



Universität  
Bremen

# Systemrückmeldung bei gestenbasierter Interaktion im Operationssaal

Bachelor's Thesis

Nicole Steinke

Matrikelnummer: 6219157

Studiengang: Digitale Medien B.Sc.

Erster Prüfer: Prof. Dr. Gabriel Zachmann

Zweiter Prüfer: Dr. René Weller

Betreuer: Andre Mühlenbrock

Universität Bremen  
27. Dezember 2025

# Danksagung

Zunächst möchte ich mich herzlich bei meinem Betreuer Andre für die große Unterstützung während dieser Arbeit bedanken. Ein besonderer Dank gilt außerdem Verena, Merle und Tim für ihre Hilfe am Durchführungsort der Studie.

Außerdem möchte ich mich bei allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Studie bedanken. Besonders danke ich den Chirurgen, die sich trotz ihres stressigen Klinikalltags Zeit für die Studie genommen haben. Ohne ihre Mitwirkung wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie, Freunden und meinem Verlobten bedanken, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt und durch ihr Korrekturlesen zum Ergebnis dieser Arbeit beigetragen haben.

# Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Gestaltung von Systemrückmeldungen für berührungslose, gestengesteuerte Anwendungen im Operationssaal. Dazu wurde eine zweiteilige Studie entwickelt, um verschiedene Arten der Systemrückmeldung in einem realitätsnahen medizinischen Simulationsszenario zu untersuchen. Im Rahmen des SISOPS-Projekts wurde ein System entwickelt, welches die Benutzeroberfläche direkt auf ein Operationstuch projiziert und zur Durchführung der Studie genutzt wurde.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Endnutzer aufgrund der hohen Lärmbelastung im Operationssaal eine Kombination aus visueller und haptischer Rückmeldung gegenüber auditiven Signalen bevorzugen würden. Daraus lässt sich ableiten, dass haptische Signale als Ersatz für den fehlenden Tastsinn bei berührungslosen Interaktionen genutzt werden könnten, um die kognitive Belastung der Chirurgen zu verringern und das subjektive Sicherheitsgefühl für eine erfolgreiche berührungslose Eingabe zu erhöhen.

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                             |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                           | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .                                                        | 1         |
| 1.2      | Relevanz . . . . .                                                          | 1         |
| 1.3      | Zielsetzung . . . . .                                                       | 2         |
| 1.4      | Methodik und Struktur . . . . .                                             | 2         |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen und Forschungsstand</b>                                       | <b>3</b>  |
| 2.1      | User Experience . . . . .                                                   | 3         |
| 2.1.1    | Grundlagen und Konzept . . . . .                                            | 3         |
| 2.1.2    | Usability, Utility und Ästhetik . . . . .                                   | 3         |
| 2.1.3    | Designprozess und Evaluierungsmethoden . . . . .                            | 4         |
| 2.1.4    | Psychologische Modelle . . . . .                                            | 5         |
| 2.1.5    | Geschäftlicher Mehrwert und Relevanz der Arbeit . . . . .                   | 5         |
| 2.2      | Systemrückmeldung . . . . .                                                 | 5         |
| 2.2.1    | Definition und psychologische Bedeutung . . . . .                           | 5         |
| 2.2.2    | Qualitätskriterien und Fehlerprävention . . . . .                           | 6         |
| 2.2.3    | Besonderheiten und Multimodalität bei gestenbasierter Interaktion . . . . . | 7         |
| 2.3      | Systemrückmeldung bei berührungslosen Interaktionen . . . . .               | 8         |
| 2.3.1    | Herausforderung fehlender Haptik und Grenzen visuellen Feedbacks . . . . .  | 8         |
| 2.3.2    | Auditive Rückmeldung und kognitive Entlastung . . . . .                     | 9         |
| 2.3.3    | Haptisches Feedback: Kontakthaptik und Mid-Air-Haptik . . . . .             | 9         |
| 2.3.4    | Multimodale Ansätze und Leistungsfähigkeit . . . . .                        | 10        |
| 2.3.5    | Einfluss von Verzögerungen und sensorischen Konflikten . . . . .            | 11        |
| 2.4      | Operationsaal als Umgebung . . . . .                                        | 11        |
| 2.4.1    | Kognitive Belastung . . . . .                                               | 11        |
| 2.4.2    | Lärm . . . . .                                                              | 12        |
| 2.4.3    | Sterilität . . . . .                                                        | 13        |
| 2.4.4    | Lichtverhältnisse und die Konsequenzen manueller Interaktion . . . . .      | 13        |
| <b>3</b> | <b>Studienplanung und Design</b>                                            | <b>16</b> |
| 3.1      | Studienumgebung und technischer Aufbau . . . . .                            | 16        |
| 3.2      | Implementierung der Gestensteuerung . . . . .                               | 17        |
| 3.3      | Hypothesen . . . . .                                                        | 17        |
| 3.4      | Studiendesign Teil 1: Nicht-Chirurgen . . . . .                             | 19        |
| 3.5      | Aufgabenstellung und Ablauf . . . . .                                       | 20        |
| 3.6      | Datenerhebung und Fehlerinduktion . . . . .                                 | 21        |

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| 3.7 Studiendesign Teil 2: Chirurgen . . . . .         | 22        |
| <b>4 Evaluation und Ergebnisse</b>                    | <b>23</b> |
| 4.1 Qualitative Auswertung . . . . .                  | 29        |
| 4.2 Auswertung der Präferenz . . . . .                | 30        |
| 4.3 Weitere Auswertung . . . . .                      | 33        |
| <b>5 Diskussion</b>                                   | <b>35</b> |
| 5.1 Die Notwendigkeit von Feedback . . . . .          | 35        |
| 5.2 Multimodalität und Effizienz . . . . .            | 35        |
| 5.3 Haptik im OP . . . . .                            | 36        |
| 5.4 Herausforderung des Auditiven Feedbacks . . . . . | 36        |
| 5.5 Limitationen der Studie . . . . .                 | 36        |
| <b>6 Fazit und Ausblick</b>                           | <b>38</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                           | <b>39</b> |
| <b>Eigenständigkeitserklärung</b>                     | <b>44</b> |

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Im Rahmen des SISOPS-Projekt soll ein gestengesteuertes System für den Operationssaal entwickelt werden, welches auf ein Operationstuch projiziert wird. Ziel des Projekts ist es die unmittelbare Nähe zur OP-Wunde zu gewährleisten, sodass der Blick des Chirurgen während der Operation nicht zu weit von der OP-Wunde abgewendet werden muss, um die dargestellten Informationen abzulesen.

Das Bedienen eines Systems, welches physischen Kontakt erfordert, stellt ein Problem für die Sterilität im Operationssaal dar. Zu den alternativen Eingabemöglichkeiten zählen berührungslose Interaktionen. Dazu zählen beispielsweise Sprach- [1], Eye-Tracking- oder Gesteninteraktion [2]. Für das SISOPS-Projekt wird die Gestensteuerung genutzt, bei der durch die Steuerung mittels Gesten, die Sterilität der bedienenden Person eingehalten wird. Chirurgen sind dadurch nicht durch die Bedienung des Systems durch eine dritte Person angewiesen oder riskieren die zeitaufwendige, erneute chirurgische Händedesinfektion und erneutes Anlegen von Kitteln und Handschuhen [3].

Trotz des Vorteils der kontaktlosen Interaktion für den Operationssaal, stellt sich die Frage der Akzeptanz eines solchen Systems in realer Umgebung. Die Akzeptanz hängt dabei von mehreren Faktoren der Benutzerfreundlichkeit ab. Ein Faktor stellt dabei das Feedback eines Systems dar. Unter Feedback versteht man die Rückmeldung eines Systems auf die Interaktion des Nutzers.

Während Interaktionen mit physischen Eingabegeräten, taktils Feedback in Form von Berührung mit dem Gerät gewährleisten, entfällt bei berührungslosen Interaktionen der Tastsinn. Die Eingabe durch Tastatur oder Maus nutzt beispielsweise die taktile Rückmeldung durch Druck, oftmals gepaart durch einen Klick-Ton, um dem Benutzer zu signalisieren, dass seine Eingabe getätigt wurde. Bei berührungslosen Interaktionen hingegen, entfällt die taktile Rückmeldung zur Bestätigung der Eingabe, wodurch der Benutzer nicht wissen kann, ob seine Eingabe registriert wurde.

## 1.2 Relevanz

Für eine gelungene Benutzerfreundlichkeit ist es essentiell dem Benutzer das Gefühl der Kontrolle zu gewähren. Diese Kontrolle wird durch die regelmäßige Rückmeldung des Systems an den Nutzer gegeben [4, 5]. Aufgrund der voranschreitenden Entwicklung von Gestensteuerung, existieren bereits Studien [1, 2, 6] zu der Effizienz mehrerer Arten der Systemrückmeldung.

So wurden Studien für die Nutzung visuellen und auditiven Feedbacks verglichen. Ebenfalls wurden Studien mit dem Vergleich visueller und haptischer Systemrückmeldung durchgeführt [4, 6, 7, 8, 9]. Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass die Nutzung auditiven oder haptischen Feedbacks zusammen mit visuellem Feedback eine erhöhte Effizienz in Form von schnellerer Reaktionszeit zeigt. Eine Kombination der drei Feedbackarten visuell, auditiv und haptisch zeigt keinen signifikanten Vorteil der Effizienz bei Betrachtung der Zeit. Zur Auswertung der Studien wurden weitgehend nur die Zeit als Metrik genutzt. Die Berücksichtigung persönlicher Eindrücke der Probanden wie Anstrengung, Frustration oder mentale Belastung während dieser Durchführungen wurden nicht genauer hinterfragt. Die Datensammlung basiert allein auf der Zeitmessung.

Ein gelungenes System mit guter Benutzerfreundlichkeit soll sich jedoch nicht nur auf die Effizienz in Form von Zeit fokussieren, sondern auch andere Aspekte einer guten Benutzerfreundlichkeit befolgen. Vor allem bei der Nutzung im Operationssaal, wo die Anstrengung des Benutzers durch das Durchführen einer Operation sehr hoch ist, sollte sich das System nicht nur auf die Effizienz fokussieren und dabei eine potentiell erhöhte kognitive Belastung oder Anstrengung in Kauf nehmen.

Ebenso wurden vorherige Studien in einer kontrollierten Umgebung durchgeführt, welche nicht die Merkmale eines Operationssaals aufweisen. Aspekte wie Geräuschkulisse, Lichtverhältnisse und die mentale Vorbelastung durch die durchgeführte Operation wurden dabei nicht in den Studien untersucht. Dabei können verschiedene Umgebungsfaktoren einen Einfluss auf die Eignung verschiedener Arten der Systemrückmeldung haben.

### **1.3 Zielsetzung**

Viele Paper stellen die Gestensteuerung als geeignete Interaktionsart für den Operationssaal dar. Das Thema der Eignung von verschiedenen Feedbackarten bei der Gestensteuerung speziell für die Umgestaltung des Operationssaals wird jedoch in keinem wissenschaftlichen Paper genauer untersucht. Die Arbeit setzt sich mit den verschiedenen Feedbackarten auseinander und untersucht diese für eine mögliche Nutzung während Operationen. Die Durchführung einer Studie, bei welcher die Probanden die Gestensteuerung unter verschiedenen Feedbackarten testen, soll Aufschluss über die Tauglichkeit in der Praxis zeigen. Ebenfalls sollen Chirurgen, welche das System am Ende nutzen werden, ihre Einblicke zu den verschiedenen Arten der Systemrückmeldung teilen.

### **1.4 Methodik und Struktur**

Der Aufbau der Arbeit sieht zunächst die Prüfung des Forschungsstands vor. Dazu gehören die Untersuchung der Literatur zum Operationssaal als Umgebung, sowie die Erkenntnisse zu verschiedenen Systemrückmeldungen bei der gestenbasierten Interaktion. Den Eigenanteil der Arbeit stellt eine zweiteilige Studie dar. Dazu gehören die Vorstellung des Studiendesigns sowie die Auswertung und der Vergleich mit der bisherigen Literatur.

## 2. Grundlagen und Forschungsstand

### 2.1 User Experience

Ein fundamentales Konzept im Bereich des Designs von Mensch-Computer-Interaktionen (Human-Computer-Interaction HCI) stellt das Benutzererlebnis, auch User Experience (UX) genannt, dar. Der Begriff User Experience steht für das Gesamterlebnis, welches der Benutzer durch die Verwendung eines Produkts, Systems oder einer Dienstleistung hat [10].

#### 2.1.1 Grundlagen und Konzept

Experience steht für ein Erlebnis und beinhaltet die Wahrnehmungen, Gefühle, Gedanken und Bewertungen, die der Nutzer während, vor und nach der Interaktion hat. Die UX beschränkt sich deshalb nicht nur auf den Zeitpunkt der Nutzung des Produkts, Systems oder der Dienstleistung, sondern auch auf die Erwartung und Reflexion. Schon vor der Nutzung nimmt der Nutzer eine Bewertung vor [11]. Auch das Ende der Nutzung darf nicht mit dem Ende des Erlebnisses gleichgestellt werden. Ob sich die Erwartungshaltung erfüllt hat, steht erst nach Beendigung der Nutzung fest. Unmittelbar nach der Nutzung wird die gesammelte Erfahrung in der Erinnerung verarbeitet, was sogar länger als die eigentliche Nutzung andauern kann. Ob der Nutzer das Produkt, die Software oder das System weiterempfiehlt oder in Zukunft nutzt, hängt von der Erinnerung ab, welche sich gebildet hat. Die Qualität der Erinnerung stellt somit einen ausschlaggebenden Teil für eine langfristige Nutzung dar [10]. Zwei Nutzer können dasselbe Produkt sehr unterschiedlich erleben. UX ist subjektiv und kann je nach Vorerfahrung, Fähigkeiten, Erwartungen und dem emotionalen Zustand des Nutzers unterschiedliche Urteile hervorbringen.

#### 2.1.2 Usability, Utility und Ästhetik

Ein weiterer wichtiger Begriff im Zusammenhang der User Experience ist die Gebrauchstauglichkeit, im Englischen auch als Usability bezeichnet. Usability bedeutet, wie einfach und effizient der Nutzer das Ziel mithilfe des Produkts, Systems oder der Dienstleistung erreichen kann. Dazu zählt unter anderem, wie verständlich oder intuitiv ein Produkt oder System funktioniert beziehungsweise zu bedienen ist [12]. Aus diesem Grund zählen die Entdeckbarkeit (Discoverability) und das Verständnis (Understanding) zu wichtigen Merkmalen der Usability. Mit der Entdeckbarkeit ist die Sichtbarkeit der Interaktionsmöglichkeiten des Produkts oder Systems gemeint, sprich wie klar der Nutzer erkennen kann, welche Aktionen möglich sind und wo oder wie diese ausgeführt werden können. Verständnis hingegen bezieht sich auf die Klarheit der Funktion eines Systems. Dazu zählt, was ein Produkt oder System allgemein erbringt, wie es konkret verwendet werden kann und was die Steuerelemente, wie die Einstellungen, bedeuten und tun [10].

Die Nützlichkeit (Utility) bedeutet, dass ein Produkt, System oder eine Dienstleistung ein reales Bedürfnis erfüllen muss [13]. Neben den Funktionalitäten des Produkts, Systems oder der Dienstleistung, besteht die User Experience auch aus Eindrücken wie Ästhetik oder Emotionen wie Vergnügen, Stolz und Freude. Negative Emotionen wie Frustration und Verwirrung können ebenfalls einen starken Einfluss auf die UX haben. Psychologische Faktoren können somit Usability-Probleme überdecken oder verstärken [10]. Die Ästhetik hingegen, damit sind Erscheinungsbild, Material, Klang oder Stil gemeint, lösen eine unbewusste Reaktion beim Nutzer aus, welche sein subjektives Urteil prägt [14].

Abgesehen von der subjektiven Wahrnehmung der UX durch unterschiedliche Personen, hat auch der Kontext des Einsatzes des Produkts oder Systems einen Einfluss auf dessen Erfolg. Faktoren wie Umgebung, soziale und ökonomische Bedingungen sowie technische Voraussetzungen fließen in die Erfahrung ein. Eine Analyse des Nutzungskontexts sowie die Berücksichtigung von Nutzungsfaktoren sind für die Gestaltung von UX aus diesem Grund von Vorteil. Sie sichert den Erfolg eines Designs für den berücksichtigten Alltagskontext [15, 16].

### **2.1.3 Designprozess und Evaluierungsmethoden**

UX steht im Grunde für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess (Human-Centered Design HCD). Das Verstehen der Menschen, ihrer Aufgaben, Ziele und des Alltags- und Nutzungskontexts ist für die Gestaltung einer guten UX entscheidend. Durch das Entwickeln von Prototypen und dem Testen mit realen Nutzern, können Produkte oder Systeme iterativ entwickelt und das Erlebnis schrittweise verbessert werden. Zu dem HCD zählen unter anderem Methoden wie Beobachtungen, Interviews, Usability-Tests, Prototyping und ethnografische Feldforschungen. Durch eine ausgiebige Recherche lassen sich die Bedürfnisse der zukünftigen Nutzer identifizieren, welches die Utility des Produkts durch gezielte Identifizierung des Problems, auch Root-Cause-Analysis genannt, verbessern kann [15].

Die Methoden zur Entwicklung der UX basieren auf Evaluation und Messungen. Dies bedeutet, dass sie grundsätzlich in subjektive und objektive Ansätze unterteilt werden können. Zu den subjektiven Methoden zählen Interviews, Fragebögen oder Präferenzen, während Beobachtungen, Leistungskennzahlen und physiologische Messungen zu den objektiven Ansätzen zählen. Beide Ansätze liefern unterschiedliche Vor- und Nachteile. Während subjektive Skalen wie Rankings eine direkte Rückmeldung zur Zufriedenheit und Präferenz liefern, können sie anfällig für eine Voreingenommenheit oder einen Erinnerungseffekte sein. Objektive Messungen wie Completion-Time oder physiologischer Signale (z. B. EEG-basierte Metriken für Cognitive Load, Engagement, Attraction und Memorization) liefern einen Einblick in die kognitiven und affektiven Zustände und Effizienz [14], die dem Nutzer nicht bewusst sein können.

### 2.1.4 Psychologische Modelle

Die UX-Forschung geht davon aus, dass menschliches Versagen auf schlechtes Design zurückgeführt werden kann. Bei Fehlern kann zwischen Ausführungsfehlern, auch Slips genannt, und Entscheidungsfehlern, als Mistake bezeichnet, unterschieden werden. Slips passieren trotz richtiger Intention durch beispielsweise Ähnlichkeit von Knöpfen, während Mistakes auf einem falschen mentalen Modell oder fehlendem Wissen basieren. Bei einem gelungenen UX-Design können Fehler durch Signifiers, sinnvolle Constraints, sichtbare Mappings, robustes Feedback, Reversibility (Undo) und sinnvolle Forcing-Functions (Verriegelungen) verhindert werden [10, 13].

