) genutzt, um chirurgische Fertigkeiten zu beurteilen.

Vergleich von (Geschäfts-) Prozessen im Bereich der Wirtschaftsinformatik

Dijkman (Dijkman *et al.*, 2009, 2011) bewertete Methoden zur Evaluation verschiedener Prozessmodelle aus einem Pool von Modellen, um dasjenige zu identifizieren, das dem Standardmodell am meisten ähnelt. Es wurden drei Metriken zur Messung der Ähnlichkeit präsentiert: *Label Matching*, das Bezeichnungen und Attribute verglich; *Struktur-Ähnlichkeit*, das zusätzlich zu den Bezeichnungen die Topologie des Prozessmodells verglich; und die *Ähnlichkeit im Verhalten*, die die Bezeichnungen gemeinsam mit dem kausalen Zusammenhang im Modell untersuchte.

Eine andere Forschungsarbeit von van der Aalst (van der Aalst *et al.*, 2006) betont die Wichtigkeit der Abstufung der Ähnlichkeit bei Untersuchungen von Eventlogs, die das typische Verhalten als Basis für den Vergleich beinhalten. Dadurch werden häufige Sequenzen automatisch priorisiert, wohingegen seltene Sequenzen weniger beachtet werden. Außerdem wurden von Rozinat und van der Aalst die

Übereinstimmung von Geschäftsprozessen mit dem Geschäftsprozessmodell auf Grundlage von Eventlogs untersucht (Rozinat u. van der Aalst, 2008).

Dahingegen untersuchten Cook und Wolf (Cook u. Wolf, 1999) Abweichungen bzw. Ähnlichkeit von Softwareprozessen zum jeweiligen Modell, indem sie Prozesse als eine Abfolge von Aktionen repräsentierten. Die Aktionen selbst haben keine zeitliche Ausdehnung. Demzufolge ist der Prozess als ein Fluss von Events zu sehen. Das Verhalten des Prozesses kann durchschaut werden, aber Strukturen und Verantwortlichkeiten wurden nicht beachtet. String-Distanz-Metriken wurden zur Messung der Ähnlichkeit genutzt.

Eine Methode zur Bestimmung der Ähnlichkeit und der Unterschiede zwischen Prozessmodellen mit den Zielen Prozessmining, Prozessdiscovery und Prozessintegration wurde von Bae (Bae *et al.*, 2006, 2007) präsentiert. Es wurde außerdem eine Ähnlichkeitsschwelle, basierend auf dem Jaccard Index eingeführt, die dazu diente Graphen zu selektieren, die nicht komplett verschieden zueinander waren. Danach wurden erst Distanzmessungen an den Graphen durchgeführt. Der Abhängigkeitsgraph des zugrundeliegenden Prozesses wurde in eine normalisierte Matrix überführt. Dann wurde die Distanz in Abhängigkeit des metrischen Abstands der Matrizen bestimmt.

So eine Prozessmatrix ist eine Adjazenzmatrix und wurde auch von Zha (Zha *et al.*, 2010) als Basis für Ähnlichkeitsberechnungen genutzt. Es wurde ein Algorithmus zur Evaluation von Ähnlichkeiten präsentiert. Die Ergebnisse der Berechnungen wurden mit Real-Life-Prozessen validiert.

Ähnlichkeit von Graphen

Basierend auf graphentheoretischen Aspekten können Graphmatching Methoden ebenso benutzt werden. Der *maximum common Subgraph-Algorithmus* wurde von Bunke (Bunke, 1997; Bunke u. Shearer, 1998; Bunke u. Kandel, 2000; Riesen *et al.*, 2007) genutzt und weiter entwickelt. Die Graph-Edit-Distanz beruht auf der kleinsten Anzahl von Lösch-, Einfüge- und Tauschoperationen von Knoten und Kanten. Außerdem bewies Bunke die Äquivalenz der Graph-Edit-Distanz und des *maximum common Subgraph-Algorithmus* durch die Nutzung spezieller Kostenfunktionen.

Dahingegen haben Robles-Kelly und Hancock (Robles-Kelly u. Hancock, 2003) Methoden der Bioinformatik eingeführt, um Graphen in Sequenzen durch Nebeneinanderstellen von stark korrelierten Knoten zu konvertieren. Außerdem wurde demonstriert, dass spektrale Seriation und die String-Edit-Distanz nützliche Methoden sind, um Graphen zu klassifizieren.

Zusammenfassung

Die Methoden in der vorliegenden Arbeit basieren weder auf Tracking-Technologien, noch auf Bewegungsdaten. Die Grundlage dieser Arbeit bilden die ausgeführten Arbeitsschritte, die mit dem ICCAS Workflow-Editor (Neumuth *et al.*, 2006a) aufgenommen wurden. In den vorgenannten Arbeiten zum Stand der Technik wurden oft nur Trainingsszenarien betrachtet, in der vorliegenden Arbeit dahingegen werden zusätzlich chirurgische Prozesse aus dem klinischen Alltag analysiert.

Zusammenfassend lässt sich durch die Vielzahl von Forschungsarbeiten zur Bestimmung der Distanz in vielen (nichtmedizinischen) Bereichen erkennen, dass dies ein wichtiges Thema ist. Die vorliegende Arbeit hebt sich vom Stand der Forschung ab, denn der Ablauf verschiedener chirurgischer Prozesse konnte bisher nicht quantitativ verglichen werden. Die Methoden sind nicht auf ein bestimmtes Fachgebiet eingeschränkt. Distanzmaße und die darauf aufbauenden Distanzanalysen in dieser Arbeit sind wichtige und neue Methoden, die sich sowohl in die bestehende Workflowanalyse eingliedern als auch in Assistenzsysteme implementiert werden können.

Nach dem Überblick über den aktuellen Stand der Forschung in diesem Bereich werden in der Folge die Methoden, die in dieser Arbeit verwendet werden, vorgestellt.

2.2 Modellierung chirurgischer Prozesse

Ein chirurgischer Prozess SP (*surgical process*) ist die Abfolge aller Tätigkeiten, die während der chirurgischen Behandlung eines spezifischen Patienten ausgeführt werden. In dieser Arbeit wird dabei der Schwerpunkt auf die intraoperativen Tätigkeiten gelegt, d.h. Arbeitsschritte, die während eines chirurgischen Eingriffs erfolgen. Ein Modell dieses chirurgischen Prozesses kann in formalen oder semiformalen Sprachen modelliert werden und wird SPM (*surgical process model*) genannt (Neumuth *et al.*, 2011a). Es gibt zwei grundsätzliche Arten von SPMs: Einerseits der patienten-individuelle Prozess iSPM (*individual SPM*) und andererseits den generischen Prozess gSPM (*generic SPM*) (Neumuth *et al.*, 2012b). Ein iSPM ist ein spezifischer chirurgischer Fall. Ein gSPM ist der mittlere Verlauf mehrerer iSPMs an einem theoretischen Patienten. In dieser Arbeit spielen gSPMs nur eine untergeordnete Rolle. Diese Begriffsdefinitionen folgen denen von Neumuth (Neumuth *et al.*, 2009, 2011b) und sind angelehnt an die Empfehlungen der WfMC-Terminologie (WfMC, 1999).

Die Arbeitsschritte innerhalb eines chirurgischen Prozesses werden als Aktivitäten aufgefasst. Eine Aktivität beinhaltet mehrere Informationen über den Arbeitsschritt. Die verschiedenen Informationsarten werden Perspektiven genannt und sind folgender Art: ausgeführte Tätigkeit (z.B. schneiden, saugen), benutztes chirurgisches Instrument (z.B. Skalpell, Sauger), betroffene anatomische Struktur (z.B. Haut, Siebbeinzellen), der Ausführende (z.B. Chirurg, Assistent) mit dem entsprechenden Körperteil (z.B. rechte Hand, beidhändig) sowie Start- und Stopzeit. Eine Aktivität kann also die Fragen *Wann?*, *Wer?*, *Was?*, *Womit?* und *Woran?* beantworten, siehe Abbildung 4 (Neumuth *et al.*, 2006b, 2011b). Für Analysen können einzelne Perspektiven oder Kombinationen der Perspektiven genutzt werden. Im Folgenden wird zur einfacheren Darstellung die Aktion (die ausgeführte Tätigkeit, das *Was?*) genutzt, sofern dies nicht anderweitig vermerkt ist.

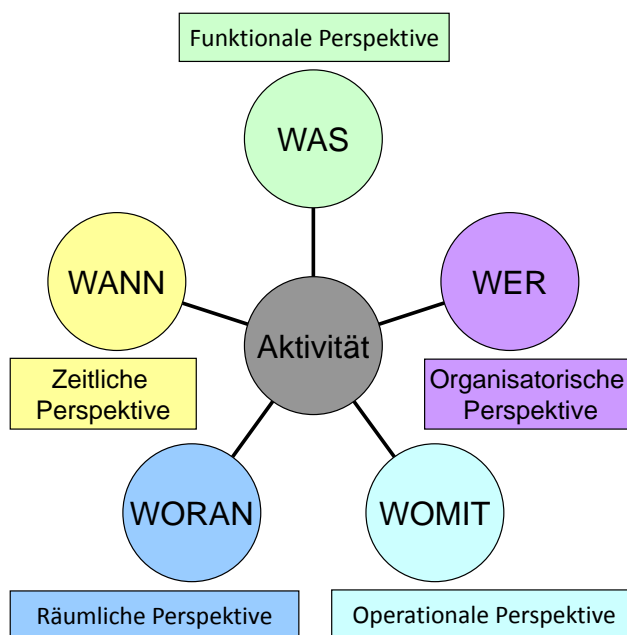


Abbildung 4: Eine Aktivität und die verschiedenen Perspektiven, aus denen sie betrachtet werden kann.

2.3 Distanzmaße

Distanz von chirurgischen Prozessen

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, ein Distanzmaß zu erarbeiten, das den Unterschied im Ablauf zwischen chirurgischen Prozessen misst. Nach der Abgrenzung des Begriffs des chirurgischen Prozesses im vorhergehenden Kapitel wird in diesem Abschnitt der Begriff der Distanz beschrieben.

Umgangssprachlich ist der Begriff der Ähnlichkeit verbreiteter. Distanz bzw. Unähnlichkeit und Ähnlichkeit haben gegensätzliche Bedeutungen. Je ähnlicher zwei Objekte sind, desto kleiner ist ihre Distanz und umgekehrt (Neumuth *et al.*, 2012b). Zwei Objekte sind ähnlich, wenn sie in mehreren Eigenschaften weitgehend übereinstimmen (Tversky, 1977; Janssen u. Laatz, 2013). Dabei wird bewusst die einfache Ja-Nein-Antwort (ist identisch – ist nicht identisch) erweitert, denn diese enthält zu wenig Information über den Vergleich, indem auch Abstufungen zugelassen werden (Cook u. Wolf, 1999; van der Aalst *et al.*, 2006; Zha *et al.*, 2010). Abstufungen können sein: ähnelt sehr stark, ähnelt ein bisschen, ähnelt kaum, etc. Davon ausgehend wird mit einem Ähnlichkeitsmaß der Grad der Übereinstimmung von interessierenden Eigenschaften zwischen zwei Objekten gemessen (Koschmider, 2007). Ein Distanzmaß misst dementsprechend die Unähnlichkeit. In dieser Arbeit sind die zu vergleichenden Objekte chirurgische Prozesse. Die Sequenz der Aktionen, d.h. die Abfolge der ausgeführten Tätigkeiten, ist die interessierende Eigenschaft, die in den Fokus der Distanzmessung gestellt wird. Demzufolge sind zwei chirurgische Prozesse als ähnlich anzusehen, wenn die Tätigkeiten und deren Abfolge weitgehend übereinstimmen. Mit Hilfe eines Distanzmaßes werden die unscharfen Begriffe *ähnlich* und *weitgehend* auf eine numerische Skala transformiert. Mit dieser Skala ist die Distanz messbar und die Ausprägung mit anderen Distanzen vergleichbar.

Auswahl der Distanzmaße für die Evaluationsstudie

Es bestehen eine Vielzahl von Methoden, um Distanzen zwischen zwei Objekten zu messen. Zur Quantifizierung von Unterschieden von chirurgischen Prozessen müssen Berechnungsmethoden bestimmte Voraussetzungen erfüllen, die sich aus den Eigenschaften von chirurgischen Prozessen ergeben. Die Anforderungen an die Distanzmaße werden in Tabelle 2 genannt und kurz begründet.

Anforderung an Maße	Kurzbeschreibung der Anforderung
Für Prozesse anwendbar	Chirurgische Prozesse werden untersucht.
Quantifizierbares Maß	Die Unterscheidung soll messbar und damit objektiv vergleichbar sein. Keine rein qualitative Methodik. Zusätzlich abgestuftes Maß (keine reine Ja-Nein-Antwort).
Ungleiche Länge	Chirurgische Prozesse haben unterschiedlich viele Arbeitsschritte.
Viele Arbeitsschritte	Chirurgische Prozesse können sehr viele Arbeitsschritte enthalten (z.B. > 500 bei neurochirurgischer Entfernung von Tumoren im Gehirn).
Keine Betrachtung der Zeit	Zeitliche Aspekte werden bewusst ausgeklammert. Die Gründe dafür sind die Betonung des Ablaufs, sowie die Methoden einfach zu halten.
Nur Basismethoden	Keine Spezialisierungen von Methoden, um die Breite der Anwendbarkeit groß zu halten, sowie die Methoden einfach zu belassen. Spezialisierungen können bei Bedarf für spezielle Fragestellungen implementiert werden.

Tabelle 2: Anforderungen an die Distanzmaße, die bei der Auswahl der zu evaluierenden Maße Berücksichtigung fanden.

In der Literatur existieren eine Vielzahl von Distanzmaßen (z.B. (Bunke u. Shearer, 1998; Aioli *et al.*, 2012; Levenshtein, 1966)). Im Anschluss wird eine Auswahl von heute in verschiedenen Domänen häufig verwendeter Distanzmaße aufgeführt. In einer Evaluationsstudie wurden die Kriterien in Tabelle 2 zu Grunde gelegt und die Distanzmaße daraufhin getestet. Tabelle 3 führt die gängigen Distanzmaße auf und beschreibt jeweils das Bewertungsergebnis.

Distanzmaß	Bewertungsergebnis
Hamingdistanz	nur für Zeichenketten fester Länge
Levenshteindistanz	wurde ausgewählt
Sequenzalignment	Spezialisierung der Levenshteindistanz
Jaccarddistanz	wurde ausgewählt
Dice-Koeffizient	ähnlich Jaccarddistanz
Manhattan-Metrik	nicht für Prozesse
Mahalanobis-Distanz	nicht für Prozesse
Jaro-Winkler-Distanz	für kurze Zeichenketten
Adjazenzdistanz	wurde ausgewählt
Rekurrenzplot	nur qualitativ
Compliance Analyse	nur qualitativ
Prozess-Benchmarking	nur qualitativ bzw. kennzahlenbasiert
Graphmatching	wurde ausgewählt
bipartites Graphmatching	Spezialisierung des Graphmatching
Graph-Edit-Distanz	Spezialisierung der Levenshteindistanz für lineare chirurgische Prozesse
Dynamic Time Warping	Betrachtung der Zeit

Tabelle 3: Übersicht über gängige Distanzmaße und das Ergebnis der Bewertung, zur Auswahl des Maßes zur detaillierten Untersuchung in einer Evaluationsstudie (vgl. Kapitel 3.2).

Ausgewählt für die Evaluation wurden: Jaccarddistanz, Levenshteindistanz, Adjazenzdistanz und Graphmatchingdistanz.

Sie erfüllen alle genannten Anforderungen zur Distanzmessung von chirurgischen Prozessen. Weiterhin wurden diese Maße gewählt, weil sie verschiedene Typen der Ähnlichkeit abdecken. Dies sind Mengen, Sequenzen, Kausalitäten und Strukturen als vergleichende Elemente der Prozesse. Dijkman (Dijkman *et al.*, 2011) hat analoge Typen von Metriken zur Messung der Ähnlichkeit von Geschäftsprozessen eingeführt.

Im nächsten Kapitel werden die vier Distanzmaße auf chirurgische Prozesse adaptiert und in einer Evaluationsstudie auf ihre Anwendbarkeit analysiert.

3 Einführung und Evaluation von Distanzmaßen

3.1 Distanzmaße für chirurgische Prozesse

3.1.1 Formale Grundlagen

Es wird eine Distanzfunktion $d(X_1, X_2)$ eingeführt, die die Distanz zwischen den chirurgischen Prozessen X_1 und X_2 angibt. Je unähnlicher die beiden Prozesse bzw. Entitäten sind, desto größer ist der Distanzwert. Für normalisierte Distanzwerte sei $0 \leq d(X_1, X_2) \leq 1$. Identische Entitäten haben also eine Distanz von 0.

Die Methodik der formalen Sprachen dient in dieser Arbeit als Grundlage zur Beschreibung der chirurgischen Prozesse. Ein Prozess kann als Konkatenation von Aktionen angesehen werden (Cook u. Wolf, 1999). Werden die Aktionen durch Buchstaben symbolisiert, kann ein chirurgischer Prozess X als Zeichenkette repräsentiert werden.

Das Alphabet $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M \mid m, M \in \mathbb{N}; 1 \leq m \leq M\}$ ist die Menge aller Symbole ω die die Menge der Aktivitäten Φ repräsentiert, die im chirurgischen Prozess durchgeführt werden können. Dabei ist M die Anzahl der unterschiedlichen Symbole bzw. Aktivitäten.

Die Funktion f sei eine bijektive Abbildung $f : \Phi \rightarrow \Omega$, die die Menge aller möglichen Aktivitäten umkehrbar eindeutig auf die Menge der Symbole Ω abbildet. Diese Abbildung wird als Mapping bezeichnet.

Sei $X^N = \{x_1, x_2, \dots, x_N \mid x_n \in \Omega; n, N \in \mathbb{N} : 1 \leq n \leq N\}$ eine Zeichenfolge der Länge N , mit $|X| = N$. Dies heißt, X^N ist ein chirurgischer Prozess mit N durchgeführten Arbeitsschritten (bzw. Anzahl der Aktivitäten im iSPM) x_1, x_2 bis x_N .

Sei $X^0 := \epsilon$, eine leere Zeichenkette mit Länge 0. Damit ist $X \cdot \epsilon = \epsilon \cdot X = X$ das neutrale Element. $(\Omega, \cdot, \epsilon)$ ist ein Monoid, wobei \cdot die Konkatenation zweier Zeichenfolgen ist.

Eine Subsequenz von Aktivitäten wird auch Teilwort genannt. Y^{N^*} heißt genau dann ein Teilwort von X^N , wenn $Y^{N^*} = \{y_{n^*}, \dots, y_{m^*} \mid 1 \leq n^* \leq m^* \leq N; n^*, m^* \in \mathbb{N}; y_i \in \Omega\}$. Es ist also $Y \in X$. Die Länge von Y^{N^*} berechnet sich zu $N^* = m^* - n^* + 1$. Übergänge oder 2er Tupel, sind dann alle Teilworte bzw. Subsequenzen für die $m^* = n^* + 1$ gilt. Sei $X \setminus \{X \setminus \Omega_m\} = X^*$ die Menge aller ω_m aus X . Dann ist die Kardinalität $|X^*| = C_m$ die Anzahl des m -ten Elements des Alphabets in der Zeichenkette bzw. im iSPM.

Es werden keine mathematischen Beweise geführt. Der Leser kann sich in anderen Studien wie (Bae *et al.*, 2006; Zha *et al.*, 2010; Bunke u. Shearer, 1998; Aioli *et al.*, 2012) davon überzeugen, dass Eigenschaften einer Metrik (Definitheit, Symmetrie und Dreiecksungleichung) erfüllt sind.

Anhand der Abbildung 5 werden die formalen Beschreibungen im nächsten Absatz erläutert.

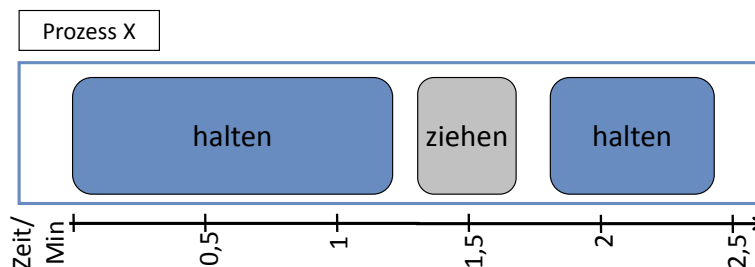


Abbildung 5: Visualisierung eines sehr kurzen theoretischen Prozesses X , anhand dessen eingeführten formale Begriffe beispielhaft gezeigt werden.

Die Menge der Aktivitäten ist $\Phi = \{\text{halten}, \text{ziehen}\}$. Die bijektive Abbildung f bildet Φ auf Ω ab ($\text{halten} = h$ und $\text{ziehen} = z$). Das Alphabet ist dann $\Omega = \{h, z\}$. Es gibt zwei unterschiedliche Symbole, also ist $M = 2$.

Der Prozess X wird dadurch als Zeichenfolge $X^3 = \{h, z, h\}$ der Länge 3 betrachtet. Ein mögliches Teilwort der Länge $N^* = 2$ ist $Y^2 = \{z, h\}$. Die Kardinalität der Aktivität halten ist $C_h = 2$, da diese zweimal ausgeführt wurde.

Nach kurzer Einführung der Theorie jedes Distanzmaßes wird die Berechnung durch die Beispielprozesse X_1 und X_2 aus Abbildung 6 illustriert. Im Anschluss daran wird in Kapitel 3.1.6 die Distanz aus den Beispielprozessen X_1 und X_2 mit weiteren Distanzen erläuternd zusammengefasst, um die Größenordnungen und Verhältnisse verschiedener Vergleiche darzustellen.

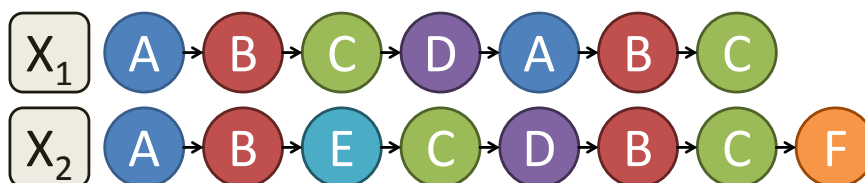


Abbildung 6: Beispiel Prozesse zur Berechnung der Distanzmaße beim Vergleich von X_1 und X_2 .

3.1.2 Jaccarddistanz

Die Jaccarddistanz beruht auf dem Jaccard Index, einem Ähnlichkeitsmaß. Der Jaccard Index wird zum Vergleich von Ähnlichkeiten und Unterschieden zwischen verschiedenen Mengen genutzt (Späth, 1981).

Der Jaccard Index berechnet sich aus dem Verhältnis der Anzahl gemeinsamer Elemente zur Größe der Vereinigungsmenge. Werden zwei iSPMs X_1 und X_2 miteinander verglichen berechnet sich die Anzahl der gemeinsamen Elemente $|X_1 \cap X_2| = \sum_{m=1, \dots, M} \min[C_{m1}, C_{m2}]$ als die Summe über die jeweiligen Minima der Kardinalitäten der Elemente des Alphabets in den beiden iSPMs. Die Größe der Vereinigungsmenge ist die Summe über die Maxima der Häufigkeiten der Elemente des Alphabets in den beiden iSPM, es ist $|X_1 \cup X_2| = \sum_{m=1, \dots, M} \max[C_{m1}, C_{m2}]$. Daraus folgt, dass die Jaccarddistanz folgendermaßen definiert wird:

$$d_{12}^J = 1 - \frac{|X_1 \cap X_2|}{|X_1 \cup X_2|} = 1 - \frac{\sum_{m=1, \dots, M} \min[C_{m1}, C_{m2}]}{\sum_{m=1, \dots, M} \max[C_{m1}, C_{m2}]} \quad (3.1)$$

Grundlage zur Berechnung der Jaccarddistanz bei chirurgischen Prozessen ist also, wie häufig einzelne Arbeitsschritte (z.B. *Schneiden*) in beiden Workflows ausgeführt werden, im Vergleich zur Gesamtzahl der Arbeitsschritte des längeren Prozesses. Dies wird erreicht, indem ein Arbeitsschritt A , wenn er das erste Mal ausgeführt wird, als A_1 gesehen wird und als A_2 , wenn er im gleichen Prozess das zweite Mal ausgeführt wird. Die Häufigkeit der Arbeitsschritte ist bedeutend für die Berechnung, da es differenziert zu betrachten ist, ob ein Schritt einzeln oder wiederholt durchgeführt wird. Dabei spielt die Reihenfolge bei der Jaccarddistanz keine Rolle. Der Vergleich von $X_1 = \{\text{ziehen, ziehen, halten, halten}\}$ und $X_2 = \{\text{halten, ziehen, halten, ziehen}\}$ führt zu einer Distanz $d_{12}^J = 0$. Dabei wird X_1 so interpretiert, als wäre $X_1 = \{\text{ziehen1, ziehen2, halten1, halten2}\}$. Ein Beispiel zur Berechnung der Jaccarddistanz ist in Abbildung 7 zu sehen.

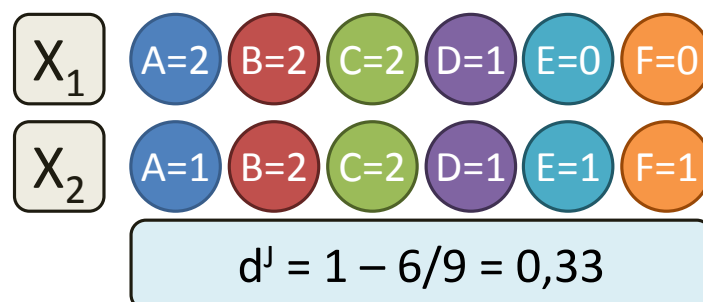


Abbildung 7: Berechnung der Jaccarddistanz für den Vergleich von X_1 und X_2 .

3.1.3 Levenshteindistanz

Die Levenshteindistanz (Levenshtein, 1966) wurde entwickelt, um die Ähnlichkeit von zwei Strings zu bewerten, wird deshalb oft auch als String-Edit-Distanz bezeichnet und wird heutzutage in verschiedenen Varianten genutzt. Als Grundlage dient die minimale Anzahl der Einfüge-, Lösch- und Ersetz-Operationen um einen String in einen anderen umzuwandeln.

Entsprechend der formalen Definition in Kapitel 2.2, kann ein chirurgischer Prozess als Zeichenkette angesehen und die Levenshteindistanz angewendet werden. Sei x_{i1} die i -te Aktivität in iSPM X_1 . Falls $x_{i1} \neq x_{i2}$, erfolgt die Ersetzung, indem x_{i2} mit x_{i1} substituiert wird.

Beim Löschen aus einem iSPM X_1 mit $|X_1| = N$ wird das Element x_{i1} eliminiert, wobei $i \leq N$ gelten muss. Der umgewandelte iSPM X_{neu} hat dann die Länge $|X_{\text{neu}}| = N - 1$, und es werden alle Indizes j für die $i < j \leq N$ gilt zu $j - 1$ transformiert.

Die Einfügeoperationen funktionieren nach dem gleichen Schema. Im iSPM X_1 der Länge $|X_1| = N$ wird an die Stelle i ein neues Element $\omega_m \in \Omega$ eingefügt. Die Indizes j für die gilt $i < j \leq N$ werden zu $j + 1$ transformiert, so dass $|X_{\text{neu}}| = N + 1$. Die durchgeführten Edit-Operationen E und deren Reihenfolge sind nicht eindeutig. Es gibt mehrere gleichwertige Möglichkeiten, um einen String in einen anderen umzuwandeln. Die Levenshteindistanz berechnet sich dann als die minimale Anzahl, die dafür notwendig ist:

$$d_{12}^L = \min \begin{cases} +0 & \text{wenn gleich} \\ +1 & \text{Ersetzung} \\ +1 & \text{Löschen} \\ +1 & \text{Einfügen} \end{cases} . \quad (3.2)$$

Ein Spezialfall ergibt sich, falls $X_1 \cap X_2 = \emptyset$ ist. Die Levenshteindistanz ist dann $d_{12}^L = \max[|X_1|, |X_2|]$. Grundlage der Berechnung der Levenshteindistanz ist dementsprechend nicht die Häufigkeit von Arbeitsschritten, sondern deren Ausführungsreihenfolge im chirurgischen Prozess. In Abbildung 8 ist eine Berechnung mit Hilfe der Edit-Operationen beispielhaft dargestellt.

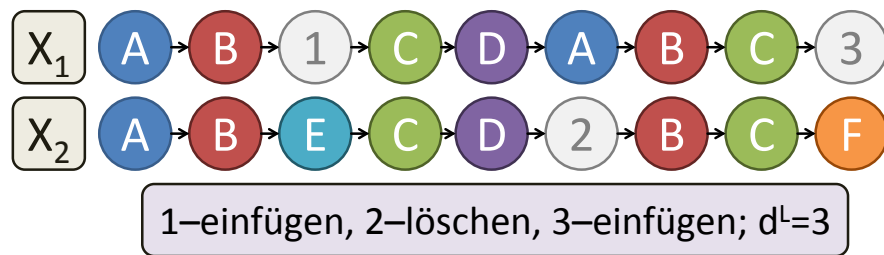


Abbildung 8: Berechnung der Levenshteindistanz für den Vergleich von X_1 und X_2 .

