

Aus dem Zentrum für Operative Medizin der Universität zu Köln
Klinik und Poliklinik für Allgemein-, Viszeral-, Thorax- und Transplantationschirurgie

Direktorin: Universitätsprofessorin Dr. med. C. Bruns

**Objektiver und subjektiver Stress als ergonomischer
Risikofaktor für Chirurg*innen
während robotisch assistierter versus
konventioneller Ösophagektomien**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von Christian Storms
aus Mönchengladbach

promoviert am 03. Juli 2025

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink
1. Gutachter: Universitätsprofessor Dr. med. H. Fuchs
2. Gutachter: Universitätsprofessor Dr. med. T. Erren

Erklärung:

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Univ.-Prof. Dr. med. H. Fuchs
Dr. med. D. Krauss

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Messergebnisse wurden von mir selbst mit Unterstützung von Dolores Krauss, Juliane Ahn, Julia Poggemeier und Alissa Reisewitz erfasst.

Die Aufbereitung und Auswertung der Datensätze sowie die anschließende statistische Analyse wurden von mir selbst durchgeführt.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten der Universität zu Köln gelesen und sie bei der Durchführung der Dissertation beachtet habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Ankara, den 18. Februar 2025

Unterschrift: 

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich auf dem Weg zu dieser Dissertation begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Betreuer, Universitätsprofessor Dr. med. H. Fuchs, für die Möglichkeit, diese Arbeit in seiner Arbeitsgruppe durchführen zu dürfen, für seine fachliche Anleitung sowie für das entgegengebrachte Vertrauen und die ausgezeichnete Betreuung und Unterstützung während meiner gesamten Promotionszeit.

Ein weiterer, ganz besonderer Dank geht an Dr. med. D. Krauss, deren Mentoring, Engagement und stetige Motivation mich in entscheidendem Maße unterstützt und weitergebracht haben. Ihre fachliche und persönliche Beratung war für mich eine unverzichtbare Hilfe, ohne die meine Dissertation in dieser Form nicht zustande gekommen wäre.

Zuletzt möchte ich meinen Eltern für Ihre immerwährende und bedingungslose Unterstützung in jeder Hinsicht während meines Studiums und meiner Promotion danken und meinem Ehemann und meinen Freundinnen und Freunden für ihr Verständnis, ihre Geduld und ihre moralische Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
1. ZUSAMMENFASSUNG	7
2. EINLEITUNG	8
2.1. Ösophagus-Karzinom: Entstehung und Therapieprinzipien	8
2.2. Ösophagektomie	9
2.2.1. Ivor-Lewis-Ösophagektomie	9
2.2.2. Operationstechniken	10
2.2.3. Vorteile der minimalinvasiven Chirurgie	10
2.2.4. Robotische Operationssysteme: DaVinci Xi	11
2.3. Ergonomie in der Chirurgie	12
2.3.1. Ergonomie - Definition	13
2.3.2. Ergonomie in der offenen und konventionell laparoskopischen Chirurgie	14
2.3.3. Ergonomie in der robotischen Chirurgie	15
2.4. Stress in der Chirurgie	16
2.4.1. Objektive Stress-Messverfahren	17
2.4.2. Herzratenvariabilität	18
2.4.3. Subjektive Stress-Messverfahren	19
2.4.4. State-Trait-Anxiety-Inventory	19
2.5. Fragestellungen und Ziel der Arbeit	20
3. MATERIAL UND METHODEN	22
3.1. Arbeitsprogramm	22
3.2. Durchführen der Messungen während der Operationen	23
3.3. Proband*innenkollektiv und Zentrum für Chirurgie des oberen Gastrointestinaltrakts	23
3.4. HRV Messung	24
3.5. HRV Auswertung	25
3.6. STAI Erfassung	29

3.7.	STAI Auswertung	31
3.8.	Statistische Analyse und Forschungsfragen	32
4.	ERGEBNISSE	36
4.1.	ERASE-Studie: Eingeschlossene Operationen	36
4.2.	Robotische Operation	37
4.2.1.	Robotisch: objektiver Stress/HRV	37
4.2.2.	Robotisch: subjektiver Stress/STAI	45
4.3.	Offene Operation	49
4.3.1.	Offen: objektiver Stress/HRV	49
4.3.2.	Offen: subjektiver Stress/STAI	50
4.4.	Vergleich Robotisch versus Offen	53
4.4.1.	Robotisch versus Offen: objektiver Stress/HRV	53
4.4.2.	Robotisch versus Offen: subjektiver Stress/STAI	55
5.	DISKUSSION	58
6.	LITERATURVERZEICHNIS	66
7.	ANHANG	78
7.1.	Abbildungsverzeichnis	78
7.2.	Tabellenverzeichnis	79

Abkürzungsverzeichnis

EAC	Adenokarzinom des Ösophagus
ESCC	Plattenepithelkarzinom des Ösophagus
HFE	Human factors/Ergonomics
HRV	Herzratenvariabilität/Herzfrequenzvariabilität
IBI	Interbeat Intervals
ISAT	Imperial-Stress-Assessment-Tool
Max HR	maximale Herzfrequenz
Mean HR	mittlere Herzfrequenz
Mean RR	mittlerer RR-Abstand
MIE	minimalinvasive Ösophagektomie
Min HR	minimale Herzfrequenz
NASA-TLX	National Aeronautics and Space Administration Task Load Index
PNS Index	Parasympathetic nervous system index
RAMIE	robotisch assistierte minimalinvasive Ösophagektomie
SD	Standardabweichung (standard deviation)
SNS Index	Sympathetic nervous system index
STAI	State-Trait-Anxiety-Inventory
SURG-TLX	Surgery Task Load Index
S-STAI	State-Komponente des State-Trait-Anxiety-Inventory
T-STAI	Trait-Komponente des State-Trait-Anxiety-Inventory
WMSD	Work-Related-Musculoskeletal-Disorders

1. Zusammenfassung

Diese Studie präsentiert die Ergebnisse von subjektiven sowie objektiven Stressmessungen von fünf Chirurg*innen während robotisch assistierter sowie offen chirurgisch durchgeführter Ösophagektomien.

Während der robotisch assistierten Operationen konnten anhand der Analysen der Herzratenvariabilität (HRV) der Chirurg*innen während der Anastomosenphase signifikant erhöhte Stresslevel gegenüber der übrigen Operationszeit festgestellt werden.

Während der offenen Operationen konnten anhand der HRV-Analysen höhere objektive Stresslevel errechnet werden als während der robotisch assistierten Operationen. Subjektive Stressmessungen wiesen ebenfalls auf höhere Stresslevel während der offenen Operationen hin.

Diese Studie demonstriert die Durchführbarkeit von objektiven und subjektiven Stressmessungen während komplexer und großer viszeralchirurgischer Operationen wie der Ösophagektomie. Zudem werden die große Aussagekraft und Nutzbarkeit von HRV-Daten als Instrument der objektiven Stressmessung herausgestellt. Darüber hinaus wird eine Methodik vorgestellt, die die Ergebnisse von subjektiven Stressmessungen mittels State-Trait-Anxiety-Inventory (STAI) interindividuell vergleichbar macht.

Dieses gewonnene Wissen kann in zahlreichen weiteren Studien zum Thema Stress in der Chirurgie genutzt werden.

2. Einleitung

2.1. Ösophagus-Karzinom: Entstehung und Therapieprinzipien

Das Ösophaguskarzinom ist weltweit eine der häufigsten malignen Erkrankungen. Als global betrachtet siebthäufigste Krebserkrankung und sechsthäufigste Krebstodesursache spielen Prävention, Früherkennung und Therapie eine immer wichtigere Rolle. ¹ Nicht nur wegen der hohen Mortalität, sondern auch wegen der in den kommenden Jahren erwartbar stark steigenden Inzidenz ist das Ösophaguskarzinom in Forschung und klinischer Versorgung relevant. ²

Histologisch lässt sich das Ösophaguskarzinom in mehrere Subtypen unterteilen, von denen aufgrund ihrer Inzidenz insbesondere das Plattenepithelkarzinom (esophageal squamous cell carcinoma, ESCC) und das Adenokarzinom (esophageal adeno carcinoma, EAC) von Interesse sind. ³ Weltweit lassen sich 90% der Ösophaguskarzinome als ESCC klassifizieren. In den übrigen 10% finden sich das EAC und andere histologische Typen wieder. ⁴ In den letzten Jahren wurde insbesondere in den westlichen, entwickelten Ländern ein Wechsel der Inzidenz beobachtet, wonach dort die Inzidenz des EAC stark angestiegen und nun häufigster histologischer Subtyp des Ösophaguskarzinoms geworden ist. Das lässt sich vor allem durch einen Wechsel des Lebensstils und damit einhergehend einem Wechsel der Risikofaktoren erklären. ^{1 5}

Die Haupt-Risikofaktoren der beiden häufigsten Subtypen des Ösophaguskarzinoms (ESCC und EAC) unterscheiden sich. Bestätigte Risikofaktoren des ESCC sind Alkohol- und Nikotinabusus, welche gemeinsam einen synergistischen, karzinogenen Effekt haben. ⁶ Weitere Risikofaktoren sind diverse Vorerkrankungen wie die atrophische Gastritis, Achalasie oder Tylosis. Auch die Ernährung spielt mutmaßlich eine Rolle bei der Entwicklung des ESCC. Nitrosamine, Aflatoxine, Frucht- und Gemüse-arme Ernährung werden als Risikofaktoren angenommen. ⁷ Der wichtigste Risikofaktor des EAC ist die Barrett-Metaplasie als Metaplasie-Dysplasie-Karzinom-Sequenz. Patient*innen mit Barrett-Ösophagus haben ein 30-fach erhöhtes Risiko ein EAC zu entwickeln. ⁸ Insbesondere Übergewicht unterstützt die Entwicklung eines Barrett-Ösophagus. ⁹ Auch Medikamente können die Entstehung des EAC beeinflussen. Es wird eine Assoziation zwischen der Einnahme von Anticholinergika, der Relaxation des unteren Ösophagussphinkters und der daraus resultierenden Entstehung von EACs vermutet. ¹

Die Herausforderungen der Therapie des Ösophaguskarzinoms begründen sich in der häufig späten Diagnose in fortgeschrittenen Stadien. ¹⁰ Hieraus resultieren in der Regel begrenzte Therapiemöglichkeiten mit der Folge einer geringen 5-Jahres-Überlebensrate von nur rund 10-20% und einer insgesamt kurzen mittleren Überlebenszeit von nur neun Monaten. ¹¹

Bei der Entscheidung über den Therapieansatz unterteilt man in resektable und nicht-resektable Tumore. Während resektable - das bedeutet in aller Regel lokal begrenzte Tumore - einer chirurgischen Therapie zugänglich sind, bleiben in der Therapie der nicht resektablen Tumore Chemo-, Radio- und neuere Immuntherapien.^{12 13} Die chirurgische Therapie wird mit neoadjuvanten, perioperativen und adjuvanten Therapieansätzen ergänzt, um das Langzeitüberleben der Patient*innen zu verbessern. Nach wie vor bleibt die radikale chirurgische Ösophagektomie mit Lymphknotendisektion der wichtigste Bestandteil des kurativen Therapieansatzes.¹⁴

2.2. Ösophagektomie

2.2.1. Ivor-Lewis-Ösophagektomie

Die Ivor-Lewis-Ösophagektomie ist derzeit die bevorzugte standardisierte Operation zur Entfernung von Ösophaguskarzinomen in Deutschland. Hierbei handelt es sich um einen Zwei-Höhlen-Eingriff mit intrathorakaler Ösophagogastrostomie.^{15 16}

Der erste, abdominelle Abschnitt der Operation, umfasst die Gastrolyse mit D2-Lymphadenektomie. In diesem Operationsabschnitt wird der Magen mobilisiert und für die spätere Rekonstruktion der Magen-Darm-Passage vorbereitet. Darüber hinaus erfolgt eine ausgedehnte Lymphadenektomie. Anschließend wird der Patient/die Patientin umgelagert und für den zweiten, thorakalen Operationsabschnitt vorbereitet. Dieser Abschnitt wird in Linksseitenlage und in Einlungenventilation durchgeführt. Nach der Etablierung des Zugangsweges je nach Operationsmodalität beginnt die Präparationsphase. Der Ösophagus wird präpariert, Ductus thoracicus und Vena azygos werden durchtrennt, Nervus vagus Anteile werden nach Möglichkeit erhalten. Auch im thorakalen Operationsabschnitt erfolgt eine ausgedehnte Lymphadenektomie. Ist die Präparation und Lymphadenektomie abgeschlossen wird der Ösophagus auf Höhe der durchtrennten Vena azygos durchtrennt. Das im abdominellen Operationsabschnitt vorbereitete Magenkonduit wird in den Thorax mobilisiert. Im Falle einer bis hierhin minimalinvasiven Operationstechnik wird jetzt eine Minithoraktomie für die Anastomosenphase durchgeführt. Anschließend wird der Staplerkopf in den Ösophagusstumpf eingenäht. Der distale Anteil des Ösophagus wird aus dem Thorax mobilisiert und das Magenkonduit vervollständigt. Über die kleine Magenkurvatur wird mit dem Stapler die Anastomose zwischen Ösophagusstumpf und Mageninterponat gesetzt. Bei Bedarf kann die Anastomose übernäht werden.¹⁷

Die Ösophagektomie gilt aufgrund des ausgedehnten Operationsgebiets mit einem abdominellen und einem thorakalen Operationsabschnitt als komplexe und anspruchsvolle Operation. Das wird als ein Grund für die nach wie vor hohe Komplikationsrate von 50-60% betrachtet. Ein wichtiges Ziel der aktuellen Forschung ist die Senkung der perioperativen

Morbidität und Mortalität. Die Entwicklung und Evaluierung neuer Operationstechniken - ohne Einschränkungen im onkologischen Outcome - spielt hier eine entscheidende Rolle. ¹⁸

2.2.2. Operationstechniken

In der chirurgischen Therapie von Ösophaguskarzinomen stehen aktuell verschiedene Operationstechniken zur Verfügung. Offen chirurgische Techniken stehen diversen minimalinvasiven Techniken gegenüber. Im Spektrum der minimalinvasiven Operationen lassen sich die konventionell laparoskopisch/thorakoskopisch durchgeführten von den robotisch assistierten Techniken unterscheiden. Die verschiedenen Modalitäten können aufgrund der zweiteiligen Operation auf mehrere Arten kombiniert werden. ¹⁹

Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Operationstechniken.

Abdomineller Abschnitt	Thorakaler Abschnitt	
offen chirurgisch	offen chirurgisch	total offen
offen chirurgisch	thorakoskopisch	Hybrid
laparoskopisch	offen chirurgisch	Hybrid
laparoskopisch	thorakoskopisch	total minimalinvasiv
laparoskopisch	robotisch assistiert	total minimalinvasiv Hybrid
robotisch assistiert	robotisch assistiert	total minimalinvasiv

Tabelle 1 Gebräuchliche Kombinationsmöglichkeiten der Operationstechniken der Ösophagektomie.

Die Möglichkeiten reichen von der total offenen Operation (abdomineller sowie thorakaler Abschnitt offen chirurgisch) über Hybrid-Techniken (unterschiedliche Techniken in den beiden Abschnitten) bis hin zu total minimalinvasiven Operationen (abdomineller sowie thorakaler Abschnitt minimalinvasiv). Auch in den total minimalinvasiven Operationen werden Hybrid-Konzepte verfolgt (abdomineller Abschnitt konventionell laparoskopisch, thorakaler Abschnitt robotisch assistiert). Die zurzeit gültige S3-Leitlinie zur Therapie des Ösophaguskarzinoms empfiehlt die Verwendung eines total minimalinvasiven oder eines Hybrid-Verfahrens. ²⁰

2.2.3. Vorteile der minimalinvasiven Chirurgie

In der chirurgischen Behandlung des Ösophaguskarzinoms haben sich in den letzten Jahren die minimalinvasiven Techniken und hierunter die robotisch assistierte Ösophagektomie vermehrt durchgesetzt. Eine Übereinstimmung über die bestgeeignete Technik besteht bislang jedoch nicht und bedarf weiterer Forschung. ¹⁸

In der Literatur zeichnet sich ab, dass bezüglich verschiedener Parameter des Patient*innen-Outcomes die minimalinvasiven Techniken und hierunter die robotisch assistierte minimalinvasive Ösophagektomie (RAMIE) zu bevorzugen sind.^{21 22 23}

Minimalinvasive Ösophagektomien (MIE) zeigten weniger pulmonale und kardiale Komplikationen und eine kürzere Krankenhausverweildauer im Vergleich zu den offenen Operationen. Darüber hinaus zeigten RAMIE die größte Zahl der entfernten Lymphknoten und die geringste Rate an postoperative delayed gastric emptying im Vergleich zu allen anderen Techniken.²⁴ Vergleicht man die konventionelle minimalinvasive Technik mit der RAMIE, zeigt die RAMIE weniger intraoperativen Blutverlust, weniger postoperative Pneumonien, eine insgesamt geringere Morbidität und höhere Raten an R0-Resektionen.¹⁶

Hieraus ergibt sich die verbreitete Anwendung der minimalinvasiven und robotisch assistierten Techniken. Auch wenn es bereits Studien zum Vergleich von MIE und RAMIE mit aussagekräftigen Ergebnissen gibt, ist derzeit eine klare Präferenz einer dieser minimalinvasiven Techniken noch nicht gegeben.^{16 25}

Die Vorteile einer Operationstechnik können nicht isoliert betrachtet werden. Zu berücksichtigen sind die nötige Kompetenz des Zentrums und der operierenden Chirurg*innen. Für die kompetente Durchführung der RAMIE muss der Chirurg/die Chirurgin umfassend geschult sein.²⁶ Standardisierte Lern-Protokolle bieten eine sichere und verkürzte Lernkurve für einsteigende robotische Chirurg*innen.¹⁷ Nicht zuletzt spielen high-volume Zentren eine entscheidende Rolle in der Reduktion der perioperativen Mortalität der Patient*innen.²⁷

Ein weiterer Punkt in der Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Operationstechnik sind die Kosten. Anschaffung und Instandhaltung von Operationsrobotern bedeuten Investitionen, die vermutlich nur zum Teil durch reduzierte Komplikationsraten und kürzere Krankenhausaufenthalte finanziell ausgeglichen werden. Dieser Aspekt soll künftig durch den wachsenden Markt und der damit wachsenden Konkurrenz unter den Anbietern von Robotersystemen reduziert werden.²⁸

Es gibt Situationen und Patient*innen-Charakteristika, die für die Verwendung eines offenen Verfahrens sprechen. Erhebliche Vorerkrankungen, bestehende Verwachsungen durch Voroperationen oder andere vorhersagbare Schwierigkeiten einer minimalinvasiven Resektion favorisieren die oft kürzere offene Operationstechnik.

2.2.4. Robotische Operationssysteme: DaVinci Xi

Robotische Operationssysteme sind bereits seit mehreren Jahrzehnten in Gebrauch. Die ersten Systeme wurden schon in den 1980er Jahren im klinischen Umfeld angewandt.²⁹ Seitdem wurden eine Vielzahl verschiedener Operationsroboter entwickelt.³⁰ Das mittlerweile am weitesten verbreitete System für robotisch assistierte Chirurgie ist die DaVinci Reihe der Firma Intuitive Surgical (Sunnyvale, Kalifornien, USA). Das erste System der Firma wurde zum

ersten Mal 1997 verwendet.³¹ Die Zulassung des DaVinci in den USA erfolgte im Jahr 2000. In den darauffolgenden Jahren folgten Weiterentwicklungen mit technischen Verbesserungen und Design-Veränderungen. Seit 2014 ist die bislang neueste Version, der DaVinci Xi, auf dem Markt.³² Mittlerweile wurden mehr als 15,4 Millionen Eingriffe mit den DaVinci Systemen durchgeführt (Stand 06/2024) mit einer Anzahl von mehr als 2,2 Millionen Eingriffen im Jahr 2023.³³

Das DaVinci Xi System besteht aus drei Komponenten. Steuerungskonsole, Patient*innenwagen und Videowagen ermöglichen die Arbeit nach dem Master-Slave Prinzip. Der Chirurg/die Chirurgin (Master) steuert über die Konsole alle Bewegungen der vier Roboterarme des Patient*innenwagens (Slave). Das schließt die Kameraführung sowie alle verwendeten Instrumente ein. Der Videowagen gibt den Blick auf das Operationsgebiet für alle übrigen Beteiligten frei, die nicht an der Konsole sitzen.³⁴

Die Steuerungskonsole besteht aus Binokular, Steuerungsinstrumenten, Displayanzeige und Fußpedalen. Das Binokular gibt zwei unterschiedliche Bilder wieder, was eine echte 3D-Visualisierung in HD-Qualität ohne das Tragen einer zusätzlichen Brille ermöglicht. Darüber hinaus ist die Kamera dazu in der Lage intraoperative Fluoreszenzbildgebung umzusetzen, in der Viszeralchirurgie beispielsweise zur Darstellung von Vaskularisierung oder ableitenden Gallenwegen.³⁵ ³⁶ Die zwei Steuerungsinstrumente an der Konsole übertragen die Bewegungen direkt auf die Roboterarme des Patient*innenwagens. Motion Scaling und Tremorreduktion ermöglichen feineres Arbeiten und reduzieren das Risiko von Organverletzungen im Operationsgebiet. Das Fehlen des Drehpunkteffekts (Fulcrum-Effekt) erleichtert ebenfalls den Abgleich der eigenen Bewegungen an der Konsole mit den Bewegungen der Instrumente im Operationsgebiet.³⁷ Über die Fußpedale lässt sich die Verwendung von monopolarer und bipolarer Energie steuern.³⁸

Der Patient*innenwagen besitzt vier robotische Arme. Durch die Verwendung der mehrgelenkigen robotischen Instrumente mit insgesamt sieben Freiheitsgraden ist die Bewegungsfreiheit der Chirurg*innen im sehr engen beispielsweise thorakalen Operationsgebiet deutlich weniger limitiert als in konventionell laparoskopischen/thorakoskopischen oder offen chirurgischen Operationen.²⁵

Über die technischen Gewinne der robotisch assistierten Chirurgie hinaus bietet das DaVinci System Verbesserungen der oft schlechten ergonomischen Bedingungen im Operationssaal.

2.3. Ergonomie in der Chirurgie

Die ergonomischen Bedingungen im chirurgischen Umfeld sind ein immer wichtiger werdendes Thema in der heutigen Zeit, in der das Wohlbefinden und der Gesundheitserhalt von Chirurg*innen stärker berücksichtigt werden. Robotisch assistierte Operationstechniken

können neben den oben aufgeführten Vorteilen für die Patient*innen, für Chirurg*innen insbesondere ergonomisch profitabel sein.