Ein Gestaltungsfeld der UX ist das Emotionale Design. Norman, Namensgeber des Begriffs User Experience, unterscheidet dieses in drei Ebenen. Es wird unterschieden zwischen der viszeralen Ebene (spontaner erster Eindruck), der behavioralen Ebene (Funktionalität und Bedienfreude im Gebrauch) und der reflektiven Ebene (langfristige Reflexion, Stolz und Geschichte hinter dem Produkt). Durch das Zusammenwirken dieser Ebenen kann ein ansprechendes Aussehen beispielsweise anfängliche Frustration dämpfen. Zufriedenheit mit dem Produkt oder System entsteht jedoch erst, wenn die Usability und die reflektierende Ebene ebenfalls überzeugend sind [10, 12].

### 2.1.5 Geschäftlicher Mehrwert und Relevanz der Arbeit

Für Unternehmen kann UX einen Wettbewerbsvorteil liefern. Gute UX erhöht Engagement, Zufriedenheit und Loyalität, reduziert Abbruchraten und steigert Konversionsraten. Ein Problem, an welchen Unternehmen arbeiten müssen, ist das schleichende Hinzufügen von Funktionen, durch welche Komplexität und Verwirrung gefördert werden. Existierende, erfolgreiche Produkte und Systeme sollten nicht nur erweitert, sondern von Grund auf für den Nutzer und den Nutzungskontext überarbeitet und weiterentwickelt werden [16, 17].

Für diese Arbeit bedeutet dies, dass im Rahmen des SISOPS-Projekts eine Untersuchung der UX stattfinden soll. Der Fokus wird dabei in der Kommunikation zwischen Nutzern und dem System liegen. Durch Evaluierungen und Messungen, sowie der Analyse des Nutzungskontexts und der Befragung der zukünftigen Nutzer, soll ein Einblick in die optimale Gestaltung der UX für den Aspekt der Systemrückmeldung geschaffen werden.

## 2.2 Systemrückmeldung

### 2.2.1 Definition und psychologische Bedeutung

Mit dem Begriff Systemrückmeldung, im Englischen auch Feedback genannt, ist die Reaktion eines Systems auf eine Nutzereingabe gemeint [18]. Im Rahmen der UX lässt sich Feedback als eines der fünf psychologischen Konzepte für die Auffindbarkeit eines Systems einordnen [10].

Eine Systemrückmeldung zeigt dem Nutzer die Ergebnisse seiner Eingabe

und den aktuellen Zustand des Systems an und kann auch als ein Dialog bei HCI bezeichnet werden. Während bei der Interaktion zwischen Menschen, Gesten oder kurze Laute in einem Gespräch verdeutlichen, dass eine Botschaft gehört und verstanden wurde, gibt Systemrückmeldung Hinweise, ob eine Benutzereingabe registriert, bearbeitet oder abgeschlossen wurde. Feedback vermittelt dem Benutzer nicht nur einen Nachweis des Abschlusses, sondern dient auch der Erfüllung der Kommunikationserwartungen des Benutzers. Auch ohne Benutzeraktion, kann Systemrückmeldung den Zustand des Systems anzeigen [18].

Zeigt ein System dem Benutzer nicht an, was passiert ist, welche Aktion ausgeführt werden soll oder was als nächstes getan werden soll, so hat dieses System eine große Kluft der Bewertung (Gulf of Evaluation). Klare Rückmeldungen wie Bestätigungsnachrichten, Töne oder Farben helfen die Kluft der Bewertung zu schließen [10].

Ohne die Informationen kann bei dem Nutzer ein Gefühl des Kontrollverlusts entstehen [5]. Fehlt die Systemrückmeldung, so kann es zu wiederholten Eingaben durch den Nutzer kommen, da dieser danach strebt den Zustand des Systems herauszufinden, welches zu überschüssigen Mehraufwand beziehungsweise Mehrfacheingabe führt.

### **2.2.2 Qualitätskriterien und Fehlerprävention**

Rückmeldung sollte ebenfalls unmittelbar erfolgen, da kürzeste Verzögerungen von Zehntelsekunden beunruhigend sein können und das Aufgeben des Benutzers begünstigen. Durch längere Completion-Time kann Frustration oder Verärgerung entstehen, welche sich negativ auf die UX auswirken können. Trotz des Vorteils und der positiven Auswirkung der Systemrückmeldung auf die UX, hat Feedback nicht in allen Fällen eine bereichernde Funktion. Schlechtes Feedback kann daher schlimmer sein als gar kein Feedback. Es kann ablenken, überfordernd und nicht informativ sein, was einen irritierenden Effekt auf den Nutzer hat.

Gutes Feedback hingegen erzielt den gewünschten Effekt ohne zur Störquelle zu werden. Geplante, priorisierte und unaufdringliche Rückmeldung wird als gutes Feedback eingestuft. Dies bedeutet, dass unwichtigere Informationen subtil kommuniziert werden, während wichtige Informationen die Aufmerksamkeit des Benutzers stärker hervorrufen, ohne überfordernd zu sein. Alle Aktionen werden zeitnah bestätigt, wobei das Ausmaß der Bestätigung (Töne, Meldungen, erforderliche Bestätigungen) sich unterscheiden kann [10].

Feedback hilft dem Benutzer Fehler zu vermeiden und zu tolerieren. Dies bedeutet, dass Feedback den Nutzer nicht nur über den Erfolg seiner Eingabe informiert, sondern auch die Möglichkeit bietet, irrtümliche Eingaben, seien es Slips oder Mistakes, frühzeitig zu erkennen und zu ändern. Ein Beispiel für ein solches Feedback kann das unwiderrufliche Löschen einer Datei sein. Durch eine klare, priorisierte Meldung, Reversibility-Funktionen wie Undo, Plausibilitätsprüfungen

(Sensibility Checks) und bestätigte Dialoge wird der Nutzer auf sein Handeln verwiesen und mögliche Slips oder Mistakes werden direkt korrigiert oder komplett vermieden. Die Fehlertoleranz wird erhöht, da die Angst, einen unwiderruflichen Fehler zu begehen, durch eine doppelte Bestätigung des Nutzers gesenkt wird [10]. Vor allem das Undo-Kommando zählt als ein wichtiges Werkzeug, um die Auswirkung von Fehlern zu minimieren. Auch aus Sicht des sicherheitskritischen Kontextes macht Feedback einen Teil der Schutzschichten aus und sorgt dafür, dass einzelne Fehler nicht unmittelbar zu folgenschweren Ergebnissen führen können [19].

### **2.2.3 Besonderheiten und Multimodalität bei gestenbasierter Interaktion**

Die Art der Interaktion zwischen dem Benutzer und dem System hat einen starken Einfluss auf die Anforderungen des Feedbacks. Während Tasteneingaben meist als eindeutig gewertet werden, stehen gestenbasierte Systeme vor der Abwägung zwischen Flexibilität und Genauigkeit. Dies bedeutet, dass eine offene Gestaltung der Gestenerkennung eine größere Gefahr der Fehlklassifikation hat, während eine restriktive Gestaltung die Interaktion durch Regelsätze limitiert. Dabei beeinflusst die Zuverlässigkeit der Sensoren maßgeblich die Vorhersagbarkeit der Aktion [20].

Ein zentraler Bewertungsfaktor dieser Interaktionen ist die Wahrnehmung der eigenen Handlungsmacht, der sogenannte Sense of Agency (SoA). Sie wird als die Erfahrung der Kontrolle definiert. Der SoA leidet, wenn Ergebnisse von der Intention des Nutzers abweichen oder wenn die Zuverlässigkeit der Gestenerkennung gering ist. Auch Latenz (latency), sprich die zeitliche Verzögerung zwischen der ausgeführten Aktion und der Reaktion des Systems, kann den SoA stören [5].

Multimodale Rückmeldung kann bei gestenbasierter Interaktion helfen die Sensorik zu kompensieren. Da der Tastsinn, wie beispielsweise bei der Eingabe mit Tastatur und Maus wegfällt, kann eine Kombination aus visuellen, auditiven oder haptischen Signalen für die Bestätigung der Eingabe genutzt werden. Ergänzende Signifier wie visuelle Markierungen oder akustische Bestätigungen, erhöhen die Discoverability und minimieren Fehlhandlungen. Das Fehlen solcher Signale führt dazu, dass die Auffindbarkeit von Funktionen erschwert wird [10].

Das Verwenden verschiedener Signale für die Gestaltung der Systemrückmeldung kann unterschiedliche Wirkungen haben. Je nach Art der Aufgabe, erwartete Dauer und Umgebungsbedingungen, können sich unterschiedliche Feedbackarten besser eignen. Beispielsweise eignen sich visuelle Hinweise gut für Informationsdichte und Detailrückmeldungen, während akustische Signale eine sofortige Bestätigung vermitteln. Haptische Impulse hingegen eignen sich für Situationen, in denen die visuellen oder auditiven Kanäle überlastet sind [20]. Ebenso können andere Gestaltungsaspekte der UX beziehungsweise der Systemrückmeldung bei der Koordination helfen. Bei längeren Prozessen können Fortschrittsanzeigen bevorzugt werden, während bei kurzen Interaktionen unmittelbare, subtile Signale eine angemessene Rückmeldung darstellen. Die Priorisierung von Feedback sollte ebenfalls einen wichtigen Aspekt bei der Gestaltung einnehmen. Durch einen priorisierten Informationsfluss können störende Unterbrechungen minimiert werden [10].

Gerade Interaktionen wie die Gestensteuerung verlassen sich auf Systemrückmeldungen. Diese ist ausschlaggebend dafür, ob die Interaktion als kontrollierbar und verlässlich erlebt wird. Durch effektives Feedback, welches Timing, Modalität, Priorisierung und Kontext berücksichtigt, wird nicht nur die Bedienbarkeit verbessert, sondern auch ein langfristiges Vertrauen der Nutzer in das System aufgebaut. Diese Arbeit wird sich auf die Untersuchung der Interaktion zwischen Nutzer und System bei der Gestensteuerung fokussieren. Dabei werden vor allem die verschiedenen Feedbackarten untereinander verglichen und in Kombination untersucht.

## **2.3 Systemrückmeldung bei berührungslosen Interaktionen**

Teil der Forschung der HCI stellt der Vergleich verschiedener Feedbackarten in der Gestensteuerung und anderen berührungslosen Interaktionen dar. In den letzten Jahren wurden vermehrt Studien zu der Untersuchung visueller, auditiver und haptischer Rückmeldungen, multimodaler Systemrückmeldungen sowie dem Fehlen jeglichen Feedbacks durchgeführt, um deren Unterschiede und Auswirkungen auf die UX herauszufinden. Die Ergebnisse der Studien zeigen Gemeinsamkeiten, jedoch auch Unterschiede, welche auf die unterschiedlichen Methoden und Bedingungen zurückzuführen sind.

### **2.3.1 Herausforderung fehlender Haptik und Grenzen visuellen Feedbacks**

Der Ausgangspunkt für die Forschung liegt in der Herausforderung der berührungslosen Gestensteuerung, dass, anders als bei physischer Interaktion mit traditionellen Eingabegeräten wie Mäuse Tastaturen und Touchscreens, der taktile Kontakt fehlt, welcher oft die Mühelosigkeit von Aktionen unterstützt [2]. Durch das Fehlen von physischen Widerstand wie bei Interaktionen mit Berührung wird die Gestensteuerung eine bewusste, anspruchsvolle Aktion. Der Nutzer muss sich bei der Eingabe mehr konzentrieren, was zu einer erhöhten kognitiven Belastung führen kann [5].

Systeme, die mit berührungsloser Interaktion arbeiten und nur visuelle Rückmeldung nutzen, zeigen zwar die Systeminformationen, scheitern jedoch eine sekundäre, taktile Rückmeldung zu bieten, welche die Interaktion erleichtern und effektiver machen würde. In einer Studie zu Mid-Air-Auswahlgesten (Push, Tap, Dwell, Pinch) fanden Dube et al. (2022) (N=12) heraus, dass visuelles Feedback allein nicht effektiv genug war, um die Interaktion zu erleichtern. Besonders bei komplexeren Gesten führte die fehlende taktile Rückmeldung zu einer hohen Fehlerrate [7]. Visuelle Anzeigen ohne sensorische Modalitäten beeinträchtigen die Leistung und beeinflussen die Sense of Agency negativ, da eine schwächere Verbindung zwischen der Aktion des Nutzers und dem Ergebnis signalisiert wird als bei anderen Modalitäten. Cornelio Martinez et al. (2017) (N=12) stellten fest, dass rein visuelles Feedback im Vergleich zu auditivem oder haptischem Feedback das geringste Intentional Binding hervorrief. Intentional Binding bedeutet, dass die Zeit zwischen der eigenen Geste und der

Reaktion des Systems kürzer wahrgenommen wird, als sie eigentlich ist [6].

### 2.3.2 Auditive Rückmeldung und kognitive Entlastung

Auditives Feedback ist besonders wirksam für die temporale Kopplung, da auditive Signale wie ein „Beep“ schneller und eindeutiger wahrgenommen werden können als ein oft langsamer, länger anhaltender visueller Effekt. In Studie 1 von Cornelio Martinez et al. (2017) (N=12) erzeugte auditives Feedback zudem ein signifikant höheres Gefühl der Kontrolle (SoA) als visuelles Feedback [6].

Im medizinischen Kontext wird die Wichtigkeit auditiven Feedbacks bei Touchless-Interaktionen von Black et. al festgestellt. Black et al. (2018) (N=26) untersuchten in einem Operationssaal (OP) ein blickgesteuertes System zur Interaktion mit Monitoren unter sterilen Bedingungen. Dabei verglichen sie audiovisuelles Feedback mit rein visuellem Feedback für einfache Blickgesten (z. B. Videoanruf beenden) und kontinuierliche Steuerungen (Lichtdimmung). Die Ergebnisse zeigen, dass das audiovisuelle Feedback zu einer signifikanten Reduzierung der Arbeitsbelastung (NASA Raw TLX  $p=0.01$ ), höheren Nützlichkeit ( $p=0.01$ ), Zufriedenheit ( $p=0.01$ ) und Vertrauen ( $p=0.01$ ) führt. Für visuell ablenkende Situationen wie den OP bedeutet dies, dass die Hinzunahme des auditiven Kanals die Interaktion stabilisiert [2].

Ein zentraler Befund der Studien ist, dass auditives Feedback das Gefühl der Kontrolle (SoA) sowie die Leistungen steigern im Gegensatz zu rein visuellen Feedback. Dies ist essenziell für die Akzeptanz von berührungslosen Interfaces [6, 21, 1]. Ein ähnlicher Befund lässt sich bei der Untersuchung von haptischer Rückmeldung im Vergleich zu rein visuellen Feedback feststellen.

### 2.3.3 Haptisches Feedback: Kontakthaptik und Mid-Air-Haptik

Wenn von haptischem Feedback gesprochen wird, so lassen sich Kontakthaptik und Mid-Air-Haptik (MAH) unterscheiden. Der Unterschied dieser haptischen Rückmeldarten liegt in dem Kontakt zum Körper. Mit Kontakthaptik ist ein physisches Interface gemeint, welches unmittelbar an der Haut anliegt und lokal gebundene Rückmeldung in Form von Vibration geben kann wie beispielsweise Armbänder, Handschuhe oder Ringe. Mid-Air-Haptik hingegen erzeugt taktile Empfindungen ohne physischen Kontakt, beispielsweise durch fokussierte Ultraschallfelder oder gerichtete Luftdruckimpulse [4].

Unabhängig davon, ob es sich um Kontakthaptik oder Mid-Air-Haptik handelt, hat haptisches Feedback in zahlreichen Studien deutliche Vorteile gegenüber rein visuellem oder auditivem Feedback in Form von Steigerung der SoA. In der Fahr-Simulator-Studie von Evangelou et al. (2024) (N=30) erhöht MAH das implizite SoA beispielsweise signifikant stärker als Audio-Feedback und führte zu höherem Vertrauen. In einer Folgestudie (2025) wurde die erhöhte SoA im Vergleich zu visueller Rückmeldung eindeutig bestätigt [21, 4].

In der Studie von Cornelio Martinez et al. (2017) wurde zudem festgestellt, dass Kontakthaptik und Mid-Air-Haptik im direkten Vergleich keinen signifikanten Unterschied in ihrer SoA aufweisen. Das Intentional Binding hingegen ist bei der MAH stärker. Dies bedeutet, dass die Zeit zwischen der Aktion und der Rückmeldung als geringer eingestuft wird, was unbewusst zu einer Steigerung des Kontrollgefühls führt [6].

### 2.3.4 Multimodale Ansätze und Leistungsfähigkeit

Für die objektive Leistungsfähigkeit bieten multimodale Kombinationen, die mehrere sensorische Kanäle beanspruchen, signifikante Vorteile. In der Studie von Dube et al. (2022) (N=12) wurden vier verschiedene Gesteneingaben (Push, Tap, Dwell, Pinch) untersucht. Zu den Bedingungen zählten zudem nur grafische Rückmeldung, grafische und haptische Rückmeldung bei Eingabe der Geste und grafische und haptische Rückmeldung bei Hover und Select. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Leistungen bei der Kommunikation grafischen Feedbacks und Mid-Air-Haptik signifikant gesteigert wurde. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen, dass visuelle Rückmeldung nicht ausreicht, um eine berührungslose Interaktion effektiv zu gestalten. Für Gesten mit hoher räumlicher Komplexität wie Push, bei welchen Nutzer ohne Haptik nicht einschätzen konnten, wie weit der Finger bewegt werden musste, war die Ergänzung durch Haptik entscheidend, um die Leistung auf das Niveau schnellerer Gesten wie Tap anzuheben und Sicherheit in der Ausführung zu schaffen. Die haptisch unterstützten Bedingungen wurden subjektiv als schneller, genauer sowie physisch und kognitiv komfortabler wahrgenommen [7].

Eine weitere Studie für das Beispiel der Kombination visueller und haptischer Rückmeldung ist die HaptiGlow-Studie von Freemann et al. (2019) (N=20), bei welcher Mid-Air-Haptik in Kombination mit peripheren Lichtern zur Rückmeldung der Handplatzierung untersucht wurden. Die Kombination aus Haptik und Lichtern führte zur schnellsten und genauesten Handpositionierung, da Haptik die horizontale Position und die visuellen Signale die Höhenkorrektur unterstützen [8].

Der signifikante Vorteil von haptischem Feedback lässt sich nicht in jedem Kontext finden. In der Untersuchung von Remizova et al. (2023) mit einem großen Fogscreen (N=20) zeigte sich, dass audiovisuelles (AV) Feedback bei der Bedingung Tapping ausreichend sei. Das Hinzunehmen haptischen Feedback hatte keinen signifikanten Haupteffekt im Durchsatz oder in der Bewegungszeit. Dies deutet darauf hin, dass gut gestaltetes audiovisuelles Feedback in manchen Kontexten ausreichend ist und Haptik keine Auswirkung auf die Effizienz hat und als redundant zählt. Dennoch wurde die Dwell-basierte Bedingung mit der Hinzunahme von Haptik signifikant bevorzugt, wodurch Haptik unter bestimmten Bedingungen weiterhin einen subjektiven Mehrwert bieten kann [9].

Wenn jedoch ein trimodales Feedback verwendet wird, ist es essentiell, für die sensorische Kongruenz das haptische Signal mit den audiovisuellen Signalen abzustimmen, sodass ein einheitliches Aussehen, Klingen und Anfühlen entsteht [1].