3.1.4 Adjazenzdistanz

Aufeinanderfolgende Arbeitsschritte in einem Prozess können mit Hilfe von Adjazenzmatrizen (Übergangsmatrizen) dargestellt werden (Zha *et al.*, 2010). Dazu wird eine Matrix $\Omega \times \Omega$ aus allen möglichen Aktivitäten erstellt. Die Elemente $\omega_m \in \Omega$ bilden die Zeilen und Spalten der Matrix. Die Adjazenzmatrix ist eine quadratische Matrix mit Kantenlänge $|\Omega| = M$. Für einen chirurgischen Prozess, d.h. eine Zeichenfolge X_1 , bilden sich die Elemente der Matrix wie folgt: Kardinalität C_{mk} der Subsequenz $Y = \{\omega_m \cdot \omega_k | 1 \leq m, k \leq M; m, k \in \mathbb{N}\}$ in X_1 , wobei alle Teilworte die Länge 2 haben, $|Y| = 2$. Für den Vergleich von zwei iSPM X_1 und X_2 werden entsprechend die beiden Adjazenzmatrizen MX_1 und MX_2 gebildet (Vergleich Abbildung 9). Um die Adjazenzdistanz zu berechnen, wird der Euklidische Abstand der beiden Matrizen MX_1 und MX_2 gebildet

$$d_{12}^A = \sqrt{(s_{11} - t_{11})^2 + \dots + (s_{MM} - t_{MM})^2}, \quad (3.3)$$

wobei $s_{mk} = C_{mk}$ in X_1 und $t_{mk} = C_{mk}$ in X_2 . Grundlage bei der Berechnung der Adjazenzdistanz sind die Übergänge zwischen den Arbeitsschritten und die Häufigkeit derer. Im Beispiel aus Abbildung 9 berechnet sich die Adjazenzdistanz zu $d_{12}^A = 3,32$ und $d_{13}^A = 6,32$.

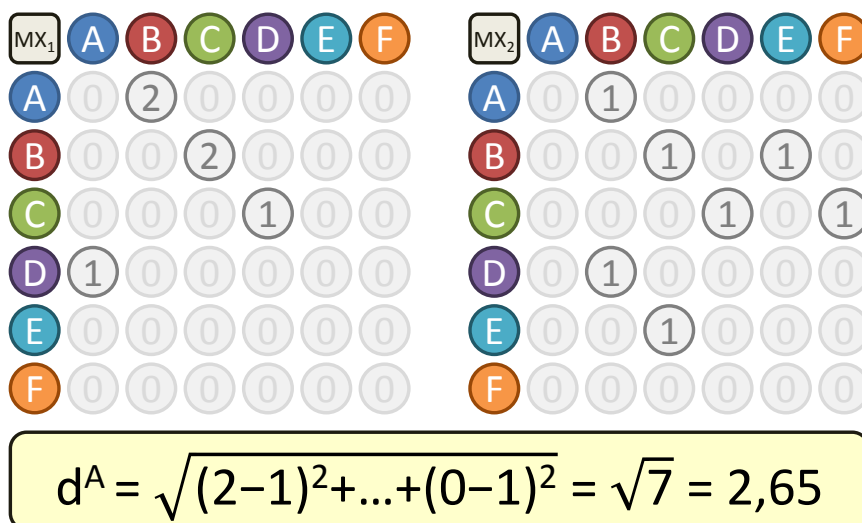


Abbildung 9: Berechnung der Adjazenzdistanz für den Vergleich von X_1 und X_2 . Die Elemente der Matrix bilden sich aus der Häufigkeit der Teilworte der Länge 2. Beispielsweise kommt $\{AB\}$ in Prozess X_1 zweimal und in x_2 einmal vor.

3.1.5 Graphmatchingdistanz

Das Graphmatching bedient sich aus Methoden der Graphentheorie. Bei Graphen können die Übergänge zwischen verschiedenen Knoten des Graphen durch die Adjazenzmatrix dargestellt werden (Bunke u. Shearer, 1998). Umgekehrt ist es möglich, aus der Adjazenzmatrix einen Graphen zu erstellen. Wird die Matrix, wie in Kapitel 3.1.4 beschrieben, erstellt und dann in einen Graphen transformiert, hat man eine Repräsentation des Ablaufs inklusive eventuell vorhandener Schleifen und Wiederholungen, sowie der möglichen Nachfolger und Vorgänger. Es sei darauf hingewiesen, dass es nicht eindeutig möglich ist, aus einem solchen Graphen einen iSPM zu generieren. Für die Berechnung der Distanz wird dies nicht benötigt.

Beim Vergleich von zwei iSPM X_1 und X_2 wird beim Graphmatching der Graph gesucht, der den maximalen gemeinsamen Teilgraph (*maximum common subgraph*) bildet. Dies geschieht durch Erstellung einer Subgraph-Matrix SG , indem elementweise das Minimum von MX_1 und MX_2 verwendet wird. $|G_1|$ ist die Anzahl der Kanten in Graph 1 der aus iSPM X_1 gebildet wird. In Abbildung 10 sind die zu den Matrizen aus Abbildung 9 gebildeten Graphen zu sehen. Die Distanz beim

Graphmatching berechnet sich wie folgt:

$$d_{12}^G = 1 - \frac{|SG|}{\max(|G_1|, |G_2|)} \quad (3.4)$$

Grundlage bildet der Ablauf des Prozesses, den beide chirurgischen Prozesse gemeinsam haben. Graphmatchingdistanz beruht auf dem Verhalten des Operators.

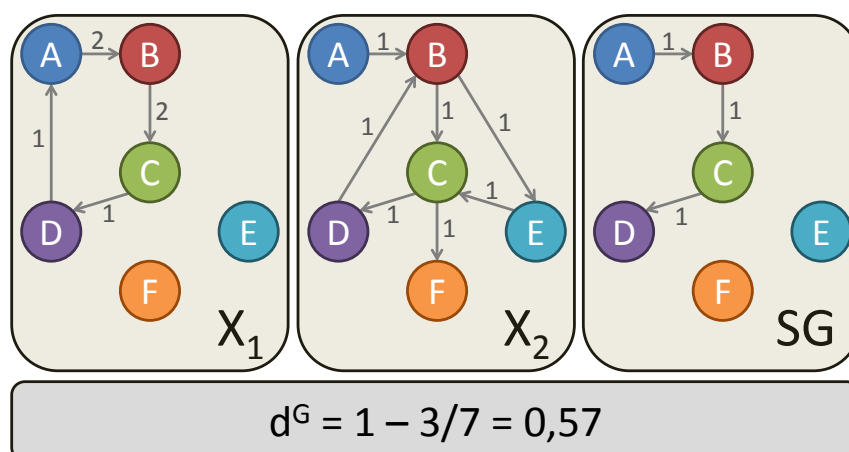


Abbildung 10: Darstellung der Graphen von X_1 und X_2 sowie des maximalen gemeinsamen Teilgraphen SG . Berechnung der Graphmatchingdistanz.

3.1.6 Zusammenfassung der Distanzmaße

Ziel ist die Entwicklung eines Distanzmaßes, das die Unterschiedlichkeit chirurgischer Prozesse quantifiziert. Es wurden vier Maße und deren Berechnung vorgestellt. In Abschnitt 2.3 wurde erläutert, dass die unscharfen Begriffe, die bei der qualitativen Beschreibung von Variationen im Prozessablauf genutzt werden, wie bspw. *weitgehend*, *ähnlich*, in eine Skala transformiert werden, die dann zur einheitlichen und vergleichenden Analyse von Prozess-Distanzen herangezogen werden kann. In diesem Kapitel wird dies anhand von drei abstrahierten chirurgischen Prozessen demonstriert, siehe Abbildung 11.

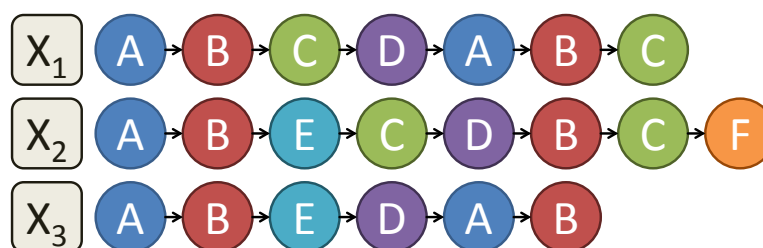


Abbildung 11: Beispiel Prozesse zur Berechnung der Distanzmaße beim Vergleich von X_1 , X_2 und X_3 .

Durch reine Betrachtung dieser Prozesse ist es schwer zu entscheiden, welche der Distanzen d_{12} , d_{13} oder d_{23} am größten ist und welche am kleinsten. Durch die Anwendung der Distanzmaße ergibt sich Tabelle 4:

Distanzmaß	d_{12}	d_{13}	d_{23}	Ordnung
Jaccard	0,33	0,38	0,44	$d_{12}^J < d_{13}^J < d_{23}^J$
Levenshtein	3	2	4	$d_{13}^L < d_{12}^L < d_{23}^L$
Adjazenz	2,65	2,65	2,83	$d_{13}^A = d_{12}^A < d_{23}^A$
Graphmatching	0,57	0,50	0,71	$d_{13}^G < d_{12}^G < d_{23}^G$

Tabelle 4: Vergleich der Distanzen zwischen den Prozessen X_1 , X_2 und X_3 . Die Unterschiede im Ablauf sind zwischen Prozess X_2 und X_3 am größten.

Als erstes fällt auf, dass die Wertebereiche der Distanzmaße sehr unterschiedlich sind. Um Distanzmaße untereinander vergleichen zu können, müsste eine Normierung eingeführt werden. Der Vergleich von Distanzmaßen untereinander ist kein Ziel dieser Arbeit. Stattdessen werden die Unterschiede zwischen Prozessen verglichen. Die kleinste Distanz wurde zwischen Prozess X_1 und X_3 gemessen. Davon abweichend ist nur die Jaccarddistanz, die die kleinste Distanz zwischen X_1 und X_2 maß. Zwischen den Prozessen X_2 und X_3 wurde einheitlich die größte Distanz berechnet. Die Auswahl des optimalen Distanzmaßes über eine Evaluationsstudie ist deshalb angebracht und wird in Kapitel 3.2 beschrieben.

Distanzen zwischen chirurgischen Prozessen wurden mit den eingeführten Maßen berechnet und über eine Skala vergleichbar gemacht.

3.2 Evaluationsstudie

3.2.1 Klinischer Kontext

In der Chirurgie finden minimalinvasive Operationsmethoden immer mehr Verbreitung und Einsatzmöglichkeiten. Die Gründe für den wachsenden Bedarf sind vielfältig. Zu den Vorteilen zählen geringeres Operationstrauma durch kleinere Schnitte, geringerer Blutverlust und niedrigere Infektionsraten (de Armas *et al.*, 2011; Guillotreau *et al.*, 2012; Pagador *et al.*, 2012). Nachteile sind in den größeren Anforderungen an den Operierenden hinsichtlich physischer, visueller und motorischer Belastung, sowie eingeschränkter räumlicher und haptischer Wahrnehmung zu sehen (Cao *et al.*, 1996; Guillotreau *et al.*, 2012; Pagador *et al.*, 2012). Maßgeblich limitierend ist die verdeckte Sicht auf das Operationsgeschehen. Genutzt werden Endoskope, die den räumlichen (3D) Arbeitsbereich in eine flächige Ebene (2D-Bildschirm) projizieren. Dies ist die größte Herausforderung in der Hand-Augen-Koordination und muss intensiv trainiert werden.

Konventionell werden minimalinvasive Operationen mit drei bis vier Schnitten durchgeführt, die bei Operationen im Bauchraum verteilt am Abdomen gesetzt werden, so dass bestmögliche Triangulation erreicht wird. Die Triangulation ist notwendig, um die geringen Bewegungs-Freiheitsgrade der laparoskopischen Instrumente und des Endoskops auszugleichen. Dadurch wird eine akzeptable Arbeitsweise ermöglicht.

Die Vorteile für den Patienten sind so groß, dass minimalinvasive Methoden kontinuierlich weiter entwickelt werden. Einige Bestrebungen gehen zu noch weniger Invasivität.

Bei der SILS (*single incision laparoscopic surgery*) Technologie wird im Gegensatz zur herkömmlichen Methode nur ein Schnitt propagiert. Dies führt zu einem noch besseren kosmetischen Ergebnis für den Patienten, weniger postoperativen Schmerzen und schnellerer Entlassung aus dem Krankenhaus (de Armas *et al.*, 2011). Problematisch bei der SILS-Technik ist die fehlende Triangulation. Mit konventionellen geraden Instrumenten kommt es zu Instrumentenkollisionen, die die Eingriffe fundamental erschweren. Durch neuartige laparoskopische Instrumentendesigns, wie abgewinkelte Instrumentenspitzen oder komplett frei beweglichen Spitzen, soll die Triangulation und die ergonomische Arbeitsweise wieder hergestellt werden.

3.2.2 Studienaufbau zur Evaluation der Distanzmaße

Die Klinik und Poliklinik für Kinderchirurgie an der Universität Leipzig hat 2010/11 in Zusammenarbeit mit dem Innovationszentrum für Computergestützte Chirurgie (ICCAS) eine Workflowanalyse zur ergonomischen Beurteilung konventioneller versus single-incision laparoskopischer Chirurgie (Bühligen *et al.*, 2010) durchgeführt.

In dieser Studie wurden zwei Instrumententypen betrachtet: konventionelle Instrumente, mit gerader Spitze gegenüber Instrumenten der transanalen endoskopischen Mikrochirurgie (TEM) mit abgewinkelter Spitze. Ferner wurden zwei Zugangsarten untersucht: der konventionelle 3-Trokar Zugang gegenüber dem Triport 1-Trokar Zugang. Durch Kombination ergaben sich vier unterschiedliche Settings, die in Abbildung 12 dargestellt sind. Bei Setting D (konventionelle Instrumente im 1-Trokar Zugang) ergibt sich durch die fehlende Triangulation keine handhabbare Arbeitssituation. Aus diesem Grund wurde diese Kombination in dieser Arbeit zukünftig nicht mehr betrachtet. Auswertungen und Daten werden nur aus den Settings A bis C herangezogen.

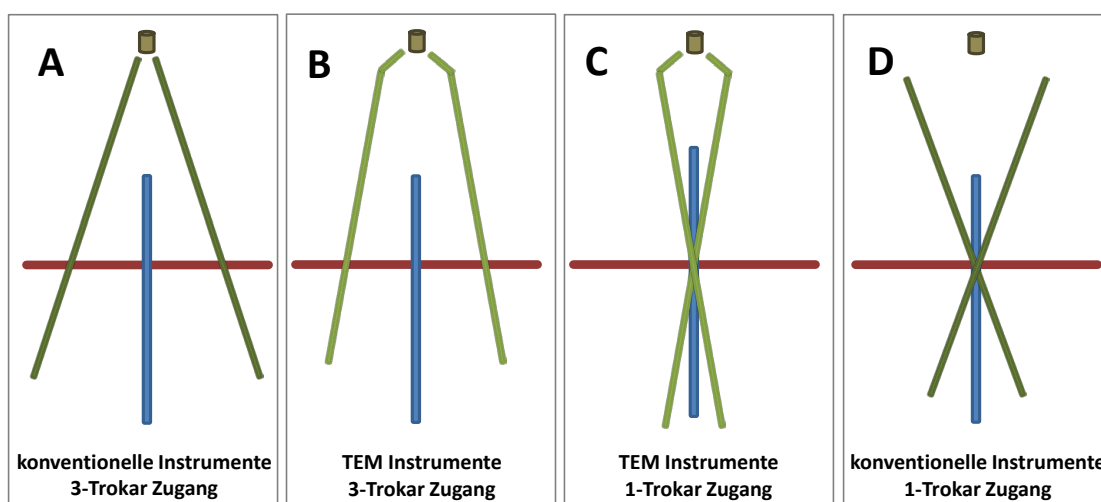


Abbildung 12: Schematische Darstellung der vier Settings von laparoskopischen Instrumenten und deren Zugangsarten.

Zur Beurteilung dieser Settings wurden diese in einem Trainingsszenario getestet. Dazu wurden drei typische minimalinvasive Operationssituationen extrahiert, die dann an Phantomen durchgeführt wurden. Die drei Konstellationen wurden in Aufgaben überführt:

- Aufgabe 1 Schneiden (Ablation eines ca. 1cm breiten Streifens am oberen Rand des Phantoms)
- Aufgabe 2 einfaches Nähen (Zusammennähen eines schlauchartigen Phantoms mit 4 Stichen)
- Aufgabe 3 komplexes Nähen (Anastomose, Zusammennähen von zwei schlauchartigen Phantomen mit 4 Stichen)

In Abbildung 13 sind die Phantome der drei Aufgaben nach Bearbeitung durch einen Probanden abgebildet. Sie bestehen aus einem Silikonmaterial und bilden damit menschliches Gewebe in Eigenschaften wie Festigkeit und Elastizität gut ab.



Abbildung 13: Fertig bearbeitete Phantome für die Aufgaben *Schneiden*, *einfaches Nähen* und *komplexes Nähen*.

Das Abdomen wurde mit Hilfe des Pelvitainers (Mettler u. Semm, 1994) dargestellt. Die Trainingssessions wurden von 10 Probanden durchgeführt. Die Probanden teilten sich in zwei gleichgroße Gruppen: erfahrene Chirurgen (Experten) mit mehrjähriger Praxis in minimalinvasiver Chirurgie und unerfahrene Probanden (Novizen) mit keinerlei minimalinvasiver Erfahrung, bestehend aus Medizinstudenten. Jede Aufgabe wurde in drei Settings von jedem Probanden fünf Mal wiederholt, so dass 450 chirurgische Prozesse zur Analyse vorlagen.

Der Versuchsaufbau, vgl. Abbildung 14, bestand aus dem Pelvitainer, in den das entsprechende Phantom eingespannt wurde. Das Endoskop wurde durch einen geschulten Helfer geführt. Mit einer Videokamera wurden die Versuche dokumentiert. Das Endoskopbild stand dem Probanden zur Verfügung und wurde parallel dazu mit Hilfe eines Videograbbers auf einem Laptop aufgezeichnet. Ein Supervisor beaufsichtigte die Versuche und führte das Studienprotokoll. Neben der technischen Überwachung wies er die Probanden in die geforderte Aufgabenstellung ein und erläuterte technische und organisatorische Details.

Jeder einzelne Versuch wurde durch einen Schlüssel eindeutig identifiziert. Das fertig bearbeitete Phantom als Ergebnis des Prozesses wurde mit dem Schlüssel gekennzeichnet. Nach Beendigung der Versuche wurden in einem Doppel-Blind-Verfahren alle Ergebnisse durch vier Mediziner unabhängig voneinander in einem Qualitätsreview bewertet, siehe Kapitel 5.3.



Abbildung 14: Links: Versuchsaufbau mit 1-Trokar Zugang. Rechts: Im Pelvitrai-ner eingespanntes Phantom zum komplexen Nähen mit gewinkelten laparoskopischen Instrumenten.

Ein weiterer Schritt im Postprozessing ist das Zusammenschneiden von Endoskop- und Dokumentations-Video, inkl. einem eingblendetem Zeitstempel. Auf Grundlage dieses synchronisierten Videos wurden die real ausgeführten chirurgischen Arbeitsschritte mit Hilfe des Surgical Workflow-Editor in einen iSPM überführt.

Die Protokollierung der Aktivitäten geschah aufgrund der sehr feingliedrigen Arbeitsweise bzw. Bewegungen auf einem sehr hohen Granularitätslevel. Die Dekomposition des chirurgischen Prozesses in einzelne chirurgische Bewegungen folgt der hierarchischen Gliederung von MacKenzie (Cao *et al.*, 1999; MacKenzie *et al.*, 2001). Dort wurden fünf Basis-Bewegungen identifiziert. In der Evaluationsstudie dieser Arbeit wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Aktionen genutzt. Weiterhin sind alle nachfolgenden Analysen der Tätigkeiten auf die rechte Hand des Chirurgen beschränkt. Da alle an den Studien beteiligten Chirurgen rechtshändig arbeiteten, spiegelt dies den Hauptprozess wieder.

Ebenfalls in Tabelle 5 ist das Mapping der Aktionen auf eine Menge von Symbolen zu sehen. In Kapitel 2.2 wurde das Mapping eingeführt, um eine Abfolge von Arbeitsschritten umkehrbar eindeutig in einen String zu konvertieren auf den dann die Distanzmaße angewendet werden können.

Die Aktivitäten haben innerhalb der OP einen Start-Zeitpunkt sowie einen End-Zeitpunkt und daraus folgend eine bestimmte Dauer. Die grün gekennzeichneten

Aktivität	Mapping
drücken	A
greifen, erfolgreich	B
greifen, nicht erfolgreich	C
halten	D
loslassen	E
schneiden	F
stechen	G
umgreifen	H
ziehen	I
zurechtlegen	J

Tabelle 5: Mapping der protokollierten Aktivitäten auf Buchstaben, zur Konvertierung chirurgischer Prozesse in einen String. Grün gekennzeichnet sind Events.

Arbeitsschritte werden als Events bezeichnet, sie haben einen Zeitpunkt, an dem sie stattfinden, aber keine zeitliche Ausdehnung. In Abbildung 15 ist ein Ausschnitt eines chirurgischen Prozesses mit den durchgeführten Schritten dargestellt.

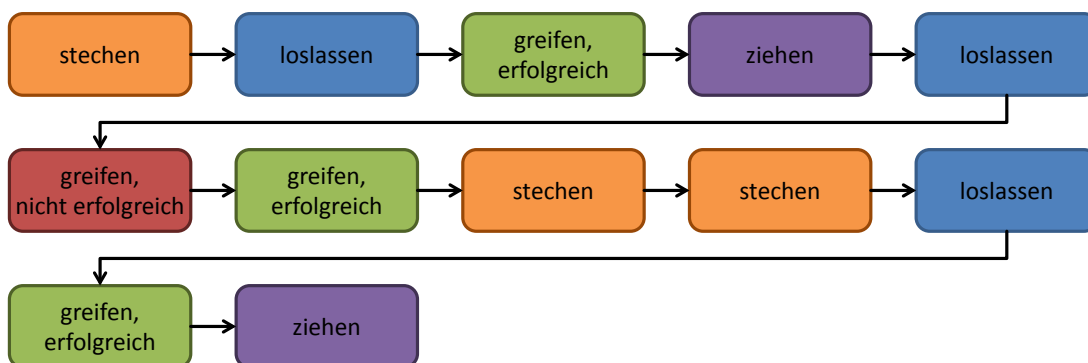


Abbildung 15: Ein Chirurgischer Prozess, der im Rahmen der Studie für laparoskopische Instrumente durchgeführt wurde. Der zugehörige String (nach dem Mapping entsprechend Tabelle 5) ist **GEBIECBGGEBI**.

Für weitere Analysen in minimalinvasiver Chirurgie wäre ein automatisches Tracking der Trajektorien der Instrumentenspitze von Vorteil, (vgl. Pagador *et al.*, 2012). Diese könnten auf Geschwindigkeiten, Beschleunigung und zurückgelegten Weg hin untersucht werden. Eine denkbare Untersuchung wäre die Präzision der Bewegung des Instruments vom Start- zum Zielpunkt. Zu erwarten sind Abweichungen vom kürzesten Weg aufgrund der schwierigen Hand-Augen-Koordination.

3.2.3 Ergebnisse der Evaluation

Ziel der Evaluation ist es, die Eignung der Distanzmaße zur Unterscheidung der Abläufe von chirurgischen Prozessen zu analysieren. Dazu werden die Distanzmaße auf die chirurgischen Prozesse der klinischen Studie zur Untersuchung laparoskopischer Instrumente und Zugangsarten (vgl. Kapitel 3.2.2) angewandt. Ausgewählt werden dann die Maße, die die Unterscheidung zwischen den Probandengruppen (Experten bzw. Novizen) am besten darstellen.

Grundlage dafür ist die These, dass Experten im Vergleich zu den Novizen die Aufgaben auf sehr ähnlichem Wege erfüllen und wenig Variabilität in den durchgeführten Arbeitsschritten aufweisen. Dies führt zu kleineren Distanzmaßen innerhalb der Gruppe der Experten. Diese Annahme kann sehr gut mit bisherigen Untersuchungen begründet werden. Forestier (Forestier *et al.*, 2012) stellte fest, dass erfahrene Operateure weniger Bewegungen durchführen und ökonomischer in den Handlungen sind. Pagador (Pagador *et al.*, 2012) untersuchte neben Zeitdauern auch die Trajektorien der Instrumentenspitzen. Das Fazit ist, dass Novizen nicht nur länger brauchen und mehr Arbeitsschritte machen, sondern auch Bewegungen und Aktionen durchführen, die nicht direkt zielführend sind. Diese resultieren aus Unsicherheit und fehlendem Training in der minimalinvasiven Technik, wie bspw. erschwerte Hand-Augen-Koordination.

Die These der größeren Distanzen innerhalb der Gruppe der Novizen im Vergleich zu den kleineren Distanzen innerhalb der Gruppe der Experten ist gut begründet und dient hier als Auswahlkriterium, um das probateste Distanzmaß für chirurgische Prozesse zu identifizieren.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse dargestellt. Der Mittelwert und die Standardabweichung des jeweiligen Distanzmaßes wird berechnet. Dazu werden ein bestimmtes Setting und eine bestimmte Aufgabe gruppiert und dann der Mittelwert über den Vergleich Jeder-gegen-Jeden innerhalb der Experten bzw. Novizen ermittelt. Mit Hilfe des Mann Whitney U Tests (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$) werden die beiden Gruppen Experten gegen Novizen getestet. Grün markiert sind alle Werte die der These entsprechen. Der Grad der Übereinstimmung ist jeweils in der letzten Zeile angegeben und gibt an bei wie vielen der getesteten Szenarien signifikante Unterschiede festgestellt wurden. Unterschiede in der Realität werden durch das Distanzmaß gut erfasst, wenn der Grad der Übereinstimmung größer als 75% ist. Das Ergebnis dieser Studie zeigt für die Levenshtein- 89% und die Adjazenzdistanz 78% Übereinstimmung. Diese Distanzmaße sind gut geeignet, die Unterschiede der chirurgischen Prozesse abzubilden. Jaccard- 33% und Graphmatchingdistanz 22% sind dahingegen weniger gut dafür geeignet.

Setting	Aufgabe	Experten	Novizen	Signifikanz
		Jaccarddistanz		
gewinkelte Instrumente, 3-Trokar	schneiden	0,50 ± 0,11	0,60 ± 0,13	$p < 0,050$
	einfaches nähen	0,39 ± 0,09	0,58 ± 0,06	$p < 0,001$
	komplexes nähen	0,38 ± 0,10	0,49 ± 0,07	$p < 0,050$
gewinkelte Instrumente, 1-Trokar	schneiden	0,46 ± 0,20	0,53 ± 0,12	$p > 0,050$
	einfaches nähen	0,50 ± 0,08	0,51 ± 0,05	$p > 0,050$
	komplexes nähen	0,44 ± 0,06	0,37 ± 0,05	$p < 0,050$
gerade Instrumente, 3-Trokar	schneiden	0,48 ± 0,22	0,50 ± 0,19	$p > 0,050$
	einfaches nähen	0,48 ± 0,13	0,48 ± 0,09	$p > 0,050$
	komplexes nähen	0,44 ± 0,08	0,51 ± 0,14	$p > 0,050$
Übereinstimmung mit These		33%		
		Levenshteindistanz		
gewinkelte Instrumente, 3-Trokar	schneiden	1,8 ± 0,7	9,4 ± 5,6	$p < 0,001$
	einfaches nähen	20,8 ± 5,1	125,9 ± 30,8	$p < 0,001$
	komplexes nähen	23,2 ± 7,2	103,7 ± 23,8	$p < 0,001$
gewinkelte Instrumente, 1-Trokar	schneiden	2,9 ± 2,4	5,4 ± 3,0	$p < 0,050$
	einfaches nähen	58,6 ± 14,9	124,6 ± 26,8	$p < 0,001$
	komplexes nähen	53,3 ± 14,8	116,6 ± 10,9	$p < 0,001$
gerade Instrumente, 3-Trokar	schneiden	3,4 ± 2,8	8,0 ± 7,2	$p > 0,050$
	einfaches nähen	37,3 ± 20,9	51,9 ± 20,2	$p < 0,050$
	komplexes nähen	28,4 ± 10,1	69,1 ± 26,4	$p < 0,001$
Übereinstimmung mit These		89%		
		Adjazenzdistanz		
gewinkelte Instrumente, 3-Trokar	schneiden	1,3 ± 0,4	9,3 ± 5,7	$p < 0,001$
	einfaches nähen	9,1 ± 1,5	47,8 ± 11,5	$p < 0,001$
	komplexes nähen	10,1 ± 2,7	38,1 ± 9,7	$p < 0,001$
gewinkelte Instrumente, 1-Trokar	schneiden	2,0 ± 1,2	5,4 ± 3,1	$p < 0,001$
	einfaches nähen	20,5 ± 5,2	44,1 ± 9,5	$p < 0,001$
	komplexes nähen	17,9 ± 4,7	41,6 ± 8,6	$p < 0,001$
gerade Instrumente, 3-Trokar	schneiden	3,0 ± 2,3	6,5 ± 5,2	$p > 0,050$
	einfaches nähen	14,6 ± 5,9	19,8 ± 7,0	$p > 0,050$
	komplexes nähen	11,3 ± 2,5	24,7 ± 9,0	$p < 0,001$
Übereinstimmung mit These		78%		
		Graphmatchingdistanz		
gewinkelte Instrumente, 3-Trokar	schneiden	0,88 ± 0,10	0,67 ± 0,13	$p < 0,001$
	einfaches nähen	0,51 ± 0,09	0,64 ± 0,08	$p < 0,050$
	komplexes nähen	0,47 ± 0,11	0,56 ± 0,08	$p < 0,050$
gewinkelte Instrumente, 1-Trokar	schneiden	0,94 ± 0,06	0,63 ± 0,15	$p < 0,001$
	einfaches nähen	0,58 ± 0,10	0,57 ± 0,07	$p > 0,050$
	komplexes nähen	0,53 ± 0,09	0,45 ± 0,08	$p > 0,050$
gerade Instrumente, 3-Trokar	schneiden	0,90 ± 0,13	0,56 ± 0,18	$p < 0,001$
	einfaches nähen	0,59 ± 0,16	0,61 ± 0,12	$p > 0,050$
	komplexes nähen	0,54 ± 0,12	0,62 ± 0,16	$p > 0,050$
Übereinstimmung mit These		22%		

Tabelle 6: Distanzen zwischen erfahrenen und unerfahrenen Probanden.

