

Aus der Radiologischen Universitätsklinik (Department) Tübingen  
Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie  
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. C. D. Claussen

**Analyse, Evaluierung und Optimierung der  
intraoperativen Mensch-Maschine-Interaktion**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Humanwissenschaften

der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard-Karls-Universität  
zu Tübingen

vorgelegt von

David Voss

aus

Hagen

2010

Dekan:

Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichtstatter:

Professor Dr. C. D. Claussen

2. Berichtstatter:

Professor Dr. H. Klaeren

# Zusammenfassung

Digitale medizinische Patientenbilder werden in der Regel beim Planen chirurgischer Eingriffe und der damit verbundenen Festlegung einer Operationsstrategie hinzugezogen. Während des Eingriffs werden solche Bilder häufig operationsbegleitend aus Gründen der Entscheidungsfindung, der Navigation und der Visualisierung bestimmter Strukturen vom Chirurgen betrachtet. Beim dazu notwendigen intraoperativen Steuern des bilddarstellenden Computers müssen v.a. hygienische Limitationen berücksichtigt werden, um den Patienten keiner Infektionsgefahr auszusetzen. Bezüglich der Bedienung des Computers bestehen signifikante Abweichungen zwischen der Ist- und der Soll-Situation. Während die Interaktion hauptsächlich im nicht sterilen Bereich des OPs von einem Assistenten auf Anweisung des Operators durchgeführt wird, wollen Chirurgen den Computer aus Gründen der Zeiteinsparung direkt bedienen. Der dabei eingesetzte Funktionsumfang ist im Gegensatz zur ständig steigende Zahl angebotener Features und zunehmender Programmkomplexität auf einige zentrale Funktionen beschränkt.

In der Evaluation hat sich gezeigt, dass Zeit vor allem durch das Benutzen eines Touchscreens eingespart werden kann - ob der Chirurg oder ein Assistent dieses Gerät bedient, spielt eine untergeordnete Rolle. Erst bei komplexeren Interaktionen bietet sich ein Übertragen der Kontrolle über den bilddarstellenden Computer an den Chirurgen an. Aktuelle Programme zum Betrachten und Manipulieren von Patientenbildern sind nur selten auf die Verwendung eines Touchscreens ausgelegt. Aus diesem Grund wurden 4 Bedienkonzepte erstellt, die für den Kontext der intraoperativen Bildbetrachtung aus ergonomischer und anthropometrischer Sicht sowie hinsichtlich ihres Funktionsumfangs optimiert wurden. Sowohl in der modellbasierten Quantifizierung als auch in einer abschließenden Evaluation mit Nutzern hat sich gezeigt, dass möglichst einfach und schnell zu bedienende Konzepte am gebrauchstauglichsten sind, verglichen mit solchen, deren Bedienung zugunsten der Sehflächenmaximierung des Patientenbildes komplexer ausfällt.

Für den vorliegenden Nutzungskontext einer intraoperativen Mensch-Maschine-Interaktion zur funktionsreduzierten Bildbetrachtung bieten sich somit Touchscreen-Systeme mit auf Bediengeschwindigkeit ausgelegten Software-Applikationen an.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielstellung . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Die Mensch-Maschine-Interaktion</b>	<b>5</b>
2.1	Die menschliche Kommunikation . . . . .	7
2.2	Die menschliche Wahrnehmung . . . . .	10
2.2.1	Der Sehsinn . . . . .	10
2.2.2	Der Hörsinn . . . . .	16
2.2.2.1	Auswirkungen von Lärm auf den Menschen . . . . .	20
2.3	Kognition . . . . .	22
2.3.1	Kognitive Prozesse . . . . .	22
2.3.1.1	Aufmerksamkeit . . . . .	22
2.3.1.2	Gedächtnis . . . . .	24
2.3.1.3	Lernen . . . . .	25
2.3.1.4	Das Sprachverstehen . . . . .	26
2.3.1.5	Planen, Schlussfolgern und Problemlösen . . . . .	26
2.4	Kognitive Modelle zur Quantifizierung der MMI . . . . .	27
2.4.1	GOMS . . . . .	27
2.4.1.1	KLM . . . . .	28
2.4.1.2	CMN-GOMS . . . . .	30
2.4.1.3	NGOMSL . . . . .	30
2.4.1.4	CPM-GOMS . . . . .	30
2.4.2	Fitts' Law . . . . .	34
2.4.3	Accot-Zhai Steering Law . . . . .	36
2.4.4	Das Human Processor Model . . . . .	37
2.4.5	Hick's Law . . . . .	40
2.5	Computer-Eingabegeräte . . . . .	41
2.5.1	Koordinatengebende Eingabegeräte . . . . .	44
2.5.2	Nicht koordinatengebende Eingabegeräte . . . . .	49
2.5.3	Multimodale MMI . . . . .	53

2.6	Computer-Ausgabegeräte . . . . .	55
2.6.1	Visuelle Ausgabegeräte . . . . .	55
2.6.2	Auditorische Ausgabegeräte . . . . .	60
2.6.3	Haptische Ausgabegeräte . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Ergonomie</b>	<b>63</b>
3.1	Definition und Entwicklung . . . . .	63
3.2	Gebrauchstauglichkeit . . . . .	66
3.2.1	Evaluieren der Gebrauchstauglichkeit . . . . .	69
3.2.2	Der Usability Engineering Lifecycle . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Die intraoperative MMI</b>	<b>75</b>
4.1	Bildgebende Verfahren . . . . .	76
4.2	Der Nutzungskontext . . . . .	80
4.2.1	Die Umgebung - der Operationssaal . . . . .	80
4.2.2	Die Benutzertypen . . . . .	89
4.2.3	Die Arbeitsaufgabe . . . . .	91
4.2.4	Die Arbeitsmittel . . . . .	93
4.3	Analyse der prä- und intraoperativen MMI . . . . .	95
4.3.1	Methode . . . . .	95
4.3.2	Ergebnisse . . . . .	96
4.3.3	Diskussion . . . . .	103
4.4	Evaluation der intraoperativen MMI . . . . .	108
4.4.1	Methode . . . . .	108
4.4.2	Ergebnisse . . . . .	118
4.4.3	Diskussion . . . . .	128
<b>5</b>	<b>Optimierung der intraoperativen MMI</b>	<b>139</b>
5.1	Software-ergonomische Gestaltung . . . . .	140
5.1.1	Anthropometrische Gestaltung . . . . .	140
5.1.2	Bedienungsgestaltung . . . . .	142
5.1.3	Graphische Gestaltung . . . . .	145
5.2	Vorstellung der Bedienkonzepte . . . . .	149
5.2.1	Konzept 1 . . . . .	151
5.2.2	Konzept 2 . . . . .	153
5.2.3	Konzept 3 . . . . .	154
5.2.4	Konzept 4 . . . . .	156

5.3	Quantifizierung der Bedienkonzepte . . . . .	157
5.3.1	Quantifizierung mit dem KLM . . . . .	157
5.3.2	Quantifizierung mit einem kombinierten Modell . . . . .	159
5.4	Evaluation der Gebrauchstauglichkeit der Bedienkonzepte . . . . .	163
5.4.1	Methode . . . . .	163
5.4.2	Ergebnisse . . . . .	165
5.4.3	Diskussion . . . . .	169
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>173</b>
	<b>Literatur</b>	<b>177</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>189</b>





# Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Mensch-Maschine-Interaktion . . . . .	6
2.2	Die Kommunikationsebenen . . . . .	9
2.3	Aufbau des menschlichen Auges . . . . .	12
2.4	Der RGB-Farbraum . . . . .	13
2.5	Funktionale Verbindungen von Ganglienzellen . . . . .	14
2.6	Der Texturgradient . . . . .	14
2.7	Die Gestaltprinzipien . . . . .	16
2.8	Die Hörfläche des menschlichen Ohres . . . . .	17
2.9	Die Cochlea . . . . .	19
2.10	Das Gedächtnismodell . . . . .	25
2.11	Kognitives Ressourcenmodell . . . . .	27
2.12	CMN-GOMS . . . . .	31
2.13	NGOMSL . . . . .	32
2.14	CPM-GOMS . . . . .	33
2.15	Fitts' Law . . . . .	35
2.16	Steering Law . . . . .	36
2.17	Das Human Processor Model . . . . .	39
2.18	Hick's Law . . . . .	40
2.19	Interaktionsgeräte . . . . .	42
2.20	Wirkprinzipien . . . . .	43
2.21	Die Mouse . . . . .	44
2.22	Der Trackball . . . . .	45
2.23	Der Joystick . . . . .	46
2.24	Das Tablett . . . . .	47
2.25	Der Touchscreen . . . . .	49
2.26	Soft- und Hardkey-Tastaturen . . . . .	50
2.27	LCD und CRT . . . . .	57
2.28	3D-Brillen . . . . .	59
3.1	Die Komponenten der Gebrauchstauglichkeit . . . . .	67

3.2	Der Usability Engineering Lifecycle . . . . .	73
4.1	Bildgebende Verfahren im Überblick . . . . .	79
4.2	Räumlicher Aufbau des OP . . . . .	81
4.3	Das Anlegen steriler Kleidung . . . . .	84
4.4	Platzsituation im OP . . . . .	88
4.5	Die Arbeitsaufgabe der intraoperativen Bildbetrachtung . . . . .	93
4.6	Orte für eine bildgestützte Operationsplanung . . . . .	97
4.7	Patientenbildbetrachtung differenziert nach Krankenhäusern . . . . .	98
4.8	Patientenbildbetrachtung differenziert nach Disziplin . . . . .	99
4.9	Prä- und intraoperativ verwendete Eingabegeräte . . . . .	99
4.10	Akzeptanzgrad für die Verwendung verschiedener Eingabegeräte . . . . .	100
4.11	Häufigkeit verwendeter Bildmanipulationsfunktionen . . . . .	101
4.12	Benutzertypen einer intraoperativen Computerbedienung . . . . .	101
4.13	Bevorzugte Benutzertypen für eine Computerbedienung . . . . .	102
4.14	Darstellung der Computer-Eingabegeräte und Software . . . . .	110
4.15	Versuchsaufbau im OP . . . . .	113
4.16	Aufgabendauer gesamt . . . . .	119
4.17	Zeitaufwand für Aufgabe 1 . . . . .	120
4.18	Zeitaufwand für Aufgabe 2 . . . . .	120
4.19	Fehleranzahl gesamt . . . . .	121
4.20	Fehleranzahl Aufgabe 1 . . . . .	122
4.21	Fehleranzahl Aufgabe 2 . . . . .	122
4.22	Fehlerdifferenzierung bei Experiment I . . . . .	123
4.23	Fehlerdifferenzierung bei Experiment II . . . . .	123
4.24	Lernkurven bei Experiment I . . . . .	124
4.25	Lernkurven bei Experiment II . . . . .	125
4.26	Zufriedenheit mit den Eingabegeräten insgesamt . . . . .	125
4.27	Zufriedenheit mit den Eingabegeräten für Aufgabe 1 . . . . .	126
4.28	Zufriedenheit mit den Eingabegeräten für Aufgabe 2 . . . . .	126
5.1	Anthropometrische Dimensionierung des Arbeitsplatzes . . . . .	141
5.2	Aufmerksamkeitserregung . . . . .	149
5.3	Konzept 1 . . . . .	152
5.4	Bedienablauf von Konzept 1 . . . . .	152
5.5	Konzept 2 . . . . .	153
5.6	Bedienablauf von Konzept 2 . . . . .	154
5.7	Konzept 3 . . . . .	155

5.8	Bedienablauf von Konzept 3 . . . . .	155
5.9	Konzept 4 . . . . .	156
5.10	Zeigebewegung zur Schaltfläche am Touchscreen . . . . .	160
5.11	Zeitaufwand insgesamt . . . . .	166
5.12	Gemessener und vorhergesagter Zeitaufwand . . . . .	166
5.13	Lernkurven . . . . .	167
5.14	Zufriedenheit mit der Bedienung der Konzepte . . . . .	168



# Tabellenverzeichnis

2.1	Die menschlichen Sinnesmodalitäten . . . . .	10
2.2	Lärmqualitäten . . . . .	20
2.3	KLM-Operatoren . . . . .	28
2.4	KLM Heuristiken . . . . .	29
2.5	Eignungsgrad von Interaktionsgeräten . . . . .	53
4.1	Lärmmessung im OP . . . . .	85
4.2	Untersuchung des Wohlbefindens im OP . . . . .	87
4.3	Häufigkeit der Computernutzung privat und während der Arbeit . . . . .	96
4.4	Am häufigsten verwendete Computeranwendungen . . . . .	96
4.5	Betrachtungsvorliebe von Patientenbildern . . . . .	97
4.6	Probleme bei einer intraoperativen Computerbedienung . . . . .	102
4.7	Differenzierung der Nutzererfahrung . . . . .	111
4.8	Maschinen-Fehler . . . . .	116
4.9	User-Fehler . . . . .	116
4.10	Erfahrung mit dem Computer und Eingabegeräten . . . . .	118
4.11	Ranking der Eingabegeräte bei Experiment I . . . . .	127
4.12	Ranking der Eingabegeräte bei Experiment II . . . . .	127
4.13	Qualitative Probandenaussagen . . . . .	128
4.14	Gerätebewertung vor und nach dem Test . . . . .	128
4.15	Bewertung der Gebrauchstauglichkeit nach der MAUT . . . . .	136
5.1	Körpermaße . . . . .	142
5.2	Auswirkungen des Farbkontrasts auf die Leserlichkeit . . . . .	146
5.3	Farbkodierung von Informationsklassen . . . . .	147
5.4	Merkmalsausprägungen der Bedienkonzepte . . . . .	151
5.5	KLM-Operatorbeschreibung . . . . .	158
5.6	Konzeptspezifische Funktionszuordnung . . . . .	158
5.7	KLM-Quantifizierung . . . . .	158
5.8	Zeitaufwand für das Zeigen auf eine Schaltfläche . . . . .	161
5.9	Zeitaufwand für das Entscheiden für eine Funktion bzw. Parameter . . . . .	161

5.10	Zeitaufwand je Ausführungsart einer Funktion . . . . .	162
5.11	Quantifizierung mit dem kombinierten Modell . . . . .	162
5.12	Summe aller aufgetretenen Fehler . . . . .	167
5.13	Ranking der Bedienkonzepte . . . . .	168
5.14	Bewertung der Gebrauchstauglichkeit nach der MAUT . . . . .	170

# 1 Einleitung

Die Digitalisierung, Automatisierung und Optimierung von Arbeitsabläufen setzt sich weltweit in immer mehr Lebensbereichen durch. Im modernen Krankenhaus erfolgt ein großer Teil der Verwaltung medizinischer und administrativer Patientendaten computerbasiert in Form sogenannter Krankenhausinformationssysteme. Den Workflow der Diagnostik und der Therapie in der Radiologie beschreibt man mittlerweile häufig als „filmlos“, da dem Arzt medizinische Patientenbilder von unterschiedlichen Bildgebungsmodalitäten wie der Computer- (CT) und Magnetresonanztomographie (MRT) in digitaler Form bereitgestellt werden. Dies liegt u.a. an der steigenden Anzahl von Einzelbildern, deren Verteilung und Administration durch ein Picture Archiving and Communication System (PACS) aufgrund des hohen Informationsvolumens häufig nur noch digital zu bewerkstelligen sind. Beispielsweise kann eine CT-Aufnahme zu hunderten von Schnittbildern führen. Als Konsequenz wurden herkömmliche Leuchtkästen zur Betrachtung von Röntgenfilmen in weiten Teilen verdrängt - generell nimmt der Computer eine zunehmend zentrale Rolle zur Steuerung integrierter Elemente in der Domäne des gesamten Krankenhauses ein [DMT02, VGS<sup>+</sup>97, WHR<sup>+</sup>06, Sme05].

Durch mit dem PACS verbundene Visualisierungsprogramme können Patientenbilder auch im Operationssaal (OP) dynamisch dargestellt werden. Intraoperativ, also während eines laufenden chirurgischen Eingriffs, wird zunehmend von solchen operationsbegleitenden Bildern Nutzen gemacht. Dies geschieht zum einen aus Gründen der Visualisierung bestimmter Körperstrukturen und metabolischer Prozesse, aber auch zur Navigation und als Entscheidungshilfe für den Chirurgen und sein Team. In Verbindung damit sind präzisere Eingriffe plan- und durchführbar, was zur Erhöhung der Patientensicherheit und zu einer Zeitersparnis führt [JM07]. Vor dem Hintergrund, dass der OP zu den teuersten Einrichtungen des Krankenhauses zählt, besteht darüber hinaus ein dementsprechend starkes wirtschaftliches Interesse, mit kürzeren Operationszeiten Kosten zu reduzieren bzw. einen höheren Patientendurchlauf zu ermöglichen [Lem06]. Zwar wird in einigen medizinischen Disziplinen wie der Orthopädie und der Neurochirurgie bildgestützte im OP gearbeitet, doch ist davon auszugehen, dass mit steigender Verfügbarkeit von Patientenbildern dessen Gebrauch

in allen operativen Bereichen zunehmen wird [AAAG00].

Die Bedienung eines technischen Systems bedeutet in der Regel einen bilateralen Austausch von Informationen. Eine solche Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) ist ein komplexer Vorgang, wobei die reibungslose Verständigung zwischen beiden Kommunikationspartnern sowohl vom Menschen als auch von der Maschine gleichermaßen abhängt.

Die Ergonomie geht der Optimierung der MMI nach. Damit verbunden kann die Leistung und des Wohlbefinden des Nutzers durch das Anpassen der Arbeitsbedingungen an den Menschen verbessert werden. Obwohl einige Methoden dieser Wissenschaft schon auf zahlreiche Anwendungsgebiete erfolgreich angewandt wurden, existieren in unterschiedlichen Aufgabendomänen häufig noch signifikante ergonomische Defizite. In solchen Fällen muss sich, umgekehrt, der Mensch bei einer Bedienung an die Maschine anpassen.

Hinsichtlich der intraoperativen Betrachtung und der Manipulation digitaler Patientenbilder am Computer stellt der OP ein eher unergonomisches Arbeitsumfeld dar, weil eine geräteübergreifende MMI durch die dort herrschenden Rahmenbedingungen stark eingeschränkt wird. Der OP ist ein heterogener Arbeitsplatz, der primär für das Ausführen von medizinischen Eingriffen am Patienten ausgelegt ist. Er ist eingeteilt in den sterilen und den nicht sterilen Bereich und weist variierende Licht-, Geräusch-, Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse auf. Um den Patienten keiner Infektionsgefahr auszusetzen, unterscheidet sich die Gerätebedienung an diesem Ort v.a. aufgrund der Einhaltung hygienekritischer Richtlinien erheblich von der an einem homogenen Arbeitsplatz - etwa dem gewöhnlichen Büro.

Weil moderne Visualisierungsprogramme darüberhinaus aufgrund der stetig steigenden Zahl angebotener Funktionen immer komplexer zu bedienen sind, besteht im OP die dringliche Notwendigkeit einer ergonomischen Optimierung der Interaktion zwischen Mensch und Maschine.

### 1.1 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, die intraoperative MMI anhand des Nutzungskontexts der Betrachtung und der Manipulation digitaler Patientenbilder am Computer aus ergonomischer Sichtweise zu analysieren, zu evaluieren und zu optimieren. Dafür müssen die für eine Interaktion zwischen Mensch und Maschine relevanten Prozesse im Vorfeld erläutert werden. Im Hinblick auf den Menschen betrifft dies die Beschreibung der Wahrnehmung und der kognitiven Integration von Informationen aus seiner Umwelt, wobei auch die damit verbundenen Kapazitäten und Limitationen



berücksichtigt werden müssen. Im Hinblick auf die Maschine sind die peripheren Schnittstellengeräte zur Ein- und Ausgabe von Informationen mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen vorzustellen. Im Anschluss daran werden die für eine Analyse, Evaluierung und Optimierung der MMI benötigten Methoden aus dem Anwendungsfeld der Ergonomie bzw. des Usability-Engineerings aufgeführt. In der darauffolgenden krankenhausesübergreifenden Analyse des Nutzungskontexts gilt es zu klären, wie Patientenbilder intraoperativ aktuell verwendet werden und auf welche Weise der bilddarstellende Computer bedient wird. In der anschließenden Evaluierung der MMI im OP soll untersucht werden, wie gut sich verschiedene Computer-Eingabegeräte für eine intraoperative Interaktion zwecks der Patientenbildbetrachtung eignen und welche der vorgestellten Personengruppe diese Interaktion am besten durchführen sollte. Auf den Ergebnissen der Analyse und der Evaluierung aufbauend werden mehrere Optimierungsansätze erarbeitet, die in Form unterschiedlicher Bedienkonzepte umgesetzt werden und die für den vorliegenden Nutzungskontext aus ergonomischer und anthropometrischer Sicht optimiert werden sollen. Im letzten Schritt dieser Arbeit gilt es, das gebrauchstauglichste Konzepte anhand einer abschließenden Evaluierung zu identifizieren und dieses zu einer finalen Optimierungslösung auszuformulieren.



## 2 Die Mensch-Maschine-Interaktion

Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine entspricht dem Austausch und der Verarbeitung von Informationen unterschiedlicher Art, wahrgenommen über Eingangskanäle und vermittelt über Ausgangskanäle (Abb. 2.1). Der Mensch kann extrinsische (äußere) Informationen beispielsweise über den Seh- und Hörsinn aufnehmen und sie unter anderem durch Sprache und Gestik an einen Kommunikationspartner weiterleiten. Im Gegensatz zur Kommunikation zwischen Menschen, sind bei der Mensch-Maschine-Interaktion geeignete Schnittstellen für eine Verständigung notwendig wie etwa Tastatur und Maus bzw. der Bildschirm. Geräte, die einem solchen Zweck dienen, werden als Computer-Eingabe- und -Ausgabegeräte bezeichnet (Kap. 2.5, 2.6). Zwischen dem Wahrnehmen und Ausgeben von Informationen werden verarbeitende Prozesse angestoßen - beim Menschen spricht man von kognitiven Prozessen (siehe Kapitel 2.3). Eine Informationsrückkopplung kann auch intrinsisch (von innen heraus) stattfinden, zum Beispiel bei einer Hand-Augen-Koordination. Im weiteren Verlauf werden die relevanten Aspekte einer MMI vorgestellt, um den Ablauf mitsamt seinen Kapazitäten und Limitierungen verstehen zu können.

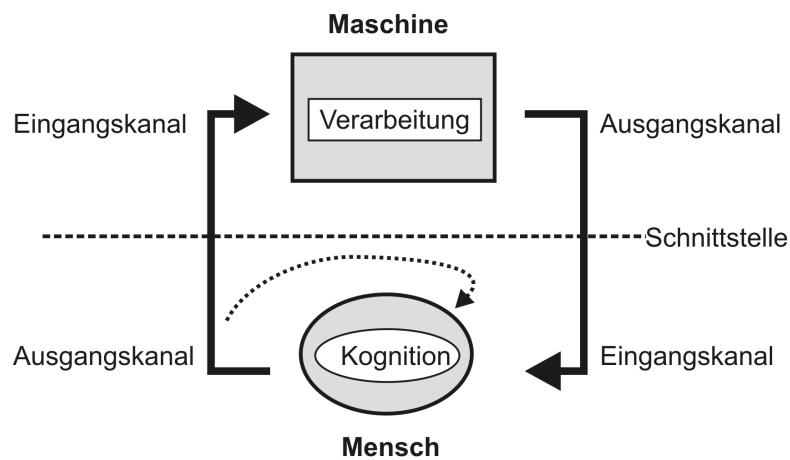


Abbildung 2.1: Informationsfluss bei einer MMI, nach Schomaker et al. [SNC<sup>+</sup>95, S. 9]. Informationen (schwarze Pfeile) werden extrinsisch über Eingangskanäle wahrgenommen und anschließend weiterverarbeitet - beim Menschen spricht man dabei von der Kognition. Durch Ausgangskanäle werden Informationen ausgegeben, wobei die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine in Form von Schnittstellen zustande kommt. Eine intrinsische Rückkopplung von Informationen beim Menschen ermöglicht die Ausführung komplexer koordinativer Handlungen, wie bei einer Hand-Augen-Koordination (gestrichelter Pfeil).

## 2.1 Die menschliche Kommunikation

Im Laufe der Evolution hat sich der Mensch ein umfangreiches Repertoire an Kommunikationstechniken angeeignet. Das Entwickeln der Sprache zählt dabei zu unseren herausragendsten Eigenschaften, doch spielen ebenso Mimik und Gestik eine wichtige Rolle beim Kommunizieren mit anderen Personen. Die Relevanz der genaueren Betrachtung der menschlichen Kommunikation im Kontext der MMI fasst Dahm mit folgenden Sätzen zusammen [Dah06, S. 112]:

„Der Mensch, der mit einem Computer interagiert, reagiert unbewusst so, als ob er mit einem anderen Menschen kommunizieren würde. Das ist nicht zu vermeiden, da auch die aktuelle Kommunikations-Software des Menschen sehr alt und auf Menschen als Gegenüber ausgerichtet ist.“

Eine Kommunikation im Alltag bedeutet den Austausch von Informationen beliebiger Art zwischen zwei oder mehreren Personen, wobei auch Schweigen als Information verstanden werden kann - z.B. falls man seinen Gesprächspartner nicht verstanden hat. Die Übertragung zwischen Sender und Empfänger wird dabei durch unterschiedliche Medien realisiert - wie eingangs erwähnt, werden bei einer Mensch-Mensch-Kommunikation verschiedene Modalitäten verwendet, neben der Sprache auch Mimik und Gestik etwa, um den sprachlichen Inhalt mit Emotionen zu erweitern. Dem Computer stehen für die Übermittlung von Informationen vor allem Text, Animationen, Geräusche und Videos zur Verfügung, wobei man im Fall eines wechselseitigen Austauschs von einem interaktiven System spricht. Um Problemen bei einer MMI vorzubeugen bzw. diese einzugrenzen, ist es wichtig, zu verstehen, wie der Mensch eine fehlerrobuste Kommunikation bewerkstelligt.

Die Semiotik ist die Lehre von den Zeichen und versteht unter einer Kommunikation den Austausch von Zeichen - diese können unter anderem Schriftzeichen, gesprochene Laute, Lichtsignale, Bilder oder Symbole sein. Es wird zwischen drei Ebenen unterschieden, auf denen ein Informationstransfer stattfindet (Abb. 2.2):

- Die syntaktische Ebene ist die niedrigste Ebene. Sie umfasst den Vorrat an Zeichen, der beiden Kommunikationsteilnehmern verständlich ist sowie auch das Wissen über Beziehungen zwischen den Zeichen in Form von Regeln. Beim Menschen werden Zeichen als elementarste Einheiten nach den Regeln der Rechtschreibung und des Wortschatzes der jeweiligen Sprache zu Wörtern und diese wiederum nach der vorliegenden Grammatik zu Sätzen zusammengesetzt. Verstöße gegen die Regeln der Syntax, sei es aus Unkenntnis oder Versehen,

können dabei zu Kommunikationsproblemen führen. Ebenfalls fehleranfällig wird eine Syntax, wenn sie nicht eindeutig definiert ist, wie folgendes Beispiel veranschaulicht [Dah06, S. 114]:

„Zwei Drittel aller Männer halten Frauen für egoistisch.“

Obwohl syntaktisch korrekt, erlaubt dieser Satz zwei unterschiedliche Interpretationen. Bei künstlichen Programmiersprachen ist aus diesem Grund die Syntax stets eindeutig und unmissverständlich formuliert, so dass der Compiler diese ohne Probleme in Maschinen-Code übersetzen kann. Damit eine Kommunikation reibungslos zustande kommt, müssen sowohl Sender als auch Empfänger von Informationen über den gleichen Bestand an Zeichen verfügen.

- Die semantische Ebene beschreibt die Bedeutung der Zeichen, sowohl einzeln als auch in Kombination miteinander. Ein Zeichen kann mehrdeutig sein und seine Interpretation vom vorliegenden Kontext abhängen - so hat die Wurzel eine variierende Bedeutung, je nachdem, ob sie im Zusammenhang der Mathematik, Botanik oder Zahnmedizin Verwendung findet. Der Linguist Noam Chomsky gibt ein Beispiel für einen auf syntaktischer Ebene korrekten Satz, mit jedoch widersprüchlicher Semantik [Cho57, S. 15]:

„Colorless green ideas sleep furiously.“

Durch das Benutzen zusätzlicher Medien bei einer Kommunikation wird diese zwar inhaltlich reicher, aber auch leichter anfällig für Fehler, beispielsweise bei kulturell bedingter, unterschiedlicher Interpretation einer Geste. Sender und Empfänger müssen Zeichen deshalb unter Betrachtung des gleichen Kontexts verwenden.

- Fehler erschweren oder verhindern einen erfolgreichen Informationsaustausch und müssen dynamisch im Verlauf einer Kommunikation korrigiert werden. Die pragmatische Ebene stellt die Ebene des sprachlichen Handelns dar, auf der semantische und syntaktische Probleme erkannt und behoben werden. Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten anderen Ebenen, ist ihr Verhalten dynamisch, z.B. wenn der Empfänger einer Information eine Nachfrage stellen muss, da er diese nicht verstanden hat. Dazu gibt es unterschiedliche Dialogformen. Beim Diskurs wird die eigentliche Unterhaltung unterbrochen, um ein syntaktisches oder semantisches Problem zu lösen - sei es durch Nachfrage, Gegenfrage oder durch das Wiederholen des Gesagten mit den eigenen Worten. Im Anschluss daran wird der eigentliche Dialog fortgesetzt. Eine weitere Dialogform ist die Disputatio, wobei der Empfänger sinngemäß die empfangene Nachricht wiederholt, um Fehler schnell zu identifizieren. Erst nach dieser

Wiederholung kann er etwas erwidern. Für schnelle Konversationen ist eine Disputatio unangebracht, doch gibt es Anwendungsfälle, bei denen Kommunikationsprobleme kritische Auswirkungen haben können, beispielsweise beim Militär oder der Schifffahrt.

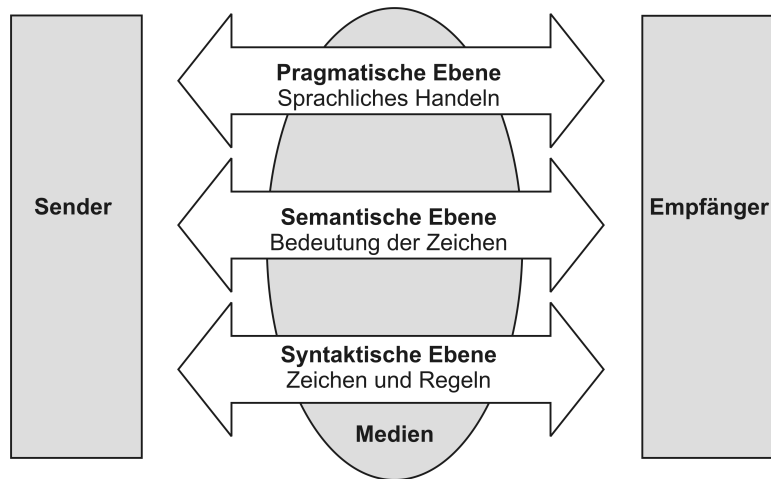


Abbildung 2.2: Die Kommunikationsebenen, nach Dahm [Dah06, S.113]. Informationen (Zeichen) zwischen Sender und Empfänger werden über Medien übertragen. Eine Kommunikation erfolgt auf drei Ebenen. Die syntaktische Ebene umfasst den Vorrat an Zeichen, Regeln und Grammatiken. Die semantische Ebene definiert die Bedeutung der Zeichen. Die pragmatische Ebene beschreibt das dynamische Lösen von syntaktischen und semantischen Problemen während einer Kommunikation.

## 2.2 Die menschliche Wahrnehmung

Der Mensch verfügt über ein Repertoire unterschiedlicher Sinne zum Wahrnehmen von und zum Interagieren mit seiner Umwelt. Man unterscheidet dabei, je nachdem welcher Eingangskanal für die Aufnahme eines extrinsischen (äußeren) oder intrinsischen (inneren) Reizes genutzt wird, zwischen verschiedenen Sinnesmodalitäten (Tab. 2.1).

Sensorische Wahrnehmung	Sinnesorgan	Modalität
Sehen	Augen	Visuell
Hören	Ohren	Auditiv
Fühlen	Haut, Muskelspindeln, etc.	Haptisch
Riechen	Nase	Olfaktorisch
Schmecken	Zunge	Gustatorisch
Gleichgewichtssinn	Gleichgewichtsorgan	Vestibulär

Tabelle 2.1: Der Mensch verfügt über unterschiedliche Sinnesorgane zur Wahrnehmung extrinsischer und intrinsischer Reize. Die haptische Wahrnehmung umfasst die taktile und kinästhetische Registrierung von Reizen. Unter der taktilen Wahrnehmung versteht man das Fühlen von Druck, Berührung, Vibration, Temperatur oder Schmerz über spezifische Rezeptoren, während mittels kinästhetischer Wahrnehmung intrinsische Informationen über die Lage des Körpers u.a. durch die Auslenkung der jeweiligen Muskelspindeln registriert werden kann.

Die Wahrnehmung ist ein komplexer Vorgang, der andere kognitive Prozesse wie die Gedächtnis- und Aufmerksamkeitssteuerung beinhaltet (s. Kap. 2.3). Für eine Mensch-Maschine-Interaktion spielen einige dieser Sinnesmodalitäten eine untergeordnete Rolle beziehungsweise werden von aktuellen Eingabegeräten nicht unterstützt. Zu diesen Modalitäten zählen das Schmecken, Riechen und der Gleichgewichtssinn. Letzterer wird in diesem Kontext vor allem bei Simulationen einer virtuellen Realität zur Unterstützung der Immersion eingesetzt.

Von hoher Relevanz für das Arbeiten am Computer ist das Sehen und Hören, weshalb diese beiden Sinne im Folgenden genauer vorgestellt werden.

### 2.2.1 Der Sehsinn

Von allen Modalitäten der menschlichen Sinneswahrnehmung spielt der Sehsinn die wichtigste Rolle [SNC<sup>+</sup>95, S. 18] - so sind ca. 80% aller wahrgenommenen Reize visuellen Ursprungs [Dah06, S. 41].

Das menschliche Auge ist in der Lage, unzählige Farben und Gegenstände auch noch aus großer Entfernung wahrzunehmen, wobei es sogar auf ein einzelnes Photon rea-



giert. Das für uns sichtbare Licht ist jedoch nur ein kleiner Ausschnitt des gesamten elektromagnetischen Spektrums und liegt bei einem Wellenlängenbereich von etwa 380 bis 780nm.

Die Rezeption und Integration eines Lichtstimulus geschieht in unterschiedlichen Verarbeitungsschritten.

### 1. Rezeption:

Das einfallende Licht durchquert zunächst die starre, durchsichtige Cornea (Hornhaut) (Abb. 2.3). Eine Steuerung der Lichtmenge, welche durch die Linse auf die Retina (Netzhaut) projiziert wird, geschieht durch Veränderungen des Pupillendurchmessers der Iris (Regenbogenhaut). Eine Fokussierung des Lichts auf bestimmte Areale der Retina geschieht zum einen durch das klare Kammerwasser und den gallertartigen Glaskörper - beide mit der Funktion einer Flüssigkeitslinse, zum anderen durch den Vorgang der Akkomodation (Veränderung der Form), bei der die Brechkraft der Linse verändert wird. Beim Betrachten weiter entfernter Objekte ist die Linse flach, bei näheren Objekten ist sie annähernd kugelförmig.

Die Retina beherbergt lichtempfindliche Photorezeptoren, welche funktional in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Stäbchen sind sehr lichtempfindlich und ermöglichen ein Schwarz-Weiß-Sehen auch bei wenig Helligkeit oder in der Nacht.
- Zapfen sind verantwortlich für das Wahrnehmen von Farben bei Tageslicht, wobei es drei Arten von Zapfen zu unterscheiden gilt, die jeweils auf unterschiedliche Wellenlängen des Lichts charakteristisch reagieren.

Die empfundene Farbe resultiert aus einer additiven Mischung der Farben Rot, Grün und Blau, man spricht auch vom RGB-Farbraum (Abb. 2.4). In der Regel wird davon ausgegangen, dass das menschliche Auge Helligkeits- und Farbunterschiede im Kodierungsbereich von 8-10 bit differenzieren kann [SNC<sup>+</sup>95]. Bedingt durch erbliche Krankheiten können einzelne Farbrezeptoren ausfallen, was zu Farbfehlsichtigkeit führen kann. Abhängig von dem Typus des defekten Zapfens, kann in Protanopie (Rot-Schwäche), Deutanopie (Grünschwäche) und Tritanopie (Blauschwäche) differenziert werden, wobei auch Kombinationen möglich sind. Etwa 8% der Männer und 0,5% der Frauen weisen eine Farbfehlsichtigkeit auf, darunter am häufigsten die Rot-Grün-Schwäche [Dah06, S. 53].

Eine Signaltransduktion von Lichtreizen geschieht, indem Stäbchen und Zapfen photochemisch angeregt werden und Nervenimpulse in Form von Aktionspotentialen über hintergeschaltete Ganglienzellen - welche den Nervus opticus (Sehnerv) bilden

- in den primären visuellen Kortex senden. Die Stelle, an der der Sehnerv aus dem Augapfel tritt, wird blinder Fleck genannt. Hier sind keine Photorezeptoren vorhanden und ein Sehen deshalb nicht möglich. Die Fovea centralis (Gelber Fleck) ist der Ort mit der höchsten Anzahl an Zapfen auf der Retina, wodurch die Auflösung des visuellen Feldes in diesem Bereich am größten ist. Beim Menschen befinden sich dort etwa 150.000 Zapfen pro  $\text{mm}^2$  - deutlich weniger im Vergleich zu Greifvögeln, mit einer Dichte von über 1 Mio. Zellen pro  $\text{mm}^2$ . In der Fovea werden wesentlich detailliertere Informationen eines kleinen Teils des visuellen Feldes erfasst, während Stimuli im restlichen Bereich der Retina, vor allem in Form globaler Informationen wie peripheren Bewegungen, wahrgenommen werden.

Nach der photochemischen Erregung der Nervenzellen durch einen Lichtstimulus vergeht eine gewisse Zeit, bis diese erneut auf einen Reiz reagieren können. Das zeitliche Auflösungsvermögen des menschlichen Auges hängt darüberhinaus von weiteren Faktoren ab wie dem Abstand, den Lichtbedingungen und der Art des Stimulus [SNC<sup>+</sup>95, S. 19]. Einzelbilder mit einer Bildrate von 24-30Hz werden als flüssig wahrgenommen - ist die Bildrate höher, so kann es zu Flimmereffekten kommen. Am Bildschirm werden solche Flimmereffekte abhängig von der Bildschirmtechnologie durch eine ausreichend hohe Bildwiederholungsrate (50-100Hz) kompensiert.

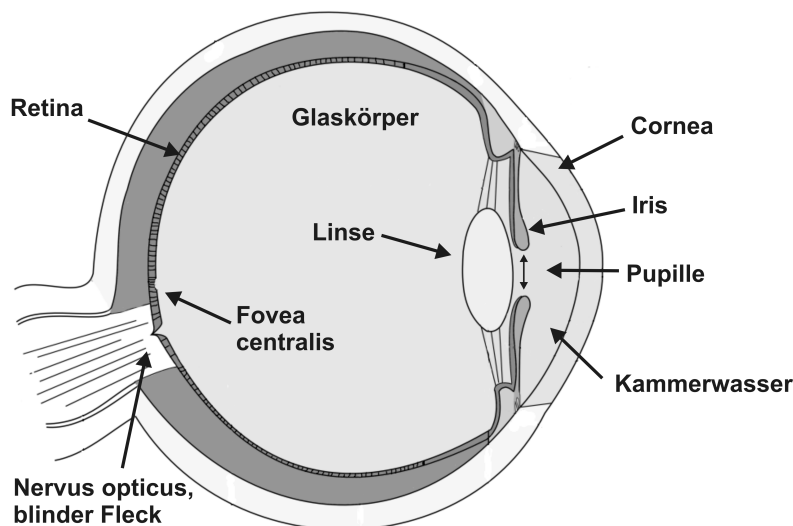


Abbildung 2.3: Aufbau des menschlichen Auges, nach Wikipedia.de [Wik09a].

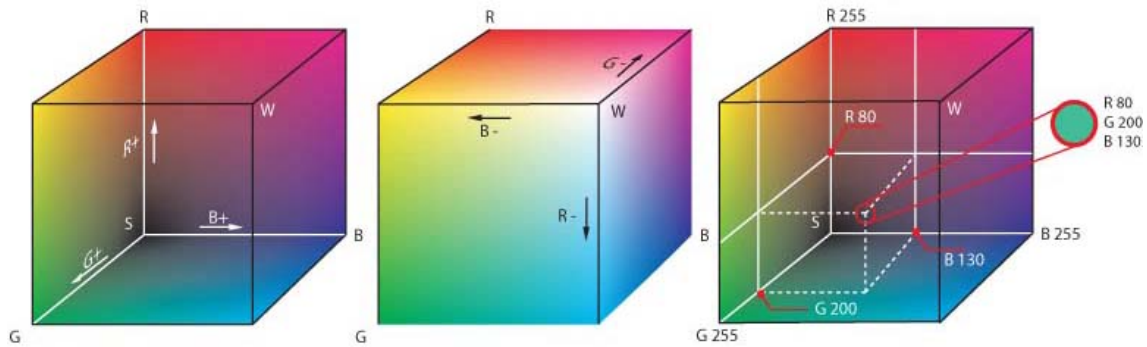


Abbildung 2.4: Der RGB-Farbraum, nach Wikipedia.de [Wik09b]. Eine Farbe ergibt sich aus der additiven Mischung der drei Komponenten Rot, Grün und Blau. Jede dieser Komponenten kann dabei einen Wert zwischen 0 und 255 annehmen, wobei die Triplets (0, 0, 0) und (255, 255, 255) Schwarz bzw. Weiß entsprechen.

## 2. Integration:

Die sensorische Wahrnehmung visueller Stimuli erfolgt ausschließlich im Auge, während Integration und Interpretation der Information - das eigentliche Sehen - in dahinter geschalteten Strukturen des zentralen Nervensystems zustande kommen. Eine räumliche Wahrnehmung geschieht unter anderem durch Kombination unterschiedlicher Ganglienzellen mit spezifischen rezeptiven Feldern (Abb. 2.5). Zu den elementaren Ganglienzellen gehören die so genannten On-off und Off-on Zellen. On-off Zellen weisen ein exzitatorisches (reizverstärkendes) Zentrum und eine inhibierende (reizhemmendes) Peripherie auf (Abb. 2.5.A), während sich Off-on Zellen genau invertiert verhalten (Abb. 2.5.B). Durch die Kombination dieser Zellen, mit ihren charakteristischen rezeptiven Feldern, können funktionale Einheiten entstehen, welche etwa als Kantendetektoren (Abb. 2.5.C) oder Balkendetektoren (Abb. 2.5.D) optische Informationen über Form und Orientierung eines Objekts liefern. Ebenso können komplexere Modelle zur Erkennung von Bewegungen generiert werden wie der Reichardt Detektor oder das Marr-Ullman-Modell [BE93]. Für die Tiefen- und Oberflächenwahrnehmung von Objekten müssen verschiedene Strategien angewandt werden, da das Bild auf der Retina 2-dimensional ist. Informationen über die Lage und Distanz im 3-dimensionalen Raum werden über ein Zusammenspiel verschiedener Hinweisreize erschlossen.

Der Texturgradient beschreibt die Tendenz von Objekten, mit zunehmendem Abstand vom Betrachter dichter beieinander zu sein, so dass daraus resultierende Aussagen über die Distanz getroffen werden können (Abb. 2.6)[Gib50].

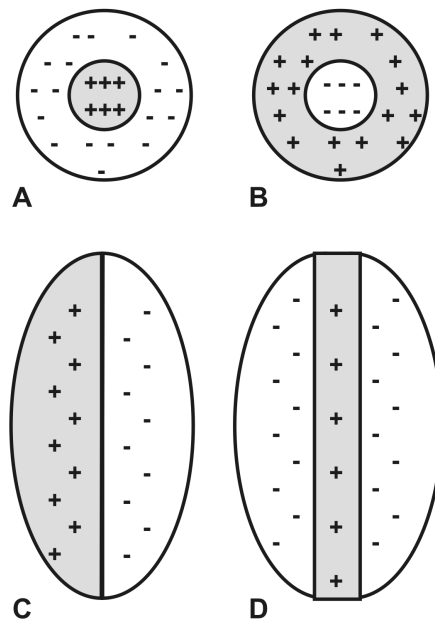


Abbildung 2.5: Funktionale Verbindungen von Ganglienzellen mit spezifischen rezeptiven Feldern. Eingehende Reize können verstärkt (+) oder gehemmt (-) werden. A) On-off Zelle. B) Off-on Zelle. C) Balkendetektor. D) Kantendetektor.

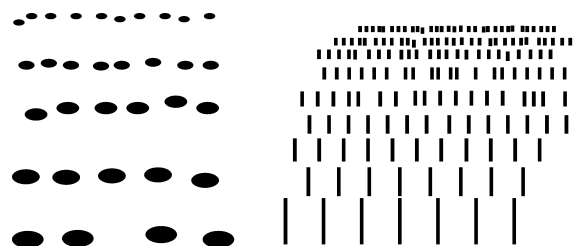


Abbildung 2.6: Texturgradient, nach Anderson [And07, S.57]. Darstellung der Tendenz von Objekten, mit zunehmendem Abstand vom Betrachter dichter beieinander zu stehen.

Eine weitere Strategie zur Einschätzung der Entfernung geschieht über die Integration der wahrgenommenen Bilder vom linken und vom rechten Auge (Stereopsis). Beim Menschen sind die Augen etwa 6 cm voneinander getrennt, wodurch sich die jeweils erzeugten Teilbilder abhängig von der Entfernung eines Objekts unterscheiden. Werden beide Augen auf einen näheren Gegenstand im Blickfeld gerichtet, so bilden die Augenachsen einen größeren Winkel, als es bei weiter entfernten Gegenständen der Fall ist. Von der Größe dieses Winkels kann daher auf die Entfernung eines Objekts geschlossen werden.

Zusätzliche zu den bereits genannten Möglichkeiten können räumliche Informationen durch den Effekt der Bewegungsparallaxe erhoben werden. Dabei bewegen sich Punkte im visuellen Feld - je nach Abstand zum Betrachter - unterschiedlich schnell vor dem Hintergrund, wenn der Kopf parallel zu ihnen bewegt wird bzw. diese Punkte selbst ihre Position verändern.

Eine weitere Informationsquelle basiert auf der Tiefenschärfe, bei der, abhängig von einem fokussierten Objekt, nähere und weiter entfernte Objekte unscharf erscheinen. Beleuchtung, Schattenwurf, Reflexion und Textur eines Gegenstands liefern ebenfalls Hinweise auf Lage und Orientierung im 3-dimensionalen Raum.

Neben der Einschätzung von Entfernungen besteht ein anderes Problem darin, separate Strukturen im Raum zu zusammengehörigen Objekten zu gliedern. Wertheimers Gestaltgesetze der Wahrnehmungsorganisation, heute auch Gestaltprinzipien genannt, illustrieren verschiedene Prinzipien der Wahrnehmung (Abb. 2.7)[Wer12]:

- Das Prinzip der Nähe basiert auf der Interpretation zusammengehöriger Strukturen, abhängig vom Abstand der Einzelelemente. So nehmen wir in Abb. 2.7.A vier Linienpaare statt acht separater Linien wahr.
- Beim Prinzip der Ähnlichkeit werden sich ähnelnde Objekte als zusammengehörig empfunden. Eine Gliederung des Gesamtbildes in Abb. 2.7.B geschieht in diesem Fall in sich abwechselnde horizontale Reihen von Kreuzen und Kreisen.
- Das Prinzip des glatten Verlaufs beschreibt das Interpretieren einzelner Elemente als zusammengehörig, abhängig vom Konturverlauf. Im Bild aus Abb. 2.7.C werden zwei sich schneidende, diagonale Linien erkannt. Obwohl diese Linien auch anders orientiert sein könnten, etwa eine oben links beginnend und unten links endend, verwenden wir einen glatten, weichen Verlauf als Hinweis für die Zusammengehörigkeit gesehener Strukturen.
- Beim Prinzip der Geschlossenheit/guten Gestalt werden Objekte, basierend auf unserem Wissen über geometrische Formen, als getrennt wahrgenommen.

In Abb. 2.7.D wird das Gesamtbild in zwei Kreise unterschiedlicher Größe unterteilt - der kleinere Kreis verdeckt hier den größeren, entfernteren. Tatsächlich könnte die verdeckte Struktur eine beliebige andere Form haben, statt der eines Kreises - oder gar mondförmig sein.

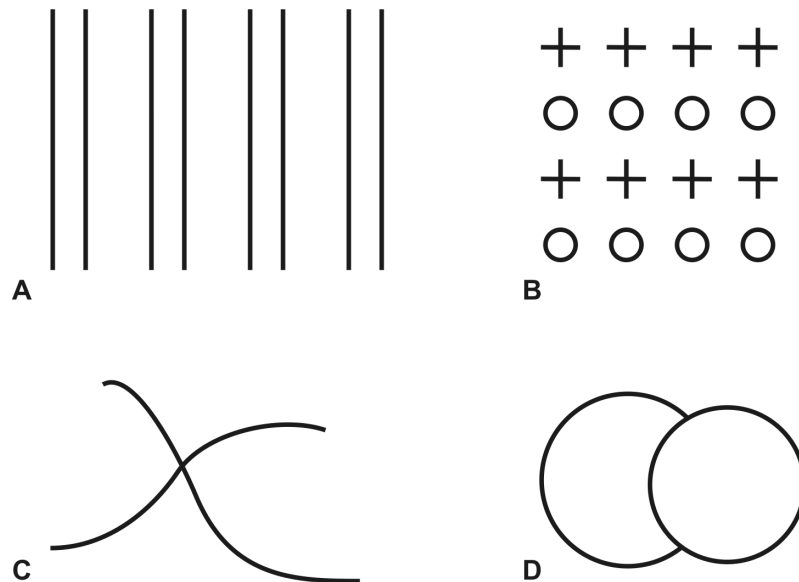


Abbildung 2.7: Gestaltprinzipien, nach Anderson [And07, S.59]. A) Prinzip der Nähe. B) Prinzip der Ähnlichkeit. C) Prinzip des glatten Verlaufs. D) Prinzip der Geschlossenheit/guten Gestalt.

### 2.2.2 Der Hörsinn

Für eine Mensch-Maschine-Interaktion ist neben dem Sehen ebenfalls das Hören relevant - eine Vielzahl unterschiedlicher Computeranwendungen liefert dem Nutzer Rückmeldung über Toninformationen. Der Mensch kann Töne im Frequenzbereich von 20 Hz - 20 kHz wahrnehmen, wobei Sprache in der Regel zwischen 150 Hz und 6 kHz stattfindet. Die empfundene Lautstärke wird in dB(A) gemessen, dabei beschreibt A einen Filter, der an das menschliche Gehör angepasst ist und Tonhöhen zwischen 200 Hz und 10 kHz stärker gewichtet als umliegende Frequenzen.

Die Hörfläche, also das Spektrum der für den Menschen hörbaren Laute, wird charakterisiert durch die Hörschwelle - unter welcher ein Ton nicht mehr hörbar ist - und der Schmerzschwelle, ab welcher Laute als nicht mehr erträglich empfunden werden (Abb. 2.8). Abhängig vom Alter steigt die Hörschwelle im Laufe der Zeit vor allem bei Männern an.

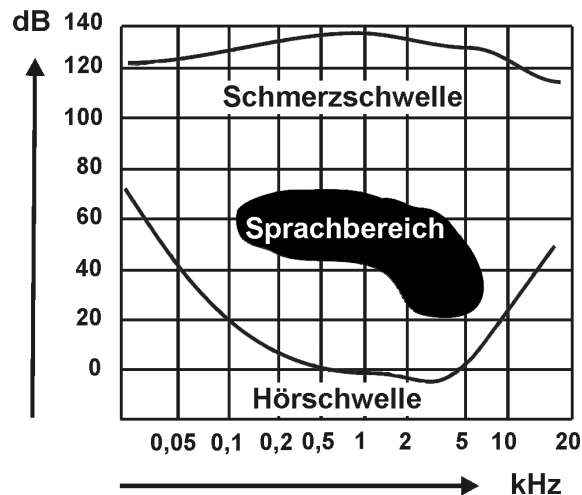


Abbildung 2.8: Die Hörfläche des menschlichen Ohres, nach Dahm [Dah06, S. 65]. Ein Ton kann erst oberhalb der Hörschwelle wahrgenommen werden, während ein Ton oberhalb der Schmerzschwelle als unerträglich empfunden wird. Der Bereich, in dem Menschen miteinander sprechen, ist eingeschränkt.

Physiologisch kommt das Hören zustande über die Translation von Schallwellen in Aktionspotentiale durch mechanische Auslenkungen von Haarzellen im Ohr. Das menschliche Ohr ist dabei in drei Teile gegliedert. Der von außen sichtbare Teil ist das Außenohr mit der Pinna (externe Ohrmuschel) und dem auditorischen Kanal. Diese Strukturen dienen der Schallfokussierung auf das Tympanum (Trommelfell), welches Außen- und Mittelohr trennt. Schallwellen regen das Trommelfell zum Schwingen auf gleicher Frequenz an und diese Schwingungen werden im Mittelohr verstärkt durch die drei Gehörknöchel Malleus (Hammer), Incus (Ambos) und Stapes (Steigbügel) auf das ovale Fenster - eine mit dem Steigbügel verbundene Membran - übertragen. Das Innenohr setzt sich aus mehreren mit Flüssigkeit gefüllten Kanälen zusammen und realisiert sowohl den Hör- als auch den Gleichgewichtssinn des Menschen. Der für das Hören relevante Teil des Innenohrs ist die Cochlea, ein schneckenförmiges Organ im Schädelknochen (Abb. 2.9.A). Sie enthält zwei mit Perilymphe gefüllte Kammern, die Scala vestibuli (Vorhofgang) und Scala tympani (Paukengang). Beide Kammern werden durch die mit Endolymphe gefüllte Scala media voneinander getrennt. Das Cortische Organ beherbergt Haarzellen, welche mechanische Auslenkung der Stereocilien in neuronale Impulse umsetzen und liegt auf der Basilarmembran der Scala media. Die Axone dieser Nervenzellen bilden den zum Gehirn führenden Nervus acusticus (Hörnerv). Vibrationen des Steigbügels auf dem ovalen Fenster führen zu Wanderwellenbewegungen der Perilymphe, welche sich von der Scala vestibuli bis zur Scala tympanie fortsetzen und beim runden Fenster enden. Dabei wird

die Basilarmembran nach unten gedrückt, wodurch die Haarzellen spezifisch ausgelenkt und depolarisiert werden.

Die höhere Lautstärke eines Tons äußert sich in der stärkeren Vibration bzw. Bewegung der Basilarmembran, was seinerseits zu einer höheren Frequenz freigesetzter Aktionspotentiale durch die Haarzellen führt. Die empfundene Lautstärke wird somit über die Frequenz der erzeugten Aktionspotentiale kodiert. Entlang der Basilarmembran sind die Cilien der Rezeptoren, ähnlich den Saiten einer Harfe, unterschiedlich lang (Abb. 2.9.B) - so sind die Haare im Bereich der Basis kürzer (hohe Töne) und nehmen bis zum Apex an Länge zu (tiefe Töne). Eine Wanderwelle bestimmter Tonhöhe regt dadurch spezifische Bereiche der Basilarmembran zum Schwingen an, wodurch vor allem die für diese Tonhöhe „gestimmten“ Haarzellen mit einer Depolarisation antworten. Die Höhe eines Tons wird somit über den Ort der stimulierten Rezeptoren kodiert.

Der Mensch hört mit zwei Ohren binaural, dadurch ist es ihm möglich die räumliche Quelle eines Geräuschs zu lokalisieren. Ähnlich wie beim Sehen müssen dazu verschiedene Hinweisinformationen integriert werden. Einen Hinweis liefern Lautstärkeunterschiede eines Tons auf beiden Ohren, weil dieser mit zunehmender Distanz zu einer Schallquelle leiser wird. Treffen Schallwellen zeitlich versetzt auf die einzelnen Ohren, so liefert diese zeitliche Differenz (Phasenverschiebung) einen weiteren Hinweis auf die Richtung des Geräuschs. Während der Mensch Laute horizontal gut differenzieren kann, ist die akustische Orientierung in der vertikalen Ebene wesentlich ungenauer - dazu müsste er über mindestens ein drittes, vertikal versetztes Hörorgan verfügen.

Durchschnittlich können drei bis fünf verschiedene Schallquellen unterschieden werden, unter anderem durch ihre Position, Tonhöhe, Melodie oder durch das spielende Instrument [Dah06]. Im Gegensatz zum Auge, das sich reaktiv vor optischen Signalen - wie starkem Lichteinfall - schützen kann, ist der Mensch nicht in der Lage, sich vor akustischen Reizen ohne Weiteres zu verschließen. Plötzliche Geräusche erregen in hohem Maße unsere Aufmerksamkeit (s. Kap. 5.1.3), ähnlich schnellen Bewegungen im Blickfeld. Das Gehör adaptiert jedoch an die Umgebungslautstärke durch Anheben der Hörschwelle, was dazu führt, dass lautere Geräusche bei einer Aufmerksamkeitserrregung bzw. dem Verstehen nötig sind.



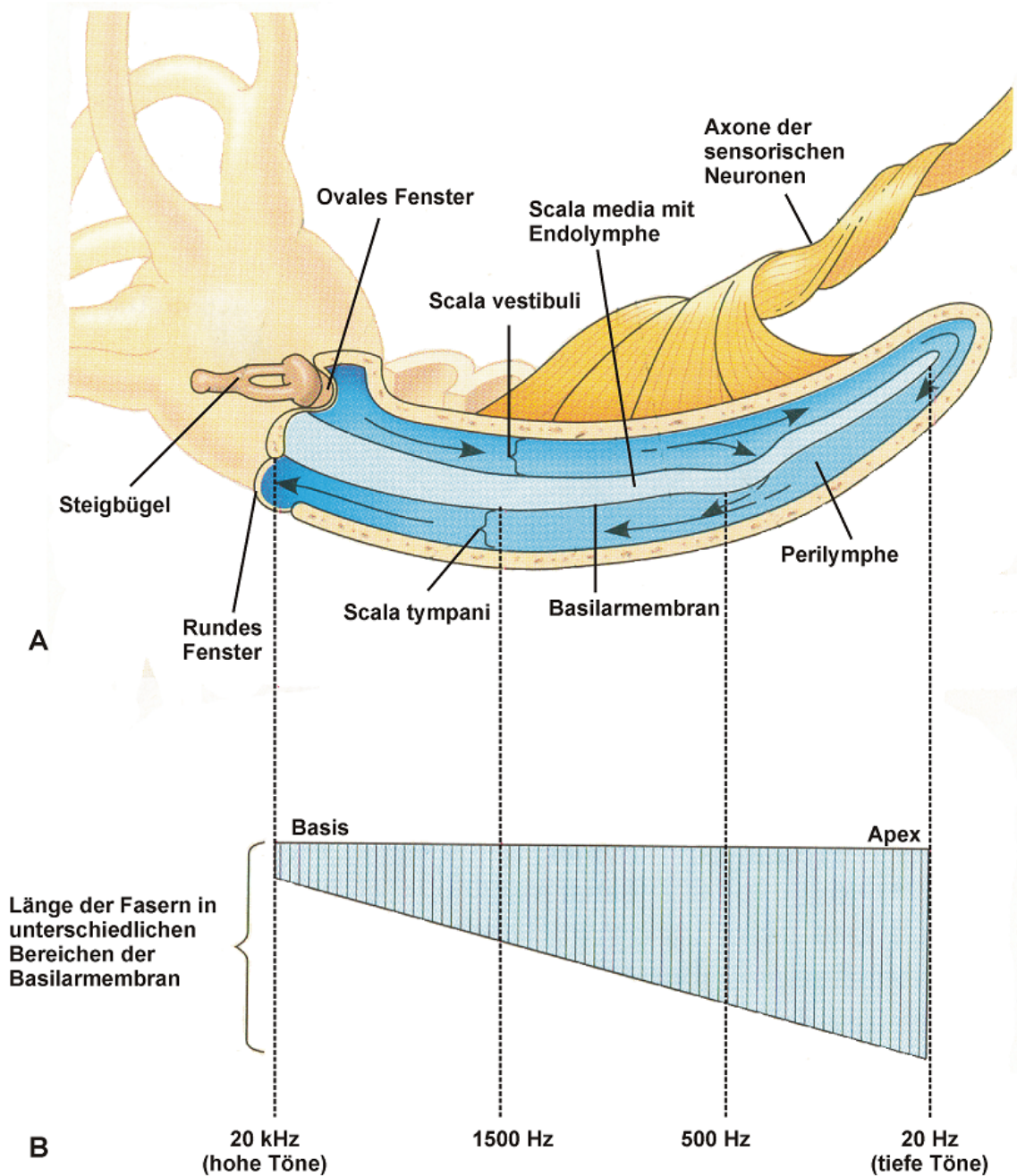


Abbildung 2.9: Die Cochlea, nach Campbell [Cam97, S. 1130]. A) Aufbau der Cochlea (entrollt). Vibrationen des Steigbügels übertragen sich über das ovale Fenster in Form von Wanderwellenbewegungen der Perilymphe in der Scala vestibuli und Scala tympani (Pfeile) und enden am runden Fenster. Diese Druckwellen führen zu Bewegungen der Basilarmembran und damit zu Auslenkungen der dort sitzenden Haarzellen, was zur Bildung von Aktionspotentialen führt, welche über Axone in das Gehirn geführt werden.