### 2.3.5 Einfluss von Verzögerungen und sensorischen Konflikten

Ein Feld für den Einsatz von Gestensteuerung, welches im Zusammenhang mit verschiedenen Feedbackarten vermehrt untersucht wird, ist Virtual Reality (VR). Tzolov et al. (2025) (N=57) untersuchten in einer VR-Simulation (Feinmotorik) den Einfluss von verzögertem visuellem und haptischem Feedback sowie fehlenden haptischen Feedbacks. Es zeigte sich, dass eine visuelle Verzögerung (200 ms) die Leistung dramatisch verschlechterte, während die Latenz des haptischen Feedbacks keinen signifikanten Einfluss auf die objektive Leistung (Fehlerzeit) hatte. Besonders auffällig war, dass erfahrene Nutzer unter visueller Verzögerung paradoxerweise am besten abschnitten, wenn gar kein haptisches Feedback vorhanden war. Gleichzeitig verschlechterte die synchrone Bereitstellung von Echtzeit-Haptik in diesem sensorischen Konflikt-Setting ihre Leistung. Dies belegt, dass das Hinzufügen von Feedback im Gegensatz zu dessen Abwesenheit für Experten nachteilig sein kann, wenn es durch eine visuelle Latenz zu einem sensorischen Konflikt kommt. Die Autoren vermuten, dass Experten bei beeinträchtigtem visuellem Input andere, widersprüchliche Inputs (wie das haptische Feedback) dynamisch unterdrücken. Für die Gestaltung von Feedback bedeutet dies, dass eine reibungslose Umsetzung von Feedbackkombinationen wichtig ist, um ein insgesamt positives Benutzererlebnis zu gestalten [22].

Der optimale Einsatz von Feedback erfordert eine kontextsensitive Abwägung [6]. Haptik (unabhängig von der Form) und auditive Signale sind essenziell zur Stärkung des SoA und des Vertrauens, während Multimodalität räumliche Präzision sichert. Visuelle Verzögerung ist der kritischste Leistungshemmer, während reines visuelles Feedback allein oft als unzureichend für effektive und befriedigende Touchless-Interaktion gilt [2, 7, 22].

## 2.4 Operationsaal als Umgebung

Der Operationssaal ist ein anspruchsvolles Arbeitsumfeld, in welchem Chirurgen und das OP-Team technische und nicht-technische Fähigkeiten, meist unter hohem Druck und über längere Zeiträume, durchführen müssen [23]. Dabei ist für die Patientensicherheit eine konzentrierte Leistung in dieser Umgebung essentiell [24]. Jedoch wird der Operationssaal durch kritische Faktoren belastet, welche das Risiko für Fehler und Ermüdung steigern [3]. Zu diesen Faktoren zählen hohe Lärmpegel, intensive kognitive Anstrengung, strikte Sterilitätsanforderungen und die damit zusammenhängende Notwendigkeit, trotz Einhaltung der Sterilität, mit Systemen interagieren zu können.

### 2.4.1 Kognitive Belastung

Chirurgische Tätigkeiten erfordern eine hohe kognitive Beanspruchung, welche auf den hohen Druck, dem simultanen Treffen von klinischen Entscheidungen und der Anwendung technischer und nicht-technischer Fähigkeiten zurückzuführen ist [23]. Durch die zunehmende Verbreitung neuer innovativer und komplexer Verfahren, welche neue Technologien wie minimalinvasive Chirurgie (MIS) mit sich bringen, wird die kognitive Belastung des Personals weiter erhöht. In Experimenten wurde

bei der Nachahmung der minimalinvasiven Chirurgie im Vergleich mit der offenen Chirurgie eine verringerte Effizienz bei der Aufgabenerfüllung und eine erhöhte mentale Arbeitsbelastung gemessen [3].

Unter kognitiver Belastung (Cognitive Load, CL) versteht sich die Menge an begrenzten Arbeitsgedächtnisressourcen, die zur Bewältigung der kognitiven Anforderungen einer Aufgabe eingesetzt wird. Eine Überbeanspruchung, sprich kognitive Überbelastung, führt zu einer Verschlechterung der Leistung, einem beeinträchtigten Urteilsvermögen und demzufolge suboptimaler Entscheidungsfindung [25]. In der Literatur wird kognitive Belastung in drei Komponenten Intrinsic Load (ICL), Extraneous Load (ECL) und Germane Load (GCL) unterteilt. Intrinsic Load bezieht sich dabei auf die Komplexität der Aufgabe, weshalb der ICL bei unerfahrenen Assistenzärzten meist höher ist als bei erfahrenen Chirurgen. Die Extraneous Load hingegen bezieht sich auf die externen Faktoren wie der Umgebung, welche nicht mit der Aufgabe zusammenhängen. Dies können Geräusche oder irrelevante Gespräche sein. Die Germane Load sind die kognitiven Ressourcen, die für den eigentlichen Lernprozess bereitgestellt werden. Interne Zustände wie Stress, Emotionen und Unsicherheit verstärken die gesamte CL zusätzlich [23].

Die Reduktion der kognitiven Belastung ist von großer Bedeutung, da Untersuchungen in den Top-Krankenhäusern der USA ergeben haben, dass fast 81,7% der intraoperativen Fehler auf die Überforderung der kognitiven Fähigkeiten der Chirurgen zurückzuführen sind [3].

### 2.4.2 Lärm

Seit längerer Zeit kann der Operationssaal nicht mehr als stille Umgebung bezeichnet werden, da der Lärmpegel die empfohlenen Grenzwerte konstant überschreitet. Dies hat einen negativen Einfluss auf die kognitive Leistung und die Kommunikation des OP-Teams. Laut einer Übersicht, welche 16 Studien berücksichtigt, liegt der Lärmpegel zwischen 51 dB und 79 dB [26]. Die maximalen Messungen der Intensität des Geräuschpegels liegen jedoch bei über 100 dB [27]. Um eine ruhige Arbeitsumgebung zu gewährleisten, empfiehlt die Weltgesundheitsorganisation (WHO) jedoch einen Grenzwert von 35 dB nicht zu überschreiten [28].

Die Lärmquellen im Operationssaal sind sowohl instrumentelle Geräusche als auch personalbedingt. Ausrüstungsbedingte Geräusche können bis zu 120 dB erreichen [29]. Darunter fallen das Fallenlassen von Objekten (maximal 93 dB), das Hämmern (etwa 77 dB), die Bewegung von Geräten und das Läuten von Alarmen (etwa 78 dB). Doch auch Personalaktivitäten und Konversationen tragen maßgeblich zum Lärm bei und können Pegel von bis zu 78 dB erreichen [27]. Dabei werden fallirrelevante und medizinisch irrelevante Gespräche als am stärksten ablenkender Lärm eingestuft.

Lärm erhöht zusätzlich die kognitive Belastung, worauf Fehler und längere Zeit zur Aufgabenerfüllung zurückzuführen sind. Neben der chirurgischen Leistung wird jedoch auch die medizinisch relevante Kommunikation gestört [26]. Lärm durch Gespräche trägt zum Extraneous Load bei [23]. Häufige Lärmgrenzüberschreitungen

von 70 dB sind zudem signifikant mit einer höheren Herzfrequenz der Teammitglieder verbunden. Die Herzfrequenz gilt dabei als physiologischer Indikator für erhöhte kognitive Belastung [29, 30].

Chronische Exposition gegenüber hohen Lärmpegeln kann beim OP-Personal zu lärmbedingtem Hörverlust führen. Dies wurde bei mindestens 50% des leitenden orthopädischen Personals in zwei Studien festgestellt [31]

### **2.4.3 Sterilität**

Der Operationssaal ist hochsteril, aseptisch und bietet nur für befugte Personen Zugang. Die strikte Einhaltung der Sterilitätsprotokolle ist für das Personal von höchster Wichtigkeit, da chirurgische Wundinfektionen (SSIs) bis zu 20% der gesamten im Krankenhaus erworbenen Infektionen ausmachen. Zu den Infektionsquellen zählen das OP-Personal, die OP-Umgebung und die in den sterilen Bereich eingebrachten Instrumente [32]. Zudem führen Fehler wie die manuelle Interaktion des Personals mit nicht-sterilen Elementen zu einem erhöhten Risiko für Kontamination [24].

Für die Infektionsprävention sind umfassende Protokolle erforderlich, einschließlich der korrekten Sterilisation von Instrumenten und der strikten Anwendung von Barriere-Techniken (Masken, Kappen, Handschuhe) [32]. Darüber hinaus können Planungsentscheidungen zur Infektionskontrolle beitragen. Indem beispielsweise Patienten mit infektiösen Krankheiten später am Tag geplant werden, wird das Kontaminationsrisiko für andere Bereiche beziehungsweise frühere Eingriffe minimiert [33].

Nicht nur der Zeitpunkt, sondern auch die Dauer der Operation tragen zum Risiko von SSIs bei. Die Verlängerung der Operationsdauer erhöht dementsprechend das Risiko von SSIs. Somit tragen die im Operationssaal herrschenden Stressoren (Lärm, kognitive Belastung), die zu Fehlern und verlängerter Operationszeit führen können, indirekt zum Infektionsrisiko des Patienten bei [26].

### **2.4.4 Lichtverhältnisse und die Konsequenzen manueller Interaktion**

Für die präzise Arbeit von Chirurgen sowie die Patientensicherheit ist eine optimale Beleuchtung von hoher Bedeutung [24]. Ein Merkmal des Operationssaals ist jedoch das wechselnde Belichtungsniveau, welches von diffusen Lichtern, fokussierten Lichtern bis hin zu Stirnlampen reichen kann. Das unterschiedliche Beleuchtungslevel beziehungsweise die unterschiedlichen Beleuchtungsquellen können Schatten und Blendungen verursachen. Das Wechseln des Blicks vom Operationsfeld zu den Datenmonitoren kann dabei eine kontinuierliche Anpassung der Augen an die wechselnden Beleuchtungsverhältnisse mit sich ziehen [34].

Während der Operation kann es dazu kommen, dass Bilddaten, seien diese 2D oder 3D, abgerufen werden müssen [35]. Die zurzeit am häufigsten verwendete Methode zum Aufruf dieser Daten ist das klassische Desktop-Computer-Setup. Das

Problem, welches bei dieser Interaktion mit Maus und Tastatur auftritt, ist die Fehlende Einhaltung der Sterilität. Durch die Verwendung dieser Geräte kommt es zum Verlust der Sterilität des Chirurgen oder des Teammitglieds [34]. Die betroffene Person muss sich in diesem Fall erneut sterilisieren lassen, was jedoch den Operationsablauf stört und Zeit in Anspruch nimmt. Um dem zu entgehen kann die Interaktion mit der Maus oder der Tastatur von einem Assistenten übernommen werden. Dabei wird die Anweisung von Chirurgen gegeben. Dies kann jedoch dazu führen, dass der Assistent nicht das Expertenwissen des Chirurgen hat und die Interaktion nicht so schnell oder genau sein kann, wie bei der direkten Bedienung durch den Chirurgen.

Neben dem traditionellen nicht-sterilen Desktop-Computer-Setup stellen auch moderne Touchscreens und mobile Geräte ein erhebliches Kontaminationsrisiko dar. So weisen Touchscreens meist mikrobielle Kontaminationen auf und können als Überträger, in oder außerhalb von Gesundheitseinrichtungen, fungieren. Verschiedene Studien gehen dabei von Kontaminationsraten (Bakterien, potenzielle Viren oder Pilze) von 90% oder höher aus. Die bei diesen Untersuchungen am häufigsten gefundenen Mikroorganismen sind Staphylokokken, Bazillen, Mikrokokken, Enterokokken, Pseudomonaden und E. coli [36]. Bei Mitarbeitern im Gesundheitswesen fand eine Querschnittsstudie heraus, dass 58,3% der Smartphones mit Bakterien kontaminiert waren. Die Rückseite der Smartphones war signifikant häufiger kontaminiert (46,4%) als deren Touchscreen (32,1%) [36].

Eine Strategie zur Überwindung des Sterilitätsproblems stellen berührungslose Interaktionstechnologien dar. Diese Systeme ermöglichen Gestensteuerung. Beispielsweise ist der Leap Motion Controller (LMC) mit zwei IR-Stereokameras und drei IR-LEDs in der Lage, 27 verschiedene Handelemente mit hoher Präzision zu verfolgen. Der LMC gilt aufgrund seiner Genauigkeit bei der Erfassung kleiner Gesten als geeigneter für OP-Umgebungen geeignet als das Kinect-System. Die übermäßige Anzahl von Gesten oder überladene Gesten können die Schwierigkeit der Bedienung und die Fehlerquote deutlich erhöhen. Die Forschung legt nahe, dass Benutzer in der Regel nur bis zu sechs Gesten effektiv im Gedächtnis behalten können. Dabei können bei der Gestensteuerung auch Probleme wie die versehentliche Aktivierung von Befehlen durch unabsichtliche Gesten, auch als "Midas-TouchProblem bekannt, auftreten [37]. Zur Lösung dieses Problems können Systemaktivierung wie Clutching-Techniken (z. B. Sprachbefehle oder Blicksteuerung) eingesetzt werden [3, 38].

Die ausschließliche Verwendung einer einzigen sensorischen Modalität als Rückmeldeart von Systemen in kritischen Umgebungen wie dem Operationssaal erweist sich als ungeeignet [34]. Es wird daher die Entwicklung multimodaler beziehungsweise multisensorischer Anzeigesysteme für den OP empfohlen, welche mehrere sensorische Kanäle kombinieren, um die Limitierungen eines einzelnen Aufnahmekanals auszugleichen. Akustische Signale besitzen den Vorteil der Omnidirektionalität und sind daher in geräteintensiven Umgebungen wie dem modernen OP, besonders sinnvoll. Omnidirektional bedeutet in diesem Kontext, dass die akustischen Signale von überall im Operationssaal gehört werden können und nicht, wie bei dem visuellen Feedback, von der Blickrichtung des Chirurgen

abhängig sind. Auditive Signale eignen sich insbesondere für Personal, dessen visuelle Aufmerksamkeit durch die primäre chirurgische Aufgabe oder durch die Vielzahl an Monitoren stark beansprucht oder überlastet ist. Haptische Signale übertragen Informationen über Vibration, Kraft oder thermische Empfindungen auf die Haut. Sie sind ebenfalls omnidirektional und erfordern nur geringe Aufmerksamkeitsressourcen. Ihr Einsatz kann außerdem dazu beitragen, die akustische Lärmbelastung im Operationssaal zu reduzieren, falls die akustischen Signale durch haptische ersetzt werden. Aufgrund der geringen Invasivität und hohen Anpassungsfähigkeit an das Tragen steriler Schutzkleidung scheint die haptische Rückmeldung mit den Anforderungen im OP und den Charakteristika des Operationsteams in hohem Maße kompatibel zu sein. Die Kombination von visuellen, akustischen und haptischen Signalen im Operationssaal kann die Kapazität zur Informationsverarbeitung signifikant verbessern und zentrale Koordinationsfunktionen wie die Steuerung von Aufmerksamkeit und Unterbrechungen im OP-Workflow wirksam unterstützen [35].

Die Frage, ob die Kombination aller drei Modalitäten aber auch die beste Lösung für den Operationssaal darstellt, gilt es noch zu beantworten. Schließlich können einige Signale auch Nachteile mit sich bringen [23]. Angesichts der hohen Lärmpegel im OP und der bereits bestehenden kognitiven Belastung besteht die Gefahr, dass zusätzliche akustische Signale die kognitive Belastung weiter erhöhen [29, 31, 34]. Die Herausforderung liegt in der Untersuchung, welche Ablenkung durch irrelevante Modalitäten entstehen können, um die Leistung nicht zu beeinträchtigen [23, 34]. Die Arbeit beschäftigt sich dementsprechend mit der Überprüfung der Feedbackarten in der Umgebung des Operationssaals.

### 3. Studienplanung und Design

Um die Eignung verschiedener Arten von Systemfeedback im Operationssaal zu testen, wurde eine zweiteilige Studie entwickelt. Ziel ist es, den Einfluss der Umgebung auf die Präferenz und Effizienz der verschiedenen Feedbackmodalitäten bei der Verwendung von Gestensteuerung zu evaluieren. Vor Beginn der Datenerhebung wurde ein positives Ethikvotum bei der Medizinischen Ethikkommission der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg eingeholt.

#### 3.1 Studienumgebung und technischer Aufbau

Die Datenerhebung erstreckte sich über einen Zeitraum von vier Wochen und fand im Living Lab des Pius Hospitals Oldenburg statt. Dieser Raum verfügt über die technische Ausstattung, um verschiedene Lichtbedingungen und die Geräuschkulisse eines Operationssaals zu simulieren. Der Raum verfügt ebenfalls über einen Laparoskopie-Simulator, welcher für die Gestaltung der Studie jedoch nicht verwendet wurde. Die an der Decke montierten Projektoren und Kameras wurden für die Gestenerkennung sowie die Projektion der Benutzeroberfläche (Interface) genutzt.

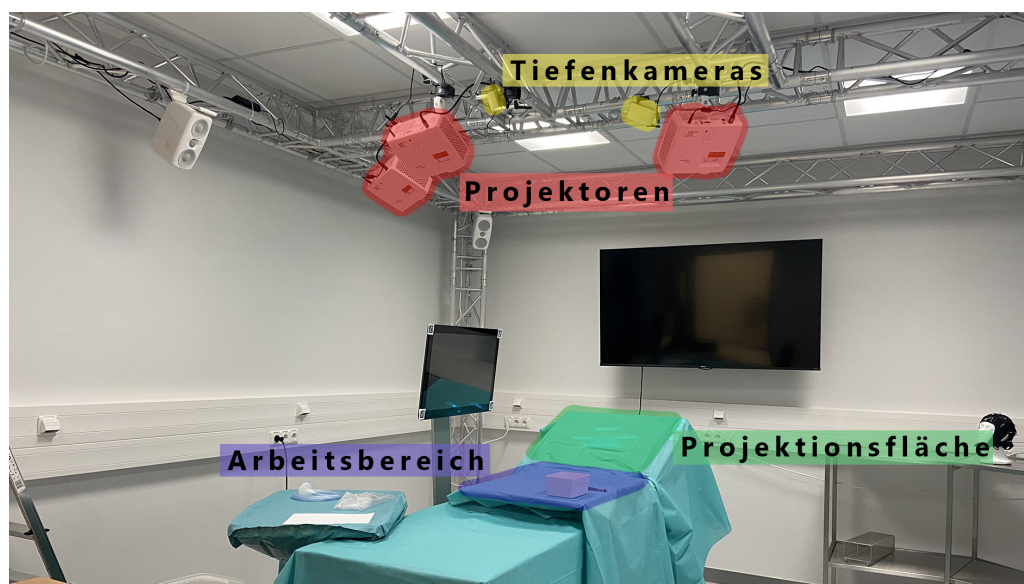


Abbildung 3.1: Aufbau der Studienumgebung

Der physische Aufbau im Raum umfasst einen mit einem Operationstuch eingedeckten Tisch, vor dem die Studienteilnehmer während der Durchführung stehen (siehe Abbildung 3.1). Rechts an diesem Tisch befindet sich eine schräge Erhöhung, die ein in der Luft gespanntes Operationstuch simulieren soll. Auf diese Fläche wird das Interface schräg zum Teilnehmer projiziert. Vor den Probanden sind während

der Durchführungen eine Box mit Legosteinen sowie eine Pinzette platziert, die für eine sekundäre Aufgabe zur Simulation eines chirurgischen Eingriffs und deren kognitiver Belastung (Cognitive Load) genutzt werden. Zusätzlich stehen ein Tisch und eine Sitzmöglichkeit zur Verfügung, welche die Studienteilnehmer zwischen den Durchgängen und zur Beantwortung der Fragebögen nutzen können. Ein separater Rechner im Raum wird zudem für die Steuerung des Programms und der Audio genutzt.