In der Abbildung 16 sind die Boxplots für das Setting gewinkelte Instrumente und 1-Trokar aus der in Tabelle 6 dargestellten Ergebnisse abgebildet. Erkennbar ist, dass sich die Boxplots in den zwei Gruppen der erfahrenen und unerfahrenen Probanden für die Jaccarddistanz und die Graphmatchingdistanz wenig unterscheiden. Bei Levenshtein- und Adjazenzdistanz sind die Distanzen bei den Novizen signifikant höher als bei den Experten. Diese beiden Distanzen können also den Unterschied quantifizieren.

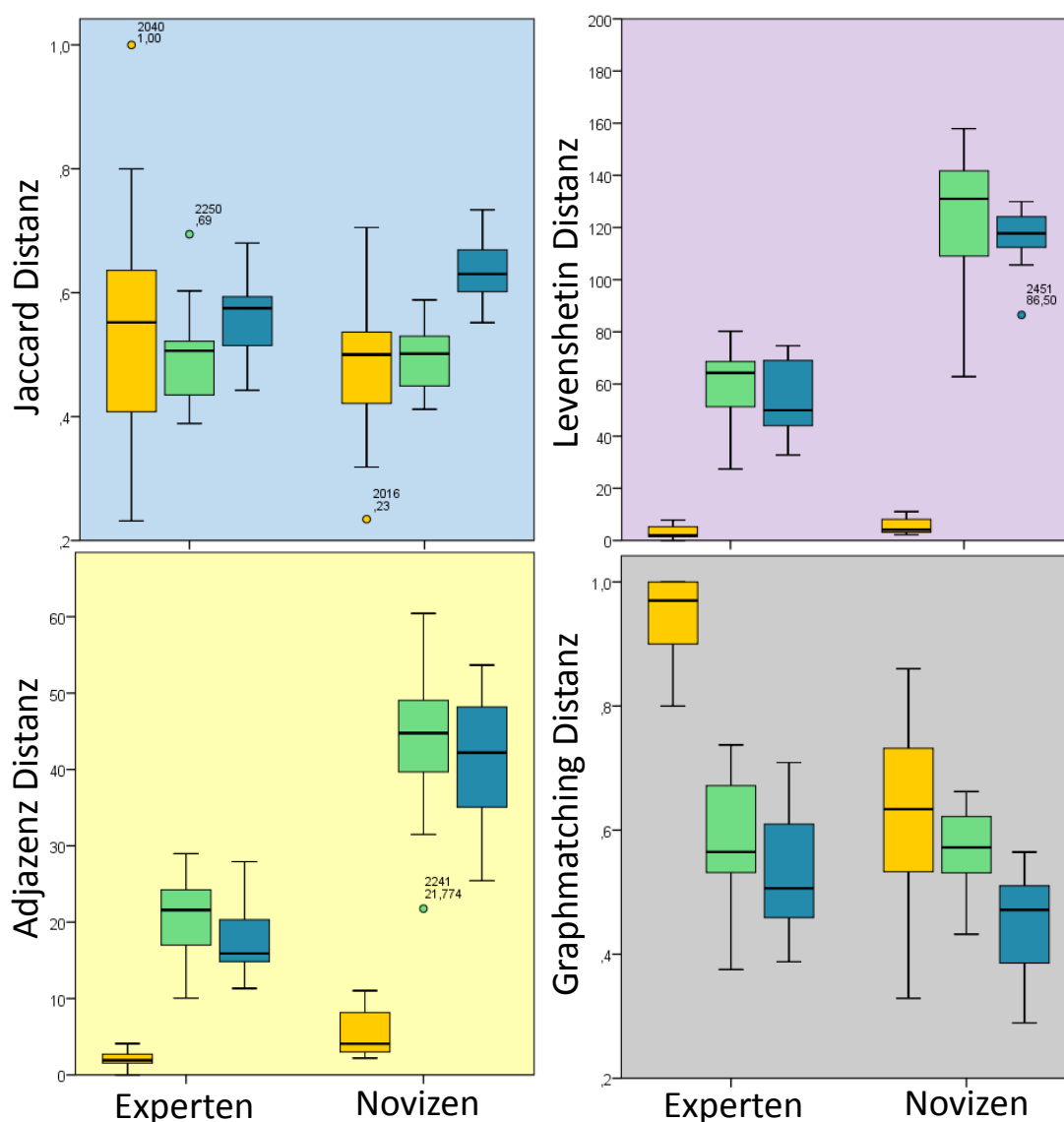


Abbildung 16: Boxplots für die vier Distanzmaße im Setting gewinkelte Instrumente und 1-Trokar. Die verschiedenen Aufgaben sind farbkodiert: gelb = Schneiden, grün = einfaches Nähen, blau = komplexes Nähen.

3.3 Diskussion

Die Ergebnisse in Tabelle 6 zeigen, dass Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz besser als Jaccard und Graphmatchingdistanz geeignet sind, um Unterschiede im Ablauf chirurgischer Prozesse zu messen. Die Levenshteindistanz schneidet mit einem Wert von 89% am besten ab. Bei der praktischen Anwendung der Distanzmaße sollten die Fragestellungen und die Schwerpunkte, die beim Ablauf des chirurgischen Prozess eine Rolle spielen, berücksichtigt werden, da jedes der vier vorgestellten Distanzmaße auf eigenen Basiseigenschaften beruht. Sind diese für die Auswertung wichtig, kann die Nutzung von Graphmatching oder Jaccarddistanz trotzdem vorteilhaft sein. Die zugrundeliegenden Basiseigenschaften sind in den Kapiteln 3.1.2 bis 3.1.5 dargelegt und werden im Folgenden näher erläutert.

Die Jaccarddistanz basiert auf den Häufigkeiten von Aktionen im ganzen Prozess, aber nicht auf deren Reihenfolge. Ähnliche Abläufe haben auch ähnliche Häufigkeiten, währenddessen die Umkehrung nicht notwendigerweise gilt (bspw. $d^J(AABB, BABA) = 0$).

Die Jaccarddistanz lässt sich auch bei großen Datenmengen (das sind Prozesse mit vielen Arbeitsschritten oder viele Prozesse) gut und schnell berechnen. Dies kann ausgenutzt werden, indem die Jaccarddistanz zur Vorsortierung genutzt wird. Dabei werden nur Prozesse, deren Distanzmaße unter einem bestimmten Grenzwert liegen, für weitere Bearbeitungen genutzt.

Die Levenshteindistanz wird berechnet, indem die minimale Anzahl an Edit-Operationen (Ersetzen, Einfügen, Löschen) gesucht wird, um eine Abfolge von Arbeitsschritten in eine andere Abfolge zu transformieren. Somit basiert die Levenshteindistanz nicht nur auf den Häufigkeiten von Aktionen, sondern vor allem die Reihenfolge der Aktionen spielt eine Rolle. Die sehr gute Eignung zur Messung von Unterschieden zwischen chirurgischen Prozessabläufen ist durch die Betrachtung der Reihenfolge der ausgeführten Arbeitsschritte gut begründet.

Zwei hintereinander ausgeführte Aktionen spielen bei der Adjazenzdistanz die Hauptrolle. Die paarweise Zusammengehörigkeit der Arbeitsschritte und deren Häufigkeit ist die Basis zur Berechnung der Distanz zwischen Prozessen mit Adjazenzmatrizen (sog. Übergangsmatrizen). Alle vorkommenden Sequenzen von zwei aufeinanderfolgenden separaten Arbeitsschritten und die Häufigkeit dieser Sequenzen ist ein gutes Gerüst, um die Abfolge der durchgeführten Aktivitäten darzustellen. Damit ist auch die Adjazenzdistanz eine gute Methode zur Messung von Distanzen zwischen Prozessen.

Graphmatchingdistanz nutzt Methoden der Graphentheorie und betrachtet übereinstimmende Aktionsreihenfolgen. Diese Methodik verursacht inhaltliche Probleme, weil es in der verwendeten Studie Prozesse gibt, die nur aus einem einzelnen Arbeitsschritt bestehen. Beispielsweise wird bei $d^G(A, AAA) = 1$ die Aktion A einmal bzw. dreimal ausgeführt. Intuitiv unterscheiden sich die Prozesse nicht sehr stark, trotzdem wird beim Graphmatching eine Distanz von 1 berechnet. Die anderen vorgestellten Distanzmaße führen in dieser Situation zu besseren Werten. Ob eine Adaption der Methode dieses Problem umgehen kann, sollte in zukünftigen Arbeiten untersucht werden.

Die weniger variablen Arbeitsweisen von erfahrenen Chirurgen im Vergleich zu Novizen wurden analysiert und bilden das Grundkonzept der Evaluationsstudie. Es wurde gezeigt, dass Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz gut geeignet sind, um Unterschiede im Ablauf von chirurgischen Prozessen zu quantifizieren (Schumann *et al.*, 2013a). Jaccarddistanz und Graphmatchingdistanz sind dahingegen nicht sensitiv genug zur Erfassung der Unterschiede.

4 Prognose der Distanz von laufenden chirurgischen Prozessen

4.1 Motivation zur Prognose der Distanz

Die konventionelle chirurgische Workflowanalyse betrachtet die Prozesse retrospektiv. Durch die retrospektive Revision können in zukünftigen Eingriffen die Erkenntnisse genutzt werden und eventuell erneut auftretende Probleme besser gelöst oder gar vermieden werden. Dahingegen benötigt chirurgisches Workflowmanagement im Operationssaal Prozessinformationen über den laufenden chirurgischen Eingriff (Cleary u. Kinsella, 2005; Neumuth *et al.*, 2012a). Eine Erweiterung der Workflowanalysen auf die Prognose der Distanz von laufenden chirurgischen Prozessen kann die benötigten Prozessinformationen bereitstellen.

Informationen über den aktuellen chirurgischen Eingriff können Verbesserungen im Zeit- und Ressourcenmanagement bewirken. Distanzanalysen helfen die laufende OP zu klassifizieren. Aufgrund der Ähnlichkeit zu bereits abgelaufenen Operationen können Vorhersagen zum Ressourcenbedarf gemacht werden. Dadurch kann beispielsweise die Nutzung von speziellen medizinischen Geräten, wie Ultraschallgeräte, besser und effizienter geplant werden.

Desweiteren ist es möglich, aus der Klassifikation Erkenntnisse über noch zu erwartende kritische Situationen im zukünftigen OP-Verlauf zu gewinnen. Komplikationen oder Probleme, die den Operationsverlauf negativ beeinflussen, können umgangen oder abgeschwächt werden. Das Ziel, die Therapie des Patienten besser und sicherer durchzuführen, kann dadurch erreicht werden.

Die Klassifikation kann durch Distanzanalysen erfolgen. Abweichungen von einem oder mehreren Referenzprozessen können mit Hilfe der in Kapitel 3.2 eingeführten Distanzmaße bestimmt werden.

Ziel der Untersuchungen in diesem Abschnitt ist die Distanzanalyse zur Laufzeit eines chirurgischen Prozesses. Folgende Hypothese wird untersucht:

Hypothese 1:

Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Distanz zur Laufzeit eines chirurgischen Eingriffs und der Distanz nach dem kompletten Ablauf des Eingriffs.

4.2 Stand der Forschung

Um Distanzanalysen bereits während des aktuellen chirurgischen Eingriffs vorzunehmen, sind Informationen über die aktuellen Arbeitsschritte notwendig. Die Bereitstellung derer ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Denkbar ist eine Vernetzung des Surgical Workflow-Editors, mit dessen Hilfe Beobachter die Operation protokollieren. Desweiteren bestehen Ansätze zur automatischen Detektion der Aktionen auf verschiedenen Granularitätsleveln (Padoy *et al.*, 2008).

Padoy betonte außerdem die Vorteile von Assistenzsystemen, die zur Laufzeit Informationen liefern und für vielfältige Zwecke genutzt werden können. Dazu gehören Steuerung von OP-Licht, Bestellung des nächsten Patienten, sowie komplexere Aufgaben wie kontextsensitive Benutzeroberflächen oder automatische Dokumentationen.

Andere Arbeiten am ICCAS, beispielsweise Franke (Franke *et al.*, 2013), machten Vorhersagen über die verbleibende Operationszeit. Genutzt wurden dazu feingranulare chirurgischen Prozessmodelle. Lumbare Diskektomien sowie Gehirntumorentfernungen wurden untersucht und die verbleibende Zeit mit einem mittleren Fehler von 13 bzw. 29 Minuten vorhergesagt.

Die Vorhersagen von Franke können signifikant verbessert werden, wenn der Algorithmus zur Vorhersage der verbleibenden OP-Zeit nicht auf alle verfügbaren Referenzprozesse angewendet wird, sondern nur auf relevante Teilmengen. Relevante Teilmengen der Referenzprozesse können durch Distanzanalysen des laufenden Eingriffs identifiziert werden.

Im Bereich des Geschäftsprozessmanagements gibt es Arbeiten, die sich mit der Abweichung des laufenden Prozesses von Service Level Agreements befassen. Abweichungen und Ausnahmen werden als Qualitätsverlust verstanden und sollten vermieden werden. Die Vorhersage von Abweichungen und daraus folgenden Gegenmaßnahmen im laufenden Prozess wurden z.B. von Grigori (Grigori *et al.*, 2001) untersucht.

Bezogen auf den medizinischen Bereich können Leitlinien zur Durchführung eines bestimmten chirurgischen Eingriffs auch als die Service Level Agreements interpretiert werden, deren Einhaltung die Qualität des Eingriffs sichert.

4.3 Material und Methoden

Die Bezeichnung der Distanz d_{12} zwischen zwei Prozessen X_1 und X_2 wird um einen obenstehenden Index erweitert, der die prozentuale Angabe des OP-Fortschritts beinhaltet. Der Fortschritt bezieht sich in diesen Analysen ebenfalls auf die Anzahl der durchgeführten Aktivitäten. Wird der chirurgische Prozess komplett betrachtet, so ist dies $X_1^{100\%}$, bei $X_1^{50\%}$ werden nur die ersten 50% der Aktivitäten betrachtet. Die Distanz $d_{12}^{100\%}$ entspricht der bisherigen Distanz, bei einem Vergleich von $X_1^{100\%}$ mit $X_2^{100\%}$. Dahingegen entspricht die Distanz $d_{12}^{50\%}$ einem Vergleich von $X_1^{100\%}$ mit $X_2^{50\%}$.

Die Untersuchung der Prognose des Distanzmaßes zur Laufzeit des chirurgischen Eingriffs wird in diesem Kapitel erläutert.

In Abbildung 17 ist das Szenario für drei Prozesse X_1 , X_2 und X_3 skizziert. Es wird das Distanzmaß zwischen allen vollständig abgelaufenen Prozessen berechnet, daraus ergibt sich $d_{12}^{100\%} = d_{21}^{100\%}$, $d_{13}^{100\%} = d_{31}^{100\%}$ und $d_{23}^{100\%} = d_{32}^{100\%}$. Außerdem werden die Distanzmaße zwischen dem erst zur Hälfte abgelaufenen Prozess mit den komplett abgelaufenen Prozessen berechnet. Es ergeben sich nach diesem Muster folgende Distanzen: $d_{12}^{50\%}$, $d_{21}^{50\%}$, $d_{13}^{50\%}$, $d_{31}^{50\%}$, $d_{23}^{50\%}$ und $d_{32}^{50\%}$. Bei der Berechnung von $d(X_1^{100\%}, X_2^{100\%})$ gilt die Kommutativität. Bei der Berechnung der Distanzmaße zur Laufzeit gilt die Kommutativität nicht, stattdessen ist $d(X_1^{50\%}, X_2^{100\%}) \neq d(X_1^{100\%}, X_2^{50\%})$.

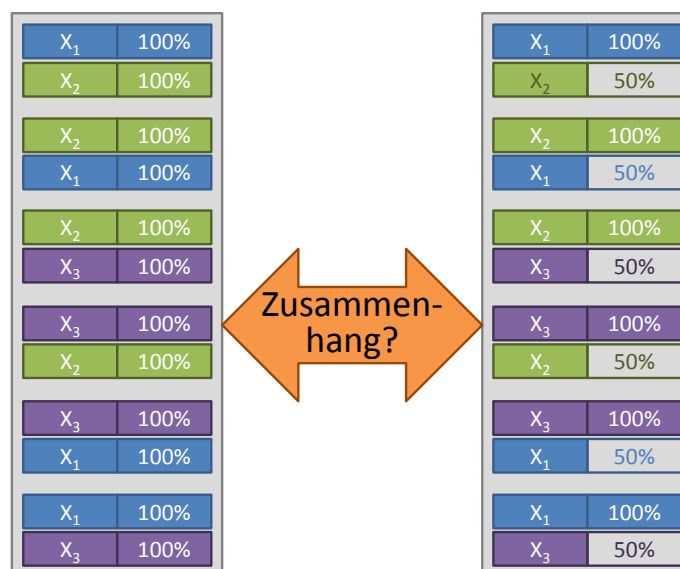


Abbildung 17: Schema der untersuchten Forschungsfragestellung: Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Distanz nach einem kompletten OP-Durchlauf und zur Hälfte der OP?

Das eingeführte Prinzip wird von der Betrachtung der Distanzmaße zur Hälfte des chirurgischen Eingriffs auf eine Betrachtung im Verlauf der Operation erweitert. Dazu werden die Distanzmaße $d^{10\%}$ bis $d^{90\%}$ in 10% Schritten betrachtet und in Korrelation zu $d^{100\%}$ gesetzt.

4.4 Ergebnisse

Um das Distanzmaß, das am Ende einer OP erreicht werden wird, vorherzusagen, muss es einen Zusammenhang zwischen dem Distanzmaß am Ende des Prozesses und während des Prozessablaufs geben. Zur Bestimmung des Zusammenhangs werden die Distanzen $d^{50\%}$ in Korrelation zu den Distanzen $d^{100\%}$ gesetzt. Wenn es eine signifikante und ausreichend große Korrelation gibt, dann kann bereits zur Laufzeit eines chirurgischen Eingriffs, hier nach der Hälfte der Schritte, auf seine Distanz nach der kompletten OP geschlossen werden. Eine Vorhersage des Distanzmaßes im OP-Verlauf ist dann möglich.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Methodik wird auf die Daten, die im Rahmen der Studie zu laparoskopischen Instrumenten und Zugangsarten in der Kinderchirurgie erhoben wurden, angewendet. Die Daten werden, wie bereits in Kapitel 3.2 erläutert, in drei Settings und drei Aufgaben aufgeteilt. Für jede Gruppierung wurden dann mit der Lebenshteindistanz und mit der Adjazenzdistanz die Werte $d^{100\%}$ sowie $d^{50\%}$ berechnet. Diese werden dann mit dem Pearson Korrelationskoeffizienten r in Beziehung zueinander gesetzt. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Korrelation von Distanzmaß und Distanzmaß zur Hälfte der OP dargestellt.

Zur Visualisierung der Daten sind in Abbildung 18 die dazugehörigen Streudiagramme und die lineare Regressionsgerade für die Adjazenzdistanz dargestellt. Für die anderen Settings sowie die Lebenshteindistanz ergeben sich ähnliche Diagramme.

Die Ergebnisse zeigen nach 50% der ausgeführten Arbeitsschritte eine sehr hohe Korrelation mit der Distanz, die am Ende der OP erreicht wird. Der Korrelationskoeffizient r beträgt durchschnittlich 0,7. Eine Untersuchung wie sich der Korrelationskoeffizient r mit Fortschreiten der OP verändert, beginnend mit 10% der Arbeitsschritte, wird deshalb angeschlossen.

Adjazenzdistanz			
Setting	$r_{\text{Schneiden}}$	$r_{\text{einfaches Nähen}}$	$r_{\text{komplexes Nähen}}$
gerade Instrumente, 3-Trokar	0,880	0,794	0,814
gewinkelte Instrumente, 3-Trokar	0,896	0,832	0,788
gewinkelte Instrumente, 1-Trokar	0,908	0,760	0,647
Levenshteindistanz			
Setting	$r_{\text{Schneiden}}$	$r_{\text{einfaches Nähen}}$	$r_{\text{komplexes Nähen}}$
gerade Instrumente, 3-Trokar	0,867	0,697	0,736
gewinkelte Instrumente, 3-Trokar	0,890	0,799	0,736
gewinkelte Instrumente, 1-Trokar	0,887	0,703	0,565

Tabelle 7: Korrelationskoeffizienten r der Distanzmaße nach komplettem OP-Ablauf mit denen nach der Hälfte der Arbeitsschritte. Die Signifikanz ist für alle Fälle $p < 0,001$.

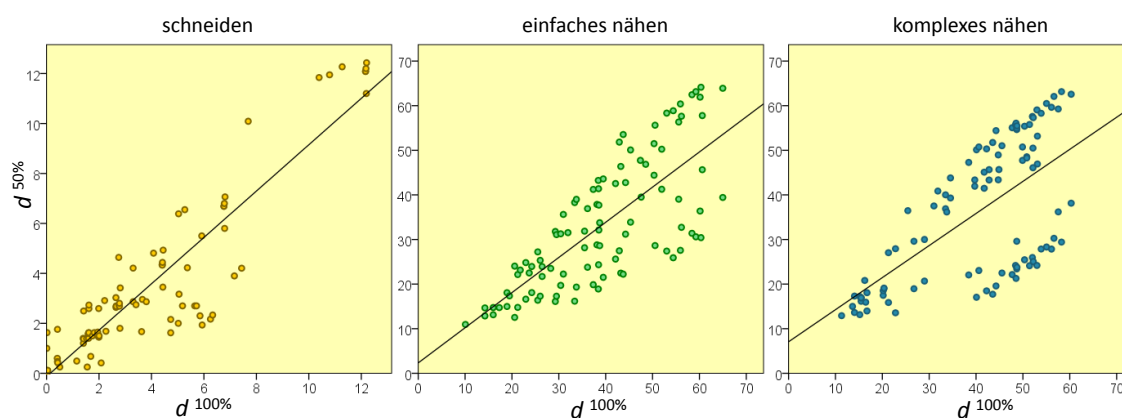


Abbildung 18: Streudiagramme und lineare Regression der Distanzmaße nach komplettem OP-Ablauf mit denen nach der Hälfte der Arbeitsschritte für die Adjazenzdistanz beim Setting gewinkelte Instrumente in 1-Trokar Zugang. Die Signifikanz ist für alle Fälle $p < 0,001$.

Beginnend mit 10% der Arbeitsschritte werden die Korrelationskoeffizienten bis zu 90% der Schritte untersucht. In Abbildung 19 sind die Kurven der Korrelationskoeffizienten im OP-Verlauf dargestellt.

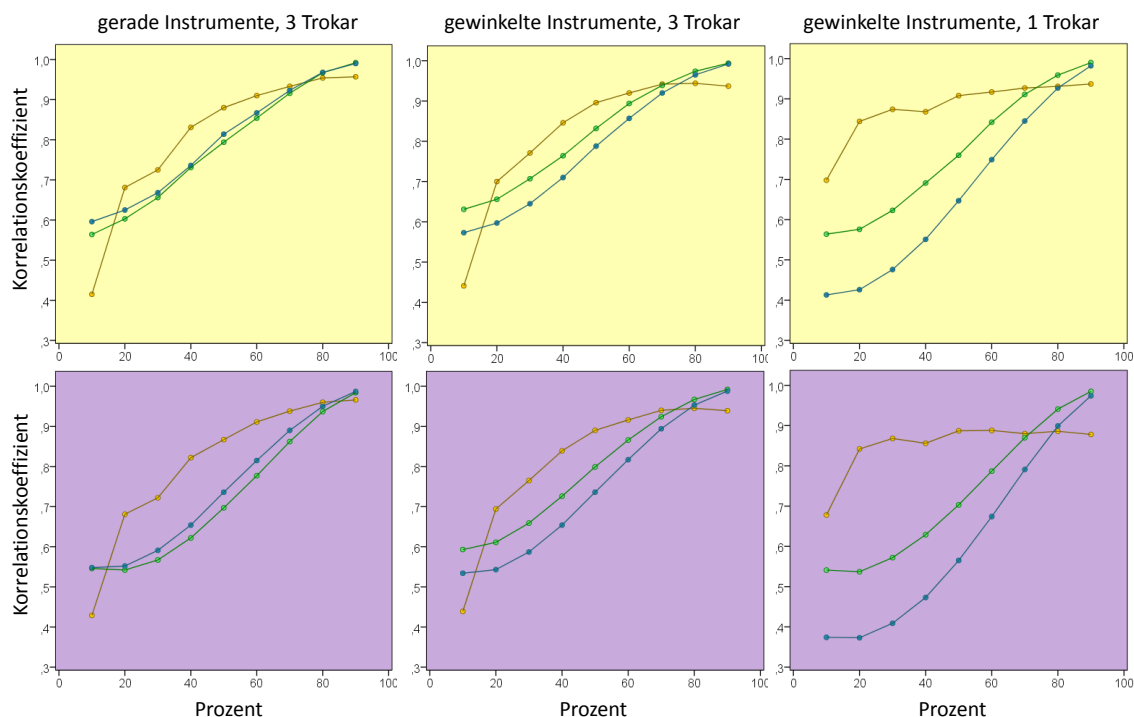


Abbildung 19: Verhalten des Korrelationskoeffizienten mit fortschreitendem OP-Verlauf in Prozent für die Settings und die Aufgaben (braun = schneiden, grün = einfaches nähen, blau = komplexes nähen). Oben: Adjazenzdistanz; Unten: Levenshteindistanz.

Die Abbildungen zeigen, dass der Grad der Vorhersagbarkeit des Distanzmaßes im Laufe der OP stark ansteigt. Bereits zu Beginn eines Eingriffs, nach 10% der Schritte, kann eine Abschätzung der endgültig erreichten Distanz durchgeführt werden.

Die Ergebnisse, signifikante und hohe Korrelationen, bestätigen die Hypothese 1. Eine Vorhersage des Distanzmaßes zur Laufzeit des chirurgischen Eingriffs ist damit möglich.

4.5 Diskussion

Die Aufgabe *Schneiden* zeigt abweichendes und nicht durchgängig steigendes Verhalten. Bei Interpretation dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass diese Aufgabe nur eine sehr geringe Anzahl von durchgeführten Arbeitsschritten hat. Werden zwei Schritte durchgeführt, sind 40% der Schritte aufgrund der Ganzzahligkeit bereits Null. In diesem Fall kann keine Distanz berechnet werden. Die Anzahl der Vergleiche bei 10% beträgt dann nur 30 von 100. Bei den beiden Näh-Aufgaben

ist die Gesamtanzahl der durchgeführten Tätigkeiten bereits so hoch, dass dieses Phänomen nicht auftritt.

Für die Aufgaben *einfaches Nähen* und *komplexes Nähen* ist ein stetig wachsender Korrelationskoeffizient festzustellen. Anfangs ist die Steigung gering, wächst dann stark an und flacht zum Ende der OP hin wieder ab. Schon bei relativ wenig durchgeführten Aktivitäten ist die Güte der Vorhersage gut, aber weitere Schritte bringen vorerst wenig Verbesserung, da noch der Hauptteil der OP unerledigt ist. Im mittleren Geschehen ist der Anstieg sehr hoch, da weitere Schritte mehr Hinweise auf eine Abweichung zeigen. Gegen Ende des Eingriffs, wenn auch schon die meisten Schritte gemacht wurden, sind nur noch wenig Änderungen zu erwarten und die Güte wächst auf hohem Niveau nur noch schwach an.

Insgesamt kann konstatiert werden, dass es sehr gut möglich ist, schon im Verlauf eines chirurgischen Eingriffs die Distanz zu anderen Prozessverläufen, wie z.B. einem Referenzprozess, vorherzusagen (Schumann *et al.*, 2013c). Dies kann genutzt werden, um Informationen von Assistenzsystemen kontextbezogen bereitzustellen, aber auch um das Ressourcenmanagement zu verbessern.

5 Prozessdistanzen und chirurgische Ergebnisqualität

5.1 Motivation zur Untersuchung der Prozessqualität

Beim Management chirurgischer Prozesse spielt die Qualität neben wirtschaftlichen Interessen die größte Rolle. Nach der Norm „Qualitätsmanagementsysteme“ (EN ISO 9000:2005) ist Qualität der „Grad in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“ (DIN EN ISO 9000, 2005). Qualität umfasst also viele Merkmale, die einem Objekt innewohnen und sich in einem bestimmten Ausprägungsbereich befinden.