B) Die Cilien der Rezeptoren sind unterschiedlich lang und reagieren spezifisch auf die Höhe eines Tons, so stimulieren hohe Töne vor allem die kurzen Haarzellen an der Basis, während tiefe Töne die besonders langen Haarzellen am Apex stimulieren.

### 2.2.2.1 Auswirkungen von Lärm auf den Menschen

Lärm wurde bereits vor mehr als 100 Jahren als schädlich für den menschlichen Organismus befunden [RL92]. Kam et al. beschreiben Lärm als ungewollte oder unerwünschte Geräusche, die als subjektiv störend empfunden werden oder die die Leistung beeinträchtigen sowie physiologisch and psychologisch belastend sind [KKT94]. Die empfundene Lärmintensität hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab wie der individuellen Empfindlichkeit, kulturellen und sozialen Umständen, der Aufgabenkomplexität beim Arbeiten sowie der Art des Lärms [KKT94, HT90].

Ob Geräusche als Lärm interpretiert werden, hängt zusätzlich vom subjektiven Kontext ab, so nimmt der Besucher eines Konzerts die Musik dort weniger wahrscheinlich als belästigend wahr, während eine Person in hörbarer Nähe Probleme beim Einschlafen haben kann. Generell kann man jedoch in verschiedene Lautstärkequalitäten unterscheiden (siehe Tab. 2.2).

Qualität	Lautstärke dB(A)	Quelle	Effekt
Kaum hörbar	10		
Sehr leise	20-30	Flüstern	>35 dB(A)
Leise	40	Wohnungsumgebung	schlafstörend
	50	Wenig Verkehr	>50 dB(A)
Mäßig laut	60	Normales Gespräch	arbeitsstörend
	70	Staubsaugen	belästigend
Laut	80	Starker Verkehr	
	90	Presslufthammer	Gehörverlust
Sehr laut	100	Rasenmäher	
	120	Diskotheke	Schmerzgrenze
Unerträglich	140	Düsenflugzeug	

Tabelle 2.2: Lärmqualitäten, nach Kam et al. [KKT94].

Die Auswirkungen von Lärm auf den Menschen werden durch Lautstärke, Dauer der Belastung und Art des Stimulus bestimmt. Kontinuierliche Geräusche zwischen 90 und 120 dB(A) resultieren beim Ausführen von einfachen mentalen und motorischen Aufgaben in keiner Leistungseinbuße, während unerwarteter, aperiodischer und unkontrollierbarer Lärm schon ab einer Intensität von 30 dB(A) zu physiologischen und psychologischen Stressreaktionen bzw. zu einer Leistungsverringerung führen kann [HT90, GS72, Kry70, BFS85].

Physiologisch äußern sich solche Reaktionen in Form von Pupillenerweiterung, erhöhtem Blutdruck und einer Herzfrequenz ab 70 dB(A), verstärkter Adrenalin-ausschüttung sowie temporärem oder permanentem Gehörverlust [HT90, BMD77, FW73, Cro74, Hol82, Ait82, RL92]. Eine nachhaltige, physiologische Schädigung des Gehörs hängt neben der Lautstärke vor allem von der Dauer ab, über die der

Mensch einer Lärmquelle ausgesetzt ist, wobei der Grad des Hörverlusts bei weiterer Lärmexposition kumulativ zunimmt. Ein verlängertes Aussetzen kann zu leichtem Hörverlust ab einer Reizintensität von 85 dB(A) führen. Mittelschwere und schwere Schädigungen sind bei Lautstärken ab 90 bzw. 95 dB(A) zu erwarten. Es reichen jedoch auch schon kurze Lärmimpulse bei 100 dB(A) aus, um das Gehör permanent stark zu schädigen [RL92].

Psychologische Auswirkungen von Lärm gehen mit Leistungsbeeinträchtigungen, Ermüdung, Kopfschmerzen, verringerter kognitiver und motorischer Genauigkeit sowie reduziertem Reaktionsvermögen einher [HT90, Glo80].

Des Weiteren behindern laute Umgebungen eine verbale Kommunikation, wobei oft der so genannte Lombard Effekt beobachtet wird - das Erhöhen der Lautstärke beim Sprechen, um dem Lärm entgegen zu wirken - was wiederum zu einer Verstärkung der Umgebungslautstärke führt [War79].

In der ISO 9241-6 wird ein nicht zu überschreitender Geräuschimmissionswert von 35-55 dB(A) am Arbeitsplatz empfohlen, damit es zu keinen Störungen bei der Verrichtung der Arbeitsaufgabe kommt [ISO99b].

## 2.3 Kognition

Kognition (lat. „das Erkennen“, „Kennen lernen“) beschreibt die mentale Umsetzung und Umgestaltung von Informationen bei der Ausführung alltäglicher Aktivitäten. Kognition ist definiert als [Bro06, S. 245]:

„Sammelbegriff für alle Prozesse und Strukturen, die mit dem Wahrnehmen und Erkennen zusammenhängen (Denken, Erinnerung, Vorstellen, Gedächtnis, Lernen, Planen u.a.).“

Die Kognition ist das Zusammenspiel von Prozessen (siehe Kapitel 2.3.1), die oft miteinander verbunden ablaufen - z.B. das Lernen von Prüfungsmaterialien, was neben dem Lesen des Dokuments, das Memorieren des Inhalts voraussetzt. Die Wissenschaft, welche sich mit der Untersuchung dieses Themengebiets befasst, ist die Kognitive Psychologie. Sie existiert seit etwa 125 Jahren, wobei es vor dem 19. Jahrhundert aus kultureller und religiöser Sicht undenkbar erschien, die Arbeitsweise des menschlichen Geistes naturwissenschaftlich analysieren zu können. Die Kognitive Psychologie ist beschrieben als [And07, S. 1]:

„die Wissenschaft, die untersucht, wie der Geist und die Psyche organisiert sind und intelligentes Denken hervorbringen und wie die Prozesse des Denkens im Hirn sichtbar werden.“

Eines ihrer Ziele ist das Verstehen und Vorhersagen des menschlichen Verhaltens - u.a. durch die Erstellung kognitiver Modelle (siehe Kapitel 2.4) - und der damit verbundenen kognitiven Limitierungen, die sich auch bei einer Computerbedienung unmittelbar auf die Interaktionsleistung auswirken. So kann nicht vorausgesetzt werden, dass der Nutzer beim Gebrauch einer Software zwei 20-stellige Zahlen in nur wenigen Sekunden multiplizieren kann.

### 2.3.1 Kognitive Prozesse

Bei alltäglichen Aktivitäten, wie auch bei der Mensch-Maschine-Interaktion, laufen verschiedene kognitive Prozesse parallel ab. Diese Prozesse werden als Reihen von Einzelschritten betrachtet, in denen Informationen unterschiedlicher Art verarbeitet werden. Für eine MMI relevant sind die folgenden kognitiven Prozesse.

#### 2.3.1.1 Aufmerksamkeit

Dies ist der Prozess, sich unter der Summe einströmender Reize - im Fall einer Computerbedienung vor allem visuelle und auditorische (vgl. Kapitel 2.2) - auf bestimmte Reizquellen zu konzentrieren, welche zum gegebenen Zeitpunkt von größter

Bedeutung sind. Aktivitäten, die unsere Aufmerksamkeit benötigen, können nicht parallel ausgeführt werden, sondern werden durch das Wechseln der Aufmerksamkeit nur anscheinend gleichzeitig durchgeführt. Solch ein pseudoparalleles Vorgehen führt zu einer Leistungsverringerung der Einzelaktivitäten [Ras00]. Dieses Konkurrieren um die kognitiven Ressourcen wird auch als Interferenz bezeichnet. Man spricht an den Stellen von seriellen Flaschenhälsen, an denen durch kognitive Prozesse relevante Informationen selektiert werden bzw. irrelevante ignoriert werden. Der Mensch kann Informationen multipler perzeptueller Modalitäten gleichzeitig verarbeiten oder mehrere Handlungen parallel ausführen, wenn Handlungsabläufe durch wiederholtes Durchführen automatisiert wurden. So ist es uns prinzipiell möglich, beim Gehen zu essen und eine Mathematikformel zu vollenden.

In diesem Zusammenhang unterscheidet Raskin zwischen dem kognitiv bewussten und unbewussten Zustand von Informationen, Reizen und mentalen Prozessen [Ras00]:

„Unconscious mental processes are those of which you are not aware at the time they occur.“

Ein Beispiel für unbewusst registrierte Reize ist das Wahrnehmen von Druck, den unsere Kleidung auf verschiedene Teile des Körpers ausübt. Erst beim Gedanken daran nimmt man bewusst wahr, an welchen Stellen die Kleidung enger und lockerer sitzt. Durch Steuerung der Aufmerksamkeit, z.B. durch bestimmte Reize, können wir unbewusste Informationen gezielt abrufen bzw. uns auf bislang unbewusst Wahrgenommenes konzentrieren. Dabei muss eine solche Steuerung jedoch nicht immer aktiv erfolgen - unerwartete Stimuli können unsere Aufmerksamkeit sofort umlenken wie etwa plötzliche Geräusche oder Brandgeruch. Eine aktive, auditive Aufmerksamkeitssteuerung erfolgt dann, wenn bei mehreren auditiven Reizen ein bestimmter Reiz fokussiert bzw. verstärkt wird, während die anderen gedämpft oder ignoriert werden. Auch in lauter Umgebung mit sich unterhaltenden Personen, können wir uns auf ein bestimmtes Gespräch konzentrieren. Broadbent beschreibt dies in der Filtertheorie, Treisman in der Dämpfungstheorie [Bro58, Tre64].

Wie in Kapitel 2.2.1 ausgeführt wurde, ist die Fovea der Bereich der Retina mit der höchsten Sehschärfe. Normalerweise liegt dort die visuelle Aufmerksamkeit, wie dies etwa beim Lesen der Fall ist. Allerdings kann der Mensch seinen Aufmerksamkeitsfokus aktiv ca. 24° durch das visuelle Feld bewegen und bei Bedarf die Fovea über schnelle Sakkadenbewegungen auf eine andere Stelle ausrichten [PSD80]. Physiologisch wird bei einer auditiven und visuellen Aufmerksamkeitssteuerung das jeweilige kortikale Signal verstärkt.

Führt der Mensch eine komplizierte oder sicherheitskritische Aufgabe  $a$  in einem bestimmten Kontext  $K_a$  durch, so ist seine Aufmerksamkeit auf einen zunehmend geringen Bereich seiner Umgebung reduziert. Für das Wechseln des Kontexts oder das mentale Vorbereiten auf eine andere Aufgabe  $b$  benötigt man, je nachdem wie stark sich  $K_b$  von  $K_a$  unterscheidet, ca. 10 Sekunden, gemessen ab dem Zeitpunkt des Abschlusses von Aufgabe  $a$  bis zum Beginn der Aufgabe  $b$  [Ras00].

### 2.3.1.2 Gedächtnis

Das Gedächtnis ermöglicht es uns, wahrgenommene Informationen zu speichern, zu ordnen und wieder abzurufen, um sich in bestimmten Situationen angemessen zu verhalten. Ein Modell zur Beschreibung des Gedächtnisses beruht auf den Arbeiten von Atkinson & Shiffrin und besteht aus drei Teilsystemen (Abb. 2.10) [AS68].

Im sensorischen Gedächtnis (SG) werden Reize aus der Umwelt kurzzeitig, für jede Sinnesmodalität spezifisch, in kortikalen Speichern gesammelt. Visuelle Stimuli werden im ikonischen Gedächtnis gespeichert, während man bei auditorischen Reizen vom echoischen Gedächtnis spricht. Aus der Summe an Sinneseindrücken wird nur jeweils ein kleiner relevanter Teil zur Folgebearbeitung herausgefiltert und in das Kurzzeitgedächtnis transferiert. Die restlichen Informationen, denen keine Aufmerksamkeit zukommt, werden überschrieben oder verfallen.

Das Kurzzeitgedächtnis (KZG) - heute nach Baddeley & Hitch eher als Arbeitsgedächtnis bezeichnet - stellt einen zeitlich und kapazitativ begrenzten Speicher dar, um Informationen für eine aktive Weiterverarbeitung wie beim Planen, Schlussfolgern oder Reagieren, bereit zu halten [BH68]. Die Anzahl gleichzeitig erhaltbarer Informationen ist durchschnittlich auf 5 bis 9 Elemente limitiert [Mil56].

Sollen Informationen längerfristig memoriert werden, werden diese in das Langzeitgedächtnis (LZG) transferiert. Es ist hinsichtlich seiner Kapazität nahezu unbegrenzt und kann Inhalte über Minuten oder lebenslang speichern, wobei der Weg in das LZG auch über das SG direkt führen kann, ohne vorher das KZG zu durchlaufen. Squire unterscheidet ferner zwischen deklarativem und prozeduralem Gedächtnis [Squ87]. Ersteres ermöglicht das explizite, bewusste Abrufen von Wissen wie Ereignisse oder Fakten. Im prozeduralen Gedächtnis wird implizites Wissen abgelegt, was beispielsweise benötigt wird, um ein Fahrrad zu fahren.

Innerhalb des LZG wird zwischen vier grundlegenden Prozesse differenziert:

1. Das Lernen und Einspeichern neuer Informationen.
2. Das Behalten bestehender Informationen durch regelmäßigen Abruf.
3. Der Abruf von Informationen.

4. Das Vergessen von Informationen durch Interferenzen oder Zerfall der Gedächtnisspuren.

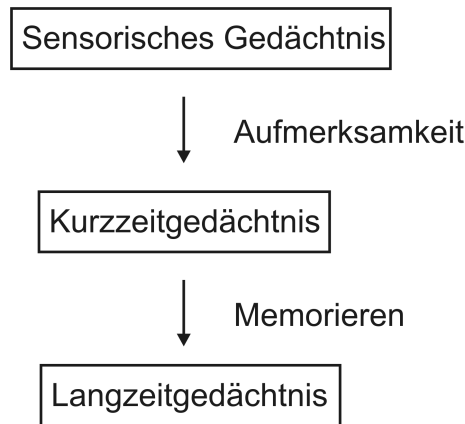


Abbildung 2.10: Gedächtnismodell, basierend auf den Theorien von Atkinson & Shiffrin, nach Anderson [And07, S. 211]. Sensorische Reize gelangen über die Sinnesorgane in das sensorische Gedächtnis. Solche Reize, die die Aufmerksamkeit erregen, gelangen zur weiteren Bearbeitung in das Kurzzeitgedächtnis. Informationen zur längerfristigen Speicherung werden in das Langzeitgedächtnis transferiert.

### 2.3.1.3 Lernen

Unmittelbar mit dem Gedächtnis verbunden ist der kognitive Prozess des Lernens. Zimbardo gibt dazu folgende Definition [ZG99, S. 229]:

„Lernen ist der Prozeß, der zu einer relativ stabilen Veränderung von Reiz-Reaktions-Beziehungen führt; er ist eine Folge der Interaktion des Organismus mit seiner Umgebung mittels seiner Sinnesorgane.“

Der Erwerb von geistigen, körperlichen oder sozialen Fertigkeiten geschieht in drei Phasen [And07]:

1. Kognitive Phase:

In dieser Phase werden erste Fakten, die für das Erlernen der Fertigkeit relevant sind, im Gedächtnis eingepägt. Fakten bedeuten in der Regel Operatoren für die Lösung einer Aufgabe oder eines Problems, wobei die Umsetzung des geübten Wissens sehr langsam voranschreitet. Beim Lernen des Autofahrens etwa würde in dieser Phase z.B. die Lage und Anordnung der Gänge erlernt.

2. Assoziative Phase:

Fehler bei der Ausführung der zu erwerbenden Fertigkeit werden nach dem

„trial and error“-Prinzip identifiziert und eliminiert, so dass am Ende der assoziativen Phase eine erfolgreiche Prozedur zur Aufgabenbewältigung steht. Im Fall des Autofahrens entspricht dies u.a. dem Lernen der Koordination von Gaspedal und Kupplung.

### 3. Autonome Phase:

Die erlernte Prozedur wird zunehmend effektiver, effizienter und automatisierter, so dass weniger Aufmerksamkeitsressourcen bereitgestellt werden müssen. Es können parallele Aufgaben ausgeführt werden wie das gleichzeitige Fahren des Autos und das Unterhalten mit dem Beifahrer.

#### 2.3.1.4 Das Sprachverstehen

Der Mensch kann Sprache schriftlich oder gesprochen verstehen. Geschriebene Sprache ist permanent und kann erneut gelesen werden - im Gegensatz zu gesprochener Sprache. Informationen aus einem Dokument zu lesen geschieht schneller, als wenn der Text gehört wird, da ein Schriftstück überflogen werden kann, dies beim Zuhören jedoch nicht möglich ist. Weniger kognitive Ressourcen verbraucht das Verarbeiten gesprochener Sprache im Vergleich zum Lesen oder Sprechen, doch differieren Menschen hinsichtlich ihrer Fähigkeit und Vorliebe mit Sprache umzugehen - manche lesen lieber, während andere Informationen bevorzugt auditiv aufnehmen [And07]. Unabhängig davon, ob gesprochen, gelesen oder zugehört wird, Sprache stützt sich auf die selben kognitiven Ressourcen wie beispielsweise das Problemlösen oder Erinnern und schränkt diese Prozesse somit bei Spracheingabe oder -ausgabe ein. Hand-Auge-Koordinationen wie das Steuern einer Computermaus hingegen, können zu meist parallel zu Denkvorgängen durchgeführt werden, da unterschiedliche Gehirnstrukturen adressiert werden (Abb. 2.11)[Shn00].

#### 2.3.1.5 Planen, Schlussfolgern und Problemlösen

Die kognitiven Prozesse des Planens, Schlussfolgerns, Problemlösens und Entscheidungsfindens beinhalten das Nachdenken darüber, was zu tun ist, welche möglichen Handlungsoptionen es gibt und wie sich die zugehörigen Handlungskonsequenzen auswirken. Erfahrung in der Aufgabendomäne schlägt sich unmittelbar in Effektivität und Effizienz nieder. Novizen, die noch unerfahren beim Problemlösen in einer bestimmten Domäne sind, versuchen Aufgaben mit vergleichbarem Wissen aus anderen Problemgebieten zu vollenden. Dabei gehen sie oft nach dem bereits genannten „trial and error“-Prinzip vor, erforschen den Lösungsraum experimentell und sind anfangs meist ineffizient. Experten hingegen haben Erfahrung mit der Aufgabe und



können dadurch eine optimale Strategie, unter der Auswahl an alternativen Vorgehensweisen, zur Lösung wählen [SRP07].

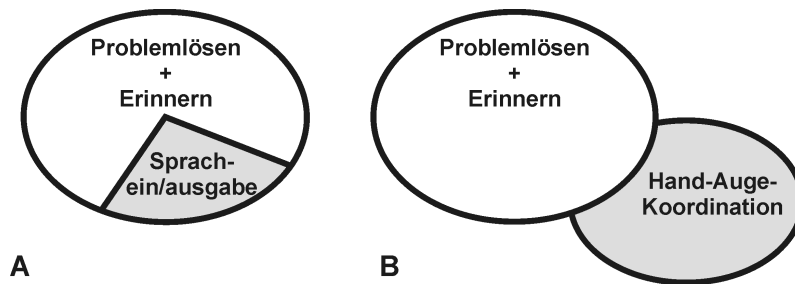


Abbildung 2.11: Kognitives Ressourcenmodell, nach Shneiderman [Shn00]. A) Kognitive Ressourcen für das Problemlösen und Erinnern werden bei gleichzeitiger Spracheingabe und -ausgabe (lesen, reden, hören) limitiert. B) Parallele Hand-Augen-Koordinationsleistungen laufen in separaten Gehirnstrukturen ab und beeinträchtigen das Problemlösen bzw. Erinnern nicht.

## 2.4 Kognitive Modelle zur Quantifizierung der MMI

Aufbauend auf dem Wissen über die kognitiven Prozesse und den damit verbundenen Limitierungen des Menschen können Voraussagen über das Verhalten bei einer Mensch-Maschine-Interaktion durch unterschiedliche Modelle getroffen werden. Solch ein Vorgehen bietet den Vorteil, dass oft sehr zuverlässige Aussagen über die Bedienung eines künstlichen Systems mit minimalem Aufwand a priori getroffen werden können, ohne einen Prototypen im Versuch quantifizieren zu müssen (siehe Kapitel 3.2). Aussagen über die menschliche Leistung bei einer Computerbedienung zu treffen ist oft sehr schwierig, da eine Vielzahl komplexer Faktoren auf den Nutzer einwirken. So müssen das Wissen des Nutzers in der Aufgabendomäne (Experte - Laie), psychologische Faktoren und solche aus der Umgebung mit berücksichtigt werden, um zuverlässige Resultate zu ermitteln. Gerade während der Konzeption von Bedienschnittstellen (vgl. Kap. 5) ist die Anwendung einiger, im weiteren Verlauf vorgestellten Modelle geeignet.

### 2.4.1 GOMS

GOMS (Goals, Operators, Methods, Selection Rules) - aufbauend auf einer eher mechanistischen Sicht der Funktionsweise des menschlichen Gehirns - ist eine Methode zur Abschätzung der Bearbeitungs- und Lernzeiten bei einer Computer-Interaktion.

Entwickelt von Card et al., wird eine Aufgabenbewältigung durch aggregierbare Zielsetzungen definiert und in einzelne atomare Operatoren zerlegt [CMN83]:

- Ziele beschreiben den vom Nutzer zu erreichenden Systemzustand. In Form unterschiedlicher Abstraktionsebenen können Ziele in Unterziele aufgeteilt werden.
- Operatoren sind die kleinsten atomaren Aktionen, die der Benutzer ausführen kann wie das Drücken der Maus oder einer Taste.
- Methoden stellen Sequenzen von Unterzielen und Operatoren dar, z.B. das Bewegen und das anschließende Drücken der Maus.
- Selektionsregeln, bei denen sich der Benutzer unter einer Auswahl alternativer Methoden zum Erreichen eines (Unter)Ziels situationsbedingt für eine spezifische Methode entscheidet, können modelliert werden.

Entscheidend für eine Zeitvoraussage ist, wie die einzelnen Prozesse dargestellt und unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen zueinander angeordnet werden.

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene Variationen des GOMS-Modells gebildet, die im weiteren Verlauf vorgestellt werden.

### 2.4.1.1 KLM

Das Keystroke-Level-Model stellt eine vereinfachte GOMS-Variante dar, die sich vor allem bei Texteingabeaufgaben bewährt hat [CMN80]. Beim Verzicht auf die Verwendung von Zielen, Methoden und Selektionsregeln wird eine Computer-Interaktion als Sequenz von Operatoren mit jeweils definierter Dauer beschrieben (s. Tab. 2.3).

Operator	Bedeutung	Dauer
K	Taste/Maus drücken	0,2s
P	Zeigebewegung auf bestimmte Stelle	1,1s
H	Wechsel zwischen Maus und Tastatur	0,4s
M	Mentale Vorbereitung eines Operators	1,35s
R	Antwortzeit des Systems auf einen Operator	systemabhängig

Tabelle 2.3: Die im KLM definierten Operatoren mit jeweiliger Ausführungsdauer.

Der mentale Operator M wird anhand von 6 heuristischen Regeln in die Sequenzen eingefügt, um kognitive Prozesse wie Denkpausen und mentale Vorbereitungen abzubilden (s. Tab. 2.4).

Regel	Beschreibung
0	Ein M vor alle Ks. Ein M vor alle Ps, die einen Befehl (kein Argument) auswählen.
1	Löschen antizipierter (überflüssiger) Ms. Die Sequenz MPMK bedeutet das Mausdrücken an bestimmter Stelle und wird zu MPK vereinfacht.
2	Löschen von Ms in kognitiven Einheiten. Das Tippen einer zusammengehörigen Zahl (z.B. 13) MKMK wird zu MKK.
3	Löschen von Ms vor aufeinander folgenden Begrenzern wie einem Leerzeichen, Punkt oder Komma.
4	Löschen von Ms bei Begrenzern von Befehlen wie Enter nach einem Befehl.
5	Löschen von Ms, die von einem R überlagert werden.

Tabelle 2.4: Heuristische Regeln zur Platzierung von mentalen Operatoren in einer KLM-GOMS-Sequenz, nach Dahm [Dah06, S. 105].

Anhand einer Copy-and-paste-Aufgabe soll das Modellierungsprinzip erläutert werden. Dabei wird der Text zuerst mit der Maus markiert, mit der Tastenkombination STRG+C kopiert und mit der Maus an anderer Stelle durch die Kombination STRG+V eingefügt<sup>1</sup>:

$$\begin{aligned}
 \text{Grundsequenz} &\rightarrow \underbrace{PKPK}_{\text{markieren}} \overset{STRG+C}{\underbrace{KK}} \underbrace{PK}_{\text{Positionswechsel}} \overset{STRG+V}{\underbrace{KK}} \\
 \text{Regel 0:} &\rightarrow MPMKMPMK MKMK MPMK MKMK \\
 \text{Regel 1, 2:} &\rightarrow MPKMPK MKK MPK MKK \\
 \text{Tab. 2.3} &\rightarrow 5 \times M + 3 \times P + 7 \times K = 11,45s
 \end{aligned}$$

Nach dem Beschreiben der Aufgabe durch entsprechende Operatoren führt die Anwendung der heuristischen Regeln zu einer Endsequenz, wobei in diesem Fall eine Zeitdauer von 11,45s prognostiziert wird.

Das KLM ist ein nützliches Werkzeug, um einfachere Aufgabensequenzen vergleichend zu bewerten und zu optimieren. Für die Darstellung komplexerer oder rekursiver Aufgaben ist dieses Modell jedoch weniger gut geeignet.

<sup>1</sup>Es wird davon ausgegangen, dass jeweils auf Maus und Tastatur eine Hand liegt.

#### 2.4.1.2 CMN-GOMS

Das ursprüngliche GOMS-Modell, benannt nach Card, Moran und Newell, unterscheidet sich vom KLM durch seine flexible Pseudo-Code-Syntax, die eine hierarchische Zielbeschreibung auf mehreren Ebenen mit alternativen Methoden und zugehörigen Selektionsregeln zulässt [CMN83]. Dadurch kann eine detailliertere und realistischere Modellierung realisiert werden. Im folgenden Beispiel (s. Abb. 2.12) wird die bereits genannte Copy-and-Paste-Aufgabe nach der CMN-GOMS-Notation beschrieben, wobei das Hauptziel durch das Durchführen bestimmter Unterziele und deren Operatoren erreicht wird. Alternative Lösungswege und zugehörige Regeln zur Entscheidungsfindungen (Zeile 10) können in Form spezifischer Selektionsregeln modelliert werden (Zeile 22 ff.).

#### 2.4.1.3 NGOMSL

Der Nachteil bei der Anwendung von CMN-GOMS ist, dass durch die flexibel definierte Syntax Resultate verschiedener Evaluatoren sehr unterschiedlich ausfallen können. Die von Kieras entwickelte Natural GOMS Language (NGOMSL) ist eine programmiersprachenähnliche Ausformulierung des CMN-GOMS und ermöglicht das Berechnen reproduzierbarer Ergebnisse aufgrund einer umfangreich beschriebenen Syntax und Semantik mit unter anderem Rekursions- und Sprunganweisungen [Kie88]. Das gleiche Beispiel einer Copy-and-Paste-Aufgabe in NGOMSL ist in Abbildung 2.13 illustriert.

#### 2.4.1.4 CPM-GOMS

Alle bislang beschriebenen GOMS-Variationen modellieren eine Human-Computer-Interaction (HCI) in streng sequenzieller Form. Mittels CPM-GOMS (Cognitive, Perception, Motor processor) - erarbeitet von John et al. und basierend auf dem Human Processor Model (siehe Kap. 2.4.4) - können parallele und sich überlappende Interaktionsabläufe auf Ebene der Wahrnehmung, Kognition und Motorik in Form elementarer Handlungsprimitive dargestellt werden [GJA93]. Es liefert zuverlässige Voraussagen über die menschliche Leistung bei einer Computerbedienung, jedoch führt die relativ komplexe und aufwändige Entwicklung solcher Modelle zu einer verminderten Reproduzierbarkeit der ermittelten Resultate [JVM<sup>+</sup>02].

Ähnlich dem CMN-GOMS werden Aufgaben hierarchisch dekomponiert, durch elementare Operatoren beschrieben und anschließend in Form modifizierter PERT Charts (Program Evaluation and Review Technique) zueinander in Bezug gesetzt [Har96]. Jeder Operator wird über einen Prozessor mit einem spezifischen Zeit-

aufwand gesteuert, wobei sich Abhängigkeiten unterhalb der Operatoren ergeben können, wenn zwei Operatoren über den gleichen Prozessor nacheinander ausgeführt werden oder ein Operator auf Informationen eines anderen angewiesen ist. Der vom CPM-GOMS errechnete Zeitbedarf einer Aufgabenbewältigung entspricht dem längsten Pfad nach der Methode des kritischen Pfads (CPM, critical path method), auch kritischer Pfad genannt (Abb. 2.14).

---

```

1 GOAL COPY-AND-PASTE-TEXT
2   GOAL COPY-TEXT
3     GOAL HIGHLIGHT-TEXT
4       Operator MOVE-CURSOR-TO-BEGINNING
5       Operator CLICK-MOUSE-BUTTON
6       Operator MOVE-CURSOR-TO-END
7       Operator SHIFT-CLICK-MOUSE-BUTTON
8       Operator VERIFY-HIGHLIGHT
9     GOAL ISSUE-COPY-COMMAND
10      Select*:
11        GOAL USE-MOUSE
12          Operator MOVE-CURSOR-TO-EDIT-MENU
13          Operator PRESS-MOUSE-BUTTON
14          Operator MOVE-CURSOR-TO-COPY-ITEM
15          Operator VERIFY-HIGHLIGHT
16          Operator RELEASE-MOUSE-BUTTON
17        GOAL USE-KEYBOARD
18          Operator PRESS-KEY-STRG
19          Operator PRESS-KEY-C
20          Operator RELEASE-KEYS
21      GOAL PASTE-TEXT[...]

22 *Selection rule for GOAL ISSUE-COPY-COMMAND
23 if HANDS-ARE-ON-KEYBOARD then
24   | select GOAL USE-KEYBOARD
25 else
26   | select GOAL USE-MOUSE

```

Abbildung 2.12: CMN-GOMS Beschreibung einer Copy-and-Paste-Aufgabe in Pseudocode. Das Hauptziel wird durch das Durchführen von Unterzielen und deren Operatoren erreicht. Selektionsregeln erlauben eine Entscheidungsfindung bei alternativen Lösungswegen.

---

```
1 Goal: copy and paste text
2   Method for goal: copy and paste text
3     Step 1. Accomplish goal: copy text
4     Step 2. Return with goal accomplished
5     Step 3. Accomplish goal: paste text
6     Step 4. Return with goal accomplished
7   Method for goal: copy text
8     Step 1. Accomplish goal: highlight text
9     Step 2. Return with goal accomplished
10    Step 3. Accomplish goal: issue copy command
11    Step 4. Return with goal accomplished
12  Method for goal: highlight text
13    Step 1: Recall what word to highlight
14    Step 2. Move cursor to beginning
15    Step 3. Click mouse Button
16    Step 4. Move cursor to end
17    Step 5. Shift-click Mouse Button
18    Step 6. Return with goal accomplished
19  Selection rule set for goal: issue copy command
20    If hand is on mouse Then
21      Accomplish goal: use mouse for copy command
22    If hand is on keyboards Then
23      Accomplish goal: use keyboard for copy command
24    Return with goal accomplished
25  Method for goal: use mouse for copy command
26    Step 1: Recall that command verb is „Copy“
27    Step 2: Move cursor to edit-menu
28    Step 3: Press mouse button
29    Step 4: Move cursor to copy-item
30    Step 5: Release mouse button
31    Step 6: Return with goal accomplished
32  Method for goal: use keyboard for copy command
33    Step 1: Recall that key combination is „STRG+C“
34    Step 2: Press key STRG
35    Step 3: Press key C
36    Step 4: Release keys
37    Step 5: Return with goal accomplished
38  Method for goal: paste text [...]
```

Abbildung 2.13: NGOMSL-Modell zur Beschreibung einer Copy-and-Paste-Aufgabe. Das Hauptziel wird durch Ausführen von Methoden erreicht, wobei jede Methode wiederum aus Submethoden bestehen kann. Selektionsregeln erlauben eine Entscheidungsfindung bei alternativen Lösungswegen.

---

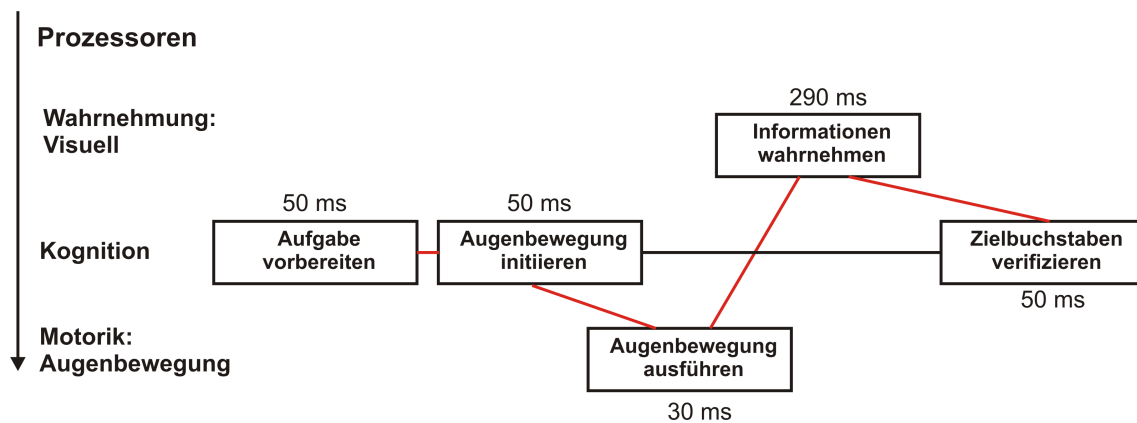


Abbildung 2.14: Beispiel eines CPM-GOMS-Modells, nach John & Kieras [JK96]. Dieses Modell bietet die Möglichkeit, parallele Interaktionsabläufe darzustellen, die von unterschiedlichen Prozessoren (kognitive, perzeptuelle und motorische) durchgeführt werden. Zwei oder mehr Operatoren (Boxen) sind voneinander abhängig (durch eine Linie verbunden), wenn der eine Operator auf Informationen oder Beendigung eines anderen warten muss. Der kritische Pfad (rote Linien) entspricht dem längsten Pfad des Modells und damit der vorhergesagten Interaktionsdauer. Aufgabe in diesem Beispiel ist es, einen bestimmten Buchstaben aus einem Wort der Länge 6 zu suchen, wobei ein Zeitbedarf von  $50 + 50 + 30 + 290 + 50 = 470\text{ms}$  prognostiziert wird.

## 2.4.2 Fitts' Law

Die GOMS-Modelle ermöglichen das Beschreiben einer gesamten BediENAufgabe bis auf den Detailgrad elementarer Operatoren, jedoch werden unter anderem bei Zeigebewegungen konstante Mittelwerte für die Interaktionsdauer verwendet, die zu verfälschten Ergebnissen führen können. Eine Möglichkeit, angepasste Zeiten zu integrieren, geht über das Anwenden von Fitts' Law.

Fitts' Law ist ein Modell zum Beschreiben und Vorhersagen des Zeitbedarfs, um eine zielgerichtete Bewegung durchzuführen - abhängig von der Zielgröße und der Distanz [Fit54]. Dieses Modell kann sowohl auf physikalische Zeigebewegungen wie Fingerberührungen, als auch auf virtuelle Zeigebewegungen am Computer, etwa bei der Benutzung einer Maus, angewandt werden.

Fitts' Law hat sich als eines der robustesten und am weitläufigsten verbreiteten Modelle erwiesen und findet Verwendung in einer Vielzahl unterschiedlicher Forschungsfelder wie der experimentellen Psychologie, der Kinematik oder in der HCI [Mac92].

Die mathematische Formulierung hat folgende Form:

$$MT = a + b \log_2 \left( 1 + \frac{D}{W} \right),$$

wobei  $MT$  der vorhergesagte Zeitbedarf der Bewegung,  $D$  die Distanz zur Zielmitte und  $W$  die Größe des Ziels sind. Die Konstanten  $a$  und  $b$  sind experimentell zu bestimmende Größen.

Um die Leistungskapazität des menschlichen motorischen Systems zu bestimmen, führte Fitts die Bezeichnungen des Leistungs- ( $IP$ ) und Schwierigkeitsindex ( $ID$ ) ein. Der Term  $\log_2 \left( 1 + \frac{D}{W} \right)$  entspricht dem  $ID$  einer Zielbewegung und wird aufgrund des Logarithmus mit der Basis 2 in bits gemessen. Durch die direkte Relation von  $D$  und  $W$  nimmt der Schwierigkeitsindex einer Bewegung mit steigender Distanz und abnehmender Zielgröße zu.  $IP$ , gemessen in bits/s, muss versuchsabhängig in Form der Proportionalitätskonstante  $b$  bestimmt werden. Die Konstante  $a$  beinhaltet versuchsbedingte, additive Effekte wie Such- und Reaktionszeit.

Physikalisch lässt sich Fitts Modell so interpretieren, dass größere Ziele auf kurzer Entfernung schneller zu erreichen sind, als kleinere Ziele, die weiter entfernt sind (s. Abb. 2.15.A).

Sind die Zeigebewegungen, wie in Abb. 2.15.A, 1-dimensional und horizontal, kann



die Zielgröße  $W$  direkt durch die Zielbreite ( $B$ ) definiert werden - im Fall einer 1-dimensionalen, vertikalen Bewegung wird dementsprechend die Zielhöhe ( $H$ ) verwendet (Abb. 2.15.B). Wenn der Annäherungswinkel jedoch variiert und die Zielform z.B. rechteckig ist (Abb. 2.15.C), so würde das Modell bei unpassend gewähltem  $W$  ungenauere Zeitvorhersagen liefern. Gillan et al. schlagen unter anderem als Zielgröße  $B$ ,  $B + H$  oder  $BH$  vor [GHA<sup>+</sup>90]. Um ein robustes  $W$  zu finden, das für möglichst viele Annäherungswinkel reliabel ist, ist ein anderer Ansatz, das Ziel in einen Kreis gleichen Flächeninhalts zu transformieren, wobei der Kreisdurchmesser der Größe entspricht ( $W = 2\sqrt{BH/\pi}$ ).

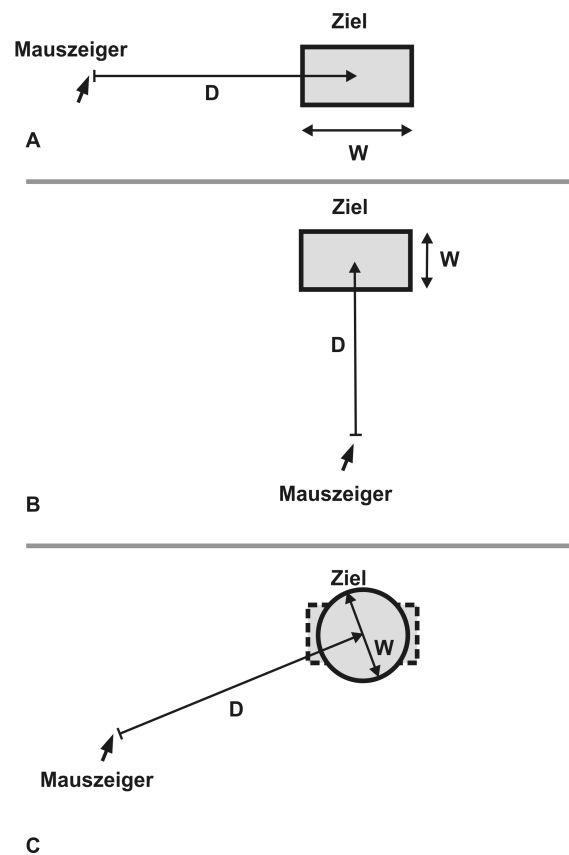


Abbildung 2.15: Fitts' Law ist ein Modell zum Vorhersagen des Zeitbedarfs, um eine Bewegung zu einem Ziel mit Größe  $W$  und Distanz  $D$  auszuführen. Größere, weniger weit entfernte Ziele sind dabei schneller zu erreichen, als solche, die weiter entfernt sind und eine geringere Größe haben. A) Bei einer 1-dimensionalen, horizontalen Bewegung entspricht  $W$  der Zielbreite. B) Bei einer 1-dimensionalen, vertikalen Bewegung entspricht  $W$  der Zielhöhe. C) Ist die Bewegung 2-dimensional, so kann als Zielgröße der Durchmesser eines Kreises mit gleichem Flächeninhalt genutzt werden.

### 2.4.3 Accot-Zhai Steering Law

Während Fitts' Law vor allem für gerade, 1-dimensionale Zielbewegungen geeignet ist, stellt das Steering Law, auch als Accot's Law bekannt, ein Modell dar, welches Vorhersagen über den Zeitbedarf beim Steuern (z.B. des Mauszeigers) durch einen Tunnel machen kann [AZ99].

Abgeleitet von Fitts' Law hat das Steering Law die Form:

$$MT = a + b \int_C \frac{ds}{W(s)},$$

wobei  $MT$  der vorhergesagte Zeitbedarf der Bewegung,  $C$  der durch  $s$  parametrisierte Tunnel und  $W(s)$  die Tunnelbreite an der Stelle  $s$  ist. Die Konstanten  $a$  und  $b$  müssen analog zu Fitts' Law versuchsbedingt bestimmt werden.

Tunnel mit konstanter Breite  $W$  führen zu einer vereinfachten Form des Modells:

$$MT = a + b \frac{D}{W},$$

mit der Pfadlänge  $D$  (s. Abb. 2.16).

Um variierende Annäherungswinkel des Tunnels zum Ziel zu berücksichtigen, kann ebenfalls  $W$  dem Kreisdurchmesser gleich gesetzt werden (vgl. 2.4.2).

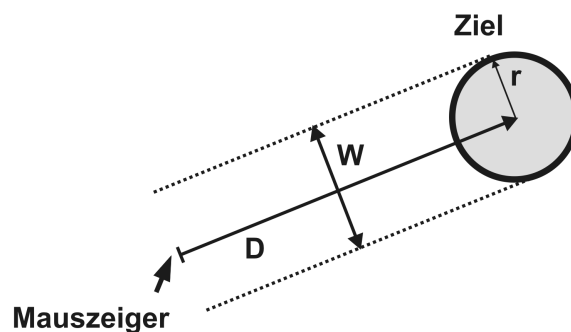


Abbildung 2.16: Das Accot-Zhai Steering Law ist ein Modell zum Vorhersagen des Zeitbedarfs, um eine Zielbewegung durch einen Tunnel mit der Breite  $W$  und Distanz  $D$  auszuführen. In diesem Fall hat der Tunnel eine konstante Breite, welche dem Durchmesser des Zielkreises ( $2r$ ) entspricht.

#### 2.4.4 Das Human Processor Model

Für die Beschreibung einer MMI haben Card et al. das Human Processor Model formuliert [CMN83]. Mittels dieses Modells können Voraussagen darüber gemacht werden, wie lange man für das Wahrnehmen oder für das Antworten auf einen externen Stimulus benötigt (Reaktionszeit) und an welchen Stellen der Informationsverarbeitung Flaschenhälse bei kognitiver Überladung auftreten können. Der übergeordnete Prozess der Kognition wird dabei als Serie von Verarbeitungsschritten betrachtet.

Es wird zwischen dem sensorischen, kognitiven und motorischen System unterschieden, welche jeweils aus Prozessor und Speicher bestehen - beim motorischen System entfällt der Speicher. Für jedes Subsystem charakteristisch sind die Verweildauer der Information im Speicher (D), die Speicherkapazität (K), die Speicherart (A) und die Dauer eines Arbeitszyklus im Prozessor (Z), welche gemittelten Werten entsprechen (Abb. 2.17). Unter anderem für die Bestimmung der Leistung des motorischen Systems hat Fitts' Law eine dominierende Rolle gespielt.

1. Sensorisches System:

Eingehende externe Stimuli, z.B. das Aufblinken eines Warnhinweises, werden von den Sinnesorganen über den sensorischen Prozessor in den visuellen oder auditiven Speicher übermittelt. Je nach Sinnesmodalität variieren Kapazität und Verweildauer - so verweilen Informationen im visuellen Speicher mit ca. 200ms 7x kürzer, als es bei auditorischen Signalen der Fall ist. Im auditorischen Speicher hingegen ist die Kapazität auf etwa 5 Elemente (z.B. Buchstaben) beschränkt, während der visuelle Speicher 17 gesehene Buchstaben fasst.

2. Kognitives System:

Das kognitive System ist die komplexeste Struktur des Human Processor Model. Hier finden kognitive Prozesse wie Lernen, Entscheidungsfindung oder Problemlösen statt. Beispielsweise wird ein erkannter Warnhinweis interpretiert und in eine entsprechende Handbewegung bzw. Programmsteuerung umgesetzt. Dazu verfügt dieses System über den Arbeits- und Langzeitspeicher, welche dem bereits angesprochenen Kurz- und Langzeitgedächtnis entsprechen. Erstgenannter ist Teil des Langzeitspeichers und arbeitet mit den Ergebnissen des Denkens und mit externen Umweltstimuli aus dem sensorischen System. In etwa bis zu sieben so genannten „Chunks“ - aggregierbare, abstrakte Bedeutungseinheiten - sind Informationen einige Sekunden bis Minuten nutzbar, bevor sie überschrieben werden [Mil56]. Der Langzeitspeicher, in Kapazität und Verweildauer prinzipiell unbegrenzt, besteht aus vernetzten

Chunks und wird assoziativ vom Arbeitsspeicher über den kognitiven Prozessor angesprochen.

### 3. Motorisches System:

Komplexere Bewegungen, wie das Drücken bestimmter Tasten, werden über das motorische System ausgeführt. Es verfügt über keinen Speicher, sondern nimmt Signale vom kognitiven System direkt entgegen. Die Geschwindigkeit eines Arbeitszyklus im motorischen Prozessor ist gegenüber dem visuellen Gegenstück mit etwa 70ms vergleichsweise hoch.

Zur Veranschaulichung des Modellablaufs kann unter anderem ein Versuch von Kelso et al. hinzugezogen werden, bei dem Versuchspersonen einen Knopf mit dem Zeigefinger drücken mussten, sobald ihnen ein Lichtsignal präsentiert wurde - dabei wurde eine durchschnittliche Reaktionszeit von 230ms gemessen [KSG79]. Nach der Wahrnehmung des Lichtstimulus wird der Reiz vom sensorischen Prozessor (ca. 100ms) an den Arbeitsspeicher transferiert und vom kognitiven Prozessor (ca. 70ms) weiterverarbeitet. Das Drücken des Knopfes mit dem Zeigefinger wird durch den motorischen Prozessor (ca. 70ms) induziert, wobei aufgrund der im Modell definierten Werte für die Dauer der jeweiligen Arbeitszyklen eine Reaktionszeit von etwa 240ms prognostiziert werden kann.

Bei komplexeren Aufgaben wird vor allem der kognitive Prozessor stärker belastet, was zu längeren Lösungszeiten führen kann. So zeigt Laming, dass die Reaktionszeit von Versuchsteilnehmern in einem ähnlichen Experiment, in dem die Teilnehmer eine binäre Entscheidungsaufgabe zu lösen hatten (ja, nein), mit 419ms fast doppelt so lang ist, wie die der Teilnehmer des oben erläuterten Versuchs [Lam68]. Im Vergleich dazu dauert das Bremsen eines Autos im Fall eines unerwarteten Hindernisses ca. 1600ms [OS86].

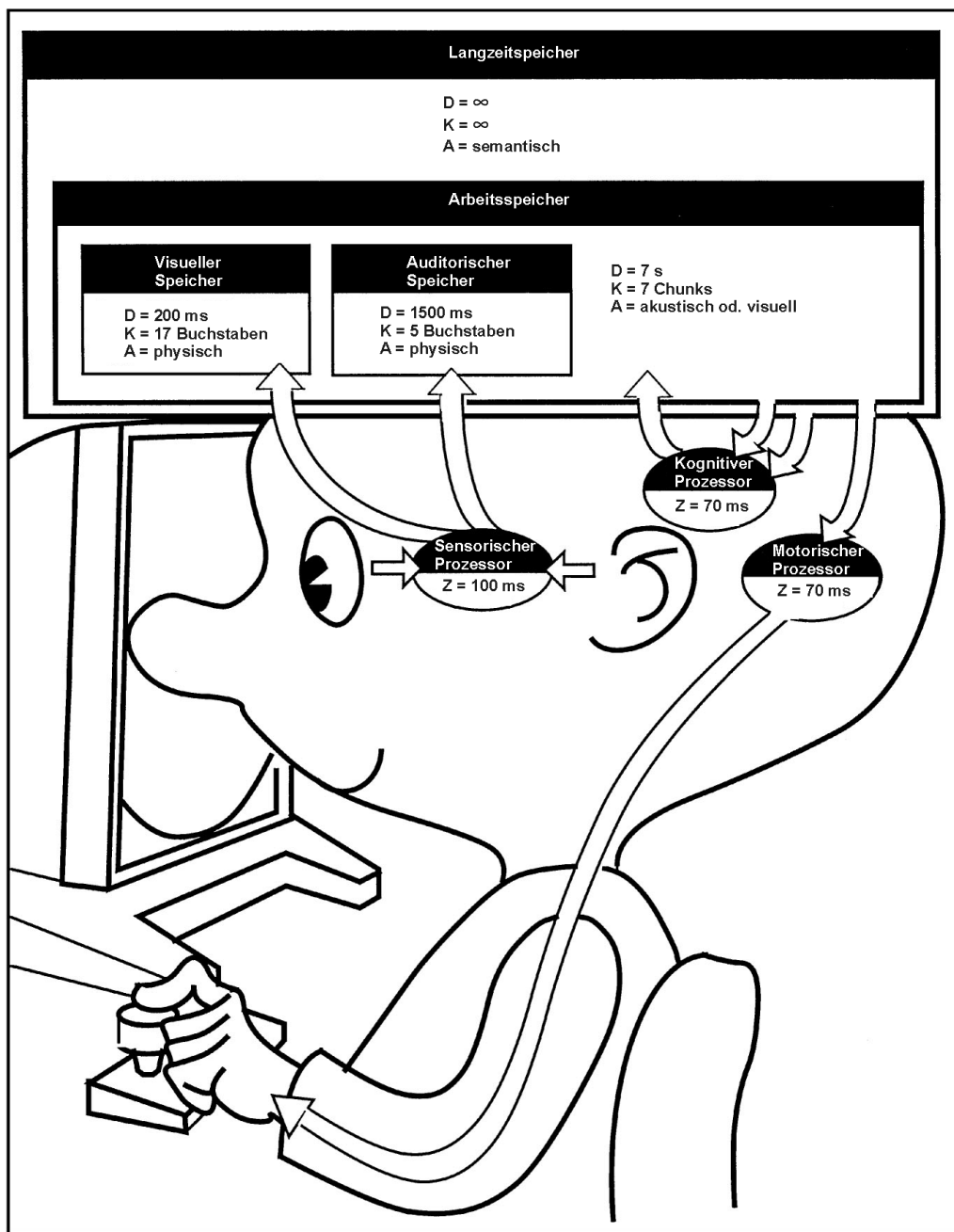


Abbildung 2.17: Das Human Processor Model, nach Sharp et al. [SRP07, S. 124]. Es besteht aus Speichern und Prozessoren mit jeweils charakteristischer Verweildauer ( $D$ ), Kapazität ( $K$ ), Speicherart ( $A$ ) bzw. Zyklusdauer ( $Z$ ), wobei es sich um gemittelte Werte handelt. Externe Reize werden über den sensorischen Prozessor, abhängig von der Art des Reizes, in den visuellen oder auditorischen Speicher transferiert. Für eine Weiterverarbeitung können die Informationen im Arbeitsspeicher zeitlich und kapazitativ begrenzt verweilen. Komplexe kognitive Aktionen wie Lernen oder Problemlösen werden vom kognitiven Prozessor durchgeführt, wobei motorische Reaktionen über den motorischen Prozessor stattfinden.

## 2.4.5 Hick's Law

Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen Modellen kann mittels Hick's Law, oder dem Hick-Hyman-Law, der Zeitbedarf bei der Auswahl zwischen zwei oder mehreren Handlungsalternativen während einer Aufgabenbewältigung errechnet werden [Hic52]. Sind alle  $n$  Alternativen gleichermaßen wahrscheinlich, so ist das Modell definiert durch:

$$T = b \log_2 (n + 1),$$

mit  $T$  gleich dem vorhergesagten Zeitbedarf und  $b$  einer experimentell zu wählenden Konstante. Die Addition mit  $+1$  soll die Unsicherheit, ob und wie man reagieren soll, abbilden (s. Abb. 2.18).

Sind die Auswahlhäufigkeiten der  $n$  Handlungsalternativen ungleich, so kann folgende Form gewählt werden:

$$T = b \sum_i^n p_i \log_2 \left( \frac{1}{p_i} + 1 \right),$$

wobei  $p_i$  der Wahrscheinlichkeit der  $i$ -ten Alternative entspricht.

Hick's Law findet unter anderem Anwendung bei der Gestaltung von Benutzungsschnittstellen wie der Verschachtelung von Menüstrukturen oder Schaltflächen. Aus diesem Modell folgernd wird weniger Zeit benötigt, um aus einer großen Auswahl gleichhäufiger Alternativen zu wählen als wenn die gleiche Anzahl an Alternativen verschachtelt präsentiert wird. Im Vergleich zu einer Schaltfläche mit 4 Parametern ( $\log_2(4 + 1) = 2,32s$ ) führen 2 Schaltflächen mit jeweils 2 Parametern zu höheren Auswahlzeiten ( $2\log_2(2 + 1) = 3,17s$ ).

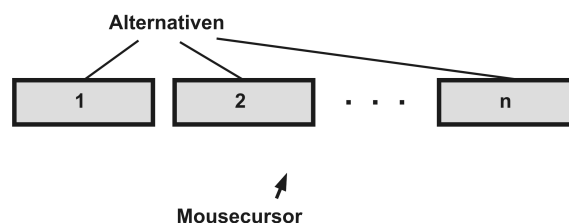


Abbildung 2.18: Hick's Law, nach Dahm [Dah06, S. 108]. Durch dieses Modell kann der Zeitaufwand berechnet werden, um sich aus einer Menge von  $n$  Handlungsalternativen für eine zu entscheiden.

## 2.5 Computer-Eingabegeräte

Um eine Interaktion mit dem Computer zu gewährleisten, bedient sich der Mensch unterschiedlicher Schnittstellenelemente zur Ein- und Ausgabe von Informationen. In diesem Kapitel sollen zunächst solche Geräte betrachtet werden, die eine Eingabe ermöglichen.

Tastaturen bilden aus Zeiten der reinen Kommandozeileneingabe auch heute noch neben der Maus den Standard zur Bedienung eines display-basierenden Systems. Als Microsoft 1985 das erste Windows mit einer graphischen Oberfläche (GUI) für den Computer (PC) vertrieb, wurden dem Nutzer völlig neuartige Möglichkeiten zur Bedienung des PC bereitgestellt. Zusätzlich zur Texteingabe konnten nun interaktive Bedienelemente wie virtuelle Schaltflächen mit einem koordinatengebenden Zeigergerät aktiviert oder verschoben werden. Die Maus, obwohl schon 1963 entwickelt, etablierte sich erst ab diesem Zeitpunkt zum wichtigsten Eingabegerät neben der Tastatur.

Eine Human-Computer-Interaktion (HCI) kann in unterschiedliche Arten von Operationen aufgeteilt werden [VDI02]:

- Zeiger positionieren:  
Mit einem koordinatengebenden Eingabegerät wie der Maus kann der Zeiger auf dem Bildschirm positioniert bzw. bewegt werden.
- Schaltoperation:  
Eine an ein physikalisches Schaltelement (Hardkey, Softkey) gebundene Funktion wird bei dessen Aktivierung durchgeführt.
- Objekt selektieren:  
Ein Bedienelement wird durch eine Schaltoperation selektiert.
- Objekt aktivieren:  
Das selektierte Objekt wird ausgelöst und seine Funktion aktiviert. Dies kann z.B. durch Loslassen des gedrückten Schaltelements realisiert werden.

Über die Kombination dieser Operationen lassen sich komplexere Interaktionsformen bewerkstelligen wie die so genannte „Drag&Drop“-Aktion, bei der der Zeiger über dem zu manipulierenden Objekt positioniert wird, das Objekt selektiert und bei gedrücktem Schaltelement durch eine erneute Positionierung verschoben wird.

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an Computereingabegeräten wie Maus, Tastatur, Sprachsteuerung, Touchscreen, Gestenerkennung und viele mehr. Wenn auch vom Interaktionsprinzip her zum Teil sehr unterschiedlich, lassen sich alle Geräte dennoch in koordinatengebende und nicht koordinatengebende Eingabegeräte klassifizieren (Abb. 2.19).

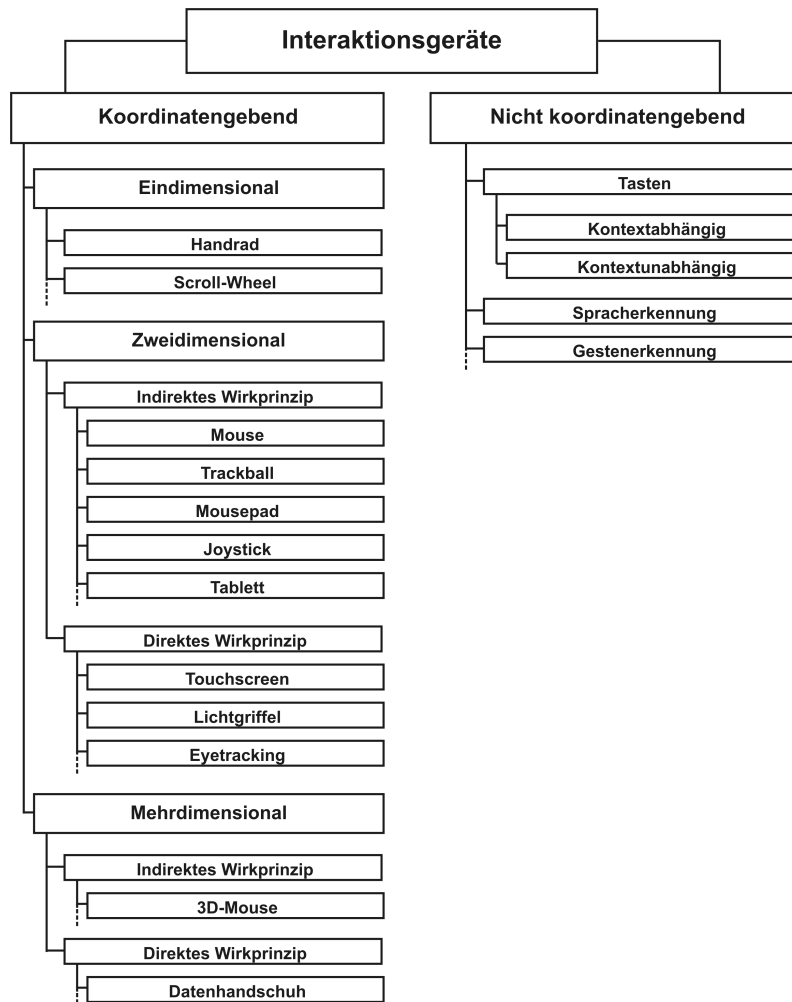


Abbildung 2.19: Klassifizierung von Interaktionsgeräten, nach VDI/VDE 3850-2 [VDI02]. Man differenziert zwischen (nicht) koordinatengebenden Eingabegeräten unterschiedlicher Dimensionalität. Bei einem direkten Wirkprinzip werden Koordinatenänderungen direkt auf der Bildebene durchgeführt, während beim indirekten Wirkprinzip eine Trennung zwischen Bildschirm- und Bewegungsebene vorliegt.

Bei erst genannter Klasse wird ein Zeiger über Bewegungen des Zeigergeräts auf dem Bildschirm positioniert, wobei der Bewegungsraum ein-, zwei- oder mehrdimensional sein kann, wie im Fall eines Scroll-Rads (1-dim.), eines Joystick (2-dim) oder einer 3D-Maus (3-dim). Des Weiteren unterscheidet man bei zwei- und mehrdimen-



sionalen Geräten zwischen dem direkten und dem indirekten Wirkprinzip (Abb. 2.20). Eine indirekte Steuerung des Zeigers bedeutet eine Trennung zwischen der Bildschirm- und Bewegungsebene des Interaktionsgeräts (z.B. Maus), während im Fall des Touchscreen oder Eyetracking die Positionierung direkt auf dem Bildschirm geschieht.