Ein Armband, welches ein Gehäuse mit einem Vibrationsmotor besitzt, wurde speziell für die Durchführung der Studie angefertigt. Dieses Armband ist für die Bedingung mit haptischer Rückmeldung notwendig. Es stellt keinen anderen Mehrwert zur Gestenerkennung oder der Funktion des Programms dar, außer der Systemrückmeldung.

## 3.2 Implementierung der Gestensteuerung

Die Software zur Gestenerkennung und Studiendurchführung wurde von Andre Mühlenbrock implementiert. Dabei erfasst die Kamera einen definierten Bereich rechts vom Teilnehmer, in dem die Handbewegungen erkannt und zur Steuerung eines Punktes auf dem Interface genutzt werden. Die Bewegung des Punktes erfolgt synchron zur Handbewegung. Aufgrund der schrägen Projektion des Interfaces rechts neben dem Probanden resultiert eine Handbewegung nach rechts (aus Sicht des Teilnehmers) in einer Aufwärtsbewegung des Punktes auf dem Interface. Dies ermöglicht die Anwendung der Gestensteuerung aus verschiedenen Perspektiven, solange die Eingabe der Geste im vorgegebenen Bereich erfolgt.

Die Interaktion findet im Stehen statt. Zur Auswahl einer Antwortmöglichkeit muss der Proband den Punkt durch die Bewegung der gesamten Handfläche zum entsprechenden Feld steuern und anschließend Daumen und Zeigefinger zweimal schnell zusammenführen. Diese zweifache Eingabe ist mit dem Doppelklick einer Computermaus vergleichbar, wobei die eigenen Finger die Eingabefläche darstellen. Die Entscheidung für einen doppelten „Klick“ als Eingabegeste diente der Fehlervermeidung, um unbeabsichtigte Berührungen der Finger nicht fälschlicherweise als Eingabe zu registrieren.

## 3.3 Hypothesen

Basierend auf den Ergebnissen bestehender Untersuchungen zu Feedbackmodalitäten bei berührungslosen Interaktionen und unter Beachtung der Stressoren des Operationssaals ergeben sich die folgenden Hypothesen:

**Hypothese 1:** *Multimodales Feedback, dass auditives oder haptisches Feedback nutzt, steigert die Leistung im Vergleich zu rein visuellem Feedback*

Multimodales Feedback, welches akustische oder haptische Komponenten enthält führt zu signifikant besseren Kennzahlen bei der Nutzung der Gestensteuerung zur Durchführung von Aufgaben. Dazu zählen beispielsweise kürzere Reaktionszeiten

und geringere subjektive Arbeitsbelastung im Vergleich zu rein visuellem Feedback [2, 7, 6, 21].

Da Chirurgen visuell mit der Operation beziehungsweise im Fall der Studie mit einer Simulationsaufgabe einer Operation beschäftigt sind, eignet sich akustisches oder haptisches Feedback, um den visuellen Kanal zu entlasten [2], da bei berührungslosen Interaktionen das taktile Feedback physischer Geräte fehlt [2, 6, 1]. Akustisches und haptisches Feedback reduzieren laut bestehenden Studien die Reaktionszeit und die subjektive Arbeitsbelastung [2, 7].

**Hypothese 2:** *Auditives Feedback unter Lärmbelastung führt zu einer höheren kognitiven Belastung der Probanden oder schlechteren Leistungswerten*

Der OP-Saal ist ein Umfeld mit hohen Lärmpegeln [27, 31]. Auditives Feedback kann im lauten OP die Informationsübertragung stören, da das Audiosignal 10 bis 15 dB lauter sein muss als der Hintergrundlärm, um zu 90% verstanden zu werden [26]. Lärm verstärkt die kognitive Arbeitsbelastung und Ablenkung, was zu einem erhöhten Extraneous Load beiträgt [23, 29, 31].

**Hypothese 3:** *Die Nutzung von haptischem Feedback im Vergleich zu rein visueller Rückmeldung führt zu einer geringeren kognitiven Arbeitsbelastung*

Haptische Signale sind omnidirektional und stellen weniger Anforderungen an Aufmerksamkeitsressourcen als visuelle oder akustische Signale, wodurch die kognitive Arbeitsbelastung und der Lärm reduziert werden [34]. Kognitive Belastung ist eine begrenzte Ressource, die während Operationen geschont werden muss [23].

**Hypothese 4:** *Trimodale Systemrückmeldung stellt ein Überlastungsrisiko dar*

Ein multimodales System, das redundante oder irrelevante Signale liefert, wird die kognitive Belastung des Probanden signifikant erhöhen und kann zu Ablenkung oder Verwirrung führen. Die gleichzeitige Verarbeitung von Informationen aus mehreren Quellen, auch Split-Attention genannt, erhöht den Extraneous Load. Eine erhöhte kognitive Belastung verhindert die Fähigkeit zur selektiven Aufmerksamkeit der Probanden, um irrelevante Informationen herauszufiltern [23].

**Hypothese 5:** *Die Bedingung mit keinem Feedback führt zu der höchsten Mehrfacheingabe*

Durch die Gestaltung des Studienablaufs und die damit zusammenhängende Verzögerung der Interface-Anzeige, wird die Benutzeroberfläche weitere fünf Sekunden nach Eingabe angezeigt. Da die Bedingung mit keinem Feedback die einzige Bedingung darstellt, bei welcher nicht ersichtlich ist, ob die Eingabe erfolgreich war, kann es zu einer wiederholten Eingabe durch den Nutzer kommen. Schon über 0,1 Sekunden Verzögerung der Eingabebestätigung können zu einer Mehrfacheingabe führen [18]. Keine Bestätigung führt neben der Mehrfacheingabe auch zu einem Gefühl des Kontrollverlusts [10] sowie einen signifikanten Mehraufwand für den

Benutzer [18].

### 3.4 Studiendesign Teil 1: Nicht-Chirurgen

Der erste Teil der Studie untersuchte fünf verschiedene Konditionen unter Simulation einer Operationssaal-Umgebung. Jeder Proband testete dabei alle fünf Bedingungen (Within-Subject-Design). Zur Validierung des technischen Setups und des Ablaufs wurde vorab eine Pilotstudie mit zwei externen Teilnehmern durchgeführt und das Programm entsprechend angepasst.

An der ersten Studie nahmen insgesamt 27 Personen teil. Da zwei Datensätze aufgrund technischer Probleme in der frühen Phase verworfen werden mussten, gingen final N=25 Datensätze in die Auswertung ein. Dabei wurde auf eine gleichmäßige Geschlechterverteilung (13 männlich, 12 weiblich) geachtet. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 29,04 Jahre. Die fünf untersuchten Bedingungen (Konditionen) waren:

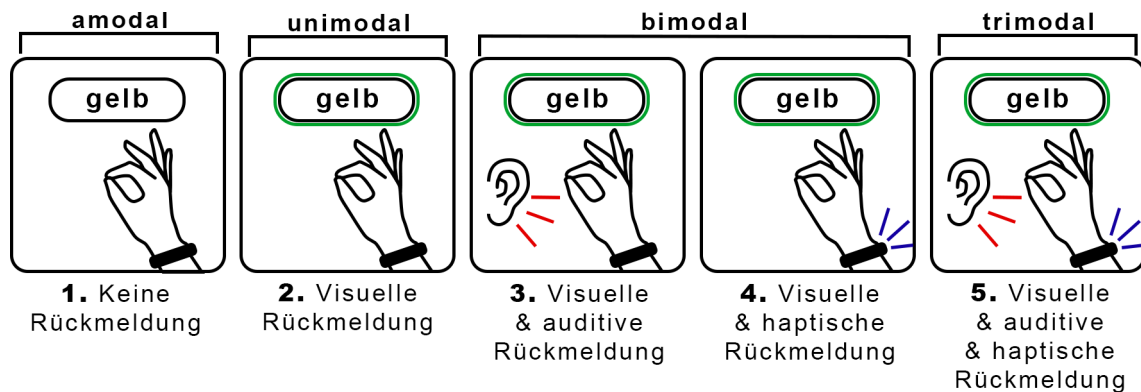


Abbildung 3.2: Darstellung der Systemrückmeldungen

- 1. Kontrolldurchlauf (Keine Systemrückmeldung):** Das System gibt keine Bestätigung bei erkannter Eingabe.
- 2. Visuelle Systemrückmeldung:** Das Interface gibt ein Signal in Form einer Umrandung der ausgewählten Antwortmöglichkeit.
- 3. Visuelle und auditive Systemrückmeldung:** Zusätzlich zur visuellen Rückmeldung wird ein Bestätigungston ausgegeben.
- 4. Visuelle und haptische Rückmeldung:** Zusätzlich zur visuellen Rückmeldung erfolgt ein haptisches Signal durch ein Armband mit Vibrationsmotor.
- 5. Kombination aller Modalitäten:** Visuelle, auditive und haptische Systemrückmeldung gleichzeitig.

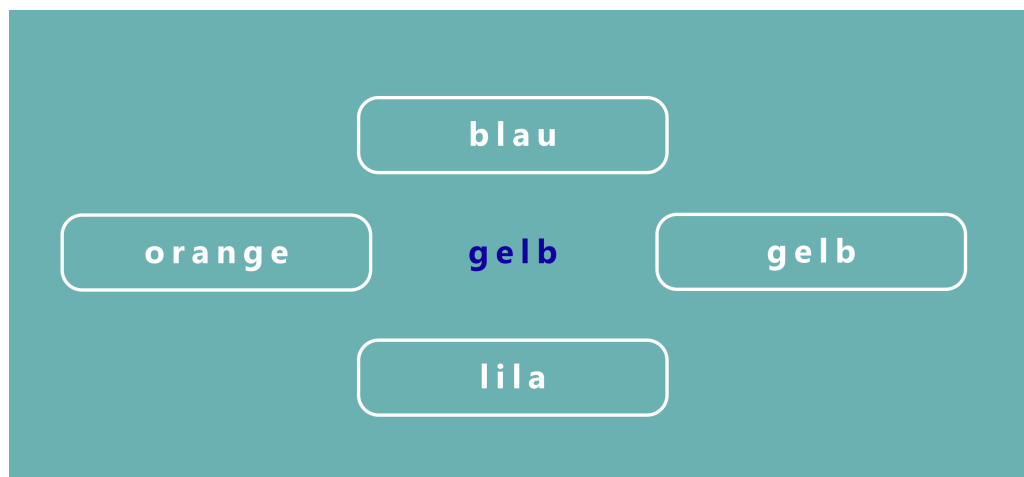
Es wurde bewusst entschieden, auditives und haptisches Feedback nur in Kombination mit visuellem Feedback zu testen, da die visuelle Rückmeldung systemseitig einfach zu implementieren ist, keine zusätzlichen Geräte erfordert und

als wenig störend gilt. Ziel ist es zu untersuchen, ob auditive und haptische Signale eine Bereicherung darstellen oder im Kontext des Operationssaals nachteilig sind.

Um Reihenfolgeeffekte zu kontrollieren, wurden die fünf Bedingungen in rotierender Reihenfolge durchgeführt (Counterbalancing). Dies stellt sicher, dass die Messergebnisse nicht durch Lern- und Erinnerungseffekte verzerrt werden. Die jeweils letzte Bedingung einer Durchführung wurde für den nächsten Probanden an die erste Stelle gerückt. So wurde sichergestellt, dass Unterschiede in den gemessenen Variablen auf die experimentellen Faktoren und nicht auf die Abfolge zurückzuführen sind [39].

### 3.5 Aufgabenstellung und Ablauf

Die Studie begann mit der Begrüßung, einer Erläuterung des Ablaufs sowie der Unterzeichnung der Einwilligungserklärung. Daten wie das Alter, Geschlecht und die Abfrage zu möglichen Seh- und oder Hörschwächen, wurden abgefragt. Vor Beginn der Messungen wurde das Vibrationsarmband am rechten Handgelenk der Probanden befestigt und die Gestensteuerung in einem Probedurchlauf erklärt und getestet.



**Abbildung 3.3:** *Stroop-Test während der Studiendurchführung*

Als primäre Aufgabe wurde der Stroop-Test gewählt. Bei dem Stroop-Test werden Farbwörter in einer abweichenden Schriftfarbe dargestellt. Das Wort „Gelb“ wird beispielsweise in blauer Schrift angezeigt (siehe Abbildung 3.3). Die Aufgabe besteht darin, die Schriftfarbe zu benennen und die Wortbedeutung zu ignorieren. Dies provoziert gezielt mentale Anstrengung, da eine Dissonanz zwischen Wortbedeutung und Farbe entsteht. Cabañero Gómez et al. (2021) bestätigten, dass der Stroop-Test ein geeigneter Stimulus zur Messung von kognitiver Belastung ist [40].

Das Interface zeigt vier verschiedene Farbwörter als Antwortmöglichkeiten für den Stroop-Test an. Um Artefakte durch potentielle Rot-Grün-Sehschwächen zu vermeiden, wurde bei der Gestaltung des Stroop-Tests bewusst auf die Farben Rot und Grün verzichtet. Im Probedurchlauf wurden 10 Stroop-Tests absolviert,

wobei die verschiedenen Feedbackarten jeweils zweimal getestet wurden. Für die eigentliche Datenerhebung wurden pro Bedingung sieben Stroop-Tests durchgeführt. Zur realistischen Simulation einer OP-Umgebung wurden Stressfaktoren eingeführt:

**Akustische Belastung:** Über Lautsprecher wurden Töne zur Simulation einer OP-Geräuschkulisse abgespielt. Die Audiolautstärke wurde mit einem Schallpegelmessgerät auf 65 dB eingestellt [26], mit Spitzenwerten über 70 dB, um eine mit einer Operation vergleichbare Belastungssituation zu simulieren [23].

**Motorische Nebenaufgabe:** Um die manuelle Tätigkeit einer Operation zu simulieren, mussten die Probanden zwischen den Stroop-Tests mit einer Pinzette 1x2-Legosteine sortieren. Diese Aufgabe lenkt den Fokus der Hände und Augen vom Interface weg. Die Stroop-Tests erschienen in Inkrementen von 30 Sekunden und stellten die priorisierte Aufgabe dar. Das projizierte Interface wird fünf Sekunden nach der Gesteneingabe dunkel, bis es zur Einblendung des nächsten Stroop-Tests wieder aufleuchtet. Nach der Eingabe durfte das Sortieren der Steine fortgesetzt werden, auch wenn das Interface noch nicht ausgeblendet wurde.

Die Dauer pro Bedingung lag bei etwa vier bis fünf Minuten. Dieses Zeitfenster ist in der klinischen Forschung, insbesondere für die Analyse der kurzfristigen Herzfrequenz, eine anerkannte Dauer. Die Herzfrequenz gilt als ein Indikator für die kognitive Arbeitsbelastung des OP-Teams. Die Studie von Kennedy-Metz et al.(2022) zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Lärmbelastung und kognitiver Belastung in der Herzchirurgie nutzte ebenfalls die Fünf-Minuten-Segmente [29].

## 3.6 Datenerhebung und Fehlerinduktion

Das System protokolliert mehrere Daten während des Durchlaufs und speichert diese in einer Textdatei. Zu den gemessenen Daten zählen neben der Probandennummer, Aufgabennummer und Bedingung, die Zeit von der Anzeige der Aufgabe bis zur Eingabe. Zusätzlich wird dokumentiert, ob die registrierte Antwort richtig ist und wie viel Zeit es zur zweiten Eingabe gedauert hat, wenn bei der jeweiligen Aufgabe ein Fehler eingebaut wurde. Auch die Anzahl der „Doppel-Klicks“ außerhalb der Antwortmöglichkeiten, sowie nach dem Auswählen einer Antwortmöglichkeit wurden gespeichert. Da die Gestenerkennung aufgrund teilweise fehlerhafter Handhaltung nicht immer einwandfrei funktionierte, wurden zusätzlich die Videoaufnahmen der Eingabefläche zur Auswertung der Eingabeversuche genutzt. Dies ermöglicht die teilweise fehlerhaften Angaben zu der Anzahl an Eingabeversuchen außerhalb der Antwortmöglichkeiten, sowie nach dem Auswählen einer Antwortmöglichkeit, nochmals fehlerfrei festzuhalten. Am Ende jeder Durchführung wurde die Anzahl der sortierten Legosteine dokumentiert oder anschließend ebenfalls durch die Videoaufnahmen nachträglich erfasst.

Um die Wahrnehmung des Feedbacks zu prüfen, wurden je Bedingung zwei künstliche Systemfehler eingebaut. Hierbei wurde die Eingabe trotz korrekter Ausführung beabsichtigt nicht registriert. Die Fehler traten an variierenden Stellen auf, jedoch nie bei der ersten oder letzten Eingabe. Die Vermutung ist, dass bei eindeutigen Feedback (Vibration/Ton) das Fehlen der Registrierung schneller

bemerkt wird als in der Bedingung ohne oder mit rein visuellen Feedback.

Nach jeder Bedingung füllten die Probanden den NASA Task Load Index (NASA-TLX) aus. Der NASA-TLX wurde gewählt, da er ein validiertes Instrument zur Messung der subjektiven Arbeitsbelastung darstellt [41]. Dieser wurde um zwei weitere individuelle Fragen, ebenfalls auf einer 21-Strich-Skala, ergänzt: „Wie sicher waren Sie, dass Ihre Eingabe registriert wurde?“ und „Wie angenehm finden Sie die Rückmeldung des Systems?“. Zum Abschluss der Studie erfolgte eine Bewertung der fünf Bedingungen untereinander (Platz 1 bis 5) sowie eine schriftliche Begründung der Präferenzen. Die Gesamtdauer pro Proband betrug etwa 40 bis 50 Minuten.

### 3.7 Studiendesign Teil 2: Chirurgen

Im zweiten Teil der Studie wurden die Feedbackarten an der eigentlichen Zielgruppe, den Chirurgen, getestet (N=10, davon 6 männlich, 4 weiblich; Durchschnittsalter 35,8 Jahre). Der Aufbau der zweiten Studie verwendet einen ähnlichen Ablauf wie die erste Studie nur mit einer anderen Personengruppe, den Chirurgen. Aufgrund der begrenzten Zeitverfügbarkeit dieser Gruppe wurde das Design angepasst:

**Reduzierte Bedingungen:** Basierend auf den Ergebnissen des ersten Teils wurde die Bedingung „Kein Feedback“ ausgeschlossen, da diese sich bereits als unterlegen erwiesen hatte. Getestet wurden somit vier Bedingungen (Visuell; Visuell und Auditiv; Visuell und Haptisch; Visuell, Auditiv und Haptisch).

**Verkürzter Ablauf:** Die Durchführungszeit wurde deutlich reduziert. Pro Bedingung wurden nur fünf Stroop-Tests mit einem Intervall von 20 Sekunden und lediglich einem eingebauten Fehler durchgeführt. Die Dauer pro Durchgang sank dadurch auf durchschnittlich zwei Minuten.