2.3.1. Ergonomie - Definition

Ergonomie ist die Wissenschaft, die sich mit dem Zusammenspiel von Menschen und anderen Elementen in einem System auseinandersetzt. ³⁹ Abgeleitet von den griechischen Worten ‚ergon‘ Arbeit und ‚nomos‘ Gesetz, beschäftigt sich die Ergonomie insbesondere mit Arbeitssystemen und den darin agierenden Menschen. ⁴⁰ Ziel dieser wissenschaftlichen Disziplin ist es, durch Design und die Anpassung der verschiedenen Bestandteile eines soziotechnischen Systems, beziehungsweise eines Arbeitssystems, eben dieses effizient, funktionsfähig und darüber hinaus unschädlich für die beteiligten Menschen zu machen. ⁴¹

Design soll die Arbeitsumgebung auf den darin arbeitenden Menschen anpassen, den Arbeitsfluss verbessern und Fehler reduzieren. Die verwendeten Werkzeuge, Hilfsmittel und Maschinen sollen das Arbeitssystem unterstützen und es dem Menschen ermöglichen, die erforderliche Arbeit ohne Schäden und auf lange Zeit ausführen zu können. ⁴²

Die Ergonomie kann in verschiedene Subgruppen unterteilt werden. Die physische Ergonomie beschäftigt sich mit der physiologischen und anatomischen Kongruenz beziehungsweise Inkongruenz einer Arbeitsumgebung zu den menschlichen Bedürfnissen. In diesen Bereich fallen muskuloskelettale Beanspruchungen, andere körperliche Herausforderungen sowie körperliche Sicherheit. Eine weitere Gruppe ist die kognitive Ergonomie. Hierzu gehören mentaler Stress, mentale Arbeitsbelastung und Besonderheiten in der Interaktion von Mensch und Maschine. Eine weitere Gruppe bildet die organisatorische Ergonomie. Organisatorische Rahmenbedingungen wie Arbeitszeit, Teamarbeit und Qualitätsmanagement werden berücksichtigt. ⁴³ Diese Teilbereiche der Ergonomie greifen ineinander und beeinflussen sich gegenseitig. Gemeinsam betrachtet bilden sie den von der International Ergonomics Association empfohlenen Begriff Human factors/Ergonomics (kurz HFE) als Zusammenfassung für alle enthaltenen ergonomischen Aspekte. Abbildung 1 visualisiert die verschiedenen Subgruppen der HFE und ihr Zusammenspiel.

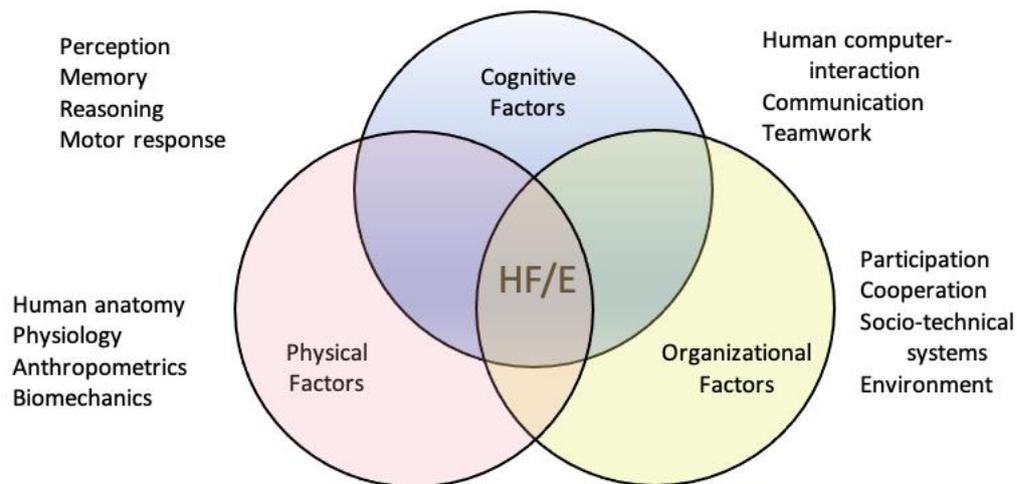


Abbildung 1 Human factors/Ergonomics. Dargestellt sind die einzelnen Subgruppen physische Faktoren, kognitive Faktoren, organisatorische Faktoren sowie Beispiele zugehöriger Themen.

44

Die Arbeitssysteme von Chirurg*innen vor allem im operativen Umfeld sind gefüllt mit ergonomischen Herausforderungen. Viele Elemente aus allen drei Bereichen der Ergonomie haben einen direkten Einfluss auf die Arbeitssituation von Chirurg*innen. Insbesondere Probleme der physischen Ergonomie sind weithin bekannt. Muskuloskelettale Erkrankungen und körperliche Fatigue sind unter Chirurg*innen hochprävalent.^{45 46} Mentaler Stress, Leistungsdruck, die eigene Rolle im Operationssaal, die Dynamik der interdisziplinären Teamarbeit oder die Verwendung von hochtechnischem Equipment sind ergonomische Einflussfaktoren auf die Chirurg*innen im System Operationssaal.⁴⁷ Dieses System präsentiert sich als hochkomplex, bietet deshalb aber auch viele Verbesserungschancen. Nicht nur das Wohlbefinden und die Gesundheit der Chirurg*innen kann erhalten werden, Krankheitsausfälle können reduziert und damit einhergehende wirtschaftliche Schäden vermieden werden.⁴⁸ Durch eine Verbesserung der Ergonomie kann auch die Qualität der Arbeit und schlussendlich die Sicherheit der Patient*innen erhöht werden.⁴⁹

2.3.2. Ergonomie in der offenen und konventionell laparoskopischen Chirurgie

Die offene und die konventionell laparoskopische Chirurgie zeichnen sich durch die unmittelbare Nähe der Chirurg*innen zu den Patient*innen aus. Die Operation wird händisch am Operationstisch durchgeführt, entweder am geöffneten Operationsgebiet oder über laparoskopische Instrumente in Kombination mit einem Endoskop. In der Regel wird in

stehender Position operiert. Die ergonomischen Bedingungen beider Techniken ähneln sich und bringen diverse ergonomische Herausforderungen mit sich.⁵⁰

Die offene Chirurgie zeichnet sich durch ergonomisch problematische Körperhaltungen und eine hohe physische Belastung der operierenden wie auch assistierenden Chirurg*innen aus. Einschränkungen der Sicht auf das Operationsgebiet führen zu Handlungsveränderungen, die ergonomisch teilweise als Hochrisiko-Haltungen einzuschätzen sind.⁵¹ Hohe subjektive Beanspruchungslevel gehen sowohl mit offenen als auch laparoskopischen Operationen einher.⁵²

In der laparoskopischen Chirurgie spielt die innerbildliche Bezugnahme der eigenen Bewegungen zu den erfassten Bildern des Endoskops eine wichtige Rolle. Die Abwendung des Blicks vom eigentlichen Operationsgebiet auf den Bildschirm und die gleichzeitige Steuerung der laparoskopischen Instrumente erfordert Übung und ein hohes Maß an Konzentration.⁵³ Insbesondere lange Operationen oder wenig Erfahrung können dann zu erheblicher körperlicher wie geistiger Fatigue führen.⁵⁴

Die Folgen dieser ergonomischen Herausforderungen sind weitreichend. Mehrere Untersuchungen zeigen, dass im Besonderen die offene und konventionell laparoskopische Chirurgie ein ergonomisch äußerst belastendes Arbeitsumfeld darstellen.^{46 55} In verschiedenen chirurgischen Subspezialisierungen kommen Studien zu übereinstimmenden Ergebnissen. Die Prävalenz von Work-Related-Musculoskeletal-Disorders (WMSD) liegt in beiden Techniken je nach Spezialisierung der Chirurg*innen und je nach Studie bei weit über 60%. Die Verbesserung der ergonomischen Bedingungen, ergonomisches Training und Aufklärung über korrektes, ergonomisch günstiges Verhalten bleibt ein wichtiges Ziel in der Prävention von WMSD und im Gesundheitserhalt der Chirurg*innen.^{52 56 57 58 59}

2.3.3. Ergonomie in der robotischen Chirurgie

Die robotische Chirurgie bietet einige ergonomische Vorteile gegenüber den konventionellen Operationsverfahren. Die Chirurg*innen operieren getrennt vom Operationstisch an der Konsole. Eine Stirn- und Armablage sowie die Höhenverstellbarkeit der Konsole sorgen bei korrekter Anwendung für eine verbesserte Ergonomie im Sinne von Niedrigrisiko-Körperhaltungen.⁶⁰

Ergonomische Vorteile der robotischen Chirurgie gegenüber den konventionellen Operationsverfahren sind die Sitzende Position, fehlende Einschränkungen durch das Arbeiten im nichtsterilen Bereich, Kamerakontrolle durch die operierenden Chirurg*innen selbst und 3D-Visualisierung. Im Vergleich mit der konventionell laparoskopischen Technik entfällt der Drehpunkteffekt bei der Verwendung der Instrumente. Dem gegenüber steht die in der Regel längere Operationszeit.⁶¹

Die robotische Chirurgie kann also zu einer Verbesserung der ergonomischen Bedingungen beitragen. Auch in der robotischen Chirurgie bedarf es jedoch einer umfassenden Schulung der Chirurg*innen über die korrekte Bedienung der Roboterkonsolen. Erste ergonomische Leitfäden mit Handlungsanweisungen wurden bereits entworfen.⁶² Die Studienlage zur tatsächlichen ergonomischen Situation der Chirurg*innen und zum Nutzen der erläuterten ergonomischen Verbesserungen in der robotischen Chirurgie ist jedoch nach wie vor unzureichend.

2.4. Stress in der Chirurgie

Ein weiterer Teil des ergonomischen Umfelds in der Chirurgie ist mentaler Stress. Studien belegen, dass Chirurg*innen neben der körperlichen Belastung erheblichem Stress ausgesetzt sind.^{63 64}

Stress kann definiert werden als physiologische Aktivierung infolge einer wahrgenommenen oder echten Bedrohung oder Herausforderung.⁶⁵ Die Auswirkungen von intra- und perioperativem Stress auf Chirurg*innen und deren Performance ist ein wichtiges Forschungsthema auf dem Weg zu chirurgischer Exzellenz. Übersteigt Stress die individuell verfügbaren Ressourcen und Coping-Mechanismen eines Individuums, kann das zu einer Reduktion von technischen und nicht-technischen Fähigkeiten führen.⁶⁶ Das kann negative Auswirkungen auf das Outcome der Patient*innen haben. Die Identifikation von intra- und perioperativen Stressoren ebenso wie die Evaluierung von bereits bestehenden Coping-Mechanismen ist ein entscheidender Bestandteil auf dem Weg zu effizientem und zielorientiertem Stress-Management.⁶⁷ Einige Studien konnten bereits Stressoren identifizieren. Hierzu zählen mangelnde Erfahrung, komplexe oder selten durchgeführte Operationen, laparoskopische Operationen, intraoperative Blutungen und Zeitdruck.⁶⁶

Vor allem bei jungen Chirurg*innen kann Stress die intraoperative Performance beeinträchtigen.⁶⁸ Stressforschung ist deshalb ganz direkt auch für die Patient*innensicherheit entscheidend.

Darüber hinaus begründet die Entwicklung neuer Technologien – hierunter insbesondere die Entwicklung und Implementierung von robotisch assistierter Chirurgie - und das damit ständig steigende Anforderungsprofil an Chirurg*innen die Notwendigkeit fortlaufender validierter Stress-Erfassung im operativen Umfeld. Eine Implementierung von Stress-Coping-Mechanismen im chirurgischen Training ist ein bedeutender Bestandteil in der Verbesserung des ergonomischen Umfelds von Chirurg*innen.^{67 69}

Auch wenn die Stressforschung in der Chirurgie in den letzten Jahren gewachsen ist, haben nur wenige Studien bisher den Einfluss von robotisch assistierter Chirurgie auf den Stress von Chirurg*innen untersucht. Heemskerk et al. verglichen 2014 die Stresslevel von zwei

Chirurg*innen während konventionell laparoskopisch versus robotisch assistiert durchgeführter Cholezystektomien.⁷⁰ Mazzella et al. verglichen 2023 die Stresslevel von zwei Chirurg*innen während offen chirurgisch und robotisch assistiert durchgeführten Lungenresektionen.⁷¹ Beide Studien verwendeten das DaVinci Xi System in den robotisch assistierten Operationen. Beide Studien postulieren eine geringere Stressbelastung der Chirurg*innen während der robotisch assistierten Operationen im Vergleich mit der jeweils konventionellen Operations-Modalität. Heemskerk et al. untersuchten die Herzratenvariabilität. Mazzella et al. untersuchten Herzfrequenz, Atemfrequenz, Körpertemperatur, Sauerstoffsättigung und Körperposition und verwendeten eine Version des State-Trait-Anxiety-Inventory (STAI), einem Fragebogen zur subjektiven Stresserfassung. Auch wenn diese Studien erste Daten liefern, ein klarer Vorteil robotisch assistierter Systeme in Bezug auf das Stresslevel von Chirurg*innen kann bislang nicht festgestellt werden.⁷²

Zur Erfassung von Stress und insbesondere intraoperativem Stress bei Chirurg*innen wurden bislang eine Vielzahl von Messverfahren angewendet, die sich grob in objektive und subjektive Messverfahren unterteilen lassen.⁷³

2.4.1. Objektive Stress-Messverfahren

Es existieren verschiedene Möglichkeiten objektiv Stress zu erfassen. Die meisten Messverfahren zielen dabei auf die Messung der Aktivität des autonomen Nervensystems ab. Ziel ist es, über die Veränderung von physiologischen oder laborchemischen Parametern die Aktivität des autonomen Nervensystems, genau genommen das Zusammenspiel von Sympathikus und Parasympathikus, als direkte Folge von Stress zu interpretieren.⁶⁹ Populäre Tools umfassen Herzfrequenz und Herzratenvariabilität^{74 75} und verschiedene Biomarker im Speichel wie Cortisol oder alpha-Amylase.^{76 77} Okulare Aktivität⁷⁸, Blutdruck⁷⁹, Atemfrequenz⁸⁰, Elektromyographie-Aufzeichnungen⁸¹, Elektroenzephalographie-Aufzeichnungen⁸² oder die elektrodermale Aktivität⁸³ sind ebenfalls angewandte, aber weniger verbreitete Methoden.

Die Auswahl der Messmethoden zur Erfassung von intraoperativem Stress bei Chirurg*innen ist divers. Gelegentlich werden mehrere objektive Messverfahren kombiniert. Häufiger ist die Kombination von subjektiven mit objektiven Messverfahren.^{69 72}

Objektive Stressmessungen bieten im Kontrast zu subjektiven Messungen den Vorteil keine Antwortbias hervorzurufen. Sie können außerdem kontinuierlich Stress aufzeichnen, ohne dabei zusätzlichen Aufwand der Proband*innen zu benötigen. Darüber hinaus werden auch unbewusste oder nur wenig bemerkte körperliche Stressreaktionen aufgezeichnet.⁸⁴

Der Operationssaal bietet jedoch Herausforderungen und Einschränkungen in der Durchführung von Stressmessungen. Das Einhalten von sterilen Bereichen, das Vermeiden von Beeinträchtigungen der Chirurg*innen bei den Messungen und die Variabilität von echten Eingriffen stellen nur einige der Herausforderungen dar. Im tatsächlichen operativen Umfeld sind entsprechend nicht alle diese Messverfahren praktikabel oder umsetzbar.

Eine verbreitete und nicht-invasive Methode der Stresserfassung im operativen Umfeld ist die Evaluation der Herzratenvariabilität (HRV).⁸⁵

2.4.2. Herzratenvariabilität

Die Herzratenvariabilität (HRV) beschreibt die variable Dauer der Intervalle aufeinanderfolgender Herzschläge. Diese Variabilität der sogenannten Interbeat Intervals (IBI) ist die Folge komplexer Prozesse des autonomen Nervensystems.⁸⁶ Über die HRV können somit Veränderungen der Aktivität von Parasympathikus und Sympathikus bestimmt werden.⁸⁷ 2018 stellten Järvelin-Pasanen et al. in ihrer Übersichtsarbeit eine reduzierte HRV als Korrelat von beruflichem Stress fest.⁸⁸

In den letzten Jahren ist die HRV ein populäres Messverfahren in der Beurteilung von Stresszuständen von Chirurg*innen gewesen.^{89 90 91 92} Weenk et al. zeigten in ihrer Studie 2018, dass Chirurg*innen die höchsten Stresslevel in der Arbeitszeit während Operationen aufweisen.⁷⁵ The et al. beschrieben 2020 die Erfassung von HRV als geeignetes Werkzeug zur objektiven Erfassung von Stress im operativen Umfeld.⁹³

Einige Studien erfassten die Herzratenvariabilität bei Chirurg*innen verschiedener Fachrichtungen mit dem Ziel intraoperativen Stress zu quantifizieren sowie Stressoren zu identifizieren. Oftmals wurden hohe Stresslevel während der operativen Arbeitszeit festgestellt.^{82 94 95 96 97 98 99}

Neben den quantitativen Stressmessungen wurde der Einfluss von Erfahrung auf das Stresslevel untersucht. Es wurden höhere Stresslevel bei unerfahreneren sowie selbst operierenden im Vergleich zu supervidierenden Chirurg*innen gemessen.^{82 95 97}

Weitergehend wurden Faktoren wie die Länge der Operation oder die Höhe des Blutverlusts als Stressor festgestellt.⁸²

Die Auswertung der HRV ist komplex. Die Analyse von HRV-Daten kann über zeitbasierte (time-domain), frequenzbasierte (frequency-domain) und nicht-lineare Analysen erfolgen. Die Aktivität von Sympathikus und Parasympathikus kann anschließend durch ausgewählte Parameter beurteilt werden. (s. 3.5 *HRV-Auswertung*)⁸⁶

2.4.3. Subjektive Stress-Messverfahren

Subjektive Messverfahren von Stress sind in der Regel Fragebögen, die von der untersuchten Person selbst ausgefüllt werden. Studien aus den letzten Jahren verwenden solche Fragebögen beispielsweise, um beruflichen Stress zu quantifizieren¹⁰⁰ oder Auswirkungen neuer Technologien auf Chirurg*innen zu evaluieren.¹⁰¹

Häufig angewandte Fragebögen sind etwa der STAI (State-Trait-Anxiety-Inventory), der NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration Task Load Index) und der SURG-TLX (Surgery Task Load Index).^{73 102 103}

Das Interesse an Stressforschung im operativen Umfeld hat in den letzten Jahren zugenommen. Georgiou et al. identifizierten 2017 den State-Trait-Anxiety-Inventory als meistverwendeten Fragebogen in Studien zur Stresserfassung bei Chirurg*innen.⁶⁹

Die Verwendung von Fragebögen bringt mehrere Vorteile mit sich. Fragebögen sind schnell durchgeführt, kostengünstig und universell einsetzbar.¹⁰⁴ Eine Vielzahl von Fragebögen sind validiert für ihr jeweiliges Untersuchungsziel und erlauben den intra- sowie interindividuellen Vergleich der Teilnehmenden. Die subjektive Stresswahrnehmung kann bei unterschiedlichen Proband*innen unter gleichen Rahmenbedingungen extrem unterschiedlich ausfallen. Subjektive Tools bieten das Potenzial den tatsächlich erfahrenen Stress verlässlich wiederzugeben, während die Verwendung von rein objektiven Tools den wahrgenommenen Stress gegebenenfalls nicht korrekt widerspiegelt.^{105 106}

Andererseits ist zu beachten, dass Fragebögen möglicherweise einem Antwortbias unterliegen. Eine Antworttendenz oder Antwortverzerrung kann durch den „social desirability bias“ (Antworttendenz aufgrund von sozialen Erwartungen) oder den „self presentation bias“ (Antworttendenz aufgrund einer gewünschten Selbstdarstellung in bestimmter Form) zustande kommen.^{107 108} Der Hawthorne-Effekt beschreibt, dass sich das Verhalten von Proband*innen verändert, wenn sie sich in einer Untersuchungssituation befinden. Die Teilnahme an einer Studie an sich ist also schon ein Bias für alle von den Proband*innen potenziell beeinflussbare Untersuchungsergebnisse, in diesem Fall den Antworten in den Fragebögen.¹⁰⁹ Fragebögen sind keine kontinuierliche Messung, sondern Momentaufnahmen. Bezieht sich ein Stress-Fragebogen auf einen längeren Zeitraum kann ein „recency bias“ entstehen. Dieser beschreibt das Phänomen, dass zuletzt Erlebtes in der Erinnerung präsenter ist und die Antworten entsprechend beeinflussen kann.¹¹⁰

Dennoch bleibt die Verwendung von subjektiven Tools bei der adäquaten Erfassung von Stresszuständen unverzichtbar.

2.4.4. State-Trait-Anxiety-Inventory

Der State-Trait-Anxiety-Inventory, kurz STAI, ist ein etabliertes und zuverlässiges Tool zur Erfassung von akuten Stresszuständen.⁹³ Zum ersten Mal 1970 von Spielberger veröffentlicht,

existieren verschiedene Versionen des Fragebogens. ¹¹¹ Kurzformen des initial vierzig Fragen umfassenden Fragebogens sind validiert und aufgrund der Zeitersparnis praktikabel für die Anwendung in größeren Studien. ¹¹²

Der STAI besteht aus zwei Komponenten, einer Eigenschafts-Skala (Trait-STAI/T-STAI) und einer Zustands-Skala (State-STAI/S-STAI). Die beiden Fragelisten enthalten unterschiedliche Fragen mit dem Ziel zwischen Angst als Eigenschaft (Trait-STAI) und Angst als Zustand (State-STAI) zu unterscheiden. Die Trait-Skala zielt auf die unveränderliche, situationsunabhängige Ängstlichkeit ab. Sie zeichnet sich durch eine hohe Retest-Reliabilität aus und kann weitergehend als Baseline verstanden werden. Die State-Skala hingegen zielt auf die aktuelle, von außen beeinflussbare Angst ab. Situationen, die als bedrohlich bzw. stressig erfahren werden, führen zu einem Anstieg der Punktzahl in der State-Skala. ¹¹³

Die Verwendung des STAI zur Erfassung von subjektivem Stress bei Chirurg*innen ist verbreitet. ⁷²

Einige Studien haben den STAI auch in Kombination mit objektiven Stress-Messungen verwendet. So entwickelten Arora et al. das Imperial-Stress-Assessment-Tool, kurz ISAT, in welchem Herzfrequenz, Kortisolkonzentration im Speichel und der STAI gemessen und evaluiert werden. Die Messungen wurden in Operationen aus verschiedenen chirurgischen Fachrichtungen durchgeführt. ⁷⁶ Jones et al. kombinierten den STAI mit Messungen der Herzratenvariabilität während kolorektaler Eingriffe. ⁹⁴ Mazzella et al. verwendeten den STAI in Kombination mit verschiedenen physiologischen Parametern wie Atemfrequenz, Herzfrequenz und Körpertemperatur bei Lungenresektionen. ⁷¹

2.5. Fragestellungen und Ziel der Arbeit

Im Rahmen der fortschreitenden technologischen Entwicklungen im operativen Umfeld und den vielen Vorteilen der robotischen Chirurgie stellt sich die Frage: Profitieren alle Beteiligten vom Fortschritt? Vorteile der Patient*innen sind durch umfangreiche Studien belegt. Was aber ist mit dem Personal? Welche Auswirkungen haben robotische Operationstechniken auf die ergonomischen Bedingungen und den Stress der operierenden Chirurg*innen? Kann die propagierte verbesserte ergonomische Situation an der Roboterkonsole des DaVinci Xi [61](#) zu einer Reduktion von Stress beitragen?