Nicht koordinatengebend sind unter anderem Tastatur, Sprach- und Gestenerkennung<sup>2</sup>, bei denen spezifische Funktionen nach Betätigung einer Geste, nach dem Sprechen eines Sprachkommandos oder nach dem Drücken einer Taste ausgeführt werden. Bei den Tasten kann zusätzlich in Hardkey und Softkey unterteilt werden - ein Hardkey ist immer an eine einzige Funktion gebunden (kontextunabhängig), während Softkeys kontextabhängig verschiedene Funktionen anbieten können.

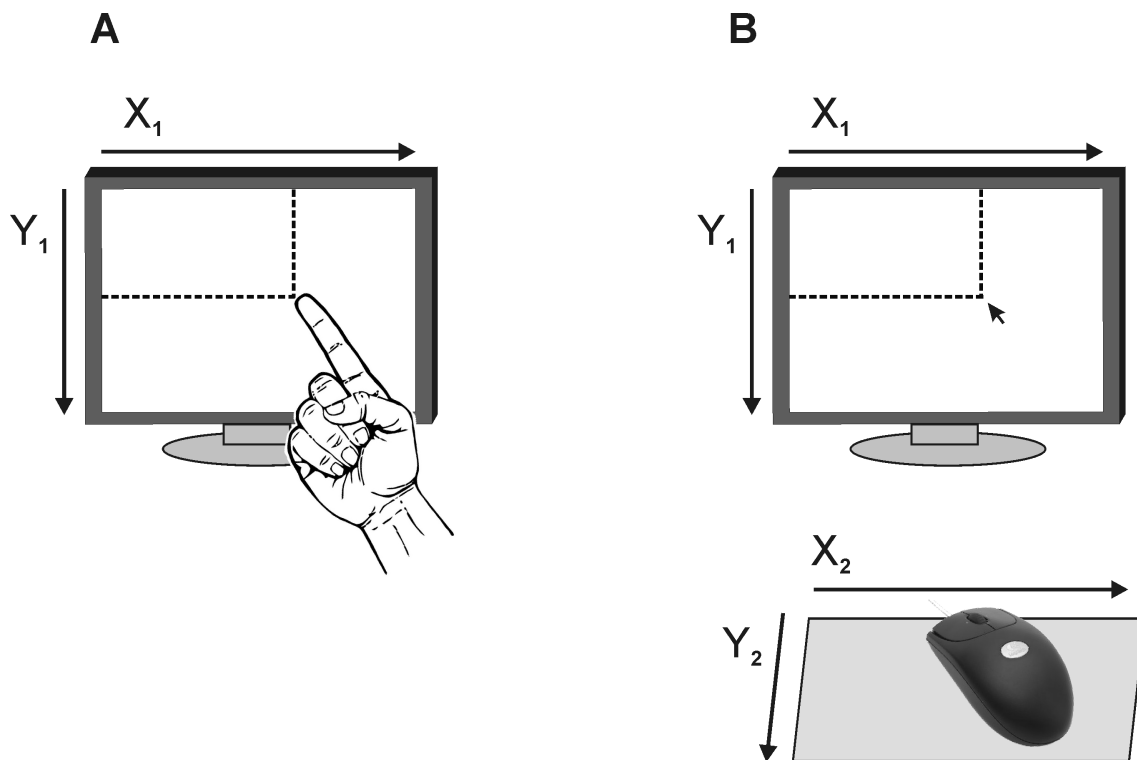


Abbildung 2.20: Wirkprinzipien von koordinatengebenden, 2-dimensionalen Interaktionsgeräten. A) Beim direkten Wirkprinzip geschieht eine Positionierung des Zeigers, z.B. durch einen Touchscreen, unmittelbar auf der Bildschirmenebene ( $X_1$ ,  $Y_1$ ). B) Beim indirekten Wirkprinzip sind Bildschirmenebene ( $X_1$ ,  $Y_1$ ) und Bewegungsebene ( $X_2$ ,  $Y_2$ ), wie im Fall der Maus, getrennt.

Jedes Interaktionsgerät für sich ist mit Vor- und Nachteilen in bestimmten Bediensituationen verbunden und eignet sich daher nicht für alle Anwendungsfelder

<sup>2</sup>Zeigegesten sind an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

gleichermaßen. Im Folgenden werden einige (nicht) koordinatengebenden Eingabegeräte für private und industrielle sowie medizinische Anwendungen vorgestellt.

### 2.5.1 Koordinatengebende Eingabegeräte

#### Maus:

Die Maus ist ein koordinatengebendes Eingabegerät zur Übertragung von zweidimensionalen Bewegungen - meist auf einer horizontalen Oberfläche - in Zeigerbewegungen auf dem Bildschirm (Abb. 2.21). Bei der Benutzung liegt die Handfläche auf dem Maus-Gehäuse, wobei die Finger auf einem oder mehreren Schaltelementen ruhen, so dass zusätzliche Schaltoperationen durchgeführt werden können. Bewegungen der Maus werden nach dem indirekten Wirkprinzip mechanisch, heute in der Regel eher durch einen optischen Sensor registriert und in Positionierungsoperationen umgesetzt.

Es gibt verschiedene Ausführungen der Maus, je nachdem für welche Aufgabe sie eingesetzt wird, z.B. Büroapplikationen, Computerspiele oder medizinische Interventionen. Bei Spielen zählt in der Regel ein möglichst präzises Steuerungsverhalten, bei Büroanwendungen eine komfortable Bedienung, während im Operationssaal Platzbedarf und Hygiene im Vordergrund stehen (s. Kap. 4.2.1). Positionierungs- und Manipulationsoperationen können komfortabel, schnell und präzise durchgeführt werden.

Die Auflagefläche hat, verglichen mit anderen Eingabegeräten, einen hohen Platzbedarf und ist darüber hinaus unflexibel hinsichtlich ihrer räumlichen Anordnung am Arbeitsplatz, da sie kaum geneigt sein darf.

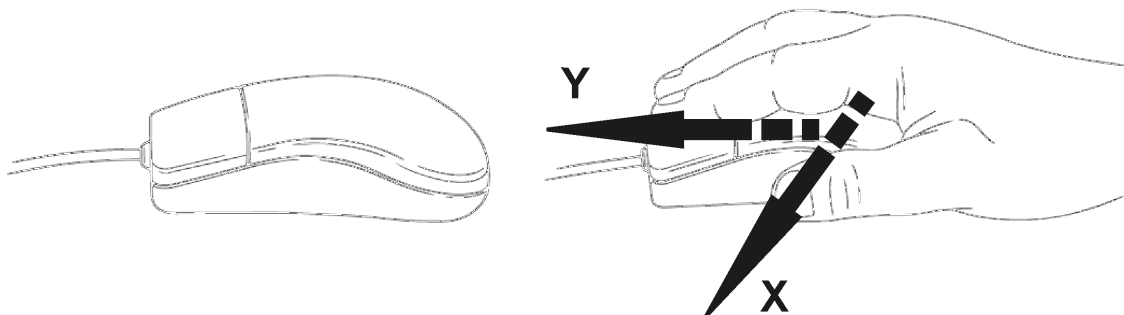


Abbildung 2.21: Darstellung der Mouse, nach VDI/VDE 3850-2 [VDI02, S. 17]. Bewegungen entlang der X- und Y-Achse werden in zweidimensionale Zeigerbewegungen auf dem Bildschirm übersetzt.

**Trackball:**

Beim Trackball wird ein frei rotierbarer sphärischer Ball auf einem stationären Gehäuse mit den Fingern gedreht (Abb. 2.22). Dieses Interaktionsgerät ist vergleichbar mit einer invertierten Maus - Rotationsbewegungen des Balls werden mechanisch oder optisch erfasst und in zweidimensionale Positionierungsänderungen translatiert. Zusätzlich bietet der Trackball Schaltelemente an, die üblicherweise mit dem Daumen ausgelöst werden. Abhängig von Masse und Größe der Rollkugel variiert die Steuerungsgenauigkeit, so eignen sich schwere und große Kugeln für eine präzise Bedienung, jedoch auf Kosten der Positionierungsgeschwindigkeit und des Platzverbrauchs.

Hauptsächlich wird der Trackball als Ersatz einer Maus in räumlich stark begrenzten Arbeitsplätzen, unter anderem als kombiniertes Gerät mit einer Tastatur, platzsparend eingesetzt. Weitere Bedienunterschiede zur Maus sind, dass längeres Arbeiten ermüdend wirkt und der Trackball ungeeignet für Freihandanwendungen (z.B. Zeichnen) ist.



Abbildung 2.22: Darstellung des Trackball, nach VDI/VDE 3850-2 [VDI02, S. 19]. Bewegungen der Rollkugel entlang der X- und Y-Achse werden in zweidimensionale Zeigebewegungen auf dem Bildschirm übersetzt.

**Joystick:**

Der Joystick besteht in der Regel aus einem Handgriff, der senkrecht zur Tischebene auf einem Sockel sitzt und über mehrere Schaltelemente verfügt (Abb. 2.23). Es kann in zwei unterschiedliche Bedienprinzipien unterteilt werden. Bei den sogenannten Force-Joysticks wird die einem unbeweglichen Griff entgegengerichtete Kraft in zweidimensionale Cursor-Bewegungen überführt. Das zweite, eher gängige, Funktionsprinzip basiert auf der Auslenkung des beweglichen Griffs. Je nach Ausführung und Größe kann dieses Eingabegerät mit nur wenigen Fingern oder mit der ganzen Hand gesteuert werden.

Der Joystick findet häufig Verwendung für präzise Zielverfolgungs- und Steuerungsaufgaben bei Maschinen/Robotern im dreidimensionalen Raum wie Flugzeugen und

Baukränen. Je nach Ausführung und Größe können diese Eingabegeräte platzsparend eingesetzt werden, jedoch ist eine längere Bedienung bei stärkeren Auslenkungen des Handgriffs bzw. bei höherem Kraftaufwand im Fall des Force-Joystick ermüdend.

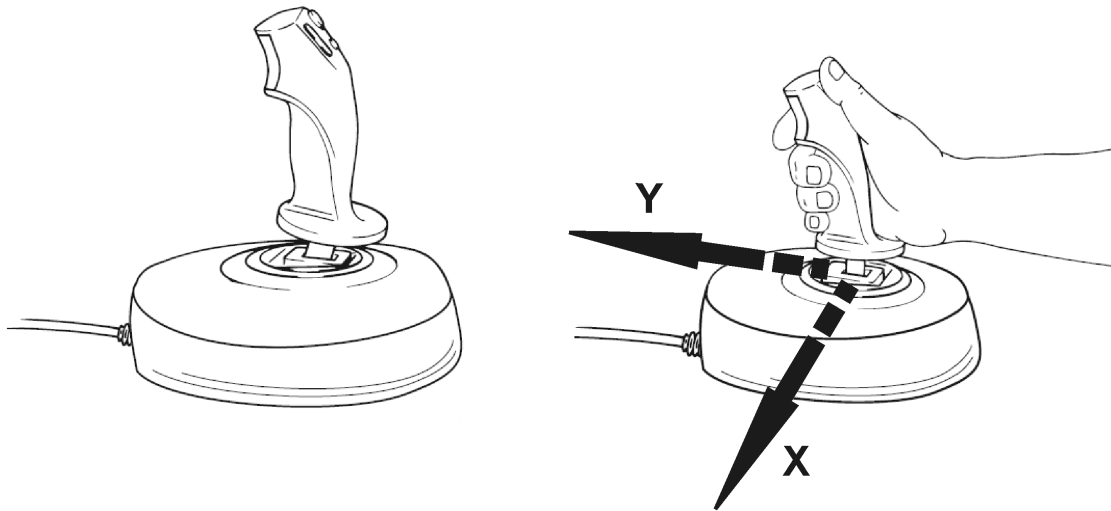


Abbildung 2.23: Darstellung des Joystick, nach VDI/VDE 3850-2 [VDI02, S. 31]. Auslenkungen des Handgriffs entlang der X- und Y-Achse werden in zweidimensionale Zeigebewegungen auf dem Bildschirm übersetzt.

### **Tablett:**

Das Tablett, auch als Trackpad bezeichnet, ist ein Eingabegerät, welches sich durch den Finger direkt oder durch ein stiftförmiges Instrument bedienen lässt (Abb. 2.24). Eine hitze-, licht-, meist aber drucksensitive Oberfläche registriert den entsprechenden Stimulus und interpretiert ihn. Drag&drop-Operationen führen zu Cursor-Bewegungen - im Fall von nur kurzen Kontakten von Finger/Stift und dem Tablett können Schaltoperationen, zum Beispiel in dafür dedizierten Bereichen, interpretiert werden. Hauptsächlich eingesetzt wird das Tablett bei graphisch gestalterischen Aufgaben wie CAD-Zeichnungen - es kann aber auch als Alternative zum Touchscreen zur Bedienung einer GUI mit Bedienelementen verwendet werden. Größere Ausführungen dieses Eingabegeräts bieten zwar einen hohen Komfort, doch wird auch mehr Platz zum Auflegen des Tablets benötigt.

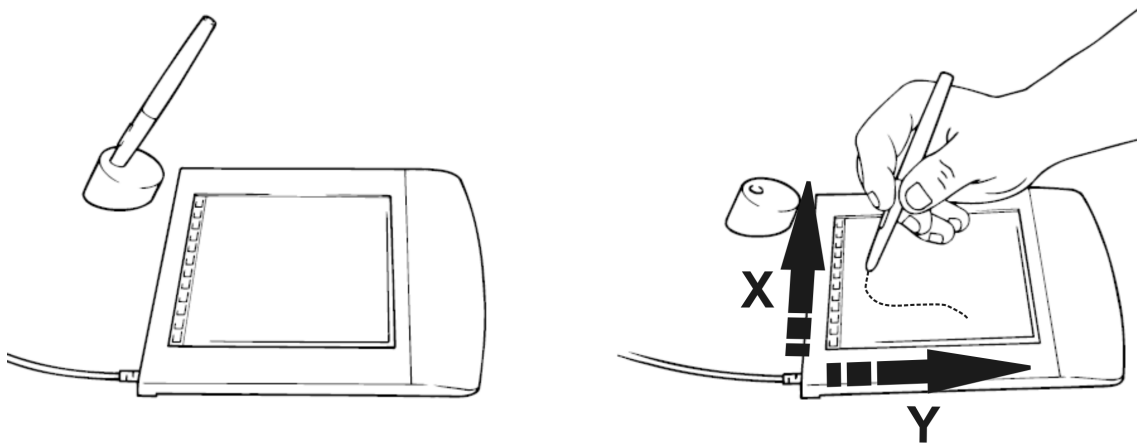


Abbildung 2.24: Darstellung des Tablett, nach VDI/VDE 3850-2 [VDI02, S. 34]. Eine drucksensitive Oberfläche registriert Berührungen und übersetzt sie in Zeigebewegungen oder Schaltoperationen auf dem Bildschirm.

### Touchscreen:

Beim Touchscreen handelt es sich um ein integriertes Ein- und Ausgabegerät (Abb. 2.25). Berührungen des Fingers oder ggfs. eines Stifts werden auf der Oberfläche des Bildschirms - üblicherweise einem LCD-Monitor (siehe Kapitel 2.6) - registriert. Da eine Bedienung direkt auf der Bildelebene stattfindet, wird dem Nutzer eine vereinfachte Hand-Augen-Koordination, im Vergleich zu Geräten mit einem indirekten Wirkprinzip, abverlangt. Man unterscheidet, je nachdem wie ein Kontakt registriert wird, in resistiven, kapazitiven, optischen oder Oberflächenwellen-Touchscreen:

- Resistiver Touchscreen:

Eine obere Kunststoffschicht erzeugt bei Berührung mit der darunter liegenden starren Grundschicht einen elektrischen Kontakt und löst an dieser Stelle eine Schaltoperation aus. Resistive Touchscreens haben eine hohe Auflösung und eine niedrige Reaktionszeit, weisen aber aufgrund ihrer zwei benötigten Schichten die niedrigste Lichtdurchlässigkeit von nur 75% auf und sind zudem anfällig für Kratzer [VDI02, S. 38].

- Kapazitiver Touchscreen:

Bei kapazitiven Touchscreens wird ein elektrisches Feld auf dem Bildschirm erzeugt, das bei Berührung mit einem entsprechenden Gegenstand gestört wird. Der Ort der Störung kann durch Elektroden rekonstruiert und in Schaltoperationen umgesetzt werden. Zwar gewährt dieses Gerät eine gute Lichtdurchlässigkeit und Reaktionszeit, doch können unter anderem keine bzw. nur spezielle Handschuhe benutzt werden.

- **Optischer Touchscreen:**

Diese Technik, vor allem bei so genannten Multi-Touch-Systemen verwendet, basiert auf dem Prinzip der Totalreflexion, wobei seitlich in eine Scheibe - etwa aus Acryl - emittiertes Infrarotlicht durch die bedienenden Finger reflektiert wird. Das abgelenkte Licht wird von einer unterhalb der Scheibe installierten Infrarotkamera erfasst und in Schaltoperationen überführt werden. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass im Gegensatz zu allen anderen Touchscreen-Technologien, mehrere Finger gleichzeitig nutzbar sind.

- **Oberflächenwellen-Touchscreen:**

Akustische Wellen werden entlang der Bildschirmoberfläche emittiert und bei einer Bedienung, beispielweise durch den Finger, teilweise absorbiert. Die Position der Störung dieses akustischen Feldes kann zurückverfolgt werden, wobei die Stärke des Drucks in eine Z-Koordinate (bis zu 256 Unterteilungen) translatiert werden kann. Dünne Stifte eignen sich für eine Bedienung - aufgrund ihrer geringen Masse - nur bedingt.

Unabhängig von der Kontaktregistrierungstechnik können Touchscreens platzsparend betrieben werden, da - wie bereits erwähnt - Eingabe und Ausgabe von Informationen in einem Gerät integriert sind. Gleichzeitig ergibt sich daraus jedoch auch die Gefahr der Verdeckung von Bildschirmbereichen durch die bedienende Hand. Das haptische Feedback bei einer Bedienung von Touchscreens ist im Gegensatz zu physischen Schaltern oder Tasten prinzipiell nicht vorhanden, so dass eine visuelle und akustische Rückmeldung bei diesem Gerät essentiell sind [VDI04]. Derzeitiger Gegenstand der Forschung und Entwicklung sind Touchscreen-Systeme mit haptischem Feedback beispielsweise durch lokal definierte Vibrationen der Oberfläche. Längeres Arbeiten am Touchscreen ist ermüdend, da der Arm des Nutzers mit zunehmender Bildschirmgröße oft bewegt werden muss - daher bieten sich vor allem Aufgabenfelder an, bei denen nur kurze Bedienoperationen nötig sind.

### **Mehrdimensionale Eingabegeräte:**

Mehrdimensionale Eingabegeräte zeichnen sich durch eine höhere Anzahl an Freiheitsgraden (Degrees of Freedom, DOF) aus und werden prinzipiell nur in speziellen Anwendungsgebieten verwendet, zum Beispiel bei solchen, bei denen sich der Nutzer in einer virtuellen, 3-dimensionalen Umgebung zurecht finden muss (Virtual Reality). Dazu bieten solche Eingabegeräte wie die 3D-Maus jeweils 3 Rotations- und Translationsachsen an (6 DOF), über die sich in jede Richtung gedreht und bewegt werden kann.

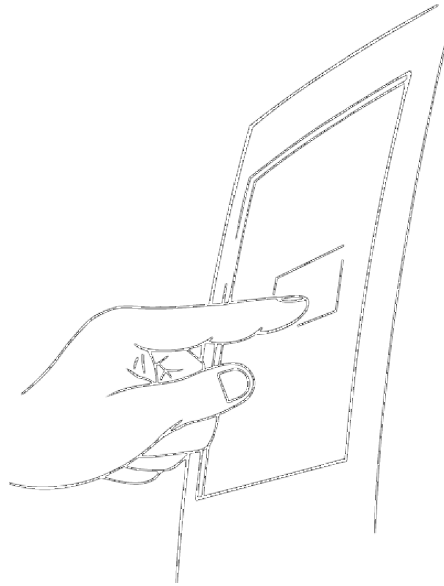


Abbildung 2.25: Darstellung des Touchscreen, nach VDI/VDE 3850-2 [VDI02, S. 38]. Kontakt ereignisse mit dem Touchscreen werden direkt in Zeigebewegungen oder Schaltoperationen übersetzt.

Es existieren mehrere unterschiedliche Ansätze, um eine Nutzereingabe mit 6 und mehr Freiheitsgraden zu ermöglichen - neben der 3D-Maus der Datenhandschuh, welcher Lage und Orientierung von Hand und Fingern registrieren kann, indem unter anderem die Fingerkrümmung erkannt wird.

Eine weitere Technik, die vor allem bei der Entwicklung von Computerspielen und Filmen verwendet wird, ist das Motioncapture-Verfahren, wobei in optisches und nicht optisches Motioncapturing zu unterteilen ist. Bei der optischen Variante werden dem Nutzer an bestimmten Stellen seines Körpers (üblicherweise einigen Gelenken) sogenannte Marker mit spezieller Form und Farbe angebracht<sup>3</sup>, deren Positionsänderungen in einem kalibrierten Interaktionsbereich von mehreren Kameras segmentiert werden. Nichtoptische Motioncapture-Systeme übertragen Lageänderungen unter anderem in Form magnetischer Signale.

## 2.5.2 Nicht koordinatengebende Eingabegeräte

### Tastatur:

Die Tastatur gehört zu der Gruppe der nicht koordinatengebenden Interaktionsgeräte und bildet für eine Texteingabe den aktuellen Standard. Je nach Anwendung besteht sie aus einer variierenden Anzahl von Tasten. Eine Taste kann unter anderem durch mechanischen oder magnetischen Kontakt mit unterschiedlichem

<sup>3</sup>Es gibt auch markerlose Motioncapture-Ansätze, doch sind solche Verfahren oft fehleranfälliger.

Betätigungsweg und unterschiedlicher Betätigungskraft aktiviert werden.

Man spricht von Hardkeys (meist explizit beschriftet), wenn Tasten kontextunabhängig jeweils nur eine spezifische Schaltfunktion ausüben, im Gegensatz zu Softkeys, die kontextabhängig verschiedene Funktionen bewerkstelligen können. Ein Softkey setzt sich zusammen aus dem eigentlichen Schaltelement und einer dynamischen, grafischen Anzeige zur Beschreibung der kontextbedingten Funktion, wie es beispielsweise bei Geldautomaten der Fall ist (s. Abb. 2.26). Vorteilhaft bei Softkeys ist, dass sie aufgrund ihrer polymorphen Funktionalität platzsparend in Bediensysteme integriert werden können, während Hardkey-Tastaturen für jede Funktion eine dedizierte Taste bereitstellen müssen. Dies kann allerdings vor allem bei inkonsistenten grafischen Schnittstellen zu Verwechslungen führen, etwa wenn eine Abbruchfunktion nur in einem Kontext an anderer Stelle durchgeführt wird, der Nutzer dies jedoch zu spät merkt.

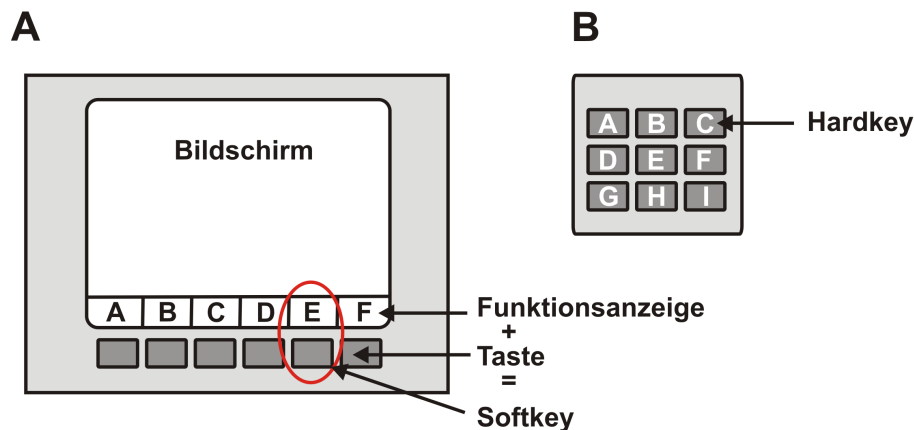


Abbildung 2.26: Darstellung verschiedener Tastaturen, nach VDI/VDE 3850-2 [VDI02, S. 56]. A) Ein Softkey besteht aus einer Taste mit zugehöriger, kontextabhängiger Funktionsanzeige auf dem Bildschirm. B) Hardkeys führen jeweils nur eine spezifische, kontextunabhängige Funktion aus.

### **Spracherkennung:**

Spracherkennungssysteme werden, relativ gesehen, bislang nur in begrenzten Anwendungsgebieten eingesetzt, wie bei automatischen Telefonagenten oder der Erstellung von Befunden und Arztbriefen in der Medizin. Generell werden technische Geräte vor allem dann über Sprache gesteuert, wenn die Hände für eine Bedienung nicht verfügbar sind, etwa weil sie für andere Tätigkeiten benötigt werden. Die Erkennungsleistung von Spracherkennungssystemen hat sich bis zum heutigen Zeitpunkt stark verbessert, hängt jedoch von einigen kritischen Faktoren ab - besonders



von der Aussprache des Nutzers. Ein gesprochenes Wort klingt nach wiederholter Aussprache nie völlig gleich. In einem Versuch führten 100 Äußerungen des Wortes „*sieben*“ bei verschiedenen Sprechern zu 10 verschiedenen Aussprachvarianten [EEW92]. Gründe dafür sind, dass die Sprechweise unter anderem von der individuellen Stimmung, Müdigkeit, Gesundheit (Erkältung) und dem jeweiligen Kontext (Koartikulation) beeinflusst wird - darüber hinaus können die verantwortlichen Muskeln nicht identisch reaktiviert werden. Des Weiteren wirken sich äußere Faktoren auf die Erkennungsleistung aus wie etwa Umgebungsgeräusche oder die Mikrofonqualität [Eul06, Shn00, KVN03].

Die Größe des Wortschatzes steht oft in unmittelbarem Zusammenhang mit der Fehlerrobustheit eines Spracherkennungssystems. Je umfangreicher und komplexer die Zahl theoretisch detektierbarer Wörter ist, desto höher ist die Gefahr einer fehlerhaften Erkennung, zum Beispiel durch Verwechslungen ähnlich klingender Laute (*rotieren, sortieren*) oder Homophone (*Meer, mehr*).

Aus Sicht des Sprechers kann man Spracherkennungssysteme in sprecherabhängig und sprecherunabhängig unterteilen:

- Sprecherabhängige Systeme setzen vor der ersten Verwendung eine adaptive Trainingsphase des Nutzers voraus, wobei ein individuell angepasstes Sprachmodell generiert wird. Da bei diesem Prozess Eigenheiten bei der Aussprache des Nutzers mitberücksichtigt werden können, kann der Wortschatz zum Teil sehr umfangreich gestaltet werden, was gerade bei komplexen Aufgabendomänen wie Diktiersystemen vorteilhaft ist. Ein (spontaner) Nutzerwechsel ist jedoch ohne Weiteres nicht möglich und würde ein erneutes Trainieren der Software voraussetzen.
- Sprecherunabhängige Systeme ermöglichen eine direkte Inbetriebnahme ohne vorherige Trainingsphase. Ein generalisiertes Sprachmodell mit limitiertem Wortschatz ermöglicht auch spontane Nutzerwechsel und eignet sich vor allem für Anwendungen, die über einfache Sprachkommandos gesteuert werden.

Eine weitere Aufteilung von Spracherkennungssystemen geschieht hinsichtlich ihres Bedienansatzes:

- Kommando- und Kontrollsysteme detektieren mit Hilfe von Grammatiken Nutzeräußerungen und setzen diese in einen spezifischen Befehl um. Auf diese Weise lassen sich Aufgaben durchführen, bei denen einfache Befehle mit möglichst wenigen Parametern verwendet werden wie beispielsweise „*zoom <rein/raus>*“. Wäre es dem Nutzer möglich, um einen beliebigen Grad  $< n >$

zu zoomen, müsste für jedes  $n$  ein Befehl im Wortschatz bereitstehen, was zu einer vergrößerten Erkennungsfehleranfälligkeit führen kann.

- Dialogsysteme halten mit dem Nutzer in bestimmten Situationen Rücksprache, etwa wenn für die Ausführung eines Befehls nicht genügend Informationen vorliegen (zoom <?>) oder eine explizite Sicherheitsbestätigung notwendig ist.
- Diktiersysteme wandeln gesprochene Wörter direkt in Computertext um. Je nach Aufgabendomäne werden dabei Systeme mit unterschiedlichem Fachvokabular angeboten wie in der Medizin oder der Juristik.

Gesprochene Worte eines Nutzers werden über Mikrofone aufgezeichnet und der Spracherkennungssoftware bereitgestellt. Das Mikrofon kann dabei entweder am Sprecher direkt oder in der Nähe befestigt werden. Beide Möglichkeiten bieten Vor- und Nachteile - so ist die Aufnahmequalität meist besser, wenn das Mikrofon am Mund des Sprechers angebracht ist, doch schränkt diese Variante den Nutzer besonders bei kabelgebundenen Systemen in seiner Beweglichkeit ein.

Abhängig vom Anwendungsgebiet kann eine Spracherkennung auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen:

- Push-to-talk-Systeme verarbeiten erst nach expliziter Aktivierung, zum Beispiel über einen Tastendruck, aufgezeichnete Wörter. Dies hat den Vorteil, dass unbeabsichtigt ausgelöste Befehle - etwa beim Gespräch mit einer anderen Person im Raum - weitestgehend vermeidbar sind, was gerade bei sicherheitskritischen Anwendungen von hoher Relevanz ist.
- Online-Systeme „hören“ während der gesamten Interaktion mit und reagieren im Idealfall erst dann, wenn ein gesprochenes Wort im Wortschatz der Sprachsoftware enthalten ist. Trotz zunehmend robuster werdender Systeme, kann es dennoch zu fälschlich erkannten Befehlen kommen.

Tabelle 2.5 stellt einige der beschriebenen Computer-Eingabegeräte hinsichtlich ihrer Eignung für verschiedene Bedienoperationen, Umgebungs- und Interaktionsfaktoren detailliert zusammen.

Merkmal	Ausprägung								
		Mouse	Trackball	Joystick	Tablett	Touchscreen	Spracherkennung	Hardkey/Tastatur	Softkey/Funktionstasten
Positionieren	Statisches Positionieren	+	+	o	+	+	n/a	n/a	n/a
	Exaktes Positionieren	+	+	+	+	o	n/a	n/a	n/a
	Geschwindigkeit	+	+	o	+	o	n/a	n/a	n/a
	Wirkprinzip	-	-	-	-	+	n/a	n/a	n/a
Selektieren und Aktivieren	Betätigen	o	o	o	o	+	o	+	+
	Rückmeldung Selektion	o	o	o	o	o	o	+	+
	Geschwindigkeit	o	o	o	o	+	-	o	o
Manipulieren	Verschieben	+	+	o	o	-	n/a	n/a	n/a
	Freihandzeichnen	o	-	-	+	-	n/a	n/a	n/a
	Geschwindigkeit	+	o	o	o	-	n/a	n/a	n/a
Text	Texteingabe	-	-	-	-	o	o	+	+
Umgebungsfaktoren	Platzbedarf	-	+	o	o	+	+	-	+
	Bildschirmverdeckung	+	+	+	+	-	+	+	+
	Anordnungsflexibilität	-	o	o	+	+	+	+	o
Interaktionsfaktoren	Bedienungskomfort	+	-	o	+	-	+	o	o

Tabelle 2.5: Merkmalsausprägungen und Eignung verschiedener Interaktionsgeräte, nach VDI/VDE 3850-2 [VDI02]. Ein Gerät kann gut (+), schlecht (-) oder mittelmäßig (o) geeignet bzw. eine Bewertung nicht möglich sein (n/a).

### 2.5.3 Multimodale MMI

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, ist eine zwischenmenschliche Kommunikation meist komplex und findet über mehrere Modalitäten wie Sprache, Gestik und Mimik statt. Für eine MMI definiert Charwat den Begriff der Modalität als [Cha92]:

„[...] Perception via one of the three perception-channels. You can distinguish the three modalities: visual, auditive and tactile (physiology of senses).“

Zwar verfügt der Mensch über weitere Sinne zur Wahrnehmung (vgl. Kap. 2.2), doch haben sich für eine Computerbedienung vor allem der visuelle, der auditive und der taktile Sinn etabliert. Die vorgestellten Eingabegeräte sind jeweils unimodal an eine spezifische Modalität angepasst wie etwa Tastatur oder Sprachsteuerung, doch ist

jedes dieser Geräte mit jeweiligen Vor- und Nachteilen verbunden (s. Tab. 2.5).

Der Ansatz der multimodalen MMI soll dem Nutzer bei einer Interaktion mit dem Computer mehr Ausdruckstärke und Flexibilität bieten, indem verschiedene Schnittstellen wie Sprache und Gestik parallel verarbeitet werden. Durch diese Integration komplementärer Modalitäten und der daraus resultierenden Erhöhung der Interaktionsbandbreite ist es möglich die Schwächen der unimodalen Bedienung auszugleichen bzw. fehlerrobuster und dynamischer zwischen unterschiedlichen Modalitäten zu wechseln. Sprache eignet sich beispielsweise für eine Zeigeaufgabe deutlich schlechter, als Gestik. Wachsmuth spricht auch von einer „Anthropomorphisierung von Schnittstellen“, also dem natürlichen Anpassen an den Menschen [Wac99]. Oviatt weist jedoch darauf hin, dass der Nutzer nicht zwangsläufig multimodal mit einem Computer interagieren wird, wenn er die Möglichkeit dazu hat [Ovi99, S. 3]:

„Users like being able to interact multimodally, but they don't always do so.“

Vielmehr hängt die Interaktionsform von der Aufgabendomäne ab, wobei die Nutzer eines Versuchs gerade bei räumlichen Aufgaben wie der Beschreibung von Form, Orientierung oder Anzahl eines Objekts zu 89% multimodal arbeiten - generelle Aktionen wie das Drucken von Karten werden nur zu 1% multimodal durchgeführt [ODK97]. Weil die Menge der zu verarbeitenden Informationen mit jeder angebotenen Modalität zunimmt, ist das Hauptproblem solcher Bedienansätze die zeitlich korrekte Integration online mit möglichst geringer Reaktionszeit.

## 2.6 Computer-Ausgabegeräte

Bislang wurde eine Gerätebedienung aus Sicht der Nutzereingabe betrachtet. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, verfügt der Mensch über multiple Organe zur Wahrnehmung von Informationen aus seiner Umwelt, die sich für eine Interaktion mit dem Computer unterschiedlich gut eignen. Im Folgenden werden die gängigsten Computer-Ausgabegeräte für eine Informationsdarstellung beschrieben, welche in die Kategorien der visuellen, der auditorischen und der haptischen Ausgabegeräte eingeteilt werden können.

### 2.6.1 Visuelle Ausgabegeräte

Da der menschliche Sehsinn als unsere primäre Modalität zur Aufnahme extrinsischer Informationen gilt, werden bei einer MMI Informationen am häufigsten visuell übermittelt. Eine Kodierung der Informationen kann u.a. durch Bildzeichen direkt oder durch Farbe, Helligkeit, Kontrast, Leuchtdichte, Gestalt (Position, Orientierung, Form etc.) bzw. in Form zeitlich sich ändernder Bilder (Animationen) erreicht werden.

Bereits in den 1950er Jahren, aufbauend auf der Entwicklung der Kathodenstrahlröhre (CRT) - auch Braunsche Röhre genannt - wurden Computersysteme mit meist integriertem Monitor auf Kommandozeilenebene bedient, wobei die Ausgabe fast ausschließlich in Form von Ziffern und Buchstaben stattfand. Mit der zunehmenden Verbreitung von Systemen, die eine Interaktion nach dem Prinzip des Graphical User Interface (GUI) ermöglichen, kam es zu einer sprunghaften Entwicklung von Monitortechnologien wie LCD-Bildschirmen, bis hin zu 3D-Monitoren.

#### **CRT-Monitor:**

CRT-Monitore (Cathode Ray Tube) gehören, wie schon erwähnt, zu den ältesten Computerbildschirmen. Eine Kathodenstrahlröhre emittiert drei Elektronenstrahlen, die nach dem Auftreffen auf einer Phosphorleuchtschicht als sichtbares Licht wahrgenommen werden können. Pro Bildelement (Pixel) besteht diese Beschichtung aus drei unterschiedlichen Phosphorelementen, welche rot, grün oder blau fluoreszieren, wenn sie von einem der Elektronenstrahlen getroffen werden und so nach dem additiven Farbmodell (vgl. Abb. 2.4) jede beliebige Farbe erzeugen können. Eine Rasterung des Bildes geschieht durch das Ablenken der emittierten Elektronen mittels horizontal und vertikal ausgerichteter Magnetfelder.

CRT-Monitore haben keine feste native Bildauflösung, sondern können nahezu beliebig skaliert werden, ohne dass es zu stärkeren Skalierungsverzerrungen kommt - dies

bietet eine höhere Anwendungsflexibilität. Die einzelnen Pixel werden nicht streng diskret beleuchtet, sondern eher in Form einer verschwommenen Gauß-Verteilung bestrahlt, so dass Strukturen mit Kurven prinzipiell besser als solche mit Kanten visualisiert und erkannt werden können [MNK99, HMCB00].

Beim peripheren Betrachten eines CRT-Monitors (Off-Axis) kommt es, verglichen mit LCD-Bildschirmen, zu wesentlich geringeren Qualitätsverlusten bei der Farbdarstellung und der Beleuchtung von Bildstrukturen [HPMB02]. Aufgrund der Gerätearchitektur - vor allem wegen der Unterbringung der Kathodenstrahlröhre - sind CRT-Monitore schwer und haben einen hohen Platzbedarf. Des Weiteren müssen für einen reibungslosen Betrieb Wechselwirkungen mit externen Magnetfeldern vermieden werden.

### **LCD-Monitor:**

LCD-Monitore (Liquid Crystal Display) unterscheiden sich hinsichtlich ihres Funktionsprinzips vom CRT-Bildschirm. Von der Rückseite des Geräts wird Licht emittiert, das polarisiert und durch eine Schicht mit Flüssigkristallen geleitet wird. Die Ausrichtung der Kristalle kann durch Anlegen eines elektrischen Feldes gesteuert werden, so dass je nach Orientierung die Polarisation des eingehenden Lichts und damit die Helligkeit bzw. Sichtbarkeit geregelt wird. Die Farbe der einzelnen Pixel wird additiv für jeden Subpixel (Rot, Grün, Blau) über einen Farbfilter geregelt. Aufgrund der diskreten Architektur und der Ansteuerung der einzelnen Bildelemente haben LCD-Monitore eine feste native Auflösung, so dass Änderungen der Bildschirmauflösungen zu Verzerrungseffekten führen können. Kanten sind sehr klar darstellbar, jedoch treten bei Kurven sogenannte Aliasing- oder Treppeneffekte<sup>4</sup> auf. Werden Anwendungen im Bereich der nativen Bildschirmauflösung betrieben, erzeugen diese Monitore ein sehr scharfes Bild. Eine Off-Axis-Betrachtung eines LCD führt abhängig vom Betrachtungswinkel zu Farbverzerrungen und reduzierter Helligkeit, da das wahrgenommene Licht einen längeren Weg durch die Flüssigkristallschicht benötigt, was wiederum zu Polarisationsveränderungen führt [SP97, HPMB02].

Weil in LCD-Monitoren keine Kathodenstrahlröhre verbaut wird, sind der Platzbedarf und das Gewicht bei diesen Geräten wesentlich geringer, verglichen mit CRT-Bildschirmen. Zusätzlich haben der ständig sinkende Marktpreis und die stetige Zunahme der Display-Größe dazu geführt, dass CRT-Monitore aus sehr vielen Anwendungsgebieten - wie im Büro- und im Privatbereich - fast vollständig vom LCD verdrängt wurden.

---

<sup>4</sup>Um solche Treppeneffekte zu reduzieren, können Anti-Aliasing Techniken zur Kantenglättung eingesetzt werden.

Abbildung 2.27 stellt beide Monitorvarianten bezüglich ihrer Dimensionierung vergleichend gegenüber.

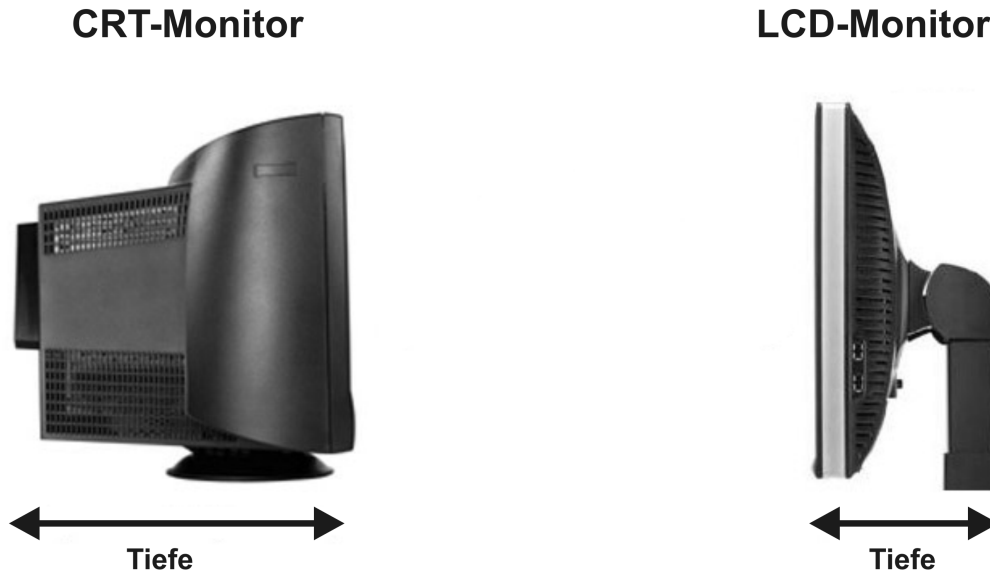


Abbildung 2.27: LCD und CRT. LCD-Monitore (r.) haben bei gleicher Größe der Sehfläche einen wesentlich geringeren Platzbedarf, verglichen mit CRT-Monitoren (l.). Bei Letzteren führt vor allem die Verbauung der Kathodenstrahlröhre zu einer erhöhten Gerätetiefe.

### Videoprojektor:

Videoprojektoren, umgangssprachlich auch als Beamer bezeichnet, projizieren ein Bild auf eine beliebige Oberfläche im Raum. Vor allem in den Bereichen der Lehre, Forschung und Unterhaltung haben sich solche Projektorsysteme zur kostengünstigen, großflächigen Visualisierung und Präsentation etabliert. Die dargestellte Bildgröße hängt vor allem vom Abstand zwischen Projektor und Leinwand ab, wobei aus Gründen der Bildschärfe geräteabhängig bestimmte Minimal- und Maximalwerte eingehalten werden müssen. Mit zunehmendem Abstand wird die Menge des einfallenden Lichts auf der Projektionsfläche geringer - dies kann durch eine höhere Leuchtstärke des Beamers ausgeglichen werden, was wiederum zu erhöhter Wärmeabfuhr und Lüfterlautstärke führt. Beamer variieren des Weiteren hinsichtlich ihres Projektionsprinzips, so gibt es CRT-, LCD-, LED-, DLP-Projektoren und einige Weitere, welche mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen der verwendeten Technik verbunden sind.

Man unterscheidet prinzipiell zwischen dem Frontal- und dem Rückprojektionssystem. Beim ersten wird das darzustellende Bild von vorne auf eine Leinwand projiziert -

der Beamer wird dazu üblicherweise im hinteren Bereich des Raums untergebracht. Zwar benötigt diese Variante wenig Platz, doch kann es zu Verdeckungen und damit zu Schatten auf der Bildoberfläche kommen, beispielsweise wenn der Nutzer zwischen Projektor und Leinwand tritt. Dieses Problem besteht nicht bei der Rückprojektion - hier wird das Bild von hinten auf eine durchscheinende Oberfläche gestrahlt, was jedoch zu einem erhöhten Platzbedarf führt, da die Leinwand in diesem Fall weiter in die Raummitte verlegt werden muss, um den minimalen Abstand zum Beamer zu gewährleisten.

Neben der Verdeckung ist das Hauptproblem bei der Anwendung von Videoprojektoren, dass die Bildqualität wesentlich von der Umgebungsbeleuchtung abhängt - eine bestmögliche Qualität wird im dunklen Raum ermöglicht, während bei direktem Sonnenlichteinfall auch leuchtstarke Geräte nur schlecht erkennbare Bilder produzieren.

Man spricht von Head-Up-Displays (HUD), wenn eine Projektion von Informationen direkt im Sichtfeld des Nutzers stattfindet wie beispielsweise im Cockpit eines Kampfflugzeugs.

### **3D-Display:**

Für die visuelle Tiefenwahrnehmung bedient sich das menschliche Gehirn verschiedener Integrationsstrategien - u.a. der Stereopsis, also dem Sehen von zwei leicht versetzten Bildern (ca. 6 cm) mit dem linken und dem rechten Auge (vgl. Kap. 2.2.1). Stereoskopische 3D-Displays basieren auf diesem Prinzip und ermöglichen ein räumliches Sehen, indem dem Betrachter getrennt für jedes Auge jeweils ein versetztes Halbbild präsentiert wird. Für die Integration der Halbbilder und die daraus resultierende Tiefenwahrnehmung muss eine Kanaltrennung durchgeführt werden, wobei einige Techniken im weiteren Verlauf beschrieben werden:

- Bei der Shuttertechnik trägt der Betrachter eine sogenannte Shutterbrille, in deren Gläser ein LCD eingebaut ist. Während die Halbbilder nacheinander gezeigt werden, verdunkeln sich die einzelnen LCD-Gläser der Brille nach Empfang bestimmter Steuersignale, so dass jedes Auge nur das für sich bestimmte Bild sieht (Abb. 2.28.A).
- Man spricht von einer farbanaglyphischen Projektion, wenn die Darstellung beider Bilder gleichzeitig - in komplementären Farben - geschieht. Bei einer rot-grün-Präsentation eliminiert das rote Glas der Farbfilterbrille das Rotbild, wobei das grüne Bild schwarz gesehen wird, andersherum verhält es sich mit dem Grünbild. Neben der Verwendung der Farben Rot und Grün gibt es unter anderem auch rot-cyan- oder rot-blau-Kombinationen (Abb. 2.28.B).



- Bei der Polarisationsfiltertechnik werden die Halbbilder in Form von polarisiertem Licht gleichzeitig projiziert. Eine sogenannte Polfilterbrille, mit zwei, jeweils um  $90^\circ$  gedrehten Polarisationsfiltern, lässt für jedes Auge nur das bestimmte Bild passieren, so dass ein räumliches Sehen ermöglicht wird (Abb. 2.28.C).



Abbildung 2.28: Bei einer 3D-Projektion wird pro Auge jeweils ein Halbbild gleichzeitig oder kurz nacheinander präsentiert. Je nach Visualisierungstechnik filtern unterschiedliche 3D-Brillen die Bilder für das linke und das rechte Auge. A) In die Gläser einer Shutterbrille sind LCDs eingebaut, die sich über Steuersignale verdunkeln lassen und somit nur für spezifische Halbbilder durchlässig sind. B) Bei einer Farbfilterbrille löschen die Brillengläser jeweils ein Halbbild der entsprechenden Farbe aus, während das andere Bild in der Komplementärfarbe schwarz wahrgenommen wird. C) Die Polfilterbrille lässt aufgrund der  $90^\circ$  zueinander gedrehten Polarisationsfilter nur bestimmte Halbbilder je Auge passieren.

Im Gegensatz zu den bislang vorgestellten stereoskopischen Visualisierungstechniken, die das Tragen einer 3D-Brille voraussetzen, erzeugen autostereoskopische Displays ein dreidimensionales Bild, ohne zusätzliche Hilfsmittel tragen zu müssen. Für einen limitierten Betrachtungsbereich (Sweet Spot) werden die Halbbilder über eine vorgeschaltete Prismenmaske auf das linke und rechte Auge separat projiziert. Um den Sweet Spot zu vergrößern und mehrere Nutzer gleichzeitig zu berücksichtigen, gibt es Ansätze mit integrierten Eye-Tracking-Systemen zur Positionsbestimmung der Betrachter [SOBS08]. Basierend auf den Augenpositionen der Betrachter, richtet sich die Prismenmaske dynamisch aus, so dass auch Kopfbewegungen kompensiert werden können. Autostereoskopische Displays bieten sich beispielsweise für die Darstellung dreidimensionaler Patientenbilder in der Medizin oder bei der Visualisierung und Erstellung von 3D-Modellen (CAD) an.

## 2.6.2 Auditorische Ausgabegeräte

Auditorische Ausgabegeräte sind oft Teil einer MMI, etwa um dem Nutzer ein akustisches Feedback bei der Gerätebedienung anzubieten oder um Informationen sprachlich bzw. in Form von Tönen darzustellen (Sonifikation). Zum Beispiel erzeugt das Drücken einer Schaltfläche auf einem Touchscreen ein vergleichsweise reduziertes haptisches Feedback im Vergleich zum Drücken einer Taste des Keyboards, so dass in vielen Fällen zusätzlich ein Klickton ausgegeben wird, um den Nutzer über die erfolgreiche Registrierung seines Befehls zu informieren. Eine akustische Wiedergabe geschieht in Form von Boxen oder Kopfhörern.

Die Kodierung von Informationen kann mit Variationen der Lautstärke, Tonhöhe, Tonart, Tondauer, Lokalisierung und des semantischen Kontexts einhergehen [Bit06]. Am Anästhesiearbeitsplatz zeigen Studien, dass somit 6 bis 8 unterschiedliche Vitalparameter korrekt detektiert und identifiziert werden können [LF02, WS04]. Ferner wurde eine signifikant kürzere Reaktionszeit bei kritischen akustischen Alarmen im Vergleich zu visuellen Alarmen nachgewiesen [MM96].

Die ergänzende auditorische Darstellung von Informationen - man spricht auch von auditorischen Displays - bietet sich vor allem für Anwendungen an, bei denen das visuelle System des Nutzers stark belastet wird wie beispielsweise beim Autofahren. Dort wurde anhand von Experimenten gezeigt, dass akustische Signale die Fahrleistung deutlich geringer stören als visuelle [Tro01].

Auditorische Displays können besonders in platz-restringierten Aufgabendomänen wie dem Operationssaal eingesetzt werden und sind entsprechend ihrer Natur unabhängig von dortigen Sichtbedingungen wie der Helligkeit (vgl. Kap. 4.2.1).

Ungeeignet sind auditorische Displays für die Darstellung längerer Informationsketten, so ist die Kapazität des auditorischen Speichers auf etwa 5 Elemente limitiert - zum Vergleich fasst der visuelle Speicher ca. 17 Elemente (Kap. 2.4.4). Fellbaum bezeichnet ein sprachliches Informationsvolumen, dessen akustische Formulierung länger als 10 Sekunden dauert, für zu umfangreich [Fel92].

Bei einer Fahraufgabe wurde eine Abnahme der Fahrleistung nachgewiesen, wenn akustische Informationen einen räumlichen Zusammenhang beschreiben - dafür bieten sich auditorische Displays weniger an [Tro01]. Laute und sehr leise Umgebungen oder solche, bei denen ein sprachlicher Austausch mit anderen Personen häufig stattfindet, sind ebenfalls für den Einsatz auditorischer Displays ungeeignet.

### 2.6.3 Haptische Ausgabegeräte

Für spezielle Anwendungen werden neben einer visuellen und einer auditorischen Darstellung von Informationen auch haptische Reize verwendet. Unter anderem können Vibrationen sowie Druck- und Texturveränderungen ergänzend oder als alleinige Informationsquelle genutzt werden. Da solche Techniken vergleichsweise selten eingesetzt werden, wird im Folgenden nur kurz auf einige verschiedene Ansätze eingegangen.

Ein typisches haptisches Ausgabegerät ist die Braillezeile - sie übersetzt Zeichen auf dem Bildschirm in Brailleschrift und ermöglicht auf diese Weise Blinden das Lesen am Computer.

Für eine Verstärkung des Grades der Immersion bei Anwendungen in der virtuellen und erweiterten Realität<sup>5</sup> werden Force-Feedback-Geräte angeboten, die der Steuerung des Nutzers Kraft entgegenbringen. Bei Simulatorumgebungen, z.B. in der Luftfahrt und in der Nautik, aber auch zu Trainingszwecken in der Führung endoskopischer Instrumente bei medizinischen, minimal-invasiven Eingriffen, haben sich solche Techniken bewährt [PCA<sup>+</sup>09, PAB<sup>+</sup>09, SS03]. Haptische Ausgabegeräte können, unabhängig von visueller Rückkopplung und auch bei großem Umgebungslärm, besonders unterstützend eingesetzt werden.

---

<sup>5</sup>Augmented Reality bedeutet eine Erweiterung der Nutzerwahrnehmung, z.B. durch überlappendes Einspielen relevanter Zusatzinformation im Sichtfeld.



# 3 Ergonomie

## 3.1 Definition und Entwicklung

Der Begriff der Ergonomie leitet sich vom Griechischen *ergon* (Arbeit) und *nomos* (Gesetz) ab. Die Ergonomie, auch oft als Human Factors bezeichnet, ist eine systemorientierte Disziplin, bei der der Mensch im Vordergrund steht. Sie verfolgt das Ziel, die Sicherheit, Gesundheit, Zufriedenheit und Effizienz des Menschen am Arbeitsplatz zu verbessern [DW08]. Die International Ergonomics Association (IEA), gegründet 1961 und mit aktuell über 19.000 Mitgliedern in mehr als 40 Ländern vertreten, definiert Ergonomie nach offizieller Übereinkunft als [Int09]:

„Ergonomics (or human factors) is the scientific discipline concerned with the understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance.“

Anwendung findet die Ergonomie als interdisziplinäres Fach in vielen unterschiedlichen Domänen und berührt dabei physikalische, kognitive, soziale und organisatorische Faktoren, die Einfluss auf die Interaktion mit einem System haben. Die IEA differenziert grob in drei Hauptdomänen:

- **Physikalische Ergonomie:**  
In diesem Anwendungsgebiet werden physikalische Aktivitäten unter der Betrachtung anatomischer, anthropometrischer, physiologischer und biomechanischer Faktoren untersucht. Themen von Relevanz gehen unter anderem einher mit der Analyse der Körperhaltung, der physischen Anstrengung, der Sicherheit und der Gesundheit am Arbeitsplatz. Der ergonomisch optimierte Arbeitsplatz kann domänenspezifisch, auf den Ergebnissen dieser Analysen aufbauend, abgeleitet werden.
- **Kognitive Ergonomie:**  
Die kognitive Ergonomie betrachtet relevante mentale Prozesse wie Wahrneh-

mung und Gedächtnis, welche Einfluss auf die Leistung bei einer Aufgabendurchführung haben. Mentale Belastung, Stress und deren Auswirkungen stehen hier im Vordergrund.

- Organisatorische Ergonomie:

Optimierungsansätze in dieser Domäne betrachten den Menschen am Arbeitsplatz aus soziologisch-technischer Sicht, dabei werden Organisationsstrukturen, Bestimmungen und Arbeitsabläufe (Workflows) untersucht. Erkenntnisse der organisatorischen Ergonomie können vorteilhaft auf die Kommunikation und Zusammenarbeit im Team, auf das Qualitätsmanagement, die Telearbeit oder die Arbeitszeitgestaltung übertragen werden.

Entwickelt hat sich die Ergonomie zu Zeiten des 2. Weltkriegs, als Mensch und Technik militärisch zum ersten mal systematisch miteinander verbunden wurden. Vor dem Hintergrund, dass mehr Flugzeuge während des Hinflugs zum eigentlichen Schlachtfeld abstürzten als durch das Abwehrfeuer des Feindes, wurde ein interdisziplinärer Arbeitskreis aus Physiologen, Psychologen, Anthropologen, Medizinern, Naturwissenschaftlern und Ingenieuren gebildet, die sich mit den Problemen bei der Bedienung komplexer militärischer Ausrüstung beschäftigten und Optimierungsvorschläge erstellten. Nach Ende des 2. Weltkriegs fand dieser Ansatz vor allem in der europäischen und der amerikanischen Industrie Interesse, etwa bei der Untersuchung von Kontrollsystemen in Kraftwerken und in anderen großindustriellen Anlagen.

Heutzutage begründet sich das wirtschaftliche Interesse bei der Anwendung ergonomischer Richtlinien und Methoden vor allem aus Gründen der Leistungssteigerung und Kostenersparnis am Arbeitsplatz - Harris spricht darüber hinaus von einer Ressourcen-, Akzeptanz-, Zufriedenheits- und Sicherheitsoptimierung und gibt Beispiele für die erfolgreiche Anwendung der Ergonomie in verschiedenen Anwendungsgebieten [Har84].

Auch wenn schon seit mehr als 50 Jahren betrieben, so bestehen weltweit in vielen Lebensbereichen noch signifikante ergonomische Defizite. Die Ausgaben für Behandlung und Versorgung arbeitserkrankter Angestellter, bezogen etwa auf die damit verbundene verlorene Arbeitszeit, wird von Koningsveld im Fall der Niederlande im Jahr 2001 auf 6 Milliarden Euro geschätzt, was etwa 2-3% des Bruttosozialprodukts entspricht [Kon05, Kon06].

Im Gesundheitswesen stellt die Ergonomie ebenfalls ein stetig wachsendes Anwendungsfeld dar. Relevante Themen befassen sich u.a. mit der Patientensicherheit, der Zuverlässigkeit medizintechnischer Geräte und mit architektonischen Fragestellungen

gen im Krankenhaus [BCCW06, San06, VRHD07, JPPR<sup>+</sup>07]. Laut Bleyer sind ca. 60% aller Gebrauchsfehler bei medizintechnischen Geräten auf Missverständnisse zwischen Mensch und Maschine zurückzuführen [Ble92]. Die dadurch entstehenden jährlichen Kosten, allein in der Intensivmedizin, werden in Deutschland auf etwa 400 Millionen Euro geschätzt [Bac04].

Da das Feld der Ergonomie sehr weitläufig ist, wird im speziellen Anwendungsfall oft die Gebrauchstauglichkeit als Synonym und Maß der Ergonomie verwendet. Im Folgenden wird der Begriff der Gebrauchstauglichkeit definiert.

## 3.2 Gebrauchstauglichkeit

Oftmals gleich behandelt werden die Begriffe der Ergonomie und der Gebrauchstauglichkeit - im Englischen Usability<sup>1</sup> genannt. Obwohl beide miteinander verbunden sind, ist die Gebrauchstauglichkeit ein kontextspezifisches Attribut und Maß bei einer Interaktion.

Usability ist kein allgemein übertragbares Maß eines Produkts für dessen Brauchbarkeit, sondern muss in Bezug auf einen bestimmten Nutzungskontext beurteilt werden. Ein Produkt ist somit nicht absolut als gut oder schlecht definierbar, sondern für einen bestimmten Einsatzzweck mehr oder weniger gut geeignet. So eignet sich festes Wanderschuhwerk beispielsweise gut für Wanderungen in den Bergen, doch kaum für Strandspaziergänge - obwohl die Schuhe in beiden Fällen für das Gehen verwendet werden, bestimmt der spezifische Kontext (Berge, Strand) die Brauchbarkeit.

Demnach sind verschiedene Faktoren verantwortlich, möchte man die Usability eines Produkts determinieren. Abbildung 3.1 stellt die Komponenten der Gebrauchstauglichkeit und deren Beziehungen untereinander zusammenfassend dar. Für das Bewerten der Usability eines Produkts müssen diese Komponenten vor einer Untersuchung möglichst detailliert beschrieben werden.

### **Gebrauchstauglichkeit:**

In der ISO 9241-11 wird Gebrauchstauglichkeit definiert als [ISO99a, S. 4]:

„Das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen.“

### **Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit:**

Die Begriffe Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit werden folgendermaßen beschrieben:

Effektivität: „Die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen.“

Effizienz: „Der im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen.“

Zufriedenheit: „Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellung gegenüber der Nutzung eines Produkts.“

---

<sup>1</sup>Der Begriff Usability setzt sich aus den Worten to use (benutzen) und ability (Fähigkeit) zusammen und entspricht der Benutz- und Brauchbarkeit.