Für Qualitätsuntersuchungen in der medizinischen Versorgung wurden von Donabedian (Donabedian, 2005) drei Objekte identifiziert: Ergebnisqualität, Prozessqualität und Strukturqualität. In seiner Arbeit werden vielfältige Problemfelder bei der Evaluation der Qualität angesprochen, wie bspw. Datenquellen und Erhebungsmethoden, empirische und maßgebende Standards und Skalen zur Messung. Die Strukturqualität umfasst die Rahmenbedingungen, die für die medizinische Versorgung vorhanden sind. Zu diesen gehören personelle und materielle nutzbare Ressourcen, wie z.B. Personal und Infrastruktur. Die Strukturqualität ist nicht Thema dieser Arbeit.

Die Ergebnisqualität wird anhand von Kennzahlen gemessen. Zu diesen gehören postoperative Schmerzen, Patientenzufriedenheit und Länge des Krankenhausaufenthalts (Donabedian, 2005; Hammermeister *et al.*, 1995). Um die Prozessqualität zu verbessern, werden Standards und Empfehlungen zur Durchführung von chirurgischen Prozessen erarbeitet (Donabedian, 2005; Ehlers *et al.*, 2006). Die Einhaltung der Standards wird in Qualitätssicherungsmaßnahmen geprüft. Ebenso werden hierbei hauptsächlich Kennzahlen herangezogen. Es wird davon ausgegangen, dass qualitativ gute Ergebnisse erzielt werden, wenn den Standards entsprochen wird. Abweichungen hingegen führen zu einer Qualitätsabnahme. Die Untersuchung dieses allgemein angenommenen Zusammenhangs ist Gegenstand dieses Kapitels.

Beim Benchmarking, einem weit verbreiteten Managementwerkzeug, ist die Orientierung an erfolgreichen Unternehmen mit den besten Produkten oder den besten Prozessen der elementare Grundgedanke. Ursprünglich angewandt auf Kennzahlen, wie Unternehmensgröße oder jährlichen Umsatz, wurde das Konzept auf Prozess-Benchmarking erweitert. Prozess-Benchmarking ist eine kontinuierliche,

systematische und zielgerichtete Methode, um eigene Prozesse mit den Prozessen anderer Unternehmen zu vergleichen. Die beste Lösung, der Best Practice, dient dabei als Referenz, um daraus Verbesserungen abzuleiten (Camp, 1998). Dieses Konzept lässt sich auf die Analyse und die Innovation von chirurgischen Prozessen adaptieren. Besonders im medizinischen Bereich sind die Qualität des Prozesses und des Ergebnisses, d.h. die Therapie und die Genesung des Patienten der maßgebliche Impuls. Dagegen spielen monetäre Kennzahlen nur eine untergeordnete Rolle. Beim Prozess-Benchmarking angewandt auf chirurgische Prozesse stehen die Arbeitsschritte des Chirurgen und des OP-Teams während eines chirurgischen Eingriffs im Vordergrund. Es wird der eigene Prozess mit dem Best Practice Prozess verglichen. Der Best Practice kann je nach Zielstellung dabei aus verschiedenen Ebenen kommen. Ein Eingriff des Chirurgen X kann mit eigenen früheren Operationen verglichen werden. Vergleiche sind Chirurg übergreifend, innerhalb des Krankenhauses, krankenhausübergreifend, innerhalb der eigenen Disziplin, aber auch disziplinübergreifend möglich.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt der Prozessvergleiche Chirurgenübergreifend aber innerhalb einer Disziplin.

Kernpunkt der nun folgenden Untersuchungen ist also die Analyse des Zusammenhangs zwischen dem Prozessablauf und dem Prozessergebnis. Damit werden zwei der drei von Donabedian vorgeschlagenen Dimensionen der Qualität in der medizinischen Versorgung in direkte Beziehung zueinander gesetzt. Schwerpunkt bilden intraoperative Prozesse. Die vorgestellten Methoden lassen sich aber leicht auf andere Phasen übertragen.

Ziel der Untersuchungen in dieser Arbeit ist der Zusammenhang zwischen Prozess und Ergebnisqualität (vgl. Abbildung 20). Die Korrelation zwischen dem Distanzmaß der Prozesse und der Qualität der Ergebnisse dient als Mittel, um folgende Hypothese zu untersuchen:

Hypothese 2:

Je größer die Distanz eines chirurgischen Prozesses zum Best Practice, desto schlechter ist das Prozessergebnis.

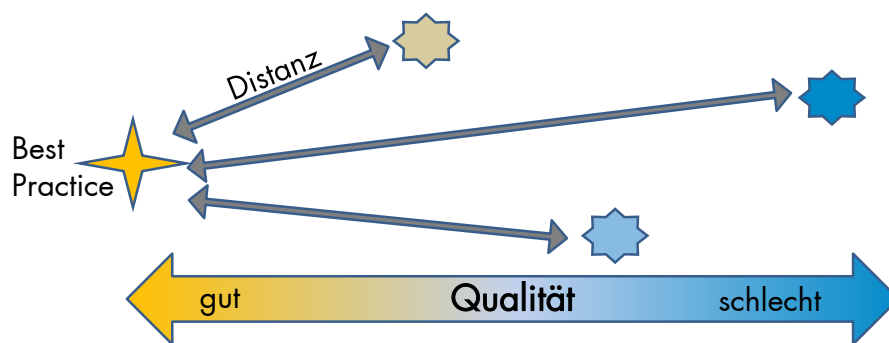


Abbildung 20: Visualisierung der Hypothese: Je größer die Distanz eines chirurgischen Prozesses zum Best Practice, desto schlechter ist das Prozessergebnis.

5.2 Stand der Forschung bei Methoden zur Verbesserung der Prozessqualität

Wenn alle Dimensionen der Qualität, die von Donabedian vorgeschlagen wurden (Prozess, Struktur und Ergebnis), beachtet werden, ist die Qualitätsverbesserung am effizientesten und effektivsten, schlussfolgert Hammermeister (Hammermeister *et al.*, 1995). Vor- und Nachteile der ergebnisorientierten Analyse und Verbesserung der Qualität wurden von Hammermeister besprochen. Außerdem wurde das aktuelle Wissen über Beziehungen zwischen Ergebnis und Prozess und Struktur vorgestellt. Auf die Prozesse wurde auf einem sehr hohen Abstraktionslevel eingegangen. Schwerpunkt bildeten die patienten-spezifischen Prozesse außerhalb des OP-Saals.

Ehlers (Ehlers *et al.*, 2006) entwickelte eine Methodik, das Process Potential Screening, um Geschäftsprozesse im Krankenhaus systematisch zu verbessern. Mehr als 300 Kennzahlen aus dem Bereichen Medizin- und Wirtschaftsinformatik, Wirtschaft und Qualitätsmanagement zur Messung der Qualität wurden identifiziert.

Nicholas (Nicholas *et al.*, 2010) untersucht, ob die Compliance-Rate der chirurgischen Prozesse, die im *Surgical Care Improvement Project* dokumentiert sind, mit der Sterberate, Venenthrombose und Infektionen im Zusammenhang stehen. Es wurde keine starke Korrelation gefunden. Nachteile und Grenzen dieser Methodik und des Ergebnisses wurden diskutiert.

Viele Autoren vergleichen verschiedene Methoden daraufhin, ob sie sich in der Qualität des Ergebnisses unterscheiden. Die Methoden sind technischer Art, wie beispielsweise farbige oder Graustufendarstellung von DCE-MR Bildern (Mehndi-

ratta *et al.*, 2009). Es gibt auch klinische Methoden wie laparoskopische Reparatur von large incisional hernia (Baccari *et al.*, 2012) oder doppel-blinde Studien zur Bewegung von Instrumenten in Single-Port oder 3-Port bei laparoskopischen Appendektomie (Teoh *et al.*, 2012).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Prozessergebnis in der Chirurgie und der medizinischen Versorgung ein wichtiges Thema ist. Einige Autoren konzentrierten sich auf Prozesse oder Methoden, andere auf das Ergebnis. Nur wenige Publikationen beschäftigen sich mit dem Ablauf der Arbeitsschritte in einem Prozess. Zusammenhänge werden häufig auf qualitativer Ebene betrachtet. Andere Autoren untersuchten die Prozesse auf einem niedrigen Granularitätslevel und maßen die Übereinstimmung mit Hilfe von Kennzahlen. Dies sind die größten Unterschiede zu den Methoden, die in dieser Arbeit präsentiert werden.

In dieser Arbeit wird der Zusammenhang zwischen dem Ablauf der Arbeitsschritte in einem Prozess und dem Prozessergebnis quantitativ, basierend auf Daten, die in einer Trainingsstudie zur laparoskopischen Chirurgie erhoben wurden, untersucht.

5.3 Material und Methoden

Um die Hypothese 2 zu untersuchen, sind einige Vorarbeiten nötig, die im Folgenden beschrieben werden.

Verwendet werden die Daten der bereits in Kapitel 3.2 vorgestellten Studie zur Beurteilung laparoskopischer Instrumente und Zugangsarten in der minimalinvasiven Chirurgie, siehe Kapitel 3.2.2.

Bei den 450 durchgeführten chirurgischen Prozessen entstand jeweils ein bearbeitetes Phantom, das als Prozessergebnis gesehen wurde. Diese wurden von vier Experten unabhängig voneinander in einer verblindeten Studie auf ihre chirurgische Qualität hin untersucht. Die Experten kannten nur das Ziel der entsprechenden Aufgabe, also weder den Probanden, noch das Setting. Da nur das Ergebnis begutachtet wurde, waren auch die Arbeitsschritte, die zur Erreichung des Ziels durchgeführt wurden, unbekannt. Eine Skala von 1 bis 5 bzw. von *sehr gut* bis *sehr schlecht* bildete die Bewertungsgrundlage. Beurteilt wurde der Grad der Zielerreichung (z.B. 4 von 4 geforderten Stichen) sowie die korrekte und akkurate Ausführung (z.B. ist der Schnitt gerade und nicht ausgefranst). Der Mittelwert der vier unabhängigen Reviews ergab eine objektive Einschätzung der Qualität des Ergebnisses.

In Abbildung 21 ist die Verteilung der Qualität zwischen Novizen und Experten dargestellt. Die Verteilung folgt einer Normalverteilung. Erwartungsgemäß lag die

Qualität der Prozessergebnisse bei den Erfahrenen mit einem Mittelwert von 2,6 signifikant höher als die Unerfahrenen mit 3,1. In den Untersuchungen in diesem Kapitel werden die Probandengruppen nicht mehr berücksichtigt. Grund dafür ist das Ziel der Untersuchungen: Die Qualitätsminderung bei Abweichungen vom Best Practice Prozess induziert keine Unterscheidung nach Erfahrungslevel, da nur die Distanz eine Rolle spielt.

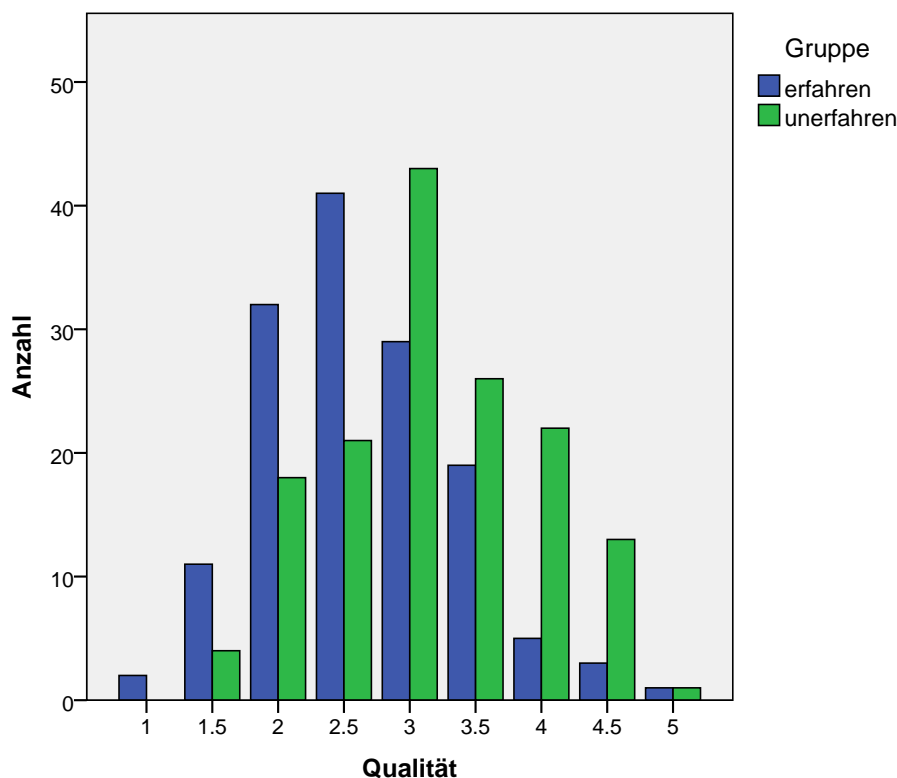


Abbildung 21: Histogramm der erreichten Qualitäten, getrennt nach den beiden Probandengruppen. Die Erfahrenen erzielten im Vergleich zu den Unerfahrenen eine signifikant höhere Qualität.

Allgemein wird ein Prozess Best Practice genannt, wenn er von einer bestimmten Sichtweise aus gesehen der *beste* ist (Driever, 2002). In der Chirurgie ist der Best Practice der chirurgische Prozess, der als die beste Prozedur angesehen wird, um das angestrebte Therapieziel zu erreichen. In der Studie in dieser Arbeit sind die Schritte, um ein qualitativ hochwertiges Ergebnis zu erreichen, von Bedeutung. Deshalb wurde der chirurgische Prozess ausgewählt, der insgesamt mit der höchsten Qualität bewertet wurde. Da sich die Rahmenbedingungen für jedes Setting und jede Aufgabe geändert haben, ist es sinnvoll für jede Kombination den besten Prozess zu bestimmen.

Für die Analyse der Hypothese 2 ist nun für jedes Setting der Best Practice bekannt. Die Qualitätsminderung wird mit der einfachen Differenz der Qualitäten zum Best Practice bestimmt. Um den Unterschied im Ablauf der chirurgischen Prozesse zu messen, werden die in den Kapiteln 3.1.3 und 3.1.4 vorgestellten Distanzmaße Lebenshteindistanz und Adjazenzdistanz genutzt.

Bei der Durchführung der Untersuchungen werden die Distanzmaße zum Best Practice und die Qualitätsminderungen mit Hilfe des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten miteinander in Beziehung gesetzt. Der Pearson Korrelationskoeffizient wird häufig genutzt und ist ein Maß für den linearen Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen. Zur besseren Visualisierung werden die dazugehörigen Streudiagramme mit der durch Lineare Regression gewonnenen Gerade dargestellt. Die Untersuchungen werden für alle Settings durchgeführt.

5.4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Abweichung des Prozesses vom Best Practice und der Qualitätsminderung dargelegt. Das Ergebnis der Korrelation nach Pearson des Distanzmaßes mit der Qualitätsdifferenz ist in Tabelle 8 dargestellt. Für einige der Settings gab es keinen eindeutig bestimmten Best Practice. Dies tritt auf, wenn es mehrere Prozesse gab, die alle das beste Qualitätsreview bekamen.

Adjazenzdistanz						
Setting \ Aufgabe	schneiden		einfaches nähen		komplexes nähen	
	<i>r</i>	Signifikanz	<i>r</i>	Signifikanz	<i>r</i>	Signifikanz
gerade Instrumente, 3-Trokar	0,138	$p > 0,050$	-0,151	$p > 0,050$	0,325	$p > 0,050$
	0,178	$p > 0,050$	-0,154	$p > 0,050$		
	-0,169	$p > 0,050$	-0,167	$p > 0,050$		
	-0,068	$p > 0,050$				
	0,140	$p > 0,050$				
	0,140	$p > 0,050$				
gewinkelte Instrumente, 3-Trokar	-0,261	$p > 0,050$	0,553	$p > 0,050$	0,752	$p < 0,050$
					0,618	$p > 0,050$
gewinkelte Instrumente, 1-Trokar	-0,532	$p > 0,050$	0,706	$p < 0,050$	0,678	$p < 0,050$
	-0,748	$p < 0,050$				
	-0,535	$p > 0,050$				
Levenshteindistanz						
Setting \ Aufgabe	schneiden		einfaches nähen		komplexes nähen	
	<i>r</i>	Signifikanz	<i>r</i>	Signifikanz	<i>r</i>	Signifikanz
gerade Instrumente, 3-Trokar	0,126	$p > 0,050$	-0,277	$p > 0,050$	0,320	$p > 0,050$
	0,167	$p > 0,050$	-0,314	$p > 0,050$		
	-0,105	$p > 0,050$	-0,341	$p > 0,050$		
	-0,031	$p > 0,050$				
	0,127	$p > 0,050$				
	0,127	$p > 0,050$				
gewinkelte Instrumente, 3-Trokar	-0,260	$p > 0,050$	0,646	$p < 0,050$	0,693	$p < 0,050$
					0,655	$p < 0,050$
gewinkelte Instrumente, 1-Trokar	-0,558	$p > 0,050$	0,748	$p < 0,050$	0,732	$p < 0,05$
	-0,729	$p < 0,050$				
	-0,561	$p > 0,050$				

Tabelle 8: Korrelationskoeffizient r nach Pearson und Signifikanz (2-seitig) für alle Kombinationen von Setting und Aufgabe und den mehrfach vorkommenden Best Practice. Farblich markiert sind Korrelationen, die auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ signifikant sind.

In den Abbildungen 22 und 23 sind die Linearen Regressionen im Streudiagramm für die Settings gewinkelte Instrumente, 3-Trokar und gewinkelte Instrumente, 1-Trokar für jeweils die Aufgaben einfaches und komplexes Nähen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen positive signifikante Korrelationen zwischen der Qualitätsminderung bei steigender Distanz zum Best Practice.

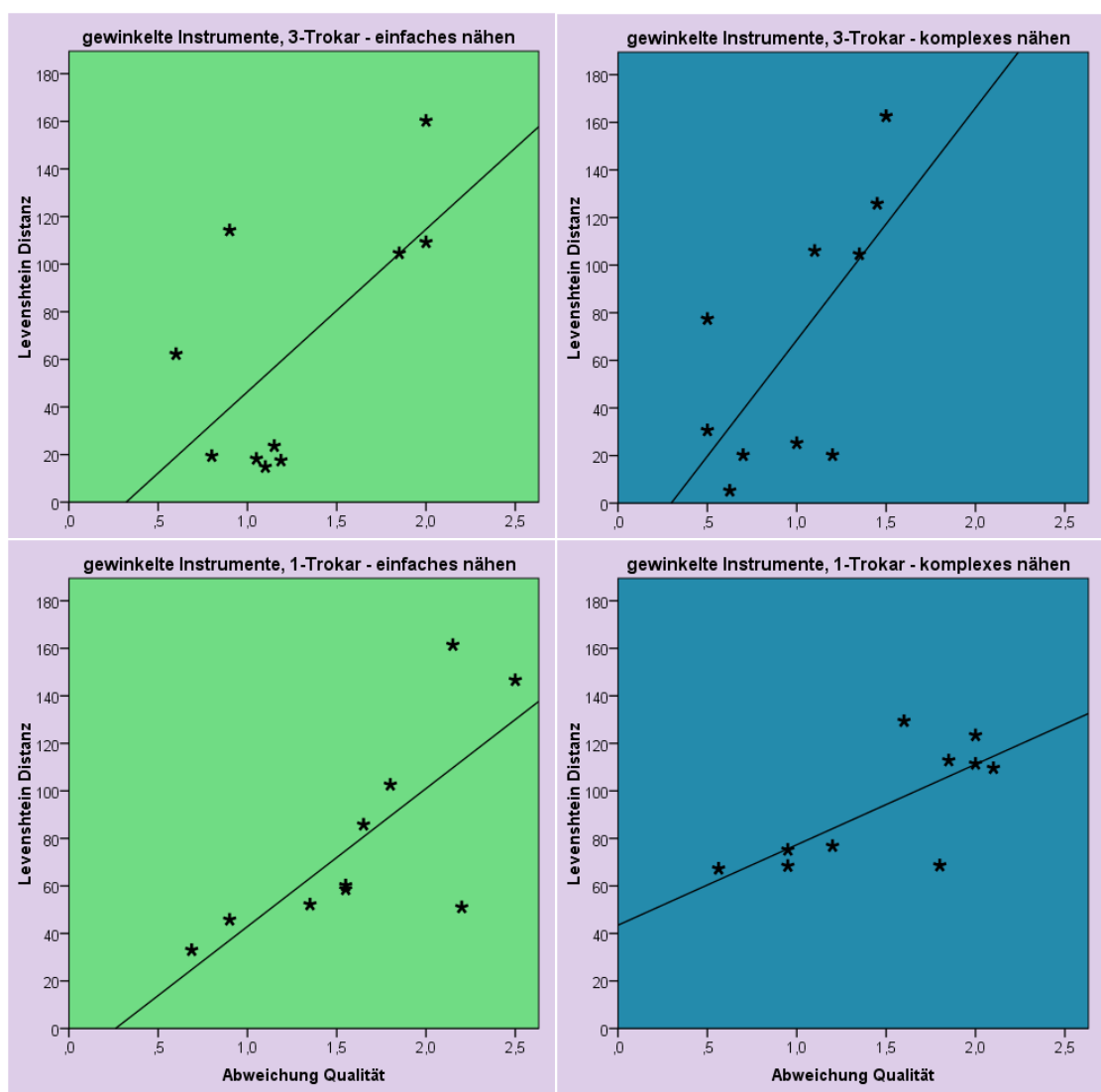


Abbildung 22: Lineare Regression der Abweichung vom Best Practice mit der Levenshteindistanz für eine Auswahl der Settings und Aufgaben.

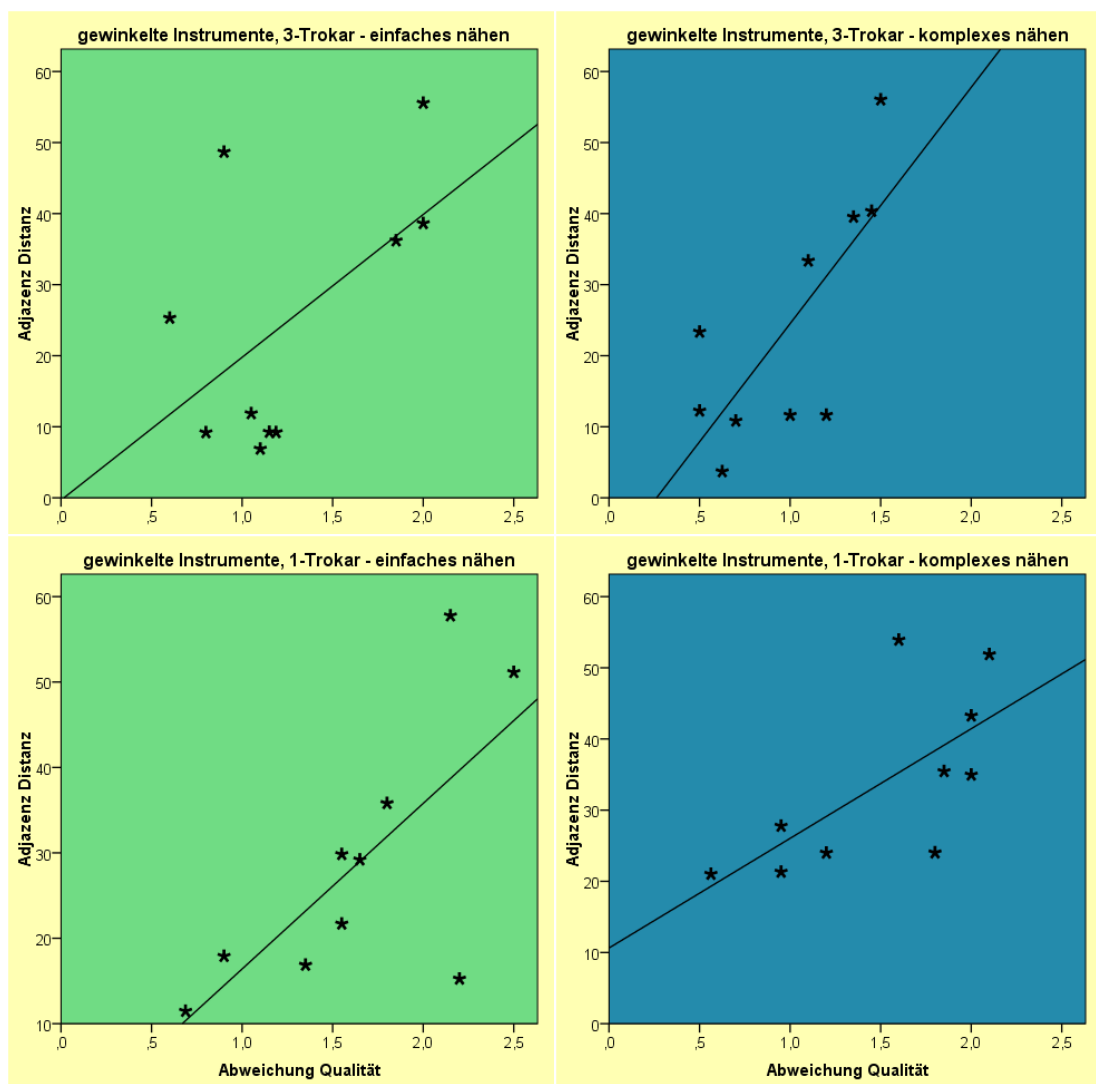


Abbildung 23: Lineare Regression der Abweichung vom Best Practice mit der Adjazenzdistanz für eine Auswahl der Settings und Aufgaben.

Die Abbildung 24 gibt eine Übersicht über die Anzahl der Arbeitsschritte und der Gesamtdauer von allen Best Practice Prozessen im Vergleich zu Minimum, Maximum und Mittelwert, abgebildet sind die Settings mit den gewinkelten Instrumenten.

Die Anzahl der Arbeitsschritte sowie die OP-Dauer liegen im unteren Bereich, aber nicht beim Minimum aller Prozesse. Schnelle und korrekte, zielführende Arbeitsweise ist dementsprechend qualitätsfördernd. Zu schnelle Arbeitsschritte und eine zu große Rationalisierung hin zu weniger Schritten sind kontraproduktiv und mindern die Qualität des Ergebnisses.

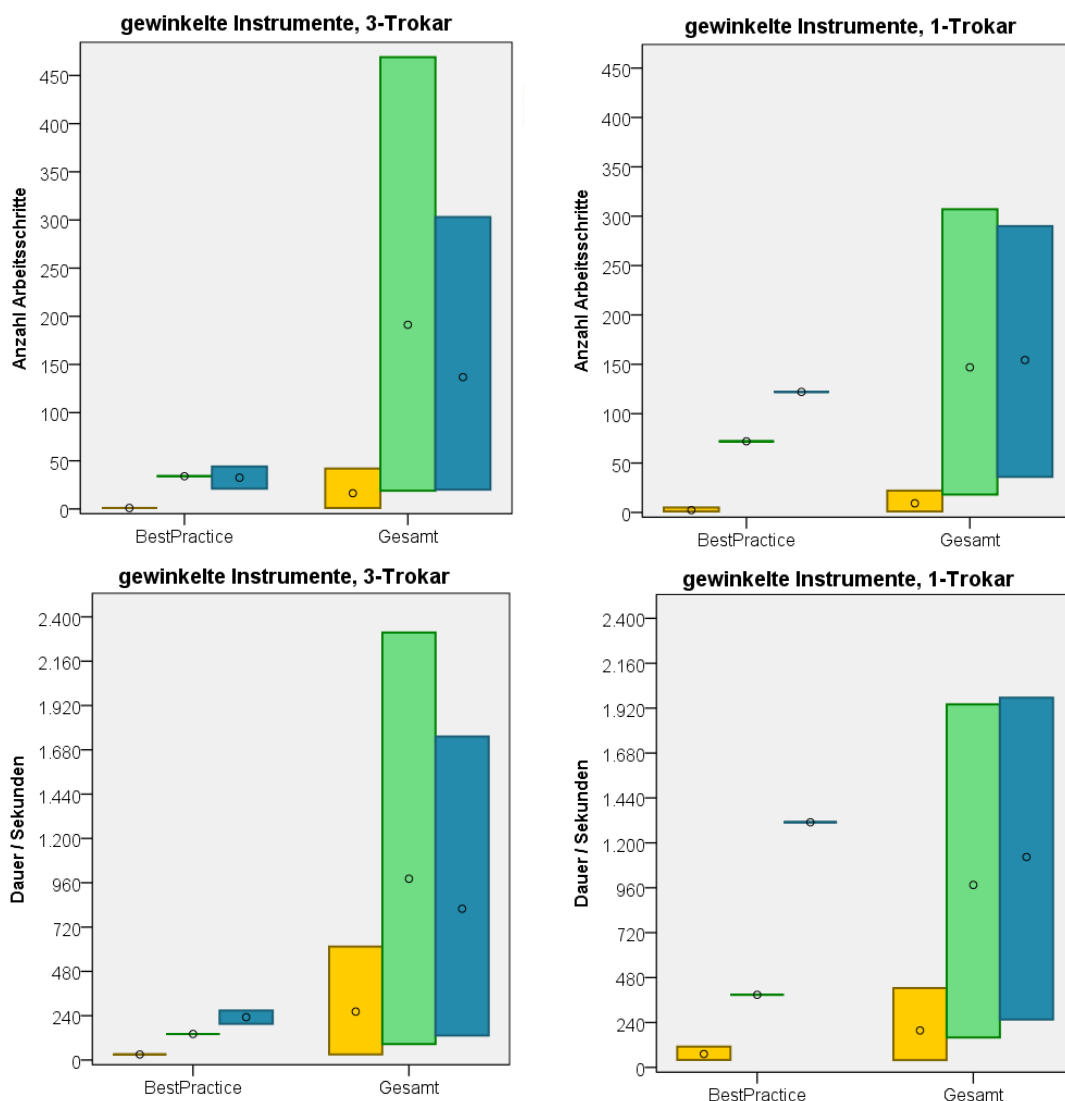


Abbildung 24: Anzahl der ausgeführten Arbeitsschritte bzw. benötigte Zeit, Best Practice im Vergleich zu allen Workflows. Die dargestellten Balken werden durch Minimum und Maximum begrenzt. Der Mittelwert ist durch \circ gekennzeichnet. Die Aufgaben sind farblich kodiert: gelb = schneiden, grün = einfaches nähen, blau = komplexes nähen.