Ziel dieser Studie war es, den Stress von Chirurg*innen im technisch komplexen thorakalen Operationsabschnitt von Ösophagektomien zu objektivieren und in Relation mit ihrer subjektiven Stress-Wahrnehmung zu setzen. Die Ergebnisse der Stressmessungen von robotisch assistierten Eingriffen werden mit denen von offen chirurgischen Eingriffen verglichen. Darüber hinaus werden Operationsabschnitte der robotisch assistierten

Operationen gesondert analysiert, mit dem Ziel besonders stressige Operationsphasen zu identifizieren.

In dieser Studie wurden Messungen der Herzratenvariabilität mit der Erfassung des State-Trait-Anxiety-Inventory kombiniert. Die Verwendung eines subjektiven als auch objektiven Messverfahrens ermöglicht ein zuverlässiges Bild über die tatsächliche Stresssituation der Chirurg*innen.

3. Material und Methoden

3.1. Arbeitsprogramm

In dieser prospektiven Studie wurden Stressmessungen an fünf Chirurg*innen unserer Klinik während robotisch assistierter und offen chirurgischer Ösophagektomien durchgeführt. Mit der Messung der Herzratenvariabilität und der Verwendung des State-Trait-Anxiety-Inventary wurden ein objektives und ein subjektives Instrument der Stresserfassung kombiniert.

Die Stressmessungen waren eingebettet in die ERASE-Studie unserer Klinik und Poliklinik für Allgemein-, Viszeral-, Thorax- und Transplantationschirurgie, einer umfangreichen prospektiven Studie über die ergonomischen Arbeitsbedingungen von Chirurg*innen in robotisch assistierten Operationen (Deutsches Register Klinischer Studien: DRKS00025022). Neben den genannten Stressmessungen werden in der ERASE-Studie die Lautstärke-Belastung im Operationssaal, die Körperhaltung der Chirurg*innen an der Roboter-Konsole sowie die intraoperative Videoaufzeichnung des Endoskops ausgewertet und miteinander korreliert.

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht des Versuchsaufbaus der ERASE-Studie.

Es wurde eine Gesamtzahl von 49 Operationen in die Studie eingeschlossen. Hiervon waren 35 Operationen robotisch assistiert, 14 Operationen wurden konventionell offen durchgeführt.

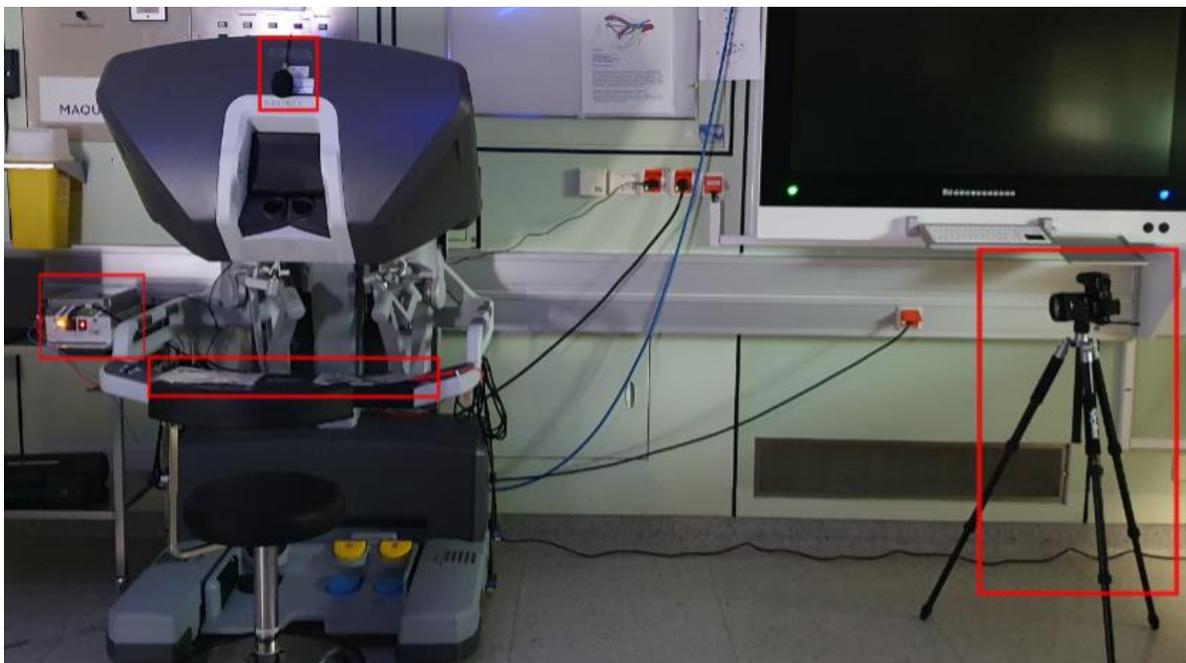


Abbildung 2 Versuchsaufbau der ERASE-Studie. Messinstrumente sind rot hervorgehoben. Links im Bild zu sehen ist die Roboterkonsole, an deren Kopfteil das Mikrofon der Lautstärkemessung befestigt ist. Auf der Armablage der Roboterkonsole sind Kontaktstreifen zur Erfassung der Nutzung der Armablage angebracht. Links der Roboterkonsole befindet sich

*der zur Kontaktmessung verwendete Arduino. Rechts im Bild befinden sich Kamera und Stativ zur intraoperativen Erfassung der Körperhaltung der Chirurg*innen an der Roboterkonsole. Nicht zu sehen sind der HRV-Sensor, den die Chirurg*innen am Körper tragen sowie die STAI-Fragebögen zur Stresserfassung.*

3.2. Durchführen der Messungen während der Operationen

Die Stress-Messungen wurden im Rahmen von zwei verschiedenen Operationstechniken durchgeführt.

Die Testgruppe bildeten total minimalinvasive Ösophagektomien, bei denen der abdominelle Abschnitt konventionell laparoskopisch, der thorakale Abschnitt robotisch assistiert durchgeführt wurde. Die Kontrollgruppe bildeten Hybrid-Ösophagektomien, bei denen der abdominelle Abschnitt ebenfalls konventionell laparoskopisch, der thorakale Abschnitt offen chirurgisch durchgeführt wurde. Die ergonomischen Messungen wurden im thorakalen Operationsabschnitt durchgeführt, um die Unterschiede zwischen den Gruppen zu identifizieren.

Bei allen Operationen handelte es sich um Ivor-Lewis-Ösophagektomien mit Magenhochzug und anschließender Rekonstruktion der Magendarmpassage mit einem Mageninterponat. Alternative Rekonstruktionsmethoden, beispielsweise mit Ileum- oder Koloninterponat wurden ausgeschlossen. Patient*inneneigenschaften spielten in der Auswahl der Operationen keine Rolle, die Patient*innen waren nicht Gegenstand der Forschung.

3.3. Proband*innenkollektiv und Zentrum für Chirurgie des oberen Gastrointestinaltrakts

Die Klinik für Allgemein-, Viszeral-, Thorax- und Transplantationschirurgie der Universitätsklinik Köln ist ein Exzellenzzentrum für die Chirurgie des oberen Gastrointestinaltrakts. Seit 2017 werden dort robotisch assistierte Ösophagektomien durchgeführt.¹⁷ Wichtiger Bestandteil der klinikinternen Forschung ist die Evaluation und Verbesserung der Anwendung robotischer Operationssysteme. Dort ist auch dieses Projekt eingebettet.

Proband*innen dieser Studie waren fünf erfahrene Chirurg*innen der Klinik für Allgemein-, Viszeral-, Thorax- und Transplantationschirurgie der Universitätsklinik Köln. Das mittlere Alter der Proband*innen betrug 46,6 Jahre. Alle Proband*innen wiesen zum Startzeitpunkt der ERASE-Studie umfangreiche Erfahrung sowohl in der Ösophaguschirurgie als auch in der robotischen Chirurgie auf. Alle Proband*innen führen die Operationen regelmäßig selbstständig durch.

Eine Übersicht der demographischen Daten der Studienkohorte kann Tabelle 2 entnommen werden.

Geschlecht	M: 4/5 (80%) F: 1/5 (20%)
Alter in Jahren	46,6 (Min 36, Max 59)
Erfahrung Ösophaguschirurgie in Jahren	12 (Min 1, Max 25)
Erfahrung robotische Chirurgie in Jahren	5,6 (Min 1, Max 11)

Tabelle 2 Charakteristika der Studienkohorte mit Augenmerk auf die Erfahrung der Proband*innen in Ösophaguschirurgie und robotischer Chirurgie.

3.4. HRV Messung

Es existieren verschiedene Devices, die über die Erfassung der Herzaktivität zur Stress-Messung verwendet werden können. Das Spektrum reicht von Smart watches bis hin zu Brustgurten mit hochsensiblen Sensoren.¹¹⁴

Für unsere Studie verwendeten wir den Polar H10 Sensor der Firma Polar Electro Oy (*Kempele, Finnland*) in Kombination mit der mobilen Applikation ELITE HRV (*Austin, Vereinigte Staaten von Amerika*).

Eines der Vorgängermodelle des Polar H10 Sensors, der Polar V800 Heart Rate Monitor wurde bereits im Jahr 2021 als zuverlässiges Instrument zur Erfassung der HRV validiert.¹¹⁵

Auch der zum Zeitpunkt unserer Studie neueste und von uns verwendete HRV-Sensor der Firma Polar Electro, der Polar H10 Sensor, ist validiert als verlässlicher Sensor in Elektrokardiogramm-Qualität.¹¹⁶

Die Applikation ELITE HRV, welche zum Transfer der gemessenen HRV-Rohdaten nötig ist, ist ebenso validiert als geeignetes Tool im Prozess der HRV-Erfassung.¹¹⁷

Der Polar H10 Sensor besteht aus Sensor und Brustgurt. Der Sensor kommt durch den Brustgurt komfortabel und unbeweglich in der vorderen Medianlinie ca. 2-3 cm unterhalb des Sternums zu liegen. Der kleine Sensor mit einer Größe von 65x34x10 Millimeter und der Brustgurt führen zu keinen Bewegungseinschränkungen der Proband*innen. Die Durchführung der Operation ist somit unbeeinflusst von der Datenerfassung. Zudem besteht die uneingeschränkte Möglichkeit steril zu arbeiten, da der Gurt direkt auf der Haut unter der

OP-Kleidung getragen wird. Die Messung wird auch nicht durch das sterile Einkleiden während der laufenden Operation im robotisch assistierten Setting beeinflusst. Der Brustgurt wird vor der Operation angelegt und nach Abtreten der Chirurg*innen abgenommen. Die Messung wird getrennt vom Sensor über die mobile Applikation ELITE HRV gestartet und gestoppt. Die Verbindung und Datenübertragung vom Sensor erfolgt über Bluetooth. Eine Internetverbindung des Mobilgeräts ist lediglich zum Transfer der Rohdaten auf andere Geräte zur Weiterverarbeitung nötig. Unterschiedliche Größen der Brustgurte ermöglichen die korrekte Verwendung des Sensors bei allen Proband*innen.

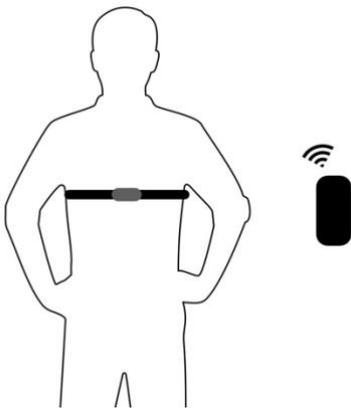


Abbildung 3 Brustgurt mit Sensor. Die Übertragung der Daten vom Sensor auf ein Endgerät erfolgt via Bluetooth.

3.5. HRV Auswertung

Für die Auswertung von HRV-Daten existieren verschiedene Softwares und Applikationen. Die Kubios HRV Software ist für wissenschaftliche Analysen geeignet. Mit zwanzig Jahren seit der Veröffentlichung der ersten Version der Kubios HRV Software ist die Firma Kubios Oy (*Kuopio, Finnland*) einer der Marktführer im Bereich der HRV-Analyse. ¹¹⁸

In dieser Studie wurde die Kubios HRV Scientific Software in der Version 4.1.0 verwendet. Sie berechnet eine Vielzahl an zeitbasierten (time-domain), frequenzbasierten (frequency-domain) sowie nicht-linearen HRV-Parametern. Zudem verfügt das Programm über Funktionen, die die Wertigkeit der Daten verbessern. Artefakt Korrektur (artefact correction), Geräuschfilterung des aufgezeichneten Elektrokardiogramms (noise correction) und die Ableitung und Verrechnung der Atemfrequenz führen zu zuverlässigen Analysen. ¹¹⁹

Verschiedene Dateiformate können mithilfe des Programms analysiert werden. Die Kombination des Polar H10 Sensors mit der ELITE HRV Applikation gibt die Daten als ASCII Datei (Datei im American Standard Code for Information Interchange) aus, die die RR-Intervalle in Millisekunden enthält. Diese Rohdaten werden in die Kubios HRV Software importiert und dort verarbeitet.

In dieser Studie wurden sowohl zeitbasierte als auch frequenzbasierte Parameter in der Auswertung der HRV berücksichtigt. Darüber hinaus wurden drei Stress Indices errechnet. Eine Übersicht der untersuchten HRV-Parameter kann Tabelle 3 entnommen werden.

Zeitbasierte Parameter	Frequenzbasierte Parameter	Stress Indices
Mean HR [bpm]	LF/HF Ratio	Stress Index
Min HR [bpm]		Parasympathetic nervous system index (PNS Index)
Max HR [bpm]		Sympathetic nervous system index (SNS Index)
Mean RR [ms]		

Tabelle 3 Berücksichtigte HRV-Parameter der Kubios-Analyse.

Zeitbasierte Parameter

Folgende zeitbasierte Parameter wurden analysiert:

- Mean HR [bpm]
- Min HR [bpm]
- Max HR [bpm]
- Mean RR [ms]

„Mean HR [bpm]“ beschreibt die durchschnittliche Herzfrequenz in Schlägen pro Minute im ausgewählten Datenabschnitt. „Min HR [bpm]“ und „Max HR [bpm]“ sind die niedrigste beziehungsweise höchste erfasste Herzfrequenz in Schlägen pro Minute im ausgewählten Datenabschnitt. „Mean RR [ms]“ bezeichnet die mittlere Dauer zwischen aufeinanderfolgenden R-Zacken des aufgezeichneten Elektrokardiogramms, entsprechend die mittlere Dauer der IBIs in Millisekunden. Das mittlere RR-Intervall verhält sich entsprechend gegensätzlich zur durchschnittlichen Herzfrequenz.¹²⁰

Frequenzbasierte Parameter

Folgender frequenzbasierter Parameter wurde analysiert:

- LF/HF Ratio

Die aufgezeichnete Herzratenvariabilität kann durch komplexe Berechnungen in verschiedene Frequenzbänder unterteilt werden. Es existieren drei Frequenzbänder, deren

Frequenzbereiche festgelegt sind. Das niedrigste Frequenzband („very low frequency band (VLF)“) umfasst den Bereich von 0-0,04 Hz. Das mittlere Frequenzband („low frequency band (LF)“) umfasst den Bereich von 0,04-0,15 Hz. Das obere Frequenzband („high frequency band (HF)“) umfasst den Bereich von 0,15-0,4 Hz. Nach der Aufschlüsselung des HRV-Signals wird die Leistung (Power) dieser drei Frequenzbänder berechnet. Anschließend kann die LF/HF Ratio ermittelt werden. ^{119 120}

Die LF/HF Ratio ist der Quotient aus der Leistung des LF Bandes und der Leistung des HF Bandes. Dieser Quotient beschreibt das Gleichgewicht zwischen sympathischen und parasympathischen Anteilen des autonomen Nervensystems (ANS). Die Leistung des LF Bandes kann hierbei als Kennwert für die sympathische Aktivität des ANS herangezogen werden. Die Leistung des HF Bandes spiegelt die parasympathische Aktivität wider. Eine erhöhte LF/HF Ratio spricht folglich für ein Übergewicht des Sympathikus. ¹²¹

Stress Indices

Folgende Stress Indices wurden analysiert:

- Stress Index
- Parasympathetic nervous system index (PNS Index)
- Sympathetic nervous system index (SNS Index)

Mittels dieser drei Indices kann die Aktivität des vegetativen Nervensystems anhand weniger Werte verlässlich sichtbar gemacht werden.

Der Stress Index wird abgeleitet von Baevsky's Stress Index. Er gibt einen direkten Hinweis darauf, wie viel Stress die untersuchte Person ausgesetzt ist. ^{119 122 123}

Der Parasympathetic nervous system index (PNS Index) gibt den Einfluss des parasympathischen Nervensystems auf die Herzaktivität wieder. Ein hoher PNS Index bedeutet ein hoher Einfluss des Parasympathikus, entsprechend mehr Erholung sowie weniger Stress. Ein niedriger PNS Index bedeutet weniger Aktivität des Parasympathikus, entsprechend weniger Erholung und mehr Stress. Der Sympathetic nervous system index (SNS Index) gibt den Einfluss des sympathischen Nervensystems auf die Herzaktivität wieder. Ein hoher SNS Index entspricht viel Stress, ein niedriger SNS Index entspricht wenig Stress.

¹²⁴

Beide Indices setzen sich aus jeweils drei Variablen zusammen. Der PNS Index wird ermittelt aus dem mittleren RR Intervall (mean RR), dem quadratischen Mittelwert der Differenzen aufeinanderfolgender RR Intervalle (RMSSD) und der Standardabweichung 1 aus dem

Poincaré Plot (SD1). Der SNS Index wird ermittelt aus der mittleren Herzfrequenz (mean HR), Beavsky's Stress Index (SI) und der Standardabweichung 2 aus dem Poincaré Plot (SD2).¹²⁵ Diese den Stress Indices zugrundeliegenden Parameter werden als Standardabweichung von normalverteilten Werten einer repräsentativen Population in Ruhe wiedergegeben.¹²⁶ PNS Index und SNS Index sind somit als Anzahl von Standardabweichungen auf einer Normalverteilung zu betrachten.

Abbildung 4 zeigt eine abgeschlossene Auswertung durch die Kubios HRV Software. Alle ausgewählten HRV-Parameter sind dort dargestellt.



Abbildung 4 Auswertung der HRV-Daten mittels Kubios. Im oberen Bild Drittel ist der Abstand der aufeinanderfolgenden RR-Intervalle als Band über den Messzeitraum grafisch dargestellt. Die berechneten Stress Indices sowie deren zugrundeliegenden Parameter sind im mittleren Bild Drittel dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse der zeitbasierten und frequenzbasierten Parameter sind im unteren Teil der Abbildung zu sehen.

3.6. STAI Erfassung

In dieser Studie wurde eine deutsche Version des STAI verwendet. ¹¹³

Der Trait-STAI Fragebogen enthält zwanzig Items, die auf die allgemeine Angsttendenz abzielen. Sieben dieser Items sind invertiert. Alle Aussagen sind auf einer achtstufigen Likert-Skala zu beantworten. Alle Proband*innen beantworteten den Trait-STAI einmalig.

Die verwendete Kurzform des State-STAI enthält zehn Items, die auf die aktuelle Angstaussprägung abzielen. Vier von diesen Aussagen sind invertiert. Alle Aussagen sind ebenfalls auf einer achtstufigen Likert-Skala zu beantworten. Die State-STAI Fragebögen wurden von den operierenden Chirurg*innen unmittelbar vor Beginn sowie nach Ende der Operationen ausgefüllt. In dieser Studie wurde die Kurzform des State-STAI verwendet, um den zeitlichen Aufwand bei der Bearbeitung der Fragebögen zu reduzieren.

Die verwendeten Fragebögen sind in Abbildung 5 und 6 dargestellt.

Wie sehr treffen die folgenden Gefühlsbeschreibungen *jetzt gerade* auf Sie zu?
 Kreuzen Sie das passende Kästchen an. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten.
 Überlegen Sie nicht lange, sondern entscheiden Sie eher „aus dem Bauch heraus“.

	gar nicht							ganz und gar
Ich bin ruhig.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich fühle mich angespannt.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin aufgeregt.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich fühle mich ausgeruht.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin beunruhigt.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich fühle mich selbstsicher.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin nervös.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin verkrampft.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin besorgt.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin vergnügt.	1	2	3	4	5	6	7	8

Abbildung 5 State-STAI Fragebogen mit zehn Items auf einer achtstufigen Likert-Skala

Bitte geben Sie an, wie oft die folgenden Aussagen *im Allgemeinen* auf Sie zutreffen. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten. Überlegen Sie nicht zu lange und entscheiden Sie sich für die Antwort, die Sie am ehesten beschreibt.