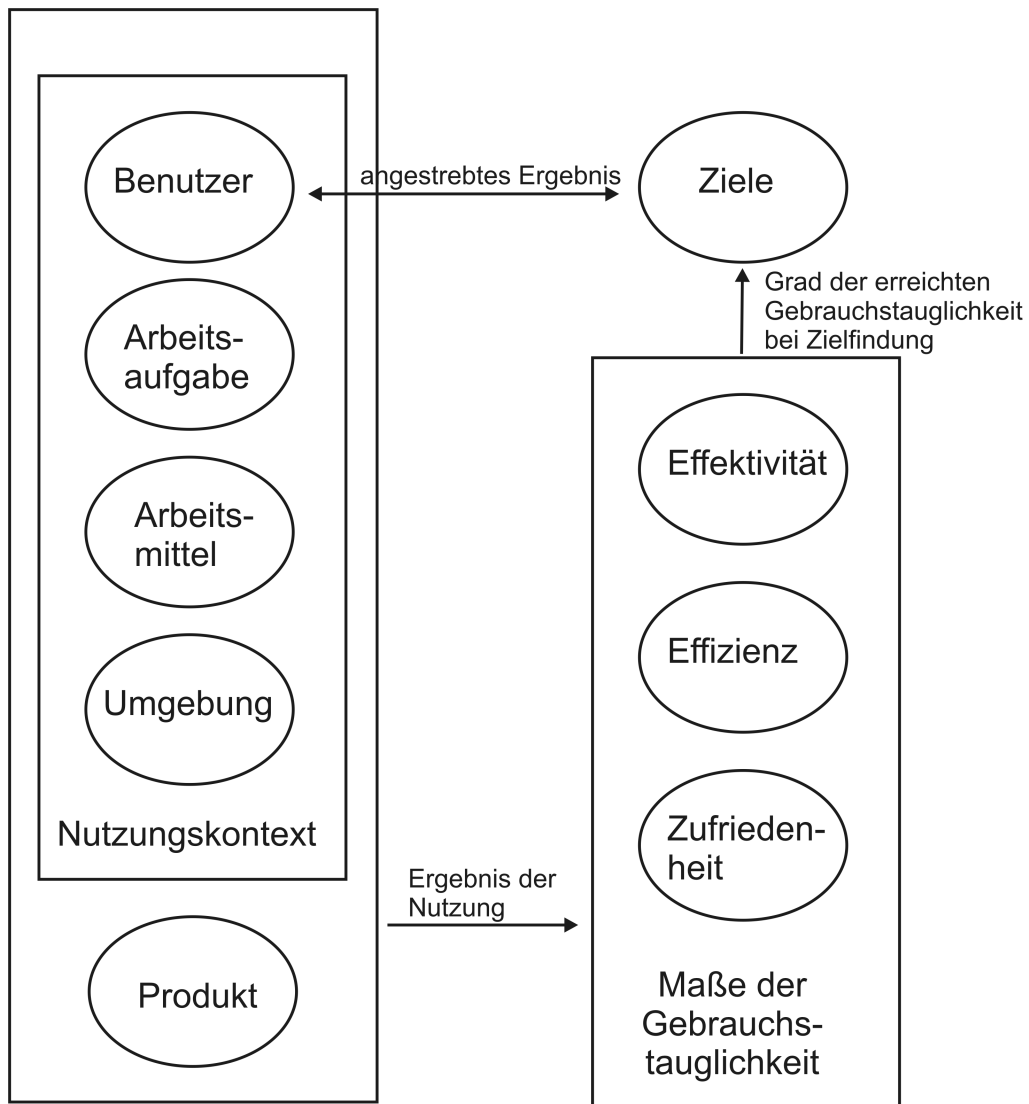


Abbildung 3.1: Die Komponenten der Gebrauchstauglichkeit und ihre Beziehungen untereinander, nach ISO 9241-11 [ISO99a, S. 6]. Die Gebrauchstauglichkeit eines Produkts gilt als Grad, in dem Ziele nach den Maßen der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit in einem spezifischen Nutzungskontext erreicht werden. Der Nutzungskontext definiert sich über die Benutzer (Fähigkeiten, Erfahrungen etc.), Arbeitsaufgabe (durchzuführende Aktivitäten), Arbeitsmittel (Hardware, Software, Materialien, etc.) und Umgebung (physische, soziale Arbeitsbedingungen etc.).

#### **Ziele**

Das vom Benutzer zu erreichende Ziel bei einer Produktnutzung wie das Lesen einer Email, entspricht dem angestrebten Arbeitsergebnis und kann seinerseits in Teilziele zerlegt werden etwa in das Starten der Software, gefolgt vom Auswählen der Nachricht.

#### **Nutzungskontext:**

Der Nutzungskontext setzt sich zusammen aus der Beschreibung der Benutzer, der Arbeitsaufgabe sowie den Arbeitsmitteln und der Umgebung.

- **Benutzer:**

Man unterscheidet auf höchster Stufe zwischen den repräsentativen und nicht repräsentativen Nutzertypen. Des Weiteren werden Nutzer durch ihren Erfahrungs- und Wissensstand beschrieben. Darunter fallen Kenntnisse über das Produkt, über die Arbeitsaufgabe sowie allgemeine Qualifikation wie etwa Sprachfertigkeit. Zusätzlich müssen persönliche Merkmale wie Alter, Geschlecht, Motivation und intellektuelle/physische/psychische Fähigkeiten oder Behinderungen zusammengefasst werden, sofern diese für die Arbeitsaufgabe von Relevanz sind.

- **Arbeitsaufgabe:**

Um das Ziel zu erreichen, wird eine Aufgabe durchgeführt, die gegebenenfalls in verschiedene Einzelaufgaben dekomponiert werden kann. Jede solche Einzelaufgabe muss anhand ihrer Dauer und Häufigkeit, ihrer physischen/psychischen Belastung für den Nutzer und ihren Abhängigkeiten zu anderen Aufgaben beschrieben werden.

- **Arbeitsmittel:**

Alle Utensilien wie Hardware, Software und entgegengenommene Dienstleistungen, die für eine Zielerreichung verwendet werden, sind in den Arbeitsmitteln zusammengefasst. Dazu werden allgemeine Aussagen über die wichtigsten Funktionen und Hauptanwendungsgebiete der Arbeitsmittel getroffen, aber auch deren direkte Spezifikationen beschrieben.

- **Umgebung:**

Organisatorische, soziale, technische und physische Merkmale der Umgebung, in der ein Produkt verwendet wird, müssen an dieser Stelle dargestellt werden. Zu erfassen sind beispielsweise die Führungs- und Kommunikationsstruktur, Arbeitszeiten, Leistungsdruck, Entscheidungsfreiheit und bestehende

Vorschriften. Des Weiteren relevant sind physikalische Bedingungen am Arbeitsplatz etwa Wärme-, Lärm- und Sichtbedingungen. Die räumliche Gestaltung und Anordnung der technischen Einrichtung mit der damit verbundenen Körperhaltung sowie Arm- und Beinfreiheit können die Usability eines Produkts ebenfalls beeinflussen.

In der ISO 9241-11 lassen sich weitere Merkmale für die Beschreibung des Nutzungskontexts finden [ISO99a, S. 10].

### 3.2.1 Evaluieren der Gebrauchstauglichkeit

Untersuchungen und Messungen der Gebrauchstauglichkeit eines Produkts können zu unterschiedlichen Zeitpunkten in dessen Reifezustand durchgeführt werden - während der Konzipierung, der Entwicklung oder bei einem bereits fertiggestellten Produkt. Je früher solche Maßnahmen angewandt werden, desto kosteneffizienter können Usability-Probleme noch vor einer Marktreife beseitigt werden - man spricht dabei von einer Aufwand-Nutzen-Relation von bis zu 1:100 [Kar94].

#### 1. Analyse des Nutzungskontexts

Das Messen der Gebrauchstauglichkeit geschieht in verschiedenen Schritten und unter Anwendung unterschiedlicher Techniken - am Anfang steht eine detaillierte Kontextanalyse. Informationen über die Benutzergruppen, Arbeitsmittel, Arbeitsaufgaben und die Umgebung können durch mehrere Verfahren gesammelt werden. Dies kann durch strukturierte oder offene Interviews, Fragebögen und Vor-Ort-Beobachtungen geschehen - oft werden mehrere dieser Techniken in Kombination miteinander angewandt, um sowohl qualitative wie auch quantitative Informationen zur Produktnutzung zu erheben.

Noch während der Analyse des Nutzungskontexts oder aber im Anschluss daran müssen die Messinstrumente und Metriken der Effektivität, der Effizienz und der Zufriedenheit mit eventuellen Minimal- und Maximalgrenzwerten deklariert werden. So könnte man als Metrik der Effizienz die benötigte Zeit und Anzahl verursachter Fehler bei einer Gerätebedienung wählen, mit der zusätzlichen Einschränkung, dass eine Interaktion nicht länger als  $n$  Sekunden dauern darf. Situationsabhängig sollten gewisse Metriken stärker oder schwächer gewichtet Einfluss auf die Usability eines Produkts haben, beispielsweise im Fall sicherheitskritischer Anwendungen, bei denen Bedienfehler zu Gesundheitsgefährdungen führen können. In der ISO 9126 Teil 1 und 2 werden verschiedene Anforderungen an Metriken beschrieben, die es im Rahmen einer Usability-Evaluation zu beachten gilt [ISO01, ISO03]. Beispielsweise sollten möglichst realistische Bedingungen bezüglich der Testumgebung und

Probanden- und Aufgabenwahl erzeugt werden. Dies wird in der Regel durch eine detaillierte Analyse des Nutzungskontexts gewährleistet. Ferner müssen Metriken valide, reliabel, reproduzierbar und objektiv gemessen werden, am besten aufbauend auf standardisierten Erhebungswerkzeugen - wie psychometrisch validierten Fragebögen und automatisierten Zeitmessverfahren.

## 2. Usability-Evaluation

Nach einer Kontextanalyse geschieht die eigentliche Evaluierung der Gebrauchstauglichkeit eines Produkts, wobei verschiedene Techniken existieren.

### Usability-Test:

Dieses klassische Testverfahren findet in speziell eingerichteten Usability-Laboren statt, in denen Probanden strukturierte, genau definierte Aufgaben durchführen, wobei Kameras und Mikrofone oft den gesamten Versuch aufzeichnen, so dass möglichst viele Informationen im Anschluss ausgewertet werden können. Der Usability-Test ist ein sehr aussagekräftiges Verfahren, das sowohl qualitative als auch quantitative Daten erheben kann, jedoch in der Planung und in der Ausführung - je nach Umfang - sehr zeitintensiv und daher schnell mit hohen Kosten verbunden ist. Weil der Versuch unter Laborbedingungen und nicht am eigentlichen Arbeitsplatz stattfindet, muss eine möglichst realistische Testumgebung nachgestellt werden. Die Hauptschwierigkeit zur Sammlung reliabler Ergebnisse ist es, eine möglichst repräsentative Stichprobe an Probanden zusammenzustellen, sowohl hinsichtlich der Stichprobengröße als auch bezüglich persönlicher Merkmale der Nutzer wie Alter, Geschlecht und Erfahrungsstand. Nielsen differenziert den Erfahrungsstand von Nutzern nach Erfahrungen mit der Aufgabendomäne, Erfahrungen mit dem speziellen, zu evaluierenden System und generelle Erfahrungen mit Computern [Nie94].

Je nach angestrebtem Evaluationsziel bieten sich unterschiedlich umfangreiche Stichproben an - für Leistungsmessungen schlägt Nielsen 10 und mehr Nutzer vor, um vergleichbare Daten zu erhalten, während bereits 5 Probanden 85% der eher qualitativen Usability-Probleme aufdecken können [DR99, Nie94, Vir92, Nie09].

Werden mehrere alternative Produkte bzw. Arbeitslösungen im Vergleich untersucht, kann man zwischen zwei Testarten unterscheiden:

- **Between-subject testing:**

Ein Proband testet bei einer Auswahl verschiedener Arbeitslösungen nur eine einzige, zufällig bestimmte. Dabei kann es jedoch zu sogenannten „Bias-Effekten“ kommen, die die Gesamtauswertung zum Teil erheblich beeinflussen, beispielsweise wenn einige Probanden generell effizienter mit einem Produkt

umgehen als andere. Alter, Gedächtnis und Kenntnisstand sind nur einige Faktoren, die zu solchen individuellen Leistungsunterschieden führen können.

- **Within-subject testing:**

Ein Proband testet alle Lösungen in randomisierter Reihenfolge. Zwar ist er ab der zweiten Arbeitslösung kein Novize mehr und kennt den Versuch, doch wird auf diese Weise die individuelle Leistungsvariabilität kompensiert.

### **Feldstudie:**

Bei einer Feldstudie wird der Benutzer, im Gegensatz zum Usability-Test unter Laborbedingungen, an seinem Arbeitsplatz während der Aufgabenbewältigung begleitet und beobachtet. Auf diese Weise kann der Nutzer relativ ungestört untersucht werden - mit Kamera- und Tonaufnahmen sowie mittels Befragungen direkt vor Ort. Da der Handlungsablauf jedoch nicht in dem Ausmaß strukturiert werden kann wie beim Usability-Test, sind die resultierenden Daten (Zeitmessungen etc.) oft schlecht vergleich- und reproduzierbar. Feldstudien bieten sich besonders als Werkzeug zur Erfassung des Nutzungskontextes an, da Arbeitsprozesse und Anwendergewohnheiten realistisch erfasst werden können.

### **Expertenbegutachtung und heuristische Evaluation:**

Eine kostenreduzierte Alternative zum Versuch mit Endanwendern stellen Experteneinschätzungen dar. Gutachter überprüfen dabei ein Produkt und leiten aufgrund ihres Expertenwissens im Bereich der Gebrauchstauglichkeit mögliche Usability-Probleme ab. Die Qualifikation des Gutachters ist maßgebend für die Güte der gewonnenen Informationen.

Ähnlich, aber strukturierter als eine Experteneinschätzung, verläuft die Produktuntersuchung im Rahmen der heuristischen Evaluation. Nielsen schlägt 3-6 Gutachter vor, die in einer mehrstündigen Sitzung die Brauchbarkeit nach vorher definierten Heuristiken (Richtlinien) wie der Bedienbarkeit und der Erlernbarkeit bewerten [Nie92]. Daraus resultierend werden die identifizierten Usability-Probleme u.a. hinsichtlich ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit und ihrer Auswirkung auf die Produktnutzung kategorisiert und priorisiert.

Für eine vollständige Bewertung der Gebrauchstauglichkeit werden auch Kombinationen der vorgestellten Techniken iterativ angewandt. Bereits in der frühen Entwicklungsphase eines Produkts können darüberhinaus die in Kapitel 2.4 beschriebenen kognitiven Quantifizierungsmodelle angewandt werden, um treffende Prognosen über die Bedieneffizienz zu erstellen, ohne dabei Usability-Experten oder Endnutzer zu involvieren.

### 3.2.2 Der Usability Engineering Lifecycle

Der Usability Engineering Lifecycle, nach Mayhew, beschreibt ein Evaluierungsmodell, das auf 3 Phasen aufbaut, die zum Teil rekurrent miteinander und ineinander verbunden sind. Nach einer Analyse des Nutzungskontexts und der Festlegung von Usability-Zielen, wird der Ist-Zustand mit dem definierten Soll-Zustand solange iterativ abgeglichen, bis Letzterer erreicht wird [May99]. Abbildung 3.2 zeigt den gesamten Ablauf im Überblick.

#### 1. Analyse des Nutzungskontexts

Aus der initialen Analyse des Nutzungskontexts resultierend (Kap. 3.2.1) werden die für dieses Produkt zu erfüllenden Usability-Ziele determiniert. Mayhew differenziert dabei zwischen qualitativen und quantitativen Zielen:

- Qualitative Usability-Ziele sind quantitativ schlecht zu erfassen und prägen schon in frühen Phasen einer Produktkonzeption das Design bzw. den Styleguide. Zum Beispiel könnte ein Ziel sein, dass Nutzer auch ohne technisches Vorwissen komplexe Aufgaben durchführen können und dabei schrittweise unterstützt werden.
- Quantitative Usability-Ziele sind direkt messbar und dadurch leichter als erfüllt bzw. als nicht erfüllt nachzuweisen. Solche Ziele könnten beispielsweise so definiert werden, dass Nutzer, abhängig von ihrem Erfahrungsstand, nicht länger als  $x$  Sekunden für eine Interaktion benötigen und dabei weniger als  $y$  Fehler begehen.

Mit dem Abschluss der Zieldefinition kann eine erste Gestaltungsrichtlinie (Styleguide) formuliert werden, die auf erster Ebene der 2. Phase konzeptionell umgesetzt wird.

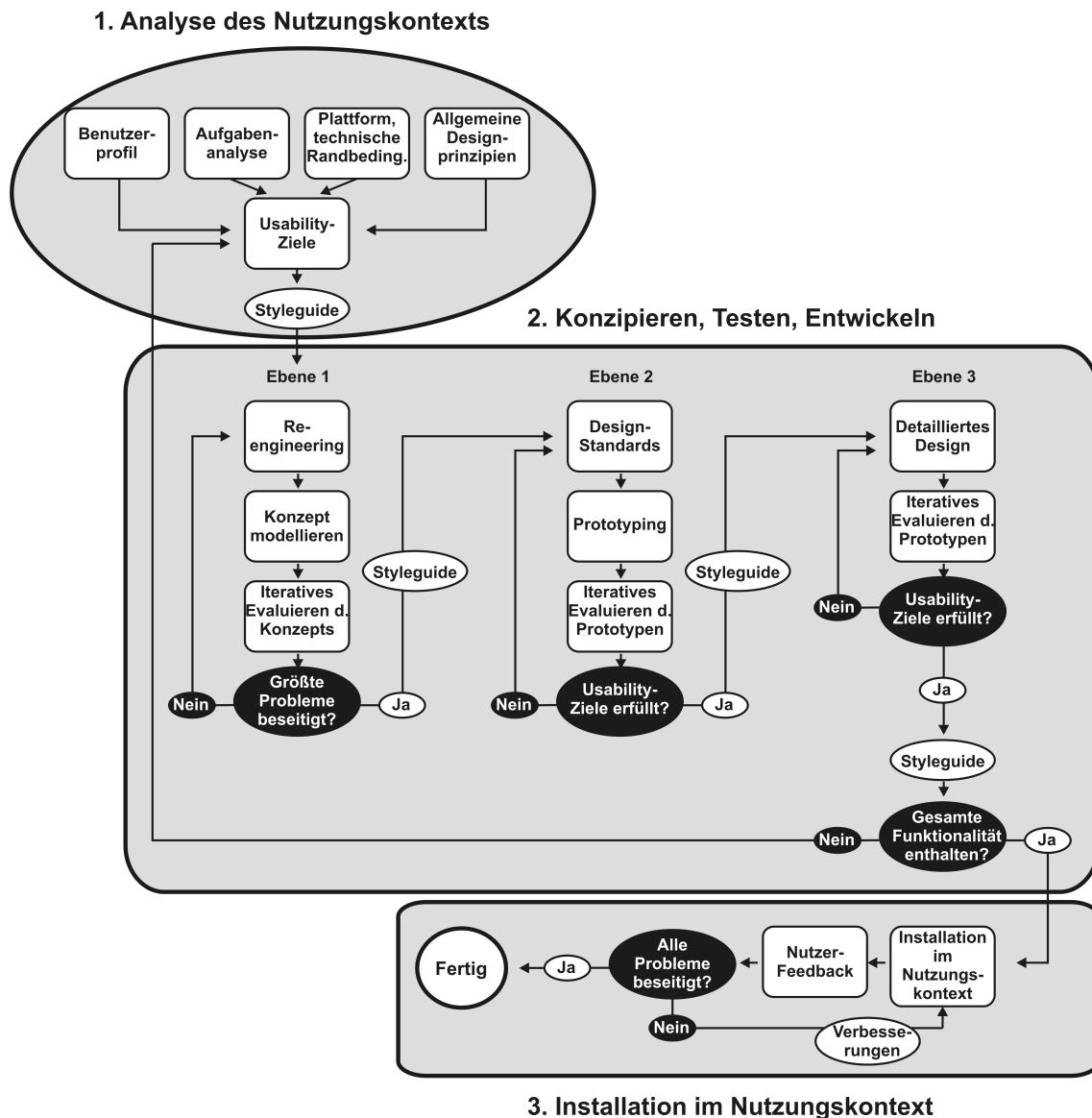


Abbildung 3.2: Der Usability Engineering Lifecycle, nach Mayhew [May99]. Anhand dieses iterativen Modells kann eine Produktentwicklung vom konzeptionellen bis hin zum fertigen Zustand durchgeführt werden. Nach einer anfänglichen Analyse des Nutzungskontexts und der Festlegung bestimmter Usability-Ziele wird ein erster Styleguide entwickelt, auf dem aufbauend ein Konzept erstellt und evaluiert wird. Beseitigt dieses Konzept die größten Probleme nicht, so findet ein Reengineering auf konzeptueller Ebene statt. Ansonsten wird der Styleguide erweitert, in einem Prototypen konkreter realisiert und wiederum evaluiert. Werden die gesetzten Usability-Ziele erfüllt, so kommt es zu einem zunehmend detaillierten Design des Prototypen auf Ebene 3 und entsprechender Modifikation des Styleguide. Ist die gesamte notwendige Funktionalität enthalten, dann verlässt der Prototyp das Entwicklungsstadium und wird als Produkt im Nutzungskontext installiert. Am Ende dieses Schritts steht das fertige Produkt, wobei im Fall von auftretenden Problemen im Nutzertest letzte Verbesserungen implementiert werden können.

## **2. Konzipieren, Testen, Entwickeln**

Auf 3 Ebenen der Entwicklung verteilt, wird der Styleguide zunächst in Form eines Konzepts modelliert, welches in der ersten Evaluation (z.B. durch Expertengutachten) auf Usability-Probleme hin untersucht wird. Bestehen relevante Probleme, so findet nach dem Reengineering eine weitere Iteration des beschriebenen Prozesses auf Ebene 1 statt. Wurden die größten Probleme beseitigt, dann wird der Styleguide für eine prototypische Umsetzung des Konzepts durch Design-Standards auf Ebene 2 erweitert. Stellt sich nach der Evaluation heraus, dass der Prototyp die in Phase 1 definierten Usability-Ziele nicht erfüllt, muss er überarbeitet werden - ansonsten wird der Styleguide mit dem damit verbundenen Design detaillierter beschrieben und auf letzter Ebene in den Prototypen implementiert. Sollten relevante Funktionen noch fehlen, so müssen die Usability-Ziele im Rahmen der Kontextanalyse modifiziert werden. Falls die gesamte Funktionalität adressiert wurde, geht der Prototyp in die letzte Phase über.

## **3. Installation im Nutzungskontext**

Der marktreife Prototyp wird nun im vorgesehenen Nutzungskontext installiert, wobei eventuelles Nutzer-Feedback direkt in Verbesserungen überführt werden kann. Existieren keine Probleme bei der Bedienung, dann steht am Ende dieses Prozesses ein für die vorliegende Anwendungsdomäne möglichst gebrauchstaugliches Produkt.



## 4 Die intraoperative MMI

Wie einleitend beschrieben, werden digitale Patientenbilder in der Regel sowohl zur Planung chirurgischer Eingriffe als auch während der Operation immer häufiger eingesetzt. Intraoperativ geschieht dies zum einen aus Gründen der Visualisierung bestimmter Körperstrukturen und Stoffwechselprozesse, zum anderen auch zur Navigation und als Entscheidungshilfe für den Chirurgen und sein Team. In Verbindung mit solchen Bildern sind präzisere Eingriffe plan- und durchführbar, was zu einer Erhöhung der Patientensicherheit und zu einer Zeitersparnis führt.

Für das intraoperative Betrachten und Modifizieren von digitalen Patientenbildern muss der darstellende Computer bzw. die entsprechende Visualisierungssoftware über ein Eingabegerät gesteuert werden - somit könnte der Chirurg zusätzliche Bilder aufrufen oder Funktionen wie eine Strukturvergrößerung durchführen.

In den Kapiteln 2.5 und 2.6 wurden die gängigsten Computer-Ein- und -Ausgabegeräte vorgestellt, jedoch lassen sich allgemeingültige Aussagen über deren Gebrauchstauglichkeit nur bedingt, teilweise überhaupt nicht treffen - vielmehr bestimmt der spezifische Nutzungskontext die jeweilige Brauchbarkeit (vgl. Kap. 3.2)[BP08, MSB91, MJ07, PSGD05, SKA<sup>+</sup>07, YLHM01].

Um die Gebrauchstauglichkeit im Kontext der intraoperativen Patientenbildbetrachtung und -modifikation zu determinieren, soll die MMI im weiteren Verlauf im operativen Bereich in Anlehnung an den Usability Engineering Lifecycle analysiert und evaluiert werden. Unter Patientenbildern werden in diesem Zusammenhang diagnostische medizinische Bilder allgemein verstanden, unabhängig davon mit welchem bildgebenden Verfahren sie erstellt wurden. Im Anschluss an die Vorstellung einiger dieser bildgebenden Verfahren (vgl. Kap.4.1) wird für die Untersuchung der intraoperativen MMI mit der Analyse des Nutzungskontexts und der Ist-Situation an deutschen Krankenhäusern begonnen. Darauf aufbauend wird eine Evaluation durchgeführt, um somit das für den vorliegenden Kontext gebrauchstauglichste Computer-Eingabegerät zu bestimmen.

## 4.1 Bildgebende Verfahren

Bildgebende Verfahren in der Medizin ermöglichen es, diagnostische Informationen über einen Patienten zu visualisieren, die dem menschlichen Auge normalerweise unzugänglich sind. Während einige dieser Modalitäten morphologische Informationen über die Form und die Struktur eines Organs liefern, können mit anderen Verfahren funktionelle Informationen erhoben werden, etwa über spezifische metabolische Prozesse im Körper. Je nachdem, welcher Teil des elektromagnetischen Spektrums zur Bilderzeugung genutzt wird, differenziert man zwischen diversen bildgebenden Modalitäten.

Dem Arzt werden die Bilder im OP digital über ein Picture Archiving and Communication System (PACS) zur Verfügung gestellt. Üblicherweise wird dabei, herstellerunabhängig, der offene Standard des Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)<sup>1</sup> verwendet. Neben der reinen Datenspeicherung werden zudem für eine standardisierte Netzwerkkommunikation Protokolle angeboten. Zusätzlich können zahlreiche verschiedene Metainformationen wie der Name, das Geburtsdatum und das Geschlecht des Patienten hinzugefügt werden.

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf einer intraoperativen Patientenbildbetrachtung im Hinblick auf die Interaktion zwischen Mensch und Computer liegt, werden einige bildgebende Modalitäten der Übersicht halber vorgestellt.

### **Computertomographie (CT):**

Die CT ist ein Verfahren, das auf der Messung der Abschwächung von Röntgenstrahlung beruht. Computergestützt kann somit ein dreidimensionales Bild aus den einzelnen Schnittbildern berechnet werden, die aus verschiedenen Richtungen aufgenommen wurden. Die von einer Röntgenquelle emittierte Strahlung wird von gegenüberliegenden Detektoren erfasst. Beim Durchstrahlen von Gewebe bzw. Stoffen wird die Röntgenstrahlung örtlich unterschiedlich stark abgeschwächt, so dass Aussagen über die Art des Gewebes getroffen werden können. Diese Abschwächung (Attenuation) wird auf der Hounsfield-Skala abgebildet, die üblicherweise einen Wertebereich von -1024 bis 3071 Hounsfield-Einheiten (HE) umfasst. Eine Attenuation von Knochen liegt beispielsweise, je nach deren Dichte, zwischen 500-1500HU, während die Abschwächung durch Wasser als 0HU definiert wird. Luft absorbiert Röntgenstrahlung kaum und entspricht einem Wert von -1000HU.

Die CT ermöglicht das Erzeugen räumlich hoch aufgelöster morphologischer Bilder (ca.  $20\mu m$ ) - es können jedoch keine funktionellen Informationen erhoben werden.

---

<sup>1</sup>Detaillierte Informationen über den DICOM-Standard können unter <http://medical.nema.org/> abgerufen werden.

Während Knochen gut darstellbar sind, ist der Weichteilkontrast sehr gering und kann lediglich durch das Verwenden spezifischer Kontrastmittel angehoben werden. Von großem Nachteil ist die mit einer CT-Untersuchung verbundene hohe Strahlenbelastung für den Patienten.

### **Magnetresonanztomographie (MRT):**

Die MRT nutzt die Eigenschaft des Spins<sup>2</sup> von bestimmten Atomen bzw. von deren Protonen - v.a. von Wasserstoff, welcher das am häufigsten vorkommende Element im menschlichen Körper darstellt. Im Normalzustand neutralisieren sich die Spins gegenseitig, so dass sie unmagnetisch sind. Durch Anlegen eines statischen Magnetfeldes wird ein überschüssiger Teil der Spins parallel zur Richtung der Feldlinien magnetisiert. Ähnlich einem Kreisel drehen sich die Spins mit einer spezifischen Frequenz (Larmorfrequenz) um die Achse der Feldrichtung (Präzession). Durch das Anregen der Spins mit kurzen hochfrequenten Magnetwellen (HF-Pulsen) werden sie aus ihrem energetischen Gleichgewicht gebracht. Um dies zu tun, muss die Schwingfrequenz des HF-Pulses mit der Larmorfrequenz des jeweiligen Spins übereinstimmen (Resonanz). Nach dem Abklingen des HF-Pulses kehren die Spins in ihren energetischen Gleichgewichtszustand zurück (Relaxation) und erzeugen dabei ein MR-Signal. Weil abhängig von der Gewebeart die Dauer der Relaxation unterschiedlich lang ist, kann aus der Relaxationszeit auf die Art des Gewebes geschlossen werden. Die MRT bietet im Vergleich zur CT eine niedrigere räumliche Auflösung (50 – 1000  $\mu\text{m}$ ). Mit diesem Verfahren können Weichteile sehr gut auch ohne Zugabe von Kontrastmitteln visualisiert werden. Da keine ionisierende Strahlung verwendet wird, ist der Patient keiner Strahlenbelastung ausgesetzt. Es können sowohl morphologische als auch funktionelle Informationen erhoben werden, wie im Fall der funktionellen MRT (fMRT) - eine Technik, die u.a. zur Darstellung neurophysiologischer Prozesse in der Hirnforschung Verwendung findet. Verglichen mit der CT kommt es bei der MRT häufiger zu künstlich generierten Artefakten, also zu fehlerhaften Bildstrukturen. Diese können beispielsweise bei Gewebeübergängen (Kantenartefakte) oder aufgrund von Inhomogenitäten des erzeugten Magnetfelds (Verzerrungsartefakte) entstehen. Darüber hinaus gilt es, magnetische Wechselwirkungen mit anderen Geräten in der Umgebung des MRT-Scanners zu verhindern.

---

<sup>2</sup>Während der Spin ein Maß für den Quantenzustand eines atomaren Teilchens ist, kann man ihn sich vereinfacht als die Rotation einer Kugel um die eigene Achse vorstellen, die nie zum Stillstand kommt.

##### **Positronen-Emissions-Tomographie (PET):**

Bei der PET wird dem Patienten ein radioaktiv markiertes Biomolekül (Tracer) verabreicht, dessen Radionuklide als Betastrahler Positronen emittieren. Trifft ein solches Positron auf ein Elektron, so kommt es zur Auslöschung beider Teilchen (Annihilation), in dessen Verlauf sich zwei hochenergetische Photonen (511keV) als Gammastrahlung im Winkel von exakt  $180^\circ$  voneinander entfernen. Diese Gammastrahlung kann von Detektoren, die ringförmig um den Patienten angeordnet sind, erfasst werden. Treffen zwei Photonen zeitgleich auf zwei gegenüberliegende Detektoren, so spricht man von einer Koinzidenz, woraufhin der Ort der Annihilation über die Koinzidenzlinie rekonstruierbar ist. Wird nur eines der Photonen registriert, so kann dies daran liegen, dass das zweite Photon außerhalb des Sichtbereichs des Detektorrings liegt oder es vom Untersuchungsvolumen absorbiert bzw. umgelenkt wurde. Resultierend aus der zeitlichen und räumlichen Verteilung der detektierten Koinzidenzereignisse wird auf die Verteilung des Tracers im Körper geschlossen und eine Serie von Schnittbildern erstellt. Da die emittierte Gammastrahlung beim Durchqueren des Untersuchungsvolumens unterschiedlich stark abgeschwächt werden kann, müssen im Anschluss an die Aufnahme Absorptionskorrekturen durchgeführt werden.

Mit der PET können metabolische Prozesse im Körper besonders gut visualisiert werden - großen Stellenwert hat dieses Verfahren in der Onkologie, der Neurologie und in der Immunologie. Je nachdem, welche Art von Tracern eingesetzt wird, können verschiedene Prozesse des Stoffwechsels und der Proteinbiosynthese im Körper untersucht werden, während morphologische Informationen nur sehr eingeschränkt darstellbar sind. Abhängig von der Halbwertszeit des verwendeten Radionuklids muss eine PET-Untersuchung sehr zeitnah nach einer Verabreichung erfolgen, wobei der Patient im Zuge dieses Verfahrens einer Strahlenbelastung ausgesetzt wird.

##### **Multimodale Bildgebung:**

Der diagnostische Nutzwert eines bildgebenden Verfahrens hängt von der damit verbundenen medizinischen Fragestellung ab. Jedes der vorgestellten Verfahren ist mit spezifischen Vor- und Nachteilen verbunden, so können beispielsweise mit der CT v.a. morphologische Strukturen, weniger aber funktionelle Prozesse visualisiert werden. Die PET liefert auf der anderen Seite sensitive Informationen über metabolische Abläufe im Körper, doch ist eine anatomische Zuordnung nur sehr eingeschränkt möglich. Im Rahmen der multimodalen Bildgebung werden die Vorteile unterschiedlicher Bildgebungsverfahren kombiniert. Auf diese Weise können z.B. von

der PET identifizierte Tumore durch Informationen der CT anatomisch lokalisiert und behandelt werden (s. Abb. 4.1). Eine solche Registrierung der Bildinhalte zweier Modalitäten wird durch angepasste Software-Algorithmen durchgeführt, wobei die größte Schwierigkeit bei diesem Verfahren die zuverlässige räumliche Überlagerung der Bilder darstellt. Erfolgt die Registrierung retrospektiv, so werden Patientenaufnahmen von zwei zeitlich getrennten Untersuchungen verglichen. Dabei müssen u.a. Unterschiede bei der Lagerung des Patienten auf dem Scanner-Bett ausgeglichen werden, aufgrund dessen Variationen der Körperhaltung entstehen. Während eine Registrierung anhand rigider Strukturen wie den Knochen besser zu realisieren ist, kann das Überlagern von Organen problematisch sein. Z.B. ändert sich die Form der Prostata, je nach der Füllung des Darms. Kombinierte PET/CT- und PET/MRT-Scanner kompensieren einige der angesprochenen Registrierungsschwierigkeiten, da Patientenbilder im Rahmen einer zusammenhängenden Untersuchung aufgenommen werden. Solche Geräte werden zunehmend sowohl in der Diagnostik als auch in der Forschung angewandt.

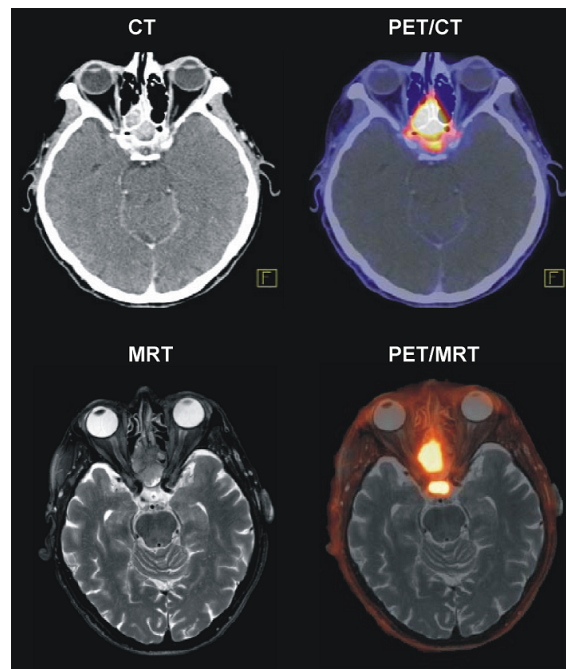


Abbildung 4.1: Bildgebende Verfahren im Überblick, nach Kolb et al. [KHW<sup>+</sup>09, S. 12]. CT- und MRT-Bilder liefern detaillierte morphologische Informationen, während durch die PET funktionelle Prozesse dargestellt werden können. Ein höherer diagnostischer Nutzwert kann durch die Anwendung multimodaler Bildgebungsverfahren erreicht werden. In diesen Beispielen einer PET/CT- und PET/MRT-Kombination kann der durch die PET identifizierte Tumor (farblich hervorgehoben) anatomisch lokalisiert werden.

## 4.2 Der Nutzungskontext

Der Nutzungskontext beschreibt alle relevanten Faktoren, die Einfluss auf eine MMI haben und setzt sich aus der Umgebung, den Benutzern, der Arbeitsaufgabe und den Arbeitsmitteln zusammen.

### 4.2.1 Die Umgebung - der Operationssaal

Im Operationssaal werden chirurgische Eingriffe am Patienten durchgeführt. Abhängig von der operierenden medizinischen Disziplin bzw. Fachrichtung variiert dabei der Arbeitsablauf und damit verbunden das eingesetzte technische Inventar. Je nach Patientendurchlauf kann ein OP als alleinige Einrichtung, z.B. in einer Arztpraxis oder in Form einer zentralen fachübergreifenden Operationsabteilung, wie es in vielen Krankenhäusern der Fall ist, mit mehreren anderen Sälen zusammen betrieben werden.

Aufgeteilt ist der OP in verschiedene Zonen, die insbesondere aus Gründen der Hygiene voneinander zu trennen sind (Abb. 4.2):

- **Sterilzone:**  
Direkt um das eröffnete Operationsgebiet am Patienten (Situs) erschließt sich die Sterilzone, in der der Chirurg und seine Assistenten arbeiten. Geräte und Materialien, die in diesem Bereich eingesetzt werden sowie auch das operierende Personal müssen in sterilem Zustand sein, um den Patienten keiner Infektionsgefahr auszusetzen. Im Fall einer externen Kontamination sind die betroffenen Materialien auszutauschen bzw. muss sich das Personal erneut umkleiden.
- **Springerzone:**  
Umgeben ist die Sterilzone von der nicht sterilen Springerzone, in der ein Springer bei Bedarf Material und Gerätschaften in den Sterilbereich übergibt, ohne dabei die Sterilität zu gefährden.
- **Anästhesiezone:**  
Meist am Kopfende des Patienten haben der Anästhesist und sein Team ihren Platz, der nicht steril ist. Hier wird der Verlauf der Narkose kontrolliert.



Abbildung 4.2: In der Sterilzone, die sich direkt um den Situs erschließt, führen der Operateur (mittig) und ein Assistenzarzt (links) einen minimal-invasiven Eingriff durch. Die instrumentierende Pflegekraft (rechts) ist beiden gegenüber positioniert. Am Kopfende des Patienten, hinter der Abdeckung nicht zu sehen, ist der Arbeitsplatz des Anästhesisten. Auf dem Boden farblich abgegrenzt umgibt die Springerzone den Operationsbereich.

### **Hygiene:**

Die Einhaltung hygienekritischer Richtlinien und der damit verbundenen Reduzierung eines postoperativen Infektionsrisikos sowohl für Patient als auch für Personal hat in höchstem Maße Einfluss auf eine Mensch-Maschine-Interaktion im Operationssaal. Solche sogenannten nosokomialen Infektionen entstehen durch im Klinikbereich eingelebte Mikroorganismen mit erhöhter Ansteckungsgefahr (Virulenz) und vielfältiger Widerstandsfähigkeit (Resistenz) gegenüber Antibiotika. Neben dem Patienten und mangelhaft gereinigten Geräten und Oberflächen gilt vor allem das medizinische Personal als primäres Transportmedium pathogener Keime - übertragen über die Hände oder Kleidung [Sch89]. Verschiedene Studien berichten von einer postoperativen Infektionsrate von 8-16% nach dem chirurgischen Eingriff, zum Teil

mit tödlichen Folgen [HCS<sup>+</sup>06, WM07].

Um nosokomialen Infektionen vorzubeugen, werden unterschiedliche Hygienemaßnahmen vor und während der Operation durchgeführt.

An erster Stelle soll ein Keimtransport von außerhalb in den OP durch das Passieren von Schleusen reduziert werden. Sowohl das Personal als auch der Patient müssen dazu beim Einschleusen ihre Kleidung wechseln. Im Fall des OP-Personals hat dieser Wechselprozess folgenden Ablauf:

1. Privatkleidung ablegen. Von außen in das Krankenhaus oder die Praxis eingeführte Keime gelangen nicht in den OP-Bereich.
2. Hände waschen. Durch diesen ersten Waschvorgang wird die Keimzahl auf den Händen reduziert.
3. OP-Haube aufsetzen. Die Haube bedeckt Kopf- und Gesichtsbehaarung und senkt damit das Risiko einer Kontamination des Situs durch Mikroorganismen und Haare.
4. Kasack, Hose und OP-Schuhe anziehen. Das Personal wird während der Operation vor einer Kontamination mit Blut und anderen Flüssigkeiten geschützt. Nach dem Ablegen der Bereichskleidung beim Ausschleusen verlassen etwaige Keime das Krankenhaus nicht, sondern werden während des Waschvorgangs eliminiert.
5. Mund-Nasen-Maske anlegen. Sowohl zum Schutz des Personals vor Blutspritzern etc. als auch um den Situs vor einer Kontamination durch Keime aus dem Nasen-Rachen-Raum zu schützen wird die Maske angelegt. Da Mikroorganismen den Filter des Mundschutzes dennoch passieren können, wird das OP-Team angehalten leise zu sprechen.
6. Hände desinfizieren. Durch die Anwendung von Desinfektionsmitteln soll die transiente bzw. kontaminierende Hautflora der Hände möglichst eliminiert werden.
7. Schleuse verlassen und in den OP-Bereich eintreten.

Für jene Personen, die in direkten Kontakt mit sterilen Instrumenten und Geräten kommen bzw. in der Sterilzone arbeiten, folgt dem Betreten des OPs die chirurgische Händedesinfektion zur vorübergehenden Entfernung der gesamten transienten Hautflora und zur Reduzierung der residenten Hautflora [Lar95]. Bereits Ende



des 19. Jahrhunderts hat sich dieses Verfahren vor dem Beginn eines medizinischen Eingriffs etabliert, sich jedoch bis zum heutigen Zeitpunkt hinsichtlich verwendeter Materialien und in der Anwendungstechnik verändert. August Bier (1861-1949), ein deutscher Chirurg, bemerkte einst:

„Der größte Feind der Wunde ist die Hand des Arztes.“

Während das Robert Koch-Institut im Jahr 2000 noch eine 1-minütige Hände- und Unterarmwaschphase vor der ersten Operation des Tages empfahl, wird dieser Vorgang bei optisch saubereren Händen mittlerweile als nicht mehr zwangsläufig notwendig erachtet, da der Nutzwert des Waschens nicht nachgewiesen werden konnte und sich die Keimzahl dabei im Gegenteil deutlich erhöhen kann [KVW06, WM07]. Essentiell für die chirurgische Händedesinfektion ist hingegen das 1,5-minütige<sup>3</sup> Benetzen und Einreiben aller Hautareale angefangen vom Ellenbogen bis zur Hand mit dem Desinfektionsmittel, gefolgt von der kompletten Lufttrocknung der Haut.

Im Anschluss an die Desinfektion der Hände wird die sterile OP-Kleidung über der Bereichskleidung angelegt. Dazu Bedarf es im Regelfall einer zweiten Person, welche, auch wenn sie unsteril ist, die Sterilkleidung an bestimmten Stellen berühren darf, ohne sie zu kontaminieren. Abschließend werden sterile Handschuhe angezogen und angezogen, wobei aufgrund variierender Perforationsraten des Materials und einem damit verbundenen Blutkontaktrisiko z.T. doppelte Handschuhpaare getragen werden [Gro06] (siehe Abb. 4.3). Im sterilen Zustand kann nun mit der Operation am Patienten begonnen werden. Eine Gerätebedienung, wie beim Steuern des bildgebenden Computers darf diesen Zustand unter keinen Umständen verletzen.

### **Geräuschpegel:**

Neben der Einhaltung hygienischer Richtlinien gilt es, den Geräusch- bzw. Lärmpegel als weiteren Faktor bei einer MMI im OP zu berücksichtigen. Die Auswirkungen von Lärm auf den Menschen wurden bereits in Kapitel 2.2.2.1 beschrieben, so erzeugen bereits unerwartete Schallereignisse ab einer Intensität von 30 dB(A) physiologische und psychologische Stressreaktionen, vor allem wenn die auszuführende Tätigkeit ein hohes Maß an Konzentration erfordert.

In der ISO 9241-6 wird ein Hintergrundgeräuschpegel von maximal 35-55 dB(A) empfohlen, um bei der Verrichtung der Arbeitsaufgabe nicht störend zu wirken. In deutschen OPs liegt der Richtwert bei einem Maximum von 40 dB(A) - zum Vergleich werden in den USA 45 dB(A) und in Australien 30 dB(A) geduldet [ISO99b, HT90, KKT94].

---

<sup>3</sup>1972 wurde eine Mindesteinwirkzeit des Desinfektionsmittels von 5 Minuten empfohlen - ab 2005 werden europaweit nur noch 1,5 Minuten beanstandet.



Abbildung 4.3: Die Instrumentierende (rechts) in steriler Kleidung hat dem Operateur (links) beim Anlegen der Sterilkleidung und der Handschuhe geholfen. Beide dürfen ab diesem Zeitpunkt nicht mehr in Kontakt mit unsterilen Gegenständen bzw. Oberflächen kommen.

Im Operationssaal gibt es eine Vielzahl an Geräuschquellen, dazu zählen sowohl das Personal als auch technische Gerätschaften und Utensilien - Shapiro & Balandl vergleichen den Lärmpegel dort mit dem auf einer Autobahn [SB72]. Einer Schallmessung von Hodge und Thompson zufolge, bei der die Mikrophone direkt am chirurgischen Arbeitsplatz im OP lokalisiert wurden, steigt die Geräuschintensität zum Teil bis auf 108 dB(A) spontan an, zum Vergleich erzeugt ein Presslufthammer etwa 90 dB(A) [HT90]. Tabelle 4.1 fasst einige Werte dieser Messung zusammen.

Ereignis (Entfernung zur Schallquelle)	Intensität
Stahlschüssel fällt zu Boden (2 m)	108 dB(A)
Gas entweicht beim Wechsel eines Gaszylinders (3 m)	103 dB(A)
Automatische Tür des OPs schließt sich (3 m)	90 dB(A)
Klappern einer Stahlschüssel (2 m)	80-85 dB(A)
Alarm vom Anästhesiegerät (3 m)	80 dB(A)
Saugpumpe wird vom Chirurgen benutzt (1 m)	75-80 dB(A)
Eingehendes Gespräch über die Sprechanlage (3 m)	70 dB(A)
Unterhaltung zwischen dem OP-Personal (1 m)	60 dB(A)

Tabelle 4.1: Lärmmessung im OP, nach Hodge & Thompson [HT90]. Im Versuch wurden Geräusche vor und während der Operationsphase gemessen. Die Mikrophone registrierten Schallereignisse dabei von der Position des Chirurgen aus.

Neben der individuellen Leistungsverringerung des Personals wirken sich Lärmereignisse auch auf die Kommunikation innerhalb des OP-Teams aus. Werden Anweisungen nicht richtig verstanden, so erzeugt dies im besten Fall Unzufriedenheit und einen Zeitverlust, im schlimmsten Fall kann es jedoch zur Patientengefährdung kommen, etwa wenn ein Gerät aufgrund fälschlich verstandener Informationen bedient wird. Lingard et al. berichten von einer 30%igen Fehlerrate bei der intraoperativen Kommunikation des OP-Personals, u.a. aufgrund mangelnder Standardphrasen und der angespannten Situation. Insgesamt führten 36% dieser Fehler zu direkt sichtbaren, negativen Auswirkungen auf den Arbeitsablauf wie verminderte Effizienz, erhöhte Team-Anspannung, Materialverschwendung, zeitliche Verzögerung und prozedurale Fehler [LEW<sup>+</sup>04].

Im Fall einer Wach-OP, in dessen Verlauf der Patient bei Bewusstsein ist, muss des Weiteren der Patient berücksichtigt werden, bei dem Stress und Angst durch unerwarteten Lärm verursacht werden [FW73].

### **Lichtverhältnisse:**

Kommt es zu einer intraoperativen Computerbedienung bzw. zum Betrachten eines Monitors, so entspricht der OP prinzipiell einem Bildschirmarbeitsplatz. Die Bildschirmarbeitsverordnung (BildscharbV) fordert in diesem Fall, dass der Bildschirm frei von störenden Reflexionen, Blendungen und Spiegelungen sein muss. Des Weiteren muss ein angemessener Kontrast zwischen Bildschirm und Arbeitsumgebung gewährleistet sein [Bil96].

Man kann zwischen Direkt- und Reflexblendungen unterscheiden - beide beeinträchtigen das visuelle Leistungsvermögen und das Wohlbefinden. Bei Erstgenanntem kommt es aufgrund eines zu hohen räumlichen oder zeitlichen Unterschieds der

Leuchtdichte im Gesichtsfeld zu einer Blendung durch Licht-emittierende Flächen wie Lampen und leuchtenden Decken. Der Grad der Beeinträchtigung hängt dabei maßgeblich von der sichtbaren Ausdehnung der Lichtquelle ab, sowie ihrer Leuchtdichte, der Lage im Gesichtsfeld und dem individuellen optischen Adaptionszustand des Betrachters. Reflexblendungen äußern sich durch eine Überlagerung des zu sehenden Bildes durch ein reflektiertes Bild, was u.a. zu Änderungen des Kontrastverhältnisses auf dem Bildschirm führt und so die Lesbarkeit des Inhalts verringern kann [ISO99b].

Im Operationssaal herrschen, abhängig von der Art des bevorstehenden chirurgischen Eingriffs, variierende Lichtverhältnisse. Während bei minimal-invasiven Operationen die Umgebungsbeleuchtung oft reduziert wird, um das Bild der Endoskopkamera besser sehen zu können, wird bei anderen Eingriffen der Situs, durch starke OP-Leuchten bestrahlt, fokussiert. Die Lichtbedingungen sind an die Anforderungen der Operation angepasst und nicht zwangsläufig an die einer Bildschirmbeobachtung. Meist setzen sich die Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz aus einer Kombination von natürlichem und künstlichem Licht zusammen - der OP als in sich geschlossene Einheit hat jedoch oft keine Fenster.

#### **Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse:**

Laut VDI 6022 und DIN 1946-4 muss das Raumklima im OP hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchtigkeit von raumluftechnischen Anlagen kontrolliert werden, so dass die Luft zur Infektionsprophylaxe durch den Einsatz von Filtersystemen möglichst keimarm aufbereitet wird [VDI06, DIN08]. Das Erzeugen eines Überdrucks im Saal soll im Fall geöffneter Türen ein Eindringen von Keimen von außerhalb verhindern. Im OP arbeiten verschiedene Spezialisten räumlich voneinander getrennt und physisch unterschiedlich gefordert zusammen (vgl. Kap. 4.2.2). Während etwa der Chirurg intraoperativ die meiste Zeit den Eingriff am Patienten direkt durchführt, muss der Anästhesist v.a. während der Anfangs- und Endphase einer Operation den Narkoseverlauf steuern - die restliche Zeit überwacht er hauptsächlich die Vitalparameter des Patienten und greift bei Abweichungen vom Soll-Zustand ein. Das Raumklima sollte im Optimalfall allen Benutzertypen gleichermaßen entgegenkommen, oft wird die Temperatur jedoch auf Wunsch des Operateurs heruntergekühlt, was unter Umständen jedoch das individuelle Wohlbefinden des restlichen Personals verringert. Matern et al. führten eine repräsentative Befragung von Chirgen und OP-Pflegepersonal u.a. zu diesem Sachverhalt durch (Tab. 4.2)[MKGS06].

Aussagen zur Klimatechnik	Chirurgen	OP-Pflegepersonal
Luft ist zu trocken	22,0% (n=422)	35,1% (n=185)
Raumtemperatur ist unangenehm	31,0% (n=419)	21,9% (n=187)
Es zieht	45,9% (n=422)	76,2% (n=189)

Tabelle 4.2: Untersuchung des Wohlbefindens im OP bzgl. Temperatur und Luftfeuchtigkeit, nach Matern et al. [MKGS06]. In einer Befragung konnten Matern et al. zeigen, dass Chirurgen und OP-Pflegepersonal z.T. unterschiedliche Ansichten zum Raumklima im OP haben.

Scherrer & Rüden sprechen von einem behaglichen Raumklima, sowohl für Patient als auch für Personal, bei Temperaturen zwischen 21 und 24°C, einer Luftfeuchtigkeit zwischen 45-85% und einer Luftgeschwindigkeit von 0,2 bis 0,3m/s [SR06].

Trotz solcher Richtvorschläge variiert das Raumklima jedoch zum Teil erheblich, abhängig u.a. von der Art des chirurgischen Eingriffs und der Vorliebe des OP-Teams. Von Klimaunterschieden unabhängig müssen die für eine intraoperative MMI einzusetzenden Geräte jedoch einen fehlerfreien, zuverlässigen und sicheren Betrieb gewährleisten.

### Platzlimitierung:

Die Zahl eingesetzter Materialien und Geräte sowie auch die Größe des OP-Teams hängen jeweils von der Art einer Operation ab. Untersuchungen zufolge werden dabei bis zu 80 verschiedene medizintechnische Geräte eingesetzt, wobei die Unterbringung, besonders aber das sterile Arbeiten mit solchen Geräten, vom Operationsaal fordern, dass genügend Platz zur Verfügung steht [Kon08]. Matern et al. beschreiben in einer Untersuchung die Platzverhältnisse im Saal als [MKGS06, S. 2]:

„In über 80 Prozent der Operationen verlaufen die Versorgungsleitungen der Geräte als Stolperfallen auf dem Fußboden oder hängen zwischen Steckdosen, den Geräten und dem Patienten. Dadurch fühlen sich über die Hälfte der chirurgischen und pflegerischen Mitarbeiter in ihrer Arbeit behindert. 60,5 Prozent der Chirurgen und 81,7 Prozent der Pflegekräfte geben an, deshalb bereits mehrfach gefährliche Situationen erlebt zu haben.“

Patkin kommt nach einer qualitativen Befragung von Chirurgen zu ähnlichen Ergebnissen [Pat03].

Die Platzsituation im OP, überspitzt dargestellt in Abbildung 4.4, muss demnach bei der Einführung weiterer Geräte, wie im Fall einer intraoperativen MMI, unbedingt mitberücksichtigt werden.



Abbildung 4.4: Inszenierte Operation, die die Platzsituation im OP überspitzt darstellt. Wirtschaftswoche 1998.

#### **Organisatorische und soziale Bedingungen:**

Bei einer Operation sind verschiedene Fachkräfte anwesend, die für einen reibungslosen Ablauf der Operation als Team zusammenarbeiten müssen (Kap. 4.2.2). Während der Anästhesist für den Verlauf der Narkose verantwortlich ist, trägt der Chirurg die Hauptverantwortung für den Ausgang des medizinischen Eingriffs und weist das Team an.

Neben den physischen Belastungen ist das Personal auch hohen psychischen Belastungen ausgesetzt, die oft ausschlaggebend für Krankmeldung, demotiviertes Arbeiten und Personalmangel sind. Grund dafür ist zum einen die Belastung aufgrund des Patientenschicksals, etwa wenn der Patient (z.B. ein Kind) stirbt, schwere Verletzungen hat, inoperabel ist oder Amputationen durchzuführen sind.

Weiterer Grund für eine psychische Belastung ist das Arbeitsklima im OP. Im Rahmen des Workshops „OR2020 - The Operating Room of the Future“ wurden u.a. die fragmentierte Kommunikation und variierende Kompetenzgrade innerhalb des OP-Teams als signifikante Störquellen für den Workflow der Chirurgie bezeichnet [CKM04].

In einer umfassenden psychometrischen Studie untersuchten Sexton et al. das Arbeitsklima zwischen Ärzten und Pflegepersonal im Operationssaal an 60 amerikanischen Krankenhäusern. Dabei kam heraus, dass Chirurgen und Anästhesisten insgesamt zufriedener mit der Zusammenarbeit sind als das Pflegepersonal. Dies wird u.a. darauf zurückgeführt, dass bei beiden Gruppen fundamentale Unterschiede hinsichtlich des beruflichen Status, der Autorität, dem Geschlecht, der Ausbildung und der Verantwortung für den Patienten bestehen. Ein weiterer Grund für das unterschiedlich gut bewertete Team-Klima ist, dass Pflegepersonal und Ärzte verschiedene Vorstellungen von einer guten Zusammenarbeit haben. Erstere sprechen von einer guten Zusammenarbeit, wenn ihre Meinung vom Arzt respektiert wird. Im Gegensatz dazu bezeichnen Ärzte das Teamwork als zufriedenstellend, wenn Krankenschwestern die jeweiligen Bedürfnisse antizipieren und Instruktionen folgen [SMT<sup>+</sup>06].

### 4.2.2 Die Benutzertypen

Das Personal im OP setzt sich aus den zwei Abteilungen des OP- und Anästhesieteams zusammen. Die Anzahl der Personen richtet sich nach der Art des bevorstehenden Eingriffs - so können bei einer neurochirurgischen Wach-Operation neben den Ärzten und der Pflege auch ein Neurophysiologe, Psychologe, Logopäde und Physiotherapeut anwesend sein.

Zum OP-Team gehören der Chirurg, die Assistenzärzte und die OP-Pflege, während das Anästhesieteam aus dem Anästhesisten und der Anästhesiepflege besteht. Grob kann man von zwei Gruppen sprechen, die sich hinsichtlich ihrer Ausbildung unterscheiden:

- Ärzte haben ein mehrjähriges Studium der Humanmedizin absolviert (in der Regel 13 Semester) und ihre Approbation erlangt. Im weiteren Verlauf kann eine mehrjährige Weiterbildung zum Facharzt durchgeführt werden. Als Oberarzt bezeichnet man Ärzte mit meist abgeschlossener Facharztweiterbildung in leitender Funktion und Verantwortung für einen bestimmten Zuständigkeitsbereich. Der Chefarzt als Facharzt eines bestimmten Gebiets ist für die gesamten medizinischen und strukturellen Abläufe in seiner Abteilung verantwortlich.
- Das Pflegepersonal hat eine dreijährige Ausbildung abgeschlossen, wobei im Anschluss an eine 24 monatige Berufserfahrung die Möglichkeit der berufsbegleitenden, zweijährigen Fachweiterbildung zur Fachkrankenpflege besteht. Für den Einsatz im operativen Dienst ist diese Fachweiterbildung jedoch keine Voraussetzung.

### **Chirurg:**

Der operierende Chirurg (Operateur) führt den medizinischen Eingriff am Patienten in der Sterilzone durch. Dabei wird der Chirurg unterstützt von einem oder mehreren Assistenzärzten, die unter seiner Aufsicht Teile der Operation ausführen können - zusätzlich kann es sein, dass Studenten oder Gastärzte anwesend sind. Der Operateur trägt die Verantwortung für den Verlauf des Eingriffs.

Während der Planungsphase<sup>4</sup> legt der Chirurg die Strategie der Operation fest - dabei verwendet er auch Software-Applikationen zur Betrachtung digitaler Patientenbilder. Daher kann von einer grundsätzlichen Erfahrung mit dem Bedienen dieser Software und vorhandenem Wissen um dessen Funktionalität auch im Kontext der intraoperativen MMI ausgegangen werden.

### **OP-Pflege:**

Die OP-Pflege besteht aus der Instrumentierenden und dem Springer.

- Die Instrumentierende arbeitet in unmittelbarer Nähe des Chirurgen in der Sterilzone. Zu ihren Aufgabengebieten gehört das Bereitstellen und Vorbereiten der benötigten Instrumente, Abdeckungen, Medikamente und sterilen Zusatzmaterialien - diese Utensilien werden dem Operateur während des Eingriffs angereicht. Postoperativ ist die Instrumentierende für die Entsorgung und Vollständigkeitskontrolle der verwendeten Materialien verantwortlich. Da die Hauptaufgabe im Anreichen benötigter Instrumente liegt und die Planung präoperativ vom Chirurgen durchgeführt wird, ist von wenig bzw. keiner Erfahrung mit der intraoperativen Bedienung einer Software zum Betrachten von Patientenbildern auszugehen.
- Der Springer übernimmt vor, während und nach der Operation unterschiedliche Aufgaben. Oft erledigt er die Dokumentation und Lagerung des Patienten und hilft dem Chirurgen wie auch der Instrumentierenden in die sterile Kleidung. Intraoperativ übergibt der Springer möglichst selbstständig bei Bedarf Materialien aus dem unsterilen Bereich an den Chirurgen oder die Instrumentierende bzw. führt auf Anweisung Tätigkeiten durch wie etwa die Bedienung eines Geräts. Im Zuge dessen kann der Springer durchaus Erfahrungen mit der Bedienung der o.g. Software aufweisen, da er im Gegensatz zur Instrumentierenden in der nicht sterilen Zone arbeitet.

---

<sup>4</sup>Nicht immer kann eine Operation geplant werden, etwa im Fall von Notfallpatienten.



**Anästhesist:**

Der Anästhesist, evtl. in Begleitung eines Assistenzarztes, kontrolliert aufsichtsführend den Verlauf der Narkose des Patienten. Zwischen der Ein- und Ausleitungsphase der Narkose werden während der Operation die Vitalparameter des Patienten überwacht und Medikamente verabreicht.

**Anästhesiepflege:**

Die Anästhesiepflege bereitet die Narkosemittel und die Intubation vor. Darüberhinaus wartet und kontrolliert sie die zu verwendenden technischen Geräte. Intraoperativ assistiert sie dem Anästhesisten beim Überwachen der Narkose und der Geräte sowie bei der Verabreichung der Medikamente.

Auch wenn das OP- und Anästhesieteam im Operationssaal zusammenarbeiten, so bilden beide dennoch zwei getrennt voneinander zu behandelnde Gruppen. Wenn der Chirurg eine Aufgabe an einen Assistenten delegiert, so wendet er sich in der Regel an die OP-Pflege oder an einen Assistenzarzt.