In Abbildung 25 sind die Distanzmaße zwischen den Best Practice, sofern es mehrere gibt, im Vergleich zur minimalen, maximalen und mittleren Distanz dargestellt.

In einigen Settings wurden mehrere Best Practice identifiziert. Die Abbildung 25 zeigt einen Vergleich der Best Practice untereinander. Die Distanzen sind niedriger als der Durchschnitt im jeweiligen Setting. Geschlussfolgert werden kann, dass die Abweichungen gering sind und damit in keinem Widerspruch zum Gesamtergebnis stehen.

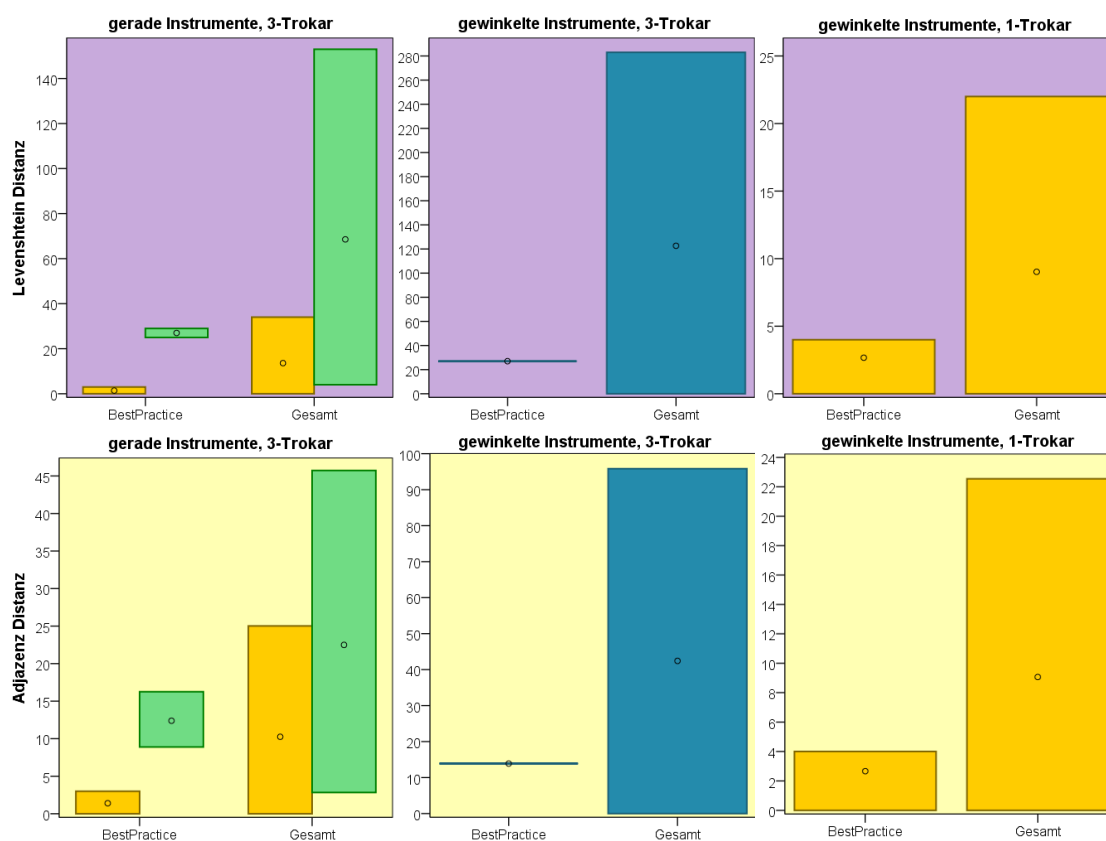


Abbildung 25: Distanzmaße zwischen den identifizierten Best Practices im Vergleich zu allen Workflows. Die dargestellten Balken werden durch Minimum und Maximum begrenzt. Der Mittelwert ist durch \circ gekennzeichnet. Die Aufgaben sind farbkodiert: gelb = schneiden, grün = einfaches nähen, blau = komplexes nähen.

Die Ergebnisse zeigen signifikante Korrelationen zwischen der Qualität des Ergebnisses und den Distanzmaßen für die Settings gewinkelte laparoskopische Instrumente in 1-Trokar Zugang und in 3-Trokar Zugang jeweils für einfaches und komplexes Nähen. Keine signifikante Korrelation gibt es bei der ablativen Aufgabe sowie im Setting gerade laparoskopische Instrumente in 3-Trokar Zugang. Die Hypothese 2 wird bestätigt.

5.5 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert. Die Aktion schneiden ist die Hauptkomponente der ablativen Aufgabe, da nur Arbeitsschritte, die mit der rechten Hand ausgeführt wurden, zur Analyse hinzugezogen wurden. Andere Aktionen sind selten. Variationen im Ablauf werden in diesem Fall hauptsächlich

durch unterschiedliche Häufigkeit der Aktion schneiden verursacht. Dadurch ist der Ablauf linear. Demgegenüber sind die Aufgaben einfaches Nähen und komplexes Nähen so vielschichtig, dass die Unterschiede im Ablauf auch Abhängigkeiten zum Ergebnis zeigen.

Gegenwärtig ist das Setting gerade Instrumente mit 3-Trokar Zugang die gängige Methode in der laparoskopischen Chirurgie. In diesem Setting ist der Handlungsrahmen durch die fest vorgegebene Triangulation relativ eingeschränkt. Im Vergleich zu den anderen Settings besteht wenig Raum für Handlungsentscheidungen des Probanden in Bezug auf Positionierung und Bewegung der laparoskopischen Instrumente. Hier konnte kein signifikanter Zusammenhang gezeigt werden.

Hauptsächlich bei der ablativen Aufgabe gibt es mehrere Best Practices. Dies unterstützt die Aussage, dass diese Aufgabe nicht diffizil genug ist und es nicht möglich ist, eine Abweichung vom Best Practice mit einer Qualitätsabnahme zu verbinden. Außerdem sind bei konventionellen Instrumenten, 3-Trokar Zugang drei der Best Practice identisch und bestehen aus nur einer Aktivität, dem Schneiden.

5.6 Fazit

Die Resultate zeigen, dass das Prozessergebnis nicht losgelöst von den Arbeitsschritten, mit denen es erreicht wird, zu betrachten ist. Die signifikanten Zusammenhänge zeigen, dass mit Abweichungen vom Best Practice eine Qualitätsminderung der Ergebnisse einhergeht. Die Hypothese kann größtenteils bestätigt werden (Schumann *et al.*, 2013b). Qualitätsmanagement der Prozesse ist ein brauchbares Werkzeug, um die Qualität des Prozessergebnisses bei laparoskopischen Eingriffen positiv zu beeinflussen.

Speziell für die laparoskopische Chirurgie ist das Training für die Chirurgen essentiell. Chirurgisches Training kann mit dem Wissen dieser Arbeit verbessert werden. Wenn ein Student nicht die gewünschte Güte des Ergebnisses erreicht, kann mit Hilfe der Distanzmaße der Teil des Arbeitsflusses identifiziert werden, in dem zusätzliches Training notwendig ist. Phasen mit hoher Fähigkeit müssen nicht so häufig geübt werden. Chirurgisches Training wird dadurch präziser, effektiver und effizienter.

In diesem Kapitel wurden die Analysen auf Daten, die in einer Trainingsstudie der laparoskopischen Chirurgie gewonnen wurden, angewandt. Der nächste Schritt ist die Anwendung dieser Methoden auf reale Situationen und Daten. Die Distanzmaße sind einfach berechenbar. Bei realen chirurgischen Eingriffen

ist es schwieriger, die Qualität des Ergebnisses zu messen. Es gibt zahlreiche Qualitätsaspekte, deshalb ist es äußerst wichtig, Schwerpunkte zu setzen und diese dann mit Hilfe von Kennzahlen zu messen.

Die Abgrenzung von Kennzahlen ist bei Experten eine kontrovers geführte Diskussion. Die korrekte und lückenlose Akquisition der Kennzahlen ist oft problematisch (Donabedian, 2005; Hammermeister *et al.*, 1995). Die Aufnahme der chirurgischen Prozesse mit Hilfe des Surgical Workflow Editor mit geübten Protokollanten ist eine präzise, etablierte und verifizierte Methode (Neumuth *et al.*, 2009). Zusätzlich gibt es Bemühungen, Aktionen automatisch zu detektieren (Neumuth u. Meissner, 2012; Enquobahrie *et al.*, 2008; Pagador *et al.*, 2012).

Der Zusammenhang von Best Practice und Qualität, der in dieser Arbeit nachgewiesen wurde, kann vice versa für besseres Qualitätsmanagement genutzt werden. Einerseits kann die Qualität des Ergebnisses besser durch Analyse der durchgeführten Arbeitsschritte überprüft werden. Damit wird das Gesamtergebnis kontrolliert und nicht nur einzelne Aspekte. Andererseits ist die Qualitätsinspektion des Ergebnisses mit Kennzahlen immer eine retrospektive Methode. Verbesserungen können nur in zukünftigen chirurgischen Eingriffen implementiert werden. Mit Hilfe der Aufnahme von chirurgischen Prozessen zur Laufzeit können Abweichungen vom Best Practice instantan detektiert werden und Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Diese Methodik hat das Potential die Qualität des Ergebnisses zur Laufzeit eines chirurgischen Eingriffs zu kontrollieren und zu verbessern.

Chirurgische Eingriffe sind niemals gleich, denn patientenspezifische Variationen sind vorhanden und müssen angemessen berücksichtigt werden. Die Distanzmaße, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden, geben keine reinen Ja-Nein-Antworten, sondern stufen die Abweichung vom Referenzprozess ab. Der Best Practice kann auch ein Pool von sehr erfolgreich durchgeführten chirurgischen Eingriffen sein. Der mittlere Verlauf verschiedener Prozesse kann mit dem generischen SPM und den Methoden von Neumuth (Neumuth *et al.*, 2011b) untersucht werden. Die Berechnung der Distanzmaße ergibt keinen festen Rahmen, sondern erlaubt praktikable Analysen. Diese Analysen beinhalten auch die Berücksichtigung der Variation chirurgischer Eingriffe durch Patientenspezifika.

6 Anwendungen in der klinischen Praxis

Die in Kapitel 3.2 ausgewählten Distanzmaße werden im Folgenden auf relevante Beispieldaten aus der klinischen Praxis angewandt. Zuerst werden die durchgeführten chirurgischen Prozesse von erfahrenen und unerfahrenen Neurochirurgen bei zervikalen Diskektomien verglichen. Im Anschluss daran werden die Unterschiede verschiedener Operationsmethoden bei zwei Phasen der Neck Dissections analysiert.

Damit ist beispielhaft gezeigt, dass die Anwendung der Distanzmaße über die chirurgischen Prozesse von Trainingsdaten zur Unterscheidung des Erfahrungslevels hinaus möglich ist.

6.1 Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen Neurochirurgen bei zervikalen Diskektomien

6.1.1 Klinischer Studienaufbau

Ziel der Untersuchungen ist es zu analysieren, ob es Unterschiede in der Durchführung der Operationen zwischen den beiden Gruppen erfahrene und unerfahrene Neurochirurgen gibt.

Bei der zervikalen Diskektomie handelt es sich um eine Entfernung der Bandscheibe im Halsbereich. Dadurch sollen die Rückenmarksnerven entlastet werden, die durch einen Bandscheibenvorfall eingengt sind und Beschwerden verursachen. In den Jahren 2008 – 2012 wurden 28 Operationen dokumentiert. Genutzt wurden dazu die Methoden der Workflowanalyse, wie sie bereits in Kapitel 3.2.2 beschrieben wurden. Mit Hilfe des Workflow-Editors wurden die durchgeführten Arbeitsschritte des Chirurgen aufgenommen. Die Protokollierung erfolgte sekundengenau und auf einem hohen Detaillierungsgrad (vgl. Tabelle 9) durch einen neurochirurgisch erfahrenen Protokollanten. In den 28 Operationen wurden 4429 Aktionen identifiziert. Im Mittel dauerte eine OP 1:21 Stunden. In 13 Fällen wurde der Eingriff von einem erfahrenen Neurochirurgen, unterstützt durch einem Assistenzarzt, durchgeführt. In den anderen 15 Fällen wurde der Eingriff vom Assistenzarzt durchgeführt, der von einem erfahrenen Operateur unterstützt wurde.

6.1.2 Konventionelle Workflowanalysen

Der Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen Operateuren in der Neurochirurgie wurde bereits anhand von lumbaren Diskektomien von Riffaud (Riffaud *et al.*, 2010) durchgeführt. Es wurde gleichfalls die Methodik der Live-Protokollierung des Eingriffs durch einen geübten Beobachter mit Hilfe des Workflow-Editors angewandt. Er stellte folgende Unterschiede zwischen den Operateuren fest: Die Erfahrenen zeigten eine signifikant kürzere Bearbeitungszeit und führten weniger Gesten und Bewegungen bei Erfüllung der Aufgabe durch.

In der vorliegenden Arbeit sind die Ergebnisse der konventionellen Workflowanalyse bei der zervikalen Diskektomie zum Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen Operateuren dargestellt (vgl. Tabelle 9). In der Tabelle sind gleichzeitig alle Aktionen aufgelistet, die protokolliert wurden. Bei diesen Analysen wird untersucht, ob sich einzelne Aktionen für die beiden Gruppen unterscheiden. Jede Tätigkeit wird in den Operationen mit einer bestimmten Häufigkeit h ausgeführt. Außerdem hat jede Tätigkeit eine bestimmte Dauer t , die sich aus der Differenz von Start- und Stoppzeit berechnet. Beispielsweise wird in der Gruppe der Assistenzärzte im Mittel 13,9 Mal pro Eingriff die Aktion *Koagulieren* ausgeführt. Diese Aktion dauert im Mittel 29 Sekunden.

Aktion	Kategorie	Häufigkeit	Dauer [s]	Sign. <i>h</i>	Sign. <i>t</i>
koagulieren	unerfahren	13,9 ± 2,6	29,5 ± 6,5	<i>p</i> < 0,050	<i>p</i> > 0,050
	erfahren	11,4 ± 3,7	30,0 ± 7,2		
schneiden	unerfahren	3,3 ± 1,4	27,6 ± 11,6	<i>p</i> > 0,050	<i>p</i> > 0,050
	erfahren	3,9 ± 1,3	26,9 ± 10,1		
präparieren	unerfahren	26,1 ± 8,0	25,1 ± 3,5	<i>p</i> < 0,050	<i>p</i> > 0,050
	erfahren	18,1 ± 7,0	26,7 ± 5,2		
bohren	unerfahren	6,2 ± 2,7	46,6 ± 13,8	<i>p</i> < 0,050	<i>p</i> > 0,050
	erfahren	3,8 ± 2,2	61,1 ± 26,1		
halten	unerfahren	2,3 ± 2,2	14,0 ± 10,5	<i>p</i> > 0,050	<i>p</i> > 0,050
	erfahren	3,9 ± 2,5	15,6 ± 12,7		
installieren	unerfahren	22,6 ± 11,6	26,5 ± 5,9	<i>p</i> < 0,050	<i>p</i> > 0,050
	erfahren	14,3 ± 3,0	30,0 ± 7,3		
spülen	unerfahren	6,4 ± 1,7	12,7 ± 3,2	<i>p</i> > 0,050	<i>p</i> < 0,050
	erfahren	7,3 ± 2,8	10,2 ± 2,3		
entfernen	unerfahren	34,0 ± 13,5	38,4 ± 7,0	<i>p</i> > 0,050	<i>p</i> < 0,001
	erfahren	29,4 ± 10,4	27,0 ± 6,6		
nähen	unerfahren	4,0 ± 1,0	90,5 ± 30,7	<i>p</i> < 0,050	<i>p</i> > 0,050
	erfahren	3,3 ± 0,7	84,8 ± 28,6		
tupfen	unerfahren	1,3 ± 0,5	21,6 ± 10,5	<i>p</i> > 0,050	<i>p</i> > 0,050
	erfahren	1,9 ± 0,6	12,4 ± 4,8		

Tabelle 9: Konventionelle Workflowanalyse über die Aktionen, bei der zervikalen Diskektomie zum Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen Chirurgen. Signifikante Unterschiede wurden farblich gekennzeichnet.

Getestet wurde mit dem Man Whitney U Test bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$, ob sich signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ergeben. Bei den Aktionen *koagulieren*, *präparieren*, *bohren*, *installieren* und *nähen* wurde ein Unterschied in der Häufigkeit der Durchführung gemessen. Die erfahrenen Chirurgen haben diese Tätigkeiten weniger oft durchgeführt. Die durchschnittliche Dauer unterschied sich aber nicht. Währenddessen war die durchschnittliche Dauer der Aktionen *spülen* und *entfernen* bei den Assistenzärzten signifikant länger. Die Ausführungshäufigkeit blieb aber gleich. Bei den Tätigkeiten *schneiden*, *halten* und *tupfen* gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen.

Durch diese Auswertungen kann ein guter Überblick gewonnen werden, welche Tätigkeiten durch den Operateur häufiger durchgeführt werden. Die Aussage lässt nicht die Schlussfolgerung zu, dass sich Unerfahrene und Erfahrene insgesamt unterscheiden. Es werden außerdem keine Informationen darüber gewonnen, ob sich nun die Arbeitsweise der Assistenzärzte von denen der erfahrenen Neurochirurgen unterscheidet. Die Aussagen über einzelne Arbeitsschritte lassen keine Einschätzung auf den Gesamtprozess zu. Es gibt Variationen in den Handlungssträn-

gen bereits aus der Tatsache heraus, dass jeder Patient individuelle Eigenschaften besitzt, die sich auch im OP-Ablauf niederschlagen. Eine objektive Einschätzung des Ablaufs und der Reihenfolge der Tätigkeiten ergibt sich bei der Anwendung der Distanzmaße. Diese sind in der Lage Unterschiede im Ablauf zu messen (vgl. Kapitel 3.2).

6.1.3 Distanzanalysen

Die Maße Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz wurden aufgrund der Ergebnisse der Evaluationsstudie in Kapitel 3.2 ausgewählt und hier angewandt, um zu messen, ob es Unterschiede in den Variationen der OP-Verläufe innerhalb der Gruppen gibt. Statistische Tests (Mann Whitney U) ergeben signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) zwischen den Gruppen in Bezug auf die durchgeführten Arbeitsschritte. In Abbildung 26 sind die entsprechenden Boxplots dargestellt. Es ist $N_{\text{unerfahren}} = 105$ und $N_{\text{erfahren}} = 78$. Die Ergebnisse zeigen, dass es Unterschiede im Ablauf zwischen den Assistenzärzten und den erfahrenen Chirurgen gibt. Die Arbeitsschritte der Erfahrenen sind sich untereinander relativ ähnlich. Der Ablauf innerhalb der Gruppe der Unerfahrenen dahingegen variiert sehr stark und deshalb sind die Distanzmaße höher. Dieser Unterschied beruht nicht auf zufälligen Variationen, sondern auf verschiedenartigen Handlungssträngen.

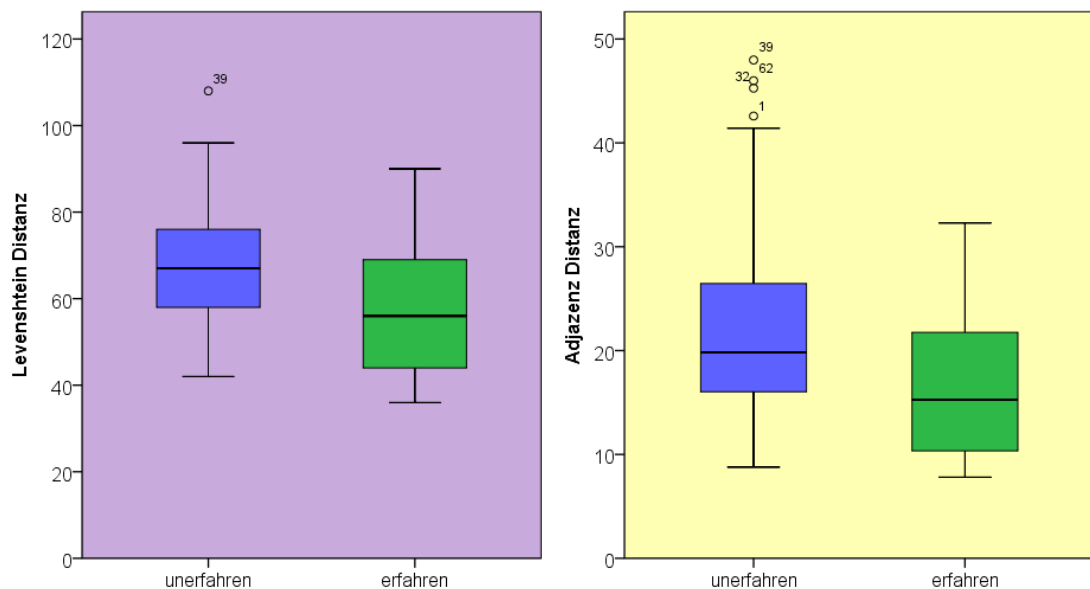


Abbildung 26: Boxplot der Distanzmaße in den Gruppen der erfahrenen und unerfahrenen Chirurgen bezogen auf die durchgeführten Aktivitäten.

Bei weiterführenden Untersuchungen wurde festgestellt, dass das Distanzmaß einen Zusammenhang mit der unterschiedlichen Anzahl von durchgeführten Arbeitsschritten Δn aufweist (vgl. Abbildung 27). Die maximale Differenz beträgt $\Delta n_{\max} = 72$ Aktionen. Um sicher zu gehen, dass die Unterschiede in den Gruppen nicht durch die differierende Aktionsanzahl bestimmt werden, wurden die Analysen nochmals mit bereinigten Daten ausgeführt. Dafür wurden nur Operationen betrachtet, die in etwa die gleiche Anzahl von Arbeitsschritten haben. Es wurden nur Vergleiche herangezogen, deren Differenz maximal 31 ($\Delta n \leq 31$) betrug, dies entspricht dem 70% Perzentil der Verteilung der Differenz. Die Größe der Gruppen schrumpfte von 105 auf $N_{\text{unerfahren}} = 74$ und von 78 auf $N_{\text{erfahren}} = 55$. In Abbildung 28 sind die Streudiagramme für die bereinigten Daten dargestellt.

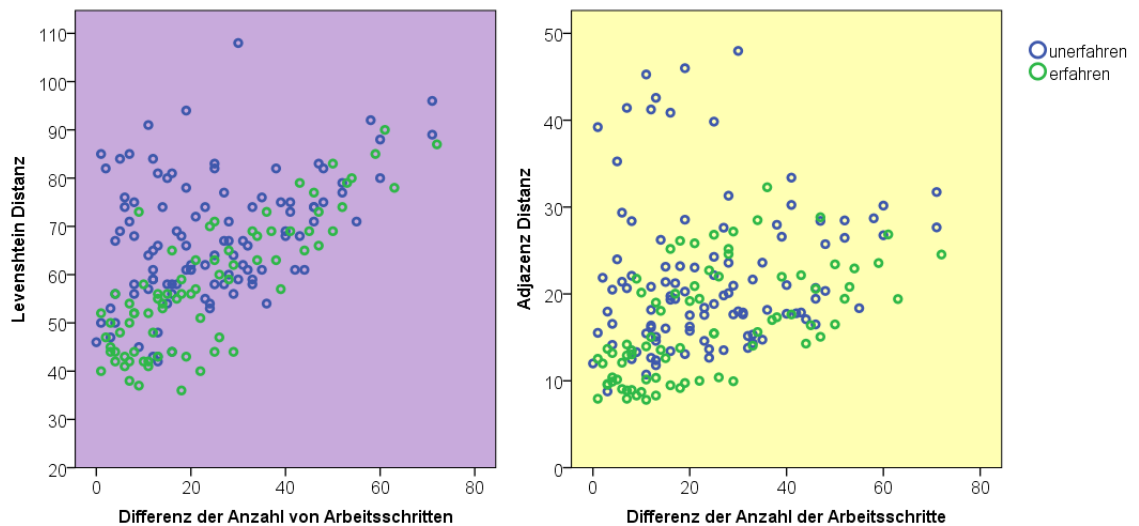


Abbildung 27: Streudiagramme der Distanzmaße in den Gruppen Erfahren und Unerfahren mit unbereinigten Daten. Der Zusammenhang zwischen Distanzmaß und Differenz der Anzahl der Schritte ist erkennbar.

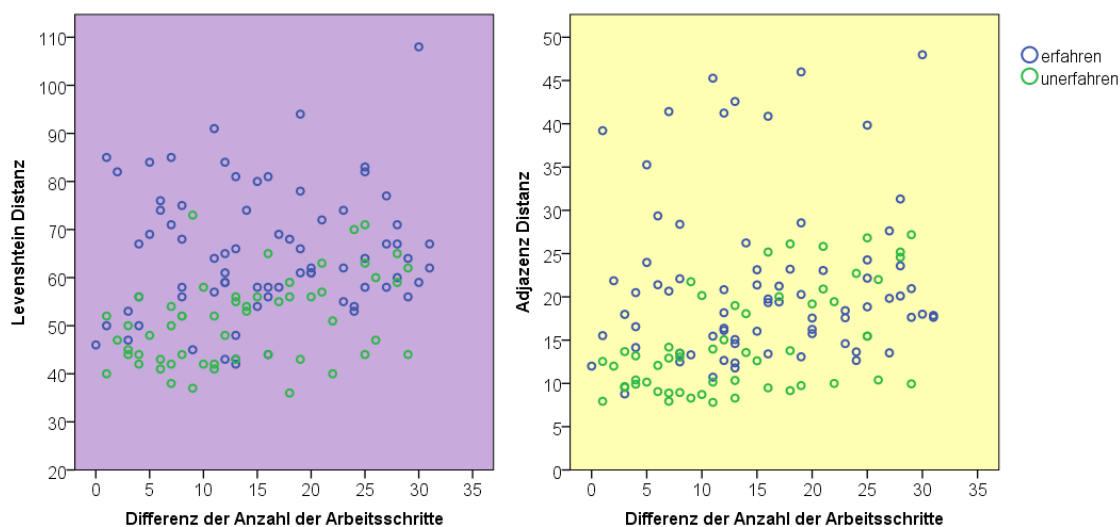


Abbildung 28: Streudiagramme der Distanzmaße in den Gruppen erfahrenen und unerfahrenen mit Daten, die um die Differenz der Anzahl der Arbeitsschritte bereinigt wurden.

Erneute Tests mit den bereinigten Daten ergaben ebenfalls einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$) zwischen den erfahrenen und unerfahrenen Chirurgen. Die beiden angewandten Maße Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz zeigen beide einen signifikanten Unterschied. Die Levenshteindistanz zeigt in diesem Beispiel eine etwas bessere Clusterung, das heißt die Levenshteindistanz ist hier sensitiver für Unterschiede im Ablauf.

Die Analysen zeigen, dass bei den untersuchten Operationen der zervikalen Diskektomie Unterschiede im Ablauf zu finden sind. Innerhalb der Gruppe der Assistenzärzte ist die Variation der Abläufe signifikant größer als innerhalb der Gruppe der erfahrenen Neurochirurgen. In beiden Gruppen gab es jeweils vier verschiedene Operateure. In den Streudiagrammen in Abbildung 28 ist die relativ niedrige und wenig streuende Distanz der Erfahrenen im Vergleich zu den hohen und weit verteilten Distanzen innerhalb der Unerfahrenen erkennbar. Die Unterschiede im Ablauf, die durch die Distanzmaße gemessen wurden, beruhen nicht auf der Anzahl der Arbeitsschritte. Dies konnte durch bereinigte Daten gezeigt werden. Instrumentennutzung und Aktionsfolgen lieferten keine anderen Ergebnisse.

Insgesamt konnte die sinnvolle Anwendung der Distanzmaße anhand von Daten aus der klinischen Praxis gezeigt werden. Mit Hilfe von Levenshtein und Adjazenzdistanz können Unterschiede im Ablauf von chirurgischen Eingriffen quantifiziert werden und stehen so für weiterführende Analysen zur Verfügung.

6.1.4 Prognose des Distanzmaßes für zervikale Diskektomien

Im Kapitel 4 wurde anhand von Trainingsdaten untersucht, ob bereits während des Eingriffs Prognosen der endgültigen Distanz zu einem Referenzprozess möglich sind. Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute Vorhersage.