	Fast nie							Fast immer
Ich bin vergnügt.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich werde schnell müde.	1	2	3	4	5	6	7	8
Mir ist zum Weinen zumute.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich glaube, mir geht es schlechter als anderen Leuten.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich verpasse günstige Gelegenheiten, weil ich mich nicht schnell genug entscheiden kann.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich fühle mich ausgeruht.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin ruhig und gelassen.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich glaube, dass mir meine Schwierigkeiten über den Kopf wachsen.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich mache mir zu viele Gedanken über unwichtige Dinge.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin glücklich.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich neige dazu, alles schwer zu nehmen.	1	2	3	4	5	6	7	8
Mir fehlt es an Selbstvertrauen.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich fühle mich geborgen.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich mache mir Sorgen über mögliches Missgeschick.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich fühle mich niedergeschlagen.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin zufrieden.	1	2	3	4	5	6	7	8
Unwichtige Gedanken gehen mir durch den Kopf und bedrücken mich.	1	2	3	4	5	6	7	8
Enttäuschungen nehme ich so schwer, dass ich sie nicht vergessen kann.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich bin ausgeglichen.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ich werde nervös und unruhig, wenn ich an meine derzeitigen Angelegenheiten denke.	1	2	3	4	5	6	7	8

Abbildung 6 Trait-STAI Fragebogen mit zwanzig Items auf einer achtstufigen Likert-Skala

3.7. STAI Auswertung

Die Auswertung der Fragebögen ergibt pro Fragebogen eine Gesamtpunktzahl, bzw. einen Zustimmungswert. Die Mindestpunktzahl des Trait-Fragebogens beträgt 20 Punkte, die Höchstpunktzahl 160 Punkte. Der State-Fragebogen erreicht aufgrund der geringeren Anzahl der Fragen eine Mindestpunktzahl von 10 Punkten und eine Höchstpunktzahl von 80 Punkten. Die Zustimmungswerte beschreiben den relativen Anteil der errechneten Punktzahl von der jeweils möglichen Höchstpunktzahl unter Verrechnung der Mindestpunktzahl. Höhere Punktzahlen, bzw. höhere Zustimmungswerte weisen auf erhöhten Stress der Chirurg*innen hin.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht und Erklärung der ausgewerteten STAI-Parameter.

STAI-Parameter	Erklärung
S-STAI Punktzahl (prä-OP)	Ermittelte Gesamtpunktzahl des präoperativen S-STAI
Zustimmungs-% S-STAI (prä-OP)	Gesamtpunktzahl des präoperativen S-STAI relativ zur maximal möglichen Punktzahl [%]
S-STAI Punktzahl (post-OP)	Ermittelte Gesamtpunktzahl des postoperativen S-STAI
Zustimmungs-% S-STAI (post-OP)	Gesamtpunktzahl des postoperativen S-STAI relativ zur maximal möglichen Punktzahl [%]
Differenz Zustimmungs-% S-STAI (prä-OP/post-OP)	Differenz zwischen prä- und postoperativem S-STAI [%]
Differenz Zustimmungs-% prä-OP S-STAI/T-STAI	Verhältnis von präoperativem Stress (aktuell, S-STAI) zur allgemeinen Stress-Tendenz (Baseline, T-STAI) [%]
Differenz Zustimmungs-% post-OP S-STAI/T-STAI	Verhältnis von postoperativem Stress (aktuell, S-STAI) zur allgemeinen Stress-Tendenz (Baseline, T-STAI) [%]

Tabelle 4 Berücksichtigte STAI-Parameter, welche nach Auswertung der Fragebögen zur weiteren statistischen Analyse verwendet wurden.

3.8. Statistische Analyse und Forschungsfragen

Nach Abschluss der Messungen wurden alle Ergebnisse ausgewertet und statistisch aufgearbeitet. Die Ergebnisse wurden aufgeschlüsselt anhand von den im Vorhinein festgelegten Forschungsfragen.

Für die Auswertung der Daten wurde der Online Statistik Rechner DATAtab (*DATAtab e.U., Graz, Österreich*) verwendet.

Robotische Operationen

HRV

Zur statistischen Analyse der errechneten HRV-Parameter wurden die ganze robotische Operation sowie drei festgelegte Teilabschnitte untersucht. Die Teilabschnitte umfassen die Präparationsphase, Rekonstruktionsphase und Anastomosenphase. Die Unterteilung der Operation in diese Abschnitte wurde bereits in der Vergangenheit im Rahmen von Trainingsprotokollen vorgenommen und auf diese Studie übertragen.¹⁷

Die untersuchten Operationsabschnitte sowie deren genaue Definition kann Tabelle 5 entnommen werden. Die ausgewählten Operationsabschnitte wurden sowohl einzeln untersucht als auch miteinander verglichen.

Operationsabschnitt	Start	Ende
Gesamte Messung	Proband*in beginnt zu operieren	Proband*in tritt ab
Präparations-Phase	Start der robotischen Operation an der Konsole	Beginn der Mini-Thorakotomie
Rekonstruktions-Phase	Beginn der Mini-Thorakotomie	Ende des Übernehmens der Anastomose
Anastomosen-Phase	Proband*in tritt an den Tisch nach Einsetzen des Staplerkopfes in den Ösophagusstumpf	Beginn des Übernehmens der Anastomose

Tabelle 5 Definition der analysierten Operationsabschnitte der robotisch assistierten Operationen.

Statistische Analyse und Forschungsfragen HRV

Zunächst wurde eine deskriptive Statistik durchgeführt. Mittelwert und Standardabweichungen (SD), Median, Minimum und Maximum wurden von allen ausgewählten HRV-Parametern (s. Tabelle 3) für alle Proband*innen ermittelt.

Für die nachfolgenden statistischen Tests wurden die Datenreihen zunächst auf Normalverteilung mittels Kolmogorov-Smirnov-Test geprüft. Anschließend wurden unter Berücksichtigung der Varianzgleichheit t-Tests durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgelegt.

Mittels abhängiger ungerichteter t-Tests wurden die errechneten HRV-Parameter hinsichtlich folgender Fragestellungen betrachtet:

1. Besteht ein Unterschied im Stresslevel zwischen Anastomosenphase und gesamter Operation?
 - Alternativhypothese: Die Anastomosenphase ist stressiger als die gesamte Operation.
2. Besteht ein Unterschied im Stresslevel zwischen Präparationsphase und Rekonstruktionsphase?
 - Alternativhypothese: Die Rekonstruktionsphase ist stressiger als die Präparationsphase.

STAI

S-STAI Fragebögen wurden unmittelbar prä- und postoperativ ausgefüllt. Um eine Störung der Operation zu vermeiden, wurde auf die Erfassung von intraoperativen Fragebögen verzichtet. Der T-STAI Fragebogen wurde von allen Proband*innen einmalig ausgefüllt und dient als Referenz für die S-STAI Fragebögen.

Die Ergebnisse der S-STAI-Fragebögen wurden intraindividuell einerseits als prä- und postoperativer S-STAI Wert verglichen, andererseits wurden die S-STAI Ergebnisse mit den T-STAI Ergebnissen in Bezug gesetzt.

Statistische Analyse und Forschungsfragen STAI

Zunächst wurde eine deskriptive Statistik durchgeführt. Mittelwert und Standardabweichungen, Median, Minimum und Maximum wurden von allen ausgewählten STAI-Parametern (s. Tabelle 4) für alle Proband*innen ermittelt.

Für die nachfolgenden statistischen Tests wurden die Datenreihen zunächst auf Normalverteilung mittels Kolmogorov-Smirnov-Test geprüft. Anschließend wurden unter Berücksichtigung der Varianzgleichheit t-Tests durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgelegt.

Mittels abhängiger ungerichteter t-Tests wurden die prä- und postoperativen S-STAI-Werte hinsichtlich folgender Fragestellungen betrachtet:

1. Besteht ein Unterschied zwischen prä- und postoperativem subjektiven Stresslevel?
 - Alternativhypothese: Die Proband*innen sind nach der Operation gestresster als vor der Operation.
2. Besteht ein Unterschied zwischen Baseline-Stresslevel (T-STAI) und prä-/postoperativem Stresslevel (S-STAI)?
 - Alternativhypothese: Stresslevels prä- und postoperativ (S-STAI) sind höher als das Baseline-Stresslevel (T-STAI).

Offene Operationen

HRV

In den offen chirurgisch durchgeführten Operationen wurde im Gegensatz zu den robotisch assistierten Operationen aus folgenden Gründen keine Unterteilung der Operation vorgenommen. Die Erstellung eines Videos der offenen Operation war nicht, beziehungsweise nicht ohne enormen Aufwand durchzuführen. Ohne Störung des üblichen Operationsablaufs konnte deshalb keine sichere Unterteilung der einzelnen Operationsabschnitte erfolgen. Entsprechend wurde keine Korrelationsanalyse der einzelnen Operationsabschnitte durchgeführt. Die Auswertung der Daten beschränkt sich auf die gesamte Messung des offenen Operationsabschnitts. Die Messung beginnt mit dem Operationsbeginn der Chirurg*innen und endet mit dem Abtreten der Chirurg*innen.

Statistische Analyse und Forschungsfragen HRV

Es wurde eine deskriptive Statistik durchgeführt. Mittelwert und Standardabweichungen, Median, Minimum und Maximum wurden von allen ausgewählten HRV-Parametern ermittelt. Statistische Tests der HRV-Ergebnisse der offenen Operationen wurden aufgrund der geringen Anzahl der Messungen nicht durchgeführt.

STAI

Die Erfassung der STAI-Fragebögen erfolgte identisch zu der Erfassung in den robotischen Operationen.

Statistische Analyse und Forschungsfragen STAI

Die statistische Analyse der STAI-Ergebnisse der offenen Operationen erfolgte identisch zur Analyse in den robotischen Operationen. Eine Subanalyse der Daten wurde aufgrund der geringen Anzahl der gemessenen Operationen ausschließlich für Proband*in 3 durchgeführt. Die Forschungsfragen waren identisch mit den Forschungsfragen in den robotischen Operationen.

Vergleich robotische Operation versus offene Operation

HRV

Die Ergebnisse der deskriptiven Statistik der HRV-Untersuchungen von beiden untersuchten Operationsmodalitäten wurden einander gegenübergestellt. Die statistische Testung auf Signifikanz der Ergebnisse erfolgte identisch zu den bereits erläuterten Analysen. Es erfolgte außerdem eine Subanalyse der Untersuchungsergebnisse von Proband*in 3.

STAI

Auch die Ergebnisse der subjektiven Stressmessungen der beiden Operationsmodalitäten wurden einander gegenübergestellt. Folgende Fragestellungen wurden entsprechend der oben erläuterten statistischen Methoden ausgewertet:

1. Besteht ein Unterschied in der Differenz von prä- zu postoperativem S-STAI zwischen der robotischen und der offenen Operationstechnik?
2. Besteht ein Unterschied im präoperativen S-STAI zwischen den beiden Operationstechniken? (Starten die Proband*innen unterschiedlich gestresst in die jeweilige Operationstechnik?)
3. Besteht ein Unterschied im postoperativen S-STAI zwischen den beiden Operationstechniken? (Enden die Proband*innen unterschiedlich gestresst in der jeweiligen Operationstechnik?)

4. Ergebnisse

Es folgt eine systematische Darstellung der Forschungsergebnisse entsprechend der in Abschnitt 3.8 vorgestellten Reihenfolge und Forschungsfragen.

4.1. ERASE-Studie: Eingeschlossene Operationen

Die hier aufgeführten Ergebnisse sind Teilergebnisse der bereits beschriebenen ERASE-Studie. In die ERASE-Studie wurde eine große Anzahl von Ösophagektomien eingeschlossen, welche in robotisch assistierter als auch konventionell offener Technik durchgeführt wurden. Die nachfolgende Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die Anzahl aller eingeschlossenen Operationen. Insgesamt wurden 5 Proband*innen für die Studie rekrutiert.

Proband*in	Robotische Operationen	Offene Operationen
1	15	1
2	13	1
3	7	7
4	0	4
5	0	1
gesamt	n = 35	n = 14

Tabelle 6 Anzahl aller in die ERASE-Studie eingeschlossenen Operationen. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.

Diese Arbeit beschreibt die Ergebnisse der objektiven und subjektiven Stressmessungen der ERASE-Studie. Die Anzahl der in die jeweilige Auswertung eingeschlossenen Operationen weicht von der Anzahl aller gemessenen Operationen ab. Das hat mehrere Gründe.

1. Technisches Versagen. Insbesondere in der Anfangsphase des Projekts kam es zu technischen Problemen in den verwendeten Devices, die dazu führten, dass Daten fehlten oder fehlerhaft waren. Entsprechend einer Lernkurve wurde dieser Ausschlussgrund während des laufenden Projekts reduziert.
2. Ausschluss der Operation aus einem anderen Grund. Die Konversion der Operationstechnik, der Wechsel der operierenden Chirurg*innen oder der Abbruch einer Operation führte ebenfalls zum Ausschluss der in diesen Operationen erfassten Daten.

Den nachfolgenden Ergebnissen sind jeweils tabellarische Übersichten über die Anzahl der eingeschlossenen Operationen vorangestellt.

4.2. Robotische Operation

4.2.1. Robotisch: objektiver Stress/HRV

Übersicht der durchgeführten Messungen

In die statistische Auswertung der HRV-Messungen der robotisch assistierten Operationen wurden die Messungen von drei Chirurg*innen eingeschlossen. Insgesamt wurden 22 gesamte robotisch assistierte thorakale Operationsabschnitte eingeschlossen. Darüber hinaus konnten 24 Präparations-Phasen, 21 Rekonstruktions-Phasen und 20 Anastomosen-Phasen ausgewertet werden. Die unterschiedliche Anzahl der einzelnen Operationsabschnitte kommt dadurch zustande, dass die Proband*innen teilweise einige Operationen nicht vollständig operiert haben, sondern lediglich einzelne Abschnitte.

Tabelle 7 zeigt eine Übersicht aller in die Auswertung eingeschlossenen Messungen aufgeschlüsselt nach einzelnen Proband*innen.

Proband*in	gesamte Operation	Anastomosen- Phasen	Präparations- Phasen	Rekonstruktions- Phasen
1	7	8	6	7
2	9	8	12	8
3	6	4	6	6
gesamt	n = 22	n = 20	n = 24	n = 21

Tabelle 7 Anzahl aller robotisch assistierten Operationsabschnitte, die in die statistische Auswertung der HRV-Messungen eingeschlossen wurden. Aufgeschlüsselt nach einzelnen Proband*innen.

Für den statistischen Vergleich der einzelnen Operationsabschnitte hinsichtlich der oben aufgeführten Forschungsfragen wurde ein abhängiger ungerichteter t-Test angewandt. Da hierfür nur gepaarte Operationsabschnitte, also zusammengehörige Messungen aus der gleichen Operation verwendet wurden, ergab sich dort eine geringere Anzahl an eingeschlossenen Operationen. Einander gegenübergestellt wurden Anastomosenphase und gesamte Operation sowie Präparationsphase und Rekonstruktionsphase.

Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der gepaart untersuchten Operationsabschnitte, aufgeschlüsselt nach einzelnen Proband*innen.

Proband*in	gesamte Operation/ Anastomosen-Phase	Präparations-Phase/ Rekonstruktions-Phase
1	7	6
2	8	8
3	4	6
gesamt	n = 19	n = 20

Tabelle 8 Anzahl der gepaarten robotisch assistierten Operationsabschnitte, die in die statistische Auswertung der HRV-Messungen eingeschlossen wurden. Aufgeschlüsselt nach einzelnen Proband*innen.

Deskriptive Statistik

Die Ergebnisse der HRV-Messungen während der robotischen Operationen sind zusammengefasst in Tabelle 9. Alle Werte sind Mittelwerte \pm Standardabweichung. Einander gegenübergestellt sind die in Tabelle 7 aufgeführten Operationsabschnitte. Subanalysen der einzelnen Proband*innen folgen der Gesamtübersicht.

Insbesondere folgende Ergebnisse stechen aus der Vielzahl der Daten hervor:

Herzfrequenz

Die höchste mittlere Herzfrequenz wurde bei allen Proband*innen in der Anastomosenphase erreicht. Die durchschnittliche minimale Herzfrequenz war ebenfalls in der Anastomosenphase am höchsten. Die durchschnittliche maximale Herzfrequenz hingegen war bei allen Proband*innen in der Anastomosenphase am niedrigsten.

Zusammengefasst bedeuten diese Ergebnisse ein kleineres Herzfrequenzintervall bei durchschnittlich höherer Herzfrequenz in der Anastomosenphase, verglichen mit allen anderen ausgewählten Operationsabschnitten.

Stress Indices

Sowohl der Stress Index als auch der SNS Index präsentierten sich in der Gesamtübersicht und in allen Einzelanalysen in der Anastomosenphase am höchsten. Der PNS Index verhielt sich korrelierend zu diesem Ergebnis. Bis auf die Einzelanalyse von Proband*in 3 wurden in der Anastomosenphase die niedrigsten Werte des PNS Index ermittelt.

Die Zusammenschau der drei Stress Indices lässt vermuten, dass die Anastomosenphase den objektiv betrachtet stressigsten Operationsabschnitt darstellte.

LF/HF Ratio

Die LF/HF Ratio war in der Gesamtübersicht sowie in den Subanalysen von Proband*in 1 und 2 in der Anastomosenphase am höchsten. Bei Proband*in 3 war die LF/HF Ratio in der Anastomosenphase interessanterweise am niedrigsten, verglichen mit den übrigen

Operationsabschnitten. Der höchste Wert wurde bei Proband*in 3 in der Präparationsphase erreicht.

Zusammenfassend konnten bei zwei von drei Proband*innen korrelierende Ergebnisse der LF/HF Ratio zu den Stress Indices festgestellt werden. Bei Proband*in 3 waren die Ergebnisse von PNS Index und LF/HF Ratio zu den Ergebnissen von SNS Index und Stress Index inkongruent.

	alle Proband*innen			
	gesamte Operation	Anastomosen-Phase	Präparations-Phase	Rekonstruktion-Phase
Mean RR [ms]	714,45 ± 64,53	694,8 ± 53,35	703,625 ± 52,20	714,333 ± 58,209
Mean HR [bpm]	84,68 ± 7,37	86,85 ± 7,09	85,708 ± 6,245	84,476 ± 7,271
Min HR [bpm]	61,55 ± 4,38	66,7 ± 7,8	62,917 ± 3,966	63,619 ± 4,544
Max HR [bpm]	110,32 ± 11,32	106 ± 7,5	106,875 ± 9,724	109,286 ± 10,785
Stress Index	9,76 ± 2,08	12,02 ± 3,83	10,733 ± 2,607	10,238 ± 2,254
LF/HF Ratio	6,52 ± 2,24	7,37 ± 2,71	6,022 ± 2,102	7,033 ± 2,278
PNS Index	-1,57 ± 0,44	-1,69 ± 0,43	-1,673 ± 0,395	-1,562 ± 0,445
SNS Index	1,37 ± 0,68	1,89 ± 0,95	1,596 ± 0,686	1,454 ± 0,731

	Prob. 1			
	gesamte Operation	Anastomosen-Phase	Präparations-Phase	Rekonstruktion-Phase
Mean RR [ms]	708,29 ± 34,12	700 ± 16,84	709,833 ± 42,22	709,857 ± 26,016
Mean HR [bpm]	85 ± 4,36	85,63 ± 2	84,667 ± 5,125	84,429 ± 3,101
Min HR [bpm]	61,86 ± 3,67	63,88 ± 3,09	62,833 ± 3,371	63,429 ± 2,936
Max HR [bpm]	115,43 ± 4,86	107,25 ± 3,85	111,5 ± 5,753	113,143 ± 5,757
Stress Index	8,63 ± 0,61	9,57 ± 0,79	8,6 ± 1,014	9,4 ± 0,569
LF/HF Ratio	9,08 ± 1,55	10,09 ± 2,31	8,656 ± 1,554	9,563 ± 1,871
PNS Index	-1,47 ± 0,2	-1,56 ± 0,12	-1,42 ± 0,282	-1,517 ± 0,153
SNS Index	1,22 ± 0,33	1,44 ± 0,21	1,208 ± 0,454	1,333 ± 0,279

	Prob. 2			
	gesamte Operation	Anastomosen-Phase	Präparations-Phase	Rekonstruktion-Phase
Mean RR [ms]	716,89 ± 74,19	688,5 ± 47,86	696,583 ± 42,26	710,125 ± 46,02
Mean HR [bpm]	84,44 ± 7,84	87,63 ± 6,19	86,417 ± 4,907	84,875 ± 5,41
Min HR [bpm]	61,89 ± 3,82	69,88 ± 8,79	63,417 ± 3,343	64,25 ± 3,412
Max HR [bpm]	101,33 ± 9,85	100,75 ± 6,34	100,833 ± 6,422	101,25 ± 6,606

Stress Index	11,72 ± 1,47	15,8 ± 2,81	12,9 ± 1,75	12,5 ± 1,251
LF/HF Ratio	4,51 ± 0,86	5,43 ± 0,64	4,419 ± 1,03	5,191 ± 0,8
PNS Index	-1,74 ± 0,46	-1,93 ± 0,32	-1,879 ± 0,236	-1,784 ± 0,306
SNS Index	1,65 ± 0,66	2,52 ± 0,83	1,968 ± 0,542	1,813 ± 0,53

	Prob. 3			
	gesamte Operation	Anastomosens- Phase	Präparations- Phase	Rekonstruktion -Phase
Mean RR [ms]	718 ± 84,89	697 ± 108,78	711,5 ± 81,144	725,167 ± 97,87
Mean HR [bpm]	84,67 ± 10,33	87,75 ± 14,59	85,333 ± 9,873	84 ± 12,586
Min HR [bpm]	60,67 ± 6,31	66 ± 11,58	62 ± 5,899	63 ± 7,403
Max HR [bpm]	117,83 ± 10,26	114 ± 8,04	114,333 ± 11,45	115,5 ± 13,925
Stress Index	8,13 ± 1,57	9,35 ± 3,12	8,533 ± 0,979	8,2 ± 1,893
LF/HF Ratio	6,54 ± 0,72	5,78 ± 0,2	6,594 ± 0,83	6,537 ± 0,995
PNS Index	-1,42 ± 0,59	-1,46 ± 0,78	-1,513 ± 0,552	-1,318 ± 0,692
SNS Index	1,14 ± 0,93	1,55 ± 1,5	1,242 ± 0,805	1,117 ± 1,135

Alle Werte sind Mittelwerte ± SD

Tabelle 9 Ergebnisse der HRV-Messungen. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der ausgewählten HRV-Parameter. Aufgeschlüsselt nach Operationsphasen und Proband*innen.