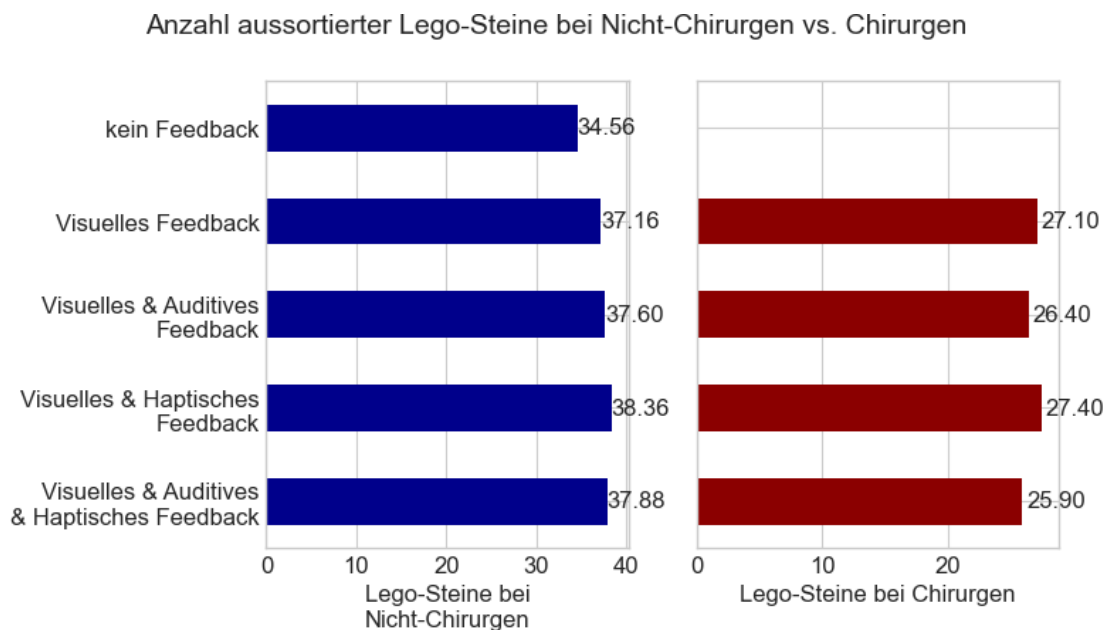
**Datenerhebung:** Um den Zeitaufwand für die Teilnehmer zu minimieren, wurden die Begründungen für die Bewertung der Feedbackarten überwiegend mündlich erfasst und parallel protokolliert. Durch diese Maßnahmen konnte der Zeitrahmen von meist 12 bis 20 Minuten pro Proband eingehalten werden.

Aufgrund der hohen Arbeitsbelastung der Chirurgen durch Krankheitsfälle und Urlaubszeiten erwies sich die Rekrutierung als herausfordernd. Um die gewünschte Teilnehmerzahl von mindestens 10 Probanden zu erreichen, wurden ergänzend zwei Medizinstudenten, welche am Ende ihres praktischen Jahres waren, für die Studie gewonnen.

## 4. Evaluation und Ergebnisse

Die Auswertung der Studie erfolgte durch das Auslesen der zeitlichen Messungen und Auswertung der Videoaufnahmen sowie der Fragebögen. Die Graphen wurden in Python erstellt. Da sich die Bedingungen und Dauer der Studie zwischen Nicht-Chirurgen und Chirurgen unterscheiden, ist ein direkter Vergleich der beiden Studien nicht möglich, jedoch lassen sich die Tendenzen gegenüberstellen. Beispielsweise lässt sich die Anzahl der sortierten Legosteine nicht direkt vergleichen, da die Bearbeitungszeit der Chirurgen eindeutig kürzer war. Ob eine Bedingung im Vergleich zu den anderen jedoch eindeutig höhere oder niedrigere Werte erzielen konnte, könnte bei beiden Personengruppen untersucht werden.

**Hypothese 1:** *Multimodales Feedback, dass auditives oder haptisches Feedback nutzt, steigert die Leistung im Vergleich zu rein visuellem Feedback*



**Abbildung 4.1:** *Durchschnittliche Anzahl sortierter Legosteine bei Nicht-Chirurgen und Chirurgen. Aufgrund der geringeren Bearbeitungszeit der Chirurgen lassen sich die Ergebnisse nicht direkt vergleichen.*

Die Messungen der sekundären Aufgabe zeigen, dass die Leistungen bei der Sortierung der Legosteine bei den Nicht-Chirurgen besser waren, als bei den multimodalen Systemrückmeldungen (siehe Abbildung 4.1). Bei den Chirurgen hingegen, wurde keine erhöhte Leistung in Form von besseren Ergebnissen in der sekundären Aufgabe festgestellt. Die Ergebnisse des NASA-TLX deutet auf eine leicht schlechtere Einschätzung der Leistung unter den Nicht-Chirurgen für die Visuelle Rückmeldung hin, während die Chirurgen ihre Leistung für diese Bedingung

besser einschätzten als alle anderen Bedingungen (siehe Abbildung 4.3 und 4.4). Trotz der leicht besseren subjektiven Einschätzung der Leistung bei den Chirurgen, haben diese Werte keine Signifikanz.

**Hypothese 2:** *Auditives Feedback unter Lärmbelastung führt zu einer höheren kognitiven Belastung der Probanden oder schlechteren Leistungswerten*

Es hat sich nicht bestätigt, dass die Leistung und kognitive Belastung bei der Bedingung mit dem audiovisuellen Feedback bei der sekundären Aufgabe schlechter abgeschnitten haben (siehe Abbildung 4.1). Da das auditive Feedback jedoch nicht einzeln ohne die visuelle Rückmeldung getestet wurde, gab es die visuelle Rückmeldung als Unterstützung des auditiven Signals. Ebenso wurden keine zusätzlichen Gespräche während des Lärms geführt, welche zusätzlich in realen Szenarien die auditiven Signale schlechter erkennbar machen könnten. Auch wenn die Leistung nicht schlechter war und eine kognitive Belastung durch die Messungen nicht festgestellt werden konnte, haben Kommentare von den Nicht-Chirurgen und Chirurgen bestätigt, dass nicht in allen Fällen die Bestätigungstöne gehört worden sind.

Vier Probanden haben zusätzlich angemerkt, dass diese die Bestätigungstöne zum Teil mit der simulierten Geräuschkulisse verwechselt haben. Aus diesem Grund haben sie beim Sortieren der Legosteine, ihren Kopf Richtung Interface gewendet, da sie während den Bedingungen mit auditiven Signalen eine Änderung im Interface erwartet haben. Das Signal muss dementsprechend nicht nur eindeutig lauter sein als die restlichen Umgebungsgeräusche, sondern es muss sich auch in seinem Klang unterscheiden. Für die Studie wurde ein Signalsound einer Lampe von bitvox genutzt, welche für das medizinische Umfeld entwickelt wurde.

**Hypothese 3:** *Die Nutzung haptischem Feedbacks im Vergleich zu rein visueller Rückmeldung führt zu einer geringeren kognitiven Arbeitsbelastung*

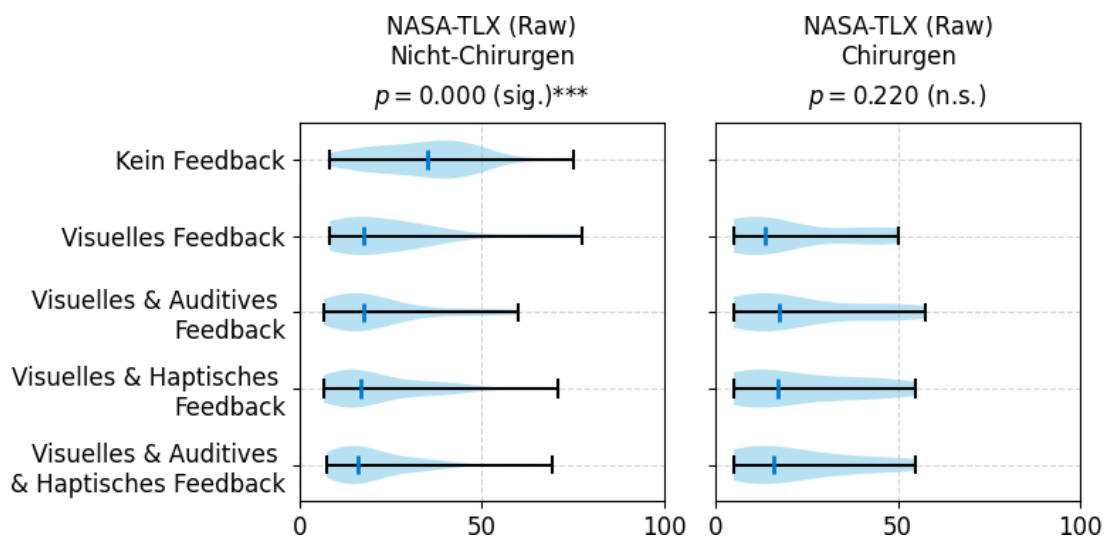
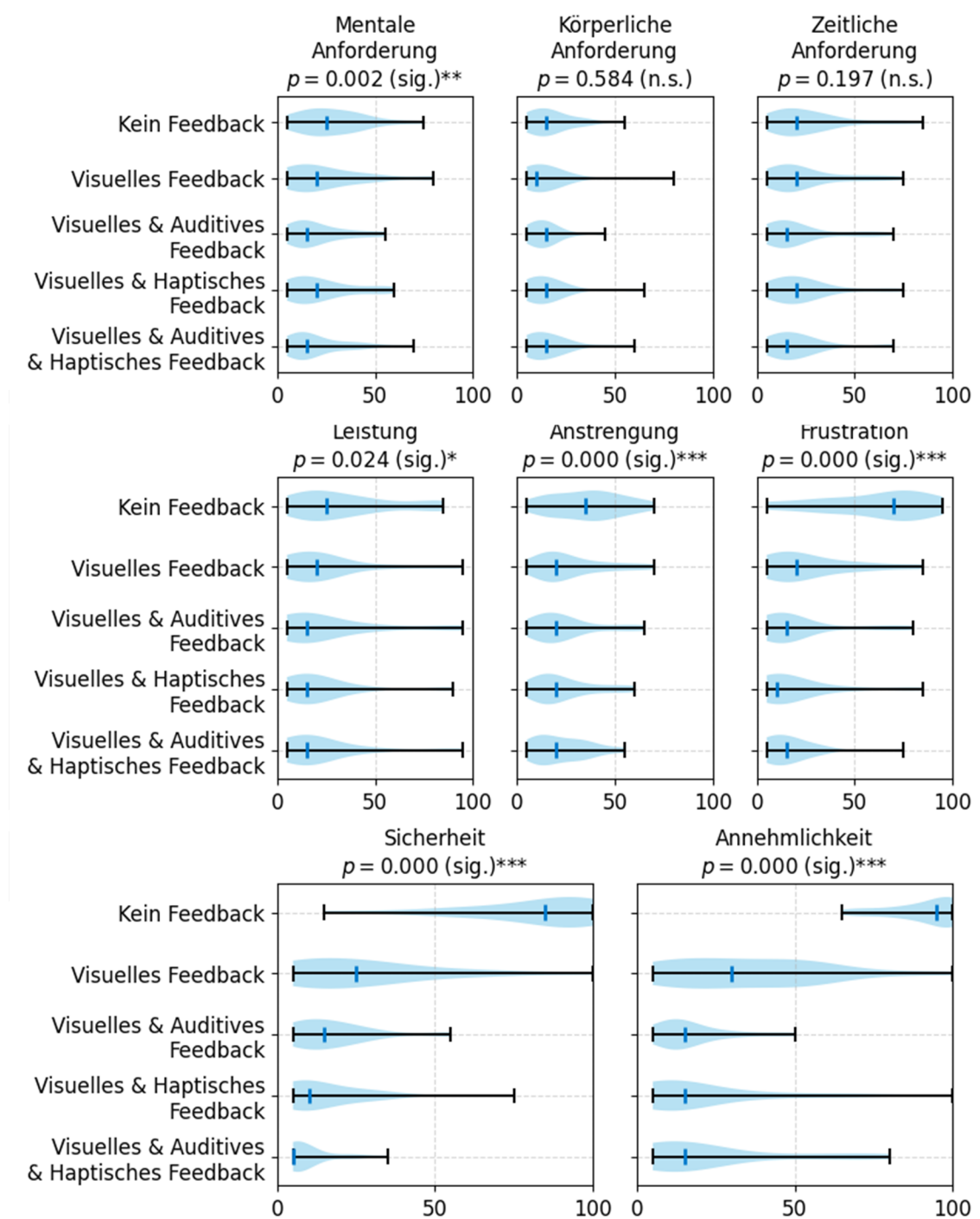
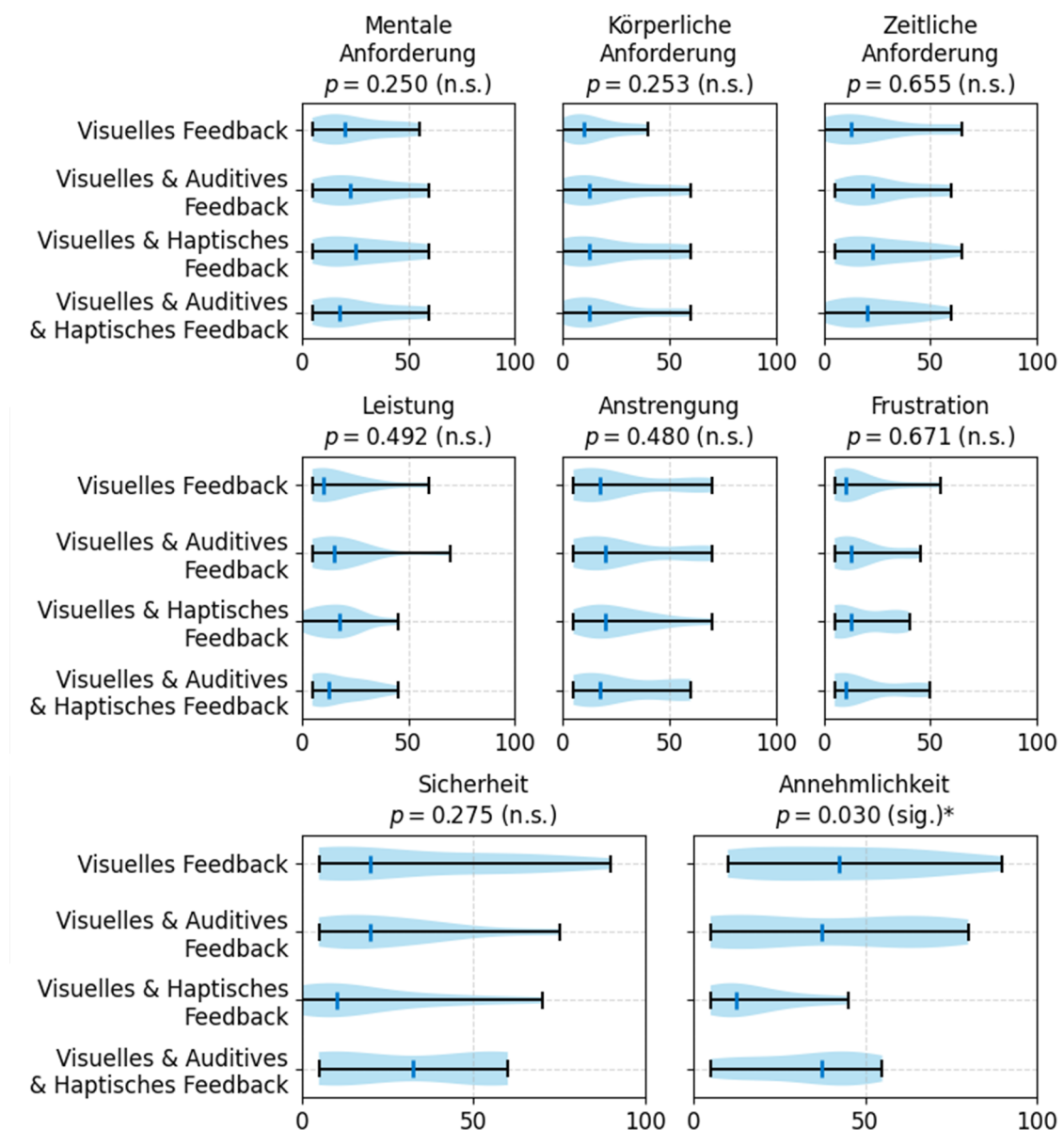


Abbildung 4.2: Raw NASA-TLX der Nicht-Chirurgen und Chirurgen



**Abbildung 4.3:** NASA-TLX Dimensionen und zusätzliche Antworten zur Sicherheit und Annehmlichkeit der Feedbackarten bei den Nicht-Chirurgen



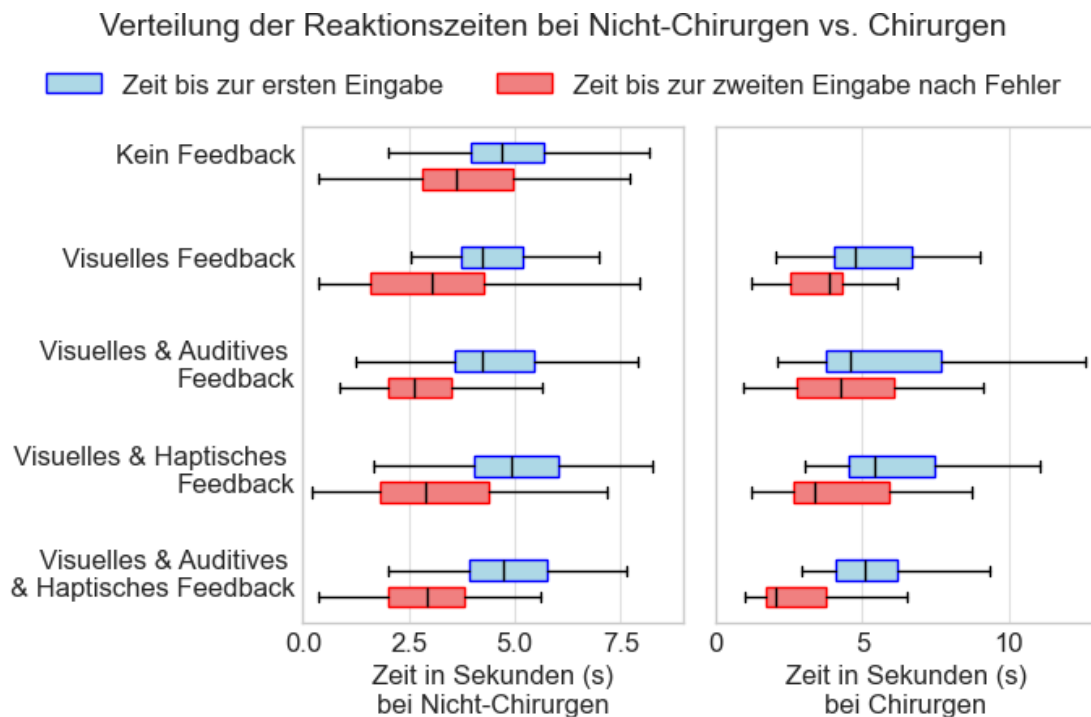
**Abbildung 4.4:** NASA-TLX Dimensionen und zusätzliche Antworten zur Sicherheit und Annehmlichkeit der Feedbackarten bei den Chirurgen

Die Messungen in Form des NASA-TLX bestätigt nicht die Aussage, dass die haptische Rückmeldung im Vergleich zu rein visueller Rückmeldung die kognitive Belastung verringert (siehe Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4). Bei den Chirurgen hat die Bedingung mit der visuellen Rückmeldung einen niedrigeren Raw NASA-TLX im Vergleich zu den anderen Bedingungen, jedoch sind die Werte nicht signifikant (siehe Abbildung 4.2). Bei den Nicht-Chirurgen gab es eine Signifikanz beim Vergleich mit der Bedingung kein Feedback, welche den höchsten NASA-TLX-Wert hat. Visuelles Feedback hat bei den Nicht-Chirurgen einen ähnlichen Wert wie die letzten drei Bedingungen. Auch wenn der NASA-TLX zur Messung der Arbeitsbelastung genutzt wird, zeigen die Ergebnisse der individuell verfassten Fragen, sowie die Bewertung der Bedingungen untereinander, dass die Präferenz trotzdem nicht bei der visuellen Rückmeldung liegt. Das Sicherheitsgefühl, dass die Geste bei der visuellen Rückmeldung erkannt wurde, ist weder bei den Chirurgen, noch bei den Nicht-Chirurgen sehr hoch. Ebenso wird die visuelle Systemrückmeldung als

insgesamt unangenehmer im Vergleich zu den anderen multimodalen Bedingungen beschrieben.