Trainingsdaten spiegeln reale chirurgische Eingriffe gut, jedoch modellhaft wieder. Ob die Ergebnisse auch auf im klinischen Alltag durchgeführte Operationen angewandt werden kann, wird im Folgenden untersucht. Genutzt werden an dieser Stelle die Aufnahmen von 28 zervikalen Diskektomien.

Es wurde das Distanzmaß zwischen einem Eingriff nach der Hälfte der Schritte zu einem anderen Eingriff nach allen Schritten berechnet, und umgekehrt. Das Prinzip wurde im Kapitel 4 näher erläutert. Danach wurde der Korrelationskoeffizient r nach Pearson zwischen $d^{100\%}$ und $d^{50\%}$ berechnet. Für die Levenshteindistanz ist $r_{\text{Lev}} = 0,449$ und für die Adjazenzdistanz ist $r_{\text{Adj}} = 0,603$. Beide Distanzmaße weisen einen hohen Zusammenhang auf.

Die Ergebnisse der Untersuchung, wie sich der Korrelationskoeffizient mit Fortschreiten der Operation entwickelt, sind in Tabelle 10 aufgelistet. Die Signifikanz ist für alle Koeffizienten $p < 0,001$. Der Zusammenhang ist bereits nach 10% der Schritte mit knapp 0,4 hoch. Die entsprechenden Kurven sind in Abbildung 29 dargestellt.

	Korrelationskoeffizient	
	r_{Lev}	r_{Adj}
10%	0,390	0,372
20%	0,382	0,403
30%	0,393	0,427
40%	0,416	0,499
50%	0,449	0,603
60%	0,527	0,731
70%	0,650	0,891
80%	0,827	0,970
90%	0,956	0,998

Tabelle 10: Korrelationskoeffizient r zwischen dem Distanzmaß nach vollständigem OP-Ablauf (100%) zum Distanzmaß nach ($x\%$) der Schritte für die Levenshtein und Adjazenzdistanz für Operationen der zervikalen Diskektomien.

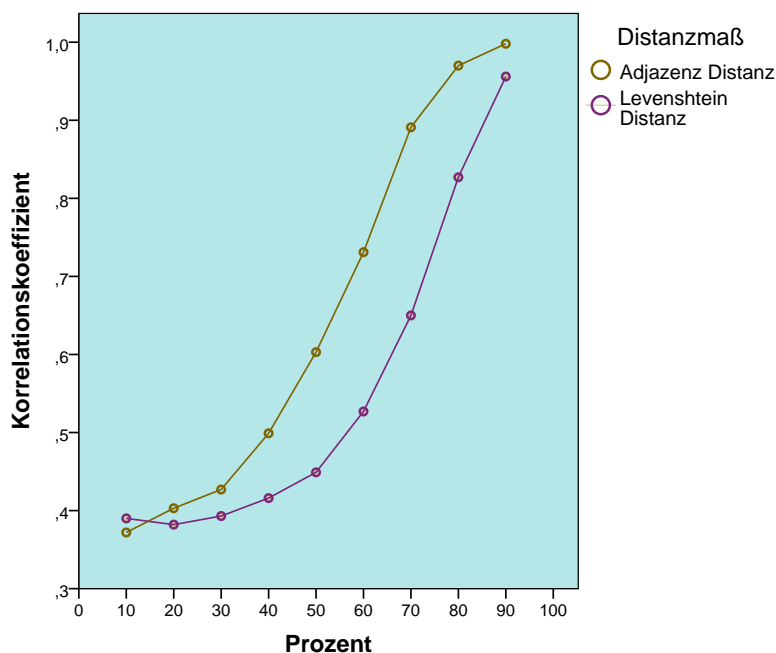


Abbildung 29: Verhalten des Korrelationskoeffizienten mit fortschreitendem OP-Verlauf für die Adjazenz und die Levenshteindistanz für Operationen der zervikalen Diskektomien.

Die Kurve der Korrelationskoeffizienten der Adjazenzdistanz weist den gleichen qualitativen Verlauf auf, der bereits bei den Trainingsdaten in Kapitel 4.4 erkennbar war. Ein relativ flacher Verlauf am Anfang und am Ende des Eingriffs, wenn sich Änderungen nicht stark auswirken und einen steilen Anstieg in der Mitte der OP. Die Levenshteindistanz hingegen hat bis etwa zur Hälfte der Schritte nur einen schwachen Anstieg. Danach steigt die Güte der Prognose mit jedem weiteren Schritt bis zur Endphase der OP stark an.

Insgesamt ist der Korrelationskoeffizient bei der Adjazenzdistanz etwas höher als der der Levenshteindistanz. Das Niveau ist bei beiden Distanzmaßen von Anfang an sehr hoch. Deshalb kann festgestellt werden, dass eine Vorhersage der Distanz bereits im OP-Verlauf hohe Genauigkeit hat.

6.2 Vergleich der einfachen und komplexen Neck Dissection

6.2.1 Klinischer Studienaufbau

Im bisherigen Verlauf der Arbeit wurden die Distanzmaße genutzt, um die Arbeitsweise von erfahrenen und unerfahrenen Chirurgen auf ihre Variabilität hin zu prüfen. Die Distanzmaße sind dessen ungeachtet für ein weites Spektrum an

Analysen geeignet. Der Einfluss von unterschiedlichen Operationsmethoden kann untersucht werden. Dies wird nun anhand von Neck Dissections gezeigt.

Ziel der Analysen ist es zu untersuchen, inwieweit sich die Methoden auf die durchgeführten Arbeitsschritte in den Hauptphasen der Neck Dissection auswirken.

Neck Dissections werden bei bösartigen Tumoren im Kopf-Hals Bereich mit Verdacht auf Metastasen durchgeführt. Dazu werden die Halslymphknoten zwischen Unterkieferknochen und Schlüsselbein unter Einbeziehung des umgebenden Gewebes operativ entfernt. Ziel ist es, Metastasen des Tumors zu entfernen und eine weitere Streuung zu verhindern. Die Lymphknoten werden in verschiedene Level je nach anatomischer Lage eingeteilt, siehe Abbildung 30. Üblicherweise werden die Eingriffe wie folgt klassifiziert: Selektive Neck Dissection, Modifizierte Radikale Neck Dissection und Radikale Neck Dissection (Robbins *et al.*, 2008). In dieser Arbeit erfolgte eine Einteilung durch einen Experten nach der Komplexität der Operation in *einfache* und *komplexe* Eingriffe. Die Gründe, einen Eingriff als *komplex* zu klassifizieren, sind in Tabelle 11 aufgelistet. Komplexe Neck Dissections lassen einen höheren Operationsaufwand, eine längere Operationsdauer sowie ein erhöhtes Komplikationsrisiko erwarten.

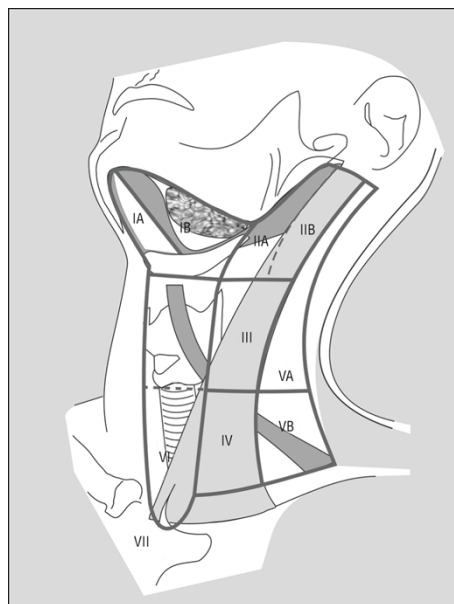


Abbildung 30: Einteilung der Lymphknoten nach verschiedenen Leveln (Robbins *et al.*, 2008).

○	Bereits erfolgte Neck Dissection oder sonstige Lymphknotenentfernung
○	Neoadjuvante Bestrahlung des Operationsgebietes
○	Klinisch festgestellte Metastasen in den zu entfernenden Lymphknoten
○	Durchführung einer Modifiziert Radikalen Neck Dissection

Tabelle 11: Gründe eine Neck Dissection als *komplex* zu identifizieren.

Es wurden insgesamt 37 Operationen von einem geschultem Protokollanten mit Hilfe des Workfloweditors aufgenommen. Die Eingriffe fanden von Januar bis Dezember 2011 an der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde am Universitätsklinikum Leipzig statt. Die Daten enthalten 19 Operationen der einfachen Neck Dissection und 18 Operationen der komplexen Neck Dissection.

Falls Patienten beidseitig operiert wurden, sind zwei chirurgische Prozesse protokolliert wurden. Deshalb werden an dieser Stelle nur Arbeitsschritte betrachtet, die in den Phasen *Gewebe präparieren* sowie *Entfernung Lymphknoten* verrichtet wurden. Die übrigen OP-Phasen, wie *Vorbereitung Patient* und *Hautnaht* werden nicht betrachtet, weil sie nicht bei jedem Eingriff konsistent vorliegen. Einen Überblick über die Phasen einer Neck Dissection gibt Abbildung 31. Im Mittelpunkt stehen wiederum der Chirurg und die Aktionen, die er mit der rechten Hand ausgeführt hat. Alle in dieser Studie untersuchten Chirurgen sind Rechtshänder.

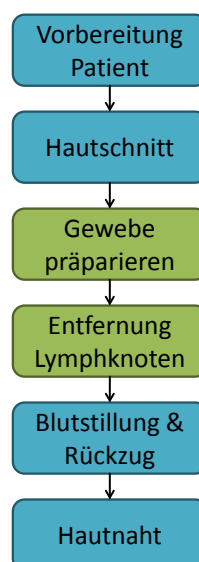


Abbildung 31: Typische Phasen einer Neck Dissection. In grün sind die beiden Phasen dargestellt, die in dieser Arbeit analysiert werden.

6.2.2 Konventionelle Workflowanalysen

Als erstes wird eine konventionelle Workflowanalyse durchgeführt. Untersucht werden die durchgeführten Aktionen in den betrachteten Prozessphasen. Mit Hilfe des Mann Whitney U Tests wurde geprüft, ob sie sich in Häufigkeit h und durchschnittlicher Dauer t der Arbeitsschritte für die beiden Methoden *einfach* und *komplex* unterscheiden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 gelistet. Mit einer Ausnahme unterscheiden sich die durchgeführten Tätigkeiten in den beiden Gruppen nicht signifikant. Wird bei der konventionellen Workflowanalyse zusätzlich nach den beiden Phasen (Gewebe präparieren und Lymphknoten entfernen) unterschieden, dann sind ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen *einfach* und *komplex* nachweisbar. Einzige Ausnahme ist *schneiden* in der Phase der Lymphknotenentfernung. Zusätzlich fällt auf, dass die Aktion *halten* in der Phase *Gewebe präparieren* nicht durchgeführt wird.

Aktion	Kategorie	Häufigkeit	Dauer [s]	Sign. h	Sign. t
wechseln	einfach	1,8 ± 1,3	8,5 ± 3,6	0,628	0,900
	komplex	1,8 ± 1,6	7,3 ± 1,9		
säubern	einfach	6,6 ± 7,1	6,8 ± 2,8	0,048	0,441
	komplex	12,4 ± 12,9	7,4 ± 4,0		
koagulieren	einfach	21,4 ± 14,8	8,7 ± 3,4	0,691	0,675
	komplex	23,5 ± 17,7	8,7 ± 2,8		
schneiden	einfach	11,0 ± 7,3	9,3 ± 6,0	0,720	0,461
	komplex	11,8 ± 8,4	12,1 ± 12,1		
präparieren	einfach	19,4 ± 13,9	21,5 ± 16,5	0,124	0,301
	komplex	26,9 ± 18,0	23,8 ± 13,7		
tasten	einfach	1,8 ± 1,1	9,5 ± 4,3	0,114	0,786
	komplex	4,6 ± 4,6	8,8 ± 3,9		
halten	einfach	2,6 ± 1,8	12,3 ± 8,0	0,339	0,259
	komplex	1,3 ± 0,6	26,3 ± 25,7		
platzieren	einfach	3,3 ± 2,4	9,2 ± 5,5	0,727	0,369
	komplex	2,9 ± 1,7	9,7 ± 3,6		

Tabelle 12: Konventionelle Workflowanalyse über die Aktionen, bei der Neck Dissection. Alle signifikanten Unterschiede wurden farblich markiert.

Bei der Neck Dissection spielen die entnommenen Lymphknoten-Level eine Rolle (vgl. Abbildung 30). In Tabelle 13 ist die Häufigkeit h der Entnahme von Lymphknoten in einem Level dargestellt. Auch hier ergeben sich, außer in Level 5A keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen.

Bisher wurde die Häufigkeit der Arbeitsschritte und deren durchschnittliche Länge untersucht. Nach der herkömmlichen Workflowanalyse ist zu schließen, dass es keine Unterschiede in Bezug auf durchgeführte Arbeitsschritte zwischen *einfachen* und *komplexen* Neck Dissection gibt. Ob aber Unterschiede im Ablauf der Tätigkeiten vorhanden sind, konnte nicht gemessen werden.

LK-Level	Kategorie	Häufigkeit	Sign. <i>h</i>
1A	einfach	1,0 ± 0,0	0,999
	komplex	1,0 ± 0,0	
1B	einfach	1,0 ± 0,0	0,999
	komplex	1,0 ± 0,0	
2A	einfach	1,4 ± 0,6	0,328
	komplex	1,9 ± 1,5	
2B	einfach	1,6 ± 0,9	0,910
	komplex	1,8 ± 1,5	
3	einfach	1,3 ± 0,4	0,260
	komplex	1,9 ± 1,7	
4	einfach	1,4 ± 1,1	0,684
	komplex	1,1 ± 0,3	
5A	einfach	1,1 ± 0,3	0,002
	komplex	1,8 ± 0,7	
5B	einfach	1,0 ± 0,0	0,455
	komplex	1,3 ± 0,5	

Tabelle 13: Konventionelle Workflowanalyse über die Lymphknotenlevel bei der Neck Dissection.

6.2.3 Distanzanalysen

Die in Kapitel 3.1 eingeführten Distanzmaße dienen hierbei zur Analyse, ob sich die Handlungsabläufe bei den beiden Operationsmethoden einfach und komplex unterscheiden. Gegenstand der Untersuchung sind neben den durchgeführten Arbeitsschritten des Chirurgen in gleicher Weise die Lymphknotenlevel.

Das Distanzmaß hängt bei der Neck Dissection ebenfalls von der Anzahl der durchgeführten Arbeitsschritte ab, vergleiche Abbildung 32. Deshalb werden die Ergebnisse für die bereinigten Daten präsentiert. Es wird das 40% Perzentil der Anzahldifferenz Δn gewählt, da dann die Abhängigkeit augenscheinlich nicht mehr gegeben ist. Für die Phase der Gewebepräparation ist dies 25, für die Phase der Lymphknotenentfernung 40. Im Streudiagramm, Abbildung 33, ist die Bereinigung der Daten von der Abhängigkeit der Differenz der Anzahl der Arbeitsschritte zu erkennen. Statistische Tests mit Hilfe des Man Whitney U Tests ergeben für die

Phase der Lymphknotenentfernung keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$). Für die Präparation von Gewebe besteht ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$). Die dazugehörigen Boxplots sind in der Abbildung 34 dargestellt.

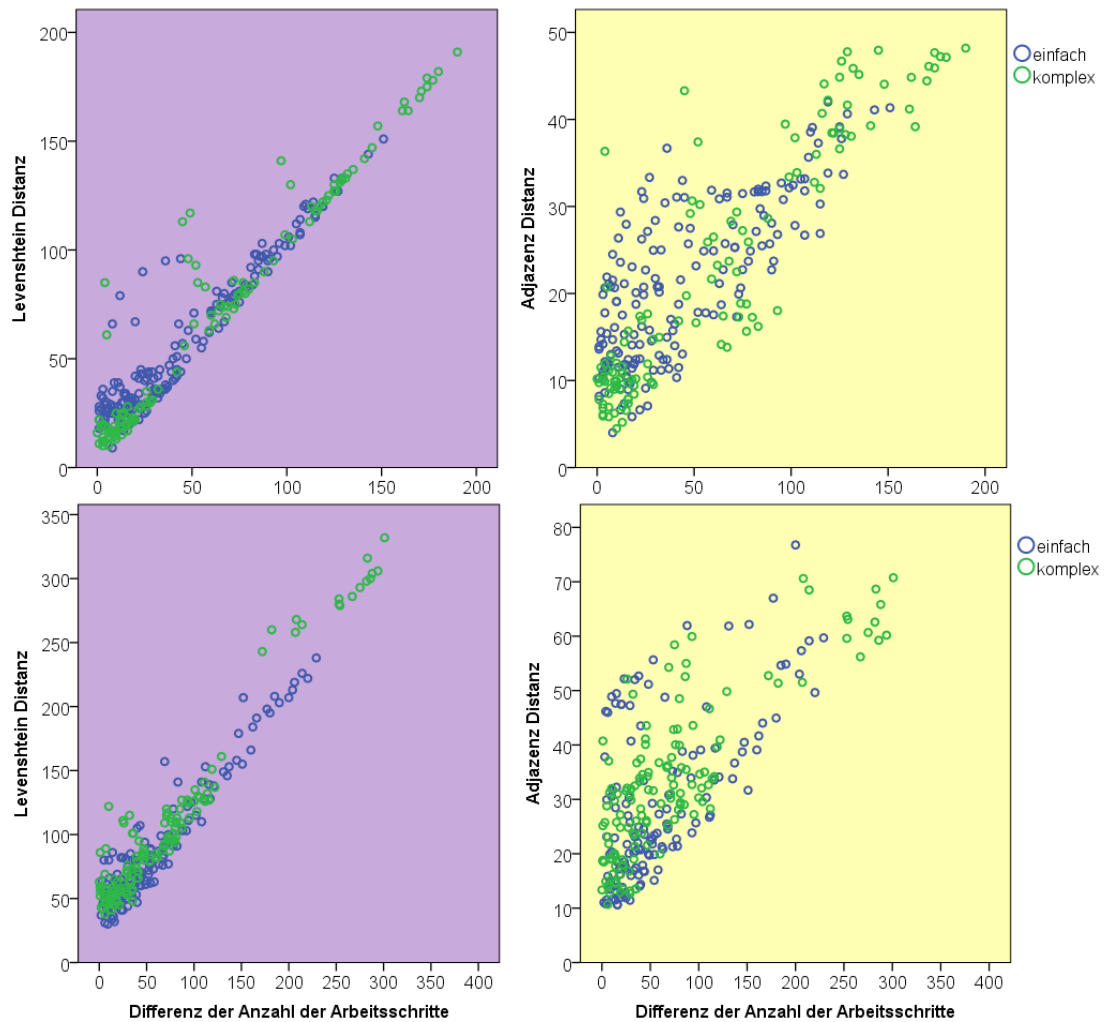


Abbildung 32: Streudiagramme der Distanzmaße in den Gruppen *einfach* und *komplex* für unbereinigte Daten. Oben: Phase *Gewebe präparieren*; unten: Phase *Entfernung von Lymphknoten*. Es ist $N_{\text{einfach}} = 171$ und $N_{\text{komplex}} = 153$.

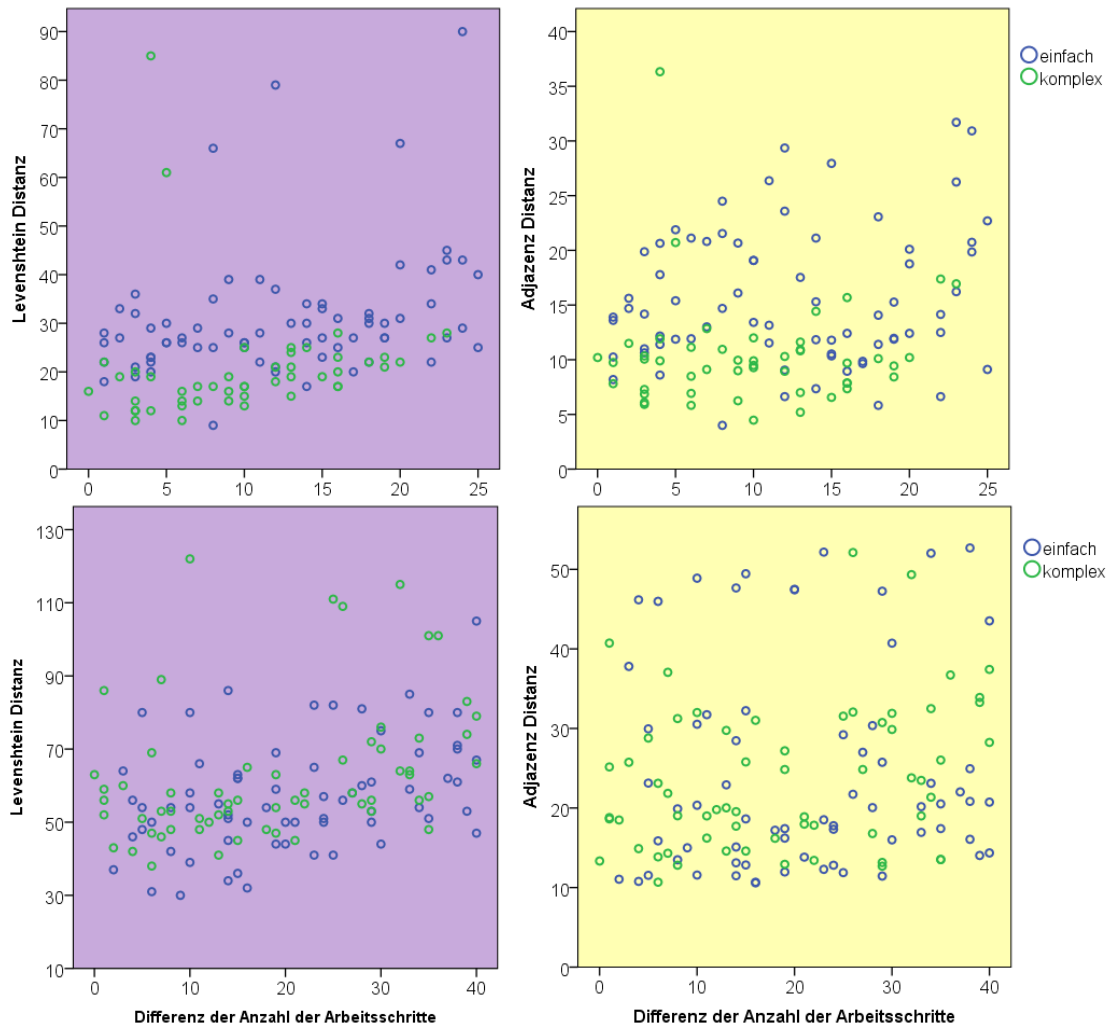


Abbildung 33: Streudiagramme der Distanzmaße in den Gruppen *einfach* und *komplex* für bereinigte Daten. Oben: Phase *Gewebe präparieren* mit $\Delta n \leq 25$, es ist $N_{\text{einfach}} = 72$ und $N_{\text{komplex}} = 49$; unten: Phase *Entfernung von Lymphknoten* mit $\Delta n \leq 40$, es ist $N_{\text{einfach}} = 68$ und $N_{\text{komplex}} = 62$.

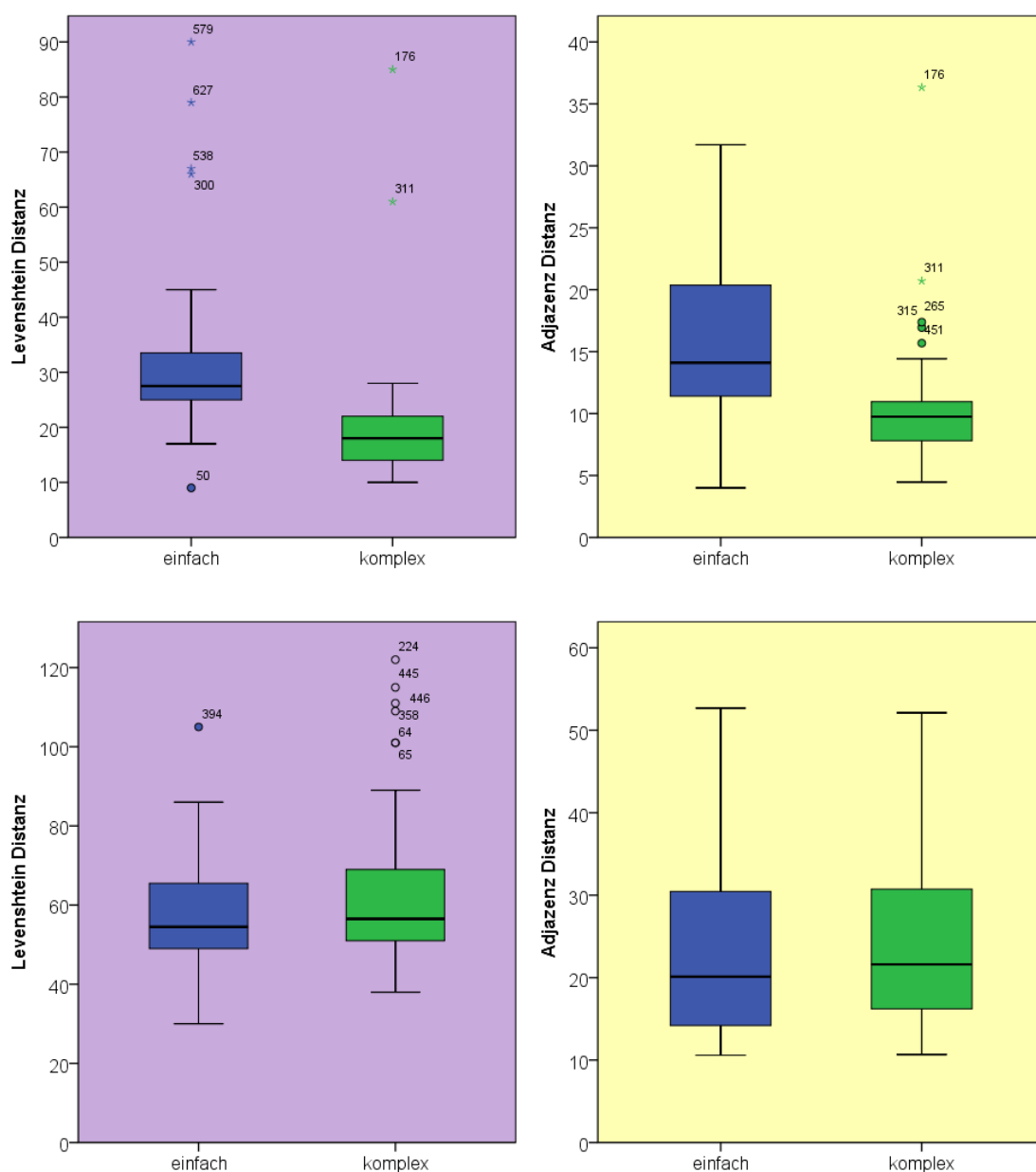


Abbildung 34: Boxplot der Distanzmaße in den Gruppen *einfach* und *komplex* für bereinigte Daten. Oben: Phase *Gewebe präparieren*, signifikante Unterschiede ($p < 0,001$); unten: Phase *Entfernung von Lymphknoten*, keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$).

Die Ergebnisse zeigen für die beiden verschiedenen Operationsmethoden Unterschiede im Ablauf in der Phase *Gewebe präparieren*, dahingegen keine Unterschiede im Ablauf für die Phase *Entfernung der Lymphknoten*. Die Methodik der *einfachen* Neck Dissection hat dabei eine höhere Variation der Arbeitsabläufe beim präparieren des Gewebes als die *komplexe* Neck Dissection. Im Streudiagramm

der bereinigten Daten (Abbildung 33) sind die Unterschiede zwischen den Phasen gut zu erkennen. Augenscheinlich getrennt sind die Cluster zu den beiden OP-Methoden *einfach* und *komplex* im oberen Teil der Abbildung für Gewebe präparieren, während sich im unteren Teil bei Entfernung der Lymphknoten die Distanz bei den Methoden nicht unterscheidet.

Gezeigt wurde damit, dass, gleichwohl welche Art der Neck Dissection durchgeführt wird, die Entnahme der Lymphknoten relativ ähnlich abläuft und keine großen Variationen auftreten.

6.2.4 Prognose des Distanzmaßes der Neck Dissection

Im Kapitel 4 wurde anhand von Trainingsdaten untersucht, ob bereits während des Eingriffs Prognosen der endgültigen Distanz zu einem Referenzprozess möglich sind. Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute Vorhersage.

Ebenfalls sehr gute Vorhersagen ergab die Prognose des Distanzmaßes bei zervikalen Dissektionen. Im Folgenden werden die Untersuchungen auf Neck Dissection angewandt. Genutzt werden die Aufnahmen von 37 Neck Dissections.

Es wurde das Distanzmaß zwischen einem Eingriff nach der Hälfte der Schritte zu einem anderen Eingriff nach allen Schritten berechnet, und umgekehrt. Das Prinzip wurde im Kapitel 4 näher erläutert.

Die Ergebnisse der Untersuchung, wie sich der Korrelationskoeffizient mit Fortschreiten der Operation entwickelt, sind in Tabelle 14 aufgelistet. Die Signifikanz ist für alle Koeffizienten $p < 0,001$. Der Zusammenhang ist bereits nach 10% der Schritte mit knapp 0,5 hoch. Die entsprechenden Kurven sind in Abbildung 35 zu sehen.