Fragestellungen: Ergebnisse

1. Besteht ein Unterschied im Stresslevel zwischen Anastomosenphase und gesamter Operation?

Durchgeführt wurde ein abhängiger ungerichteter t-Test mit einem Signifikanzniveau von $p=0,05$. Gesamtoperation und jeweils zugehörige Anastomosenphase wurden entsprechend immer zusammenhängend betrachtet.

Tabelle 10 zeigt eine Übersicht der ausgewählten HRV-Parameter und ihrer Mittelwerte ± Standardabweichung. Die Ergebnisse der gesamten Operationen und der Anastomosenphasen sind einander gegenübergestellt. Statistisch signifikante Unterschiede sind hervorgehoben.

Herzfrequenz

Betrachtet man die Ergebnisse aller Proband*innen präsentierte sich der mittlere RR Abstand während der Anastomosenphase signifikant niedriger als während der gesamten Operation.

Korrespondierend hierzu wurde in der Anastomosenphase eine höhere Herzfrequenz gemessen. Dieser Unterschied erreichte jedoch keine statistische Signifikanz.

Während die minimal gemessene Herzfrequenz während der Anastomosenphase signifikant höher war als während der gesamten Operation präsentierte sich die maximale gemessene Herzfrequenz in der Anastomosenphase signifikant niedriger. Das Intervall, in welchem sich die Herzfrequenz während der Anastomosenphase bewegte, war somit signifikant kleiner als jenes in der gesamten Operation.

Stress Indices

Stress Index und SNS Index zeigten sich in der Anastomosenphase signifikant erhöht gegenüber der gesamten Operation. Der PNS Index verhielt sich korrelierend zu diesem Ergebnis. Der PNS Index war in der Anastomosenphase niedriger als in der gesamten Operation, jedoch ohne statistische Signifikanz zu erreichen.

Die Subanalysen der einzelnen Proband*innen zeigten allesamt dieselben Ausprägungen der Stress Indices wie die Gesamtübersicht. Statistische Signifikanzen wurden jedoch nur bei Proband*innen 1 und 2 erreicht.

LF/HF Ratio

Die LF/HF Ratio war in der Gesamtauswertung sowie in den Subanalysen von Proband*in 1 und 2 in der Anastomosenphase höher als in der gesamten Operation. Ein statistisch signifikanter Unterschied konnte nicht festgestellt werden. In der Subanalyse von Proband*in 3 zeigte sich die LF/HF Ratio in der Anastomosenphase niedriger als in der gesamten Operation, jedoch ebenfalls ohne Erreichen der statistischen Signifikanz.

Zusammenfassung

Diese Werte lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Proband*innen während der Anastomosenphase höhere Stresslevel aufwiesen als in der restlichen Operation.

2. Besteht ein Unterschied im Stresslevel zwischen Präparationsphase und Rekonstruktionsphase?

Durchgeführt wurde ein abhängiger ungerichteter t-Test mit einem Signifikanzniveau von $p=0,05$. Präparationsphase und jeweils zugehörige Rekonstruktionsphase wurden entsprechend immer zusammenhängend betrachtet.

Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der ausgewählten HRV-Parameter und ihrer Mittelwerte \pm Standardabweichung. Die Ergebnisse der Präparationsphasen und der Rekonstruktionsphasen sind einander gegenübergestellt. Statistisch signifikante Unterschiede sind hervorgehoben.

Herzfrequenz und Stress Indices

In der Auswertung aller gepaarten Operationen wurde lediglich für den HRV-Parameter LF/HF Ratio eine statistische Signifikanz nachgewiesen. Die LF/HF Ratio war während der Rekonstruktion signifikant erhöht gegenüber der Präparation.

Betrachtet man die einzelnen Proband*innen konnte dieser signifikante Unterschied nur bei Proband*in 2 ebenfalls nachgewiesen werden. Interessanterweise wies Proband*in 2 darüber hinaus eine signifikant erniedrigte mittlere Herzfrequenz während der Rekonstruktion auf.

In den übrigen Parametern sowie den anderen zwei Proband*innen konnten keine weiteren signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

Zusammenfassung

Anhand der signifikant erhöhten LF/HF Ratio könnte man darauf schließen, dass die Rekonstruktion verglichen mit der Präparation stressiger für die Proband*innen (in diesem Fall Proband*in 2) war. Jedoch spricht die reduzierte mittlere Herzfrequenz eher gegen diese Schlussfolgerung. Darüber hinaus zeigen die übrigen Stress Indices inkongruente, statistisch nicht signifikante Ausprägungen.

	alle Proband*innen		
	gesamte Operation	Anastomosenphas e	p
Mean RR [ms]	704,158 ± 52,195	694,368 ± 54,772	0,041*
Mean HR [bpm]	85,737 ± 6,428	86,947 ± 7,268	0,074
Min HR [bpm]	62,211 ± 4,131	67,053 ± 7,849	0,002*
Max HR [bpm]	111,368 ± 8,295	105,632 ± 7,515	<0,001*
Stress Index	9,953 ± 2,109	12,132 ± 3,906	<0,001*
LF/HF Ratio	6,588 ± 2,295	7,007 ± 2,247	0,056
PNS Index	-1,637 ± 0,405	-1,691 ± 0,438	0,079
SNS Index	1,474 ± 0,653	1,914 ± 0,97	<0,001*

	Prob. 1		
	gesamte Operation	Anastomosenphas e	p
Mean RR [ms]	708,286 ± 34,116	699,571 ± 18,146	0,388
Mean HR [bpm]	85 ± 4,359	85,714 ± 2,138	0,609
Min HR [bpm]	61,857 ± 3,671	64,429 ± 2,878	0,017*
Max HR [bpm]	115,429 ± 4,86	106,429 ± 3,309	0,005*
Stress Index	8,629 ± 0,61	9,529 ± 0,84	0,009*
LF/HF Ratio	9,078 ± 1,548	9,509 ± 1,742	0,369

PNS Index	-1,47 ± 0,203	-1,549 ± 0,117	0,173
SNS Index	1,223 ± 0,335	1,436 ± 0,221	0,011*

Prob. 2

	Anastomosenphas		
	gesamte Operation	e	p
Mean RR [ms]	695 ± 36,905	688,5 ± 47,86	0,276
Mean HR [bpm]	86,625 ± 4,627	87,625 ± 6,186	0,2
Min HR [bpm]	62,625 ± 3,335	69,875 ± 8,79	0,033*
Max HR [bpm]	104,25 ± 4,833	100,75 ± 6,341	0,015*
Stress Index	11,875 ± 1,489	15,8 ± 2,808	0,001*
LF/HF Ratio	4,627 ± 0,837	5,43 ± 0,638	0,003*
PNS Index	-1,874 ± 0,22	-1,93 ± 0,321	0,225
SNS Index	1,82 ± 0,453	2,516 ± 0,831	0,003*

Prob. 3

	Anastomosenphas		
	gesamte Operation	e	p
Mean RR [ms]	715,25 ± 102,044	697 ± 108,778	0,137
Mean HR [bpm]	85,25 ± 12,5	87,75 ± 14,592	0,206
Min HR [bpm]	62 ± 6,976	66 ± 11,576	0,24
Max HR [bpm]	118,5 ± 8,347	114 ± 8,042	0,093
Stress Index	8,425 ± 1,924	9,35 ± 3,117	0,219
LF/HF Ratio	6,152 ± 0,461	5,784 ± 0,202	0,198
PNS Index	-1,457 ± 0,727	-1,46 ± 0,783	0,973
SNS Index	1,223 ± 1,141	1,547 ± 1,502	0,208

Alle Werte sind Mittelwerte ± SD; *p<0,05

Tabelle 10 Ausgewählte HRV-Parameter gesamte Operation versus Anastomosenphase RAMIE. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen. Alle Werte sind Mittelwerte ± SD. Signifikante Ergebnisse (p<0,05) sind mit * hervorgehoben.

alle Proband*innen

	alle Proband*innen		p
	Präparation	Rekonstruktion	
Mean RR [ms]	699,95 ± 53,465	714,3 ± 59,72	0,054
Mean HR [bpm]	86,15 ± 6,45	84,5 ± 7,459	0,08
Min HR [bpm]	62,85 ± 4,056	63,8 ± 4,584	0,207

Max HR [bpm]	108,9 ± 9,09	109,1 ± 11,031	0,881
Stress Index	10,305 ± 2,59	10,295 ± 2,297	0,972
LF/HF Ratio	6,233 ± 2,204	6,769 ± 1,98	0,018*
PNS Index	-1,656 ± 0,416	-1,56 ± 0,456	0,085
SNS Index	1,562 ± 0,717	1,464 ± 0,748	0,305

	Prob. 1		
	Präparation	Rekonstruktion	p
Mean RR [ms]	709,833 ± 42,216	709 ± 28,39	0,935
Mean HR [bpm]	84,667 ± 5,125	84,5 ± 3,391	0,897
Min HR [bpm]	62,833 ± 3,371	64 ± 2,757	0,158
Max HR [bpm]	111,5 ± 5,753	113,167 ± 6,306	0,341
Stress Index	8,6 ± 1,014	9,45 ± 0,606	0,062
LF/HF Ratio	8,656 ± 1,554	9,104 ± 1,559	0,27
PNS Index	-1,42 ± 0,282	-1,503 ± 0,163	0,34
SNS Index	1,208 ± 0,454	1,347 ± 0,303	0,28

	Prob. 2		
	Präparation	Rekonstruktion	p
Mean RR [ms]	683,875 ± 35,906	710,125 ± 46,02	0,058
Mean HR [bpm]	87,875 ± 4,324	84,875 ± 5,41	0,042*
Min HR [bpm]	63,5 ± 3,251	64,25 ± 3,412	0,528
Max HR [bpm]	102,875 ± 5,866	101,25 ± 6,606	0,409
Stress Index	12,913 ± 1,959	12,5 ± 1,251	0,412
LF/HF Ratio	4,146 ± 0,922	5,191 ± 0,8	0,003*
PNS Index	-1,941 ± 0,192	-1,784 ± 0,306	0,065
SNS Index	2,068 ± 0,544	1,813 ± 0,53	0,089

	Prob. 3		
	Präparation	Rekonstruktion	p
Mean RR [ms]	711,5 ± 81,144	725,167 ± 97,87	0,37
Mean HR [bpm]	85,333 ± 9,873	84 ± 12,586	0,574
Min HR [bpm]	62 ± 5,899	63 ± 7,403	0,63
Max HR [bpm]	114,333 ± 11,448	115,5 ± 13,925	0,746
Stress Index	8,533 ± 0,979	8,2 ± 1,893	0,551
LF/HF Ratio	6,594 ± 0,83	6,537 ± 0,995	0,894

PNS Index	-1,513 ± 0,552	-1,318 ± 0,692	0,113
SNS Index	1,242 ± 0,805	1,117 ± 1,135	0,59

Alle Werte sind Mittelwerte ± SD; *p<0,05

Tabelle 11 Ausgewählte HRV-Parameter Präparationsphase versus Rekonstruktionsphase RAMIE. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen. Alle Werte sind Mittelwerte ± SD. Signifikante Ergebnisse (p<0,05) sind mit * hervorgehoben.

4.2.2. Robotisch: subjektiver Stress/STAI

Übersicht der durchgeführten Messungen

In die statistische Auswertung der STAI-Fragebögen wurden die Messungen von drei Chirurg*innen eingeschlossen. Insgesamt wurden in 27 robotisch assistierten Operationen vollständige STAI-Fragebögen erfasst.

Für den statistischen Vergleich von prä- und postoperativen S-STAI-Werten hinsichtlich der oben aufgeführten Forschungsfragen wurden jedoch nur jene Operationen berücksichtigt, die vollständig von den Proband*innen durchgeführt wurden. Isolierte Präparationsphasen oder Rekonstruktionsphasen wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 12 zeigt eine Übersicht aller in diese Auswertung eingeschlossenen STAI-Erfassungen, aufgeschlüsselt nach einzelnen Proband*innen.

Proband*in	Anzahl gesamte OPs mit STAI-Daten
1	7
2	9
3	6
gesamt	n = 22

Tabelle 12 Anzahl der vollständig durchgeführten robotischen Operationen mit erfassten S-STAI Fragebögen. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.

Deskriptive Statistik

Die Ergebnisse der STAI-Erfassungen während der robotischen Operationen sind zusammengefasst in Tabelle 13. Aufgeführt sind die in Tabelle 4 erläuterten STAI-Parameter. Alle Werte sind Mittelwerte ± Standardabweichung, aufgeschlüsselt nach Proband*innen.

S-STAI

Proband*in 1 zeigte postoperativ durchschnittlich eine Steigerung des Punktwertes auf der S-STAI Skala im Vergleich zu präoperativ. Proband*in 2 und 3 hingegen zeigten postoperativ durchschnittlich eine Minderung der S-STAI-Werte.

S-STAI/T-STAI

Das Verhältnis der S-STAI Punktzahlen zum T-STAI Punktwert der einzelnen Proband*innen zeigte sich heterogen verteilt. Proband*in 1 zeigte durchschnittlich sowohl prä- als auch postoperativ höhere S-STAI Zustimmungswerte verglichen mit dem zugehörigen T-STAI Zustimmungswert. Proband*in 2 und 3 hingegen zeigten durchschnittlich niedrigere S-STAI Zustimmungswerte verglichen mit dem T-STAI Zustimmungswert.

Zusammenfassung

Die subjektive Stresserfassung über den STAI liefert unklare, gemischte Ergebnisse. Die Ergebnisse werden in der unten folgenden Diskussion interpretiert.

	Alle Prob.	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 3
S-STAI Punktzahl				
(prä-OP)	19,909 ± 10,717	10,714 ± 1,496	19,111 ± 5,036	31,833 ± 12,205
Zustimmungs-%				
S-STAI (prä-OP)				
[%]	14,155 ± 15,31	1,02 ± 2,136	13,014 ± 7,195	31,19 ± 17,437
S-STAI Punktzahl				
(post-OP)	19,909 ± 8,24	12,571 ± 1,813	18,889 ± 3,1	30 ± 8,149
Zustimmungs-%				
S-STAI (post-OP)				
[%]	14,155 ± 11,77	3,674 ± 2,588	12,697 ± 4,429	28,57 ± 11,64
Differenz				
Zustimmungs-%				
S-STAI				
(prä-OP/post-OP)				
[%]	0,001 ± 5,489	2,656 ± 0,987	-0,317 ± 4,726	-2,62 ± 8,447
Differenz				
Zustimmungs-%				
prä-OP S-STAI/				
T-STAI [%]	-0,162 ± 9,7	1,02 ± 2,136	-0,556 ± 7,195	-0,952 ± 17,434
Differenz				
Zustimmungs-%	-0,163 ± 7,078	3,674 ± 2,588	-0,874 ± 4,429	-3,573 ± 11,64

post-OP S-STAI/

T-STAI [%]

Alle Werte sind Mittelwerte \pm SD

Tabelle 13 Ergebnisse der STAI-Erfassungen. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der ausgewählten STAI-Parameter. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.

Fragestellungen: Ergebnisse

1. Besteht ein Unterschied zwischen prä- und postoperativem subjektiven Stresslevel?

Durchgeführt wurde ein abhängiger ungerichteter t-Test mit einem Signifikanzniveau von $p=0,05$.

Ein signifikanter Unterschied zwischen prä- und postoperativem Stresslevel konnte lediglich in der Subanalyse bei Proband*in 1 nachgewiesen werden. Das postoperative subjektive Stresslevel war signifikant höher als das präoperative Stresslevel. Weitere signifikante Abweichungen wurden nicht festgestellt.

Tabelle 14 zeigt eine Übersicht der statistischen Analyseergebnisse.

2. Besteht ein Unterschied zwischen Baseline-Stresslevel (T-STAI) und prä-/postoperativem Stresslevel (S-STAI)?

Durchgeführt wurde ein abhängiger ungerichteter t-Test mit einem Signifikanzniveau von $p=0,05$.

Eine signifikante Abweichung von der allgemeinen Stresstendenz (T-STAI) konnte lediglich in der Subanalyse bei Proband*in 1 nachgewiesen werden. Das postoperative subjektive Stresslevel war signifikant höher als die allgemeine Stresstendenz. Weitere signifikante Abweichungen wurden nicht festgestellt.

Tabelle 14 zeigt eine Übersicht der statistischen Analyseergebnisse.

4.3. Offene Operation

4.3.1. Offen: objektiver Stress/HRV

Übersicht der durchgeführten Messungen

In die statistische Auswertung der HRV-Messungen der offen chirurgisch durchgeführten Operationen wurden die Messungen von fünf Chirurg*innen eingeschlossen. Insgesamt wurden 12 gesamte offen chirurgisch durchgeführte thorakale Operationsabschnitte eingeschlossen.

Tabelle 15 zeigt eine Übersicht aller in die Auswertung eingeschlossenen Messungen, aufgeschlüsselt nach einzelnen Proband*innen.

Proband*in	Anzahl gesamte OPs mit HRV-Messung
1	1
2	0
3	6
4	4
5	1
gesamt	n = 12

Tabelle 15 Anzahl der vollständig durchgeführten offenen Operationen mit HRV-Messung. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.

Deskriptive Statistik

Die Ergebnisse der HRV-Messungen während der offenen Operationen sind zusammengefasst in Tabelle 16. Alle Werte sind Mittelwerte \pm Standardabweichung. Neben der Gesamtauswertung aller Messungen wurde eine Subanalyse von Proband*in 3 durchgeführt. Auf Subanalysen der übrigen Proband*innen sowie statistische Tests wurde aufgrund der geringen Anzahl der Messungen sowie der alleinigen Betrachtung der gesamten Operation verzichtet.

	alle Proband*innen gesamte Operation	Proband*in 3 gesamte Operation
Mean RR [ms]	623,33 \pm 58,66	639,667 \pm 57,643
Mean HR [bpm]	96,92 \pm 8,52	94,333 \pm 7,866
Min HR [bpm]	66 \pm 6,25	63,667 \pm 3,983
Max HR [bpm]	121,17 \pm 8,57	122,667 \pm 7,737

Stress Index	9,94 ± 2,58	8,317 ± 1,201
LF/HF Ratio	9,36 ± 1,26	8,755 ± 0,899
PNS Index	-2,05 ± 0,52	-1,782 ± 0,449
SNS Index	2,28 ± 0,95	1,828 ± 0,72

Alle Werte sind Mittelwerte ± SD

Tabelle 16 Ergebnisse der HRV-Messungen. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der ausgewählten HRV-Parameter von allen offenen Operationen.

4.3.2. Offen: subjektiver Stress/STAI

Übersicht der durchgeführten Messungen

In der statistischen Auswertung der STAI-Fragebögen wurden die Messungen von fünf Chirurg*innen berücksichtigt. Voraussetzung war, dass die gesamte Operation von den Proband*innen durchgeführt wurde. Insgesamt wurden 11 Operationen eingeschlossen.

Tabelle 17 zeigt eine Übersicht aller in die Auswertung eingeschlossenen offenen Operationen, aufgeschlüsselt nach Proband*innen.

Proband*in	Anzahl gesamte OPs mit STAI-Daten
1	1
2	0
3	5
4	4
5	1
<i>gesamt</i>	<i>n = 11</i>

Tabelle 17 Anzahl der vollständig durchgeführten offenen Operationen mit erfassten S-STAI Fragebögen. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.

Deskriptive Statistik

Die Ergebnisse der STAI-Erfassungen während der offenen Operationen sind zusammengefasst in Tabelle 18. Aufgeführt sind die in Tabelle 4 erläuterten STAI-Parameter. Alle Werte sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Neben der Gesamtauswertung aller Messungen wurde eine Subanalyse von Proband*in 3 durchgeführt. Auf Subanalysen der übrigen Proband*innen wurde aufgrund der geringen Anzahl der Messungen verzichtet.

	alle Proband*innen	Proband*in 3
S-STAI Punktzahl		
(prä-OP)	21,273 ± 4,541	22,8 ± 4,324
Zustimmungs-%		
S-STAI (prä-OP) [%]	16,105 ± 6,485	18,286 ± 6,176
S-STAI Punktzahl		
(post-OP)	24,091 ± 5,504	23,8 ± 4,266
Zustimmungs-%		
S-STAI (post-OP) [%]	20,13 ± 7,863	18,286 ± 6,176
Differenz		
Zustimmungs-%		
S-STAI		
(prä-OP/post-OP)		
[%]	4,025 ± 8,94	1,428 ± 10,738
Differenz		
Zustimmungs-%		
prä-OP S-STAI/		
T-STAI [%]		
	-0,715 ± 13,661	-13,858 ± 6,18
Differenz		
Zustimmungs-%		
post-OP S-STAI/		
T-STAI [%]		
	3,312 ± 16,976	-12,428 ± 6,096

Alle Werte sind Mittelwerte ± SD

Tabelle 18 Ergebnisse der STAI-Erfassungen der offenen Operationen. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der ausgewählten STAI-Parameter.

Fragestellungen: Ergebnisse

1. Besteht ein Unterschied zwischen prä- und postoperativem subjektiven Stresslevel?

Durchgeführt wurde ein abhängiger ungerichteter t-Test mit einem Signifikanzniveau von $p=0,05$.

Postoperativ erfasste S-STAI-Werte waren durchschnittlich höher als präoperativ erfasste S-STAI-Werte. Das Signifikanzniveau wurde jedoch nicht erreicht.

Auch in der Subanalyse von Proband*in 3 waren die postoperativen S-STAI-Werte durchschnittlich höher als präoperativ. Das Signifikanzniveau wurde jedoch ebenfalls nicht erreicht.

2. Besteht ein Unterschied zwischen Baseline-Stresslevel (T-STAI) und prä-/postoperativem Stresslevel (S-STAI)?

Durchgeführt wurde ein abhängiger ungerichteter t-Test mit einem Signifikanzniveau von $p=0,05$.

Präoperative S-STAI-Werte waren durchschnittlich niedriger als jeweils zugehörige T-STAI-Werte. Postoperative S-STAI-Werte waren durchschnittlich höher als jeweils zugehörige T-STAI-Werte. In beiden Fällen wurde keine statistische Signifikanz erreicht.

In der Subanalyse von Proband*in 3 zeigten sich präoperative S-STAI-Werte niedriger als der zugehörige T-STAI-Wert, entsprechend der Gesamtauswertung. Das statistische Signifikanzniveau wurde erreicht. Postoperative S-STAI-Werte waren ebenfalls niedriger als der zugehörige T-STAI-Wert, anders als in der Gesamtauswertung. Hier wurde ebenfalls das statistische Signifikanzniveau erreicht.

Die Korrelation von Baseline-Stresslevel (T-STAI) und situativem Stresslevel (S-STAI) sowie die oben geschilderten Beobachtungen werden in der Diskussion näher erörtert.