Bei allen vorgestellten Benutzertypen ist im Rahmen dieser Kontextanalyse das Geschlecht der Person zu vernachlässigen, da die physische Verrichtung der intraoperativen Computerbedienung (Arbeitsaufgabe) kaum anstrengend ist.

### **4.2.3 Die Arbeitsaufgabe**

Die hauptsächliche Arbeitsaufgabe des OP-Teams besteht in der sicheren und effektiven Durchführung der Operation am Patienten. Neben dem eigentlichen chirurgischen Eingriff müssen fortlaufend Informationen über den Gesundheitszustand des Patienten bzw. über den Fortschritt der Operation dynamisch bereitgestellt und vom Personal aufgenommen werden. Moderne Bildgebungsverfahren wie die MRT werden zunehmend auch direkt im OP eingesetzt, um eine bestmögliche intraoperative Visualisierung und Navigation zu ermöglichen. Zusätzlich zur Ausführung komplexer und anfordernder manueller Tätigkeiten bedeutet diese simultane Präsentation und Verarbeitung visueller Informationen einen höheren kognitiven Aufwand, gerade für den Operateur. Bittermann vergleicht den Operationssaal hinsichtlich der Arbeitsanforderungen u.a. mit dem Cockpit eines Flugzeugs und der Kontrollstation im Atomkraftwerk. All diese Arbeitsumgebungen zeichnen sich durch einen hohen Bedarf an dynamisch dargestellten, komplexen Informationen aus, die unter größtmöglicher Aufmerksamkeit - verbunden mit Zeitdruck - interpretiert werden müssen. Schon kleine prozedurale Fehler können zu sicherheitskritischen Situationen führen, womit ein hohes Maß an mentalem Stress und kognitiver Anforderung

für das Personal einhergehen. Es wird davon ausgegangen, dass die Situation im OP, verglichen mit den gerade vorgestellten Arbeitsfeldern, noch weitaus anfordernder hinsichtlich der manuellen und visuellen Belastung ist [Bit06].

Der Workflow der Überwachung und der Interpretation (Monitoring) von Patienteninformationen beim Anästhesisten kann aufgrund eines höheren Grades an standardisierten Prozessen gut analysiert und strukturiert werden. Über das Monitoring im Fall des Chirurgen und seiner Assistenten gibt es kaum generalisierbare Studien, da dieser Workflow oft sehr dynamisch und inkonsistent abläuft, abhängig vom Gesundheitszustand des Patienten, von dessen Reaktion auf den Eingriff und auf die verabreichten Medikamente, sowie vom Fortschritt der Operation.

Im Zusammenhang einer intraoperativen MMI lässt sich die Arbeitsaufgabe als die Ansteuerung des Computers zur Darstellung und Manipulation von digitalen Patientenbildern konkret definieren. Obwohl situationsabhängig und dynamisch, so kann dieser Prozess dennoch strukturiert als Abfolge von Einzelaktionen beschrieben werden (s. Abb. 4.5).

Wenn Bildinformationen intraoperativ vom Chirurgen benötigt werden, dann muss der medizinische Eingriff unterbrochen und der Computer im Saal bedient werden. Die Steuerung der dafür notwendigen Eingabegeräte kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen:

1. Der Operateur kann die Eingabegeräte wie Maus oder Tastatur direkt bedienen. Dazu müssen diese Geräte jedoch aus der Sterilzone heraus bedienbar sein und den Arzt keiner Kontaminierungsgefahr aussetzen.
2. Ein Assistent übernimmt die Computerbedienung indirekt auf Anweisung des Operateurs, wobei Visarius et al. von der „yell and click“-Strategie sprechen [VGS<sup>+</sup>97]. Der Assistent, z.B. in der Springerzone, könnte somit auch unsterile Eingabegeräte nach vorheriger mündlicher Instruktion benutzen.

Unabhängig davon, wer den bildgebenden Computer bedient, werden digitale Manipulationsfunktionen - wie eine Vergrößerung oder Skalierung des Inhalts - auf dem bestehenden Bild durchgeführt oder ergänzende Patientenbilder über die Visualisierungssoftware geladen. Die Ausgabe der gewünschten Informationen geschieht über entsprechende Ausgabegeräte, wobei nach deren Betrachtung mit dem chirurgischen Eingriff fortgefahren werden kann.

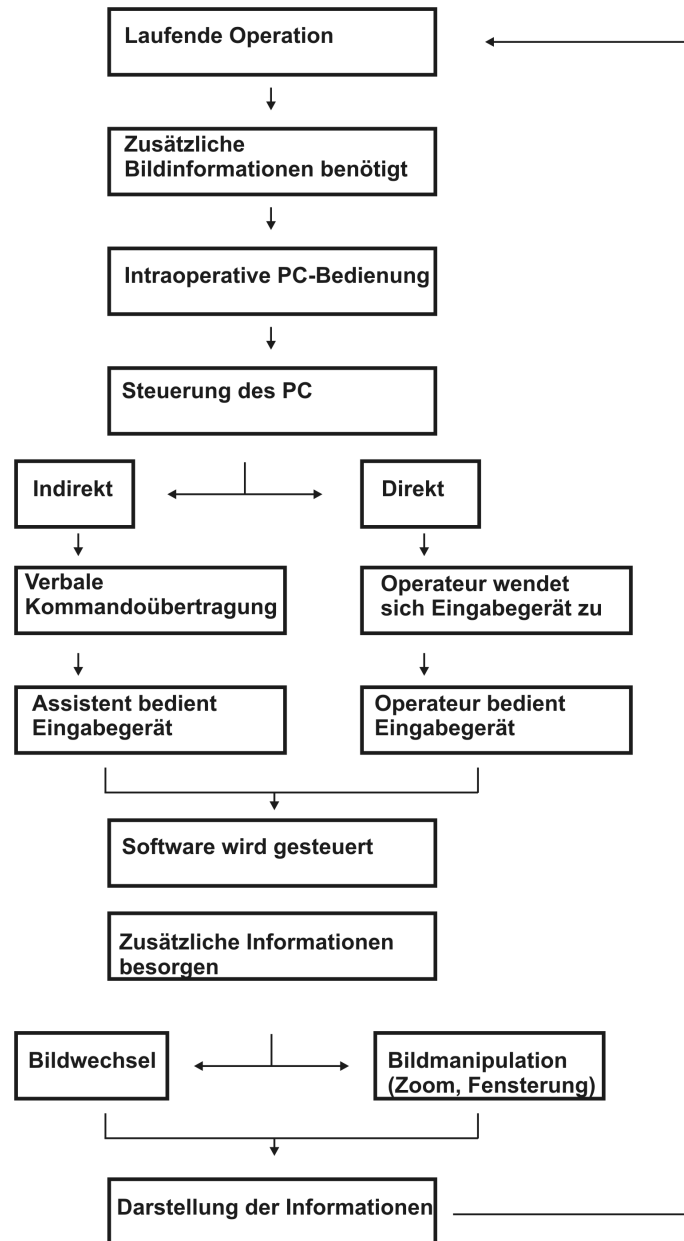


Abbildung 4.5: Beschreibung der Einzelaktivitäten der Arbeitsaufgabe einer intraoperativen Patientenbildbetrachtung.

#### 4.2.4 Die Arbeitsmittel

Die Arbeitsmittel fassen solche Geräte und Utensilien zusammen, die der Benutzer für eine Durchführung der Arbeitsaufgabe verwendet. Im Fall einer intraoperativen Bildbetrachtung stehen dabei das Computersystem mit seinen peripheren Interaktionsgeräten für die Ein- und Ausgabe von Informationen an erster Stelle. Der Computer an sich kann entweder direkt im OP untergebracht sein oder ist ausgelagert nur über die Peripherie ansprechbar. Auch die Bildschirme können unterschiedlich

im Saal verteilt sein - so gibt es Konfigurationen, in denen ein oder mehrere Displays am Deckenstativ befestigt werden oder aber das Display in der unsterilen Zone auf einem Tisch steht bzw. in die Wand des OPs eingelassen ist. Unter anderem aus Platzgründen werden die großen CRT-Monitore zunehmend durch die wesentlich platzsparsameren LCD-Displays ersetzt.

Die Unterbringung der Eingabegeräte hängt maßgeblich davon ab, welcher Benutzer-typ eine intraoperative Bedienung des Computers durchführt. Wenn der Anästhesist oder der Springer die Bedienung übernehmen, werden in der Regel Maus und Tastatur im unsterilen Bereich bereitgestellt - will der Operateur die Interaktion hingegen selbst ausführen, so müssen die Geräte idealerweise in der Sterilzone untergebracht werden. Um die Gefahr einer Kontaminierung des Situs zu unterbinden, werden in der Praxis alle Eingabegeräte mit sterilen Folien überspannt, so dass der Chirurg sie anfassen kann. Damit einher gehen jedoch Verluste des Bedienkomforts, vor allem im Fall des Touchscreen, der gleichzeitig Ein- und Ausgabegerät darstellt.

Für die Visualisierung und die Manipulation des Bildinhalts wird eine Client-Software gesteuert, die mit dem PACS (Bildarchivierungs-Server) verbunden ist. Der Austausch von Informationen geschieht über das hauseigene Netzwerk, wobei ein Abrufen von Patientenstudien, je nach Speichervolumen der Bilder und Netzgeschwindigkeit, mehrere Minuten dauern kann. Für die Manipulation des Bildinhalts wie dem Vergrößern oder Vermessen von spezifischen Strukturen bieten aktuelle Software-Lösungen herstellerunabhängig eine Vielzahl an Funktionen an. Dazu zählen: Rotieren, Zoomen, Spiegeln, Skalieren, Längen- und Winkelmessung, Kontrast- und Helligkeitsveränderung sowie Ausschneiden. Dieses Angebot an sogenannten Features nimmt ein immer komplexeres Ausmaß an und steht oft im Gegensatz zur Bedienbarkeit des Programms.

Für eine intraoperative MMI ebenfalls relevant ist die vom OP-Team zu tragende Arbeitskleidung, besonders jedoch der Mundschutz und die sterilen Handschuhe. Bei ersterem wird die Zahl der vom Personal abgegebenen Keime reduziert, jedoch könnte abhängig von der Art und Größe des Filters im Mundschutz eine sprachgesteuerte Bedienung erschwert werden. Das Tragen von Handschuhen hingegen kann sich auf das haptische Feedback bei einer Gerätebedienung auswirken, besonders da der Chirurg zum Teil ein zweites Paar Handschuhe zusätzlich überzieht und diese anschließend entsorgt.

## 4.3 Analyse der prä- und intraoperativen MMI

Es ist schwer allgemeingültige Aussagen über die Hardwarekonfiguration und die Bediengewohnheiten im Fall einer intraoperativen MMI zu treffen, weil kaum generalisierbare Studien existieren, die den Nutzungskontext umfassend analysieren. Eine dieser Studien wurde von Pomerantz et al. im Jahr 1996 durchgeführt und untersucht die Integration von PACS-Lösungen in den chirurgischen Arbeitsablauf [PSP+96]. Da sowohl hinsichtlich der Soft- und Hardware in mehr als 10 Jahren erhebliche technische Fortschritte auch für das Arbeitsfeld des OPs erzielt wurden, ist es nötig, die aktuelle Situation im Krankenhaus - bzw. Operationssaal - zu erfassen, um zu überprüfen, ob und inwiefern sich die intraoperative MMI verändert hat.

Diese Untersuchung kann insofern als vertiefende Analyse des Nutzungskontexts verstanden werden. Dabei wird die konkrete Fragestellung verfolgt, wie die prä- und intraoperative Computerbedienung zwecks Patientenbildbetrachtung im Detail geschieht. Das Analysieren der MMI zu Planungszwecken ist auch für den intraoperativen Workflow von Relevanz, da es zu einer vergleichbaren Bedienung der bilddarstellenden Software - quasi in Reinform - kommt, ohne die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Limitationen im OP.

### 4.3.1 Methode

Eine fragebogenbasierte Umfrage wurde an 6 deutschen Krankenhäusern durchgeführt. Die Zielgruppe, bestehend aus operierenden Chirurgen unterschiedlicher medizinischer Disziplin und unterschiedlichen Alters, vom Assistenz- bis zum Chefarzt reichend, wurde zur privaten, präoperativen und intraoperativen Nutzung von Computersystemen befragt.

Die insgesamt 21 Fragen gliedern sich inhaltlich folgendermaßen in drei Teile:

1. Demographische Fragen:  
Persönliche und demographische Fragen bezüglich der generellen Vertrautheit mit Computersystemen.
2. Präoperative Computerbedienung:  
Fragen zur Computer-Interaktion vor der Operation, etwa zu Planungszwecken.
3. Intraoperative Computerbedienung:  
Fragen zur Computer-Interaktion während der laufenden Operation.

Alle Antwortmöglichkeiten (z.B. niemals, selten, gelegentlich, oft, immer) entsprechen den von Rohrman, Bortz und Döring vorgeschlagenen standardisierten Ant-

wortmöglichkeiten auf einer geschlossenen Lickert-Skala [Roh78, BD02].

**Statistische Analyse:**

Eine Untersuchung der Mittelwertunterschiede und Korrelation basiert auf dem t-Test und der bivariaten Korrelationsanalyse nach Pearson. Ein Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  wird als signifikant interpretiert.

**4.3.2 Ergebnisse**

Insgesamt nahmen an dieser Umfrage 158 Chirurgen teil - 110 Männer und 48 Frauen - von 6 deutschen Krankenhäusern. Darunter 10 Chefärzte, 64 Oberärzte, 18 Fachärzte und 66 Assistenzärzte, deren Altersdurchschnitt bei 38 Jahren lag. Die Ärzte arbeiten in 9 unterschiedlichen medizinischen Disziplinen: Neurochirurgie, Orthopädie, Urologie, Gynäkologie, Kinderchirurgie, Unfallchirurgie, Allgemeinchirurgie, Mund-, Kiefer-, Gesichts-Chirurgie (MKG) und Thorax-, Herz-, Gefäß-Chirurgie (THG).

Die Tabellen 4.3 und 4.4 zeigen, wie oft Computer privat und während der Arbeit benutzt werden bzw. welche Anwendungen generell am meisten verwendet werden.

Ort der Computernutzung	MW±SD
Privat	4,2 ± 0,9
Arbeit	4,8 ± 0,4

Tabelle 4.3: Häufigkeit der Computernutzung privat und während der Arbeit. MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung, 1 = nie, 2 = selten, 3 = gelegentlich, 4 = oft, 5 = immer. n = 158.

Computeranwendung	%
Schreiben und Lesen von Emails	99
Surfen und Recherchieren im Internet	96
Erstellen von Präsentationen (z.B. mit Powerpoint)	85
Office Dokumente erstellen (z.B. Word)	85
Laden von Fotos von einer Digitalkamera auf den PC	73
Nachbearbeiten von Fotos (z.B. mit Photoshop)	40
Internet-Telefonieren (Voice over IP)	20
Computerspiele	9
Erstellen und Verwalten von Homepages	8

Tabelle 4.4: Computeranwendungen, die Chirurgen, generell betrachtet, am häufigsten verwenden. n = 158.

Chirurgen, die privat häufig mit einem Computer arbeiten, tun dies auch öfter während der Arbeit (Korrelation nach Pearson,  $p < 0,001$ ).

Tabelle 4.5 illustriert, dass ein Betrachten von Patientenbildern bevorzugt in digitaler Form, statt als Ausdruck vorgenommen wird.

Betrachtungsart	%
Digitales Bild	92
Ausdruck	8

Tabelle 4.5: Betrachtungsvorliebe der Chirurgen von Patientenbildern.  $n = 158$ .

Die Planung von Operationen (Abb. 4.6) geschieht signifikant am häufigsten auf der Station (t-Test,  $p < 0,001$ ). Einige Chirurgen bevorzugen es, die Planung direkt im OP-Bereich oder anderswo durchzuführen, wie in Konferenz- und Besprechungszimmern.

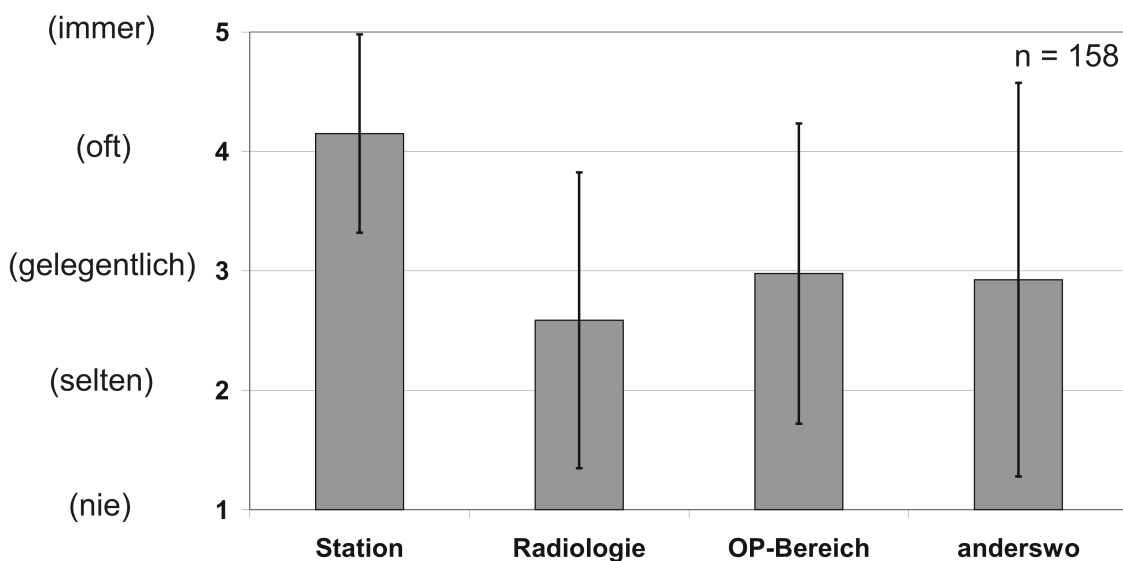


Abbildung 4.6: Orte, an denen der Chirurg die Planung einer Operation durchführt. Mittelwerte,  $n = 158$ .

Insgesamt sind digitale Patientenbilder Teil fast jeder modernen Operationsplanung und werden intraoperativ, also während der laufenden Operation, etwas seltener verwendet (Abb. 4.7). Abgesehen von den Krankenhäusern K4 und K6 unterscheiden sich die Mittelwerte der einzelnen Krankenhäuser nur geringfügig.

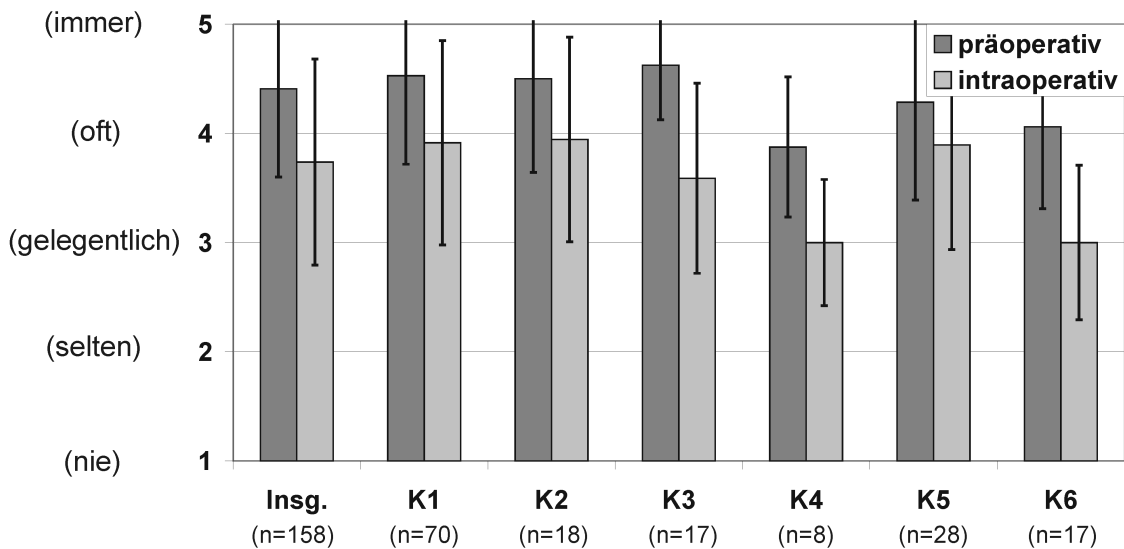


Abbildung 4.7: Häufigkeit der prä- und intraoperativen Patientenbildbetrachtung insgesamt und differenziert nach den 6 untersuchten Krankenhäusern (K1 bis K6). Mittelwerte, n = 158.

Mehr Einfluss auf die Häufigkeit der Bildbetrachtung, vor allem intraoperativ, hat die medizinische Disziplin, in welcher der Arzt arbeitet (Abb. 4.8). Während MKG-, Neurochirurgen und Orthopäden Patientenbilder am meisten operationsbegleitend einsetzen, wird in der Urologie, der Gynäkologie und der Allgemeinchirurgie weniger damit gearbeitet. Chirurgen, die zu Planungszwecken oft auf digitale Patientenbilder zurückgreifen, tun dies auch vermehrt im Operationssaal (Korrelation nach Pearson,  $p < 0,001$ ).

Abbildung 4.9 zeigt, welche Eingabegeräte für die Bedienung des bilddarstellenden Computers prä- und intraoperativ benutzt werden. In beiden Fällen werden dabei Maus und Tastatur signifikant am häufigsten verwendet (t-Test,  $p < 0,001$ ).



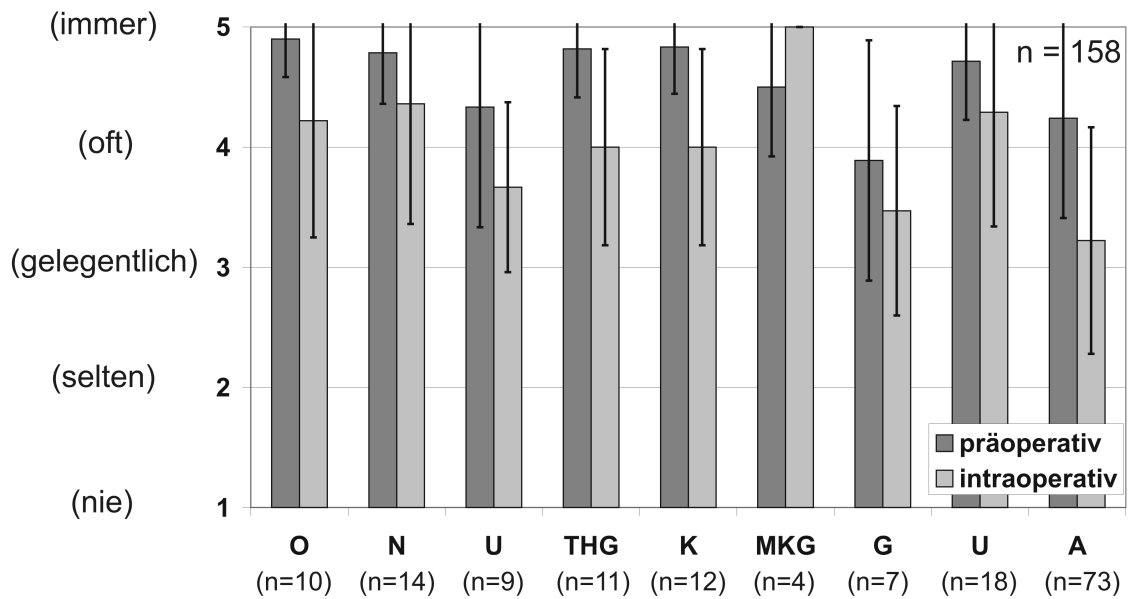


Abbildung 4.8: Häufigkeit der prä- und intraoperativen Patientenbildbetrachtung differenziert nach den 9 untersuchten medizinischen Disziplinen. O = Orthopädie, N = Neurochirurgie, U = Urologie, THG = Thorax-, Herz-, Gefäßchirurgie, K = Kinderchirurgie, MKG = Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie, G = Gynäkologie, U = Unfallchirurgie, A = Allgemeinchirurgie. Mittelwerte, n = 158.

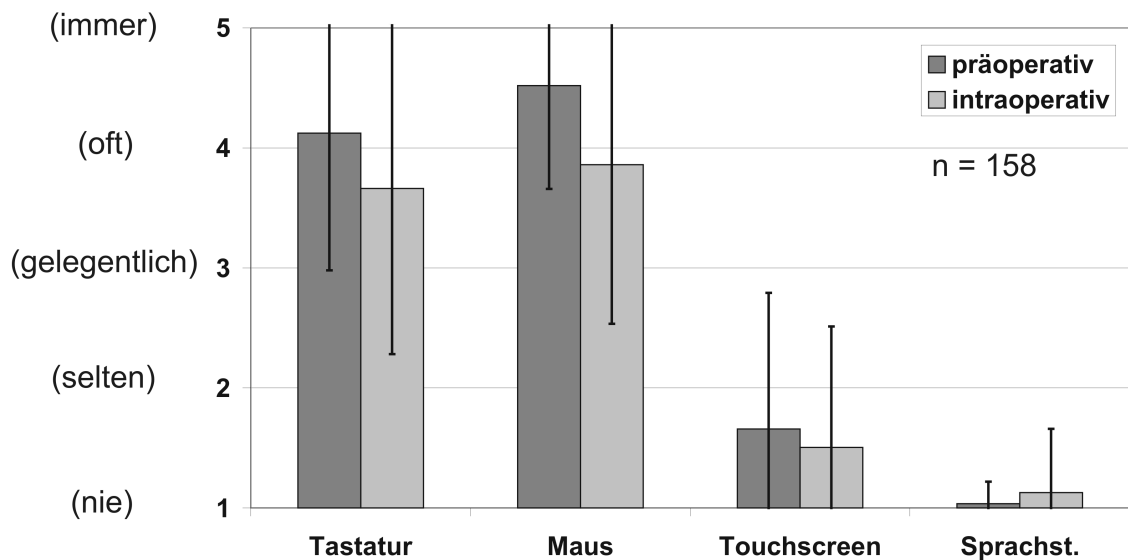


Abbildung 4.9: Eingabegeräte, die für eine prä- und intraoperative Patientenbildbetrachtung am Computer verwendet werden. Mittelwerte, n = 158.

Unter einer Auswahl unterschiedlicher Eingabegeräte (Touchscreen, Sprachsteuerung, Hand-Gesten-Erkennungssystem, Eye-Tracking-System und Maus zusammen mit einer Tastatur) illustriert Abbildung 4.10, welche Geräte Chirurgen hingegen

für die Steuerung eines bilddarstellenden Computers bevorzugen würden. Bei einer Planung werden Maus mit Tastatur und Touchscreen signifikant deutlich bevorzugt (t-Test,  $p < 0,001$ ). Während eines laufenden Eingriffs wird der Touchscreen am höchsten bewertet, gefolgt von der Sprachsteuerung und Maus-Tastatur-Kombination. Hand-Gesten- und Eye-Tracking-Systeme können sich die befragten Ärzte am wenigsten zur Bedienung eines Computers, sowohl prä- als auch intraoperativ, vorstellen.

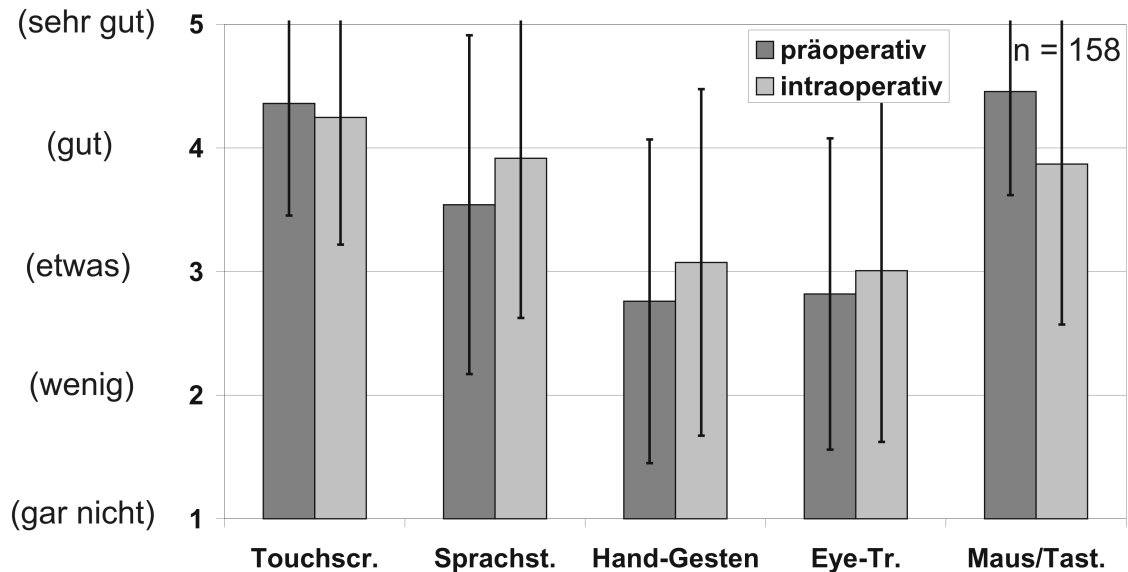


Abbildung 4.10: Akzeptanzgrad für die prä- und intraoperative Verwendung verschiedener Eingabegeräte. Mittelwerte,  $n = 158$ .

Die für eine Bildmanipulation eingesetzten Funktionen (Zoom etc.) und deren Verwendungshäufigkeit sind in Abbildung 4.11 zusammengefasst. Am meisten werden dabei Zoom (Vergrößern/Verkleinern), Längenmessung, Kontrast- und Helligkeitsveränderungen (Fensterung) sowie Rotieren benutzt.

Beim Großteil aller Operationen wird der Computer, der digitale Patientenbilder darstellt, aus dem nicht sterilen Bereich heraus von einem Assistenten bedient (Abb. 4.12, t-Test,  $p < 0,001$ ).

Die befragten Ärzte bevorzugen hingegen signifikant den operierenden Chirurgen, als die Person, die den Computer intraoperativ bedienen sollte (Abb. 4.13, t-Test,  $p < 0,001$ ).

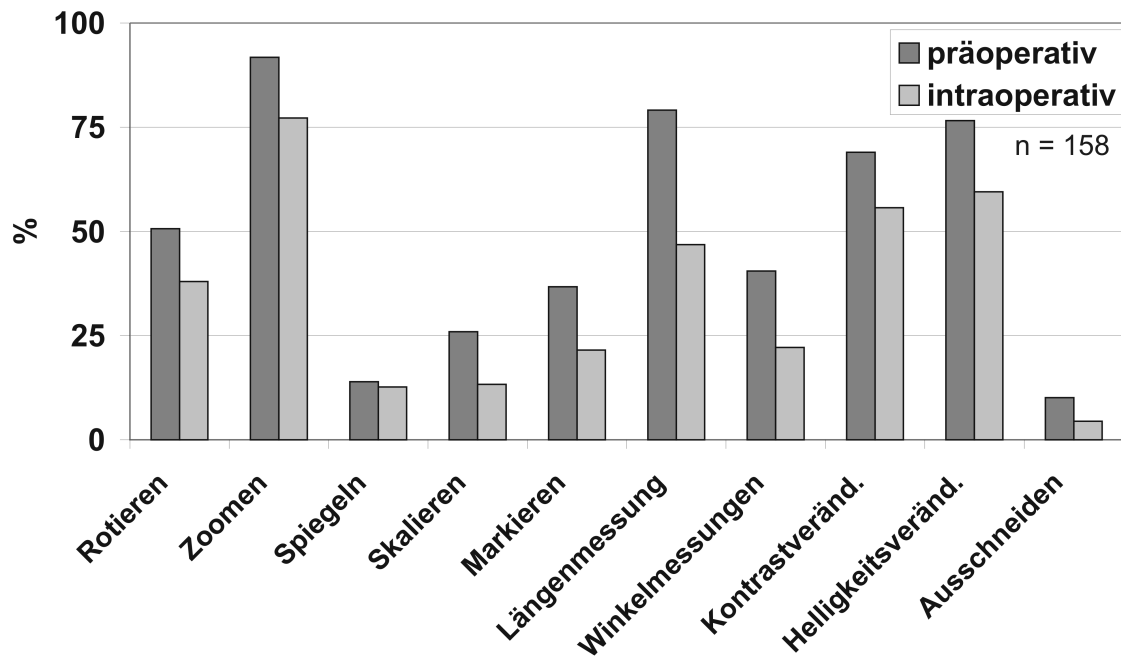


Abbildung 4.11: Prozent der Chirurgen, die die aufgelisteten Manipulationsfunktionen prä- und intraoperativ auf Patientenbilder anwenden. n = 158.

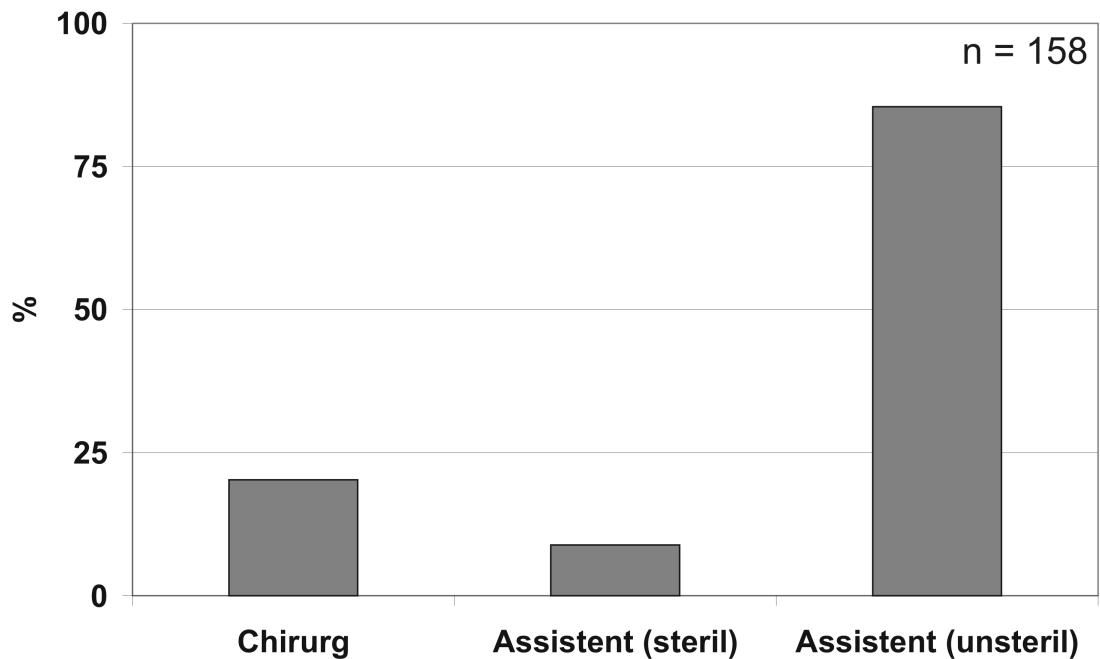


Abbildung 4.12: Benutzertypen, die den Computer zur Patientenbildbetrachtung intraoperativ verwenden. Prozent, n = 158.

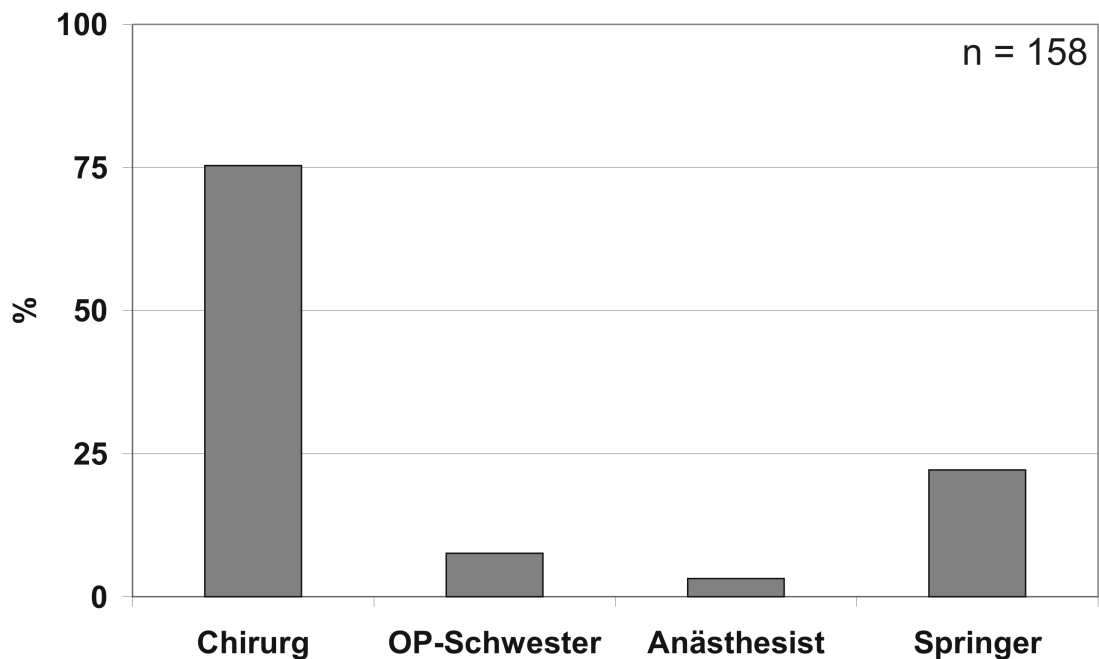


Abbildung 4.13: Benutzertypen, die für eine intraoperative Computerbedienung zur Patientenbildbetrachtung vom Chirurgen bevorzugt werden. Prozent,  $n = 158$ .

Eine Bewertung des Ausmaßes unterschiedlicher Probleme, die im Zusammenhang einer intraoperativen Computersteuerung stehen ist in Tabelle 4.6 ersichtlich. Sowohl die Bedienung der Eingabegeräte und der Software als auch die Suche nach bestimmten Patientenbildern wird als etwas bzw. ziemlich problematisch angesehen.

Problembereich	MW $\pm$ SD
Bedienung der Eingabegeräte	3,2 $\pm$ 1,3
Bedienung der Software	3,2 $\pm$ 1,2
Suche nach bestimmten Patientenbildern	3,4 $\pm$ 1,2

Tabelle 4.6: Probleme im Zusammenhang einer intraoperativen Computerbedienung zur Patientenbildbetrachtung. MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung, 1 = gar nicht, 2 = wenig, 3 = etwas, 4 = ziemlich, 5 = sehr.  $n = 158$ .

### 4.3.3 Diskussion

Um die MMI generell zu analysieren und um abzuleiten, ob der Benutzertyp des Chirurgen eine interessierte oder eher ablehnende Haltung gegenüber Computersystemen im allgemeinen hat, befasst sich der erste Teil des verteilten Fragebogens hauptsächlich mit demographischen Details.

Menschen, die eher skeptisch oder ablehnend reagieren, wenn sie mit technischen Gerätschaften arbeiten, um eine Aufgabe zu lösen, bevorzugen in der Regel ihnen vertraute, alternative Lösungsansätze. Das Röntgenbild eines Patienten kann beispielsweise digital am Computer oder als Ausdruck im Leuchtkasten betrachtet werden, wobei 92% der befragten Chirurgen erstere Möglichkeit bevorzugen und immer mehr Krankenhäuser dazu tendieren, Patientenbilder, auch aufgrund des stetig wachsenden Informationsvolumens, in digitaler Form zu verwalten (Tab. 4.5). Der Vorteil des Arztes beim Umgang mit digitalen Bildern liegt neben der zentral strukturierten Datenadministrierung vor allem in der Möglichkeit, verschiedene Manipulationsfunktionen wie Kontrastveränderungen flexibel und reversibel zu verwenden.

Die Teilnehmer dieser Umfrage verwenden Computer oft während der Arbeit und privat für gängige Büro-Applikationen wie Email, Dokumentenverwaltung und Präsentationserstellungen, aber auch im Rahmen der privaten Fotografie. Daraus folgend haben Chirurgen zumindest elementare Erfahrungen im Umgang mit Computern, was den von McCannon und O'Neal deklarierten, essentiell nötigen Anforderungen an eine Computer-Bedienung für neu graduierte Krankenschwestern entspricht [MO03]:

„Descriptive analysis of the data revealed that using e-mail effectively, operating basic Windows applications, and searching databases were critical information technology skills.“

Die Fragen der Teile 2 und 3 befassen sich mit der Computernutzung für eine Patientenbildbetrachtung, sowohl während der Planungsphase eines chirurgischen Eingriffs als auch während der laufenden Operation.

Größtenteils wird die Planung auf der Station des Arztes durchgeführt (Abb. 4.6) - dort ist der Arbeitsplatz hinsichtlich der Soft- und Hardware meist auf die individuellen Anforderungen bei der Ausführung dieser Tätigkeit konfiguriert. Digitale Patientenbilder werden dabei disziplinübergreifend nahezu immer betrachtet, um die optimale Strategie eines medizinischen Eingriffs zu ermitteln (Abb. 4.7 und 4.8). Das Verwenden solcher Bildinformationen kann, wie bereits erwähnt, auch intraoperativ ein wertvolles Mittel zur Visualisierung, zur Navigation als auch zur Ent-

scheidungshilfe sein. Die Häufigkeit, mit der davon Gebrauch gemacht wird, variiert jedoch, abhängig von der medizinischen Disziplin, der damit verbundenen Art einer Operation und den notwendigen Gerätschaften im OP. MKG-, Neurochirurgen und Orthopäden arbeiten am häufigsten mit ergänzenden Patientenbildern, während in der Gynäkologie und in der Allgemeinchirurgie dies weniger oft der Fall ist. Diesbezügliche Abweichungen zwischen verschiedenen Krankenhäusern lassen auf Unterschiede hinsichtlich des operativen Workflows schließen. Zwei Chirurgen äußerten, dass es bei ihnen im OP gar keinen Computer zur Darstellung von Patientenbildern gibt - demnach spielen auch Unterschiede in der technischen Ausstattung eines Krankenhauses eine Rolle.

Maus und Tastatur, v.a. in Kombination miteinander, bilden den modernen Standard zur Bedienung des Computers. Für das Planen einer Operation verwenden Chirurgen hauptsächlich diese Eingabegeräte (Abb. 4.9). Bei einer intraoperativen MMI müssen verschiedene Limitierungen mitberücksichtigt werden, die in Kapitel 4.2.1 vorgestellt wurden, allen voran das Einhalten hygienischer Richtlinien. In der Praxis werden Eingabegeräte, die in der Sterilzone bedient werden, mit sterilen Folien überspannt, oder ein zweites Paar Handschuhe vom Operateur angezogen.

Zwar halten Touchscreen-Monitore vermehrt Einzug in den modernen Operationssälen, doch werden in vielen OPs lediglich Maus und Tastatur als Steuerelemente angeboten - Sprachsteuerungen sind noch weniger verbreitet.

Für die Planung bevorzugen Ärzte Maus, Tastatur und Touchscreen, wobei eher experimentelle bzw. für diesen Nutzungskontext unangebrachte Eingabegeräte wie Sprachsteuerung, Eye-Tracking- und Hand-Gesten-Erkennungssysteme als schlechter befunden wurden (Abb. 4.10).

Während des Eingriffs am Patienten favorisieren Chirurgen Touchscreen und Sprachsteuerung aus Gründen der Platzeinsparung und Hygiene, da der OP ein bereits mit technischer Einrichtung überladener Arbeitsplatz ist und aus diesen Gründen Maus und Tastatur weniger geeignet sind. In den letzten Jahre wurden im Forschungsbereich der optischen Gestenerkennung weitere Fortschritte erzielt, so entwickelten Wachs et al. ein experimentelles Verfahren, bei dem eine Interaktion mit dem Computer berührungslos geschieht und hygienische Limitierungen überwunden werden können [WSE<sup>+</sup>08]. Dieses Verfahren ist jedoch von einer Markteinführung noch weiter entfernt.

Abgesehen von den Gründen der Hygiene und der Platzeinsparung eignen sich die erwähnten Eingabegeräte unterschiedlich gut für die Vollendung spezifischer Aufgaben. Eine Sprachsteuerung kann nicht bzw. nur sehr eingeschränkt für Positio-

nierungsaufgaben verwendet werden, während „Drag&Drop“-Aktionen wie das freie Rotieren eines Bildes mittels eines Touchscreen schwieriger durchführbar sind - verglichen mit der Maus - da es leicht zu Kontaktverlusten zwischen Finger und Gerät kommen kann.

Die meisten Software-Applikation zur Betrachtung medizinischer Patientenbilder bieten dem Nutzer eine große Anzahl an Funktionen und Features an. Während diese Anzahl stetig zunimmt, ist die Menge der sowohl prä- als auch intraoperativ genutzten Funktionen auf einige wenige reduziert - dazu gehören Zoom, Längenmessung, Kontrast- und Helligkeitsveränderung sowie Rotieren (Abb. 4.11). Obwohl die Studie von Pomerantz et al. mehr als 10 Jahre alt ist, führt sie zu ähnlichen Ergebnissen, was zeigt, dass sich, im starken Gegensatz zur ständig zunehmenden Komplexität und Anzahl an Programm-Features, der chirurgische Arbeitsplatz in diesem Zusammenhang wenig verändert hat [PSP<sup>+</sup>96].

Während bei Bildern, die beispielsweise im Rahmen einer MRT-Untersuchung erstellt wurden, direkt der Helligkeit- und Kontrastwert verändert wird, spricht man bei CT-Aufnahmen von einer Fensterung des sichtbaren Ausschnitts. Der Grund dafür ist, dass, wie in Kapitel 4.1 angesprochen, eine Absorption der Röntgenstrahlung durch das jeweilige Gewebe bei der Computertomographie auf die Hounsfield-Skala abgebildet wird. Eine Darstellung dieser Skala durch Grauwerte (12 bit) würde den Sehsinn des Menschen überfordern, da wir lediglich 40 bis 100 Graustufen unterscheiden können - aus diesem Grund wird nur ein begrenzter Ausschnitt betrachtet. Die Lage dieses Fensters entlang der Skala wird durch den Center-Wert bestimmt, die Weite des Fensters durch den Weite-Wert. Änderungen des Centers äußern sich für den Betrachter als Helligkeitsveränderungen des Bildes, während Variationen der Weite den Kontrast anheben bzw. senken. Funktional betrachtet können somit der Center analog zur Helligkeit und die Weite analog zum Kontrast verstanden werden - all diese Funktionen dienen der besseren Sichtbarkeit bestimmter Bildstrukturen. Generell werden Manipulationsfunktionen öfter zu Planungszwecken vom Chirurgen auf Patientenbilder angewandt als intraoperativ. Dies liegt v.a. daran, dass präoperativ - etwa auf der Station - mehr Zeit zur Verfügung steht, verglichen mit der Situation im OP, wo dem Patienten maximale Aufmerksamkeit entgegen zu bringen ist.

Im Prinzip kann die eigentliche Aufgabe der Funktionsausführung über das Bedienen der Software von verschiedenen Personen im OP erreicht werden, u.a. durch den Operateur selbst. Wie erwähnt, stellt der Aspekt der Sterilität in diesem Zusam-

menhang jedoch ein großes Hindernis dar, da der Chirurg unter keinen Umständen aufgrund des Kontakts mit einem Computer-Eingabegerät kontaminiert werden darf und so die Gefahr einer nosokomialen Infektion entstehen würde. Befinden sich die verfügbaren Eingabegeräte in der unsterilen Zone, eine intraoperative Interaktion ist allerdings von Nöten, so muss ein Assistent auf Anweisung des Chirurgen den Computer bedienen. Verstärkt durch die Lärmbedingungen im OP und aufgrund kaum standardisierter Anweisungssphrasen kommt es bei dieser indirekten Steuerung oft zu Fehlern in der Mensch-Mensch-Kommunikation (vgl. Kap. 4.2.1). Donchin et al. untersuchten die Fehlerquellen auf der Intensivstation und kamen dort zu dem vergleichbaren Ergebnis, dass 37% aller Fehler auf eine schlechte Verständigung zwischen Arzt und Krankenschwester zurückzuführen sind, etwa wenn im Notfall Anweisungen falsch verstanden werden. Insgesamt 29% dieser Fehler können schwerwiegenden Folgen für den Gesundheitszustand des Patienten mit sich bringen oder sogar zum Tode führen [DGO<sup>+</sup>95].

Aus dieser Umfrage folgernd wird der Computer intraoperativ in 85% der Fälle von einem Assistenten in der nicht sterilen Zone indirekt, in Form der beschriebenen „yell and click“-Strategie, bedient (Abb. 4.12). Wiederum deckt sich dieses Ergebnis mit der von Pomerantz et al. im Jahr 1996 durchgeführten Untersuchung, was zeigt, dass sich auch dieser Aspekt des Workflows im OP bezüglich einer Gerätebedienung trotz technischen Fortschritts kaum verändert hat.

Dennoch wollen 75% der Chirurgen mit dem bilddarstellenden Computer direkt interagieren, besonders aus Gründen der Zeiteinsparung, da eine vorhergehende mündlichen Instruktion des Assistenten mehr Zeit benötigt, als wenn der Operateur selbst das Eingabegerät steuert (Abb. 4.13). Dies setzt jedoch voraus, dass der Chirurg für die Bedienungsaufgabe ausreichend trainiert ist bzw. Erfahrung im Umgang mit dem Eingabegerät und der Visualisierungs-Software hat. Aus einer repräsentativen Befragung folgernd befinden sich 70% der interviewten Chirurgen und 50% der OP-Schwester als nicht fähig, die Geräte im OP einwandfrei bedienen zu können [MKGS06]. Wilbright et al. führten eine ähnliche Untersuchung bei Pflegekräften im Krankenhaus durch und kamen dort zu einem ähnlichen Ergebnis [WHR<sup>+</sup>06]:

„[...] many nurses and nursing support staff may not have the minimum computer competencies to effectively and efficiently perform their work.“

Trotz einer vorhergehenden Trainingsprozedur zur Bedienung der PACS-Software befanden alle von Pomerantz et al. untersuchten Krankenschwestern ihre Fähigkeit im Umgang mit dem Programm als nicht optimal [PSP<sup>+</sup>96, S. 128]:

„A common frustration was a situation where a nurse would struggle



with a workstation function with an impatient surgeon looking over his or her shoulder.“

Einige Umfrageteilnehmer äußerten sich im Fragebogen zu diesem Sachverhalt, wobei zwei Zitate nennenswert erscheinen:

„Lästig ist, die intraoperative Bedienung nicht selbst durchführen zu können, da es Zeit kostet, es anderen zu erklären und oft nicht zum gewünschten Ergebnis führt.“

„Probleme bei Bildern im OP: Pflege ruft Bilder auf und kennt die Anwendung des Programms nicht.“

Demnach müssen sowohl für Ärzte als auch für das Pflegepersonal adäquate Trainingsmaßnahmen zur Bedienung des Computers durchgeführt werden, wobei die Bedienung der Software wie auch eine Steuerung der verwendeten Eingabegeräte berücksichtigt werden muss (Tab. 4.6).

Wie dieser Umfrage zu entnehmen ist, bestehen zum Teil signifikante Unterschiede hinsichtlich der Ist- und Soll-Situation gerade bei einer intraoperativen Patientenbildbetrachtung. Chirurgen wollen direkt mit dem bilddarstellenden Computer interagieren - v.a. aus Gründen der Zeitersparnis - und befinden dafür besonders Touchscreen und Sprachsteuerung als geeignete Eingabegeräte. Um den praktischen Nutzen solcher Geräte für den Einsatz im OP zu analysieren und um zu vergleichen, ob eine direkte Computerbedienung den intraoperativen Workflow tatsächlich effektiver, effizienter und zufriedenstellender gestaltet, muss eine Evaluation der Gebrauchstauglichkeit durchgeführt werden.

## 4.4 Evaluation der intraoperativen MMI

In Kapitel 4.3 wurde die prä- und intraoperative MMI anhand des Nutzungskontexts einer Computerbedienung zur Betrachtung von Patientenbildern untersucht. Insbesondere während eines chirurgischen Eingriffs bestehen signifikante Unterschiede zwischen der aktuellen Situation im OP und jener, die Chirurgen sich wünschen würden - dies betrifft vor allem die Art der Computerbedienung. Das verbale Instruieren eines Assistenten benötigt prinzipiell mehr Zeit, als wenn der Operateur direkt mit der Visualisierungs-Software interagiert.

Ein Übertragen der direkten Kontrolle über den bilddarstellenden Computer an den Operateur muss jedoch nicht zwangsläufig zu einer Zeit- und damit Kosteneinsparung führen, sondern könnte im Gegenteil die Interaktionsdauer verlängern - etwa wenn der Arzt unerfahren im Umgang mit der Software ist. Von mindestens ebenso hoher Relevanz hinsichtlich der Effektivität, der Effizienz und der Zufriedenheit bei einer MMI ist die Wahl des Computer-Eingabegeräts.

Zwei Fragestellungen gilt es in diesem Zusammenhang zu klären:

1. Bei einer Auswahl verschiedener Computer-Eingabegeräte - welches dieser Geräte eignet sich unter Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit am besten für eine intraoperative MMI?
2. Geht eine intraoperative MMI schneller von statten, wenn der operierende Chirurg selbst mit dem Computer interagiert oder aber wenn er die Bedienungsaufgabe an einen Assistenten mündlich delegiert?

### 4.4.1 Methode

#### **Versuchsaufbau:**

Die Probanden wurden in das Test-Szenario einer simulierten minimal-invasiven Operation versetzt, in dessen Verlauf es nötig ist, zusätzliche Patientenbildinformationen am Computer einzusehen. Dazu musste die angebotene Visualisierungs-Software mit unterschiedlichen Eingabegeräten in der Sterilzone des OPs bedient werden.

Die Evaluation ist in zwei Experimente unterteilt:

- In Experiment I führen die Probanden in der Rolle des operierenden Chirurgen die Ihnen präsentierten Aufgaben direkt am Computer durch. Dies entspricht der Situation, in der der Chirurg intraoperativ die Visualisierungs-Software direkt bedient, ohne den Sterilbereich verlassen zu müssen.

- In Experiment II führen die Probanden in der Rolle der OP-Pflege die zu absolvierenden Aufgaben erst nach vorheriger mündlicher Instruktion am Computer durch. Dies entspricht der Situation, in der ein Chirurg intraoperativ die Visualisierungs-Software bedienen will, dafür jedoch einen Assistenten instruiert.

### **Computer-Eingabegeräte und Visualisierungs-Software:**

Zur Aufgabendurchführung bedienen sich die Probanden 5 verschiedener Computer-Eingabegeräte, mit denen die Visualisierungs-Software (Viewer) gesteuert wird. All diese Geräte eignen sich für eine hygiene-sensible intraoperative Bedienung direkt in der Sterilzone:

- **Laser-Tastatur:**  
Der Celluon Laserkey CL800BT projiziert ein Tastenfeld auf eine beliebige plane, möglichst reflexionsfreie Oberfläche. Die Registrierung von Tastendrücken geschieht über optische Sensoren, wenn die Finger das über dem Tastenfeld erzeugte Infrarot-Array unterbrechen. Dieses Gerät wird über Bluetooth mit dem Computer verbunden, wobei das Tastenfeld auf eine sterile Metallplatte projiziert wird (Abb. 4.14.A).
- **Maus:**  
Die GETT InduMouse ist eine für den Medizinbereich ausgelegte, silikonummantelte, hermetisch versiegelte 2-Tastenmaus. Sie entspricht in ihrer Bedienung ansonsten einer herkömmlichen optischen Maus (Abb. 4.14.B).
- **Tastatur:**  
Die GETT Induproof Tastatur ist ebenfalls vollständig silikonummantelt und daher in sich dicht (Abb. 4.14.C). Laut den Herstellerspezifikationen können sowohl Maus und Tastatur einem Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $90^{\circ}\text{C}$  ausgesetzt werden, wodurch diese Geräte im Zuge eines Niedertemperatursterilisationsverfahrens in der Sterilzone einsetzbar wären. Dazu bietet sich die Plasmasterilisation an - das Verfahren arbeitet unter  $50^{\circ}\text{C}$  und ist damit für viele thermolabile Medizinprodukte (Optiken etc.) geeignet.
- **Touchscreen:**  
Der Planar PT1910MX ist ein resistiver 19" SXGA Touchscreen mit einer nativen Auflösung von  $1280 \times 1024$ . Durch das Überziehen einer sterilen Folie kann dieses Gerät auch in der Sterilzone benutzt werden, wobei es an den Deckenstativen im OP befestigt wird (Abb. 4.14.D).

- Sprachsteuerung:

Der Siemens SpeechAdvance ASR Server stellt eine sprecherunabhängige online Sprachsteuerung dar, die aus einem begrenzten Vokabular an Kommandos Sprachbefehle in Computeraktionen übersetzt. Zur Tonaufnahme wird ein Sennheiser PC 131 Headset verwendet, das der Proband über dem Mundschutz trägt (Abb. 4.14.E).

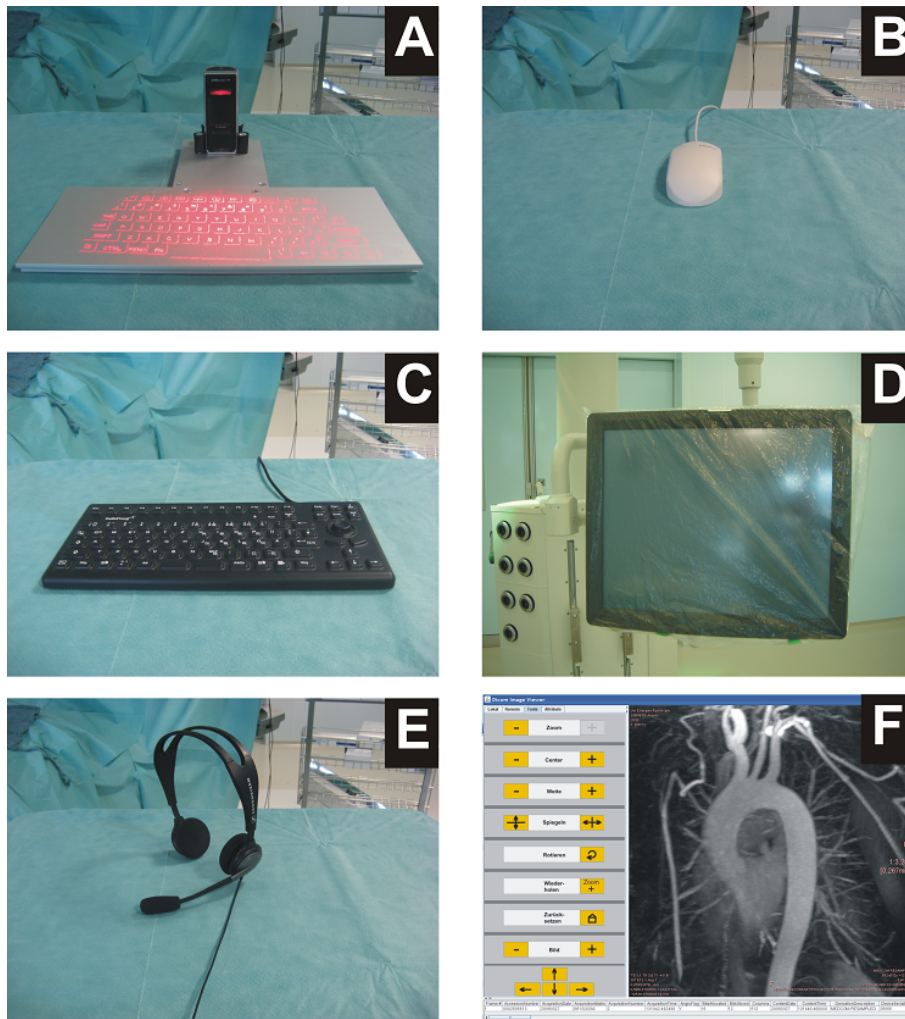


Abbildung 4.14: Darstellung der 5 untersuchten Computer-Eingabegeräte und Visualisierungs-Software. A) Laser-Tastatur. B) Maus. C) Tastatur. D) Touchscreen. E) Sprachsteuerung. F) Viewer.

Die Wahl der vorgestellten Eingabegeräte - außer der Laser-Tastatur - begründet sich aus dem Vorhaben dieser Studie, die aktuelle Situation im OP zu untersuchen. Experimentelle und selten im Krankenhaus verwendete Bedienansätze wie Gesteuerkennungssysteme werden deshalb an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Bei dem Viewer handelt es sich um eine angepasste Version des PixelMed Java DI-

COM Toolkit<sup>5</sup>, einer freien open source Software zur Darstellung und Modifikation von Patientenbildern (Abb. 4.14.F). Die für diesen Kontext benötigten Anpassungen beziehen sich u.a. auf die Erweiterung des Funktionsumfangs (z.B. Rotieren und Spiegeln) und auf die Anbindung an den SpeechAdvance ASR Server mittels Java Remote Methode Invocation (RMI).

### Stichprobe:

Die untersuchte Stichprobe, bestehend aus 28 Teilnehmern, wurde heterogen zusammengesetzt und unterteilt sich in 4 Gruppen von Probanden - 8 Chirurgen, 7 OP-Schwestern, 6 Medizinstudenten und 7 Informatikstudenten. Chirurgen sowie die OP-Pflege arbeiten im Operationssaal und sind repräsentative Probanden bei einer Untersuchung der intraoperativen MMI. Medizinstudenten haben im Rahmen ihrer Ausbildung begrenztes Wissen über die Arbeitsabläufe im OP, stellen jedoch potentielle zukünftige Chirurgen dar. Informatikstudenten weisen kein bzw. wenig Wissen im Bereich der Medizin, sind dafür jedoch geübt im Umgang mit Computern - die letztgenannten Gruppen der Studenten sind nicht repräsentative Probanden und stellen die Kontrollgruppe dar.