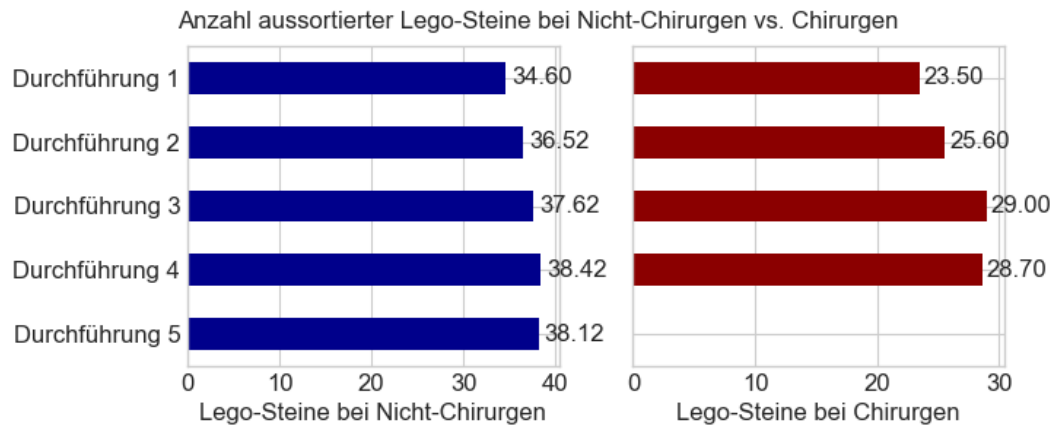
Die Leistung der Chirurgen während der sekundären Aufgabe, kann einen anderen Einblick auf die kognitive Belastung geben als die subjektive Bewertung durch den Probanden im Fragebogen (siehe Abbildung 4.1). Die Teilnehmer haben bei der Bedingung mit der visuellen und haptischen Rückmeldung mehr Legosteine sortiert als bei der Bedingung mit der trimodalen Systemrückmeldung. Dies kann bedeuten, dass das Vorhandensein einer klaren Rückmeldung in Form von Haptik, die kognitive Belastung reduzierte und es den Probanden ermöglichte schneller zur sekundären Aufgabe zurückzukehren, was sich in einer höheren Anzahl sortierter Steine zeigte. Besonders das haptische Feedback wurde in den qualitativen Bewertungen hervorgehoben und als sicherste Bestätigung für eine erfolgreiche Eingabe bezeichnet, da es ein schnelles Wegschauen vom Bildschirm erlaubte.

**Hypothese 4:** *Trimodale Systemrückmeldung stellt ein Überlastungsrisiko dar*



**Abbildung 4.5:** *Reaktionszeiten der Nicht-Chirurgen und Chirurgen*

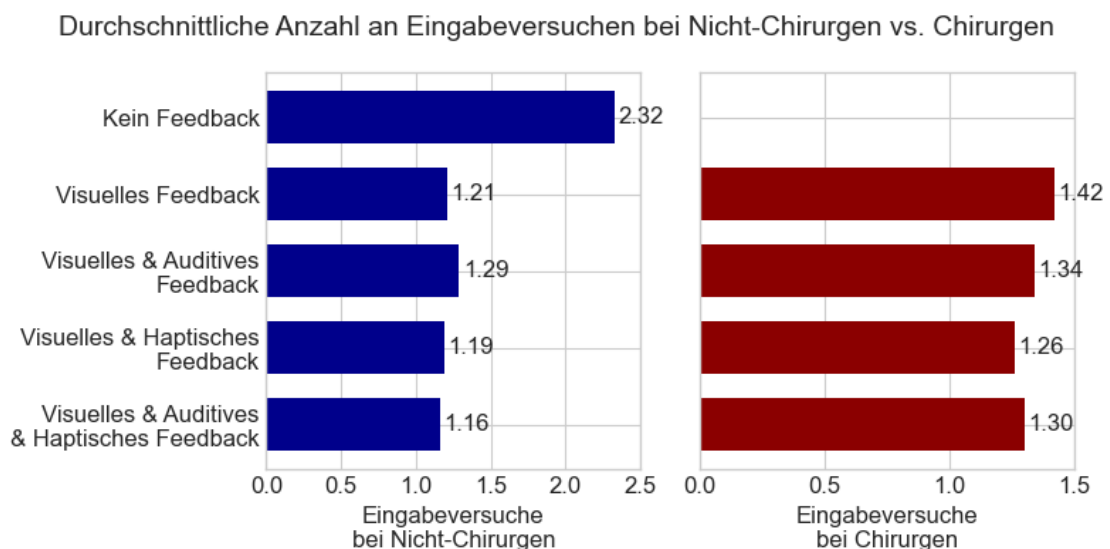
Abgesehen von den mündlichen Kommentaren oder Begründungen, lässt sich keine Überlastung durch die trimodale Systemrückmeldung bei der Auswertung der Nicht-Chirurgen feststellen. Die Antworten des NASA-TLX, sowie die Leistung in der Sekundäraufgabe des Sortieren der Legosteine, fielen bei dieser Bedingung sehr gut aus (siehe Abbildung 4.1 bis 4.5). Auch das Erkennen des künstlich eingebauten Fehlers und die erneute Gesteneingabe fiel sowohl den Nicht-Chirurgen als auch den Chirurgen unter der letzten Bedingung mit der trimodalen Rückmeldung am schnellsten (siehe Abbildung 4.6).



**Abbildung 4.6:** *Lerneffekt beim Sortieren der Legosteine. Aufgrund der geringeren Bearbeitungszeit der Chirurgen lassen sich die Ergebnisse nicht direkt vergleichen.*

Die Anzahl an Sortierten Legosteinen bei den Chirurgen hingegen ist die niedrigste, was bedeutet, dass die Leistung bei der sekundären Aufgabe unter der Bedingung visuelles, auditives und haptisches Feedback am schlechtesten war (siehe Abbildung 4.1). Die trimodale Systemrückmeldung hatte die zweithöchste Anzahl der sortierten Legosteine und somit die zweitbeste Leistung. Dabei ließ sich bei den Chirurgen und Nicht-Chirurgen ein Lerneffekt bei der sekundären Aufgabe feststellen, da mit steigender Durchführungsnummer, auch die Anzahl der sortierten Legosteine wuchs (siehe Abbildung 4.7). Dies bedeutet für die Studie, dass die Änderung der Reihenfolge der einzelnen Bedingungen für die Studie unerlässlich war und der Reihenfolgeeffekt verhindert werden konnte.

**Hypothese 5:** *Die Bedingung mit keinem Feedback führt zu der höchsten Mehrfacheingabe*



**Abbildung 4.7:** *Durchschnittliche Anzahl an Eingabeversuchen bei den Nicht-Chirurgen und Chirurgen*

Diese Hypothese, dass es bei der Bedingung ohne Feedback vermehrt zur Mehrfacheingabe kommt, hat sich bestätigt (siehe Abbildung 4.8). Die Anzahl an Ein-

gabeversuchen ist bei der Bedingung mit keinem Feedback fast doppelt so hoch wie bei den anderen Bedingungen. Da die Bedingung mit keinem Feedback nur bei den Nicht-Chirurgen untersucht wurde, können nur die Ergebnisse der ersten Studie diese Hypothese bestätigen. Während die Nicht-Chirurgen im Durchschnitt am zweitwenigsten Eingabeversuche bei der Visuell-Haptischen Rückmeldung hatten, haben die Chirurgen mit 1,26 Eingabeversuchen die niedrigste Mehrfacheingabe bei visueller und haptischer Rückmeldung. Insgesamt fällt auf, dass die Chirurgen ein wenig mehr Eingabeversuche tätigten.

## 4.1 Qualitative Auswertung

Die qualitative Auswertung umfasst die mündlichen Rückmeldungen der 25 Probanden sowie der zehn Chirurgen und ergänzt die quantitativen Ergebnisse des NASA-TLX und des Präferenz-Rankings. Dabei bestätigen die Kommentare der Teilnehmenden die bereits beobachteten Unterschiede zwischen den getesteten Feedback-Bedingungen und verdeutlichen zentrale Nutzungstendenzen. Die Bedingung Kein Feedback wurde von allen Probanden als am schlechtesten bewertet und durchgehend als verwirrend, unsicher und stark ablenkend beschrieben. Ohne Rückmeldung waren die Teilnehmenden unsicher, ob eine Eingabe tatsächlich registriert wurde, was zu wiederholten Eingabeversuchen führte und den Blick häufig zurück zum Interface zwang. Diese Unsicherheit wurde als „hilflos“ und „störend“ empfunden und spiegelte sich in der Bewertung als durchgehend letzter Platz wider.

Besonders positiv äußerten sich viele Probanden zum haptischen Feedback, das als zuverlässigste und eindeutigste Rückmeldung beschrieben wurde. Mehrere Teilnehmende betonten, dass die Vibration ihnen die größte Sicherheit gab, da sie unabhängig vom Blickfeld wahrgenommen werden konnte. Auch wurde wiederholt hervorgehoben, dass haptische und auditive Rückmeldungen die Augen entlasten, da der Blick schneller zur Sortieraufgabe der Legosteine zurückgeführt werden konnte. Gleichzeitig wurde das auditive Feedback jedoch kritischer bewertet: Einige Probanden empfanden die Töne als störend, unnötig oder in der simulierten Geräuschkulisse schwer unterscheidbar. Multimodale Kombinationen wurden vielfach als hilfreich beschrieben, da mehrere Bestätigungsebenen die Sicherheit der Eingabe erhöhten, während sie von einzelnen Teilnehmenden jedoch auch als potenziell überstimulierend wahrgenommen wurden. Insgesamt zeigte sich bei der allgemeinen Probandengruppe eine deutliche Präferenz für die maximale Kombination aus visuellem, auditivem und haptischem Feedback.

Bei den Chirurgen ergab die qualitative Rückmeldung ein anderes Bild, das stark durch den realen Operationskontext geprägt war. Haptisches Feedback wurde auch hier am positivsten bewertet und als eindeutigste, sicherste und im OP-Saalkontext am zuverlässigsten wahrnehmbare Form der Rückmeldung beschrieben. Mehrere Chirurgen betonten, dass das haptische Signal selbst bei hoher Umgebungslautstärke klar erkennbar sei und die Interaktion dadurch einem vertrauten Knopfdruck ähnele. Das auditive Feedback hingegen wurde von vielen Chirurgen als ungeeignet für den OP eingestuft, da die Töne zwischen Umgebungsgeräuschen untergingen oder diesen zu ähnlich waren. Auch reines visuelles Feedback wurde trotz guter objektiver Leistung kritisch gesehen. Chirurgen gaben

an, dass visuelle Hinweise während der Aufgabe zunehmend weniger wahrgenommen wurden oder allein nicht ausreichten, um sich auf die Interaktion zu verlassen. Einzelne Teilnehmende äußerten zudem die Sorge, dass vollständige multimodale Kombinationen zu viel sein könnten, da sowohl auditive als auch haptische Signale gleichzeitig als überladen empfunden werden könnten.

Die qualitative Analyse zeigt, dass Nicht-Chirurgen vor allem eine redundante, multimodale Rückmeldung bevorzugen, da sie maximale Sicherheit bietet und den Blick stärker entlastet. Chirurgen hingegen orientieren ihre Präferenz stärker an der praktischen Eignung im realen OP-Umfeld und bewerten haptisches Feedback als klar zuverlässigstes und am besten wahrnehmbares Signal. Das auditive Feedback wird von einigen Chirurgen aufgrund der typischen Geräuschkulisse im OP als deutlich weniger geeignet beschrieben. Somit bestätigen die qualitativen Rückmeldungen die quantitativen Ergebnisse und unterstreichen die Bedeutung kontextbezogener Gestaltung von Feedbackmechanismen für Interaktionssysteme im OP.

## 4.2 Auswertung der Präferenz

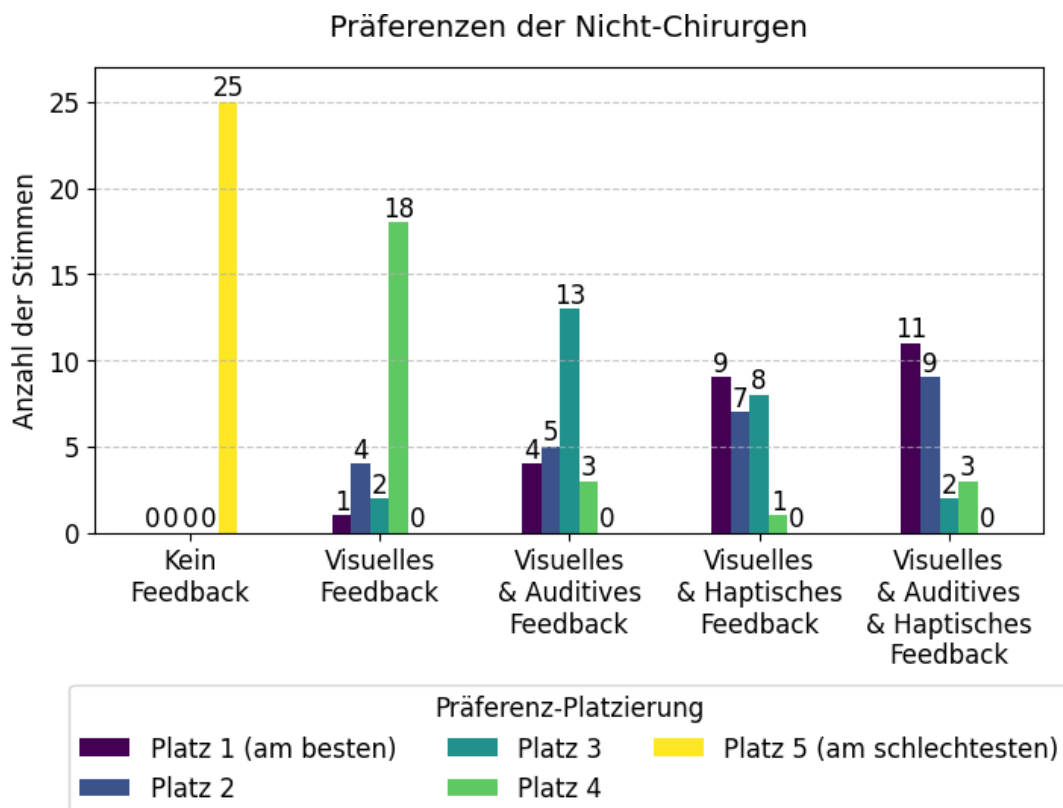
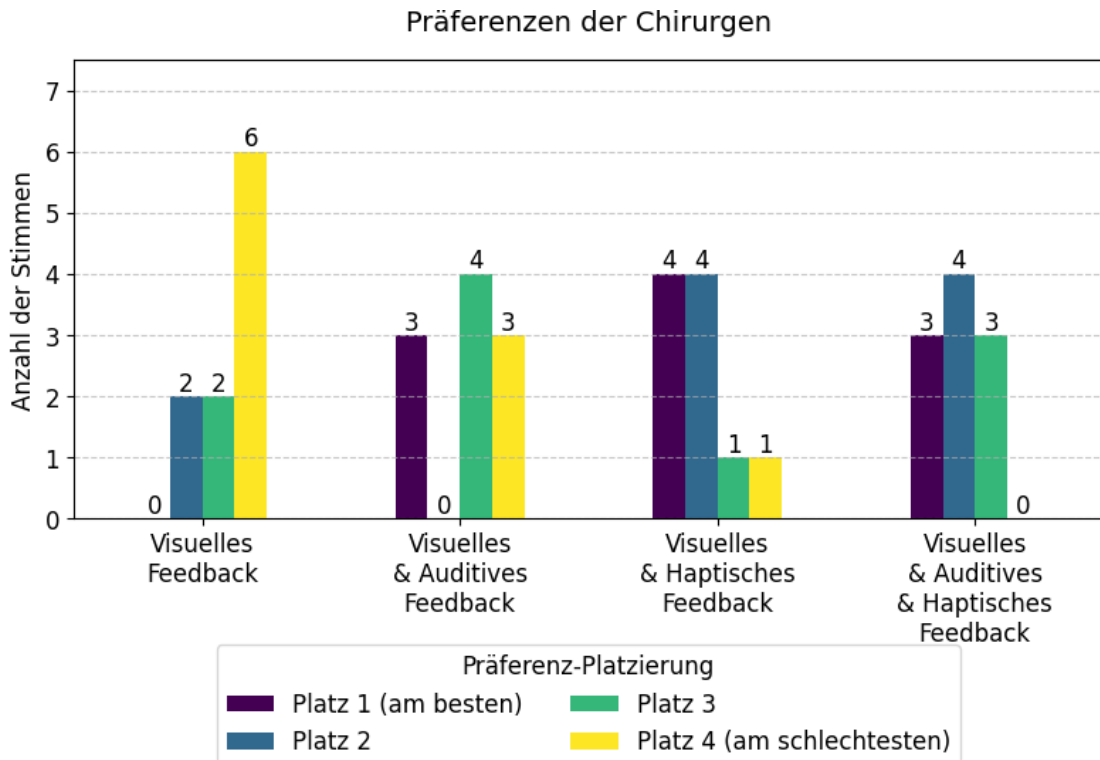


Abbildung 4.8: Präferenz der Nicht-Chirurgen



**Abbildung 4.9:** *Präferenz der Chirurgen*

Die Bewertung der Bedingungen untereinander zeigt bei den Nicht-Chirurgen eindeutig, dass die Bedingung mit keinem Feedback am wenigsten präferiert wird (siehe Abbildung 4.9). Die Bedingung mit dem visuellen Feedback wird sowohl von den Nicht-Chirurgen als auch Chirurgen als insgesamt zweitschlechtesten oder im Fall der Chirurgen am schlechtesten bewertet (siehe Abbildung 4.10). Die Ergebnisse der Nicht-Chirurgen zeigen eine Präferenz der Bedingung mit dem trimodalen Feedback. Bei den Chirurgen hat das visuelle und haptische Feedback die höchste Präferenz, gefolgt vom trimodalen Feedback.