Tabelle 19 zeigt eine Übersicht der statistischen Analyseergebnisse hinsichtlich der Fragestellungen.

	alle Proband*innen		
	präoperativ	postoperativ	p
S-STAI Punktzahl	21,273 ± 4,541	24,091 ± 5,504	0,166
S-STAI Zustimmungszustimmungsprozent /			
T-STAI Zustimmungszustimmungsprozent	-0,715 ± 13,661		0,866
S-STAI Zustimmungszustimmungsprozent /			
T-STAI Zustimmungszustimmungsprozent		3,312 ± 16,976	0,532
	Proband*in 3		
	präoperativ	postoperativ	p
S-STAI Punktzahl	22,8 ± 4,324	23,8 ± 4,266	0,781
S-STAI Zustimmungszustimmungsprozent /			
T-STAI Zustimmungszustimmungsprozent	-13,858 ± 6,18		0,007*

	alle Proband*innen		
	robotisch	offen	p
Mean RR [ms]	714,45 ± 64,53	623,33 ± 58,66	<0,001*
Mean HR [bpm]	84,68 ± 7,37	96,92 ± 8,52	<0,001*
Min HR [bpm]	61,55 ± 4,38	66 ± 6,25	0,021*
Max HR [bpm]	110,32 ± 11,32	121,17 ± 8,57	0,007*
Stress Index	9,76 ± 2,08	9,94 ± 2,58	0,824
LF/HF Ratio	6,52 ± 2,24	9,36 ± 1,26	<0,001*
PNS Index	-1,57 ± 0,44	-2,05 ± 0,52	0,007*
SNS Index	1,37 ± 0,68	2,28 ± 0,95	0,003*

Alle Werte sind Mittelwerte ± SD; *p<0,05

Tabelle 20 Ergebnisse der HRV-Messungen. Einander gegenübergestellt sind die Ergebnisse der robotischen Operationen und offenen Operationen. Alle Werte sind Mittelwerte ± SD. Signifikante Ergebnisse (p<0,05) sind mit * hervorgehoben.

Bei der Darstellung der Gesamtergebnisse aller Proband*innen muss die ungleiche Verteilung der Messungen unter den Proband*innen berücksichtigt werden.

Wie den Tabellen 7 und 15 entnommen werden kann, wurden von Proband*in 3 jeweils 6 Operationen der robotischen und der offenen Technik in die Auswertung eingeschlossen. Aus diesem Grund wurde auch eine statistische Subanalyse der HRV-Ergebnisse von Proband*in 3 zum Vergleich der beiden Operationstechniken durchgeführt.

Durchgeführt wurde ein unabhängiger, ungerichteter t-Test mit einem Signifikanzniveau von p=0,05.

Alle HRV-Parameter wiesen korrelierend mit den Ergebnissen der Gesamtauswertung auch in der Subanalyse von Proband*in 3 auf höhere Stresslevel während der offenen Operationen hin. Ein statistisch signifikanter Unterschied konnte jedoch nur in der LF/HF Ratio festgestellt werden.

Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse der Subanalyse von Proband*in 3.

	Proband*in 3		
	robotisch	offen	p
Mean RR [ms]	718 ± 84,89	639,667 ± 57,643	0,091
Mean HR [bpm]	84,67 ± 10,33	94,333 ± 7,866	0,098
Min HR [bpm]	60,67 ± 6,31	63,667 ± 3,983	0,348

Max HR [bpm]	117,83 ± 10,26	122,667 ± 7,737	0,379
Stress Index	8,13 ± 1,57	8,317 ± 1,201	0,825
LF/HF Ratio	6,54 ± 0,72	8,755 ± 0,899	0,001*
PNS Index	-1,42 ± 0,59	-1,782 ± 0,449	0,262
SNS Index	1,14 ± 0,93	1,828 ± 0,72	0,179

Alle Werte sind Mittelwerte ± SD; *p<0,05

Tabelle 21 Subanalyse der HRV-Messungen Proband*in 3. Einander gegenübergestellt sind die Ergebnisse der robotischen Operationen und offenen Operationen. Alle Werte sind Mittelwerte ± SD. Signifikante Ergebnisse (p<0,05) sind mit * hervorgehoben.

4.4.2. Robotisch versus Offen: subjektiver Stress/STAI

Verglichen wurden die STAI-Ergebnisse von 22 robotischen und 11 offenen Operationen. Die genaue Verteilung der Messungen unter den Proband*innen kann den Tabellen 12 und 17 entnommen werden.

Durchgeführt wurde ein unabhängiger, ungerichteter t-Test mit einem Signifikanzniveau von p=0,05.

Neben der Gesamtauswertung aller Messungen wurde eine Subanalyse von Proband*in 3 mit 6 Operationen der robotischen Technik und 5 Operationen der offenen Technik durchgeführt. Die Ergebnisse sind aufgeschlüsselt anhand der in Abschnitt 3.8 festgelegten Forschungsfragen.

Fragestellungen: Ergebnisse

1. Besteht ein Unterschied in der Differenz von prä- zu postoperativem S-STAI zwischen der robotischen und der offenen Operationstechnik?

Wie bereits in den detaillierten Analysen der beiden Operationstechniken dargestellt wurde, wurde in beiden Operationstechniken postoperativ ein höherer Mittelwert des S-STAI als präoperativ festgestellt. Der Vergleich der beiden Operationstechniken zeigte eine höhere Differenz in den offenen Operationen, jedoch ohne Erreichen des festgesetzten Signifikanzniveaus. Die Subanalyse von Proband*in 3 zeigt dasselbe Ergebnis.

2. Besteht ein Unterschied im präoperativen S-STAI zwischen den beiden Operationstechniken? (Starten die Proband*innen unterschiedlich gestresst in die jeweilige Operationstechnik?)

In beiden Operationstechniken wurde präoperativ ein im Vergleich zum Baseline-Stresslevel niedrigeres subjektives Stresslevel festgestellt, mit einer größeren Abweichung in den offenen Operationen. Ein statistisch signifikanter Unterschied wurde jedoch nicht erreicht. Die Subanalyse von Proband*in 3 zeigte dasselbe Ergebnis.

3. Besteht ein Unterschied im postoperativen S-STAI zwischen den beiden Operationstechniken? (Enden die Proband*innen unterschiedlich gestresst in der jeweiligen Operationstechnik?)

In den offenen Operationen wurde postoperativ ein im Vergleich zum Baseline-Stresslevel höheres subjektives Stresslevel festgestellt. In den robotischen Operationen zeigte sich im Schnitt postoperativ praktisch keine Abweichung des subjektiven Stresslevels vom Baseline-Stresslevel. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Operationstechniken bestand nicht.

Die Subanalyse von Proband*in 3 zeigte in beiden Operationstechniken postoperativ ein im Vergleich zum Baseline-Stresslevel niedrigeres subjektives Stresslevel. In den offenen Operationen zeigte sich diese Beobachtung stärker ausgeprägt. Ein signifikanter Unterschied wurde nicht festgestellt.

Tabelle 22 zeigt eine Übersicht der statistischen Analyseergebnisse hinsichtlich der Fragestellungen.

	alle Proband*innen		p
	robotisch	offen	
Differenz			
Zustimmungs-%			
S-STAI			
(prä-OP/post-OP)			
[%]	0,636 ± 5,186	4,025 ± 8,94	0,151
Differenz			
Zustimmungs-%			
prä-OP S-STAI/			
T-STAI [%]	-0,635 ± 9,282	-0,715 ± 13,661	0,986

Differenz			
Zustimmungs-%			
post-OP S-STAI/			
T-STAI [%]	-0,001 ± 7,311	3,312 ± 16,976	0,545
	Proband*in 3		
	robotisch	offen	p
Differenz			
Zustimmungs-%			
S-STAI			
(prä-OP/post-OP)			
[%]	-2,62 ± 8,447	1,428 ± 10,738	0,501
Differenz			
Zustimmungs-%			
prä-OP S-STAI/			
T-STAI [%]	-0,952 ± 17,434	-13,858 ± 6,18	0,152
Differenz			
Zustimmungs-%			
post-OP S-STAI/			
T-STAI [%]	-3,573 ± 11,64	-12,428 ± 6,096	0,161

Alle Werte sind Mittelwerte ± SD; *p<0,05

Tabelle 22 STAI-Ergebnisse im Vergleich robotisch versus offen. Der Gesamtübersicht folgt die Subanalyse von Proband*in 3. Alle Werte sind Mittelwerte ± SD. Signifikante Ergebnisse (p<0,05) sind mit * hervorgehoben.

5. Diskussion

Diese prospektive, experimentelle Studie präsentiert eine umfassende Evaluation der intraoperativen Stresslevel von Chirurg*innen während robotisch assistierter Ösophagektomien mit dem DaVinci Xi Operationsroboter. Ein Kernpunkt der Studie war der Vergleich dieser Untersuchungen mit den Messungen aus offen chirurgisch durchgeführten Ösophagektomien.

Hierdurch konnten Unterschiede im Stresslevel während der beiden Operationstechniken festgestellt werden, durch die schlussendlich die robotische Operation als weniger stressig und dadurch ergonomisch günstiger eingestuft werden kann als die offene Operation. Darüber hinaus wurde die Anastomosenphase in der robotischen Operation als stressigster Operationsabschnitt erkannt. Diese Erkenntnis bietet Anregungen für die Aus- und Weiterbildung von Chirurg*innen in speziellen Eingriffen wie der Ösophagektomie aber auch die Möglichkeit der Optimierung des Arbeitsplatzes, insbesondere bei Teilschritten der Operation.

Im Rahmen der fortschreitenden Verbreitung und umfangreichen Evaluierung von robotischen Operationssystemen wie dem DaVinci Xi spielt die Beurteilung der ergonomischen Situation der Chirurg*innen eine wichtige Rolle. Diese Studie zeigt, dass der ergonomische Risikofaktor Stress anhand geeigneter Messmethoden zuverlässig evaluiert werden kann.

Aus den vorgestellten Studienergebnissen wird das große Potenzial von HRV-Daten hinsichtlich der qualitativen und quantitativen Erfassung von objektivem Stress deutlich. Insbesondere die Praktikabilität des verwendeten Sensors und die hohe Qualität der Messergebnisse sind klare Vorteile der HRV-Messung gegenüber anderen objektiven Stressmessinstrumenten. Diese Studie demonstriert erfolgreich die Durchführbarkeit von Echtzeit-Stressmessungen im intraoperativen Umfeld ohne Beeinflussung des üblichen Operationsablaufs oder des sterilen Umfelds.

Die verwendete Software der Firma Kubios Oy zur Berechnung der HRV-Rohdaten liefert eine Vielzahl an HRV-Parametern. Aus diesen Parametern müssen einerseits die relevanten Parameter ausgewählt werden, andererseits müssen diese Parameter korrekt interpretiert werden. In dieser Studie wurden zeitbasierte, frequenzbasierte und nicht-lineare HRV-Parameter verwendet.

Die Interpretation von zeitbasierten HRV-Parametern (Parameter der Herzfrequenz) muss mit Bedacht erfolgen. Verschiedene Faktoren beeinflussen die Aussagekraft dieser Werte. Die Körperhaltung sowie die körperliche Aktivität können die Ergebnisse verzerren. Die stehende Position während der Anastomosenphase kann beispielsweise zu einer erhöhten Herzfrequenz im Vergleich zur sitzenden Position an der Konsole während der übrigen

Operation führen.¹²⁷ Zudem weisen unterschiedliche Proband*innen unterschiedliche Ruhe-Herzfrequenzen auf. Die zeitbasierten Parameter sollten also nicht isoliert, sondern in Zusammenschau mit weiteren HRV-Parametern betrachtet werden.

Besonders aussagekräftig sind die ausgewählten Stress Indices, die jeweils aus mehreren Parametern berechnet werden und mit einer normalverteilten Kohorte korreliert sind. Die drei Stress Indices sind dimensionslos und als Anzahl der Standardabweichungen einer normalverteilten repräsentativen Stichprobe zu interpretieren. Somit erlauben sie, besser als die zeitbasierten HRV-Parameter, einen interindividuellen Vergleich der Proband*innen untereinander sowie die Zusammenfassung der Messergebnisse mehrerer Proband*innen zu einer größeren Kohorte.

In der statistischen Auswertung der HRV-Daten dieser Studie zeigten sich die ausgewählten zeitbasierten Parameter und die Stress Indices überwiegend gleichsinnig ausgeprägt. Die nachgewiesene, gegenüber den robotischen Operationen erhöhte mittlere, minimale und maximale Herzfrequenz in den offenen Operationen korrelierte mit erhöhten Stress Indices. Die Anwendung der verschiedenen Parameter und ihr gleichgerichtetes Ergebnis unterstützen vor dem Hintergrund ihrer unterschiedlichen Berechnung die Wertigkeit und Aussagekraft des Studienergebnisses.

Die in dieser Studie verwendeten HRV-Parameter wurden bereits in früheren Studien verwendet. Jones et al. sowie Heemskerk et al. verwendeten jeweils die Herzfrequenz und die LF/HF Ratio zur Darstellung der HRV während viszeralchirurgischer Eingriffe.^{94 70}

Jones et al. führten intraoperative HRV-Messungen während anteriorer Rektumresektionen durch und verglichen die Ergebnisse mit der subjektiven Einschätzung der Chirurg*innen. Die Arbeitsgruppe kam zu dem Ergebnis, dass die Ergebnisse der HRV-Messungen mit der subjektiven Einschätzung des eigenen Stresses korrelierten.⁹⁴ In der ERASE-Studie wurde ebenfalls ein objektives und ein subjektives Stressmessinstrument verwendet. Die Ergebnisse der objektiven und subjektiven Stresslevel waren jedoch nicht klar korreliert. Während in den objektiven Stressmessungen statistisch signifikante Ergebnisse festgehalten werden konnten, waren die Ergebnisse der subjektiven Stressmessungen nicht eindeutig. Beide Stressmessungen für sich bieten jedoch interessante Auffälligkeiten.

Heemskerk et al. führten in ihrer Studie intraoperative HRV-Messungen während 22 Cholezystektomien durch. Der Fokus ihrer Studie lag auf dem Vergleich der konventionell laparoskopischen und der robotisch assistierten Operationstechnik. Die Arbeitsgruppe kam zu dem Ergebnis, dass die LF/HF Ratio sowie die mittlere Herzfrequenz während der robotisch assistierten Operationen niedriger waren. Die robotisch assistierten Cholezystektomien führten also zu geringeren Stressleveln unter den Chirurg*innen als die laparoskopisch durchgeführten Cholezystektomien.⁷⁰ Dieses Ergebnis korreliert mit den in dieser Arbeit

vorgestellten Ergebnissen. Die robotisch assistierte Technik führte im Vergleich mit der offenen Technik zu geringeren Stressleveln. Die Komplexität der untersuchten Operationen unterscheidet sich jedoch deutlich. Darüber hinaus beschränkten sich Heemskerk et al. auf die Verwendung eines objektiven Stressmessinstruments.

Auch die in dieser Studie verwendeten Stress Indices wurden bereits in anderen Studien genutzt. Awad et al. verwendeten neben weiteren HRV-Parametern den Stress Index, SNS Index und PNS Index zur Untersuchung von Stress bei zwei Chirurg*innen in Weiterbildung. Der Kernpunkt der Studie lag auf dem Vergleich operativer und nicht operativer Arbeitszeit. Insbesondere während der Operationen wurden erhöhte Stresslevel gemessen. ¹²⁸ Die ERASE-Studie präsentiert ausschließlich intraoperative Daten. Der Fokus lag auf der Evaluation von neuen Operationstechniken und ihren Auswirkungen auf das ergonomische Arbeitsumfeld von Chirurg*innen.

Der State-Trait-Anxiety-Inventory ist einer der am häufigsten verwendeten Fragebögen zur subjektiven Stresserfassung. ⁶⁹ Aufgrund der Praktikabilität, Validität sowie häufigen Nutzung in vergangenen Studien wurde der STAI auch in dieser Studie verwendet. Dadurch wird der Vergleich der Ergebnisse dieser Studie mit der bestehenden Literatur vereinfacht.

Subjektive Stressmessverfahren wie die STAI-Fragebögen lassen sich in repetitiven Messungen gut intraindividuell miteinander vergleichen. Ein interindividueller Vergleich zwischen mehreren Proband*innen ist jedoch ohne Weiteres nicht möglich. Um diesen Vergleich zu ermöglichen und eine größere sowie aussagekräftigere Stichprobe zu erreichen, wurden die Ergebnisse der S-STAI Fragebögen (aktueller Stresszustand) zu den Ergebnissen der T-STAI Fragebögen (allgemeine Stresstendenz) in Bezug gesetzt. Diese „Nullung“ der intraoperativen Stressmessungen gegenüber der individuellen allgemeinen Stresstendenz ermöglicht die bereinigte Betrachtung der erfassten intraoperativen Stresslevel. Eine höhere allgemeine Stresstendenz relativiert hohe Punktzahlen im S-STAI Fragebogen. Eine niedrigere allgemeine Stresstendenz gewichtet Abweichungen im S-STAI Fragebogen anders. Auf diese Weise wird ein besseres Verständnis darüber erlangt, inwieweit die Operationen für die Chirurg*innen einen Stressfaktor darstellen.

Diese Studie demonstriert sowohl die intraoperative Durchführbarkeit der S-STAI-Fragebögen als auch eine Methodik zur kumulativen Auswertung von STAI-Daten mehrerer Proband*innen. In dieser Studie konnten auf diese Weise nicht nur Analysen einzelner Proband*innen, sondern auch Gesamtanalysen durchgeführt werden.

So wurde beispielsweise in den Einzelanalysen der robotischen Operationen bei Proband*in 1 postoperativ eine Steigerung des subjektiven Stresslevels im Vergleich zu präoperativ festgestellt. Proband*in 2 und 3 hingegen zeigten postoperativ eine Senkung des subjektiven Stresslevels im Vergleich zum präoperativen Zustand. Betrachtet man anschließend die

Korrelation der aktuellen Stresslevel zur allgemeinen Stresstendenz können zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung zeigten lediglich bei Proband*in 1 eine signifikante Steigerung des postoperativen Stresslevels in Bezug auf die allgemeine Stresstendenz. Bei Proband*in 2 und 3 konnte keine signifikante Abweichung des situativen Stresslevels zum allgemeinen Stresslevel festgestellt werden. Im Gegenteil suggestieren die Ergebnisse der deskriptiven Statistik bei diesen beiden Proband*innen einen niedrigeren aktuellen Stresszustand als die allgemeine Stresstendenz. Dies würde bedeuten, dass die Proband*innen zu Zeiten der Operation ein subjektiv niedrigeres Stresslevel empfanden als zu Zeiten außerhalb der Operation. Um diese Auffälligkeit zu überprüfen und statistisch belastbare Ergebnisse zu erhalten, wäre eine größere Stichprobe von Nutzen. Der Einfluss von Antwortverzerrungen könnte so reduziert werden. Die Aussagekraft der Daten könnte so erhöht werden.

Während die Einzelanalysen der Proband*innen in den robotischen Operationen interessante Ergebnisse lieferten, erfolgte durch eine Gesamtanalyse der Daten aller Proband*innen ein Vergleich der beiden Operationstechniken. Es zeigte sich eine größere Steigerung des subjektiven Stresslevels von präoperativ zu postoperativ in den offenen Operationen. Diese Entdeckung erwies sich als statistisch nicht signifikant. Eine Vergrößerung der Stichprobe wäre auch hier empfehlenswert, um diesen beobachteten Unterschied zu verifizieren.

Die STAI-Fragebögen zur subjektiven Stresserfassung wurden bisher in einigen Studien zur Beschreibung von subjektivem Stress bei Chirurg*innen verwendet. Arora et al. kombinierten den STAI mit zwei objektiven Stress-Messverfahren, der Cortisol-Messung im Speichel und der Erfassung der Herzfrequenz. Operationen von elf Chirurg*innen unterschiedlicher Erfahrungsstufen und Fachrichtungen wurden eingeschlossen. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass die Kombination dieser drei Messmethoden aussagekräftige Ergebnisse über die Stresslevel der Chirurg*innen liefern kann. Die Ergebnisse der STAI-Fragebögen korrelierten mit den Ergebnissen der objektiven Stressmessungen.⁷⁶ Im Gegensatz zu der Arbeit von Arora et al. fokussierte sich diese Studie auf lediglich eine Operation in zwei unterschiedlichen Operationsmodalitäten, robotisch assistiert und offen chirurgisch.

Budden et al. verwendeten in ihrer Studie 2023 den STAI und eine visuelle Analogskala zur Beurteilung von subjektivem Stress bei acht erfahrenen Gynäkolog*innen und neun Gynäkolog*innen in Weiterbildung während neunzig unterschiedlicher Operationen. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass insbesondere die Chirurg*innen in Weiterbildung sowie jene, die die Operation hauptsächlich durchführen, höhere subjektive Stresslevel aufwiesen als erfahrene Chirurg*innen und solche in assistierender Funktion. Die Art der Operation zeigte dabei keinen signifikanten Einfluss auf die subjektiven Stresslevel.¹⁰⁰ Im Gegensatz zu Budden et al. wurden in dieser Studie lediglich erfahrene Chirurg*innen untersucht, die die

Operationen selbst durchführten. Eine entscheidende Voraussetzung zur Teilnahme an der Studie war das Beherrschen beider Operationsmodalitäten. Dennoch bestehen auch in dieser Studienkohorte Unterschiede im Erfahrungslevel der Chirurg*innen. Interessant ist die Subanalyse von Proband*in 3. Proband*in 3 wies im Vergleich der beiden Operationstechniken hinsichtlich der objektiven Stressmessung mittels HRV lediglich in einem der Parameter (LF/HF Ratio) eine signifikante Steigerung in der offenen Operation auf. In der Gesamtanalyse aller Proband*innen wurden in sieben der acht HRV-Parameter signifikante Unterschiede festgestellt. Proband*in 3 wies mit 25 Jahren die höchste Erfahrung in der Ösophaguschirurgie auf, wies jedoch gleichzeitig mit vier Jahren die zweitniedrigste Erfahrung in der robotisch assistierten Chirurgie auf. Langjährige Routine in der konventionell offenen Operationstechnik steht geringerer Erfahrung in der robotisch assistierten Technik gegenüber. Diese unterschiedlichen Erfahrungslevel könnten dazu beigetragen haben, dass sich die Stresslevel in beiden Operationstechniken nicht signifikant unterschieden. Die Subanalyse hinsichtlich der Auswirkungen der Erfahrungslevel der Chirurg*innen auf ihr Stresslevel war nicht Gegenstand dieser Studie. Dennoch bietet diese Auffälligkeit Anreiz den Zusammenhang in zukünftigen Studien weiter zu untersuchen.