Hinsichtlich der Differenzierung des Erfahrungsstands von Versuchsteilnehmern nach Erfahrungen mit der Aufgabendomäne, Erfahrungen mit dem speziellen System und generellen Erfahrungen mit Computern (Kap. 3.2.1), können die Teilnehmergruppen dieser Evaluation im Vorfeld folgendermaßen grob unterteilt werden (Tab. 4.7):

Probandengruppe	Erfahrung in der Aufgabendomäne	Erfahrung mit dem speziellen System	Erfahrung mit Computern
Chirurgen	hoch	mittel	mittel
OP-Pflege	hoch	mittel	mittel
Medizinstudenten	mittel	wenig	mittel
Informatikstudenten	wenig	wenig	hoch

Tabelle 4.7: Differenzierung der Nutzererfahrung nach Erfahrungen mit der Aufgabendomäne, dem speziellen System und Computern. Die Aufgabendomäne entspricht in diesem Kontext dem medizinischen operativen Eingriff am Patienten, während mit dem speziellen System die konkrete Visualisierungs-Software bzw. vergleichbare Software-Produkte gemeint sind.

<sup>5</sup><http://www.pixelmed.com>

Für eine Klärung der beschriebenen zentralen Fragestellungen dieser Evaluation wurden zwei Experimente angesetzt. Die Chirurgen sowie beide Studentengruppen nahmen ausschließlich an Experiment I teil, die OP-Schwester hingegen nur an Experiment II.

#### **Testumgebung:**

Um Arbeitsabläufe zu untersuchen, bieten Feldversuche den Vorteil, dass man den Nutzer direkt bei der Ausführung seiner Arbeit beobachten kann, jedoch sind aufgrund mangelnder Kontrollmechanismen die Ergebnisse eines solchen Feldversuchs weniger reproduzier- und vergleichbar, da nur bedingt in den Workflow des Nutzers eingegriffen werden kann.

Zur Erhebung repräsentativer Ergebnisse bei einer Untersuchung unter Laborbedingungen muss die Testumgebung der realen Situation im Nutzungskontext möglichst weitestgehend entsprechen - in vielen Usability-Laboren ist dies jedoch nicht der Fall, da solche Labore v.a. auf eine Beobachtung des Probanden ausgerichtet sind.

Diese Evaluation wurde im Experimental-OP<sup>6</sup> durchgeführt, welcher deshalb ideale Testbedingungen bietet, da an dieser Einrichtung die Vorteile eines Laborversuchs mit denen eines Feldversuchs kombiniert werden. Der Experimental-OP ist ein authentisch errichteter und betriebsbereiter OP-Bereich, mit allen damit verbundenen Funktionsräumen wie der Schleuse, der Ein- und Ausleitung, dem Sterilgutlager und mehreren Operationssälen - hier können realistische Arbeitsabläufe rund um den OP simuliert und untersucht werden.

Da die Operationssäle voll funktionsfähig sind, herrschen dort sämtliche, im Rahmen der Nutzungskontextanalyse in Kapitel 4.2.1 ermittelten relevanten Umgebungsfaktoren wie die Beleuchtung und das Raumklima (Temperatur, Feuchtigkeit). Um eine realistische Hintergrundgeräuschkulisse zu erzeugen, werden darüberhinaus akustische Aufzeichnungen von Operationen während des Versuchs abgespielt.

#### **Aufgabenbeschreibung:**

Der Versuch findet im Kontext einer minimal-invasiven Operation statt. Die Aufgaben wurden entsprechend der Analyse des Nutzungskontexts repräsentativ gewählt und beschreiben die Situation, in der operationsbegleitende digitale Patientenbilder manipuliert werden müssen. Dies geht einher mit dem Unterbrechen des chirurgischen Eingriffs, einer möglichst kurzen Interaktion mit dem Computer und dem

---

<sup>6</sup>Der Experimental-OP und Ergonomie, ursprünglich eine Einrichtung des Universitätsklinikums Tübingen, wurde ab Mitte 2009 in die wwH-c GmbH überführt. Homepage: <http://www.wwh-c.com>

anschließenden Fortsetzen der Operation.

Der Proband steht in der Sterilzone am OP-Tisch mit einem darauf befindlichen Laparoskopie-Trainer (Lap-Trainer, Abb. 4.15.B) - neben ihm befindet sich der Computer-Arbeitsplatz (Workstation) zur Bedienung der Visualisierungs-Software (Abb. 4.15.A). Abhängig davon, ob der Proband an Experiment I oder II teilnimmt, werden unterschiedliche Ausgangspositionen eingenommen. Im Experiment I arbeitet der Versuchsteilnehmer mit der Endoskop-Kamera sowie den Instrumenten in der Rolle des Chirurgen am Lap-Trainer und führt dort jeweils vor und nach dem einzelnen Aufgabendurchlauf typische chirurgische Tätigkeiten aus. Im Experiment II verfolgt der Proband in der Rolle des Assistenten und ebenfalls in der Sterilzone platziert den simulierten Eingriff, den der gespielte Operateur am Lap-Trainer gegenüber vornimmt (Abb. 4.15.C).



Abbildung 4.15: Versuchsaufbau im OP. A) Der Computer-Arbeitsplatz mit dem jeweils zu testenden Eingabegerät und der Hilfedokumentation. B) Laparoskopie-Trainer. C) Monitore für die Endoskop-Kamera (r.) und für ein zusätzliches Bild des Viewers (l.).

In beiden Experimenten müssen pro Computer-Eingabegeräte zwei Aufgaben jeweils dreimal hintereinander anhand der Visualisierungs-Software absolviert werden:

- Aufgabe 1:  
Der Proband führt eine festgelegte Sequenz von 7 Bildfunktionen nacheinander aus (z.B. „Zoom rein“, „Bild zurücksetzen“).
- Aufgabe 2:  
Der Proband bewegt den sichtbaren Bildausschnitt auf die angezeigte, hervorgehobene Zielregion, indem das Bild in eine von vier Richtungen (links, rechts, oben, unten) verschoben wird. Dies kann er mit mindestens 4 Funktionsaufrufen erreichen, wodurch der Zeitbedarf für Aufgabe 2 insgesamt niedriger ausfallen sollte.

Die Aufgaben sind in beiden Experimenten gleich, werden dem Teilnehmer jedoch unterschiedlich präsentiert.

Im Fall von Experiment I unterbricht der Proband das Arbeiten am Lap-Trainer zu Aufgabenbeginn und wendet sich der Workstation zu. Dort werden ihm die jeweiligen Aufgabenschritte am Monitor präsentiert, wobei der Proband nach jedem Durchlauf in die Ausgangsposition zurückgekehrt.

Bei Experiment II wendet sich der Proband ebenfalls der Workstation zu, bekommt die einzelnen Aufgaben jedoch nicht am Bildschirm präsentiert, sondern wird, durch den gespielten Operateur standardisiert, in mündlicher Form schrittweise angewiesen.

Um etwaige Bias-Effekte aufgrund individueller Leistungsvariabilität zu kompensieren, führt jeder Versuchsteilnehmer die Aufgaben mit allen 5 Eingabegeräten durch (Within-subject testing, vgl. Kap. 3.2.1). Während im Fall des Touchscreen und der Maus die zu tätigen Funktionen direkt auf der graphischen Oberfläche des Viewers angeklickt werden können, müssen bei der (Laser-)Tastatur entsprechende Tastenkürzel (Hotkeys) gedrückt bzw. bei der Sprachsteuerung die zugehörigen Kommandos gesprochen werden. Vor allem für die letztgenannten Geräte befindet sich neben der Workstation eine Hilfedokumentation, die einen Überblick über die verfügbaren Hotkeys und Sprachkommandos gibt. Das Klonen des Viewer-Bildes auf einen weiteren Monitor (Abb. 4.15.C) soll beim Nutzen der Sprachsteuerung eine direkte Ausführung der Aufgaben ermöglichen, ohne dass man sich vom Lap-Trainer abwenden muss.

Um etwaige Bedieneinschränkungen beim Sprechen (Sprachsteuerung) oder bezüglich der Haptik zu berücksichtigen, müssen vor dem Durchführen der Aufgaben alle Pro-



banden einen Mundschutz und Handschuhe anziehen.

**Erhebungsmethodik:**

Im Rahmen dieser Studie wurden drei unterschiedlichen Informationsarten, die qualitativer und quantitativer Art sind, erhoben:

- **Zeiten (quant.):**  
Eine Messung der Zeiten, die die Probanden für die Erfüllung der jeweiligen Aufgaben benötigen, geschah durch die programmierte Visualisierungs-Software, die alle Aktivitäten des Nutzers in Form automatisch generierter Protokolle speichert. Auf diese Weise erweisen sich die gemessenen Zeiten in höchstem Maße als präzise, zuverlässig und reproduzierbar.
- **Fehler (quant.):**  
Fehler können hinsichtlich ihrer Auswirkung auf eine MMI in zwei Klassen definiert werden. Leichte Fehler bedeuten einen größeren Aufwand, um die Aufgabe zu beenden, während schwere Fehler den Nutzer (User) davon abhalten, mit der Aufgabendurchführung fortzufahren [Dah06]. Ferner können Fehler bezüglich ihres Ursprungs in Maschinen- und User-Fehler in jeweils unterschiedliche Typen differenziert werden (Tab. 4.8, 4.9), wobei eine Messung über die Visualisierungs-Software und in Kombination mit dem Versuchsleiter geschah.
- **Zufriedenheit (qual.):**  
Zur Messung der Zufriedenheit füllten die Probanden unterschiedliche psychometrisch validierte Fragebögen aus - den von Lewis beschriebenen After-Scenario Questionnaire (ASQ) im direkten Anschluss an jeden dreimaligen Aufgabendurchlauf und den Post-Study System Usability Questionnaire (PS-SUQ) für jedes Eingabegerät am Ende des Versuchs [Lew95]. Zusätzlich wurden versuchsbegleitende Notizen vom Versuchsleiter gemacht. Videokameras zeichneten die Probanden während des gesamten Testablaufs auf, um etwaige „Highlight-Videos“<sup>7</sup> zu erhalten.

---

<sup>7</sup>Beim Usability-Test stellen Highlight-Videos besonders ausdrucksstarke positive oder negative Aspekte einer Gerätebedienung dar.

Fehlertyp	Bedeutung	Fehlerklasse
M1	Funktion nicht erkannt	Leicht
M2	Falsche Funktion erkannt	Leicht
M3	System reagiert nicht mehr	Schwer

Tabelle 4.8: Maschinen-Fehler entstehen bei einer MMI auf Seiten der Maschine, wenn eine Eingabe des Users nicht bzw. falsch erkannt wird oder das System nicht mehr reagiert. Im letzteren Fall spricht man von einem schweren Fehler.

Fehlertyp	Bedeutung	Fehlerklasse
U1	Falsche Funktion ausgeführt	Leicht
U2	User zögert, ist verwirrt	Leicht
U3	User benötigt externe Hilfe	Schwer

Tabelle 4.9: User-Fehler entstehen bei einer MMI auf Seiten des Menschen, wenn der User eine falsche Eingabe ausführt, für einen gewissen Moment zögert oder Hilfe benötigt, um mit dem Versuch fortzufahren. Im letzteren Fall spricht man von einem schweren Fehler.

**Evaluationsmetriken:**

Eine Evaluation der Gebrauchstauglichkeit geht mit der Messung der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit bei einer Bedienungsaufgabe einher. Des Weiteren soll in diesem speziellen Nutzungskontext neben der Gebrauchstauglichkeit die Erlernbarkeit der Computer-Eingabegeräte analysiert werden. Für das Bewerten der Effektivität, der Effizienz, der Erlernbarkeit und der Zufriedenheit müssen im Vorfeld Metriken definiert werden (vgl. Kap. 3.2.1):

- Metrik für die Effektivität:  
Die Effektivität entspricht dem Grad der Zielerreichung, also den Aufgaben, die vom Probanden selbstständig erfolgreich beendet werden konnten. Einfluss auf die Effektivität haben die bereits vorgestellten schweren Fehler des Typs M3 und U3, in Folge dessen das System nicht mehr reagiert bzw. nur durch Hilfestellung des Versuchsleiters mit der Aufgabe fortgefahren werden kann.
- Metrik für die Effizienz:  
Die Effizienz beschreibt den nötigen Aufwand für die Zielerreichung und setzt sich in diesem Fall aus der Anzahl der definierten leichten Fehler des Typs M1, M2, U1, U2 und aus der gemessenen Zeit, in der die Aufgaben absolviert wurden, zusammen.
- Metrik für die Erlernbarkeit:  
Da jede Aufgabe dreimal hintereinander durchzuführen ist, kann die Erlern-

barkeit durch den Vergleich der einzelnen Zeitmessung der Durchgänge errechnet werden. Der Grad der Zeitverbesserung oder -verschlechterung gibt direkt Auskunft über den Lernfortschritt.

- Metrik für die Zufriedenheit:

Anhand der Fragebögen, welche die Probanden zu unterschiedlichen Aspekten der Aufgabenbewältigung befragen, kann die subjektiv erfahrene Zufriedenheit abgeleitet werden.

Eine Untersuchung der Mittelwertunterschiede und der Korrelation basiert auf dem t-Test und der bivariaten Korrelationsanalyse nach Pearson. Ein Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  wird als signifikant interpretiert.

### **Versuchsablauf:**

Im Folgenden wird der sequentielle Versuchsablauf beschrieben:

1. Begrüßung des Probanden und Führung in den Experimental-OP.
2. Aushändigung des Prüfplans und Vertrautmachen mit dem Aufgabenkontext.
3. Ausfüllen eines Fragebogens zur Erhebung demographischer Informationen.
4. Anlegen von Mundschutz und Handschuhen.
5. Einweisung in das 1. Computer-Eingabegerät. Um Bias-Effekte zu vermeiden ist die Testreihenfolge der 5 Geräte randomisiert, wobei jedes Eingabegerät gleich oft an jeder der 5 Reihenfolgepositionen vorkommt.
6. Ausführen der Aufgabe 1, dreimal hintereinander.
7. Bewerten der Zufriedenheit mit der Lösung von Aufgabe 1 unter Benutzung des 1. Geräts auf dem ASQ.
8. Ausführen der Aufgabe 2, dreimal hintereinander.
9. Bewerten der Zufriedenheit mit der Lösung von Aufgabe 2 unter Benutzung des 1. Geräts auf dem ASQ.
10. Für das nächste der 5 Eingabegeräte wird wie in den Schritten 5.-9. verfahren, bis die Aufgaben mit allen Geräte absolviert wurden.
11. Bewerten der Zufriedenheit mit der Bedienung aller 5 Geräte anhand des PS-SUQ.

12. Bewerten der Zufriedenheit mit der verwendeten Visualisierungs-Software.
13. Abschließendes Ausfüllen eines Fragebogens u.a. zum Ranking der 5 Eingabegeräte.
14. Verabschiedung des Probanden.

Die Durchführung des einzelnen Versuchs von der Begrüßung bis hin zur Verabschiedung des Probanden dauerte etwa 1 Stunde.

#### 4.4.2 Ergebnisse

Insgesamt nahmen 28 Personen an dieser Evaluation teil, darunter 12 Frauen und 16 Männer. Für Experiment I wurden Probanden aus den Gruppen der Informatikstudenten ( $n = 7$ , Altersdurchschnitt = 25 Jahre), Medizinstudenten ( $n = 6$ , Altersdurchschnitt = 25 Jahre) und Chirurgen ( $n = 8$ , Altersdurchschnitt = 38 Jahre) gewählt. Am Experiment II nahm ausschließlich ausgebildetes OP-Pflegepersonal ( $n = 7$ , Altersdurchschnitt = 40 Jahre) teil.

Tabelle 4.10 zeigt, wie alle Teilnehmergruppen ihre Erfahrung mit dem Computer allgemein sowie mit den 5 Eingabegeräten selbst einschätzen.

Gruppe	Erfahrung mit					
	Comp.	Maus	Tast.	Touchscr.	Sprachst.	Laser-Tast.
Chirurgen	$4,1 \pm 0,6$	$4,8 \pm 0,5$	$4,5 \pm 0,8$	$3,4 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,5$	$1,1 \pm 0,4$
Med.stud.	$3,2 \pm 0,8$	$4,2 \pm 0,4$	$3,8 \pm 0,4$	$2,7 \pm 0,8$	$1,3 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,8$
Inf.stud.	$4,7 \pm 0,5$	$5,0 \pm 0,0$	$5,0 \pm 0,0$	$3,2 \pm 1,0$	$1,7 \pm 0,8$	$1,2 \pm 0,4$
OP-Pflege	$3,3 \pm 0,5$	$4,4 \pm 0,5$	$4,3 \pm 0,8$	$3,7 \pm 1,1$	$1,3 \pm 0,5$	$1,0 \pm 0,0$
Insgesamt	$3,9 \pm 0,8$	$4,6 \pm 0,5$	$4,4 \pm 0,7$	$3,3 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,6$	$1,2 \pm 0,5$

Tabelle 4.10: Selbsteinschätzung der Probanden bezüglich ihrer Erfahrung mit dem Computer allgemein und den verschiedenen Eingabegeräten. Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, 1 = keine Erfahrung, 3 = mittelmäßige Erfahrung, 5 = sehr viel Erfahrung,  $n = 28$ .

#### Zeiten:

Über die gemessene Zeit zum Beenden der Aufgaben gibt Abbildung 4.16 Aufschluss. Am schnellsten lassen sich die Aufgaben mit Touchscreen und Tastatur bewältigen, während mit der Sprachsteuerung am langsamsten gearbeitet wird. Bis auf die Gerätepaarung Maus und Tastatur differieren die Mittelwerte aller Eingabegeräte hoch signifikant (t-Test,  $p < 0,03$ ). Die Teilnehmer des Experiments II (OP-Pflege) brauchen mit Sprachsteuerung, Tastatur und Touchscreen insgesamt länger

(t-Test,  $p \leq 0,03$ ) als die Probanden von Experiment I (Chirurgen, Medizin- und Informatikstudenten). Letztgenannte differieren bei der Nutzung der Eingabegeräte zeitlich zum Teil signifikant, doch gibt es keine Gruppe innerhalb des Experiments I, die konsistent am längsten bzw. am kürzesten für die Aufgabenvollendung benötigt.

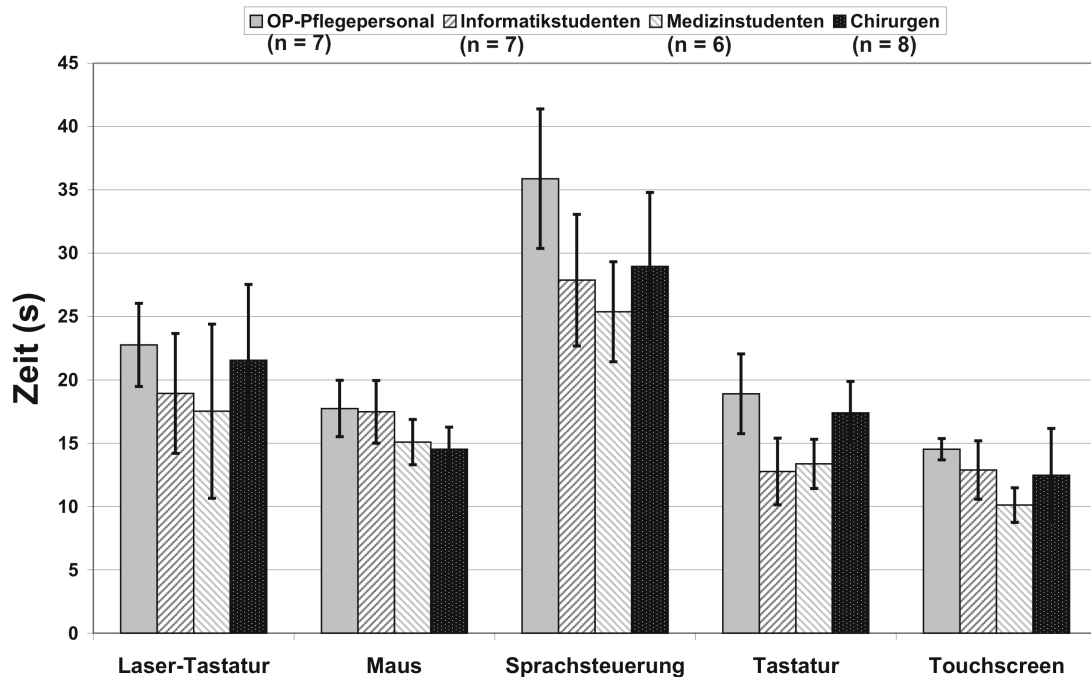


Abbildung 4.16: Zeitaufwand zur Erfüllung beider Aufgaben. Mittelwerte,  $n = 28$ .

Eine Aufschlüsselung der Bedienzeiten nach Aufgabe 1 und 2 zeigt, dass bei erstgenannter Aufgabe die Teilnehmer von Experiment I mit allen Geräten, mit Ausnahme der Maus, signifikant länger brauchen als die Probanden von Experiment II (t-Test,  $p \leq 0,04$ , Abb. 4.17). Bei Aufgabe 2 trifft dies nur im Fall der Tastatur zu (t-Test,  $p \leq 0,03$ ) - dort ist der Mittelwert der Tastatur niedriger als der des Touchscreen (Abb. 4.18).

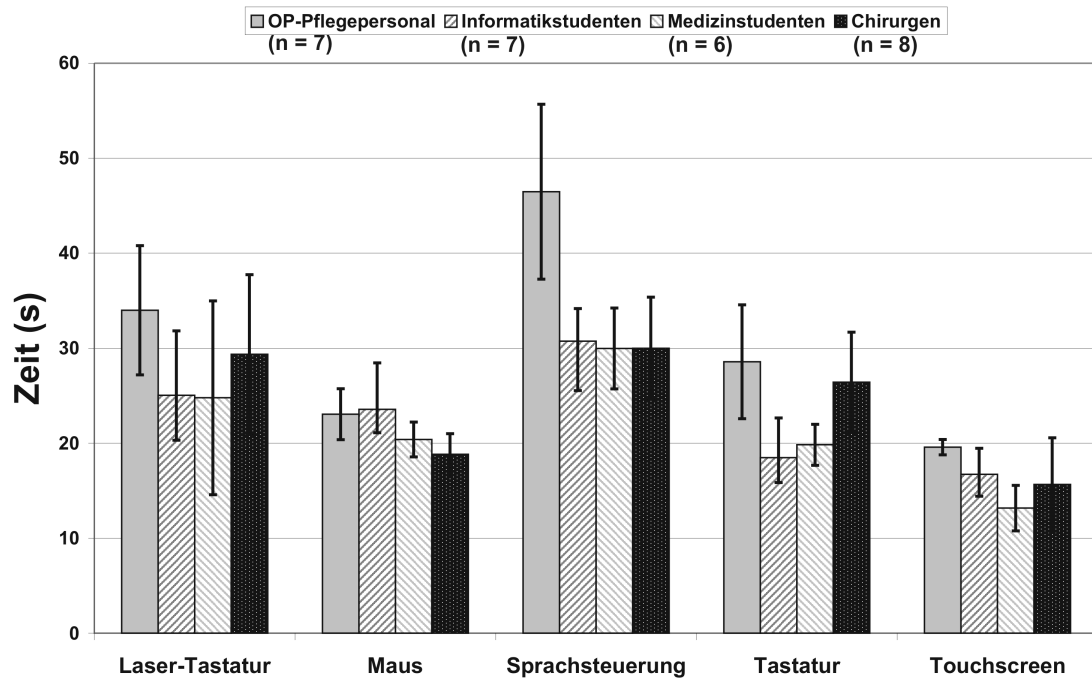


Abbildung 4.17: Zeitaufwand zur Erfüllung der Aufgabe 1. Mittelwerte, n = 28.

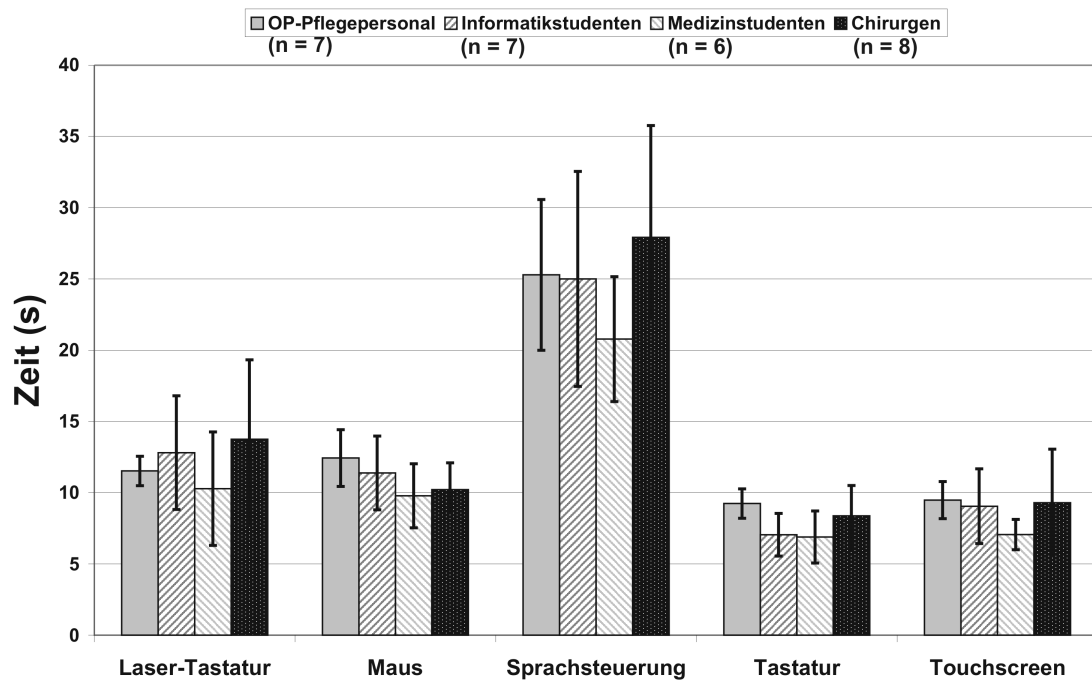


Abbildung 4.18: Zeitaufwand zur Erfüllung der Aufgabe 2. Mittelwerte, n = 28.

**Fehler:**

Abbildung 4.19 illustriert die durchschnittliche Anzahl an Fehlern, die bei der Geräte-

bedienung entstanden sind. Maus, Tastatur und Touchscreen weisen die niedrigste Fehleranfälligkeit auf, wobei generell sehr hohe Standardabweichungen vom Mittelwert auftreten.

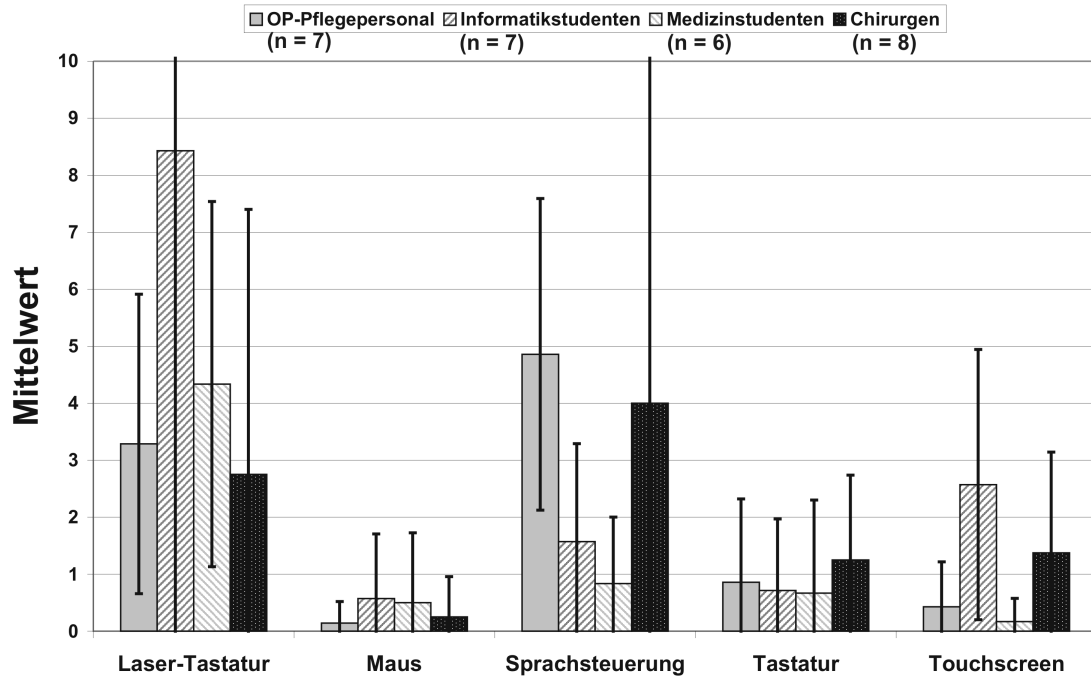


Abbildung 4.19: Anzahl an Fehlern pro Versuchsteilnehmer. Mittelwerte,  $n = 28$ .

Im Vergleich zu Aufgabe 1 werden in der zweiten Aufgabe deutlich weniger Fehler produziert - im Fall von Maus und Tastatur überhaupt keine (Abb. 4.20, 4.21).

Eine genauere Analyse zeigt, dass Fehler bei Experiment I und II vor allem auf inkorrekte Aktionserkennungen durch den Computer (z.B. keine Erkennung eines Sprachkommandos) und auf falsche Eingaben durch den Probanden (bspw. aus Versehen gedrückter, falscher Knopf) zurückzuführen sind (Abb. 4.22, 4.23).

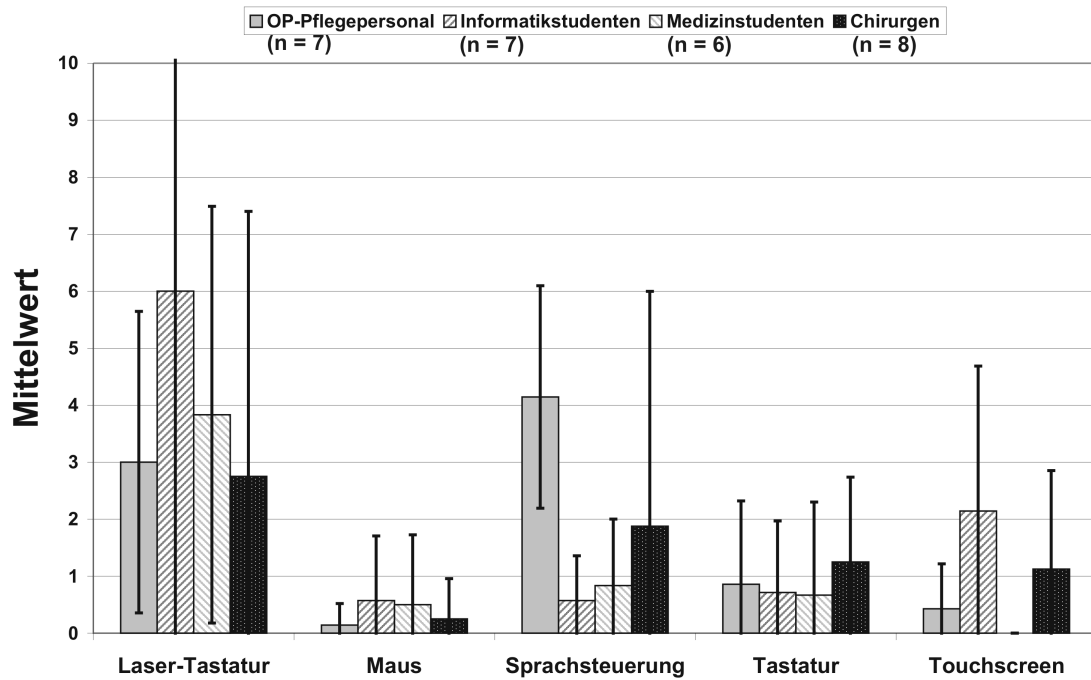


Abbildung 4.20: Anzahl an Fehlern pro Versuchsteilnehmer bei Aufgabe 1. Mittelwerte, n = 28.

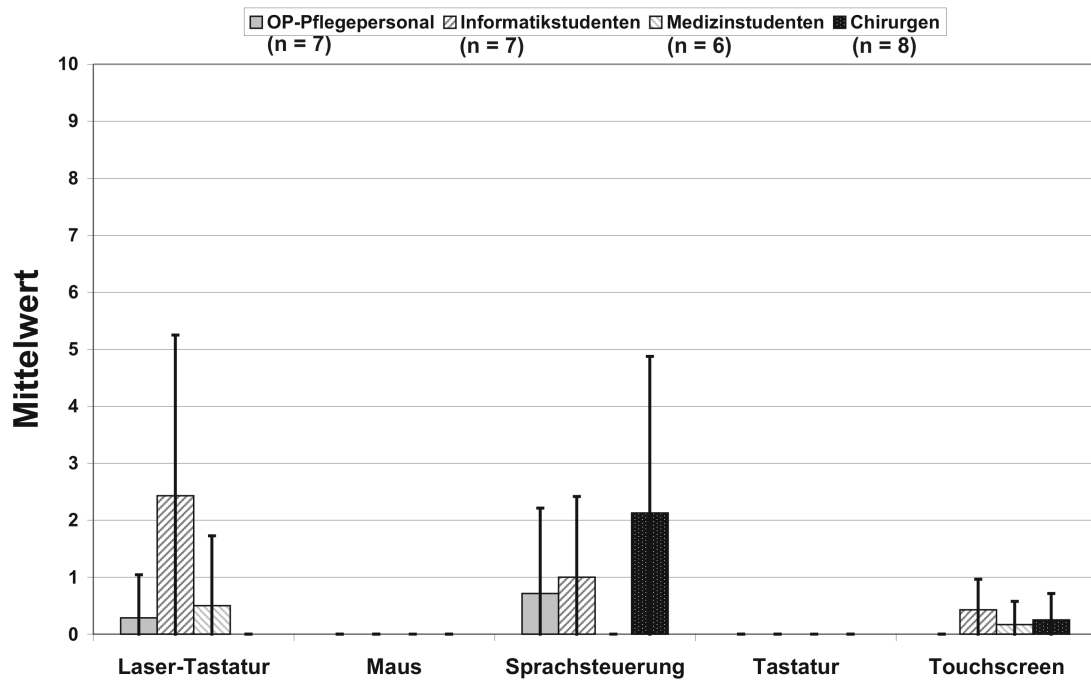


Abbildung 4.21: Anzahl an Fehlern pro Versuchsteilnehmer bei Aufgabe 2. Mittelwerte, n = 28.



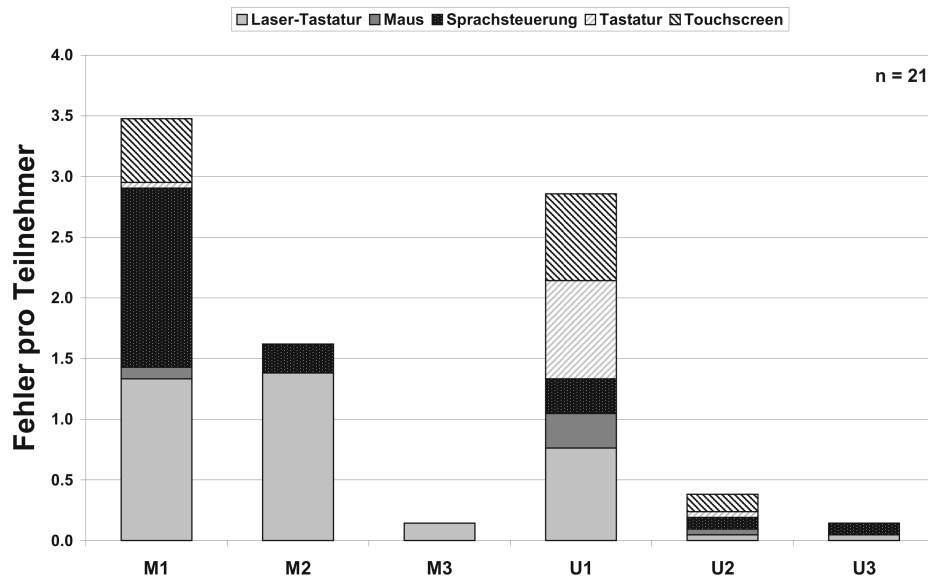


Abbildung 4.22: Differenzierung der aufgetretenen Fehler im Experiment I nach Maschinen- und User-Fehlern. M1 = Funktion nicht erkannt. M2 = Falsche Funktion erkannt. M3 = System reagiert nicht mehr. U1 = Falsche User-Funktion. U2 = User zögert/ist verwirrt. U3 = User braucht Hilfe. Mittelwerte,  $n = 21$ .

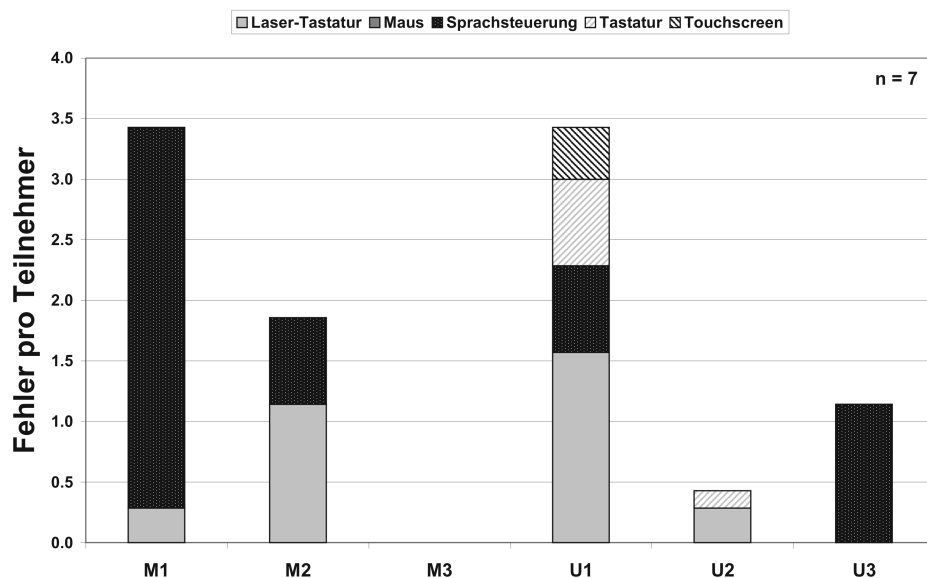


Abbildung 4.23: Differenzierung der aufgetretenen Fehler im Experiment II nach Maschinen- und User-Fehlern. M1 = Funktion nicht erkannt. M2 = Falsche Funktion erkannt. M3 = System reagiert nicht mehr. U1 = Falsche User-Funktion. U2 = User zögert/ist verwirrt. U3 = User braucht Hilfe. Mittelwerte,  $n = 7$ .

**Lernkurven:**

Die Lernkurven der Probanden des Experiments I sind in Abbildung 4.24 dargestellt. Eine hohe Verbesserung der Aufgabendauer von Durchlauf 1 im Vergleich zu Durchlauf 3 ist vor allem beim Gebrauch der Tastatur (41% Steigerung), der Laser-Tastatur (32%) und der Maus (31%) gegeben. Bei Touchscreen (23%) und Sprachsteuerung (18%) findet eine geringere zeitliche Verbesserung statt.

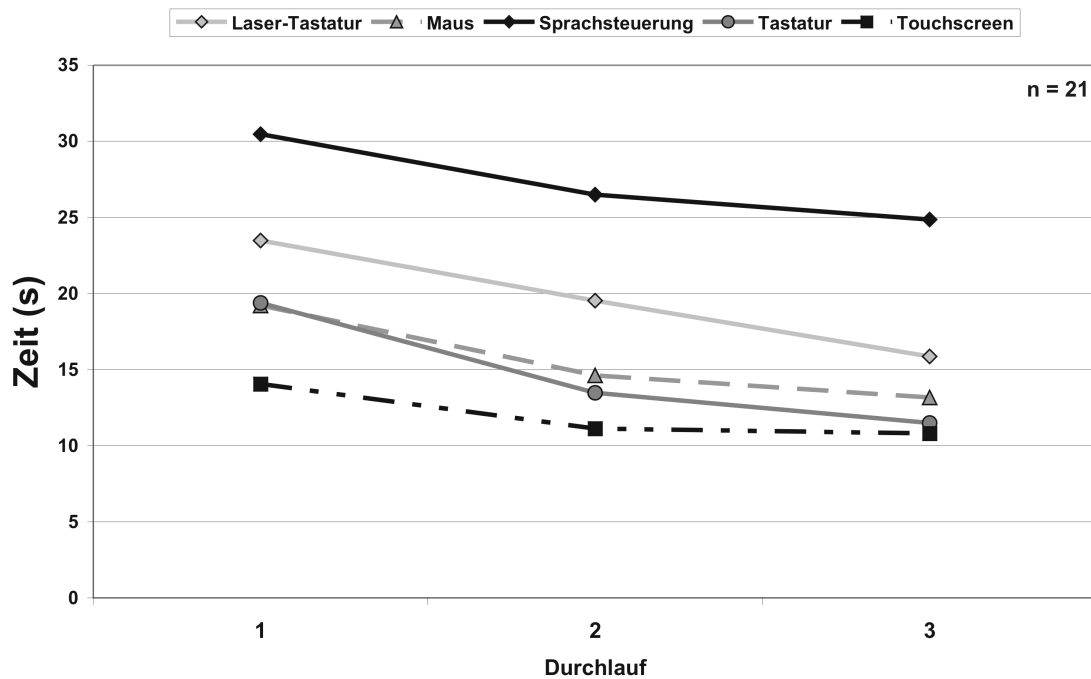


Abbildung 4.24: Lernfortschritt der Probanden des Experiments I zwischen den einzelnen Aufgabendurchläufen. Mittelwerte, n = 21.

Ähnlich verhält es sich bei Experiment II, wobei sich Tastatur (35%) und Laser-Tastatur (33%) von Touchscreen (21%), Maus (17%) und Sprachsteuerung (7%) abheben (Abb. 4.25).

**Zufriedenheit:**

Nachdem alle Aufgaben mit sämtlichen Eingabegeräten durchgeführt worden sind, machten die Teilnehmer der Studie abschließend pro Gerät im PSSUQ Aussagen darüber, wie zufrieden sie mit dessen Nutzung waren (Abb. 4.26). Insgesamt werden dabei der Touchscreen, gefolgt von der Maus, deutlich besser bewertet als der Rest (t-Test,  $p < 0,01$ ).

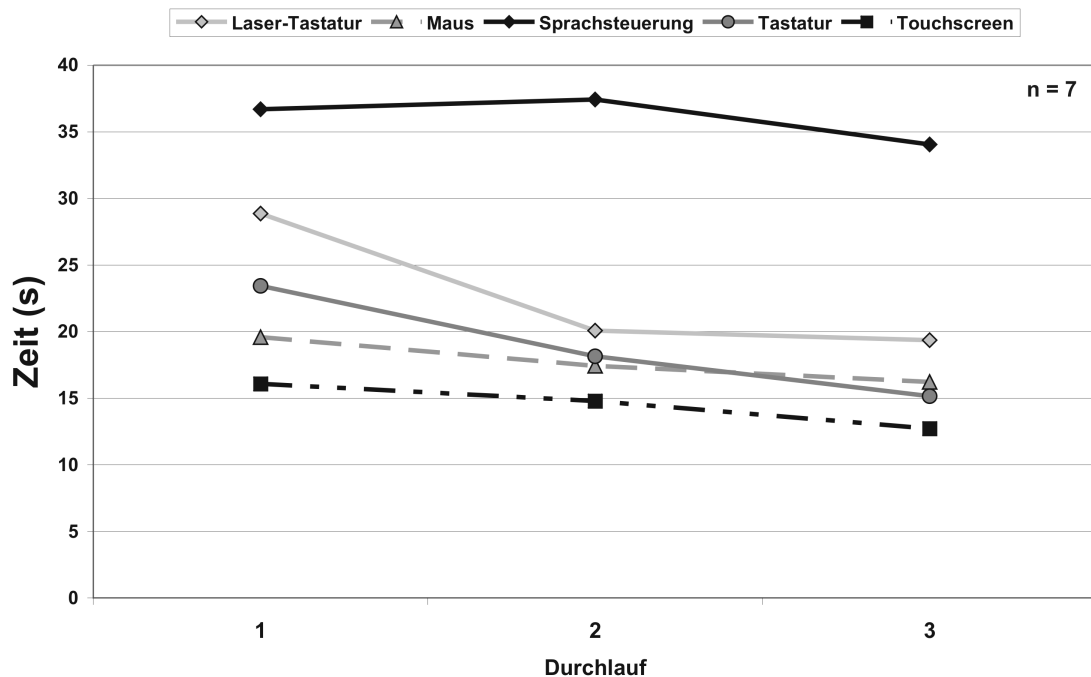


Abbildung 4.25: Lernfortschritt der Probanden des Experiments II zwischen den einzelnen Aufgabendurchläufen. Mittelwerte,  $n = 7$ .

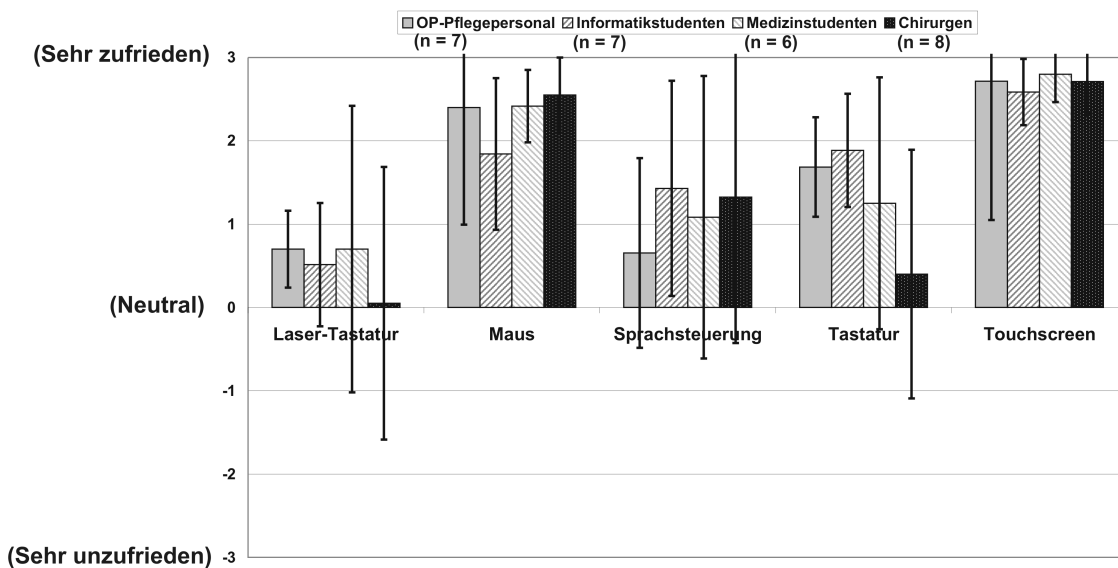


Abbildung 4.26: Bewertung der Zufriedenheit der Probandengruppen mit der Bedienung der Eingabegeräte auf dem PSSUQ. Mittelwerte,  $n = 28$ .

Unmittelbar im Anschluss an die Durchführung einer Aufgabe bewerteten die Probanden mittels des ASQ ihre Zufriedenheit mit dem jeweiligen Eingabegerät. Insgesamt stimmt diese Bewertung mit der auf dem PSSUQ (Abb. 4.26) überein, doch variiert die Zufriedenheit je nach Aufgabenart (siehe Abb. 4.27, 4.28). Während sich

die Zufriedenheit mit Touchscreen, Maus und Sprachsteuerung zwischen Aufgabe 1 und 2 kaum unterscheiden, weichen die Mittelwerte von Tastatur und Laser-Tastatur signifikant voneinander ab (t-Test,  $p < 0,01$ ).

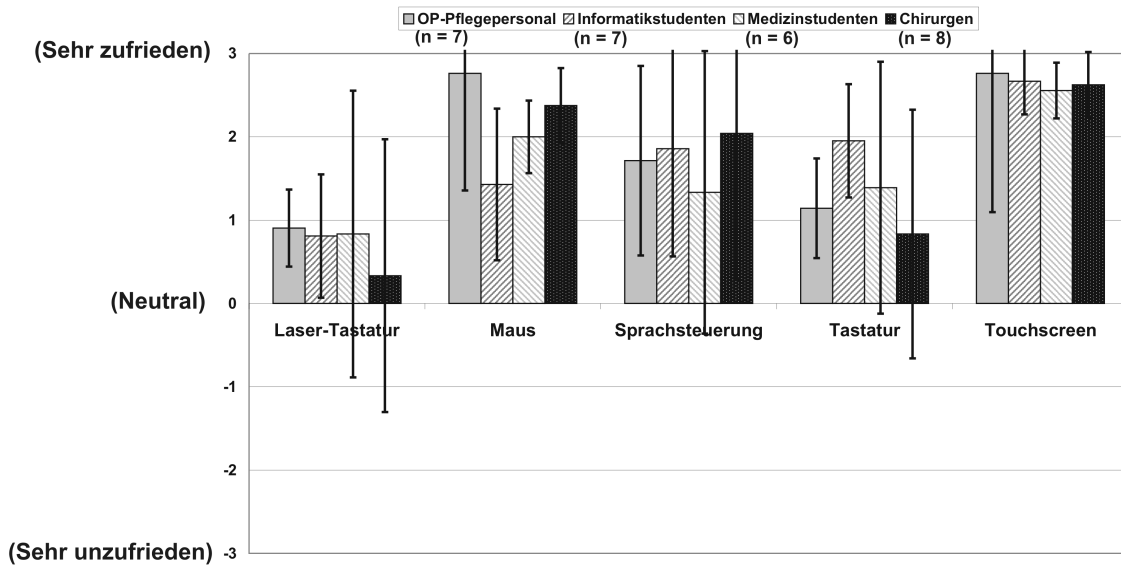


Abbildung 4.27: Bewertung der Zufriedenheit der Probandengruppen mit der Bedienung der Eingabegeräte bei Aufgabe 1 auf dem ASQ. Mittelwerte,  $n = 28$ .

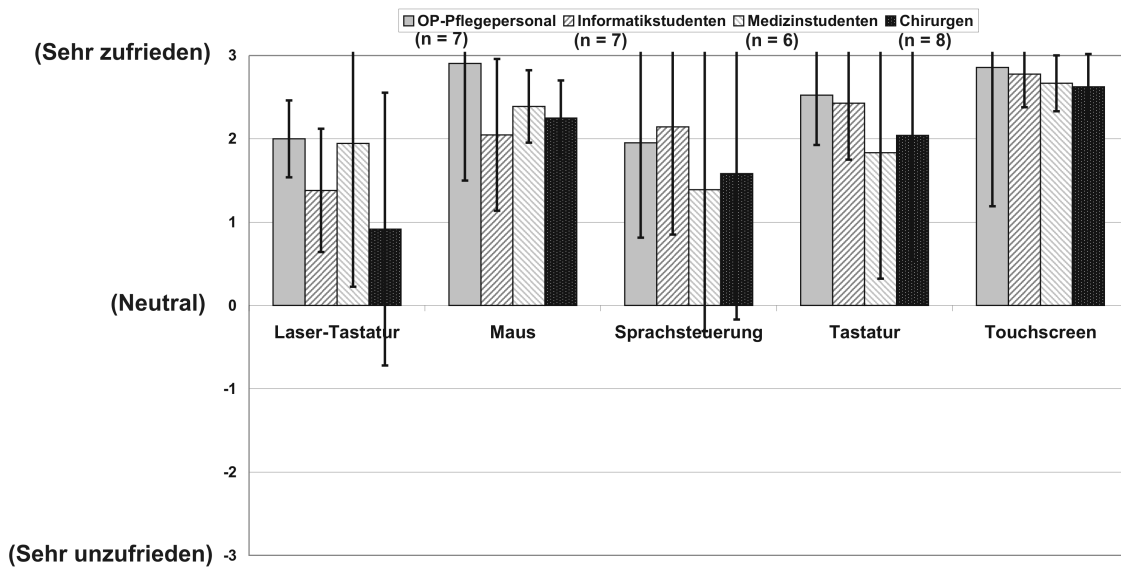


Abbildung 4.28: Bewertung der Zufriedenheit der Probandengruppen mit der Bedienung der Eingabegeräte bei Aufgabe 2 auf dem ASQ. Mittelwerte,  $n = 28$ .

Um die absolute Positionierung der Eingabegeräte auf einer Zufriedenheitsskala zu ermitteln, ordneten die Teilnehmer von Experiment I jedem Gerät genau einen unterschiedlichen Rang zu (Rang 1 > ... > Rang 5), so dass aus der Summe bei dieser Punktvergabe ein Ranking ersichtlich wird. Für das Darstellen der Abstände zwischen den einzelnen Rängen wird zusätzlich der prozentuale Anteil an einer möglichen Bestpunktzahl dargestellt - so wurde mit 69% der maximal erreichbaren Punkte der Touchscreen auf Rang 1 gewählt (Tab. 4.11).

Rang	Gerät	% der Bestpunktzahl
1	Touchscreen	69%
2	Maus	46%
3	Sprachsteuerung	39%
4	Tastatur	30%
5	Laser-Tastatur	11%

Tabelle 4.11: Ranking der Eingabegeräte durch die Probanden von Experiment I. Neben dem Rang der einzelnen Geräte ist der prozentuale Anteil an der Bestpunktzahl dargestellt, um die Abstände zwischen den Rängen zu verdeutlichen. n = 21.

Bezüglich der Teilnehmer von Experiment II ist das Ranking in Tabelle 4.12 illustriert.

Rang	Gerät	% der Bestpunktzahl
1	Touchscreen	57%
2	Maus	54%
3	Tastatur	49%
4	Laser-Tastatur	40%
5	Sprachsteuerung	31%

Tabelle 4.12: Ranking der Eingabegeräte durch die Probanden von Experiment II. Neben dem Rang der einzelnen Geräte ist der prozentuale Anteil an der Bestpunktzahl dargestellt, um die Abstände zwischen den Rängen zu verdeutlichen. n = 7.

Eine Zusammenfassung der aus den Fragebögen und Videoaufzeichnungen resultierenden qualitativen Teilnehmeraussagen ist in Tabelle 4.13 aufgegliedert. Dort sind die jeweils meistgenannten positiven und negativen Äußerungen pro Eingabegerät aufgelistet.

Gerät	Pro (%)	Contra (%)
Touchscr.	Leichte, intuit. Bedienung (57%) Schnell (29%) Platzsparend (29%)	Schlechte Sichtbarkeit (43%) Verlassen des Situs (24%)
Maus	Gewohnte Bedienung (62%) Schnell (29%)	Schwere Mausführung (38%) Verlassen des Situs (24%)
Sprachst.	Hände sind frei (57%) Leichte Bedienung (33%) Bleibe am Situs (29%)	Langsam (57%) Schlechte Funktionserk. (24%)
Tastatur	Gewohnte Bedienung (62%) Schnell (19%)	Hotkeys schwer zu lernen (43%) Verlassen des Situs (29%) Platzverbrauch (14%)
Laser-Tast.	Schnell (19%) Platzsparend (9%)	Schlechte Sichtbarkeit (48%) Schlechte Funktionserk. (29%) Hotkeys schwer zu lernen (24%)

Tabelle 4.13: Zusammenfassung qualitativer Aussagen der Probanden zu den 5 Eingabegeräten. n = 28.

Die Probanden äußerten sich sowohl vor Testbeginn als auch nach der Testdurchführung zur Eignung der präsentierten Computer-Eingabegeräte. Tabelle 4.14 zeigt, inwiefern die Gerätebewertungen nach dem tatsächlichen Bedienen von den vorab durchgeführten Bewertungen prozentual abweichen.

Gruppe	Touchscreen	Maus	Sprachsteuerung	Tastatur	Laser-Tastatur
Chirurgen	↗ 8%	↔ 0%	↘ -15%	↘ -10%	↘ -35%
Med.stud.	↗ 7%	↗ 23%	↗ 3%	↔ 0%	↗ 17%
Inf.stud.	↗ 9%	↗ 5%	↗ 17%	↗ 14%	↘ -34%
OP-Pflege	↘ -9%	↗ 9%	↘ -26%	↘ -6%	↗ 12%

Tabelle 4.14: Vergleichende Bewertung der Eingabegeräte vor und nach der Testdurchführung. Ein Gerät kann im Nachhinein als besser (↗), schlechter (↘) oder für gleich gut (↔) bewertet werden, wobei Abweichungen prozentual angegeben sind. n = 28.

### 4.4.3 Diskussion

Diese Evaluation untersuchte die MMI anhand des Nutzungskontexts einer intraoperativen Computerbedienung zur Betrachtung digitaler Patientenbilder und ging dabei zwei Fragestellungen nach. Die erste soll Aufschluss darüber geben, welches Eingabegerät sich unter Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit am besten für eine Interaktion eignet. Im Rahmen der zweiten Fragestellung gilt es zu klären, ob die intraoperative MMI im vorliegenden Kontext schneller verläuft, wenn der Chirurg

den Computer direkt oder über eine angewiesene OP-Pflege indirekt bedient - dazu wurde die Evaluation in zwei Experimente aufgeteilt.

Teilnehmer des ersten Experiments wurden aus insgesamt drei Gruppen gewählt. Studenten der Informatik sind in der Regel im Umgang mit Computern geübt, Medizinstudenten stellen die zukünftige Generation von Ärzten dar und Chirurgen sind die heutigen Anwender bei einer intraoperativen Computer-Interaktion. Am Experiment II nahm ausschließlich OP-Pflegepersonal teil, da Personen dieser Berufsgruppe für die Assistenz des Chirurgen während einer Operation ausgebildet sind.

Die typische Usability-Evaluation wird laut Dumas mit 6-12 Probanden durchgeführt, wobei bereits 5 Nutzer ca. 80% aller Usability-Probleme eines Geräts im Versuch aufdecken können [DR99, Nie94, Vir92]. Faulkner wies jedoch im Experiment nach, dass, abhängig von der Zusammenstellung solcher Fünfergruppen, der Grad der Problemidentifikation zwischen 55% und 99% schwanken kann und betont die Dringlichkeit, eine möglichst repräsentative Stichprobe von Teilnehmern verschiedener Gruppen zu wählen, die sich hinsichtlich ihrer Fähigkeiten und Erfahrungsstände unterscheiden [Fau03]. Aus diesen Gründen wurden neben den repräsentativen Gruppen der Chirurgen und OP-Pflege auch Informatik- und Medizinstudenten in die Evaluation eingebunden, um anhand dessen zu untersuchen, inwiefern Erfahrungsvariationen eine intraoperative MMI beeinflussen.

Die selbst einzuschätzenden Erfahrungswerte mit dem Computer sind bei allen Gruppen mittelmäßig bis hoch (Tab. 4.10). Wie zu erwarten, bewerten sich Informatikstudenten als sehr geübt im Umgang mit dem PC. Im alltäglichen Bürobetrieb bilden vor allem Maus und Tastatur den Eingabestandard, so dass alle Teilnehmer einen sehr hohen Erfahrungsstand mit diesen Geräten aufweisen, während Touchscreen, Sprachsteuerung und besonders die Laser-Tastatur eher in sehr eingeschränkten Anwendungsgebieten zu finden sind. Man könnte aufgrund der größeren Erfahrung mit den beiden erst genannten Eingabegeräten auf eine vergleichsweise effizientere Aufgabenbewältigung schließen, doch gibt es keine signifikanten Korrelationen zwischen Zeitaufwand und Fehlerhäufigkeit zu dem Erfahrungsstand.

Insgesamt betrachtet lassen sich die präsentierten Aufgaben am schnellsten mit Touchscreen, Tastatur und Maus bewältigen - die Laser-Tastatur belegt hier nur den 4. Platz, obwohl das Bedienkonzept gleich dem eines herkömmlichen Keyboards ist, die Interaktion jedoch wesentlich komplizierter für den Nutzer ausfällt (Abb. 4.16). Dies liegt unter anderem daran, dass man eine Taste sehr genau mit dem Finger möglichst von oben treffen muss, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Deutlich

am langsamsten geschieht eine Interaktion mittels der Sprachsteuerung. Davon war auszugehen, da einer einzelnen Funktionsausführung am PC das verbale Formulieren des Kommandos (1-2s) sowie dessen Erkennung (ca. 1s) vorangeht.

Teilnehmer von Experiment I absolvieren die Aufgaben schneller als das assistierende OP-Pflegepersonal. Dies kann prinzipiell auf zwei unterschiedliche Arten interpretiert werden.

Zum einen könnte man vermuten, dass das Pflegepersonal, im Vergleich zu allen anderen Testgruppen, generell langsamer am Computer arbeitet. Dies scheint wenig realistisch, da bei den Probanden des ersten Versuchs keine Gruppe für sich immer die beste oder schlechteste Leistung erzielt. Die Unterschiede zwischen Chirurgen, Medizin-, und Informatikstudenten sind sehr gering, wobei Informatiker, mit Ausnahme der Maus bei allen anderen Bediengeräten am längsten für das Beenden der Aufgaben brauchen. Dies verhält sich entgegengesetzt der Annahme, dass im vorliegenden Anwendungsfall ein hoher Erfahrungsstand mit dem Computer zu besserer Leistung führt.