Dabei bestätigen drei Chirurgen in ihrer Begründung zu ihrer Bewertung, dass sie die visuelle und haptische Rückmeldung mit der visuellen, auditiven und haptischen Rückmeldung gleichsetzen würden, da die auditive Rückmeldung kaum zu hören war und die Bedingung ebenfalls als visuell und haptisch wahrgenommen wurde. Die Bedingung mit dem visuellen und auditiven Feedback bewertet etwa zwei Drittel der Chirurgen diese Bedingung als schlechteste oder zweitschlechteste Feedbackart, da diese laut ihnen keinen Mehrwert zum visuellen Feedback geboten hat. Die Bestätigungstöne seien kaum durch die Geräuschkulisse zu hören sein. Schon vor Beginn der Messungen, noch vor dem Abspielen der Audio mit der Geräuschkulisse, haben drei Chirurgen erwähnt, dass das auditive Signal im OP untergehen wird.

Andererseits wurden auch zur haptischen Rückmeldung wiederkehrende Begründungen zur schlechten Bewertung gebracht. So fanden zwei Chirurgen und drei Nicht-Chirurgen das Tragegefühl des Armbands beziehungsweise die Vibration als unangenehm.

Auch die Platzierung des vibrierenden Armbands am Handgelenk wurde von zwei Chirurgen beim Anlegen bemängelt. Vor Beginn der Studie wurde jedem Chirurgen jedoch erklärt, dass in der realen Situation das Armband an einer anderen Körperstelle wie beispielsweise dem Oberarm befestigt wird.

Präferenzen nach Geschlecht bei den Nicht-Chirurgen

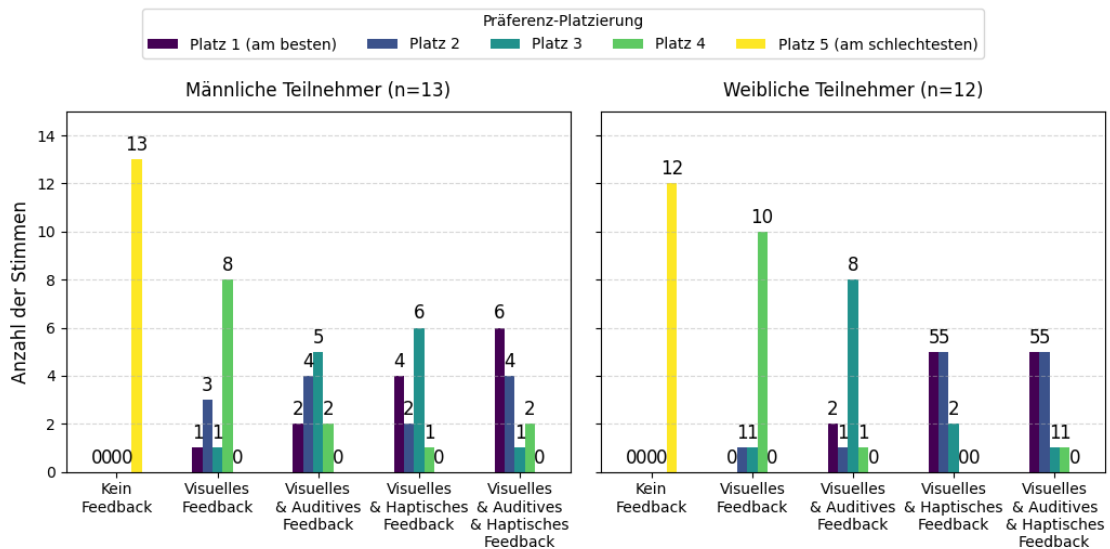


Abbildung 4.10: Präferenz bei den Nicht-Chirurgen nach Geschlecht sortiert

Präferenzen nach Geschlecht bei den Chirurgen

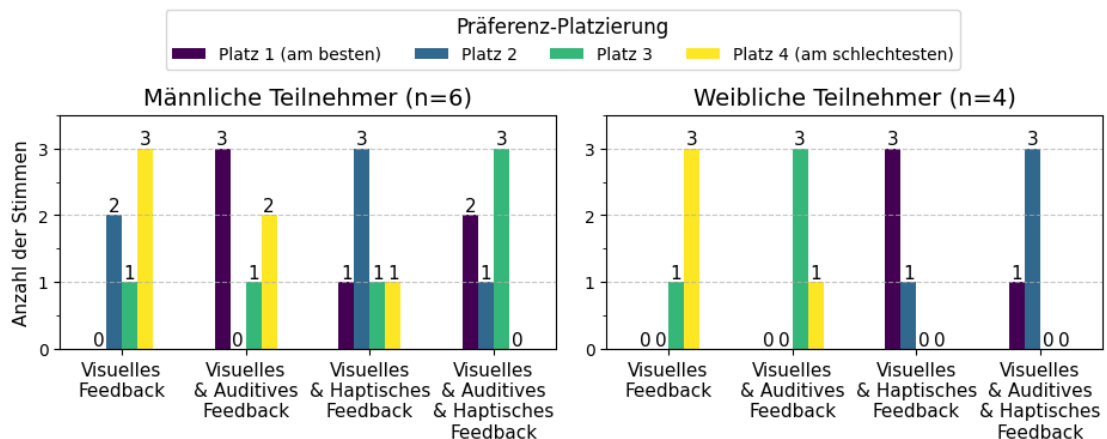


Abbildung 4.11: Präferenz bei den Chirurgen nach Geschlecht sortiert

Bei den Geschlechter ist bei den Nicht-Chirurgen keine Tendenz bei der Bewertung der Bedingungen untereinander aufgefallen (siehe Abbildung 4.10). Bei den Chirurgen hingegen, neigen die weiblichen Teilnehmer zu einer multimodalen Systemrückmeldung mit Haptik (siehe Abbildung 4.11). Die meiste Präferenz hat dabei das visuelle und haptische Feedback, gefolgt vom trimodalen Feedback, welches auch Haptik beinhaltet. Die visuelle oder visuelle und auditive Rückmeldung wurde von allen weiblichen Chirurgen als dritter oder vierter Platz gewählt.

Bei den männlichen Teilnehmer hingegen gab es keine eindeutige Tendenz. Auch wenn die Hälfte der männlichen Teilnehmern die visuell, auditive Feedbackart

am meisten präferierte, haben ein Drittel der männlichen Chirurgen dem visuell, auditiven Feedback den letzten Platz gegeben.

### 4.3 Weitere Auswertung

Aufgrund der Signifikanz in dem Raw NASA-TLX, sowie fast allen weiteren Dimensionen, außer der körperlichen Anforderung, wurde bei den Nicht-Chirurgen nach dem Friedman-Test noch eine Post-Hoc-Analyse durchgeführt, um mit dem Wilcoxon Signed-Rank Test noch weitere Einblicke zu den Unterschieden der Bedingungen untereinander zu bekommen.

| Vergleich     | Raw TLX         | Mental | Leistung | Anstrengung    | Frustration     | Gestenerk.       | Präferenz        |
|---------------|-----------------|--------|----------|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| NF vs. V      | <b>0.0046*</b>  | 0.7171 | 0.2598   | 0.1928         | <b>0.0005**</b> | <b>0.0004**</b>  | <b>0.0001***</b> |
| NF vs. V&A    | <b>0.0019*</b>  | 0.1110 | 0.3337   | 0.0315         | <b>0.0004**</b> | <b>0.0001***</b> | <b>0.0001***</b> |
| NF vs. V&H    | <b>0.0004**</b> | 0.4941 | 0.0769   | 0.0439         | <b>0.0002**</b> | <b>0.0002**</b>  | <b>0.0002**</b>  |
| NF vs. V&A&H  | <b>0.0002**</b> | 0.0069 | 0.0455   | <b>0.0033*</b> | <b>0.0002**</b> | <b>0.0001***</b> | <b>0.0001***</b> |
| V vs. V&A     | 0.1178          | 0.3009 | 1.0000   | 0.1608         | 0.4427          | 0.1106           | 0.0159           |
| V vs. V&H     | 1.0000          | 1.0000 | 1.0000   | 0.7569         | 1.0000          | 0.2572           | 0.3846           |
| V vs. V&A&H   | 0.1325          | 0.2027 | 1.0000   | 0.1418         | 0.0682          | 0.0070           | 0.6891           |
| V&A vs. V&H   | 1.0000          | 1.0000 | 1.0000   | 1.0000         | 1.0000          | 1.0000           | 1.0000           |
| V&A vs. V&A&H | 1.0000          | 1.0000 | 1.0000   | 1.0000         | 1.0000          | 0.1754           | 1.0000           |
| V&H vs. V&A&H | 1.0000          | 1.0000 | 1.0000   | 1.0000         | 1.0000          | 0.9390           | 1.0000           |

\*Abkürzungen: NF=Kein Feedback, V=Visuell, A=Auditiv, H=Haptisch.

Die globale Signifikanz wurde durch den Friedman-Test ermittelt, gefolgt vom Wilcoxon Signed-Rank Test als Post-hoc-Analyse.

**Tabelle 4.1:** *Paarweise statistische Vergleiche (Post-Hoc-Analyse) der subjektiven Belastung (NASA-TLX) sowie der Usability-Metriken (Gestenerkennung und Präferenz). Dargestellt sind die Bonferroni-korrigierten p-Werte aus dem Wilcoxon Signed-Rank Test ( $N = 25$ ). Signifikante Ergebnisse bei ( $p \leq 0,0050$ ).*

Es fällt auf, dass bei den Nicht-Chirurgen aufgrund der Kontrollbedingung ohne Feedback im Vergleich mit den Bedingungen mit Feedback, eine Signifikanz vorliegt (siehe Tabelle 4.1). Hierbei liegen die Bonferroni-korrigierten p-Werte für den Raw TLX, die Frustration, die Gestenerkennung und die Präferenz durchgängig unter der festgelegten Schwelle von  $p < 0,0050$ . Im Gegensatz dazu sind die paarweisen Vergleiche zwischen den verschiedenen Feedback-Kombinationen größtenteils nicht signifikant. Insgesamt lässt sich daraus schlussfolgern, dass die Anwesenheit von Feedback, im Gegensatz zu keinem Feedback, der entscheidende Faktor für die Reduktion der subjektiven Belastung und die Steigerung der Nutzerakzeptanz ist. Die Kombination weiterer Modalitäten mit visuellem Feedback brachte laut dem NASA-TLX keinen weiteren signifikanten Effizienz- oder Belastungsvorteil.

Bei den Chirurgen zeigt der Raw NASA-TLX und die Dimensionen keine signifikanten Unterschiede. Die individuelle Frage zur Annehmlichkeit der Systemrückmeldung hingegen zeigt eine signifikant bessere Bewertung der visuellen und haptischen Rückmeldung. Während die Zeit bis zur Eingabe keine direkte Rückmeldung über die Eignung der Rückmeldeart liefern kann, eignet sich die gemessene Zeit nach dem künstlich eingebauten Fehler, um zu erkennen, ob der Nutzer direkt erkannt hat, dass seine Eingabe nicht funktioniert hat und er diese deswegen wiederholen musste. So fällt sowohl bei den Nicht-Chirurgen als auch Chirurgen auf, dass bei der trimodalen Rückmeldeart am schnellsten eine erneute Eingabe

getätigt wurde. Bei den Nicht-Chirurgen lässt sich allgemein erkennen, dass alle Bedingungen mit Systemfeedback eine ähnliche zweite Eingabedauer haben. Bei den Chirurgen hingegen gibt es größere zeitliche Unterschiede. So dauerte es bei dem visuellen und haptischen Feedback etwa 4,79 Sekunden und bei dem visuellen und auditiven Feedback etwa 4,37 Sekunden. Das Visuelle Feedback hatte mit 3,55 Sekunden eine schnellere erneute Eingabe. Diese Werte sollten jedoch nur mit Vorsicht betrachtet werden. Aufgrund der Haltung der Hand, kam es zu Fehlern in der Gestenerkennung, wodurch das System nicht ausgeführte Eingaben registrierte und die Studienteilnehmer somit keinen künstlichen Fehler erlebten, da dieser durch das versehentliche Erkennen einer Eingabegeste, übersprungen wurde.

Bei der Auswertung der Videoaufnahmen ist vor allem bei den Chirurgen während der visuellen Rückmeldung aufgefallen, dass oftmals eine direkte Mehrfacheingabe getätigt wurde und bis zu fünf Mal hintereinander Zeigefinger und Daumen berührt worden sind. Dies lässt sich auch in dem Durchschnitt der Eingabeversuche pro Stroop-Test erkennen. Zusammen mit den Bemerkungen von zwei Chirurgen, dass die visuelle Rückmeldung kaum erkannt wurde, lässt sich die schnelle Reaktionszeit bei künstlich eingebautem Fehler bei der visuellen Systemrückmeldung durch die erhöhte Mehrfacheingabe erklären.

Die Auswertung der 10 Chirurgen zeigte unter dem reinen visuellen Feedback die niedrigste Fehlerrate. Dennoch wich die subjektive Präferenz stark von dieser Leistungsmetrik ab und war eindeutig durch den simulierten OP-Kontext geprägt. Während das reine visuelle Feedback im Ranking am häufigsten als schlechteste Option bewertet wurde, präferierten die Chirurgen die Kombination aus visuellem und haptischem Feedback am häufigsten. Obwohl die Fehlerrate bei dieser Bedingung leicht höher war als beim rein visuellen Feedback, gab es bei den Raw-NASA-TLX Scores keine signifikanten Unterschiede in der wahrgenommenen Belastung.

Zusammenfassend zeigt die Studie, dass multimodales Feedback sowohl die Leistung als auch die subjektive Sicherheit erhöht. Für allgemeine Nutzer stellt die Kombination aus visuellem, auditivem und haptischem Feedback die optimale Lösung dar, da sie Fehlerraten minimiert und die höchste Akzeptanz genießt. Im spezifischen OP-Kontext hingegen ist die Kombination aus visuellem und haptischem Feedback die bevorzugte Lösung der Chirurgen, da die Haptik die notwendige Verlässlichkeit in einer lauten Umgebung bietet. Allerdings litt die Studie unter technischen Einschränkungen bei der Gestenerkennung, was nachträgliche Videoauswertungen nötig machte. Für zukünftige Anwendungen sollten daher mehrere Perspektiven für das Kamerasystem und eindeutige Audiosignale für die auditive Rückmeldung entwickelt werden, um die Ergebnisse im realen Kontext weiter zu validieren. Ebenso ist die Anzahl an teilnehmenden Chirurgen sehr gering. Eine höhere Anzahl an Chirurgen könnte einen besseren Einblick auf eine sich weiter ausprägende Präferenz geben. Insgesamt hat die Studie jedoch gezeigt, dass die Meinung in vielen Fällen individuell sein kann und das haptische Feedback dementsprechend als sehr hilfreich oder eher unangenehm eingestuft wurde.

## 5. Diskussion

Die durchgeführte Studie befasste sich mit der Gestaltung und Bewertung multimodaler Systemrückmeldungen für eine gestengesteuerte Anwendung, welche in einer Operationsaal-Umgebung genutzt werden soll. Ziel war es, die Effizienz und Akzeptanz von visueller, auditiver und haptischer Rückmeldung sowie deren Kombinationen zu untersuchen, insbesondere im Hinblick auf die potenziellen Stressoren im OP. Die Ergebnisse zeigen, dass es wichtig ist, die Umgebung, in welcher das Endprodukt eingesetzt werden soll, in der Untersuchung zu berücksichtigen. Ebenso verdeutlichen die Ergebnisse, neben der reinen Zeit- und Effizienzmessungen, die Relevanz der subjektiven Belastung und qualitativer Befragung als wichtige Metrik.

### 5.1 Die Notwendigkeit von Feedback

Die Ergebnisse bestätigen die fundamentale Bedeutung jeglicher Form von Systemrückmeldung. Die Durchführung unter der Bedingung ohne Feedback schnitt in allen Messungen inakzeptabel ab und wurde von allen 25 Nicht-Chirurgen als am schlechtesten bewertet.

Das Fehlen von Systemrückmeldung führte zu einem Gefühl des Kontrollverlusts bei den Nutzern. Die Probanden beschrieben die entsprechenden Durchführungen als sehr verwirrend und sehr hilflos. Die Bedingung ohne Feedback hat ebenfalls die höchste durchschnittlichen Anzahl an Eingabeversuchen, welche fast doppelt so hoch wie bei den Bedingungen mit Systemrückmeldung war. Die Nutzer strebten danach, den Zustand des Systems herauszufinden, was zu überschüssigem Mehraufwand führte und somit die Hypothese 5 bestätigte. Psychologisch gesehen deutet dieses Ergebnis darauf hin, dass das System ohne Feedback die Kluft der Bewertung nicht schließen kann.

### 5.2 Multimodalität und Effizienz

Die Annahme, dass multimodales Feedback die Leistung gegenüber rein visuellem Feedback steigert (Hypothese 1), wurde unter den untersuchten Bedingungen in Bezug auf die subjektive Sicherheit und Präferenz bestätigt, lässt sich jedoch nicht in allen Leistungs-Metriken des NASA-TLX erkennen.

Die Bedingung mit visuellem, auditivem und haptischen Feedback erzielte bei den Nicht-Chirurgen die geringste Fehlerrate. Dies kann dadurch erklärt werden, dass das redundante Feedback den visuellen Kanal entlastete und es dem Nutzer ermöglichte schneller zur sekundären Aufgabe zurückzukehren. Der aktuelle Forschungsstand besagt, dass die Nutzung auditiven oder haptischen Feedbacks zusammen mit visuellem Feedback eine erhöhte Effizienz in Form von schnellerer Reaktionszeit zeigt. Es wurde jedoch auch festgestellt, dass die Kombination aller

drei Feedbackarten keinen Vorteil der Effizienz in Betracht der Zeit zeigt. Die durchgeführte Studie bestätigt diese Befunde. Multimodalität erhöht nicht zwingend die Geschwindigkeit der Reaktionszeit, sondern gewährleistet durch redundante Informationen die maximale subjektive Sicherheit und hat aus diesem Grund ebenfalls die geringste Frustration unter den Nutzern hervorgerufen.

### 5.3 Haptik im OP

Die Ergebnisse der zweiten Studie mit Chirurgen belegen, dass die wahrgenommene Zuverlässigkeit der trimodalen Systemrückmeldung im Kontext eines längeren Aufenthalts im Operationssaal unter hohen OP-ähnlichen Lärmbedingungen betrachtet werden muss.

Die Chirurgen präferierten die Durchführung mit visueller und haptischer Rückmeldung. Haptisches Feedback wurde als klarste und sicherste Bestätigungsmethode beschrieben, da es entlastend für die Augen sei und das fehlende taktile Feedback physischer Geräte bei der berührungslosen Interaktion ersetzen könnte. Zudem erfordern haptische Signale nur geringe Aufmerksamkeitsressourcen. Die Akzeptanz des haptischen Signals deutet darauf hin, dass die Kompatibilität mit der Umgebung für den Endnutzers wichtig ist.