Diese Studie befasste sich mit den ergonomischen Bedingungen der operativen Arbeitszeit von Chirurg*innen. Methodische Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu verwandten Studien zu diesem speziellen Thema wurden bereits herausgestellt. Die ERASE-Studie bietet einige methodische Stärken.

Mit der Ösophagektomie wurde ein komplexer viszeralchirurgischer Eingriff des oberen Gastrointestinaltrakts ausgewählt, der sowohl in der konventionellen (offen chirurgischen) als auch robotisch assistierten Technik untersucht wurde. Das Kernstück dieser Arbeit bildete der Vergleich der neueren, robotisch assistierten Technik mit der offen chirurgischen Technik, dem bisherigen Goldstandard unserer Klinik für den thorakalen Teil der Ösophagektomie. Die Ösophagektomie ist an der Uniklinik Köln mit über 200 Eingriffen pro Jahr einer der standardisier testen Eingriffe der Klinik. Andere Operationen wurden zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der beiden Operationstechniken nicht eingeschlossen.

Die eingeschlossene Studienkohorte umfasste ausschließlich Chirurg*innen mit abgeschlossener Weiterbildung, um das geringere Erfahrungslevel von Chirurg*innen in Weiterbildung als Einflussfaktor auf intraoperativen Stress zu vermeiden. Zudem mussten alle Chirurg*innen in beiden Operationstechniken erfahren sein, um an der Studie teilzunehmen. Neben der objektiven Stressevaluierung mittels HRV wurde gleichzeitig die subjektive Stresseinschätzung mittels STAI berücksichtigt.

Zum Vergleich der ergonomischen Situation der Chirurg*innen hinsichtlich ihrer Stresslevel in den beiden Operationstechniken wurden acht HRV-Parameter (mittlere Herzfrequenz,

minimale und maximale Herzfrequenz, mittlerer RR-Abstand, LF/HF Ratio sowie die Stress Indices Stress Index, SNS Index und PNS Index) sowie der State-Trait-Anxiety-Inventory evaluiert. Durch die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Parameter konnte ein zuverlässiges Bild über den tatsächlichen Stresszustand der Chirurg*innen erlangt werden. Zudem wurde mit der Ösophagektomie ein viszeralchirurgischer Eingriff des oberen Gastrointestinaltrakts ausgewählt, der nicht nur als besonders komplex und technisch anspruchsvoll gilt, sondern darüber hinaus bisher nicht untersucht worden ist. Die Gesamtzahl aller Operationen, die in die finale Auswertung eingeschlossen wurde, liegt mit 34 Operationen, davon 22 robotische Operationen, hoch zu vergleichbaren Studien, die in der Literatur zu finden sind.

Die Ergebnisse der objektiven Stressmessung mittels HRV zeigten, dass die offene Operationstechnik mit einem höheren Stresslevel verbunden war als die robotische Technik. Alle acht ausgewählten HRV-Parameter zeigten eine stärkere Ausprägung in Richtung Stress in der offenen Operation. Sieben von acht HRV-Parametern zeigten sich diesbezüglich in der statistischen Testung statistisch signifikant.

Eine Limitation der Aussagekraft dieser Daten ist die ungleiche Verteilung der Operationen unter den Proband*innen. Eine höhere Gesamtanzahl sowie gleichmäßigere Verteilung der offenen und robotischen Operationen auf die Proband*innen würde die Wertigkeit der Daten noch weiter anheben.

Die Ergebnisse der subjektiven Stressmessung weisen ebenfalls darauf hin, dass die offene Operationstechnik für die operierenden Chirurg*innen stressiger war als die robotische Technik. Die Differenz vom präoperativen zum postoperativen subjektiven Stresslevel zeigte eine größere Steigerung während der offenen Operationen. Zudem konnte in den offenen Operationen postoperativ eine größere Abweichung des aktuellen Stresslevels (S-STAI) von der allgemeinen Stresstendenz (T-STAI) festgestellt werden.

Die statistische Auswertung zeigte jedoch keinen signifikanten Unterschied der beiden Operationstechniken, was die Aussagekraft dieses Ergebnisses einschränkt. Außerdem sollte der Einfluss möglicher Antwortverzerrungen bedacht werden.

Interessanterweise waren die gegen die allgemeine Stresstendenz (T-STAI) genullten Zustimmungswertwerte der S-STAI Erfassungen robotisch prä- und postoperativ sowie offen präoperativ in der Gesamtauswertung negativ. Das bedeutet, dass das aktuelle subjektive Stressniveau der Chirurg*innen zu diesen drei von vier Messzeitpunkten niedriger lag als ihr allgemeines Stressniveau. Auch wenn diese Ergebnisse sich in der Gesamtübersicht statistisch als nicht signifikant erwiesen, ist dieses Messergebnis interessant. Es widerspricht dem erwarteten Ergebnis, dass aufgrund der operativen Tätigkeit mit einem

gegenüber der Baseline erhöhten akuten Stresszustand zu rechnen ist. Eine Überprüfung dieses Ergebnisses anhand einer größeren Studienkohorte ist empfehlenswert.

Außerdem sollte in zukünftigen Studien der Zusammenhang zwischen objektivem und subjektivem Stresserleben weiter untersucht werden.

Neben dem Vergleich der beiden Operationstechniken bietet diese Studie auch detaillierte Ergebnisse über das Stresslevel von Chirurg*innen während einzelner Operationsabschnitte der robotischen Operation. Die Anastomosenphase wies von allen ausgewählten Operationsabschnitten die höchsten objektiven Stresslevel auf. Dieses Ergebnis zeigte sich im Vergleich mit den Ergebnissen der gesamten Operation in fünf der acht HRV-Parameter statistisch signifikant. In den Subanalysen der einzelnen Proband*innen konnte dieses Ergebnis ebenfalls festgestellt werden.

Diese Erkenntnisse bieten Anreiz für Übungssimulationen und protektive Maßnahmen zur Förderung der ergonomischen Situation von Chirurg*innen.

In dieser Studie wurden intraoperative Echtzeit-Stressmessungen durchgeführt. In der realen Chirurgie bringt jeder Einzelfall individuelle Herausforderungen mit sich. Eine Standardisierung der Rahmenbedingungen, in denen die Stressmessungen stattfinden, ist schwieriger als in isolierten Labor-, beziehungsweise Simulationssettings. Diesem Problem wurde mit einer strengen Auswahl der eingeschlossenen Operationen nach festgelegten Kriterien begegnet. Ein Bias, der sich nicht ausschließen ließ, war die Patient*innenselektion für die beiden Operationsmodalitäten. Je nach Vorerkrankungsprofil und anästhesiologischer Einschätzung erfolgte zwangsweise eine Unterteilung in „kranke“ und „kränkere“ Patient*innen, von welchen letztere eher der invasiveren, aber in der Regel kürzeren offenen Operationstechnik zugeführt wurden. Ob dieses Selektionsbias auch einen Einfluss auf das Stresslevel der operierenden Chirurg*innen hatte, kann nicht ausgeschlossen werden.

Die Durchführung von Stress- und Ergonomie-Messungen in Simulationssettings kann solche Störfaktoren umgehen. Der Transfer der Ergebnisse aus Simulations-Studien in eine reale Umgebung ist jedoch nicht unbeeinträchtigt möglich und muss weiter erforscht werden. Wie Georgiou et al. jedoch in ihrer Übersichtsarbeit von 2017 korrekt festhalten, bieten Simulationsstudien eine große Chance hinsichtlich der Erforschung von Stress-Grenzwerten und des Einflusses von Stress auf Performance und Lernkurven.⁶⁹ Ab wann ist Stress schädlich? Bis zu welchem Stresslevel bleibt die Performance der Chirurg*innen unbeeinträchtigt? Ebenso können Stress-Coping Mechanismen in Trainings- und Simulations-Studien kontrolliert erprobt und erlernt werden.¹²⁹

Die Ergebnisse aus intraoperativen Studien wie dieser Studie, dem ERASE-Trial, können verwendet werden, um stressauslösende Operationsabschnitte zu identifizieren und anschließend verstärkt zu trainieren. Das intensive Trainieren von stressauslösenden Situationen beziehungsweise Operationsabschnitten in Simulationen kann zu einer geringeren Stressreaktion in der echten Operation führen. ¹³⁰

Grantcharov et al. stellten 2019 in ihrer Studie fest, dass höhere Stresslevel gemessen anhand der HRV mit einer schlechteren intraoperativen Performance korrelieren. ¹³¹ Während weitere Studien benötigt werden, um die Kausalität dieser Beobachtung zu überprüfen, steht die Frage im Raum, ob die Reduktion von intraoperativem Stress umgekehrt eine verbesserte chirurgische Performance befördern könnte.

Es benötigt mehr Forschung hinsichtlich stressauslösender, aber auch stressreduzierender Faktoren im operativen Umfeld von Chirurg*innen. Idealerweise sollten diese Studien im realen intraoperativen Umfeld stattfinden, mit dem Ziel neues Wissen in die Aus- und Weiterbildung von Chirurg*innen zu integrieren.

Die in dieser Studie vorgestellte Methodik der Stressmessungen konnte in unserer Klinik bereits in weiteren Studien angewandt werden. Die Übertragung der Stressmessungen auf einen weiteren Operationsroboter, das HUGO RAS System, lieferte wertvolle Daten über den Stress und die Ergonomie verschiedener Proband*innen in einer Trainings-Simulation. ¹³² Weitere Studien befassen sich derzeit mit anderen Eingriffen, unterschiedlichen Ausbildungsniveaus der Chirurg*innen und verschiedenen Operationsrobotern.

Ergonomische Bedingungen in der Chirurgie gewinnen immer mehr an Aufmerksamkeit und Bedeutung. Studien, die sich mit der Ergonomie am chirurgischen Arbeitsplatz befassen, sollten verstärkt gefördert werden. Neue Technologien wie der Operationsroboter DaVinci Xi bieten Verbesserungschancen für Chirurg*innen hinsichtlich des ergonomischen Risikofaktors Stress. Nicht nur das Wohlbefinden und die Gesundheit der Chirurg*innen kann erhalten werden. Durch eine Verbesserung der Ergonomie kann auch die Qualität der Arbeit und schlussendlich die Sicherheit der Patient*innen erhöht werden. ⁴⁹

Das Schaffen eines ergonomisch günstigen Arbeitsumfelds ist für alle Beteiligten von Vorteil.

Die Publikation der ERASE-Studie, in welcher auch die in dieser Monographie dargestellten Ergebnisse wiederzufinden sind, ist zeitnah geplant.

6. Literaturverzeichnis

1. Lander S, Lander E, Gibson MK. Esophageal Cancer: Overview, Risk Factors, and Reasons for the Rise. *Current Gastroenterology Reports* 2023; **25**(11): 275-9.
2. Liu CQ, Ma YL, Qin Q, et al. Epidemiology of esophageal cancer in 2020 and projections to 2030 and 2040. *Thoracic Cancer* 2023; **14**(1): 3-11.
3. Morgan E, Soerjomataram I, Rungay H, et al. The Global Landscape of Esophageal Squamous Cell Carcinoma and Esophageal Adenocarcinoma Incidence and Mortality in 2020 and Projections to 2040: New Estimates From GLOBOCAN 2020. *Gastroenterology* 2022; **163**(3): 649-58.e2.
4. Abnet CC, Arnold M, Wei W-Q. Epidemiology of Esophageal Squamous Cell Carcinoma. *Gastroenterology* 2018; **154**(2): 360-73.
5. Sheikh M, Roshandel G, McCormack V, Malekzadeh R. Current Status and Future Prospects for Esophageal Cancer. *Cancers* 2023; **15**(3): 765.
6. Zentrum für Krebsregisterdaten. Speiseröhrenkrebs (Ösophaguskarzinom). 2023.
https://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Krebsarten/Speiseroehrenkrebs/speiseroehrenkrebs_node.html (accessed 27 March 2024)
7. Tarazi M, Chidambaram S, Markar SR. Risk Factors of Esophageal Squamous Cell Carcinoma beyond Alcohol and Smoking. *Cancers* 2021; **13**(5): 1009.
8. Li J, Xu J, Zheng Y, et al. Esophageal cancer: Epidemiology, risk factors and screening. *Chin J Cancer Res* 2021; **33**(5): 535-47.
9. Thrift AP, Shaheen NJ, Gammon MD, et al. Obesity and Risk of Esophageal Adenocarcinoma and Barrett's Esophagus: A Mendelian Randomization Study. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 2014; **106**(11): dju252-dju.
10. Huang FL, Yu SJ. Esophageal cancer: Risk factors, genetic association, and treatment. *Asian J Surg* 2018; **41**(3): 210-5.
11. Uhlenhopp DJ, Then EO, Sunkara T, Gaduputi V. Epidemiology of esophageal cancer: update in global trends, etiology and risk factors. *Clinical Journal of Gastroenterology* 2020; **13**(6): 1010-21.
12. Rogers JE, Sewastjanow-Silva M, Waters RE, Ajani JA. Esophageal cancer: emerging therapeutics. *Expert Opinion on Therapeutic Targets* 2022; **26**(2): 107-17.
13. Lorenzen S, Reinacher-Schick A, Masetti M. Moderne Konzepte der Systemtherapie zur adjuvanten und palliativen Behandlung des lokal

- fortgeschrittenen oder metastasierten Ösophaguskarzinoms. *Der Chirurg* 2021; **92**(12): 1085-93.
14. Schmidt T, Babic B, Bruns CJ, Fuchs HF. Chirurgische Therapie des Ösophaguskarzinoms – neue Technologien, moderne Konzepte. *Der Chirurg* 2021; **92**(12): 1100-6.
15. Eddahchouri Y, Van Workum F, Van Den Wildenberg FJH, et al. European consensus on essential steps of Minimally Invasive Ivor Lewis and McKeown Esophagectomy through Delphi methodology. *Surgical Endoscopy* 2022; **36**(1): 446-60.
16. Angeramo CA, Bras Harriott C, Casas MA, Schlottmann F. Minimally invasive Ivor Lewis esophagectomy: Robot-assisted versus laparoscopic-thoracoscopic technique. Systematic review and meta-analysis. *Surgery* 2021; **170**(6): 1692-701.
17. Fuchs HF, Muller DT, Leers JM, Schroder W, Bruns CJ. Modular step-up approach to robot-assisted transthoracic esophagectomy-experience of a German high volume center. *Translational Gastroenterology and Hepatology* 2019; **4**: 62.
18. Schröder W, Gisbertz SS, Voeten DM, Gutschow CA, Fuchs HF, Van Berge Henegouwen MI. Surgical Therapy of Esophageal Adenocarcinoma—Current Standards and Future Perspectives. *Cancers* 2021; **13**(22): 5834.
19. Babic B, Schiffmann LM, Schröder W, Bruns CJ, Fuchs HF. Evidenz in der minimal-invasiven onkologischen Chirurgie des Ösophagus. *Der Chirurg* 2021; **92**(4): 299-303.
20. Leitlinienprogramm Onkologie (Deutsche Krebsgesellschaft DK, AWMF). Diagnostik und Therapie der Plattenepithelkarzinome und Adenokarzinome des Ösophagus, Langversion 4.0, 2023, AWMF-Registernummer: 021-023OL. 2023. <https://www.leitlinienprogramm-onkologie.de/leitlinien/oesophaguskarzinom/> (accessed 09 October 2024)
21. van der Sluis PC, van der Horst S, May AM, et al. Robot-assisted Minimally Invasive Thoracoscopic Esophagectomy Versus Open Transthoracic Esophagectomy for Resectable Esophageal Cancer: A Randomized Controlled Trial. *Ann Surg* 2019; **269**(4): 621-30.
22. Mederos MA, De Virgilio MJ, Shenoy R, et al. Comparison of Clinical Outcomes of Robot-Assisted, Video-Assisted, and Open Esophagectomy for Esophageal Cancer. *JAMA Network Open* 2021; **4**(11): e2129228.

23. Esagian SM, Ziogas IA, Skarentzos K, et al. Robot-Assisted Minimally Invasive Esophagectomy versus Open Esophagectomy for Esophageal Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cancers* 2022; **14**(13): 3177.
24. van der Sluis PC, Babic B, Uzun E, et al. Robot-assisted and conventional minimally invasive esophagectomy are associated with better postoperative results compared to hybrid and open transthoracic esophagectomy. *Eur J Surg Oncol* 2022; **48**(4): 776-82.
25. Rebecchi F, Ugliono E, Allaix ME, Morino M. Why pay more for robot in esophageal cancer surgery? *Updates in Surgery* 2023; **75**(2): 367-72.
26. Fuchs HF, Collins JW, Babic B, et al. Robotic-assisted minimally invasive esophagectomy (RAMIE) for esophageal cancer training curriculum-a worldwide Delphi consensus study. *Dis Esophagus* 2022; **35**(6).
27. Fuchs HF, Harnsberger CR, Broderick RC, et al. Mortality after esophagectomy is heavily impacted by center volume: retrospective analysis of the Nationwide Inpatient Sample. *Surgical Endoscopy* 2017; **31**(6): 2491-7.
28. Kingma BF, de Maat MFG, van der Horst S, van der Sluis PC, Ruurda JP, van Hillegersberg R. Robot-assisted minimally invasive esophagectomy (RAMIE) improves perioperative outcomes: a review. *J Thorac Dis* 2019; **11**(Suppl 5): S735-S42.
29. Preising B, Hsia TC, Mittelstadt B. A literature review: robots in medicine. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 1991; **10**(2): 13-22.
30. Rassweiler JJ, Autorino R, Klein J, et al. Future of robotic surgery in urology. *BJU International* 2017; **120**(6): 822-41.
31. Himpens J, Leman G, Cadiere GB. Telesurgical laparoscopic cholecystectomy. *Surgical Endoscopy* 1998; **12**(8): 1091-.
32. Marco Vito Marino GS, Gaspare Gulotta ALK. From Illusion to Reality: A Brief History of Robotic Surgery. *Surgical Innovation* 2018; **25**(3): 291-6.
33. Intuitive Surgical Operations Inc. Investor Presentation Q2 2024. 2024. <https://isrg.intuitive.com/static-files/d9b874f7-3fff-4849-bf28-b78f924061e1> (accessed 09 October 2024)
34. Morrell ALG, Morrell-Junior AC, Morrell AG, et al. The history of robotic surgery and its evolution: when illusion becomes reality. *Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões* 2021; **48**.

35. Petz W, Bertani E, Borin S, Fiori G, Ribero D, Spinoglio G. Fluorescence-guided D3 lymphadenectomy in robotic right colectomy with complete mesocolic excision. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 2021; **17**(3).
36. Buchs NC, Hagen ME, Pugin F, et al. Intra-operative fluorescent cholangiography using indocyanin green during robotic single site cholecystectomy. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 2012; **8**(4): 436-40.
37. Jayne DG, Culmer PR, Barrie J, Hewson R, Neville A. Robotic platforms for general and colorectal surgery. *Colorectal Disease* 2011; **13**(s7): 78-82.
38. Chen Y, Zhang SA, Wu Z, Yang B, Luo Q, Xu K. Review of surgical robotic systems for keyhole and endoscopic procedures: state of the art and perspectives. *Frontiers of Medicine* 2020; **14**(4): 382-403.
39. Wilson JR. Fundamentals of ergonomics in theory and practice. *Applied Ergonomics* 2000; **31**(6): 557-67.
40. Scheer SJ, Mital A. Ergonomics. *Archives of physical medicine and rehabilitation* 1997; **78**: 36-45.
41. Dul J, Bruder R, Buckle P, et al. A strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession. *Ergonomics* 2012; **55**(4): 377-95.
42. Carayon P, Schoofs Hundt A, Karsh BT, et al. Work system design for patient safety: the SEIPS model. *Quality in Health Care* 2006; **15**(suppl 1): i50-i8.
43. International Ergonomics Association. What Is Ergonomics (HFE)? 2024. <https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/> (accessed 31 May 2024)
44. International Ergonomics Association. Domains of HFE. 2024. <https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/> (accessed 10 October 2024)
45. Epstein S, Sparer EH, Tran BN, et al. Prevalence of Work-Related Musculoskeletal Disorders Among Surgeons and Interventionalists. *JAMA Surgery* 2018; **153**(2).
46. Stucky CH, Cromwell KD, Voss RK, et al. Surgeon symptoms, strain, and selections: Systematic review and meta-analysis of surgical ergonomics. *Ann Med Surg (Lond)* 2018; **27**: 1-8.
47. Hallbeck MS, Paquet V. Human Factors and Ergonomics in the Operating Room: Contributions that Advance Surgical Practice: Preface. *Applied Ergonomics* 2019; **78**: 248-50.

48. Kuoppala J, Lamminpää A, Husman P. Work Health Promotion, Job Well-Being, and Sickness Absences—A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Occupational & Environmental Medicine* 2008; **50**(11): 1216-27.
49. Carayon P, Xie A, Kianfar S. Human factors and ergonomics as a patient safety practice. *BMJ Quality & Safety* 2014; **23**(3): 196-205.
50. Meltzer AJ, Hallbeck MS, Morrow MM, et al. Measuring Ergonomic Risk in Operating Surgeons by Using Wearable Technology. *JAMA Surgery* 2020; **155**(5): 444.
51. Yang L, Wang T, Weidner TK, Madura JA, Morrow MM, Hallbeck MS. Intraoperative musculoskeletal discomfort and risk for surgeons during open and laparoscopic surgery. *Surgical Endoscopy* 2021; **35**(11): 6335-43.
52. Wells AC, Kjellman M, Harper SJF, Forsman M, Hallbeck MS. Operating hurts: a study of EAES surgeons. *Surgical Endoscopy* 2019; **33**(3): 933-40.
53. Berguer R. Surgical technology and the ergonomics of laparoscopic instruments. *Surgical Endoscopy* 1998; **12**(5): 458-62.
54. Thurston T, Dolan JP, Husain F, et al. Assessment of muscle activity and fatigue during laparoscopic surgery. *Surgical Endoscopy* 2022; **36**(9): 6672-8.
55. Catanzarite T, Tan-Kim J, Menefee SA. Ergonomics in gynecologic surgery. *Curr Opin Obstet Gynecol* 2018; **30**(6): 432-40.
56. Alzahrani MM, Alqahtani SM, Tanzer M, Hamdy RC. Musculoskeletal disorders among orthopedic pediatric surgeons: an overlooked entity. *J Child Orthop* 2016; **10**(5): 461-6.
57. Dalager T, Sogaard K, Boyle E, Jensen PT, Mogensen O. Surgery Is Physically Demanding and Associated With Multisite Musculoskeletal Pain: A Cross-Sectional Study. *J Surg Res* 2019; **240**: 30-9.
58. Mavrovounis G, Meling TR, Lafuente J, Fountas KN, Demetriades AK. Postural ergonomics and work-related musculoskeletal disorders in neurosurgery: lessons from an international survey. *Acta Neurochirurgica* 2021; **163**(6): 1541-52.
59. Wohlaer M, Coleman DM, Sheahan MG, et al. Physical pain and musculoskeletal discomfort in vascular surgeons. *J Vasc Surg* 2021; **73**(4): 1414-21.
60. Van'T Hullenaar CDP, Hermans B, Broeders IAMJ. Ergonomic assessment of the da Vinci console in robot-assisted surgery. *Innovative Surgical Sciences* 2017; **2**(2): 97-104.