Die andere Interpretationsmöglichkeit wäre, eine stetige Zeitdifferenz auf die zusätzlich benötigte Zeit, die verstreicht, zurückzuführen, bis eine mündliche Anweisung durch den Operateur erfolgt ist. Die zweite Vermutung ist naheliegender, da pro Aufgabe vor jedem einzelnen ausgeführten Kommando bis zu 2 Sekunden vergehen, bis dem OP-Pflegepersonal gesagt wurde, was zu tun ist. Hinzukommt, dass das die Mehrheit der Teilnehmer aus Experiment II von der in Kapitel 2.1 beschriebenen Dialogform der Disputatio - dem sinngemäßen Wiederholen des Gehörten - Gebrauch gemacht und unmittelbar nach Empfang einer Aufgabenanweisung jene wiederholt haben. Auf diese Weise können Bedienfehler bei einer mündlichen Anweisung besser vermieden, identifiziert und korrigiert werden.

Für das Beenden der Aufgabe 1 müssen 7 verschiedene Viewer-Funktionen vom Nutzer betätigt werden - bei Aufgabe 2 sind es mindestens 4 verschiedene, so dass sich beide Aufgaben vor allem hinsichtlich ihres zeitlichen Aufwands voneinander unterscheiden. Betrachtet man die Zeitmessungen separat, so wird ersichtlich, dass Aufgabe 2 am schnellsten mit der Tastatur gelöst wurde. Dies liegt daran, dass die dazu benötigten vier Verschiebungs-Funktionen (hoch, runter, links, rechts) auf der Tastatur schnell ausführbar sind, da die entsprechenden Hotkeys intuitiv und nah beieinander angeordnet sind (Pfeiltasten). Im Fall von Aufgabe 1 müssen auch Funktionen betätigt werden, die zwangsläufig mit Tasten auf dem restlichen Tastenfeld (etwa Buchstaben) verbunden sind, so dass häufigeres Nachlesen in der Hilfedokumentation nötig ist, um die Hotkeys mit den damit verbundenen Funktionen zu



assoziiieren<sup>8</sup>.

Des Weiteren wird aus der getrennten Aufgabenbetrachtung ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen Experiment I und II hinsichtlich der Dauer einer Computerbedienung mit abnehmender Zahl an benötigten Interaktionsschritten immer geringer werden (Abb. 4.17, 4.18).

Auf die oben genannte zweite Fragestellung hin, ob eine direkte Bedienung des Computers (Experiment I) schneller vonstattengeht als indirekt über einen Assistenten (Experiment II), lässt sich keine allgemeingültige Antwort geben. Signifikante Unterschiede zwischen den repräsentativen Nutzergruppen der Chirurgen und des Pflegepersonals gibt es nur bei Maus und Sprachsteuerung, ansonsten weichen die Bedienzeiten beider Gruppen lediglich marginal voneinander ab.

Der benötigte Zeitaufwand in diesem Nutzungskontext wird viel mehr durch das verwendete Eingabegerät bestimmt - so dauert die Durchführung der Aufgabe 1 durch den Chirurgen durchschnittlich 30s mit einer Sprachsteuerung. Die OP-Pflege absolviert diese Aufgabe mit durchschnittlich 20s unter Verwendung eines Touchscreen deutlich schneller, auch wenn eine vorherige mündliche Instruktion nötig ist. Des Weiteren muss, wenn zu entscheiden ist, ob eine intraoperative MMI direkt oder indirekt realisiert werden soll, die Komplexität der Computer-Bedienung (Anzahl der Interaktionsschritte) berücksichtigt werden. Mit zunehmender Interaktionskomplexität bietet sich prinzipiell eine Steuerung des bilddarstellenden Computers durch den Operateur an - weniger Einfluss auf den Zeitaufwand hat diese Wahl bei kurzen Bedienoperationen.

Bei einer Fehleranalyse zeigt sich generell auf Grund der hohen Standardabweichung, dass die Häufigkeit von Fehlern individuell sehr stark von den einzelnen Versuchsteilnehmern abhängt und keiner bestimmten Teilnehmergruppe ein durchweg hohe oder niedriger Fehlerrate zugewiesen werden kann (Abb. 4.19). Als am zuverlässigsten und robustesten haben sich Maus und Tastatur erwiesen. Im Fall der Laser-Tastatur und der Sprachsteuerung hingegen kam es zu Durchläufen, in denen mehr als zehn mal nacheinander Fehler produziert wurden, wogegen in anderen Durchläufen kein einziger Fehler auftrat.

Im Vergleich zu Aufgabe 1 kommt es in der zweiten Aufgabe zu wesentlich weniger Fehlern - bei Verwendung der Maus und Tastatur zum Beispiel wird nicht ein einziger produziert (s. Abb. 4.20, 4.21). Dies hängt mit der bereits erwähnten geringeren

---

<sup>8</sup>Die Pfeiltaste ( $\rightarrow$ ), als das Verschieben des Bildausschnitts nach rechts, ist wesentlich einfacher zu verstehen als wenn der entsprechende Hotkey auf der Taste (Q) liegen würde.

Anzahl an Interaktionsschritten zur Erfüllung der Aufgabe 2 zusammen.

Bei genauerer Aufschlüsselung in User- und Maschinenfehler wird ersichtlich, dass der Computer die Funktionen des Nutzers am häufigsten nicht erkannt (M1) bzw. falsch interpretiert hat (M2) (Abb. 4.20, 4.21). Gerade die Sprachsteuerung generierte viele solcher M1-Fehler, da Probanden bei ausbleibender Reaktion auf ein gesprochenes Kommando in der Regel lauter wurden oder dieses überdeutlich betont wiederholten, wodurch sich die Erkennungsleistung der Software stark verschlechtert. Am häufigsten kam es zu Fehlern des Typen M2, wenn die Laser-Tastatur den Druckpunkt des Fingers nicht korrekt detektierte, was vor allem geschieht, wenn das Infrarotfeld nicht zielgenau von oben durchbrochen wird.

User-Fehler auf sensomotorischer Ebene in Form falsch ausgeführter Aktionen (U1) bilden die zweithäufigste Fehlerquelle und können hauptsächlich durch Übung vermieden werden. Vor allem, wenn das Eingabegerät kein angemessenes Feedback auf eine Nutzeraktion lieferte, verhielten sich Teilnehmer zögerlich (U2).

Die bisher beschriebenen Fehlerarten entsprechen den bereits definierten leichten Fehlern, welche für die Nutzer einen höheren Aufwand bedeuten. Schwere Fehler sind solche, die eine Zielerreichung verhindern. Diese traten in den Versuchen nur selten auf, zum Beispiel wenn das System nicht mehr reagierte (M3) oder der Teilnehmer für den weiteren Verlauf des Experiments Hilfe benötigte (U3). Unabhängig davon, ob leicht oder schwer, Fehler haben immer Auswirkungen auf die Zufriedenheit des Nutzers.

Durch einen Vergleich der Zeitmessung bei den einzelnen Durchläufen kann ein möglicher Lern- und Verbesserungseffekt untersucht werden (Abb. 4.24, 4.25). Eine steile Lernkurve wie bei der (Laser-)Tastatur lässt sich so interpretieren, dass der Nutzer nach nur wenigen Durchläufen ein Leistungsmaximum erreichen kann. Allerdings ist dies auch ein Indiz dafür, dass solche Bedienkonzepte bei erstmaliger Nutzung nicht direkt effizient in einer Programmsteuerung umgesetzt werden können. Eine flache Lernkurve hingegen zeigt, dass zeitliche Verbesserungen begrenzter möglich sind, dafür aber eine vergleichsweise bessere Initialleistung gegeben ist. Die Sprachsteuerung weist in den Experimenten I und II die geringste Lernrate auf - Sprache ist die wesentlichste aller menschlichen Kommunikationstechniken und somit schnell an eine PC-Bedienung adaptierbar (vgl. Kap. 2.1) [Dah06]. Bei allen anderen Eingabegeräten wird dem Teilnehmer eine Hand-Augen-Koordinationsleistung abverlangt. Im Fall der (Laser-)Tastatur kommt noch das Memorieren der Hotkeys für die zugehörigen Viewer-Funktionen dazu, was die Hauptschwierigkeit darstellt und ein häufiges Einsehen in die Hilfedokumentation nötig macht. Der Touchscreen

ist für den Menschen prinzipiell intuitiver zu bedienen, da ein Knopf auf der grafischen Oberfläche direkt mit dem Finger betätigt werden kann. Bei der Maus hingegen liegt eine Trennung der Bildschirm- und Mausebene vor, wodurch die Hand-Augen-Koordination erschwert wird (siehe Kapitel 2.5).

Oft entscheidet man über die Eignung eines Geräts nach nur kurzer Zeit der Bedienung. Diesbezüglich äußerte sich ein Chirurg während der Evaluation und nach Beginn der Einweisung in eines der Eingabegeräte mit:

„Das Gerät taugt nichts, das merke ich sofort.“

Ein weiterer Arzt sagte:

„Wenn ein Gerät nicht auf Anhieb zu bedienen ist, dann fliegt es sofort aus dem OP.“

Pomerantz et al. äußern ihre Erfahrungen mit Chirurgen diesbezüglich als [PSP<sup>+</sup>96, S. 129]:

„It is our experience that surgeons in general have less tolerance than other physicians for any factor that might slow or disrupt their work.“

Lemke et al. sprechen davon, dass sich Chirurgen „plug-and-play“ wünschen, also Geräte unmittelbar nach dem Anschließen betreiben wollen, ohne Installations- oder Einweisungsroutinen durchlaufen zu müssen [LTK<sup>+</sup>04, S. 1]. Diese Aussagen sprechen gegen Computer-Eingabegeräte, die erst durch wiederholtes Training effektiv und effizient handhabbar sind wie die (Laser-)Tastatur, bei der die Tastenkürzel auswendig gelernt werden müssen.

Die Zufriedenheit der Nutzer mit den 5 Eingabegeräten dieses Versuchs hängt stark von der individuell erlebten Leistung, besonders aber von der Anzahl an Fehlern ab. Die zugehörigen Mittelwerte des PSSUQ unter den vier Teilnehmergruppen sind größtenteils ähnlich - insgesamt werden der Touchscreen, gefolgt von der Maus, am besten bewertet, Sprachsteuerung und Laser-Tastatur dagegen am schlechtesten (Abb. 4.26). Unterschiede zwischen den Experimenten I und II gibt es an dieser Stelle nur bei der Bewertung der Sprachsteuerung - im zweiten Experiment fällt diese niedriger aus. Differenziert man die Zufriedenheitsbewertung zwischen den zwei Aufgaben anhand des ASQ, so werden Tastatur und Laser-Tastatur in Aufgabe 2 deutlich besser bewertet (Abb. 4.27, 4.28). Für kurze, einfach durchführbare Interaktionen mit dem Computer eignen sich diese Geräte besser als für komplexe Bedienvorgänge.

Da die Zufriedenheitsbewertung nicht zwangsläufig zur Bildung einer Reihenfolge führen muss, sondern einige Eingabegeräte für gleich gut bewertet wurden, arrangierten die Probanden diesbezüglich alle Geräte anhand eines Rankings eindeutig. Dort zeigt sich, dass Teilnehmer des Experiments I, im Vergleich zur OP-Pflege, den Touchscreen mit deutlicherem Abstand vor der Maus und somit auf den ersten Platz gewählt haben. Mit dem dritten Platz befinden Chirurgen und Studenten die Sprachsteuerung für diesen Anwendungskontext geeigneter als die (Laser-)Tastatur, wobei in Experiment II die Sprachsteuerung am schlechtesten bewertet wird (Tab. 4.11, 4.12).

Jedes Eingabegerät für sich stellt keine Ideallösung zur intraoperativen Computersteuerung dar und ist mit Vor- und Nachteilen verbunden (Tab. 4.13). Aus Sicht der Probanden spricht für den Touchscreen, dass er intuitiv bedienbar ist und wenig Platz benötigt. Nachteilig ist jedoch, dass bei sterilem Zugriff eine übergespannte Folie zu Reflexionen und Sichtbehinderungen führen kann. Maus und Tastatur sind den meisten Menschen, die mit einem PC bereits gearbeitet haben, vertraut, doch war das Memorieren von Hotkeys bzw. das Bewegen der verwendeten Maus für viele Probanden schwierig. Die Laser-Tastatur bietet im Vergleich zur herkömmlichen Tastatur den Vorteil, dass sie auf eine beliebige Oberfläche projiziert werden kann, doch stellt die schlechte Sichtbarkeit mit zunehmender Helligkeit einen erheblichen Nachteil dar. Hauptvorteil einer Sprachsteuerung ist, dass die Hände bei einer Mensch-Computer-Interaktion für operative Tätigkeiten frei bleiben und der Chirurg am Situs verweilen kann, während alle anderen Eingabegeräte ein Abwenden zur Workstation nötig machen. Die Mehrheit der Versuchsteilnehmer bewerteten eine Interaktion mittels Sprachsteuerung als zu langsam, wobei im Fall von Experiment II das Headset zum Erfassen der Sprachkommandos nicht an der OP-Pflege, sondern direkt am Operateur befestigt werden könnte und so der Umweg vom Chirurgen über den Assistenten zur Erkennungs-Software um einen Schritt reduziert würde.

Erst nachdem ein Gerät oder eine Software im tatsächlichen Nutzungskontext untersucht bzw. bedient wurde, kann man sich als Nutzer ein genaueres Bild von dessen Gebrauchstauglichkeit machen. Im Vergleich zur Erwartungshaltung des Nutzers hinsichtlich der Eignung des Geräts kommt es beim tatsächlichen Gebrauch oft zu erheblichen Unterschieden, so dass die Erwartungen entweder übertroffen oder enttäuscht werden können.

Bei Betrachtung der vorliegenden Erwartungshaltung von Chirurgen im Zusammenhang einer intraoperativen MMI zeigt sich, dass v.a. Sprachsteuerung und Laser-

Tastatur vorab für wesentlich geeigneter befunden wurden (Tab. 4.14). Während die Nachher-Bewertung der Sprachsteuerung vom OP-Pflegepersonal ebenfalls negativer ausfällt, hält diese Probandengruppe von Experiment II die Laser-Tastatur im Nachhinein für besser geeignet.

Diese Art der Abweichung wird bei der Konzeption neuer Produkte häufig nicht berücksichtigt, so dass die im Rahmen einer Kontextanalyse erhobenen Anforderungen repräsentativer Benutzer zu wörtlich genommen werden und schnell einer überladenen Wunschliste an Features und Funktionen gleichen.

### **Bewertung der Gebrauchstauglichkeit:**

Wie eingehend erwähnt, erfolgt eine absolute Bewertung der getesteten Eingabegeräte auf Grund von Messungen der Effektivität, der Effizienz und der Zufriedenheit. Eine Effektivität von 100% ist gegeben, wenn die gestellten Aufgaben mit allen Geräten bewältigt werden können, was mit Touchscreen, Tastatur und Maus der Fall ist.

Beide Experimente betrachtend kam es bei Laser-Tastatur und Sprachsteuerung zu Situationen, in denen ein Abschluss der Aufgaben nur durch Hilfe des Versuchsleiters (U3-Fehler) gewährleistet werden konnte bzw. in denen die Laser-Tastatur nicht mehr reagierte (M3-Fehler). Solche U3- und M3-Fehler können als direktes Maß der Effektivität genutzt werden. Auf die Teilnehmerzahl umgerechnet ist bei 6% der Probanden ein selbstständiges Vollenden des Versuchs mittels Sprachsteuerung nicht möglich - bei der Laser-Tastatur in 1,8% der Fälle.

Neben der Klärung der Frage, ob ein Ziel generell erreichbar ist, beschreibt die Effizienz den Aufwand, mit dem es z.B. unter Zeit- und Fehlerberücksichtigung erreicht wird. In beiden Versuchen kann mittels Touchscreen signifikant am schnellsten gearbeitet werden (t-Test,  $p < 0,01$ ), gefolgt von der Maus. Die wenigsten Fehler, die eine Vollendung der Aufgaben nicht beeinträchtigten, produzierten Maus, Tastatur und Touchscreen.

Am zufriedensten waren Teilnehmer dieser Studie mit Touchscreen und Maus.

Eine abschließende Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit in diesem Nutzungskontext kann durch Verwendung der „Multi-Attribute Utility Theory“ (MAUT) erfolgen [WE86]. Bei diesem Verfahren werden die einzelnen Messungen der Attribute  $a$  ( $eval_a(a)$ ) aus einer Attributmenge  $A$  hinsichtlich ihrer Relevanz für eine Gesamtbewertung des Produkts  $eval(P)$  spezifisch gewichtet  $g_a$  und miteinander addiert:

$$eval(P) = \sum_{a \in A} g_a \cdot eval_a(a)$$

Für die Gewichtung gilt  $\sum_{a \in A} g_a = 1$ .

Abgesehen von der Erlernbarkeit, die an dieser Stelle nicht in die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit einfließen soll, wurden als Attribute die Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit evaluiert - da alle drei Größen für eine MMI von hoher Relevanz sind, werden sie im Folgenden gleich gewichtet. Weniger relevant ist, wie schnell oder fehlerfrei ein bestimmtes Eingabegerät einen Nutzer bei der Bedienung der Visualisierungs-Software unterstützt, sondern eher, wie gut oder schlecht sich diese Geräte im direkten Vergleich miteinander für den vorliegenden Nutzungskontext eignen.

Um ein einheitliches vergleichbares Maß für jedes Attribut zu erhalten, werden allen Eingabegeräten Punkte zugeordnet, abhängig von der jeweiligen Position im Vergleich zu den anderen Geräten. Das ineffektivste Gerät erhalte so die wenigsten Punkte, während das nächst bessere einen Punkt mehr bekommen würde, wobei im Fall des Gleichstands der gleiche Punktwert vergeben wird. Die Effizienz setzt sich ihrerseits aus dem Mittelwert des Zeitbedarfs (t) und der Fehleranzahl (e) zusammen. In Tabelle 4.15 ist für beide Experimente getrennt die Gesamtbewertung der untersuchten Eingabegeräte nach der MAUT dargestellt:

Attribut	Touchscreen	Maus	Tastatur	Laser-Tast.	Sprachst.
Exp. 1					
Effektivität	3	3	3	1	2
Effizienz (t/e)	4 (5/3)	4 (3/5)	4 (4/4)	1,5 (2/1)	1,5 (1/2)
Zufriedenheit	5	4	2	1	3
Summe ( $eval(P)$ )	12	11	9	3,5	6,5
Exp. 2					
Effektivität	2	2	2	2	1
Effizienz (t/e)	4,5 (5/4)	4,5 (4/5)	3 (3/3)	2 (2/2)	1 (1/1)
Zufriedenheit	5	4	3	2	1
Summe ( $eval(P)$ )	11,5	10,5	8	6	3

Tabelle 4.15: Bewertung der Gebrauchstauglichkeit nach der MAUT. Allen Eingabegeräten werden für jedes Attribut Punkte zugeordnet, abhängig von der jeweiligen Position im Vergleich zu den anderen Geräten. Teilen sich zwei oder mehr Geräte eine Position in der Reihenfolge, so werden gleich viele Punkte vergeben, wobei sich die Effizienz aus dem Mittelwert der Zeit- und Fehlermessung zusammensetzt.

Aus den Ergebnissen dieser Berechnung folgend ist der Touchscreen für eine intraoperative Computerbedienung zwecks Patientenbildbetrachtung sowohl für das OP-Pflegepersonal als auch für Chirurgen am besten geeignet - gefolgt von der Maus. Eine spezifischere Gewichtung der Attribute würde die Abstände zwischen den ersten drei Plätzen verändern - so könnte man z.B. den Zeitbedarf als wesent-

lich relevanter erachten, da die Anzahl der Fehler direkt mit der Aufgabendauer und der Nutzerzufriedenheit korreliert. In diesem Fall würde sich der Touchscreen noch stärker anbieten.

An dieser Stelle zeigt sich, warum die Gebrauchstauglichkeit eines Produkts nur für einen gewissen Anwendungskontext definierbar ist. Im Fall der intraoperativen Bildbetrachtung sollte eine MMI möglichst schnell vonstattengehen, wobei Fehler bei einer Bedienung keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Sicherheit von Patient und Personal haben. Würden die untersuchten 5 Eingabegeräte jedoch zur Steuerung eines sicherheitskritischen Systems verwendet werden, so hätte die Vermeidung von Fehlern oberste Priorität. Ein Beispiel dafür wäre die Steuerung eines da Vinci Systems<sup>9</sup> - eine robotisch unterstützte Technik zur Durchführung chirurgischer minimal-invasiver Eingriffe, bei der der operierende Arzt von einem entfernt liegenden Computerarbeitsplatz aus den Roboter steuert. So könnten etwa fehlerhafte Bewegungskommandos des Roboterarms, der unterschiedliche chirurgische Instrumente führt, schwerwiegende Gefährdungen des Patienten zur Folge haben.

Wenn auch der Wechsel im Nutzungskontext von einer intraoperativen Bildbetrachtung zur Steuerung eines chirurgischen Robotersystems etwas weit gefasst ist, so haben bereits kleine Änderungen im chirurgischen Workflow Einfluss auf die Generalisierbarkeit von Aussagen über die Gebrauchstauglichkeit eines Produkts. Im Fall eines offenen Eingriffs am Patienten beispielsweise, muss bedacht werden, dass der Chirurg im Verlauf einer Operation seine Handschuhe mit Blut und anderen Substanzen verunreinigen kann - dies geschieht seltener im Rahmen einer minimal-invasiven Operation. Da ein Touchscreen Informationen gleichzeitig ein- und ausgibt, würden auf den Bildschirm übertragene Verunreinigungen bei einer Bedienung zu eventuellen Einschränkungen der Sichtbarkeit solcher Geräte führen, ähnlich ist es bei der (Laser-)Tastatur.

Zusammengefasst lassen sich die anfangs gestellten Fragen so beantworten, dass unter der gegebenen Auswahl an Computer-Eingabegeräten der Touchscreen das gebrauchstauglichste Gerät für den vorliegenden Nutzungskontext darstellt - mit ihm kann insgesamt am effektivsten, effizientesten und zufriedenstellendsten gearbeitet werden. Theoretisch wäre eine MMI im OP schneller durchführbar, wenn der Chirurg den Computer direkt bedient, anstatt einen Assistenten anzuweisen. In der Evaluation hat sich jedoch gezeigt, dass die Unterschiede zum Teil nur marginal sind und besonders die Wahl des verwendeten Eingabegeräts von Relevanz für die

---

<sup>9</sup><http://www.davincisurgery.com/davinci-surgery/davinci-surgical-system/>

Bediendauer ist.



# 5 Optimierung der intraoperativen MMI

Im Verlauf von Kapitel 4 hat sich herausgestellt, dass eine intraoperative MMI zur Betrachtung und Manipulation von Patientenbildern am Computer am besten mit einem Touchscreen durchführbar ist, unabhängig davon, ob die Bedienung über den Chirurgen oder durch die OP-Pflege geschieht. Eine mit dem PACS verbundene Visualisierungs-Software muss jedoch etwaige Limitationen berücksichtigen sowie die Stärken ausbauen, welche mit der Nutzung solcher Eingabegeräte einhergehen (vgl. Kap. 2.5.1). Der Großteil verfügbarer Viewer-Anwendungen, die oft sowohl prä- als auch intraoperativ benutzt werden, ist für eine Bedienung durch Maus und Tastatur ausgelegt - das Steuern mittels Touchscreen könnte unter Umständen nicht möglich sein, wenn der Nutzer etwa aufgefordert werden würde, Buchstaben oder Zahlen einzugeben.

Resultierend aus der in Kapitel 4.3 beschriebenen Chirurgenbefragung zeigte sich, dass obwohl moderne Viewer eine stetig wachsende Zahl an Funktionen und Features bereitstellen und damit immer komplexer zu bedienen sind, im Endeffekt nur ein kleiner Teil davon während der laufenden Operation verwendet wird.

In diesem letzten Schritt der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Bedienkonzepte vorgestellt, die für eine intraoperative MMI mittels Touchscreen optimiert wurden. Diese Optimierungen umschließen sowohl das Design der graphischen Oberfläche, die Anordnung und die Positionierung der benötigten Geräte im OP als auch den Umfang und die Umsetzung der angebotenen Funktionalität. Hauptunterschied der Konzepte ist der Bedienansatz, so sind einige schneller, andere platzsparender einsetzbar.

Ziel ist es nicht, vollwertige Applikationen für eine direkte Portierung in den OP vorzustellen, sondern die Bedienansätze hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit in einer abschließenden Evaluation zu untersuchen.

## 5.1 Software-ergonomische Gestaltung

Bei einer Optimierung der intraoperativen MMI im vorgestellten Nutzungskontext müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden, die Einfluss auf eine Interaktion mit dem Computer haben. Die Software-Ergonomie, als spezielles Anwendungsgebiet der Ergonomie, beschäftigt sich mit der Gebrauchstauglichkeit von Software-Produkten. Es ist ein sehr weitläufiges Feld, wobei eine Vielzahl an Gestaltungsprinzipien existiert, die kontextabhängig verwendet werden können - Rudlof spricht von über 400 verschiedenen [Rud06]. Ferner beschreibt Rudlof, dass etwa 75% aller Software-Mängel während der Entwicklung entstehen, wovon ca. 80% bis zur Nutzung unerkannt bleiben.

Im Folgenden werden die wesentlichen Gestaltungsprinzipien aufgegriffen, die für das Arbeiten mit dem Touchscreen im OP zur Darstellung und Manipulation von Patientenbildern relevant sind.

### 5.1.1 Anthropometrische Gestaltung

Im OP richten sich die Anordnung und die Konfiguration der Ein- und Ausgabegeräte hauptsächlich nach den bereits vorgestellten Arbeitsverhältnissen - dabei werden ergonomische Empfehlungen kaum berücksichtigt. Zwar werden je nach medizinischer Disziplin, z.B. in der Neurochirurgie, Operationen auch sitzend durchgeführt, doch finden chirurgische Eingriffe insgesamt meist im Stehen statt.

Für eine stehende Gerätebedienung, in diesem Fall von einem Touchscreen, geben u.a. die ISO 9241-5 und VDI/VDE 3850-3 Informationen für eine anthropometrisch optimale Dimensionierung des Arbeitsplatzes (Abb. 5.1)[DIN05, VDI04].

Die beste Sichtbarkeit des Touchscreen wird gewährleistet, wenn dieser senkrecht zum vertikalen Blickwinkel ausgerichtet wird. In der VDI/VDE 3850-3 wird bei einer Visualisierungspriorität eine Anordnung des Touchscreen auf Augenhöhe im frontalen Blickfeld ( $0^\circ$ ) empfohlen. Liegt die Priorität beim Bedienen - also der Eingabe von Informationen - so wird empfohlen, den Touchscreen im unteren Greifraum zu positionieren, um Ermüdungserscheinungen vorzubeugen, die mit dem häufigen Heben der Hand einhergehen. Im vorliegenden Nutzungskontext der intraoperativen Patientenbildbetrachtung fällt die MMI in der Regel unregelmäßig und zumeist kurz aus, so dass man eher von einer Visualisierungspriorität ausgehen kann. Nicht berücksichtigt ist jedoch, dass der Kopf des Menschen in Ruhehaltung um etwa  $15^\circ$  nach unten geneigt ist, wodurch sich eine optimale Ausrichtung des Touchscreen senkrecht zum optimalen Blickwinkel zwischen  $0^\circ$  und  $30^\circ$  ergibt.

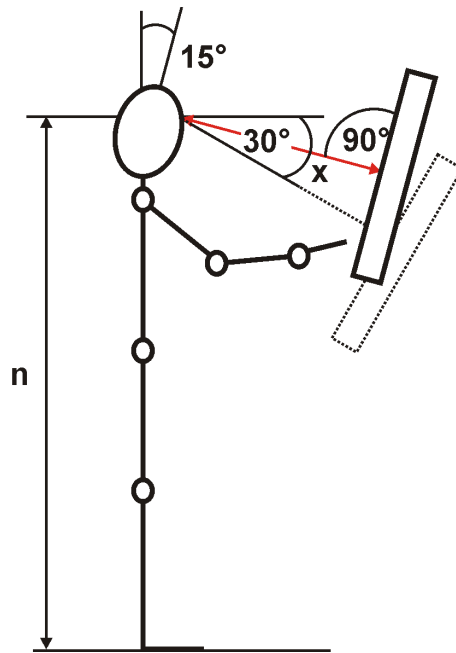


Abbildung 5.1: Anthropometrische Dimensionierung des Arbeitsplatzes bei stehender Haltung, nach ISO 9241-5 [ISO98, S. 24]. Abhängig von der Augenhöhe ( $n$ ) sollte der Touchscreen mit einem hinsichtlich der Armlänge variablen Abstand ( $x$ ) dem Nutzer gegenüber positioniert sein. Da der Kopf in Ruhehaltung etwa um  $15^\circ$  nach unten geneigt ist, ergibt sich eine optimale Ausrichtung des Touchscreen senkrecht zum optimalen Blickwinkel (rot) zwischen  $0^\circ$  und  $30^\circ$ .

Der Abstand zwischen Nutzer und Gerät richtet sich in diesem Fall nach der jeweiligen Armlänge. In der DIN 33402-2 sind die Durchschnitte verschiedener Körpermaße von in Deutschland lebenden männlichen und weiblichen Erwachsenen in Perzentilwerten zusammengefasst [DIN05]. Wie Tabelle 5.1 zu entnehmen ist, kann man als Minimalabstand das 5. Perzentil<sup>1</sup> der weiblichen Armlänge (ausgestreckt) von 62,5cm wählen. Der maximale Abstand sollte das entsprechende 95. Perzentil des Mannes von 81,5cm nicht übersteigen. Da es sich bei diesen Werten jedoch um die Länge des Arms im ausgestreckten Zustand handelt und diese Haltung für eine Bedienung schnell ermüdend ist, sollten in der Praxis 15-20% abgezogen werden. Laut Lange und Windel eignet sich das Verwenden des 50. Perzentils nicht als Mittelwert, da die Hälfte aller Nutzer ausgeschlossen wird, so dass für eine Interaktion mit dem Touchscreen ein variabler Abstand von 50cm (-20%) bis 65cm (-20%) sinnvoll ist [LW09].

<sup>1</sup>Beim 5. Perzentil liegen 5% aller Werte unter diesem Grenzwert. Beim 50. Perzentil liegen je 50% aller Werte über bzw. unter diesem Grenzwert. Beim 95. Perzentil liegen 5% aller Werte über diesem Grenzwert.

Körpermaß in cm	männlich Perzentile			weiblich Perzentile		
	5. 5%	50. 50%	95. 95%	5. 5%	50. 50%	95. 95%
Armlänge gestreckt	68,5	74,0	81,5	62,5	69,0	75,0
Augenhöhe	153,0	163,0	173,5	143,0	151,5	160,5
Zeigefingerbreite	1,7	1,8	2,0	1,4	1,6	1,8

Tabelle 5.1: Ausgewählte Körpermaße (cm) von in Deutschland wohnenden männlichen und weiblichen Erwachsenen (18-65 Jahre), nach DIN 33042-2 [DIN05]. Das 5. Perzentil (klein) bedeutet, dass 5% aller Werte unter diesem Grenzwert liegen. Beim 50. Perzentil (mittelgroß) liegen je 50% aller Werte über bzw. unter diesem Grenzwert. Beim 95. Perzentil (groß) liegen 5% aller Werte über diesem Grenzwert.

Die Höhe, in der das Gerät bei stehender Bedienung anzuordnen ist, richtet sich nach der Augenhöhe der Nutzer (Tab. 5.1). Wieder wird das 5. Perzentil der Frau und das 95. Perzentil des Mannes verwendet - folglich sollte der Touchscreen in einem Höhenbereich von 143-173cm im OP, z.B. über Deckenstative, so angebracht sein, dass er beim Betätigen nicht zurückweicht, sondern auch nach dem Druck durch den Finger in seiner Optimalposition verbleibt [VDI04].

### 5.1.2 Bedienungsgestaltung

Wie sich herausgestellt hat, ist der Funktionsumfang, der intraoperativ tatsächlich angewandt wird, limitiert (Abb. 4.11). Hauptsächlichste Verwendung finden Zoom, Rotation, Längenmessung sowie Kontrast- und Helligkeitsveränderung, wobei - wie bereits angesprochen - bei CT-Aufnahmen der Center analog zur Helligkeit und die Weite analog zum Kontrast eines Bildes zur Vereinfachung behandelt werden (vgl. Kap. 4.3.3). Zusätzlich wurden eine Bildwechsel- und Zurücksetzen-Funktion implementiert. Letzere trägt zur Selbstsicherheit und zur Explorationsfreudigkeit des Nutzers bei, da die Patientenbilder jederzeit in ihren ursprünglichen Zustand zurückversetzt werden können.

Alle Bedienkonzepte bieten den gleichen, auf diesen Kontext reduzierten Funktionsumfang an (Funktion <Parameter>):

- Zoom <+>, <->  
Vergrößert bzw. verkleinert den Bildausschnitt um einen festen Faktor x.
- Center <+>, <->  
Erhöht bzw. verringert die Helligkeit um einen festen Faktor x.

- Weite  $\langle + \rangle$ ,  $\langle - \rangle$   
Erhöht bzw. verringert den Kontrast um einen festen Faktor  $x$ .
- Rotieren  $\langle 90^\circ \rangle$ ,  $\langle -90^\circ \rangle$   
Rotiert das Bild um  $90^\circ$  bzw.  $-90^\circ$  im Uhrzeigersinn.
- Länge  $\langle P_1, P_2 \rangle$   
Führt eine Längenmessung zwischen den Punkten  $P_1$  und  $P_2$  durch.
- Bild  $\langle + \rangle$ ,  $\langle - \rangle$   
Wechselt zum nächsten bzw. vorherigen Bild einer Bildserie.
- Reset  
Setzt das Bild in seinen Ursprungszustand zurück.

Ein auf 7 Elemente reduziertes Funktionsangebot bedeutet für den Nutzer eine geringere mentale Beanspruchung und entlastet das Kurzzeitgedächtnis, von dem man ausgeht, dass es auf  $7 \pm 2$  Informationseinheiten kapazitativ limitiert ist (vgl. Kap. 2.3.1.2).

„Modes“ sind spezifizierte Systemzustände, bei denen Eingaben des Nutzers kontextabhängig zu unterschiedlichen Reaktionen des Systems führen und somit zwar den Funktionsumfang einer Software erweitern, auf den Nutzer jedoch verwirrend wirken können. Unter der Monotonie versteht man hingegen, dass eine Funktion nur auf eine bestimmte Art und Weise ausgeführt werden kann. Dadurch ist es für den Nutzer einfacher, ein mentales Modell des Bedienkonzepts zu generieren und schneller Automatismen zu erlernen. Raskin spricht von einem guten Bedienansatz, wenn dieser keine Modes verwendet und monoton ist [Ras00].

Oft erfolgt eine Unterteilung der Nutzer bezüglich der Bedienung einer Software in Anfänger und Experten. Anfänger werden dabei langsam an die Bedienung durch vermehrte Hilfestellungen herangeführt, während Experten verkürzte bzw. variierende Programmabläufe (Hotkeys etc.) aufgrund ihrer fortgeschrittenen Erfahrung angeboten werden (Kap. 2.3.1.5). Dies äußert sich oft dadurch, dass das System den Anwender ab einem bestimmten Zeitpunkt, etwa nach dem  $x$ -ten Durchlauf des Programms, als fortgeschritten einstuft und alternative Programmabläufe vorstellt. Da Nutzer jedoch seltener als absolute Anfänger oder als Experten klassifiziert werden können, sondern einen Erfahrungsstand aufweisen, der meist dazwischen liegt, ist es sinnvoller, eine Systemadaption zu unterbinden und somit das Entwickeln konsistenter Bedienautomatismen zu ermöglichen. Des Weiteren sollte die Funktionalität nicht auf eine einfache Erlernung ausgerichtet sein, sondern eine möglichst langfristige, effiziente Bedienung gewährleisten, da Nutzer vor allem bei weniger komplexen

Programmen eine kurze Phase des Lernens benötigen, gefolgt von einer langen Phase, die letztendlich zur Routine führt (vgl. Kap. 2.3.1.3)[Ras00].

Touchscreens bieten dem Nutzer im Vergleich zur Maus oder einer Tastatur nur ein limitiertes haptisches Feedback an (s. Kap. 2.5.1). Aus diesem Grund muss jede Funktionsauslösung von einer akustischen und visuellen Rückmeldung begleitet werden, die den Nutzer über die erfolgreiche Registrierung seiner Handlung informiert. Während ein Ton Auskunft darüber gibt, dass eine Funktionsauslösung vom System erkannt wurde, liefert ein visuelles Feedback Informationen darüber, um welche Funktion es sich dabei genau handelt.

Da der OP ein bereits sehr lärmintensiver Arbeitsplatz ist (Kap. 4.2.1), muss hinsichtlich der Verwendung von Tönen sparsam umgegangen werden - laut VDI/VDE 3850-1 bieten sich Grundtöne im Bereich von 1-2 kHz am besten an [VDI00]. Es gilt jedoch zu bedenken, dass die Hörschwelle des Menschen mit zunehmendem Geräuschpegel und Alter angehoben wird und leise Töne nach einer Funktionsausführung überhört werden können (Kap. 2.2.2).

Parallel zum akustischen Feedback wird eine visuelle Rückmeldung angeboten. Optisch am auffälligsten sind veränderliche Signale in Form von Änderungen der Leuchtdichte oder Farbe (vgl. Abb. 5.2) wie das Aufblinken einer Schaltfläche nach einem Kontakt mit dem Finger.

Die Auslösung einer Funktion kann entweder unmittelbar nach dem Berühren (on press) oder nach dem Kontaktverlust (on release) zwischen Finger und der Touchscreen-Oberfläche geschehen. Letztere Methode bietet sich hier an, da der Nutzer so die Möglichkeit hat, Bedienfehler zu korrigieren, die beispielsweise aus einer unpräzisen Kalibrierung oder bei Parallaxefehlern des Touchscreen - aufgrund seitlichen Betrachtens - hervorgehen können [VDI04].

Die Dauer ( $T$ ) einer Rückmeldung sollte  $T \leq 1s$  betragen, um dem Nutzer eine instantane Antwort auf seine Eingabe zu vermitteln. Weiterhin spricht Dahm von einer verzögerten Antwort bei  $T \leq 5s$  und von einer stark verzögerten Antwort bei  $T \leq 10s$  [Dah06]. Im Fall von Aktionen, deren Durchführung länger als 10 Sekunden benötigt, sollte der Nutzer über den Durchführungsfortschritt informiert werden, da er ansonsten davon ausgeht, dass seine Eingabe nicht erkannt wurde. In der VDI/VDE 3850-1 wird die maximale Antwortzeit auf eine Eingabe mit 2 Sekunden angegeben, darüber hinaus muss ein Zwischenbescheid erfolgen [VDI00].

### 5.1.3 Graphische Gestaltung

Die graphische Gestaltung einer Anwendung beinhaltet den Aufbau der GUI und legt die Auswahl, Anordnung, Form- und Farbwahl der einzelnen Elemente fest.

Tractinsky äußerte sich zum Bezug zwischen einer schönen und gebrauchstauglichen Anwendung folgendermaßen [TSKI00]:

„What is beautiful is usable.“

Wenn uns eine Anwendung also insgesamt gefällt - wir sie als schön wahrnehmen - dann ist sie gebrauchstauglich, andernfalls wäre sie nicht schön. Dies wird kontrovers diskutiert, da es in diesem Zusammenhang kein quantitatives Maß für Schönheit gibt. Hingegen können Aussagen darüber getroffen werden, welche Eigenschaften Elemente einer graphischen Oberfläche haben müssen, um gut wahrnehm- und bedienbar zu sein.

Neben einer konsistenten Bedienung sollte auch die GUI in ihrem Aufbau generell konsistent gestaltet sein. Elemente gleicher Art, etwa Schaltflächen, müssen gleichbleibend als solche erkennbar sein bzw. als zusammengehörig empfunden werden - Wertheimers Gestaltgesetze können dabei angewandt werden (vgl. Kap. 2.2.1). Da beim rechtshändigen Nutzer dessen Hand zwischen den Eingaben rechts unterhalb des Touchscreens, einige Zentimeter vor der Oberfläche ruht, sind häufige oder kritische Funktionen, die schnell ausgeführt werden müssen, am besten ebenfalls rechts unten anzuordnen. Im Fall des Linkshänders könnte ein entsprechendes Profil für die Umstrukturierung der relevanten GUI-Elemente nach links unten definiert werden. Die Größe der einzelnen Elemente ist maßgeblich für die Sicht- und Lesbarkeit von deren Inhalt - im Fall von Schaltflächen zusätzlich für die Bedienbarkeit. Touchscreens sind ungeeignet für eine Interaktion mit kleinen Objekten, weil exakte Positionierungen schlecht durchführbar sind. Je nach Grundform dürfen Bedienelemente nicht kleiner sein als 15x25mm (rechteckig), 20x20mm (quadratisch) oder einen Minimaldurchmesser von 20mm aufweisen [VDI04]. Dies entspricht der in Tabelle 5.1 beschriebenen Durchschnittsbreite des menschlichen Zeigefingers<sup>2</sup>, wobei zu bedenken ist, dass durch das Tragen von Handschuhen im OP diese Breite zunimmt und damit die Berührfläche vergrößert wird. Der Abstand der Elemente muss größer als 5mm sein, damit Fehlbedienungen reduziert werden.

Werden Schriftinhalte präsentiert, so richtet sich die Schriftgröße nach dem Abstand (x) zum Betrachter. Generell empfiehlt der Verein Deutscher Ingenieure einen serifenlosen Schrifttyp mit konstantem Zeichenabstand wie Arial oder Courier [VDI00].

---

<sup>2</sup>Es wird davon ausgegangen, dass eine Berührung des Touchscreen meist mit dem Zeigefinger durchgeführt wird.

Rudlof gibt eine Schrifthöhe von 3,2 - 4,5mm (x = 50cm), 3,9 - 5,5mm (x = 60cm) und 4,5 - 6,4mm (x = 70cm) an. Darüber hinaus müssen solche Inhalte aus Gründen der Übersichtlichkeit und Zeiteinsparung möglichst kurz und prägnant formuliert werden, da ein Bildschirmtext im Vergleich zum Text auf dem Papier ca 30% langsamer gelesen wird [Rud06].

Neben der Größe hat auch die Farbwahl direkten Einfluss auf die Sichtbarkeit von graphischen Elementen. Es gilt jedoch zu beachten, dass Farben zum Teil sehr individuell wahrgenommen werden, abhängig z.B. von der Umgebungsbeleuchtung und dem Blickwinkel auf den Monitor - aber auch aufgrund erblicher Krankheiten wie der Rot-Grün-Schwäche, die bei ca. 8% der Männer auftritt (vgl. Kap. 2.2.1).

Je nach Kombination von Vorder- und Hintergrundfarbe hat der jeweilige Farbkontrast direkten Einfluss auf die Leserlichkeit von Zeichen und Bildern. In Tabelle 5.2 sind verschiedene Kombinationsmöglichkeiten mit ihren Auswirkungen auf die Leserlichkeit dargestellt. So bietet sich beispielsweise Schwarz auf Gelb an, jedoch nicht Schwarz auf Blau.

Zeichenfarbe (Vordergrund)	Hintergrundfarbe							
	Schwarz	Weiß	Magenta	Blau	Cyan	Grün	Gelb	Rot
Schwarz	■	++	o	-	++	+	++	o
Weiß	+	■	+	+	k.A.	k.A.	k.A.	+
Magenta	o	+	■	-	o	o	++	-
Blau	-	++	-	■	+	+	++	-
Cyan	++	-	o	++	■	k.A.	-	o
Grün	++	-	o	+	k.A.	■	-	o
Gelb	++	k.A.	o	++	k.A.	k.A.	■	o
Rot	o	++	-	-	+	+	+	■

Tabelle 5.2: Auswirkungen des Farbkontrasts auf die Leserlichkeit, nach VDI/VDE 3850-1 [VDI00, S. 21]. Die Leserlichkeit eines Zeichens ist abhängig vom Kontrast zwischen Vorder- und Hintergrundfarbe. Es wird differenziert zwischen sehr gut leserlich (++), gut leserlich (+), leserlich (o), schlecht leserlich (-) oder es gibt keine Angabe (k.A.).

Farben können zur Kodierung von Informationen verwendet werden (Tab. 5.3). Hinweisinformationen werden in der Regel durch eine weiße oder blaue Farbkodierung visualisiert, während für Warnhinweise oft Gelb verwendet wird. Rote Farben sind am auffälligsten und kommen deshalb für hoch priorisierte Informationen zum Einsatz, wie beispielsweise im Fall von Alarmzuständen. Jeder Farbe eigen ist neben der Auffälligkeit eine gewisse Farbsymbolik - so assoziieren wir Rot mit einer möglichen Gefahr, während Grün bei einer Maschine den ordnungsgemäßen Betriebszustand



beschreibt und Gelb Vorsicht gebietet [IEC02]. Die Kodierung von Informationen durch eine Farbsymbolik ist jedoch nicht unbeschränkt gültig, da u.a. kulturell bedingte Unterschiede in der Bedeutung von Farben existieren<sup>3</sup>.

Auffälligkeit	Informationsklasse	Hintergrundfarbe	Vordergrundfarbe
hoch	Alarm	Rot Weiß od. Schwarz	Weiß od. Schwarz Rot
↓	Warnung	Gelb Schwarz	Schwarz Gelb
	Status	Weiß Schwarz	Schwarz Weiß
niedrig	Hinweis	Blau Weiß	Weiß Blau

Tabelle 5.3: Farbkodierung von Informationsklassen, nach VDI/VDE 3850-1 [VDI00, S. 42]. Informationsklassen werden abhängig von ihrer Priorität für den Nutzer farblich unterschiedlich dargestellt. Alarmmeldungen sind aufgrund der Verwendung roter Farben am auffälligsten, während niedriger priorisierte Hinweise durch Blau-Weiß-Kombinationen weniger auffallend sind.

Es empfiehlt sich, insgesamt nicht mehr als 6 Bunttöne mit jeweils zwei verschiedenen Helligkeitsstufen in einer Applikation zu verwenden. Der Hintergrund sollte möglichst nicht bunt sein - im Fall einer Farbverwendung bietet sich am besten ein grauer Ton an [VDI00]. Ein heller Hintergrund reduziert die Beeinträchtigung der Sichtbarkeit durch Reflexionen und Spiegelungen, die durch Verunreinigungen des Touchscreens aufgrund des Fingerkontakts (Fingerabdrücke etc.) entstehen können.

Aus Sicht der Ausgabe von Informationen ist der Touchscreen ein LCD-Monitor. Da besonders auf diesen Geräten Off-Axis-Betrachtungen abhängig vom Blickwinkel zu Farbverzerrungen und reduzierter Helligkeit führen können (Kap. 2.6.1), wurde auf eine Farbdarstellung und -kodierung der Bedienelemente verzichtet.

Beim Betrachten von medizinischen Patientenbildern, mit z.T. darauf aufbauenden chirurgischen Operationsstrategien, darf es zu keinen Fehlwahrnehmungen der Farben kommen. Um Wechselwirkungen zwischen Vorder- und Hintergrund zu vermeiden, haben die meisten Viewer-Anwendungen einen schwarzen Hintergrund. Eine gute Sichtbarkeit vor dem schwarzen Hintergrund wird durch die Wahl weißer Elemente erzielt, so dass auch bei größeren Betrachtungswinkeln ein möglichst homogenes Erscheinungsbild gewährleistet wird.

<sup>3</sup>Während in westlichen Kulturkreisen die Farbe Weiß mit Reinheit und Licht assoziiert wird, verbinden sie einige asiatische Kulturen mit dem Tod.

Werden Information konzentriert über eine einzelne Sinnesmodalität wahrgenommen, so kann dies unter Umständen zu einer Überlastung und zu damit verbundener Stress führen. Im Beispiel des Operationssaals (vgl. Kap 4.2.3) ist der Chirurg einer starken visuellen Belastung ausgesetzt - das zusätzliche Darstellen operationsbegleitender Informationen über den visuellen Kanal würde diese Belastung noch verstärken. In solchen Situationen bietet sich eine Ausweitung auf weitere Sinnesmodalitäten an - man spricht dann von einer bi- oder multimodalen Wahrnehmung, wie z.B. im Fall einer visuell-akustischen Wahrnehmung.

Werden dem Menschen Reize über zwei oder mehr Modalitäten angeboten, so kann es zu einem Konkurrieren um die kognitiven Ressourcen kommen (vgl. Kap. 2.3.1.1). Während evolutionsbedingt eine große Anzahl unterschiedlicher Reizquellen aus der Umwelt unsere Aufmerksamkeit schlagartig auf sich lenken können wie beispielsweise Brandgeruch, wird im weiteren Verlauf nur auf die für eine MMI relevanten Reizquellen eingegangen.

Von einer Aufmerksamkeitssteuerung machen Designer von graphischen Oberflächen Gebrauch, um sicherzustellen, dass relevante Informationen in einem bestimmten Kontext gezielt vom Nutzer registriert und wahrgenommen werden - z.B. im Alarmfall. Der Bildschirm lässt sich hinsichtlich einer Aufmerksamkeitsverteilung des Betrachters in 4 Quadranten aufteilen. Den größten Anteil unserer Aufmerksamkeit bringen wir dem linken oberen Quadranten entgegen (40%), gefolgt vom linken unteren (25%), dem rechten oberen (20%) und dem rechten unteren Quadranten (15%) [Rud06]. Kritische Informationen sollten dementsprechend am besten links oben präsentiert werden.

Eine gezielte Lenkung der Aufmerksamkeit kann neben der Positionierung auf dem Bildschirm zudem durch eine adäquate Farbwahl geschehen (vgl. Tab. 5.3). Stärker noch als die Farbwahl erregt eine Steigerung der Leuchtdichte (Helligkeit) von Oberflächen unsere Aufmerksamkeit, wobei zu hohe Leuchtdichtekontraste zwischen Flächen negative Auswirkungen auf die Leserlichkeit haben und ggfs. Blendungen erzeugen können.

Alternierende optische Signale wie veränderlich blinkende Elemente, sind noch auffälliger, doch nimmt der Grad der Aufmerksamkeitserregung mit der Anzahl sich verändernder Signale ab - im Idealfall wird kontextspezifisch nur ein solches Signal gleichzeitig visualisiert.

In höchstem Maße auffällig sind im Zusammenhang einer MMI akustische Signale. Vor allem bei Alarmmeldungen werden impulsartige Geräusche eingespielt, jedoch ist zu beachten, dass schon ab einer Intensität von 30 dB(A) physiologische und

psychologische Stressreaktionen bzw. eine Leistungsverringerung induziert werden können (vgl. Kap. 2.2.2.1). Kontinuierliche Geräusche hingegen müssen im Vergleich zu aperiodischen Impulsen deutlich lauter ausfallen, um in gleichem Maße die Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen. Für den Anwendungsfall einer Signalerkennung am Anästhesie-Arbeitsplatz konnten Craven und McIndoe zeigen, dass bei einer operationsbegleitenden Überwachung der Vitalparameter aperiodische Töne wesentlich besser erkannt werden als kontinuierliche Töne [CM99]. Umgebungsgeräusche haben Einfluss auf die Auffälligkeit, Erkennbarkeit und Unterscheidbarkeit akustischer Signale. Abbildung 5.2 fasst die genannten Aspekte der Aufmerksamkeitserregung zusammen.

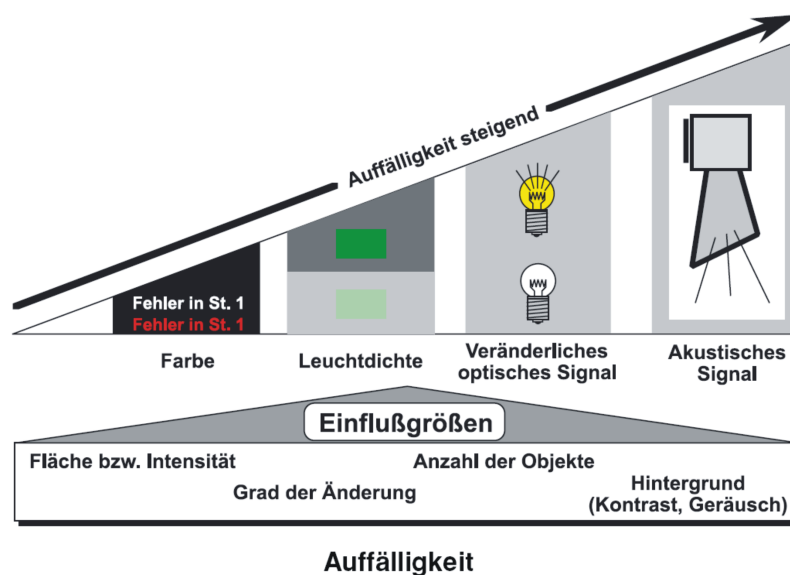


Abbildung 5.2: Grad einer Aufmerksamkeitserregung durch unterschiedliche Signale und deren Einflussgrößen, nach VDI/VDE 3850-1 [VDI00, S. 18].

Unabhängig von der Art eines wahrzunehmenden Reizes hat Stress laut Raskin großen Einfluss auf die Aufnahmefähigkeit des Menschen [Ras00, S. 27]:

„As stress increases, people concentrate more and more on but a few features of their environment, paying less and less attention to others.“  
 [...]. „The more critical the task, the less likely it is for users to notice warnings that alert them to potentially dangerous actions.“

## 5.2 Vorstellung der Bedienkonzepte

Aufbauend auf den software-ergonomischen Gestaltungsprinzipien wurde ein generisches Modell für einen durch den Touchscreen optimal bedienbaren Viewer erstellt.

Aus diesem Modell wurden 4 Bedienkonzepte (K1,..., K4) für eine intraoperative Patientenbildbetrachtung definiert, die hinsichtlich ihrer Funktionalität gleich sind. Während die Viewer-Applikation - welche im Rahmen der Evaluation in Kapitel 4.4.1 vorgestellt wurde - vor allem aus Gründen der Integration der Sprachsteuerung in Java programmiert wurde, geschah eine Umsetzung der Bedienkonzepte in Adobe Flash. Mit dieser Entwicklungsumgebung, die vor allem für Web-Anwendungen genutzt wird, lassen sich interaktive multimediale Inhalte effizient realisieren. Durch die Erweiterung von Flash um die Programmiersprache ActionScript besteht darüber hinaus die Möglichkeit, mächtigere und komplexere Applikationen zu erstellen. Die Verwendung von Adobe Flash begründet sich vor allem daraus, dass es nicht das Ziel ist, einen vollwertigen Viewer zu generieren, sondern die 4 Konzepte bezüglich ihres Bedienansatzes miteinander vergleichend zu evaluieren.

Die Konzepte unterscheiden sich in den Ausprägungen der drei Merkmale des Platzbedarfs, der Anordnungsflexibilität und des Bedienaufwands voneinander.

### **Platzbedarf:**

Der Platzbedarf entspricht dem prozentualen Anteil der Bildfläche, der zum Darstellen der Interaktionselemente benötigt wird. Ein hoher Platzbedarf verringert die Sehfläche, welche das Patientenbild zeigt, bietet dafür jedoch die Möglichkeit, Schaltflächen und andere Elemente größer zu dimensionalisieren und damit leichter bedienbar zu machen.

### **Anordnungsflexibilität:**

Die Anordnungsflexibilität eines Konzepts kann entweder starr, flexibel oder semi-flexibel ausgeprägt sein, je nachdem ob und wie frei die Interaktionselemente auf der Bildfläche neu angeordnet werden können. Der Nutzer hat mit zunehmendem Flexibilitätsgrad die Möglichkeit, die Bedienelemente auf seine Bedürfnisse hinsichtlich der Körperhaltung (z.B. Links-, Rechtshänder) anzupassen - doch geschieht dies auf Kosten der GUI-Konsistenz, da Elemente keine dedizierte Position mehr auf der graphischen Oberfläche haben. Bei semi-flexiblen Anordnungen kann nur ein Teil der Elemente umpositioniert werden.

### **Bedienaufwand:**

Mit dem Bedienaufwand ist der benötigte Aufwand gemeint, um eine Funktion auszuführen - dabei kann die Funktion entweder verschachtelt oder direkt aktivierbar sein. Bei einer Verschachtelung muss erst die Funktionsart (z.B. Zoom) gewählt

werden und im Anschluss daran der Parameter ( $\langle + \rangle$ ), während der Nutzer im direkten Fall ein Hereinzoomen mit nur einem „Klick“ durchführen kann. Der Grund für die Verschachtelung von Funktionen ist, dass auf diese Weise die Sehfläche des Patientenbildes maximiert wird, weil die graphischen Interaktionselemente reduziert und platzsparender visualisiert werden. Längenmessung und Reset sind davon nicht betroffen, da sie bei allen Konzepten in gleicher Weise ausgelöst werden.

Die Ausprägungen der Bedienkonzepte bezüglich aller vorgestellten Merkmale sind in Tabelle 5.4 zusammengestellt:

Konzept	Platzbedarf	Anordnungsflexibilität	Bedienaufwand
K1	7%	flexibel	verschachtelt
K2	15%	starr	verschachtelt
K3	18%	semi-flexibel	verschachtelt
K4	23%	starr	direkt

Tabelle 5.4: Merkmalsausprägungen der Bedienkonzepte. Der Platzbedarf zur Darstellung der Bedienelemente entspricht dem prozentualen Anteil am Gesamtbild, während die Anordnungsflexibilität den Grad einer Neuordnung dieser Elemente auf der graphischen Oberfläche beschreibt. Mit dem Bedienaufwand wird präzisiert, ob Funktionen direkt oder verschachtelt (aufwändiger) ausführbar sind.

### 5.2.1 Konzept 1

Das Konzept 1 ist auf eine möglichst reduzierte, minimal präsentierte Bedienung ausgelegt. Es ist in seiner Positionierung auf dem Bildschirm völlig flexibel und hat im Vergleich zu den anderen Konzepten den geringsten Platzbedarf. Durch Drücken des Touchscreens an beliebiger Stelle erscheinen die ansonsten unsichtbaren Bedienelemente an dieser Position - sie verschwinden jedoch nach 7s wieder, wenn keine weitere Eingabe erfolgt, wodurch eine größtmögliche Sehfläche gewährleistet wird (s. Abb. 5.3).

Funktionen, deren Auslösung einen weiteren Parameter voraussetzen, sind verschachtelt dargestellt. Eine Aktivierung setzt das Durchführen mehrerer Handlungsschritte voraus - angefangen mit der etwaigen Sichtbarmachung der Bedienelemente. Danach ist die Funktion durch das Drücken der entsprechenden Schaltfläche (Button) auszuwählen, woraufhin die zugehörigen Parameter erscheinen. Nach erneutem Drücken auf den gewünschten Parameter-Button wird die Funktion ausgeführt. Dieser Ablauf ist graphisch anhand einer Vergrößerung des Bildinhalts (Zoom  $\langle + \rangle$ ) in Abbildung 5.4 illustriert.

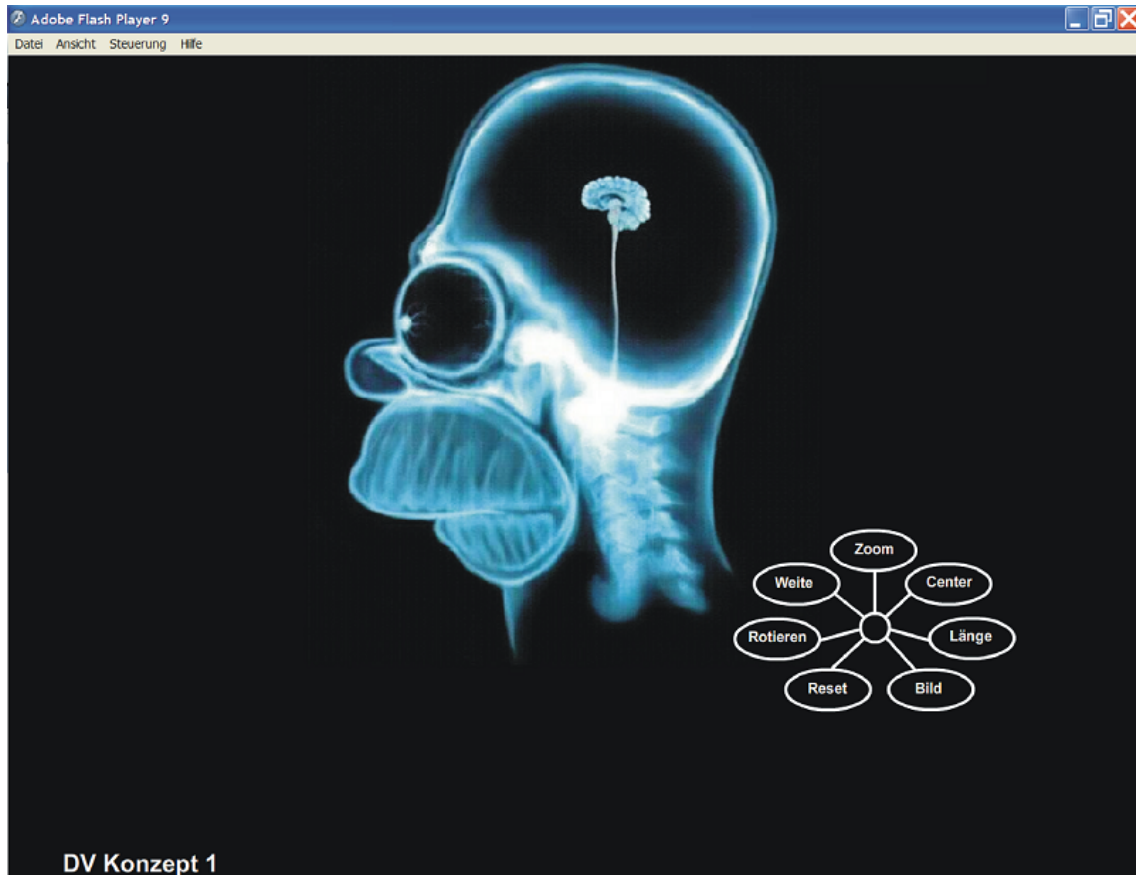


Abbildung 5.3: Darstellung von Konzept 1.