### 5.4 Herausforderung des Auditiven Feedbacks

Die Eignung von auditiver Rückmeldung unter den Lärmbedingungen des OPs (Hypothese 2) konnte nicht qualitativ signifikant bestätigt werden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das auditive Feedback nicht separat, sondern nur in Kombination mit visuellem Feedback getestet wurde. Trotz dessen, stellen die qualitativen Kommentare der Probanden die Eignung der auditiven Rückmeldung stark infrage.

Die Umgebung des Operationssaals ist durch hohe Lärmpegel (51 dB bis 79 dB)[26] geprägt, was den Extraneous Load erhöht [23]. Mündliche Anmerkungen von Chirurgen bestätigten, dass das auditive Signal im OP untergehen würde. Das Verwechseln der Bestätigungstöne mit der simulierten Geräuschkulisse, welches bei vier Probanden auftrat, ist ebenfalls problematisch. Anstatt den visuellen Kanal zu entlasten, wird der Blick der Probanden zurück zum Interface gezwungen, wenn der Bestätigungston mit den Tönen der Geräuschkulisse verwechselt wurde. Die Anforderung des Forschungsstands, dass ein Audiosignal 10 bis 15 dB lauter sein muss als der Hintergrundlärm, um zu 90% verstanden zu werden, würde im OP-Kontext dazu führen, dass die Gesamtlärmbelastung und der Extraneous Load weiter erhöht wird.

### 5.5 Limitationen der Studie

Im Nachhinein lassen sich aufgrund von fehlerhaften Messungen und der allgemeinen Gestaltung der Studie einige Limitationen und die daraus folgenden Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen der Gestensteuerung im OP-Umfeld feststellen.

Die Erkennung der Eingabegeste stellt eine Limitation der Studie dar. In einigen Fällen wurde die Eingabegeste aufgrund der Handhaltung fälschlicherweise erkannt. Durch die Auswertung des Videomaterials konnte herausgefunden werden, dass die Software im Durchschnitt das Dreifache an Interaktionen registrierte. Die Fehlregistrierungen lassen sich durch einen ungünstigen Winkel der Hand zur Kamera erklären. Während die Software bei einigen Durchgängen die Eingaben fehlerfrei erkannte, kam es in einigen Fällen bis zu 25 Fehlregistrierungen pro Aufgabe. Aus diesem Grund wurden die Messungen der Eingabeversuche durch die Software nicht für die Gesamtauswertung berücksichtigt.

Da die fehlerhaften Registrierungen der Eingabegeste überwiegend außerhalb der Antwortmöglichkeiten erfolgten, kam es lediglich bei zwei Probanden zu einer ungewollten Auswahl einer falschen Antwort. Diesen Probanden wurde die falsche Eingabe aufgrund der fehlerhaften Messungen erklärt, sodass diese nicht denken, dass der Fehler auf sie und ihre Leistung zurückzuführen ist. Die beiden Probanden, bei denen es zu der ungewollten Auswahl kam, wurden in die Auswertung mit aufgenommen, da wir davon ausgehen, dass die Teilnehmer keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse zum Feedback der Gestensteuerung haben. Da die Präferenz und die Arbeitsbelastung der verschiedenen Systemrückmeldungen und nicht die technische Zuverlässigkeit der Gestenerkennung untersucht wird, gehen wir davon aus, dass die fehlerhaften Registrierungen das Gesamtergebnis nicht signifikant beeinflussen.

Sollte auditives Feedback verwendet werden, muss dieses akustisch eindeutig gestaltet werden, um Verwechslungen mit Hintergrundgeräuschen im OP zu vermeiden. Ein anderer Ton, der sich stärker von den Umgebungsgeräuschen hervorhebt, könnte eine Alternative zu dem haptischen Armband darstellen und eine weitere Option für Chirurgen bieten, die das Tragen eines Vibrationsarmbandes als sehr unangenehm empfanden. Das visuelle und haptische Feedback sollte trotz dessen als primäre Systemrückmeldung für chirurgische Systeme empfohlen werden, da sie die notwendige Verlässlichkeit liefert.

Zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen könnten an diese Ergebnisse anknüpfen, indem sie die Hypothesen zur haptischen Rückmeldung weiter validieren. Dabei könnte insbesondere die Entlastung des visuellen Kanals sowie die Stärkung des Sicherheitsgefühls im Kontext des Operationssaals im Fokus stehen und durch ergänzende Messungen, wie beispielsweise Eye-Tracking, überprüft werden. Eine höhere Teilnehmerzahl von Chirurgen wäre außerdem notwendig, um eindeutige Tendenzen in der Präferenz und mögliche geschlechtsspezifische Unterschiede weiter zu untersuchen. Außerdem empfiehlt es sich, sich mit den geteilten mentalen Modellen (Shared Mental Models SMM) in OP-Teams genauer auseinanderzusetzen. Diese Modelle sind für die Sicherheit in Krankenhäusern relevant und könnten untersuchen, wie verschiedene Arten der Systemrückmeldung die Koordination und Entscheidungsfindung im gesamten OP-Team beeinflusst.

## 6. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit untersuchte die Eignung und Akzeptanz verschiedener multimodaler Systemrückmeldungen für die berührungslose Gestensteuerung in einem simulierten Operationssaal-Umfeld. Der zentrale Beitrag der Arbeit ist die Bereitstellung kontextspezifischer Beweise für die Gestaltung eines HCI-Systems in der Umgebung des Operationssaals, wobei die subjektive Akzeptanz der Endnutzer (Chirurgen) im Vordergrund steht. Die Arbeit adressierte die Lücke in der Literatur, welche die Umgebungsfaktoren des OP-Umfelds, wie Lärm und die hohe kognitive Belastung des chirurgischen Personals, bei der Evaluierung von verschiedenen Arten der Systemrückmeldung vernachlässigt

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse lässt sich die Schlussfolgerung treffen, dass das Fehlen jeglicher Systemrückmeldung in einer kritischen Umgebung wie dem Operationssaal inakzeptabel ist und zu Frustration und Kontrollverlust führt.

Die Arbeit zeigt, dass die Akzeptanz von Feedback stark vom Nutzungskontext und den Nutzern abhängt. Die Durchführung unter der Bedingung mit visueller, auditiver und haptischer Rückmeldung ist die am meisten präferierte Bedingung unter der Nicht-Chirurgen, da sie maximale Sicherheit und Entlastung des visuellen Kanals bietet.

Für die Chirurgen hingegen, ist die Durchführung unter der Bedingung mit visuellem und haptischen Feedback die am meisten akzeptierte Lösung für den OP-Saal. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Chirurgen das haptische Signal aufgrund seiner Zuverlässigkeit und Fähigkeit präferieren. Haptisches Feedback wurde als die klarste und sicherste Bestätigungsmethode beschrieben, da es das fehlende taktile Feedback physischer Geräte ersetzt und auch unter hohem OP-ähnlichem Lärm sicher zu erkennen war. Im Gegensatz dazu wurde das auditive Feedback von einigen Chirurgen als ungeeignet für den OP eingestuft, da die Bestätigungstöne zwischen den Umgebungsgeräuschen untergingen oder diesen zu ähnlich waren.

Für die zukünftige Entwicklung wird empfohlen, die Robustheit der Gestensteuerung durch verbesserte Hardware, wie zusätzliche Kameras, zu erhöhen, um Fehlmessungen zu minimieren. Sollte auditives Feedback eingesetzt werden, ist eine Gestaltung mit akustisch eindeutigeren Signalen erforderlich, um Verwechslungen mit Hintergrundgeräuschen im OP zu vermeiden. Außerdem empfiehlt es sich für die weitere Validierung der Eignung der Haptik als Systemrückmeldung für den Operationssaal eine höhere Teilnehmerzahl von Chirurgen zu befragen.

# Literaturverzeichnis

- [1] Orestis Georgiou, William Frier, and Oliver Schneider. User experience and mid-air haptics: Applications, methods, and challenges. In Orestis Georgiou and Ed und Pacchierotti Claudio und Hoshi Tsutomu Frier, William und Freeman, editors, *Ultrasound Mid-Air Haptics for Touchless Interfaces*, pages 21–69. Springer International Publishing, Cham, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-04043-6\\_2.
- [2] Derek Black et al. Auditory display as feedback for a novel eye-tracking system for sterile operating room interaction. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 13(1):37–45, Januar 2018. doi: 10.1007/s11548-017-1677-3.
- [3] Z. S. Zhang, Y. Wu, and B. Zheng. A review of cognitive support systems in the operating room. *Surgical Innovation*, 31(1):111–122, Februar 2024. doi: 10.1177/15533506231218962.
- [4] George Evangelou, Orestis Georgiou, and Nick und Moore Jessica Brown, Emma und Hine. Mid-air haptic feedback improves implicit agency and trust in gesture-based automotive infotainment systems: a driving simulator study. In *Proceedings of the 16th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pages 116–124, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/3640792.3676882.
- [5] Heather Limerick, David Coyle, and Jessica W. Moore. The experience of agency in human-computer interactions: a review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8: 643, August 2014. doi: 10.3389/fnhum.2014.00643.
- [6] P. I. Cornelio Martinez, S. De Pirro, C. T. Vi, and S. Subramanian. Agency in mid-air interfaces. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*, pages 2426–2439, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/3025453.3025457.
- [7] Thobias J. Dube, Yuchen Ren, Heather Limerick, I. Scott MacKenzie, and Ahmud S. Arif. Push, tap, dwell, and pinch: Evaluation of four mid-air selection methods augmented with ultrasonic haptic feedback. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 6(ISS):565:207–565:225, November 2022. doi: 10.1145/3567718.
- [8] Ed Freeman, Do-Bo Vo, and Stephen Brewster. HaptiGlow: Helping users position their hands for better mid-air gestures and ultrasound haptic feedback. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pages 289–294, Juli 2019. doi: 10.1109/WHC.2019.8816092.

- [9] Vera Remizova, Antti Sand, I. Scott MacKenzie, Oleg Špakov, Katariina Nyyssönen, Ismo Rakkolainen, Anneli Kylliäinen, Veikko Surakka, and Yulia Gizatdinova. Mid-air gestural interaction with a large Fogscreen. *Multimodal Technologies and Interaction (MTI)*, 7(7):63, Juni 2023. doi: 10.3390/mti7070063.
- [10] Donald A. Norman. *The Design of Everyday Things*. Basic Books, New York, NY, USA, Überarbeitete und erweiterte neuauflage edition, 2013. ISBN 978-0465050659.
- [11] Farinaz Fotrousi, Samuel A. Fricker, and Markus Fiedler. The effect of requests for user feedback on quality of experience. *Software Quality Journal*, 26(2): 385–415, Juni 2018. doi: 10.1007/s11219-017-9373-7.
- [12] Marc Hassenzahl, Kati Eckoldt, and Michael T. Thielsch. User experience und experience design - konzepte und herausforderungen. In *Tagungsband UP09*, pages 233–237. Fraunhofer Verlag, 2009.
- [13] R. A. Purwanto, T. S. Ratri, M. S. Purwanti, F. K. Sari, P. Sari, R. L. Fitriani, and G. N. B. P. Wardana. Human-computer interaction: Enhancing user experience in interactive systems. *E3S Web Conf.*, 399:04037, 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202339904037.
- [14] Jakob Nielsen. Enhancing the explanatory power of usability heuristics. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '94)*, pages 152–158, New York, NY, USA, 1994. Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/191666.191729.
- [15] Simone Abrahão, Emilio Insfran, Anne Sluÿters, and Jean Vanderdonckt. Model-based intelligent user interface adaptation: challenges and future directions. *Software and Systems Modeling*, 20(5):1335–1349, Oktober 2021. doi: 10.1007/s10270-021-00909-7.
- [16] Gaurav Raj, Alok K. Chakraverti, and Suresh N. Mehta. User interface and user experience design methodologies and evaluation techniques: A systematic literature review. In *2024 1st International Conference on Advances in Computing, Communication and Networking (ICAC2N)*, pages 398–402, Dezember 2024. doi: 10.1109/ICAC2N63387.2024.10894982.
- [17] Toumi Issa and Pedro Isaias. Usability and human-computer interaction (HCI). In Toumi Issa and Pedro Isaias, editors, *Sustainable Design: HCI, Usability and Environmental Concerns*, pages 23–40. Springer, London, 2022. doi: 10.1007/978-1-4471-7513-1\\_2.
- [18] Manuel A. Pérez-Quinones and John L. Sibert. A collaborative model of feedback in human-computer interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 316–323, New York, NY, USA, 1996. Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/238386.238535.
- [19] Ben Brown, Panos Balatsoukas, and Matt und Buchan Iain Williams, Richard und Sperrin. Interface design recommendations for computerised clinical audit and feedback: Hybrid usability evidence from a research-led system. *International*

- Journal of Medical Informatics*, 94:191–206, Oktober 2016. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2016.07.010.
- [20] Arthur Sluÿters, S. Lambot, Jean Vanderdonckt, and Santiago Villarreal. Analysis of user-defined radar-based hand gestures sensed through multiple materials. *IEEE Access*, pages 1–1, 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3366667.
  - [21] George Evangelou, Orestis Georgiou, Emma Brown, and Jessica W. Moore. Sense of agency in gesture-based interactions: modulated by sensory modality but not feedback meaning. *Frontiers in Computer Science*, 7, Januar 2025. doi: 10.3389/fcomp.2025.1511928.
  - [22] Dimitar Tzolov et al. Impact of laparoscopic training, haptic feedback and visual haptic latency on virtual fine motor performance. *Scientific Reports*, 15 (1):32480, September 2025. doi: 10.1038/s41598-025-18862-6.
  - [23] E. E. Howie et al. Cognitive load management: An invaluable tool for safe and effective surgical training. *Journal of Surgical Education*, 80(3):311–322, März 2023. doi: 10.1016/j.jsurg.2022.12.010.
  - [24] Tolga Cetin, Alexander Mühlenbrock, and Volker und Weyhe Dirk und Us-lar Victor Zachmann, Gabriel und Weber. A virtual reality simulation of a novel way to illuminate the surgical field – a feasibility study on the use of automated lighting systems in the operating theatre. *Frontiers in Surgery*, 10, März 2023. doi: 10.3389/fsurg.2023.1055053.
  - [25] Rohit Naik and Hutan und Mylonas George und Darzi Ara Kogkas, Anastasios und Ashrafian. The measurement of cognitive workload in surgery using pupil metrics: A systematic review and narrative analysis. *Journal of Surgical Research*, 280:258–272, Dezember 2022. doi: 10.1016/j.jss.2022.07.010.
  - [26] Rhiannon Mcleod and Sarah und Elhassan Hazem Myint-Wilks, Lin und Davies. The impact of noise in the operating theatre: a review of the evidence. *Annals of The Royal College of Surgeons of England*, 103(2):83–87, Februar 2021. doi: 10.1308/rcsann.2020.7001.
  - [27] M. D. Giv, K. G. Sani, and A. und Majdabadi H. A. Alizadeh, M. und Valinejadi. Evaluation of noise pollution level in the operating rooms of hospitals: A study in iran. *Interventional Medicine and Applied Science*, 9(2):61–66, 2017. doi: 10.1556/1646.9.2017.2.15.
  - [28] World Health Organization (WHO). Guidelines for community noise, 2000. URL <https://www.who.int/publications/i/item/a68672>. Letzter Zugriff: 05.12.2025.
  - [29] L. R. Kennedy-Metz and S. und Arney D. und Dias R. D. und Zenati M. A. Arshanskiy, M. und Keller. Association between operating room noise and team cognitive workload in cardiac surgery. In *Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA)*, pages 89–93, Juni 2022. doi: 10.1109/CogSIMA54611.2022.9830675.

- [30] M. Mohammadian and H. und Kazemi R. Parsaei, H. und Mokarami. Cognitive demands and mental workload: A filed study of the mining control room operators. *Heliyon*, 8(2), Februar 2022. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e08860.
- [31] J. Au and A. und Mcleod R. Hamilton, S. und Webb. Decibels in the operating theatre: a study of noise levels during surgical procedures. *ANZ Journal of Surgery*, 94(10):1841–1845, Oktober 2024. doi: 10.1111/ans.19001.
- [32] R. K. Bali. Operating room protocols and infection control. In K. Bonanthaya and S. und Kumar V. V. und Rai A. Panneerselvam, E. und Manuel, editors, *Oral and Maxillofacial Surgery for the Clinician*, pages 173–194. Springer Nature, Singapur, 2021. doi: 10.1007/978-981-15-1346-6\\_9.
- [33] M. Al Amin and V. Baldacci, R. und Kayvanfar. A comprehensive review on operating room scheduling and optimization. *Operations Research*, 25(1):3, Dezember 2024. doi: 10.1007/s12351-024-00884-z.
- [34] Nisa Taşdemir and Derya Yılmaz Tank. Operating room nurses’ experiences of maintaining sterile technique: a qualitative study. *BMC Nursing*, 24:1184, September 2025. doi: 10.1186/s12912-025-03834-y.
- [35] E. Mandes and A. und Ohya K. und Sato Y. und Saito A. und Suzuki K. Sase, M. und Kuzu. A touchless control system for medical images based on hand gesture recognition and its evaluation in a surgical environment. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 12(1):37–45, 2017. doi: 10.1007/s11548-016-1482-4. URL <https://doi.org/10.1007/s11548-016-1482-4>.
- [36] Martin Hessling and Bernd Haag, Robert und Sicks. Review of microbial touch-screen contamination for the determination of reasonable ultraviolet disinfection doses. *GMS Hygiene and Infection Control*, 16:Doc30, November 2021. doi: 10.3205/dgkh000401.
- [37] Robert J. K. Jacob. What you look at is what you get: eye movement-based interaction techniques. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 11–18, 1990.
- [38] Sharon Cronin and Gordon Doherty. Touchless computer interfaces in hospitals: A review. *Health Informatics Journal*, 25(4):1325–1342, Dezember 2019. doi: 10.1177/1460458217748342.
- [39] P. D. Nath and K. Delamare, W. und Hasan. PalmSpace: Leveraging the palm for touchless interaction on public touch screen devices. *International Journal of Human-Computer Studies*, 184:103219, April 2024. doi: 10.1016/j.ijhcs.2024.103219.
- [40] L. Cabañero Gómez and I. und Villarreal V. Hervás, R. und González. Studying the generalisability of cognitive load measured with EEG. *Biomedical Signal Processing and Control*, 70:103032, September 2021. doi: 10.1016/j.bspc.2021.103032.

- [41] Safa Said et al. Validation of the raw NASA task load index (NASA-TLX) questionnaire to assess perceived workload in patient monitoring tasks: Pooled analysis study using mixed models. *Journal of Medical Internet Research*, 22(9): e19472, September 2020. doi: 10.2196/19472.

# Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Teile meiner Arbeit, die wortwörtlich oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Gleiches gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet, dazu zählen auch KI-basierte Anwendungen oder Werkzeuge. Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsleistung eingereicht.

Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit im Universitätsarchiv für wissenschaftliche Zwecke von Dritten eingesehen werden darf.

Ich bin damit einverstanden, dass die von mir vorgelegte und verfasste Arbeit zum oben genannten Zweck dauerhaft auf dem externen Server der aktuell von der Universität Bremen genutzten Plagiatsoftware, in einer institutionseigenen Bibliothek (Zugriff nur durch die Universität Bremen), gespeichert wird.

---

Unterschrift (*Nicole Steinke*)