	Korrelationskoeffizient	
	r_{Lev}	r_{Adj}
10%	0,563	0,449
20%	0,558	0,484
30%	0,587	0,544
40%	0,651	0,634
50%	0,732	0,732
60%	0,817	0,820
70%	0,894	0,900
80%	0,954	0,963
90%	0,989	0,991

Tabelle 14: Korrelationskoeffizient r zwischen dem Distanzmaß nach vollständigem OP-Ablauf (100%) zum Distanzmaß nach ($x\%$) der Schritte für die Levenshtein und Adjazenzdistanz für Eingriffe der Neck Dissection.

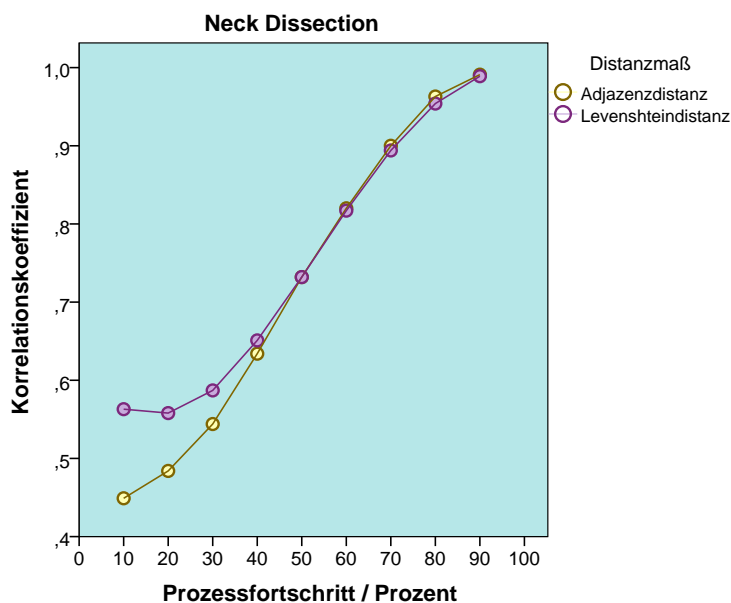


Abbildung 35: Verhalten des Korrelationskoeffizienten mit fortschreitendem OP-Verlauf für die Adjazenz- und die Levenshteindistanz für Eingriffe der Neck Dissection.

Die Kurve der Korrelationskoeffizienten der Distanzmaße weist einen ähnlich qualitativen Verlauf auf, der bereits bei den Trainingsdaten in Kapitel 4.4 und zervikalen Diskektomien erkennbar war. Der Korrelationskoeffizient bei der Adjazenzdistanz bis 40% Prozessfortschritt etwas niedriger als der der Levenshteindistanz. Das Niveau ist bei beiden Distanzmaßen von Anfang an sehr hoch. Am Ende der OP gibt es keine Unterschiede zwischen den Distanzmaßen in der Güte der Prognose.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass eine Vorhersage der Distanz im OP-Verlauf sehr gut möglich ist. Der Grad des Zusammenhangs ist bei allen getesteten Daten bereits bei kleinem Prozessfortschritt gut ($\geq 0,4$) und steigt im OP-Verlauf weiter an und ist kurz vor Ende des Eingriffs nahe bei eins.

7 Diskussion und Fazit

7.1 Zusammenfassung

Ein mit dem Surgical Workflow-Editor aufgenommener chirurgischer Prozess wird mit Hilfe der formalen Sprachen in eine Zeichenkette umgewandelt. Dabei wird jede Aktion umkehrbar eindeutig einem Buchstaben zugeordnet. Eine Abfolge von Aktionen, ein Prozess, wird zu einer Zeichenkette. Dieser Schritt ist notwendig, um die Methoden zur Ermittlung der Distanzen zwischen chirurgischen Prozessen anwenden zu können.

Allgemein ist ein Distanzmaß ein Maß, das die Unähnlichkeit als Grad der Differenz von interessierenden Eigenschaften zwischen zwei Objekten misst. Chirurgische Prozesse sind sich ähnlich, wenn die Tätigkeiten und deren Abfolge weitgehend übereinstimmen. Diese unscharfe Einteilung wird durch das Distanzmaß auf eine Skala transformiert und damit vergleichbar gemacht.

In dieser Arbeit wurden vier Distanzmaße vorgestellt: Jaccarddistanz, Levenshteindistanz, Adjazenzdistanz und Graphmatchingdistanz.

Um aus den vier vorgestellten Distanzmaßen dasjenige zu identifizieren, das am besten geeignet ist, um Unterschiede in chirurgischen Workflows zu messen, wurde eine Evaluationsstudie durchgeführt. Genutzt wurden dazu Daten einer Trainingsstudie, durchgeführt von der Klinik und Poliklinik für Kinderchirurgie an der Universität Leipzig in Kooperation mit dem Innovationszentrum für Computergestützte Chirurgie, zur ergonomischen Beurteilung konventioneller versus single-incision laparoskopischer Chirurgie. Neben drei Settings, gebildet aus verschiedenen minimalinvasiven Zugangsarten und laparoskopischen Instrumenten, wurden drei verschiedene Aufgaben und zwei Gruppen von Probanden betrachtet. Die Aufgaben wurden an Phantomen aus Silikon durchgeführt und waren realen OP-Situationen nachempfunden. Die Probandengruppen setzten sich aus Experten (Chirurgen mit mehrjähriger klinischer Praxis in minimalinvasiver Chirurgie) und Novizen (Studenten der Medizin ohne praktische Erfahrungen) zusammen.

Die These der größeren Distanzen innerhalb der Gruppe der Novizen im Vergleich zu den kleineren Distanzen innerhalb der Gruppe der Experten dient als Auswahlkriterium, um das probateste Distanzmaß für chirurgische Prozesse zu identifizieren. Bereits viele vorangegangene Arbeiten (vgl. Kapitel 3.3) erkannten, dass Novizen nicht nur länger brauchen und mehr Arbeitsschritte machen, sondern auch Bewegungen und Aktionen durchführen, die nicht direkt zielführend sind. Mit statistischen Tests wurde die Übereinstimmung mit der These für alle Settings und Aufgaben der Trainingsdaten überprüft. Die Schlussfolgerung aus den Er-

gebnissen war, dass Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz beide gut geeignet sind, um Unterschiede in chirurgischen Workflows zu messen. Eine Diskussion der Ergebnisse der Evaluationsstudie wurde in Kapitel 3.3 geführt.

Die Erweiterung der Workflowanalyse von retrospektiver Betrachtung hin zur Anwendung zur Laufzeit des chirurgischen Eingriffs wurde in Kapitel 4 betrachtet. Dazu wurde untersucht, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Distanzmaß zur Laufzeit zu dem Distanzmaß am Ende der OP gibt. Angewandt auf die Trainingsdaten der Instrumentenstudie zeigten die Ergebnisse eine hohe signifikante Korrelation, die sich während des Fortschreitens der OP zunehmend verbesserte. Insgesamt kann konstatiert werden, dass es sehr gut möglich ist, schon im Verlauf eines chirurgischen Eingriffs die Distanz zu anderen Operationen zu prognostizieren.

In Kapitel 5 wurde der Zusammenhang zwischen Prozessablauf und Ergebnisqualität untersucht. Die zentrale Hypothese lautete: Je größer die Distanz eines chirurgischen Prozesses zum Best Practice, desto schlechter ist das Prozessergebnis. Genutzt wurden hierzu wiederum die Trainingsdaten. Die Qualität des Ergebnisses wurde in einem verblindeten Review bestimmt. Der Prozess mit der besten Qualität wurde als Best Practice angesehen. Die Ergebnisse zeigen für die meisten Settings eine signifikante Korrelation, die Hypothese kann nicht abgelehnt werden. Aus dem Ablauf des Prozesses ist es möglich, Vorhersagen zur Qualität des Ergebnisses zu machen.

Die bisher nur auf Trainingsdaten getesteten Methoden fanden ebenfalls in der klinischen Praxis Anwendung. Neurochirurgische Operationen der zervikalen Diskektomie wurden von erfahrenen und unerfahrenen Chirurgen durchgeführt. Die Distanzmaße Levenshtein und Adjazenz zeigen auch hier Unterschiede in den beiden Gruppen. Die Arbeitsweise der unerfahrenen Chirurgen zeigt größere Variationen als die der erfahrenen Chirurgen. Die Prognose der Distanzmaße zur Laufzeit ist hier auch sehr gut.

Untersuchungen zur Variation der Abläufe bei verschiedenen Operationsmethodiken wurden anhand von Neck Dissection in der HNO-Chirurgie durchgeführt. In der Phase der Lymphknotenentnahme konnten keine unterschiedlichen Abläufe gemessen werden. Dahingegen wurden in der vorhergehenden Phase der Präparation des umliegenden Gewebes große Variationen des OP-Verlaufs gemessen, je nachdem, ob eine einfache oder komplexe Neck Dissection durchgeführt wurde. Zur Messung von Unterschieden in chirurgischen Prozessen in der klinischen Praxis sind Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz angemessene Methoden.

7.2 Zielerreichung

In der Einleitung wurden fünf Ziele dieser Arbeit genannt. Im Folgenden wird diskutiert, ob die Ziele erreicht wurden und welche neuen Probleme daraus entstanden sind.

1.1 Evolution von Distanzmaßen zur Messung der Variationen im Ablauf von chirurgischen Prozessen.

Das Ziel wurde erreicht, indem in Kapitel 3.1 Jaccard, Levenshtein, Adjazenz und Graphmatchingdistanz ausgewählt, erläutert und an einem Minimalbeispiel vorgeführt wurden.

1.2 Evaluierung verschiedener Maße zur Bestimmung eines optimalen Distanzmaßes, um Unterschiede im Ablauf von chirurgischen Prozessen messen zu können.

Das Ziel wurde erreicht, indem in Kapitel 3.2 eine Evaluationsstudie diesbezüglich durchgeführt wurde. Zur optimalen Messung des Unterschieds zwischen chirurgischen Prozessen wurden Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz identifiziert.

2.1 Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Distanz am Ende und der Distanz zur Laufzeit einer Operation.

In Kapitel 4 wurde dieser Zusammenhang untersucht. Eine hohe Korrelation konnte nachgewiesen werden. Das Ziel wurde erreicht. Es ist damit möglich, schon zur Laufzeit der Operation Distanzanalysen des aktuellen Eingriffs mit bereits abgeschlossenen zu vergleichen.

2.2 Analyse des Zusammenhangs zwischen Veränderungen im Ablauf des chirurgischen Prozesses zur Qualität des Prozessergebnisses.

Je größer die Distanz eines chirurgischen Prozesses zum Best Practice, desto schlechter ist das Prozessergebnis, lautete die Hypothese 2 aus Kapitel 5. Sie konnte bestätigt werden. Das Ziel wurde erreicht.

Dies kann zur intraoperativen Einflussnahme auf das Prozessergebnis verwendet werden. Da es einen Zusammenhang zwischen Prozessablauf und Ergebnisqualität gibt, können unerwünschte Abweichungen zur Laufzeit sofort erkannt werden. Kritische Situationen können bestenfalls vermieden werden, bevor sie auftreten. Änderungen der Handlungen des Chirurgen haben Einfluss auf das Erreichen des Therapieziels und können bewusst eingesetzt werden, um die Qualität positiv zu beeinflussen.

Die Qualität der Erreichung des Therapieziels ist mit herkömmlichen Methoden nur schwer zu messen. Benutzt werden dazu einzelne Kennzahlen. Diese werden bisher nur retrospektiv erhoben. Die Auswahl der Kennzahlen und deren Erhe-

bung sind Gegenstand vieler Kontroversen. Mit der Messung der Distanz zum Best Practice gibt es ein Instrument, die Qualität des Ergebnisses einzuordnen und intraoperativ zu beeinflussen, bevor der Prozess abgeschlossen ist.

3 Anwendung der Distanzmaße anhand von relevanten Beispieldaten aus der klinischen Praxis.

Das Ziel wurde erreicht, indem in Kapitel 6 die Distanzmaße erfolgreich auf zwei verschiedene Gebiete der klinischen Praxis, Neurochirurgie (zervikale Diskektomie) und HNO-Chirurgie (Neck Dissection) angewandt wurden.

Die Einführung und ersten Analysen anhand der Levenhstein- und Adjazenzdistanz fanden auf Daten einer Trainingsstudie zur Beurteilung von minimalinvasiven Zugangsarten und laparoskopischen Instrumenten statt. Die Anwendbarkeit in der klinischen Praxis wurde gezeigt, indem unterschiedliche Fachdisziplinen der Chirurgie berücksichtigt (Neurochirurgie und HNO) und ebenso unterschiedliche Analysethemen (Erfahrungslevel und Operationsmethodik) ausgewertet wurden.

7.3 Ausblick

Durch die Erreichung der Ziele konnten die genannten Probleme gelöst werden und neue sind entstanden, die in weiterführenden Arbeiten behandelt werden können und in diesem Abschnitt angerissen werden.

Schwerpunkt bei der Entwicklung der Distanzmaße bildeten die durchgeführten Arbeitsschritte. Auf zeitliche Gesichtspunkte wurde bewusst verzichtet. Die Struktur des Ablaufs wird durch die Aktionen an sich vorgegeben, Untersuchungen der Zeit können diese Analysen erweitern, sind aber nicht notwendig, um inhaltliche Aspekte zu erfassen.

In dieser Arbeit wurden die Perspektive der genutzten chirurgischen Instrumente und die bearbeitete anatomische Struktur nicht betrachtet. In zukünftigen Anwendungsfällen können diese integriert werden. Damit erweitert sich der Blickwinkel vom reinen Ablauf der Tätigkeiten auf die jeweils genutzten Instrumente bzw. auf die spezifische Anatomie.

Mit den intraoperativen Distanzanalysen ist es möglich, den aktuellen Eingriff mit schon abgeschlossenen Operationen zu vergleichen. Eine Vielzahl von bisher nicht möglichen Analysemöglichkeiten ergibt sich durch diese Erweiterung. Dazu gehört die Klassifikation der laufenden OP zu bestimmten Clustern von Eingriffen, um daraus Informationen über benötigte Ressourcen zu ziehen. Beispielsweise könnte es Operationsmethoden geben, bei denen ein spezielles Ultraschallgerät benutzt wird oder nicht. Die Einordnung des aktuellen Eingriffs anhand der durchgeführten

Tätigkeiten ermöglicht eine Vorhersage, ob das Gerät noch gebraucht wird und daher vorbereitet werden muss. Ressourcenkonflikte können ebenso vermieden werden wie zeitliche Verzögerungen.

Am ICCAS entwickelte Franke (Franke *et al.*, 2013) eine Methode, um zur Laufzeit die verbleibende OP-Zeit vorherzusagen. Die Genauigkeit der Vorhersagen kann erhöht werden, indem diese Analysen nicht auf den kompletten Pool bereits abgeschlossener Operationen anzuwenden sind, sondern auf die Eingriffe zu beschränken, die dem aktuellen ähnlich sind.

Eine weitere Innovation wäre die Vorhersage des nächsten Arbeitsschrittes mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Durch ein generalisiertes Prozessmodell, d.h. durch das Übereinanderlegen aller bisherigen Operationspfade, ergibt sich ein komplexes Netz von Arbeitsschritten, aus dem die nächsten möglichen Aktionen bestimmt werden können. Die Klassifikation des laufenden Eingriffs im Pool der abgeschlossenen Operationen lässt sich mit Hilfe der Distanzanalyse zur Laufzeit realisieren. Dadurch ist es möglich, das generalisierte Prozessmodell zu verfeinern und die Vorhersage des nächsten Arbeitsschrittes zu verbessern.

Die Ausweitung des Vergleichs von Operationen des gleichen Typs zu Operationen unterschiedlicher Richtungen eröffnet ein neues Feld. Wie auch beim Prozess-Benchmarking der Vergleich über Branchengrenzen hinweg vorgenommen wird, um beste Methoden oder beste Techniken zu erkennen, kann die Analyse chirurgischer Prozesse fachübergreifend erfolgen. Optimale Methoden oder Techniken können dann adaptiert werden, um die Qualität der eigenen Prozesse und Ergebnisse zu erhöhen.

Die Distanzmaße können auf ein breites Feld von chirurgischen Prozessen angewandt werden. Einfache Eingriffe können ebenso wie komplizierte Eingriffe untersucht werden. Zu erwarten ist ein steigendes Distanzmaß innerhalb eines OP-Typs mit steigender Komplexität. Komplexitätsbetrachtungen können ebenfalls quantifiziert werden.

Die in dieser Arbeit betrachteten Analysen gingen vom Ablauf und Variationen im Ablauf aus und wie sich diese auf das Ergebnis des Prozesses auswirken. Eine Erweiterung ist die Klassifizierung der Ausgangsbedingungen und die Untersuchung, welchen Einfluss diese auf den Prozessablauf haben. Die Untersuchungen von Bouarfa (Bouarfa *et al.*, 2011), ob eine Operation komplex ist oder nicht, können auf Grundlage patientenspezifischer Eigenschaften erweitert werden. Im medizinischen Bereich sind Vorerkrankungen, anatomische Besonderheiten, Lage des Tumors und viele andere Kennzahlen wichtig, die Auswirkungen auf den Verlauf des chirurgischen Eingriffs haben.

Von Donabedian wurde eine Dreiteilung der Qualität in Strukturqualität, Prozessqualität und Ergebnisqualität vorgeschlagen. In dieser Arbeit wurde ein quantitativer Zusammenhang zwischen Prozessqualität und Ergebnisqualität hergestellt. Erweiterungen der Untersuchungen auf den quantitativen Einfluss der äußeren Parameter der Struktur bringen zusätzliche Erkenntnisse.

Die Evolution von Distanzmaßen für chirurgische Prozesse ist Ausgangspunkt für eine Vielzahl weiterer Analysen und Entwicklungen. Diese können genutzt werden, um die medizinische Betreuung von Patienten weiter zu verbessern und die Arbeit des Chirurgen adäquat zu unterstützen.

7.4 Fazit

Das Verständnis über den Arbeitsablauf des Chirurgen im komplexen und sich entwickelnden System des Operationssaales ist essentiell. Erst dadurch ist es möglich, den chirurgischen Workflow durch digitale Systeme optimal zu unterstützen oder ihn aktiv in gewünschte positive Richtung zu beeinflussen. Durch die Distanzanalysen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, ist das Verständnis des Arbeitsablaufs des Chirurgen vertieft wurden. Der Fokus der Analyse wandert von kennzahlenbasierten rein retrospektiven Analysen hin zu ablauforientierten Analysen, die ebenso intraoperativ zur Laufzeit durchgeführt werden können.

Aktuelle Probleme, wie die Notwendigkeit, Distanzen im Ablauf von chirurgischen Prozessen zu messen, oder die Analysen während der laufenden Operation konnten gelöst werden. Unterschiede der Abfolge der Tätigkeiten können nun nicht mehr nur qualitativ beschrieben, sondern quantitativ erfasst werden.

Der variable Prozessverlauf, der sich aus den patienten-individuellen Eigenschaften ergibt, ist der Hauptunterschied von chirurgischen Prozessen im Vergleich zu (automatisierten) Geschäftsprozessen. Bei jeglichen Analysen und der Entwicklung von Assistenzsystemen muss der individuelle Ablauf jedes Eingriffs mit vielen Freiheitsgraden des ausführenden Chirurgen zur bestmöglichen patienten-individuellen Therapie impliziert sein. Die Distanzmaße, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden, sind dazu geeignet. Einerseits werden die natürlichen Variationen der Arbeitsschritte der Chirurgen berücksichtigt, und andererseits sind sie sensitiv gegenüber Unterschieden und Gemeinsamkeiten.

Daraus ergeben sich neue Problemfelder, die in zukünftigen Arbeiten behandelt werden können. Die in dieser Arbeit eingeführten Distanzmaße sind bewusst allgemeingültig und einfach gehalten. Für diverse Anwendungsfälle kann es notwendig sein, diese anzupassen oder zu erweitern. Anpassungen können z.B.

durch Gewichtungen der semantischen Ähnlichkeit von Arbeitsschritten erfolgen. Erweiterungen um die Dimension der Zeit sind ebenso denkbar.

Die Messung des Ablaufs durch menschliche Beobachter hat Vorteile, ein automatisiertes Tracking kann aber präziser sein. Vorhandene Entwicklungen in diesem Bereich sollten vorangetrieben werden, um die Datengrundlage der Distanzmaße weiter zu verfeinern.

Insgesamt wurde mit der in dieser Arbeit dargelegten grundlegenden Methodik der Distanzmaße bei der Analyse chirurgischer Prozesse ein Grundstein für vielfältige weitere Untersuchungen gelegt.

Abbildungsverzeichnis

1	Ein Operationssaal aus dem Bereich der Neurochirurgie. Eine Vielzahl medizinischer Geräte und Personen bilden ein komplexes System mit gegenseitigen Abhängigkeiten.	3
2	Screenshot des Workflow-Editors. Die Zeitleiste ist zu sehen und die Aktionen, die der Chirurg mit der linken sowie der rechten Hand durchgeführt hat.	5
3	Visualisierung eines chirurgischen Prozesses eines minimalinvasiven Eingriffs. Unterscheidung nach linker und rechter Hand des Chirurgen, sowie die Darstellung der Aktivitäten mit den durchgeführten Tätigkeiten, dem benutzten Instrument sowie der zeitlichen Ausdehnung.	6
4	Eine Aktivität und die verschiedenen Perspektiven, aus denen sie betrachtet werden kann.	14
5	Visualisierung eines sehr kurzen theoretischen Prozesses X , anhand dessen eingeführten formalen Begriffe beispielhaft gezeigt werden.	19
6	Beispiel Prozesse zur Berechnung der Distanzmaße beim Vergleich von X_1 und X_2	19
7	Berechnung der Jaccarddistanz für den Vergleich von X_1 und X_2	20
8	Berechnung der Levenshteindistanz für den Vergleich von X_1 und X_2	22
9	Berechnung der Adjazenzdistanz für den Vergleich von X_1 und X_2 . Die Elemente der Matrix bilden sich aus der Häufigkeit der Teilworte der Länge 2. Beispielsweise kommt $\{AB\}$ in Prozess X_1 zweimal und in x_2 einmal vor.	23
10	Darstellung der Graphen von X_1 und X_2 sowie des maximalen gemeinsamen Teilgraphen SG . Berechnung der Graphmatchingdistanz.	24
11	Beispiel Prozesse zur Berechnung der Distanzmaße beim Vergleich von X_1 , X_2 und X_3	25
12	Schematische Darstellung der vier Settings von laparoskopischen Instrumenten und deren Zugangsarten.	27
13	Fertig bearbeitete Phantome für die Aufgaben <i>Schneiden</i> , <i>einfaches Nähen</i> und <i>komplexes Nähen</i>	28
14	Links: Versuchsaufbau mit 1-Trokar Zugang. Rechts: Im Pelvitainer eingespanntes Phantom zum komplexen Nähen mit gewinkelten laparoskopischen Instrumenten.	29

15	Ein Chirurgischer Prozess, der im Rahmen der Studie für laparoskopische Instrumente durchgeführt wurde. Der zugehörige String (nach dem Mapping entsprechend Tabelle 5) ist <i>GEBIECBGGEBI</i>	30
16	Boxplots für die vier Distanzmaße im Setting gewinkelte Instrumente und 1-Trokar. Die verschiedenen Aufgaben sind farbkodiert: gelb = Schneiden, grün = einfaches Nähen, blau = komplexes Nähen.	33
17	Schema der untersuchten Forschungsfragestellung: Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Distanz nach einem kompletten OP-Durchlauf und zur Hälfte der OP?	38
18	Streudiagramme und lineare Regression der Distanzmaße nach komplettem OP-Ablauf mit denen nach der Hälfte der Arbeitsschritte für die Adjazenzdistanz beim Setting gewinkelte Instrumente in 1-Trokar Zugang. Die Signifikanz ist für alle Fälle $p < 0,001$	40
19	Verhalten des Korrelationskoeffizienten mit fortschreitendem OP-Verlauf in Prozent für die Settings und die Aufgaben (braun = schneiden, grün = einfaches nähen, blau = komplexes nähen). Oben: Adjazenzdistanz; Unten: Levenshteindistanz.	41
20	Visualisierung der Hypothese: Je größer die Distanz eines chirurgischen Prozesses zum Best Practice, desto schlechter ist das Prozessergebnis.	45
21	Histogramm der erreichten Qualitäten, getrennt nach den beiden Probandengruppen. Die Erfahrenen erzielten im Vergleich zu den Unerfahrenen eine signifikant höhere Qualität.	47
22	Lineare Regression der Abweichung vom Best Practice mit der Levenshteindistanz für eine Auswahl der Settings und Aufgaben.	50
23	Lineare Regression der Abweichung vom Best Practice mit der Adjazenzdistanz für eine Auswahl der Settings und Aufgaben.	51
24	Anzahl der ausgeführten Arbeitsschritte bzw. benötigte Zeit, Best Practice im Vergleich zu allen Workflows. Die dargestellten Balken werden durch Minimum und Maximum begrenzt. Der Mittelwert ist durch \circ gekennzeichnet. Die Aufgaben sind farbkodiert: gelb = schneiden, grün = einfaches nähen, blau = komplexes nähen.	52
25	Distanzmaße zwischen den identifizierten Best Practices im Vergleich zu allen Workflows. Die dargestellten Balken werden durch Minimum und Maximum begrenzt. Der Mittelwert ist durch \circ gekennzeichnet. Die Aufgaben sind farbkodiert: gelb = schneiden, grün = einfaches nähen, blau = komplexes nähen.	53

26	Boxplot der Distanzmaße in den Gruppen der erfahrenen und unerfahrenen Chirurgen bezogen auf die durchgeführten Aktivitäten.	59
27	Streudiagramme der Distanzmaße in den Gruppen Erfahren und Unerfahren mit unbereinigten Daten. Der Zusammenhang zwischen Distanzmaß und Differenz der Anzahl der Schritte ist erkennbar.	60
28	Streudiagramme der Distanzmaße in den Gruppen erfahrenen und unerfahrenen mit Daten, die um die Differenz der Anzahl der Arbeitsschritte bereinigt wurden.	61
29	Verhalten des Korrelationskoeffizienten mit fortschreitendem OP-Verlauf für die Adjazenz und die Levenshteindistanz für Operationen der zervikalen Diskektomien.	63
30	Einteilung der Lymphknoten nach verschiedenen Leveln (Robbins <i>et al.</i> , 2008).	64
31	Typische Phasen einer Neck Dissection. In grün sind die beiden Phasen dargestellt, die in dieser Arbeit analysiert werden.	65
32	Streudiagramme der Distanzmaße in den Gruppen <i>einfach</i> und <i>komplex</i> für unbereinigte Daten. Oben: Phase <i>Gewebe präparieren</i> ; unten: Phase <i>Entfernung von Lymphknoten</i> . Es ist $N_{\text{einfach}} = 171$ und $N_{\text{komplex}} = 153$.	68
33	Streudiagramme der Distanzmaße in den Gruppen <i>einfach</i> und <i>komplex</i> für bereinigte Daten. Oben: Phase <i>Gewebe präparieren</i> mit $\Delta n \leq 25$, es ist $N_{\text{einfach}} = 72$ und $N_{\text{komplex}} = 49$; unten: Phase <i>Entfernung von Lymphknoten</i> mit $\Delta n \leq 40$, es ist $N_{\text{einfach}} = 68$ und $N_{\text{komplex}} = 62$.	69
34	Boxplot der Distanzmaße in den Gruppen <i>einfach</i> und <i>komplex</i> für bereinigte Daten. Oben: Phase <i>Gewebe präparieren</i> , signifikante Unterschiede ($p < 0,001$); unten: Phase <i>Entfernung von Lymphknoten</i> , keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$).	70
35	Verhalten des Korrelationskoeffizienten mit fortschreitendem OP-Verlauf für die Adjazenz- und die Levenshteindistanz für Eingriffe der Neck Dissection.	72

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht über die Ziele dieser Arbeit und deren Zuordnung zu den Kapiteln.	8
2	Anforderungen an die Distanzmaße, die bei der Auswahl der zu evaluierenden Maße Berücksichtigung fanden.	16
3	Übersicht über gängige Distanzmaße und das Ergebnis der Bewertung, zur Auswahl des Maßes zur detaillierten Untersuchung in einer Evaluationsstudie (vgl. Kapitel 3.2).	17
4	Vergleich der Distanzen zwischen den Prozessen X_1 , X_2 und X_3 . Die Unterschiede im Ablauf sind zwischen Prozess X_2 und X_3 am größten.	25
5	Mapping der protokollierten Aktivitäten auf Buchstaben, zur Konvertierung chirurgischer Prozesse in einen String. Grün gekennzeichnet sind Events.	30
6	Distanzen zwischen erfahrenen und unerfahrenen Probanden. . . .	32
7	Korrelationskoeffizienten r der Distanzmaße nach komplettem OP-Ablauf mit denen nach der Hälfte der Arbeitsschritte. Die Signifikanz ist für alle Fälle $p < 0,001$	40
8	Korrelationskoeffizient r nach Pearson und Signifikanz (2-seitig) für alle Kombinationen von Setting und Aufgabe und den mehrfach vorkommenden Best Practice. Farblich markiert sind Korrelationen, die auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ signifikant sind.	49
9	Konventionelle Workflowanalyse über die Aktionen, bei der zervikalen Diskektomie zum Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen Chirurgen. Signifikante Unterschiede wurden farblich gekennzeichnet.	58
10	Korrelationskoeffizient r zwischen dem Distanzmaß nach vollständigem OP-Ablauf (100%) zum Distanzmaß nach ($x\%$) der Schritte für die Levenshtein und Adjazenzdistanz für Operationen der zervikalen Diskektomien.	62
11	Gründe eine Neck Dissection als <i>komplex</i> zu identifizieren.	65
12	Konventionelle Workflowanalyse über die Aktionen, bei der Neck Dissection. Alle signifikanten Unterschiede wurden farblich markiert.	66
13	Konventionelle Workflowanalyse über die Lymphknotenlevel bei der Neck Dissection.	67
14	Korrelationskoeffizient r zwischen dem Distanzmaß nach vollständigem OP-Ablauf (100%) zum Distanzmaß nach ($x\%$) der Schritte für die Levenshtein und Adjazenzdistanz für Eingriffe der Neck Dissection.	71