61. Wong SW, Ang ZH, Yang PF, Crowe P. Robotic colorectal surgery and ergonomics. *Journal of Robotic Surgery* 2022; **16**(2): 241-6.
62. Tetteh E, Wang T, Kim JY, et al. Optimizing ergonomics during open, laparoscopic, and robotic-assisted surgery: A review of surgical ergonomics literature and development of educational illustrations. *The American Journal of Surgery* 2023.
63. Sharma A, Sharp DM, Walker LG, Monson JRT. Stress and burnout in colorectal and vascular surgical consultants working in the UK National Health Service. *Psycho-Oncology* 2008; **17**(6): 570-6.
64. Celik SU, Aslan A, Coskun E, et al. Prevalence and associated factors for burnout among attending general surgeons: a national cross-sectional survey. *BMC Health Serv Res* 2021; **21**(1): 39.
65. Pavlidis I, Tsiamyrtzis P, Shastri D, et al. Fast by Nature - How Stress Patterns Define Human Experience and Performance in Dexterous Tasks. *Scientific Reports* 2012; **2**(1).
66. Arora S, Sevdalis N, Nestel D, Woloshynowych M, Darzi A, Kneebone R. The impact of stress on surgical performance: a systematic review of the literature. *Surgery* 2010; **147**(3): 318-30, 30 e1-6.
67. Anton NE, Montero PN, Howley LD, Brown C, Stefanidis D. What stress coping strategies are surgeons relying upon during surgery? *Am J Surg* 2015; **210**(5): 846-51.
68. Arora S, Sevdalis N, Aggarwal R, Sirimanna P, Darzi A, Kneebone R. Stress impairs psychomotor performance in novice laparoscopic surgeons. *Surgical Endoscopy* 2010; **24**(10): 2588-93.
69. Georgiou K, Larentzakis A, Papavassiliou AG. Surgeons' and surgical trainees' acute stress in real operations or simulation: A systematic review. *Surgeon* 2017; **15**(6): 355-65.
70. Heemskerk J, Zandbergen HR, Keet SW, et al. Relax, it's just laparoscopy! A prospective randomized trial on heart rate variability of the surgeon in robot-assisted versus conventional laparoscopic cholecystectomy. *Digestive Surgery* 2014; **31**(3): 225-32.
71. Mazzella A, Casiraghi M, Galetta D, et al. How Much Stress Does a Surgeon Endure? The Effects of the Robotic Approach on the Autonomic Nervous System of a Surgeon in the Modern Era of Thoracic Surgery. *Cancers* 2023; **15**(4): 1207.

72. Lefetz O, Baste JM, Hamel JF, Mordojovich G, Lefevre-Scelles A, Coq JM. Robotic surgery and work-related stress: A systematic review. *Appl Ergon* 2024; **117**: 104188.
73. Torkamani-Azar M, Lee A, Bednarik R. Methods and Measures for Mental Stress Assessment in Surgery: A Systematic Review of 20 Years of Literature. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics* 2022; **26**(9): 4436-49.
74. Prichard RS, O'Neill CJ, Oucharek JJ, Holmes CY, Delbridge LW, Sywak MS. A prospective study of heart rate variability in endocrine surgery: surgical training increases consultant's mental strain. *J Surg Educ* 2012; **69**(4): 453-8.
75. Weenk M, Alken APB, Engelen L, Bredie SJH, van de Belt TH, van Goor H. Stress measurement in surgeons and residents using a smart patch. *Am J Surg* 2018; **216**(2): 361-8.
76. Arora S, Tierney T, Sevdalis N, et al. The Imperial Stress Assessment Tool (ISAT): A Feasible, Reliable and Valid Approach to Measuring Stress in the Operating Room. *World Journal of Surgery* 2010; **34**(8): 1756-63.
77. Lowndes BR, Abdelrahman AM, Thiels CA, et al. Surgical team workload comparison for 4-port and single-port laparoscopic cholecystectomy procedures. *Appl Ergon* 2019; **78**: 277-85.
78. Berguer R, Smith WD, Chung YH. Performing laparoscopic surgery is significantly more stressful for the surgeon than open surgery. *Surgical Endoscopy* 2001; **15**(10): 1204-7.
79. Bunevicius A, Bilskiene D, Macas A, Tamasauskas A. Hemodynamic response during aneurysm clipping surgery among experienced neurosurgeons. *Acta Neurochirurgica* 2016; **158**(2): 221-7.
80. Rieger A, Fenger S, Neubert S, Weippert M, Kreuzfeld S, Stoll R. Psychophysical workload in the operating room: primary surgeon versus assistant. *Surgical Endoscopy* 2015; **29**(7): 1990-8.
81. Hubert N, Gilles M, Desbrosses K, Meyer J, Felblinger J, Hubert J. Ergonomic assessment of the surgeon's physical workload during standard and robotic assisted laparoscopic procedures. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 2013; **9**(2): 142-7.
82. Kwon J-W, Lee S-B, Sung S, et al. Which Factors Affect the Stress of Intraoperative Orthopedic Surgeons by Using Electroencephalography Signals and Heart Rate Variability? *Sensors* 2021; **21**(12): 4016.

83. Pluyter JR, Rutkowski A-F, Jakimowicz JJ. Immersive training: breaking the bubble and measuring the heat. *Surgical Endoscopy* 2014; **28**(5): 1545-54.
84. Van Der Ploeg MM, Brosschot JF, Verkuil B, et al. Inducing unconscious stress: Cardiovascular activity in response to subliminal presentation of threatening and neutral words. *Psychophysiology* 2017; **54**(10): 1498-511.
85. Hickey BA, Chalmers T, Newton P, et al. Smart Devices and Wearable Technologies to Detect and Monitor Mental Health Conditions and Stress: A Systematic Review. *Sensors* 2021; **21**(10): 3461.
86. Shaffer F, Ginsberg JP. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health* 2017; **5**.
87. Kim H-G, Cheon E-J, Bai D-S, Lee YH, Koo B-H. Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *Psychiatry Investigation* 2018; **15**(3): 235-45.
88. Järvelin-Pasanen S, Sinikallio S, Tarvainen MP. Heart rate variability and occupational stress—systematic review. *Industrial Health* 2018; **56**(6): 500-11.
89. Robinson C, Lawless R, Zarzaur BL, Timsina L, Feliciano DV, Coleman JJ. Physiologic stress among surgeons who take in-house call. *Am J Surg* 2019; **218**(6): 1181-4.
90. Jevsevar DS, Molloy IB, Gitajn IL, Werth PM. Orthopaedic Surgeon Physiological Indicators of Strain as Measured by a Wearable Fitness Device. *J Am Acad Orthop Surg* 2021; **29**(24): e1378-e86.
91. Kent J, Fong A, Hall E, Fitzgibbons S, Sava J. Measurement of Trauma Caregiver Stress: Validation of Heart rate variability in a Real-World Surgical Setting. *J Surg Res* 2021; **265**: 252-8.
92. Amirian I, Andersen L, Rosenberg J, Gögenur I. Decreased heart rate variability in surgeons during night shifts. *Canadian Journal of Surgery* 2014; **57**(5): 300-4.
93. The AF, Reijmerink I, van der Laan M, Cnossen F. Heart rate variability as a measure of mental stress in surgery: a systematic review. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 2020; **93**(7): 805-21.
94. Jones KI, Amawi F, Bhalla A, Peacock O, Williams JP, Lund JN. Assessing surgeon stress when operating using heart rate variability and the State Trait Anxiety Inventory: will surgery be the death of us? *Colorectal Disease* 2014; **17**(4): 335-41.
95. Awad G, Pohl R, Darius S, et al. Evaluation of Stress Levels of Trainee Cardiac Surgery Residents during Training Interventions Using Physiological Stress

Parameters. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021; **18**(22): 11953.

96. Yamanouchi K, Hayashida N, Kuba S, et al. Increase in Operator's Sympathetic Nerve Activity during Complicated Hepatobiliary Surgery: Evidence for Surgeons' Mental Stress. *Tohoku J Exp Med* 2015; **237**(3): 157-62.

97. Song MH, Tokuda Y, Nakayama T, Sato M, Hattori K. Intraoperative heart rate variability of a cardiac surgeon himself in coronary artery bypass grafting surgery. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery* 2009; **8**(6): 639-41.

98. Dedmon MM, O'Connell BP, Yawn RJ, et al. Measuring Mental Stress During Otologic Surgery Using Heart Rate Variability Analysis. *Otol Neurotol* 2019; **40**(4): 529-34.

99. Pimentel G, Rodrigues S, Silva PA, Vilarinho A, Vaz R, Silva Cunha JP. A wearable approach for intraoperative physiological stress monitoring of multiple cooperative surgeons. *Int J Med Inform* 2019; **129**: 60-8.

100. Budden AK, Song S, Henry A, Wakefield CE, Abbott JA. Surgeon reported measures of stress and anxiety prior to and after elective gynecological surgery. *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica* 2023.

101. Nguyen DH, Nguyen BH, Van Nong H, Tran TH. Three-dimensional laparoscopy in urology: Initial experience after 100 cases. *Asian J Surg* 2019; **42**(1): 303-6.

102. Bell SW, Kong JCH, Clark DA, et al. The National Aeronautics and Space Administration-task load index: <sc>NASA-TLX</sc>: evaluation of its use in surgery. *ANZ Journal of Surgery* 2022; **92**(11): 3022-8.

103. Wilson MR, Poolton JM, Malhotra N, Ngo K, Bright E, Masters RSW. Development and Validation of a Surgical Workload Measure: The Surgery Task Load Index (SURG-TLX). *World Journal of Surgery* 2011; **35**(9): 1961-9.

104. Sunita Duggal SM-S, Boris Birmaher, Barbara P. Anderson, Mary K. Matty, Patricia R. Houck, Meredith Bailey-Orr, Douglas E. Williamson, Ellen Frank. Assessment of Life Stress in Adolescents: Self-Report Versus Interview Methods. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry* 2000; **39**(4): 445-52.

105. Föhr T, Tolvanen A, Myllymäki T, et al. Subjective stress, objective heart rate variability-based stress, and recovery on workdays among overweight and

- psychologically distressed individuals: a cross-sectional study. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* 2015; **10**(1).
106. Christensen DS, Dich N, Flensburg-Madsen T, Garde E, Hansen ÅM, Mortensen EL. Objective and subjective stress, personality, and allostatic load. *Brain and Behavior* 2019; **9**(9).
107. Schütz A. Assertive, Offensive, Protective, and Defensive Styles of Self-Presentation: A Taxonomy. *The Journal of Psychology* 1998; **132**(6): 611-28.
108. Westland JC. Information loss and bias in likert survey responses. *PLOS ONE* 2022; **17**(7): e0271949.
109. McCambridge J, Witton J, Elbourne DR. Systematic review of the Hawthorne effect: New concepts are needed to study research participation effects. *Journal of Clinical Epidemiology* 2014; **67**(3): 267-77.
110. Chen S, Qin P, Tan-Soo JS, Wei C. Recency and projection biases in air quality valuation by Chinese residents. *Sci Total Environ* 2019; **648**: 618-30.
111. Spielberger CD. Manual for the State-Trait-Anxiety Inventory: Consulting Psychologist; 1970.
112. Marteau TM, Bekker H. The development of a six-item short-form of the state scale of the Spielberger State—Trait Anxiety Inventory (STAI). *British Journal of Clinical Psychology* 1992; **31**(3): 301-6.
113. Grimm J. State-Trait-Anxiety Inventory nach Spielberger. Deutsche Lang- und Kurzversion. *Methodenforum der Universität Wien* 2009; (2009/02).
114. Peake JM, Kerr G, Sullivan JP. A Critical Review of Consumer Wearables, Mobile Applications, and Equipment for Providing Biofeedback, Monitoring Stress, and Sleep in Physically Active Populations. *Frontiers in Physiology* 2018; **9**.
115. Huang C-J, Chan H-L, Chang Y-J, Chen S-M, Hsu M-J. Validity of the Polar V800 Monitor for Assessing Heart Rate Variability in Elderly Adults under Mental Stress and Dual Task Conditions. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021; **18**(3): 869.
116. Schaffarczyk M, Rogers B, Reer R, Gronwald T. Validity of the Polar H10 Sensor for Heart Rate Variability Analysis during Resting State and Incremental Exercise in Recreational Men and Women. *Sensors* 2022; **22**(17): 6536.
117. Moya-Ramon M, Mateo-March M, Pena-Gonzalez I, Zabala M, Javaloyes A. Validity and reliability of different smartphones applications to measure HRV during

- short and ultra-short measurements in elite athletes. *Comput Methods Programs Biomed* 2022; **217**: 106696.
118. Niskanen JP, Tarvainen MP, Ranta-Aho PO, Karjalainen PA. Software for advanced HRV analysis. *Comput Methods Programs Biomed* 2004; **76**(1): 73-81.
119. Tarvainen MP, Niskanen J-P, Lipponen JA, Ranta-Aho PO, Karjalainen PA. Kubios HRV – Heart rate variability analysis software. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2014; **113**(1): 210-20.
120. Kubios Oy. Kubios HRV Scientific User's Guide. 2023.
<https://www.kubios.com/downloads/HRV-Scientific-Users-Guide.pdf> (accessed 4 July 2024)
121. Berntson GG, Thomas Bigger J, Eckberg DL, et al. Heart rate variability: Origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology* 1997; **34**(6): 623-48.
122. Quendler E, Trieb K, Nimmerichter A. Validation of automated detection of physical and mental stress during work in a Hühnermobil 225. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 2017; **24**(2): 329-31.
123. Lee S-G, Song YD, Lee EC. Experimental Verification of the Possibility of Reducing Photoplethysmography Measurement Time for Stress Index Calculation. *Sensors* 2023; **23**(12).
124. Rajendra Acharya U, Paul Joseph K, Kannathal N, Lim CM, Suri JS. Heart rate variability: a review. *Medical & Biological Engineering & Computing* 2006; **44**(12): 1031-51.
125. Kubios Oy. PNS and SNS Indexes in evaluating autonomic function. 2024.
<https://www.kubios.com/blog/hrv-ans-function/> (accessed 4 July 2024)
126. Nunan D, Sandercock GRH, Brodie DA. A Quantitative Systematic Review of Normal Values for Short-Term Heart Rate Variability in Healthy Adults. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 2010; **33**(11): 1407-17.
127. Rietz M, Schmidt-Persson J, Gillies Banke Rasmussen M, et al. Facilitating ambulatory heart rate variability analysis using accelerometry-based classifications of body position and self-reported sleep. *Physiological Measurement* 2024; **45**(5): 055016.
128. Awad G, Pohl R, Darius S, et al. Activation of the stress response among the cardiac surgical residents: comparison of teaching procedures and other (daily) medical activities. *Journal of Cardiothoracic Surgery* 2022; **17**(1).

129. Luger T, Bonsch R, Seibt R, Krämer B, Rieger MA, Steinhilber B. Intraoperative active and passive breaks during minimally invasive surgery influence upper extremity physical strain and physical stress response—A controlled, randomized cross-over, laboratory trial. *Surgical Endoscopy* 2023; **37**(8): 5975-88.
130. Crewther BT, Shetty K, Jarchi D, et al. Skill acquisition and stress adaptations following laparoscopic surgery training and detraining in novice surgeons. *Surgical Endoscopy* 2016; **30**(7): 2961-8.
131. Grantcharov PD, Boillat T, Elkabany S, Wac K, Rivas H. Acute mental stress and surgical performance. *BJS Open* 2019; **3**(1): 119-25.
132. Brunner S, Müller D, Krauss DT, et al. Cologne ergonomic measurement for robotic surgery (CEMRobSurg) using the Hugo™ RAS System. *Surgical Endoscopy* 2024.

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Human factors/Ergonomics. Dargestellt sind die einzelnen Subgruppen physische Faktoren, kognitive Faktoren, organisatorische Faktoren sowie Beispiele zugehöriger Themen. ⁴⁴	14
Abbildung 2 Versuchsaufbau der ERASE-Studie. Messinstrumente sind rot hervorgehoben. Links im Bild zu sehen ist die Roboterkonsole, an deren Kopfteil das Mikrofon der Lautstärkemessung befestigt ist. Auf der Armablage der Roboterkonsole sind Kontaktstreifen zur Erfassung der Nutzung der Armablage angebracht. Links der Roboterkonsole befindet sich der zur Kontaktmessung verwendete Arduino. Rechts im Bild befinden sich Kamera und Stativ zur intraoperativen Erfassung der Körperhaltung der Chirurg*innen an der Roboterkonsole. Nicht zu sehen sind der HRV-Sensor, den die Chirurg*innen am Körper tragen sowie die STAI-Fragebögen zur Stresserfassung.....	22
Abbildung 3 Brustgurt mit Sensor. Die Übertragung der Daten vom Sensor auf ein Endgerät erfolgt via Bluetooth.....	25
Abbildung 4 Auswertung der HRV-Daten mittels Kubios. Im oberen Bilddrittel ist der Abstand der aufeinanderfolgenden RR-Intervalle als Band über den Messzeitraum grafisch dargestellt. Die berechneten Stress Indices sowie deren zugrundeliegenden Parameter sind im mittleren Bilddrittel dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse der zeitbasierten und frequenzbasierten Parameter sind im unteren Teil der Abbildung zu sehen.	28
Abbildung 5 State-STAI Fragebogen mit zehn Items auf einer achtstufigen Likert-Skala.....	29
Abbildung 6 Trait-STAI Fragebogen mit zwanzig Items auf einer achtstufigen Likert-Skala .	30

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Gebräuchliche Kombinationsmöglichkeiten der Operationstechniken der Ösophagektomie.....	10
Tabelle 2	Charakteristika der Studienkohorte mit Augenmerk auf die Erfahrung der Proband*innen in Ösophaguschirurgie und robotischer Chirurgie.....	24
Tabelle 3	Berücksichtigte HRV-Parameter der Kubios-Analyse.....	26
Tabelle 4	Berücksichtigte STAI-Parameter, welche nach Auswertung der Fragebögen zur weiteren statistischen Analyse verwendet wurden.....	31
Tabelle 5	Definition der analysierten Operationsabschnitte der robotisch assistierten Operationen.....	32
Tabelle 6	Anzahl aller in die ERASE-Studie eingeschlossenen Operationen. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.....	36
Tabelle 7	Anzahl aller robotisch assistierten Operationsabschnitte, die in die statistische Auswertung der HRV-Messungen eingeschlossen wurden. Aufgeschlüsselt nach einzelnen Proband*innen.....	37
Tabelle 8	Anzahl der gepaarten robotisch assistierten Operationsabschnitte, die in die statistische Auswertung der HRV-Messungen eingeschlossen wurden. Aufgeschlüsselt nach einzelnen Proband*innen.....	38
Tabelle 9	Ergebnisse der HRV-Messungen. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der ausgewählten HRV-Parameter. Aufgeschlüsselt nach Operationsphasen und Proband*innen.....	40
Tabelle 10	Ausgewählte HRV-Parameter gesamte Operation versus Anastomosenphase RAMIE. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen. Alle Werte sind Mittelwerte \pm SD. Signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$) sind mit * hervorgehoben.....	43
Tabelle 11	Ausgewählte HRV-Parameter Präparationsphase versus Rekonstruktionsphase RAMIE. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen. Alle Werte sind Mittelwerte \pm SD. Signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$) sind mit * hervorgehoben.....	45
Tabelle 12	Anzahl der vollständig durchgeführten robotischen Operationen mit erfassten S-STAI Fragebögen. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.....	45
Tabelle 13	Ergebnisse der STAI-Erfassungen. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der ausgewählten STAI-Parameter. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.....	47
Tabelle 14	Ausgewählte STAI-Parameter im prä- und postoperativen Vergleich sowie im Vergleich mit ermittelten T-STAI Werten (Baseline) während der robotischen Operationen. Alle Werte sind Mittelwerte \pm SD. Signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$) sind mit * hervorgehoben....	48
Tabelle 15	Anzahl der vollständig durchgeführten offenen Operationen mit HRV-Messung. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.....	49

Tabelle 16 Ergebnisse der HRV-Messungen. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der ausgewählten HRV-Parameter von allen offenen Operationen.	50
Tabelle 17 Anzahl der vollständig durchgeführten offenen Operationen mit erfassten S-STAI Fragebögen. Aufgeschlüsselt nach Proband*innen.	50
Tabelle 18 Ergebnisse der STAI-Erfassungen der offenen Operationen. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der ausgewählten STAI-Parameter.	51
Tabelle 19 Ausgewählte STAI-Parameter im prä- und postoperativen Vergleich sowie im Vergleich mit ermittelten T-STAI Werten (Baseline) während der offenen Operationen. Alle Werte sind Mittelwerte \pm SD. Signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$) sind mit * hervorgehoben.	53
Tabelle 20 Ergebnisse der HRV-Messungen. Einander gegenübergestellt sind die Ergebnisse der robotischen Operationen und offenen Operationen. Alle Werte sind Mittelwerte \pm SD. Signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$) sind mit * hervorgehoben.	54
Tabelle 21 Subanalyse der HRV-Messungen Proband*in 3. Einander gegenübergestellt sind die Ergebnisse der robotischen Operationen und offenen Operationen. Alle Werte sind Mittelwerte \pm SD. Signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$) sind mit * hervorgehoben.	55
Tabelle 22 STAI-Ergebnisse im Vergleich robotisch versus offen. Der Gesamtübersicht folgt die Subanalyse von Proband*in 3. Alle Werte sind Mittelwerte \pm SD. Signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$) sind mit * hervorgehoben.	57