Quellen- und Literaturverzeichnis

- AIOLLI, F., BURATTIN, A., u. SPERDUTI, A. A Business Process Metric Based on the Alpha Algorithm Relations. In F. Daniel, K. Barkaoui, S. Dustdar, W. Aalst, J. Mylopoulos, M. Rosemann, M.J. Shaw, u. C. Szyperski (Editoren), *Business Process Management Workshops, Lecture Notes in Business Information Processing*, Volume 99, S. 141–146. Springer, Berlin Heidelberg (2012)
- ARCHER, T. u. MACARIO, A. The drive for operating room efficiency will increase quality of patient care. *Current Opinion in Anaesthesiology* **19**(2):171–176 (2006)
- BACCARI, P., NIFOSI, J., GHIRARDELLI, L., u. STAUDACHER, C. Short- and mid-term outcome after laparoscopic repair of large incisional hernia. *Hernia: The Journal of Hernias and Abdominal Wall Surgery* (2012)
- BAE, J., LIU, L., CAVERLEE, J., u. ROUSE, W.B. Process Mining, Discovery, and Integration using Distance Measures. In *International Conference on Web Services, 2006. ICWS '06*, S. 479–488. IEEE (2006)
- BAE, J., LIU, L., CAVERLEE, J., ZHANG, L.J., u. BAE, H. Development of Distance Measures for Process Mining, Discovery, and Integration. *International Journal of Web Services Research* (4.4):1–17 (2007)
- BÜHLIGEN, U., WACHOWIAK, R., NEUMUTH, T., SCHUMANN, S., KASCHEK, B., u. TILL, H. Workflow-Analysen zur ergonomischen Beurteilung von „konventioneller“ versus „single-incision“ laparoskopischer Chirurgie (SILS). In *127. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie*. Berlin (2010)
- BLUM, T., FEUSSNER, H., u. NAVAB, N. Modeling and Segmentation of Surgical Workflow from Laparoscopic Video. In N. Navab, J.P.W. Pluim, u. M.A. Viergever (Editoren), *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2010*, Volume 6363, S. 400–407. Springer, Berlin Heidelberg (2010)
- BOHN, S., LESSNAU, M., u. BURGERT, O. Monitoring and diagnosis of networked medical hardware and software for the integrated operating room. *SIGBED Rev.* **6**(2):10:1–10:5 (2009)
- BOUARFA, L., SCHNEIDER, A., FEUSSNER, H., NAVAB, N., LEMKE, H.U., JONKER, P.P., u. DANKELMAN, J. Prediction of intraoperative complexity from preoperative patient data for laparoscopic cholecystectomy. *Artificial Intelligence in Medicine* **52**(3):169–176 (2011)

- BUNKE, H. On a relation between graph edit distance and maximum common subgraph. *Pattern Recognition Letters* **18**(8):689–694 (1997)
- BUNKE, H. u. KANDEL, A. Mean and maximum common subgraph of two graphs. *Pattern Recognition Letters* **21**(2):163–168 (2000)
- BUNKE, H. u. SHEARER, K. A graph distance metric based on the maximal common subgraph. *Pattern Recognition Letters* **19**(3-4):255–259 (1998)
- CAMP, R. Best Practice Benchmarking. The Path to Excellence. *CMA Magazine* (Vol. 72) (1998)
- CAO, C.G., MACKENZIE, C.L., IBBOTSON, J.A., TURNER, L.J., BLAIR, N.P., u. NAGY, A.G. Hierarchical decomposition of laparoscopic procedures. *Studies in Health Technology and Informatics* **62**:83–89 (1999)
- CAO, C.G.L., MACKENZIE, C.L., u. PAYANDEH, S. Task And Motion Analyses In Endoscopic Surgery. *5th Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* S. 583–590 (1996)
- CLAUS, G.P., SJOERDSMA, W., JANSEN, A., u. GRIMBERGEN, C.A. Quantitative standardised analysis of advanced laparoscopic surgical procedures. *Endoscopic Surgery and Allied Technologies* **3**(4):210–213 (1995)
- CLEARY, K. u. KINSELLA, A. OR 2020: the operating room of the future. *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques. Part A* **15**(5):495, 497–573 (2005)
- COOK, J.E. u. WOLF, A.L. Software process validation: quantitatively measuring the correspondence of a process to a model. *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.* **8**(2):147–176 (1999)
- DATTA, V., CHANG, A., MACKAY, S., u. DARZI, A. The relationship between motion analysis and surgical technical assessments. *American Journal of Surgery* **184**(1):70–73 (2002)
- DE ARMAS, I., GARCIA, I., u. PIMPALWAR, A. Laparoscopic single port surgery in children using Triport: our early experience. *Pediatric Surgery International* **27**(9):985–989 (2011)
- DIJKMAN, R., DUMAS, M., u. GARCÍA-BAÑUELOS, L. Graph Matching Algorithms for Business Process Model Similarity Search. In U. Dayal, J. Eder, J. Koehler, u. H. Reijers (Editoren), *Business Process Management, Lecture Notes in Computer Science*, Volume 5701, S. 48–63. Springer, Berlin Heidelberg (2009)

- DIJKMAN, R., DUMAS, M., VAN DONGEN, B., KÄÄRIK, R., U. MENDLING, J. Similarity of business process models: Metrics and evaluation. *Information Systems* **36**(2):498–516 (2011)
- DIN EN ISO 9000. DIN EN ISO 9000:2005-12. Quality management systems – Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2005); Trilingual version EN ISO 9000:2005 (2005)
- DONABEDIAN, A. Evaluating the Quality of Medical Care. *Milbank Quarterly* **83**(4):691–729 (2005)
- DRIEVER, M.J. Are evidenced-based practice and best practice the same? *Western Journal of Nursing Research* **24**(5):591–597 (2002)
- EHLERS, F., AMMENWERTH, E., U. HAUX, R. Process potential screening – an instrument to improve business processes in hospitals. *Methods of Information in Medicine* **45**(5):506–514 (2006)
- ENQUOBAHRIE, A., GOBBI, D., TUREK, M., CHENG, P., YANIV, Z., LINDSETH, F., U. CLEARY, K. Designing Tracking Software for Image-Guided Surgery Applications: IGSTK Experience. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* **3**(5):395–403 (2008)
- FORESTIER, G., LALYS, F., RIFFAUD, L., TRELHU, B., U. JANNIN, P. Classification of surgical processes using dynamic time warping. *Journal of Biomedical Informatics* **45**(2):255–264 (2012)
- FRANKE, S., MEIXENSBERGER, J., U. NEUMUTH, T. Intervention time prediction from surgical low-level tasks. *Journal of Biomedical Informatics* **46**(1):152–159 (2013)
- GELDNER, G., EBERHART, L.H.J., TRUNK, S., DAHMEN, K.G., REISSMANN, T., WEILER, T., U. BACH, A. Efficient OP management. Suggestions for optimisation of organisation and administration as a basis for establishing statutes for operating theatres. *Der Anaesthetist* **51**(9):760–767 (2002)
- GRIGORI, D., CASATI, F., DAYAL, U., U. SHAN, M.C. Improving Business Process Quality through Exception Understanding, Prediction, and Prevention (2001)
- GUILLOTREAU, J., MIOCINOVIC, R., GAMÉ, X., FOREST, S., MALAVAUD, B., KAOUK, J., RISCHMANN, P., U. HABER, G.P. Outcomes of laparoscopic and robotic radical cystectomy in the elderly patients. *Urology* **79**(3):585–590 (2012)

- HAMMERMEISTER, K.E., SHROYER, A.L., SETHI, G.K., u. GROVER, F.L. Why it is important to demonstrate linkages between outcomes of care and processes and structures of care. *Medical Care* **33**(10 Suppl):OS5–16 (1995)
- JANSSEN, J. u. LAATZ, W. Korrelation und Distanzen. In *Statistische Datenanalyse mit SPSS*. Springer, Berlin Heidelberg (2013)
- KOSCHMIDER, A. *Ähnlichkeitsbasierte Modellierungsunterstützung für Geschäftsprozesse*. KIT Scientific Publishing (2007)
- LEVENSHTAIN, V.I. Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. *Soviet Physics Doklady* **10**(8):707–710 (1966)
- MACKENZIE, C.L., IBBOTSON, J.A., CAO, C.G., u. LOMAX, A.J. Hierarchical decomposition of laparoscopic surgery: a human factors approach to investigating the operating room environment. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies: MITAT: Official Journal of the Society for Minimally Invasive Therapy* **10**(3):121–127 (2001)
- MEGALI, G., SINIGAGLIA, S., TONET, O., u. DARIO, P. Modelling and evaluation of surgical performance using hidden Markov models. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering* **53**(10):1911–1919 (2006)
- MEHNDIRATTA, A., KNOPP, M.V., ZECHMANN, C.M., OWSIJEWITSCH, M., VON TENGG-KOBLIGK, H., ZAMECNIK, P., KAUCZOR, H.U., CHOYKE, P.L., u. GIESEL, F.L. Comparison of diagnostic quality and accuracy in color-coded versus gray-scale DCE-MR imaging display. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* **4**(5):457–462 (2009)
- MENG, F., D’AVOLIO, L.W., CHEN, A.A., TAIRA, R.K., u. KANGARLOO, H. Generating models of surgical procedures using UMLS concepts and multiple sequence alignment. *AMIA Annual Symposium proceedings* S. 520–524 (2005)
- METTLER, L. u. SEMM, K. Training and regulation for endoscopic surgery. *Baillière’s Clinical Obstetrics and Gynaecology* **8**(4):881–894 (1994)
- NELSON, C., LUXON, E., u. OLEJNIKOV, D. Tool Sequence Trends in Minimally Invasive Surgery: Statistical Analysis and Implications for Predictive Control of Multifunction Instruments. *Journal of Healthcare Engineering* **3**(2):261–278 (2012)
- NEUMUTH, D., LOEBE, F., HERRE, H., u. NEUMUTH, T. Modeling surgical processes: a four-level translational approach. *Artificial Intelligence in Medicine* **51**(3):147–161 (2011a)

- NEUMUTH, T., DURSTEWITZ, N., FISCHER, M., STRAUSS, G., DIETZ, A., MEIXENSBERGER, J., JANNIN, P., CLEARY, K., LEMKE, H.U., u. BURGERT, O. Structured recording of intraoperative surgical workflows. *Proceedings of SPIE* **6145**(1):1–12 (2006a)
- NEUMUTH, T., LIEBMANN, P., WIEDEMANN, P., u. MEIXENSBERGER, J. Surgical workflow management schemata for cataract procedures. process model-based design and validation of workflow schemata. *Methods of Information in Medicine* **51**(5):371–382 (2012a)
- NEUMUTH, T. u. MEISSNER, C. Online recognition of surgical instruments by information fusion. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* **7**(2):297–304 (2012)
- NEUMUTH, T., SCHUMANN, S., STRAUSS, G., JANNIN, P., MEIXENSBERGER, J., DIETZ, A., LEMKE, H., u. BURGERT, O. Visualization Options for Surgical Workflows. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* S. 438–440 (2006b)
- NEUMUTH, T., STRAUSS, G., MEIXENSBERGER, J., LEMKE, H.U., u. BURGERT, O. Acquisition of process descriptions from surgical interventions. In *Proceedings of the 17th international conference on Database and Expert Systems Applications, DEXA'06*, S. 602–611. Springer, Berlin Heidelberg (2006c)
- NEUMUTH, T., JANNIN, P., STRAUSS, G., MEIXENSBERGER, J., u. BURGERT, O. Validation of knowledge acquisition for surgical process models. *Journal of the American Medical Informatics Association: JAMIA* **16**(1):72–80 (2009)
- NEUMUTH, T., JANNIN, P., SCHLOMBERG, J., MEIXENSBERGER, J., WIEDEMANN, P., u. BURGERT, O. Analysis of surgical intervention populations using generic surgical process models. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* **6**(1):59–71 (2011b)
- NEUMUTH, T., LOEBE, F., u. JANNIN, P. Similarity metrics for surgical process models. *Artificial Intelligence in Medicine* **54**(1):15–27 (2012b)
- NICHOLAS, L.H., OSBORNE, N.H., BIRKMEYER, J.D., u. DIMICK, J.B. Hospital process compliance and surgical outcomes in medicare beneficiaries. *Archives of Surgery (Chicago, Ill.: 1960)* **145**(10):999–1004 (2010)
- NIEDERLAG, W., LEMKE, H.U., STRAUSS, G., FEUSSNER, H., LEMKE, H.U., u. BERLINER, L. Der digitale Operationssaal – Stand und zukünftige Entwicklungsphasen. In *Der digitale Operationssaal, Health Academy*, Volume 17. Health Academy, Dresden (2012)

- PADOY, N., BLUM, T., FEUSSNER, H., BERGER, M.O., u. NAVAB, N. On-line recognition of surgical activity for monitoring in the operating room. In *Proceedings of the 20th national conference on Innovative applications of artificial intelligence – Volume 3, IAAI'08*, S. 1718–1724. AAAI Press, Chicago, Illinois (2008)
- PAGADOR, J.B., SÁNCHEZ-MARGALLO, F.M., SÁNCHEZ-PERALTA, L.F., SÁNCHEZ-MARGALLO, J.A., MOYANO-CUEVAS, J.L., ENCISO-SANZ, S., USÓN-GARGALLO, J., u. MORENO, J. Decomposition and analysis of laparoscopic suturing task using tool-motion analysis (TMA): improving the objective assessment. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 7(2):305–313 (2012)
- PAYANDEH, S., LOMAX, A.J., DILL, J., MACKENZIE, C.L., u. CAO, C.G.L. On defining metrics for assessing laparoscopic surgical skills in a virtual training environment. *Studies in health Technology and Informatics* 85:334–340 (2002)
- REILEY, C.E. u. HAGER, G.D. Task versus subtask surgical skill evaluation of robotic minimally invasive surgery. *MICCAI, International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention* 12(Pt 1):435–442 (2009)
- RIESEN, K., NEUHAUS, M., u. BUNKE, H. Bipartite graph matching for computing the edit distance of graphs. In *Proceedings of the 6th IAPR-TC-15 international conference on Graph-based representations in pattern recognition, GbRPR'07*, S. 1–12. Springer, Berlin Heidelberg (2007)
- RIFFAUD, L., NEUMUTH, T., MORANDI, X., TRANTAKIS, C., MEIXENSBERGER, J., BURGERT, O., TRELHU, B., u. JANNIN, P. Recording of surgical processes: a study comparing senior and junior neurosurgeons during lumbar disc herniation surgery. *Neurosurgery* 67(2 Suppl Operative):325–332 (2010)
- ROBBINS, K.T., SHAHA, A.R., MEDINA, J.E., CALIFANO, J.A., WOLF, G.T., FERLITO, A., SOM, P.M., u. DAY, T.A. Consensus statement on the classification and terminology of neck dissection. *Archives of Otolaryngology – Head & Neck Surgery* 134(5):536–538 (2008)
- ROBLES-KELLY, A. u. HANCOCK, E.R. Graph matching using spectral seriation and string edit distance. In *Proceedings of the 4th IAPR international conference on Graph based representations in pattern recognition, GbRPR'03*, S. 154–165. Springer, Berlin Heidelberg (2003)
- ROZINAT, A. u. VAN DER AALST, W. Conformance checking of processes based on monitoring real behavior. *Information Systems* 33(1):64–95 (2008)

- SANDBERG, W.S., GANOUS, T.J., U. STEINER, C. Setting a research agenda for perioperative systems design. *Seminars in Laparoscopic Surgery* **10**(2):57–70 (2003)
- SCHUMANN, S., BÜHLIGEN, U., U. NEUMUTH, T. Distance measures for surgical process models. *Methods of Information in Medicine* (in Druck) (2013a)
- SCHUMANN, S., BÜHLIGEN, U., U. NEUMUTH, T. Outcome quality assessment by surgical process compliance measures in laparoscopic surgery. *Artificial Intelligence in Medicine* (eingereicht) (2013b)
- SCHUMANN, S., BÜHLIGEN, U., U. NEUMUTH, T. Prediction of distances between surgical processes during runtime. *tbm* (in Arbeit) (2013c)
- SPEIDEL, S., ZENTEK, T., SUDRA, G., GEHRIG, T., MÜLLER-STICH, B.P., GUTT, C., U. DILLMANN, R. Recognition of surgical skills using hidden Markov models. *Proceedings of SPIE* **7261**:25 (2009)
- SPÄTH, H. The minisum location problem for the Jaccard metric. *OR Spectrum* **3**(2):91–94 (1981)
- TEOH, A.Y.B., CHIU, P.W.Y., WONG, T.C.L., POON, M.C.M., WONG, S.K.H., LEONG, H.T., LAI, P.B.S., U. NG, E.K.W. A double-blinded randomized controlled trial of laparoendoscopic single-site access versus conventional 3-port appendectomy. *Annals of Surgery* **256**(6):909–914 (2012)
- TVERSKY, A. Features of similarity. *Psychological Review* **84**(4):327–352 (1977)
- VAN DER AALST, W., DE MEDEIROS, A., WEIJTERS, A., DUSTDAR, S., FIADEIRO, J., U. SHETH, A. Process Equivalence: Comparing Two Process Models Based on Observed Behavior. *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 4102, S. 129–144. Springer, Berlin Heidelberg (2006)
- WFMC. Workflow Management Coalition. Terminology & Glossary. <http://www.wfmc.org/> (1999)
- ZHA, H., WANG, J., WEN, L., WANG, C., U. SUN, J. A workflow net similarity measure based on transition adjacency relations. *Computers in Industry* **61**(5):463–471 (2010)

Zusammenfassung der Arbeit

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. rer. med.

Evolution von Distanzmaßen für chirurgische Prozesse

eingereicht von: Dipl. Wirtsch.-Inf. Dipl. Phys. Sandra Schumann

geboren: 12. März 1979 in Gotha

angefertigt an: Universität Leipzig, Medizinische Fakultät
Innovation Center Computer Assisted Surgery (ICCAS)

Betreuer: PD Dr. Thomas Neumuth
PD Dr. Ulf Bühligen

Mai 2013

Der Operationssaal ist ein hochkomplexes System mit dem Ziel patientenindividuelle Therapien zum Erfolg zu führen. Schwerpunkt dieser Arbeit ist der Arbeitsablauf des Chirurgen. Ein chirurgischer Prozess beinhaltet die durchgeführten Arbeitsschritte des Operateurs während eines Eingriffs. Der protokollierte chirurgische Prozess ist Ausgangspunkt der Untersuchungen. Ein mit einer am ICCAS entwickelten Protokollsoftware aufgenommenen chirurgischen Prozess wird mit Hilfe der formalen Sprachen in eine Zeichenkette umgewandelt. Dabei wird jede Aktion umkehrbar eindeutig einem Buchstaben zugeordnet. Eine Abfolge von Aktionen, ein Prozess, wird zu einer Zeichenkette. Dieser Schritt ist notwendig, um die Methoden zur Ermittlung der Distanzen zwischen chirurgischen Prozessen anwenden zu können.

Allgemein ist ein Distanzmaß ein Maß, das die Unähnlichkeit als Grad der Differenz von interessierenden Eigenschaften zwischen zwei Objekten misst. Chirurgische Prozesse sind sich ähnlich, wenn die Tätigkeiten und deren Abfolge weitgehend übereinstimmen. Diese unscharfe Einteilung wird durch das Distanzmaß auf eine Skala transformiert und damit vergleichbar gemacht.

In dieser Arbeit wurden vier Distanzmaße vorgestellt. Die Jaccarddistanz berechnet sich aus der Differenz des Verhältnisses der Anzahl gemeinsamer Elemente zur Größe der Vereinigungsmenge, zu eins. Die Häufigkeit der Arbeitsschritte ist bedeutend, aber die Reihenfolge spielt keine Rolle.

Die Levenshteindistanz, auch String-Edit-Distanz genannt, beruht auf der mini-

malen Anzahl der Einfüge-, Lösch- und Ersetz-Operationen, um einen String in einen anderen umzuwandeln. Hier wird die Umwandlung des Prozesses in eine Zeichenkette besonders deutlich.

Übergangsmatrizen bilden den Kern der Adjazenzdistanz. Die Kardinalität von zwei aufeinanderfolgenden Aktionen in einem chirurgischen Prozess bilden die Elemente dieser Matrix. Der Euklidische Abstand zweier Matrizen bildet die Adjazenzdistanz.

Die Graphmatchingdistanz bedient sich aus Methoden der Graphentheorie. Aus der Adjazenzmatrix wird ein Graph erstellt, der den Ablauf des Prozesses repräsentiert. Der maximale gemeinsame Teilgraph ist die Berechnungsgrundlage für die Distanz. Damit wird der Ablauf der Prozesse, den beide zu vergleichenden chirurgischen Prozesse gemeinsam haben, betrachtet.

Um aus den vier vorgestellten Distanzmaßen dasjenige zu identifizieren, das am besten geeignet ist, um Unterschiede in chirurgischen Workflows zu messen, wurde eine Evaluationsstudie durchgeführt. Dazu wurden Daten einer Trainingsstudie, durchgeführt von der Klinik und Poliklinik für Kinderchirurgie an der Universität Leipzig in Kooperation mit dem Innovationszentrum für Computergestützte Chirurgie, zur ergonomischen Beurteilung konventioneller versus single-incision laparoskopischer Chirurgie genutzt. Neben drei Settings, gebildet aus verschiedenen minimalinvasiven Zugangsarten und laparoskopischen Instrumenten, wurden drei verschiedene Aufgaben und zwei Gruppen von Probanden betrachtet. Die Aufgaben wurden an Phantomen aus Silikon durchgeführt und waren realen OP-Situationen nachempfunden. Die Probandengruppen setzten sich aus Experten (Chirurgen mit mehrjähriger klinischer Praxis in minimalinvasiver Chirurgie) und Novizen (Studenten der Medizin ohne praktische Erfahrungen) zusammen.

Die These der größeren Distanzen innerhalb der Gruppe der Novizen im Vergleich zu den kleineren Distanzen innerhalb der Gruppe der Experten dient als Auswahlkriterium, um das probateste Distanzmaß für chirurgische Prozesse zu identifizieren. Bereits viele vorangegangene Arbeiten (vgl. Kapitel 3.3) erkannten, dass Novizen nicht nur länger brauchen und mehr Arbeitsschritte machen, sondern auch Bewegungen und Aktionen durchführen, die nicht direkt zielführend sind. Mit statistischen Tests wurde die Übereinstimmung mit der These für alle Settings und Aufgaben der Trainingsdaten überprüft. Dies führte zu folgenden Ergebnissen: Jaccarddistanz 33%, Levenshteindistanz 89%, Adjazenzdistanz 78% und Graphmatchingdistanz 22% – Übereinstimmung mit der These. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz beide gut geeignet sind, um Unterschiede in chirurgischen Workflows zu messen. Eine Diskussion der Ergebnisse der Evaluationsstudie wurde in Kapitel 3.3 geführt.

Die Erweiterung der Workflowanalyse von retrospektiver Betrachtung hin zur Anwendung zur Laufzeit des chirurgischen Eingriffs wurde in Kapitel 4 betrachtet. Dazu wurde untersucht, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Distanzmaß zur Laufzeit zu dem Distanzmaß am Ende der OP gibt. Angewandt auf die Trainingsdaten der Instrumentenstudie gab es nach der Hälfte der Schritte eine durchschnittliche Korrelation von knapp 0,8. Während des Fortschreitens des OP-Verlaufs verbesserte sich die Prognose des Distanzmaßes zunehmend, von etwa 0,4 nach 10% der Schritte auf über 0,9 nach 90% der Schritte. Insgesamt kann konstatiert werden, dass es sehr gut möglich ist, schon im Verlauf eines chirurgischen Eingriffs die Distanz zu anderen Operationen zu prognostizieren.

In Kapitel 5 wurde der Zusammenhang zwischen Prozessablauf und Ergebnisqualität untersucht. Die zentrale Hypothese lautet: Je größer die Distanz eines chirurgischen Prozesses zum Best Practice, desto schlechter ist das Prozessergebnis. Genutzt wurden hierzu wiederum die Trainingsdaten. Die Qualität des Ergebnisses wurde in einem verblindeten Review bestimmt. Der Prozess mit der besten Qualität wurde als Best Practice angesehen. Die Ergebnisse zeigen für die meisten Settings eine signifikante Korrelation, die Hypothese kann nicht abgelehnt werden. Aus dem Ablauf des Prozesses ist es möglich, Vorhersagen zur Qualität des Ergebnisses zu machen.

Die bisher nur auf Trainingsdaten getesteten Methoden fanden auch in der klinischen Praxis Anwendung. Neurochirurgische Operationen der zervikalen Diskektomie wurden von Junior und Senior Chirurgen durchgeführt. Die Distanzmaße Levenshtein und Adjazenz zeigen auch hier Unterschiede in den beiden Gruppen. Die Arbeitsweise der Junior Chirurgen zeigt größere Variationen als die der Senior Chirurgen. Die Prognose der Distanzmaße zur Laufzeit ist hier auch sehr gut. Nach 10% der Schritte ist die Korrelation knapp 0,4 und steigt im OP-Verlauf auf über 0,95 nach 90% der Schritte.

Untersuchungen zur Variation der Abläufe bei verschiedenen Operationsmethoden wurden anhand von Neck Dissektion in der HNO-Chirurgie durchgeführt. In der Phase der Lymphknotenentnahme konnten keine unterschiedlichen Abläufe gemessen werden. Dahingegen wurden in der vorhergehenden Phase der Präparation des umliegenden Gewebes große Variationen des OP-Verlaufs gemessen, je nachdem, ob eine einfache oder komplexe Neck Dissektion durchgeführt wurde. Insgesamt sind Levenshteindistanz und Adjazenzdistanz angemessene Methoden, um die Distanz zwischen chirurgischen Prozessen auch in der klinischen Praxis zu messen.

Publikationsverzeichnis

2013

S. Schumann, U. Bühligen, T. Neumuth: *Prediction of surgical process distances during surgical interventions*; tbn, in Arbeit 2013.

S. Schumann, U. Bühligen, T. Neumuth: *Outcome quality assessment by surgical process compliance measures in laparoscopic surgery*; Artificial Intelligence in Medicine, eingereicht 2013.

S. Schumann, U. Bühligen, T. Neumuth: *Distance measures for surgical process models*; Methods of Information in Medicine, im Druck 2013.

A. Boehm, T. Neumuth, **S. Schumann**, S. Müller, G. Strauß, B. Preim, L. Dornheim, H. Lemke, S. Bohn, A. Dietz: *TTM (Tumour Therapy Manager): 3-dimensional tumour visualization in panendoscopy documentation as clinical tool for better interdisciplinary decision making*; European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, eingereicht 2013.

2012

S. Schumann, R. Wachowiak, H. Till, U. Bühligen, T. Neumuth: *Correlation of distance measurements and quality outcome in surgical processes*; 11th Leipzig Research Festival for Life Sciences, 2012.

2011

S. Schumann, R. Wachowiak, H. Till, U. Bühligen, T. Neumuth: *Distance Assessment between surgical processes*; 10th Leipzig Research Festival for Life Sciences, 2011.

Posterpreis für herausragende wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der Medizin und Biowissenschaften.

D. A. Kann, S. Schmidl, C. Hoegner, B. Stecklum, **S. Schumann**, M. Hartmann: *GRB 110503A - TLS afterglow observations*, GRB Coordinates Network, Bd. 11996, 2011.

2010

S. Schumann, R. Wachowiak, H. Till, U. Bühligen, T. Neumuth: *An experimental Setup to evaluate laparoscopic Instruments by analyzing Surgical Process Models*; 9th Leipzig Research Festival for Life Sciences, 2010.

A. Haas, M. Sauter, R. Wachowiak, R. Böhm, T. Woller, C. Geyer, H. Till, T. Neumuth, **S. Schumann**, U. Bühligen: *Workflowanalysen zur statistischen Beurteilung neuer laparoskopischer Techniken und neuer Instrumente*; 9th Leipzig Research Festival for

Life Sciences, 2010.

U. Bühligen, R. Wachowiak, T. Neumuth, **S. Schumann**, B. Kaschek, H. Till: *Workflow-Analysen zur ergonomischen Beurteilung von „konventioneller“ versus „single-incision“ laparoskopischer Chirurgie (SILS)*; 127. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie, 2010.

2009

D. Goldstein, **S. Schumann**, T. Neumuth: *Measuring the Semantic Relatedness of Surgical Workflows*; 8th Leipzig Research Festival for Life Sciences, 2009.

2006

T. Neumuth, **S. Schumann**, G. Strauß, P. Jannin, J. Meixensberger, A. Dietz, H. Lemke, O. Burgert: *Visualization Options for Surgical Workflows*; International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2006.

Erklärung über die eigenständige Abfassung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, und dass die vorgelegte Arbeit weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt wurde. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren.

Leipzig, den 13. Mai 2014

Sandra Schumann