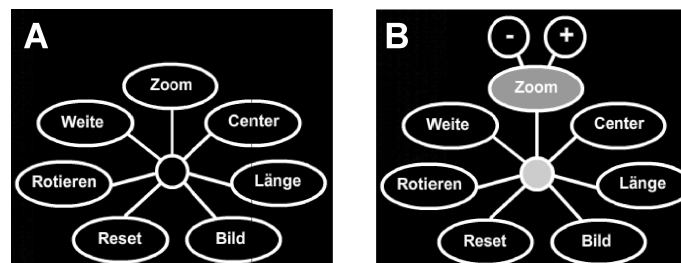


Abbildung 5.4: Der Bedienablauf von Konzept 1 am Beispiel einer Vergrößerung des Bildinhalts (Zoom <+>). A) Im dargestellten Zustand muss zunächst die Funktion Zoom ausgewählt werden. B) Nach Drücken des Zoom-Buttons erscheint dessen Parameter. Um das Bild zu vergrößern muss der entsprechende Parameter-Button betätigt werden.

### 5.2.2 Konzept 2

Konzept 2 ist bezüglich seiner Anordnung starr festgelegt - die Bedienelemente sind im rechten unteren Teil des Bildschirms positioniert, um eine schnelle und bequeme Bedienung für Rechtshänder zu ermöglichen<sup>4</sup>. Zwischen einer minimalen (K1) und einer maximalen Präsentationsart (K4) ist dieses Konzept hinsichtlich der Bedienskonsistenz und dem Platzverbrauch als in der Mitte einzustufen (Abb. 5.5).

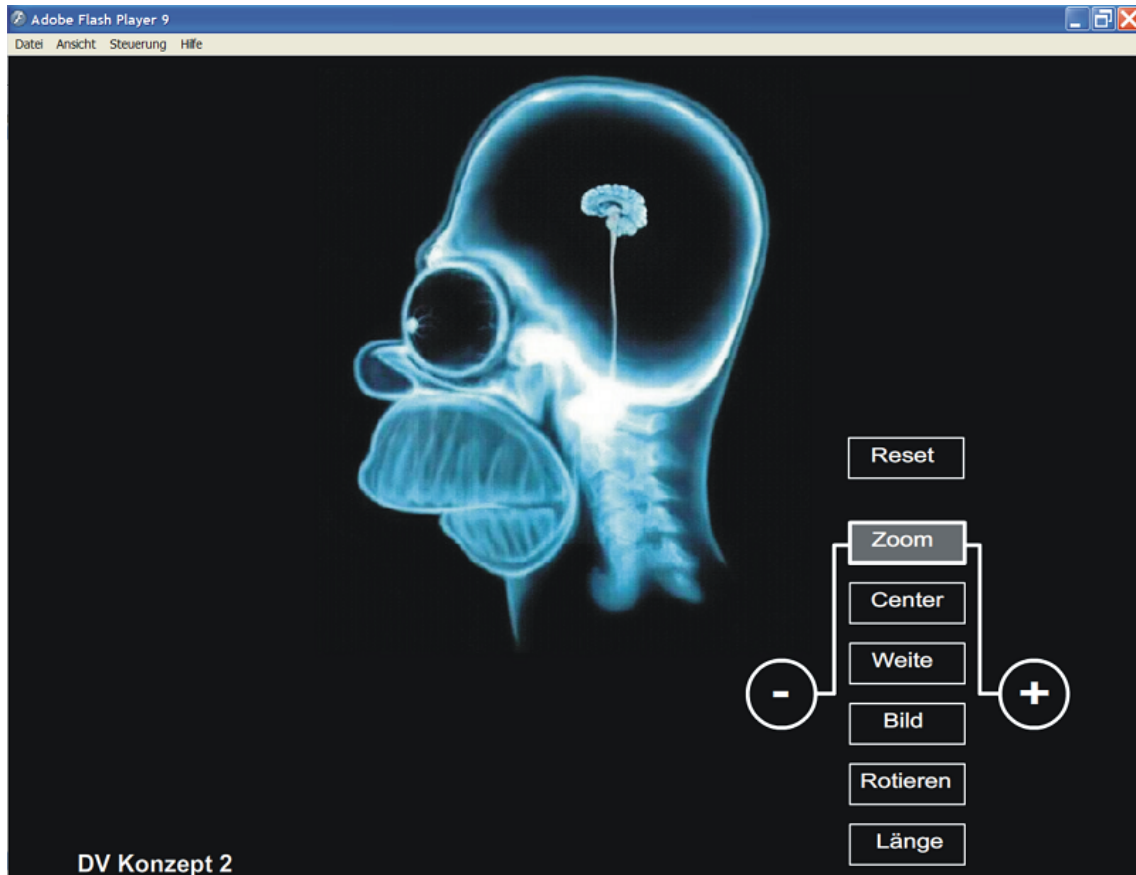


Abbildung 5.5: Darstellung von Konzept 2.

Wie bei K1 sind Funktionen, die eine Parameterauswahl anbieten, verschachtelt aktivierbar - es muss zunächst zur gewünschten Funktionsart gewechselt werden. Insgesamt gibt es nur zwei Parameter-Buttons, die abhängig von der gewählten Funktion unterschiedliche Manipulationen des Bildes ermöglichen. Durch das Verwenden solcher Softkeys (vgl. Kap. 2.5.2) kann zwar Platz eingespart werden, doch führt dies eventuell ebenfalls zur Verwirrung des Nutzers, da so kontextabhängige Modes im Programmablauf vorhanden sind (Abb. 5.6).

<sup>4</sup>Für Linkshänder könnte ein entsprechendes Nutzungsprofil bei den Konzepten 2-4 angelegt werden, bei dem die Elemente links dargestellt sind.

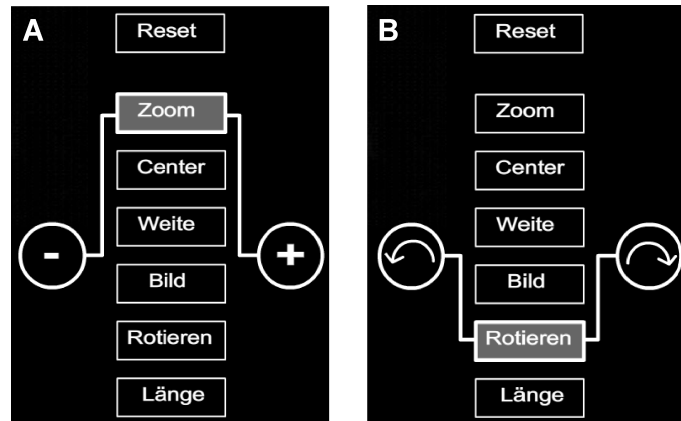


Abbildung 5.6: Der Bedienablauf von Konzept 2 am Beispiel eines Funktionswechsels. A) Die ausgewählte Funktion des Zoom (hell hervorgehoben) wird durch Betätigen der jeweiligen Parameter-Buttons aktiviert. B) Die Funktion Rotieren wird über dieselben Parameter-Buttons ausgelöst.

### 5.2.3 Konzept 3

Das dritte Konzept unterscheidet sich von allen anderen Konzepten grundlegend in seiner Bedienung. Wie im Fall von K2 muss zunächst zur entsprechenden Funktion gewechselt werden (starr), doch erscheinen die zugehörigen Parameter-Buttons erst, nachdem der Finger an beliebiger Stelle (semi-flexibel) den Touchscreen berührt hat (s. Abb. 5.7).

Eine Funktionsauslösung kommt dann zustande, wenn der Nutzer nach dem Drag&Drop-Prinzip entweder den linken oder den rechten Parameter gewählt hat und den Finger im Anschluss daran von der Oberfläche nimmt - auf diese Weise hat er die Möglichkeit, seine Eingabe zu korrigieren (Abb. 5.8).



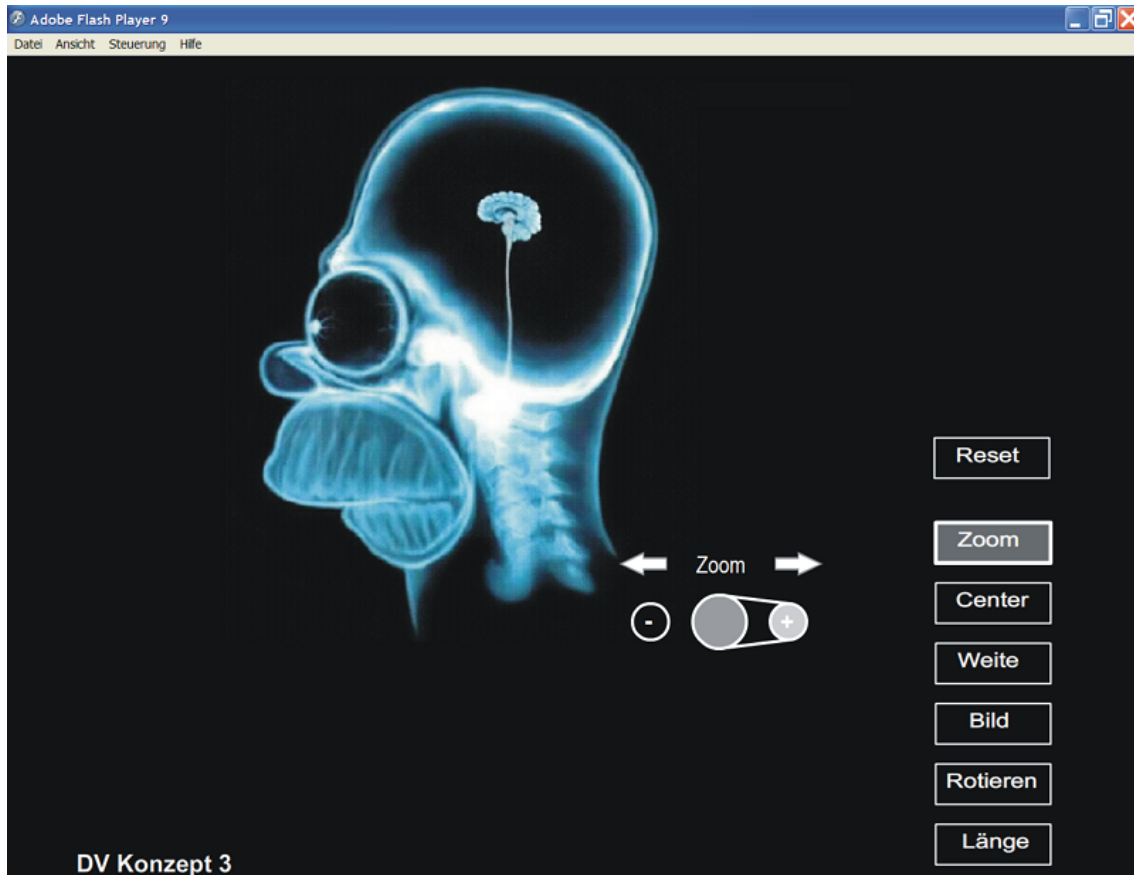


Abbildung 5.7: Darstellung von Konzept 3.

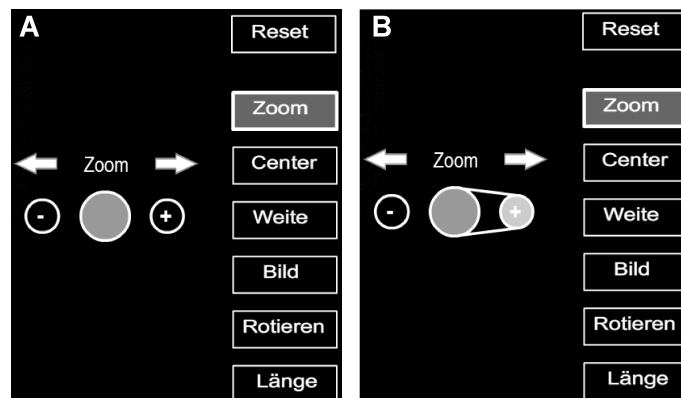


Abbildung 5.8: Der Bedienablauf von Konzept 3 am Beispiel einer Vergrößerung des Bildinhalts (Zoom <+>). A) Wurde die Funktion Zoom gewählt, so erscheinen beim Berühren durch den Finger an beliebiger Stelle die Parameter-Buttons dort. B) Um das Bild zu vergrößern, muss der entsprechende Parameter-Button nach dem Drag&Drop-Prinzip über eine Fingerbewegung nach rechts betätigt werden.

### 5.2.4 Konzept 4

Die Bedienelemente von Konzept 4 sind starr am rechten Rand angeordnet. Eine Funktionsauslösung geschieht direkt durch das Drücken des jeweiligen Parameter-Buttons auf der Oberfläche - eine Verschachtelung ist nicht gegeben. Aus diesem Grund benötigt dieses Konzept am meisten Platz und schränkt dementsprechend die Sehfläche ein.

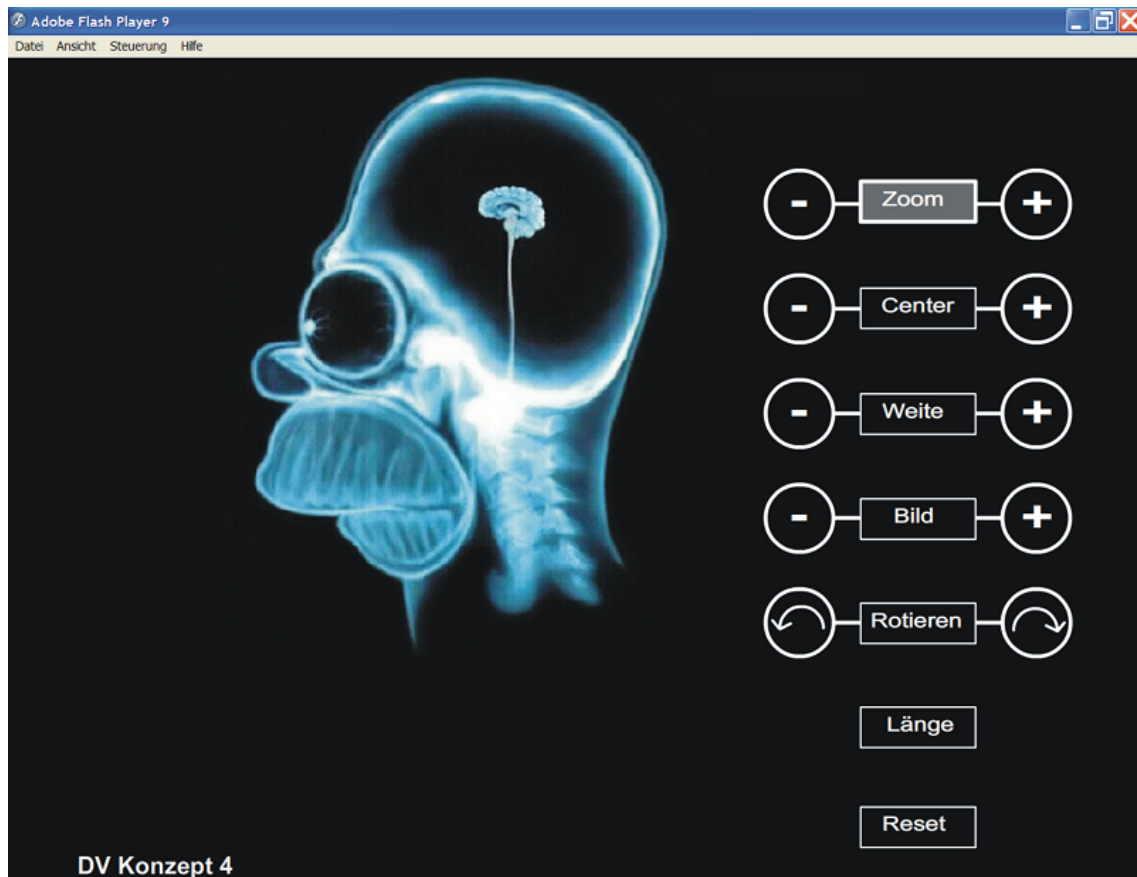


Abbildung 5.9: Darstellung von Konzept 4. Eine Vergrößerung des Bildinhalts (Zoom <+>) geschieht über Drücken des zugehörigen Parameter-Buttons der Funktion Zoom.

## 5.3 Quantifizierung der Bedienkonzepte

Um die 4 Bedienkonzepte auf ihre Gebrauchstauglichkeit hin zu untersuchen, kann - wie bereits für die Computer-Eingabegeräte geschehen (Kap. 4.4) - eine Evaluation mit Probanden durchgeführt werden. Gerade während der frühen Konzipierungsphase einer Software-Anwendung bieten sich die in Kapitel 2.4 vorgestellten kognitiven Modelle zur Quantifizierung der Konzeptbedienung an, da während dieser frühen Entwicklungsphase Änderungen leichter umsetzbar sind.

Eine vergleichende Quantifizierung der Bediendauer (Effizienz) aller Konzepte wird anhand der Aufgabenbewältigung einer 8-stelligen Funktionssequenz durchgeführt, die an Aufgabe 1 des Usability-Tests in Kapitel 4.4 angelehnt ist.

### 5.3.1 Quantifizierung mit dem KLM

Das KLM (Kap. 2.4.1.1) bietet elementare Bedienoperatoren an, die über heuristische Regeln zu komplexeren Handlungsabfolgen zusammengesetzt werden können. Die 4 wesentlichen Operatoren sind der Wechsel zum Eingabegerät (H, 400ms), das Zeigen auf dem Touchscreen bzw. mit einem Zeigegerät auf eine beliebige Stelle (P, 1100ms), das Betätigen einer Schaltfläche (K, 100ms) und der mentale Operator (M, 1350ms). Unter der Voraussetzung, dass der Nutzer schon zum Touchscreen gewechselt hat, entspräche der Vorgang des Betätigens einer Schaltfläche somit der Operatorfolge MPK (2550ms).

Man kann alle verfügbaren Funktionen der Konzepte in solche aufteilen, die keine Parameter aufweisen ( $P_0$ ) - also unmittelbar ausgeführt werden (Reset) - und in andere, die das Wählen eines Parameters ( $P_+$ ) voraussetzen (Zoom  $\langle + \rangle$ ). Die Längenmessung (L) nimmt eine Extrastellung ein und muss separat betrachtet werden, da in diesem Fall zuerst die Funktion und dann beide Punkte nacheinander für eine Längenmessung auszuwählen sind. Diese drei Funktionsklassen unterscheiden sich hinsichtlich der für eine Aktivierung benötigten Anzahl an Handlungsschritten, sprich dem Bedienaufwand. Weil im Gegensatz zu allen anderen Konzepte parametrisierte Funktionen bei K3 durch Drag&Drop-Gesten (D) ausgelöst werden, müssen jene auch bezüglich ihres Aufwands einzeln erfasst werden.

Beschrieben durch die KLM-Operatoren und unter Anwendung der zugehörigen heuristischen Regeln, zeigt Tabelle 5.5 die vorhergesagte Bediendauer pro Funktionsart.

Funktionsart	KLM-Operatoren	Dauer (ms)
$P_0$	MPK	2550
$P_+$	MPKPK	3750
D	MPKPKPK	4950
L	MPKPKPK	4950

Tabelle 5.5: Beschreibung verschiedener Funktionsarten durch KLM-Operatoren mit daraus resultierender Bediendauer.

Weil die Konzepte sich in ihrer Verschachtelung und dadurch in ihrer Bedienung unterscheiden, müssen alle Funktionen - für jedes Bedienkonzept einzeln - einer der insgesamt 4 Funktionsarten zugeordnet werden (s. Tab. 5.6).

Funktion	K1	K2	K3	K4
Zoom $\langle + \rangle$ , $\langle - \rangle$	$P_+$	$P_+$	D	$P_0$
Center $\langle + \rangle$ , $\langle - \rangle$	$P_+$	$P_+$	D	$P_0$
Weite $\langle + \rangle$ , $\langle - \rangle$	$P_+$	$P_+$	D	$P_0$
Rotieren $\langle 90^\circ \rangle$ , $\langle -90^\circ \rangle$	$P_+$	$P_+$	D	$P_0$
Länge $\langle P_1, P_2 \rangle$	L	L	L	L
Bild $\langle + \rangle$ , $\langle - \rangle$	$P_+$	$P_+$	D	$P_0$
Reset	$P_0$	$P_0$	$P_0$	$P_0$

Tabelle 5.6: Konzeptspezifische Zuordnung der Funktionen zur zugehörigen Funktionsart.

Für die Durchführung einer 8-stelligen Funktionssequenz kann nun der geschätzte Zeitaufwand pro Bedienkonzept berechnet werden (s. Tab. 5.7). Die Sequenz hat folgende Form: Bild  $\langle + \rangle$ , Zoom  $\langle + \rangle$ , Rotieren  $\langle 90^\circ \rangle$ , Center  $\langle + \rangle$ , Weite  $\langle - \rangle$ , Zoom  $\langle - \rangle$ , Reset, Längenmessung.

Konzept	Operatorsequenz	Dauer (ms)
K1	$HP_0P_+P_+P_+P_+P_+P_+P_0L$	32950
K2	$HP_+P_+P_+P_+P_+P_+P_0L$	30400
K3	$HDDDDDDP_0L$	37600
K4	$HP_0P_0P_0P_0P_0P_0L$	23200

Tabelle 5.7: Aus dem KLM errechnete Bediendauer pro Konzept für die Durchführung einer 8-stelligen Funktionssequenz.

Resultierend aus der Modellierung der beschriebenen Aufgabe sagt das KLM voraus, dass die Sequenz mit K4 am schnellsten zu absolvieren ist, während dafür mit K3 am längsten gebraucht wird (ca 38% länger). Dies begründet sich aus der direkten, unverschachtelten Art der Bedienung von K4, da deutlich weniger Aufwand betrieben werden muss, um die ersten 6 der 8 Funktionen auszulösen. Die Operatorfolge

von Konzept 1 ist um einen Eintrag ( $P_0$ ) länger, da die Bedienelemente einmalig per Klick sichtbar gemacht werden müssen.

### 5.3.2 Quantifizierung mit einem kombinierten Modell

Das KLM hat sich vor allem für Anwendungsszenarien mit einem hohen Maß an textbasierten Dateneingaben (Tastatur) durch den Nutzer als zuverlässiges Modell etabliert. Aufgrund der relativ wenigen fest definierten Operatoren ist die Ausdrucksstärke und Flexibilität des KLM eingeschränkt. Für Aufgaben, die häufiges Zeigen (Maus) voraussetzen - wie das Absolvieren der Funktionssequenz am Touchscreen - ist dieses Modell zu starr und berücksichtigt etwa nicht die Distanz und die Größe von Schaltflächen oder den mentalen Aufwand, der betrieben werden muss, um sich zwischen mehreren Alternativen zu entscheiden.

Um eine genauere Vorhersage über die Effizienz der Bedienkonzepte anhand der Sequenzausführung zu ermöglichen, wird das KLM um das Accot-Zhai Steering Law (Zeigen) und um Hick's Law (Entscheiden) erweitert.

Durch das Accot-Zhai Steering Law (vgl. Kap. 2.4.3) kann die Dauer berechnet werden, die benötigt wird, um bei einer Zeigegeste entlang eines Tunnels mit der Breite ( $W$ ) und der Länge ( $D$ ) ein Ziel zu erreichen. Da im Vergleich zu Fitts' Law auch mehrdimensionale Bewegungen modelliert werden können, wird an dieser Stelle das Steering Law verwendet. Ist  $W$  konstant breit, so kann der Zeitbedarf ( $MT$ ) folgendermaßen berechnet werden:

$$MT = a + b \frac{D}{W},$$

mit den experimentell zu bestimmenden Konstanten  $a$  und  $b$ .

Die Hand des Nutzers kehrt i.d.R. nach jeder Eingabe in eine Neutralstellung zurück, die ca. 10cm vor der Oberfläche des Touchscreen im rechten unteren Quadranten liegt (Rechtshänder). Unter dieser Voraussetzung kann das Zeigen zu einer Schaltfläche als Bewegung entlang eines spezifizierten Tunnels beschrieben werden, wobei die Distanz zwischen Neutralstellung und allen Schaltflächen als gleich behandelt wird. Während bei der Maus das Betätigen eines Buttons durch die gezielte Bewegung und das Drücken der Maustaste durchgeführt wird, entspricht dies beim Touchscreen dem Zeigen auf einen Button, da mit Abschluss der Handbewegung der Finger Kontakt mit letztgenanntem Eingabegerät hat.

Bei rechteckigen Schaltflächen hängt die Tunnelbreite vom Annäherungswinkel der

Hand des Nutzers ab und entspricht entweder der Button-Höhe (vertikale Fingerbewegung) oder der Button-Breite (horizontale Fingerbewegung). Um diese Variabilität zu kompensieren, wird im Fall eines rechteckigen Buttons die Tunnelbreite durch den Durchmesser eines Kreises mit gleichem Flächeninhalt dargestellt (s. Abb. 5.10).

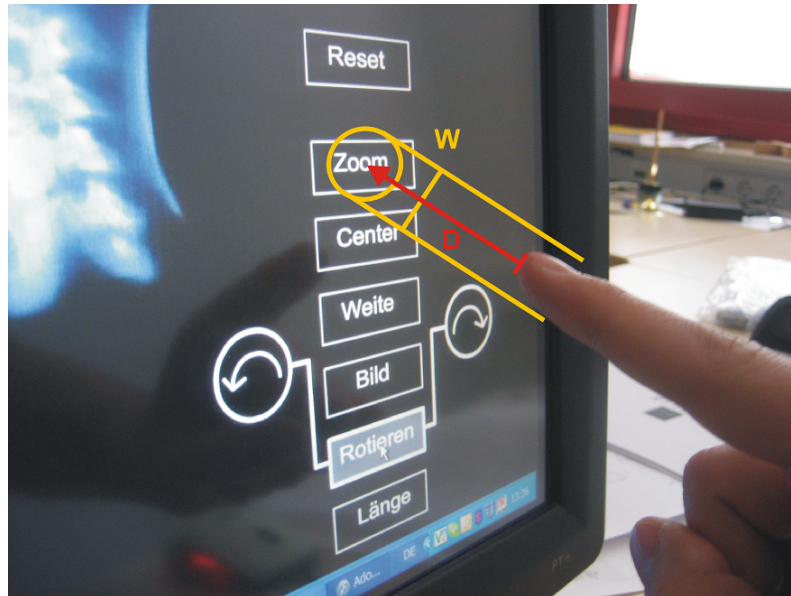


Abbildung 5.10: Die Zeigebewegung auf eine Schaltfläche am Touchscreen entspricht der Bewegung durch einen Tunnel mit der Breite  $W$  und der Länge  $D$ .

Nach dem Spezifizieren einer gleichbleibenden Tunnellänge ( $D = 10\text{cm}$ ) können Zeitvorhersagen für das Zeigen auf einen Funktions- und Parameter-Button abhängig von deren Durchmesser errechnet werden (Tab. 5.8). Die Konstanten  $a$  und  $b$  wurden als  $a = 50\text{ms}$  und  $b = 150\text{ms}$ , nach Raskin definiert [Ras00].

Der benötigte kognitive Zeitaufwand, um sich für eine von  $n$  Schaltflächen zu entscheiden, kann mittels Hick's Law berechnet werden (vgl. Kap. 2.4.5). Bei vorliegender gleicher Auswahlwahrscheinlichkeit aller  $n$  Alternativen ist das Modell definiert durch:

$$T = b \log_2(n + 1),$$

mit  $T$  gleich dem vorhergesagten Zeitbedarf und  $b$  gleich einer experimentell zu wählenden Konstante ( $b = 150\text{ms}$ ). Für die einzelnen Bedienkonzepte fasst Tabelle 5.9 den Zeitbedarf zum Entscheiden für eine von  $n$  Funktionen bzw. Parametern zusammen:

Konzept	Zeigen zum	$W$ (cm)	$MT$ (ms)
K1	Funktions-Button	2,0	789
	Parameter-Button	1,1	1379
K2	Funktions-Button	2,5	654
	Parameter-Button	2,3	715
K3	Funktions-Button	2,5	654
	Parameter-Button	1,1	1038 (800+238)*
K4	Funktions-/Parameter-Button	2,3	715

Tabelle 5.8: Für das Zeigen auf den Funktions- und Parameter-Button errechneter Zeitbedarf ( $MT$ ), basierend auf dem Accot-Zhai Steering Law pro Konzept. Die Breite ( $W$ ) entspricht dem Durchmesser der Schaltfläche.  $D = 10\text{cm}$ ,  $a = 50\text{ms}$ ,  $b = 150\text{ms}$ . \*Bei K3 beinhaltet das Auswählen eines Parameters zwei Bewegungen: Sichtbarmachung der Parameter-Buttons ( $D = 10\text{cm}$ ) + Auswählen des Parameters ( $D = 2,5\text{cm}$ ).

Konzept	Auswahl von	Alternativen ( $n$ )	$T$ (ms)
K1	Funktion	7	450
	Parameter	2	238
K2	Funktion	7	450
	Parameter	2	238
K3	Funktion	7	450
	Parameter	2	238
K4	Funktion/Parameter	12	555

Tabelle 5.9: Für das Entscheiden für eine von  $n$  Funktionen bzw. Parametern benötigter Zeitbedarf ( $T$ ), basierend auf Hick's Law. Bei K4 sind alle Funktionen und Parameter unmittelbar auswählbar.

Die für das KLM betriebene Unterteilung in 4 Funktionsarten ( $P_0, P_+, L, D$ ) (Tab. 5.6) kann für dieses kombinierte Modell (KoM) übernommen werden. Das Hinzufügen des mentalen Operators  $E$  (350ms) vor jeder Funktion beschreibt den kognitiven Aufwand des Nutzers, um bei der Aufgabensequenz das auf dem Bildschirm schriftlich dargestellte nächste Element zu erkennen [Cat85, JN89]. Unter Anwendung der Ergebnisse des Steering Laws (Tab. 5.8) und Hick's Law (Tab. 5.9) lassen sich konzeptspezifische Ausführungszeiten berechnen, die in Tabelle 5.10 dargestellt werden.

Konzept	Funktionsart	Operatoren	Dauer (ms)
K1	$P_0$	$E+A_F+Z_F$	1589
	$P_+$	$P_0+A_P+Z_P$	3206
	L	$P_0+Z_{x1}+Z_{x2}$	4189
K2	$P_0$	$E+A_F+Z_F$	1454
	$P_+$	$P_0+A_P+Z_P$	2407
	L	$P_0+Z_{x1}+Z_{x2}$	4054
K3	$P_0$	$E+A_F+Z_F$	1454
	D	$P_0+A_P+Z_P$	2729
	L	$P_0+Z_{x1}+Z_{x2}$	4054
K4	$P_0$	$E+A_F+Z_F$	1620
	L	$P_0+Z_{x1}+Z_{x2}$	4220

Tabelle 5.10: Für jedes Konzept spezifisch kann der Zeitaufwand je Ausführungsart einer Funktion errechnet werden. Abhängig vom jeweiligen Konzept beschreiben  $A_F$  und  $A_P$  die Dauer bis zum Entscheiden für eine Funktion/einen Parameter, während  $Z_F, Z_P, Z_{x1}$  und  $Z_{x2}$  die Dauer für das Zeigen auf eine Funktion/einen Parameter oder, im Fall der Längenmessung, auf die Punkte  $x1$  und  $x2$  angibt.

Bei Durchführung der gleichen Funktionssequenz kann mit dem KoM für jedes Konzept eine spezifische Bediendauer vorausgesagt werden (Tab. 5.11).

Konzept	Operatorsequenz	KoM Dauer (ms)	KLM Dauer (ms)
K1	$HP_0P_+P_+P_+P_+P_+P_+P_0L$	26999	32950
K2	$HP_+P_+P_+P_+P_+P_+P_0L$	20348	30400
K3	$HDDDDDDP_0L$	22285	37600
K4	$HP_0P_0P_0P_0P_0P_0L$	15958	23200

Tabelle 5.11: Aus dem kombinierten Modell errechnete Bediendauer pro Konzept für die Durchführung der 8-stelligen Funktionssequenz. Zum Vergleich ist das Resultat des KLM angegeben.

Wie auch das KLM, so prognostiziert das kombinierte Modell die geringste Bedienzeit bei Verwendung von K4. Die beiden Modelle unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Wertskalierung, so fallen die Zeitvorhersagen beim KoM ca. 30% kürzer aus. Weiterhin wird bei letztgenanntem Modell K3 im Vergleich zum KLM als wesentlich effizienter bewertet.

Die Fragestellungen, welche Skalierung der Werte realistischer ist und wie schnell die Funktionssequenz mit K3 im Vergleich zu den anderen Bedienkonzepten durchgeführt wird, kann nur im Rahmen einer Evaluation mit Probanden untersucht werden.



## 5.4 Evaluation der Gebrauchstauglichkeit der Bedienkonzepte

Eine modellbasierte Quantifizierung der Konzepte K1 bis K4 liefert schon während eines frühen Entwicklungsstadiums theoretische Informationen über deren Effizienz beim Lösen bestimmter Aufgaben. Zwar können so Aussagen über die Bediengeschwindigkeit getroffen werden, doch werden Fehler oder die Zufriedenheit des Nutzers nicht mitberücksichtigt. Die Durchführung der nun folgenden Evaluation mit Nutzern geht der Klärung von zwei Fragestellungen nach. Zum einen soll geklärt werden, wie hoch das Maß der Gebrauchstauglichkeit aller Konzepte im intraoperativen Kontext ist, zum anderen, wie zuverlässig die Aussagen des kombinierten Modells und des KLM bezüglich der Bediendauer sind.

### 5.4.1 Methode

#### **Versuchsaufbau:**

Während in Kapitel 4.4 der Touchscreen als das am besten geeignete Eingabegerät zur Bildbetrachtung und -manipulation im OP identifiziert wurde, kann diese Evaluation als Fortsetzung zur Bestimmung des gebrauchstauglichsten Bedienkonzepts für den Touchscreen verstanden werden. Aus diesem Grund werden Informationen über den Nutzungskontext und die Rahmenbedingungen nur minimiert beschrieben und weitestgehend übernommen. Dabei fällt der folgende Usability-Test bezüglich des Versuchsaufwands erheblich geringer aus, weil es sich bei der einzigen durchzuführenden Aufgabe um die gleiche 8-stellige Funktionssequenz handelt, die auch im Rahmen der quantitativen Modelle verwendet wurde.

Die 4 vorgestellten Konzepte werden an demselben Touchscreen getestet, der bereits für die vorhergehende Evaluation verwendet wurde und mit einer sterilen Folie intraoperativ auch in der Sterilzone bedienbar ist.

#### **Stichprobe:**

Um ein möglichst repräsentatives Nutzerspektrum hinsichtlich des Erfahrungsstandes mit Touchscreen und Aufgabendomäne zu berücksichtigen, wurde eine heterogene Stichprobe von 20 Probanden gewählt - darunter 2 Ingenieure, 2 Chirurgen, 8 Medizinstudenten und 8 OP-Schwestern. Im Verlauf der vorherigen Evaluation (Kap. 4.4) hat sich herausgestellt, dass die Effizienz (Zeiten/Fehler) beim Arbeiten mit den 5 untersuchten Eingabegeräten - auch dem Touchscreen - sehr individuell von Person zu Person variiert und diesbezüglich eine Differenzierung nach den verschiedenen Probandengruppen zu keinen allgemeingültigen Aussagen führt. Aus

diesem Grund findet eine Auswertung über alle Gruppen gemittelt statt.

### **Testumgebung:**

In Anlehnung an die vorhergehende Evaluation fand dieser Versuch ebenfalls in den Räumlichkeiten des Experimental-OP mit gleichen Beleuchtungsverhältnissen statt.

### **Aufgabenbeschreibung:**

Für einen Vergleich der Resultate dieser Evaluation mit denen der Quantifizierung durch das KLM und KoM muss die gleiche 8-stellige Funktionssequenz pro Bedienkonzept dreimal nacheinander absolviert werden. Dazu nimmt der Proband die Position gegenüber dem Touchscreen ein und beginnt ab Aufgabenstart mit der ersten zu betätigenden Funktion. Damit Bias-Effekte ausgeschlossen werden können, ist die Reihenfolge der präsentierten Bedienkonzepte zufällig.

### **Erhebungsmethodik:**

Die Erhebungsmethodik entspricht weitestgehend jener aus der vorherigen Evaluation. Zeiten werden durch automatisch generierte Protokolle aufgenommen, wobei Fehler, ebenfalls in Maschinen- und User-Fehler unterteilt, zusätzlich durch den Versuchsleiter vermerkt werden. Die Bewertung der Zufriedenheit mit den Konzepten erfolgt durch das Ausfüllen eines PSSUQ durch den Probanden - auf den zusätzlichen ASQ wird verzichtet, da hier nur eine Aufgabe zu lösen ist.

### **Evaluationsmetriken:**

Wie bereits in Kapitel 4.4.1 ausgeführt wurde, wird die Effektivität durch die Anzahl schwerer Fehler berechnet, während sich die Effizienz aus den verbleibenden leichten Fehlern und Zeitmessungen zusammensetzt. Ein Lernfortschritt ergibt sich aus der zeitlichen Verbesserung zwischen dem jeweils ersten und dritten Aufgabendurchlauf. Die subjektive Zufriedenheit der Probanden mit den Bedienkonzepten kann aus den Ergebnissen des PSSUQ abgeleitet werden.

Die Untersuchung der Mittelwertunterschiede und der Korrelation basiert auf dem t-Test, wobei ein Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  als signifikant interpretiert wird.

### **Versuchsablauf:**

Im Folgenden wird der Ablauf des Versuchs beschrieben:

1. Begrüßung des Probanden.
2. Aushändigung des Prüfplans und Vertrautmachen mit dem Aufgabenkontext.

3. Ausfüllen eines Fragebogens zur Erhebung demographischer Informationen.
4. Anlegen der Handschuhe.
5. Einweisung in das Konzept, mit dem die Aufgabe zuerst gelöst werden soll. Um Bias-Effekte zu vermeiden, ist die Testreihenfolge der 4 Bedienkonzepte randomisiert.
6. Ausführen der Aufgabe, dreimal hintereinander.
7. Bewerten der Zufriedenheit mit der Lösung der Aufgabe unter Benutzung des vorliegenden Konzepts auf dem PSSUQ.
8. Für das nächste der Bedienkonzepte wird wie in den Schritten 5.-7. verfahren, bis die Aufgabe mit allen Konzepten absolviert wurde.
9. Abschließendes Ausfüllen eines Fragebogens u.a. zum Ranking aller Bedienkonzepte.
10. Verabschiedung des Probanden.

Die Durchführung des einzelnen Versuchs, von der Begrüßung bis hin zur Verabschiedung des Probanden, dauerte etwa 15 Minuten.

### 5.4.2 Ergebnisse

Es nahmen 20 Personen an dieser Evaluation teil, darunter 10 Frauen und 10 Männer. Die Stichprobe setzt sich wie beschrieben aus 4 Gruppen zusammen - Ingenieure ( $n = 2$ , Altersdurchschnitt = 40 Jahre), Chirurgen ( $n = 2$ , Altersdurchschnitt = 40 Jahre), Medizinstudenten ( $n = 8$ , Altersdurchschnitt = 25 Jahre) und OP-Pflegepersonal ( $n = 8$ , Altersdurchschnitt = 35 Jahre). Eine Auswertung und anschließende Diskussion der Ergebnisse findet über alle Probandengruppen gemittelt statt.

#### **Zeiten:**

Der benötigte Zeitbedarf, um die Funktionssequenz zu absolvieren, ist in Abbildung 5.11 illustriert. Signifikant am schnellsten kann die Aufgabe mit K4 noch vor K2 beendet werden (t-Test,  $p < 0,03$ ), während dafür mit K3 länger benötigt wird. Sowohl für den dritten Aufgabendurchlauf als auch über alle Durchläufe gemittelt, sind die Zeiten vergleichend mit den Vorhersagen des KoM und KLM in Abbildung 5.12 dargestellt.

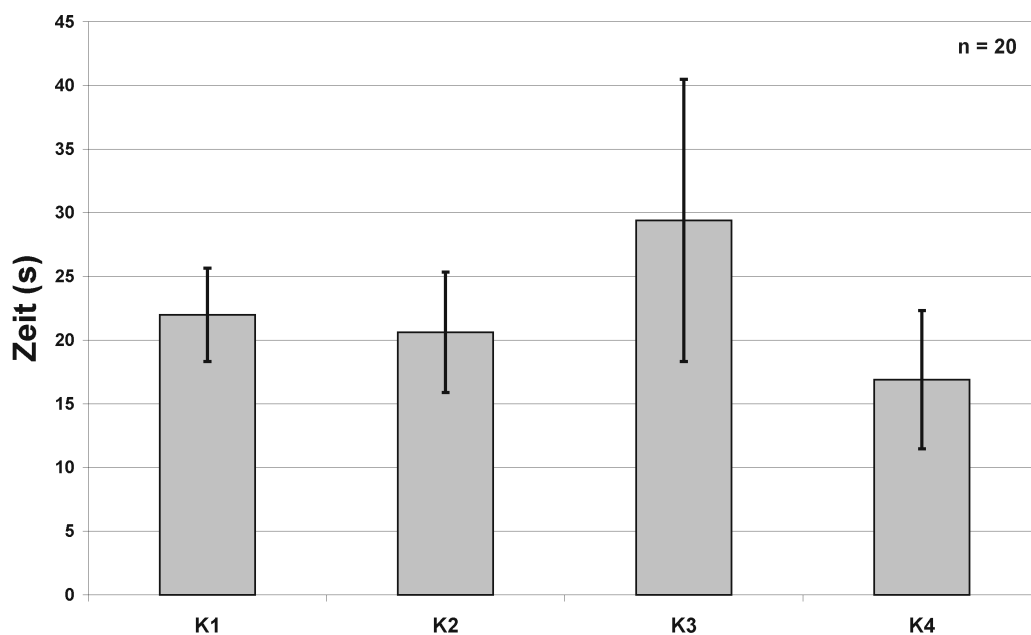


Abbildung 5.11: Zeitaufwand zur Erfüllung der Funktionssequenz. Mittelwerte, n = 20.

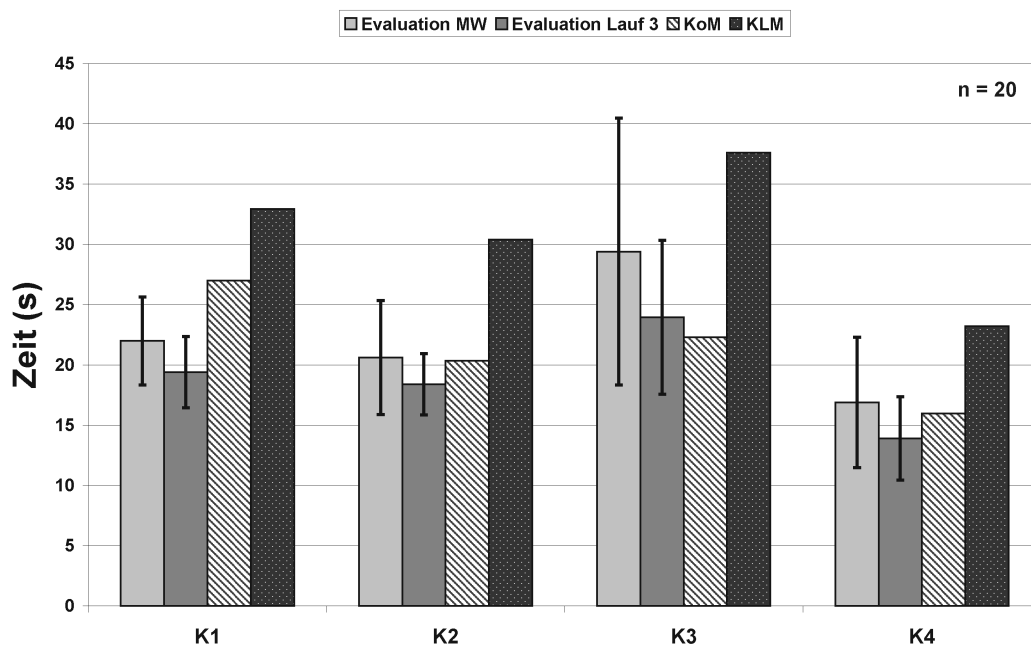


Abbildung 5.12: Zeitaufwand zur Erfüllung der Funktionssequenz gemittelt (MW) sowie separat in Durchlauf 3. Zum Vergleich sind die Zeitvorhersagen vom kombinierten Modell (KoM) und dem Keystroke-Level-Model (KLM) angegeben. Mittelwerte, n = 20.

**Fehler:**

Die Summe aller Fehler, die mit den jeweiligen Konzepten beim Lösen der Aufgabe aufkamen, ist in Tabelle 5.12 dargestellt. Die Bedienung von K3 geht mit wesentlich mehr Fehlern einher als es bei den anderen Bedienkonzepten der Fall ist.

Bedienkonzept	M1	M2	M3	U1	U2	U3
K1	0	0	0	11	0	0
K2	0	0	0	10	0	0
K3	0	107	0	12	4	0
K4	0	0	0	18	0	0

Tabelle 5.12: Summe aller aufgetretenen Fehler, differenziert nach Maschinen- und User-Fehlern. M1 = Funktion nicht erkannt. M2 = Falsche Funktion erkannt. M3 = System reagiert nicht mehr. U1 = Falsche User-Funktion. U2 = User zögert/ist verwirrt. U3 = User braucht Hilfe. Summe, n = 20.

**Lernkurven:**

Abbildung 5.13 zeigt den Lernfortschritt der Probanden mit der Bedienung der Konzepte. Bei den Konzepten K3 (32% Verbesserung) und K4 (31%) findet, im Vergleich zu K1 (24%) und K2 (24%), eine etwas höhere zeitliche Verbesserung zwischen dem ersten und dem dritten Aufgabendurchlauf statt.

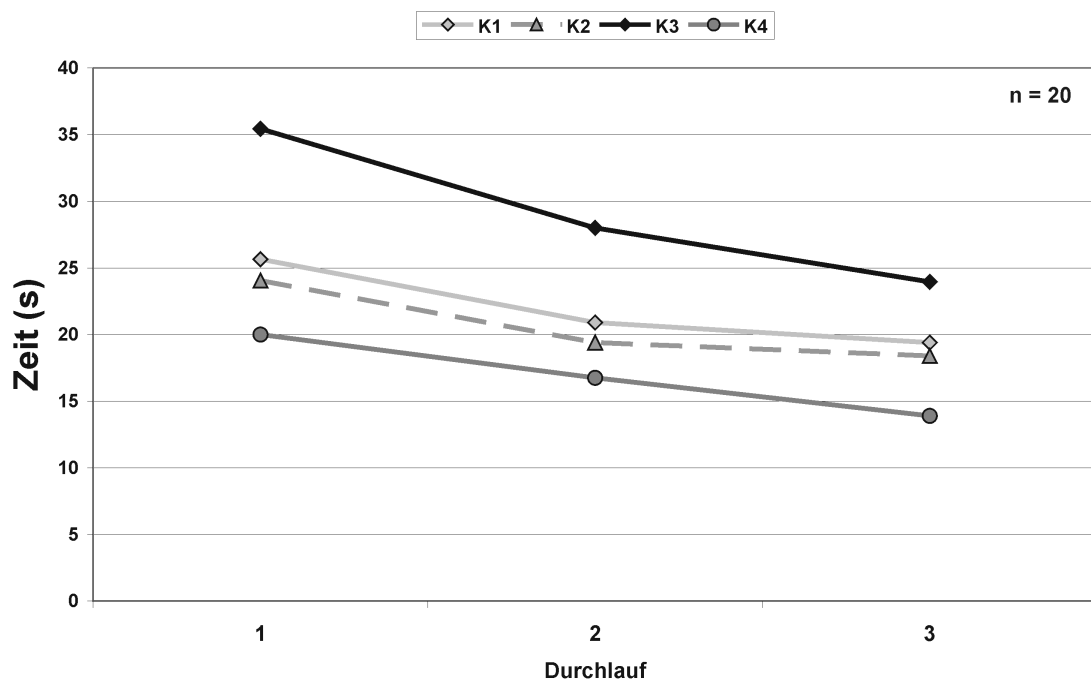


Abbildung 5.13: Lernfortschritt der Probanden zwischen den einzelnen Aufgabendurchläufen. Mittelwerte, n = 20.

**Zufriedenheit:**

Die Probanden äußerten ihre Zufriedenheit mit den Bedienkonzepten auf dem PSSUQ (Abb. 5.14) - Konzept 4 wird dabei signifikant am besten bewertet (t-Test,  $p < 0,01$ ), gefolgt von K2, K1 und K3.

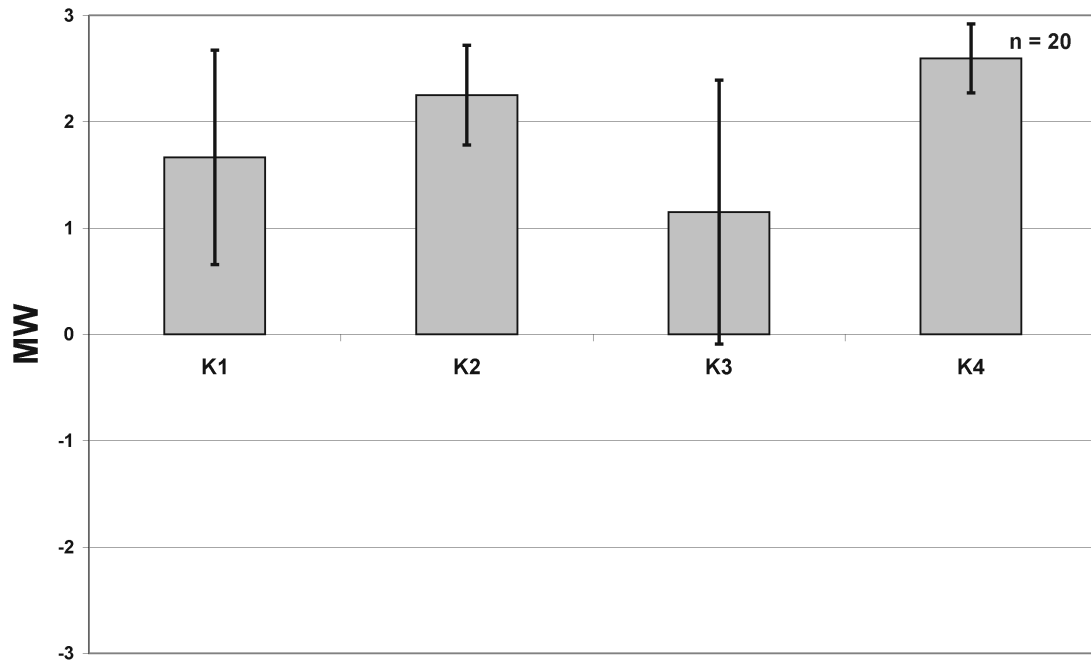


Abbildung 5.14: Bewertung der Zufriedenheit von den Probanden mit der Bedienung der Konzepte auf dem PSSUQ. Mittelwerte,  $n = 20$ .

Bei der Vergabe von Rangpunkten für die verschiedenen Bedienkonzepte (Rang 1 > ... > Rang 4) durch die Probanden zeigt sich, dass K4 mit 60% der maximal erreichbaren Punkte als am deutlich zufriedenstellendsten befunden wurde (Tab. 5.13).

Rang	Bedienkonzept	% der Bestpunktzahl
1	K4	60%
2	K2	41%
3	K1	31%
4	K3	18%

Tabelle 5.13: Ranking der Bedienkonzepte durch die Probanden. Um die Abstände zwischen den Rängen zu verdeutlichen ist neben dem Rang der einzelnen Geräte der prozentuale Anteil an der Bestpunktzahl dargestellt.  $n = 20$ .

Auf die bipolare Frage hin, wie wichtig die 20 Teilnehmer dieser Evaluation die

Bediengeschwindigkeit im Vergleich zur Größe der Sehfläche vor dem Hintergrund einer intraoperativen Patientenbildbetrachtung befinden, ergab sich ein Mittelwert von  $1,0 \pm 1,3$  (-3 = Geschwindigkeit ist wichtiger, 0 = neutral, 3 = Sehfläche ist wichtiger). Demnach wird die Sehfläche, verglichen mit der Bediengeschwindigkeit, als wichtiger erachtet.

### 5.4.3 Diskussion

Aufgrund der Verschachtelung der einzelnen Bedienkonzepte geschieht eine Auslösung der Funktionen zum Teil mit einer unterschiedlichen Anzahl an Interaktionsschritten. Im Fall von K4 werden sämtliche Funktionen, außer die Längenmessung, durch Betätigen der zugehörigen Schaltfläche mit nur einem Handlungsschritt ausgeführt, während beispielsweise bei K1 etwaige Parameter erst nach einer weiteren Eingabe durch den Nutzer gewählt werden können. Im Versuch mit den Probanden zeigt sich dementsprechend, dass am schnellsten mit K4 gearbeitet werden kann, gefolgt von K2 und K1, während mit dem dritten Konzept eine Aufgabenvollendung am langsamsten durchgeführt wird (Abb. 5.11). Grund dafür ist, dass, wie bereits erläutert, Touchscreens im allgemeinen für Drag&Drop-Eingaben weniger gut geeignet sind und Kontaktverluste zwischen dem Finger und der Oberfläche des Geräts vor allem zu Fehlern des Typs M2 führen. Das heißt, dass, obwohl vom Nutzer ungewollt, ein Kontaktverlust vom Viewer als Parameterauswahl interpretiert wird<sup>5</sup>. Zum Vergleich ist die Fehleranzahl bei K3 ca. 9-10x so hoch wie im Fall der anderen Konzepte - bei diesen kommt es mit K4 zu etwa doppelt so vielen Fehlern wie dies mit K1 und K2 der Fall ist (Tab. 5.12). In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass die verschachtelten Konzepte 1 und 2 robuster gegenüber Fehlbedienung sind, da der Nutzer nach fälschlichem Betätigen einer parametrisierten Funktionsschaltfläche in der Regel seinen Fehler entdeckt und ihn korrigieren kann, bevor die Funktion ausgelöst wird. Da bei K4 der Parameter-Button direkt gedrückt wird, führt eine Fehlbedienung unmittelbar zur Aktivierung der entsprechenden Funktion.

Ein Lernfortschritt, also das effizientere Lösen einer Aufgabe, äußert sich vor allem in der Reduktion der Fehleranzahl und der daraus resultierenden kürzeren Bediendauer. Bei der Anwendung der Konzepte 3 und 4, welche insgesamt fehleranfälliger sind, ist die Lernrate mit knapp 31% etwas höher als dies bei K1 und K2 mit 24% der Fall ist (Abb. 5.13). Somit bieten beide letztgenannten Konzepte jedoch nur in begrenztem Ausmaß eine Bedienung mit höherer Initialleistung an, da die Unterschiede zwischen den Lernkurven insgesamt eher geringfügig sind.

---

<sup>5</sup>Bei optischen Touchscreens sind Drag&Drop-Eingaben besser umsetzbar (Kap. 2.5.1).

Sowohl im Rahmen des PSSUQ (Abb. 5.14) als auch hinsichtlich des Rankings (Tab. 5.13) wird K4 von den Teilnehmern dieser Evaluation als am deutlich zufriedenstellendsten befunden. Aus mehreren qualitativen Äußerungen der Probanden ging hervor, dass dieses Bedienkonzept vor allem aufgrund seiner Einfachheit und der Größe der Schaltflächen als besonders gut befunden wird. Wie in Kapitel 5.2 erklärt wurde, können größere Bedienelemente zwar einfacher und schneller ausgelöst werden, doch geschieht dies auf Kosten der Sehfläche des Patientenbildes.

Auf die Frage hin, was den Probanden wichtiger ist - eine größere Sehfläche oder eine schnellere Bedienung - wurde die Maximierung der Sehfläche als wichtiger erachtet. Dies spricht gegen ein Favorisieren des Konzepts 4 und verdeutlicht den bereits beschriebenen Sachverhalt, dass Endanwender zum Teil widersprüchliche Anforderungen an ein Produkt stellen.

#### **Bewertung der Gebrauchstauglichkeit:**

Um die erste Fragestellung dieser Evaluation, welches Bedienkonzept am gebrauchstauglichsten für den Kontext einer intraoperativen Patientenbildbetrachtung ist, zu beantworten, wird erneut das in Kapitel 4.4.3 erläuterte MAUT-Verfahren angewandt (s. Tab. 5.14).

Attribut	K1	K2	K3	K4
Effektivität	1	1	1	1
Effizienz (t/e)	2,5 (2/3)	3,5 (3/4)	1 (1/1)	3 (4/2)
Zufriedenheit	2	3	1	4
Summe ( $eval(P)$ )	5,5	7,5	3	8

Tabelle 5.14: Bewertung der Gebrauchstauglichkeit nach der MAUT. Allen Bedienkonzepten werden für jedes Attribut Punkte zugeordnet, abhängig von der jeweiligen Position im Vergleich zu den anderen Geräten. Teilen sich zwei oder mehrere Konzepte eine Position in der Reihenfolge, so werden gleich viele Punkte vergeben, wobei sich die Effizienz aus dem Mittelwert der Zeit- und Fehlermessung zusammensetzt.

Bei gleicher Gewichtung der Attribute der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit kann K4 als gebrauchstauglichstes Bedienkonzept betrachtet werden, wobei K2 in Folge der MAUT nur geringfügig schlechter bewertet wird. Wieder sei darauf hingewiesen, dass eine spezifischere Gewichtung der Attribute dieses Ergebnis verändern würde. Im Fall von Anwendungsszenarien, die für Personal oder Patienten sicherheitskritisch sind - Bedienfehler also vermieden werden müssen - würde ein größerer Einfluss der Fehler in der MAUT-Berechnung dazu führen, dass K2 als am gebrauchstauglichsten vorgeschlagen wird. Weil Bedienfehler im vorliegenden Nutzungskon-



text einer intraoperativen MMI jedoch keine direkten Auswirkungen auf die Gesundheit von Patient und Personal haben, kann K4 weiterhin als das am besten geeignete Konzept betrachtet werden.

Für die Klärung der zweiten Fragestellung, inwiefern die Prognosen über die Bediendauer mittels des kombinierten Modells und des KLM mit den Ergebnissen eines Nutzertests übereinstimmen, können die jeweiligen Zeitmessungen direkt im Vergleich betrachtet werden (Abb. 5.12). Deutlich ersichtlich ist, dass mit dem KoM wesentlich zuverlässigere Aussagen über die Bedienung getroffen werden können als dies mit dem KLM der Fall ist. Letzteres Modell ist zu unflexibel und ermöglicht durch die begrenzte Anzahl an Operatoren nur bedingt Interaktionen abzubilden, die nicht auf der Tastatur-Ebene stattfinden. Da beide Modelle keine Fehler bei einer MMI berücksichtigen, erscheint es sinnvoll dessen Prognosen nur mit den Zeitmessungen im jeweils dritten Durchlauf zu vergleichen, da die Fehleranzahl dort am niedrigsten ist. Im Fall von K3 ist somit die Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Nutzertests wesentlich größer, wohingegen sie bei den anderen Konzepten geringer ausfällt. Zwar werden Fehler auf diese Weise weitestgehend kompensiert, doch wird der natürliche Lerneffekt der Probanden beim Durchführen der Aufgabe im Lauf 3 (24-32% Verbesserung) vernachlässigt. Unter Verwendung des Mittelwerts aller Aufgabendurchläufe lässt sich generell eine höhere Übereinstimmung mit den Prognosen des KoM erzielen.

Bei Verwendung dieses Modells muss demnach zwischen Anwendungsfällen unterschieden werden, in denen niedrige Fehlerraten bei einer Bedienung auftreten - in diesem Fall bietet sich der Mittelwert über alle Läufe an - und zwischen Anwendungsfällen, bei denen es zu vielen Bedienfehlern kommt. Um zuverlässigere Prognosen zu erhalten, müssten im zweiten Fall beim Vergleich mit dem letzten Lauf des Aufgabenzyklus der Lerneffekt im Modell durch Multiplikation mit einer Variablen ( $\alpha$ ) mitberücksichtigt werden.



## 6 Fazit

Das Verwenden digitaler medizinischer Patientenbilder nimmt mit stetig fortschreitender Entwicklung der bildgebenden Verfahren wie der MRT oder PET einen immer höheren Stellenwert in der Medizin ein. Chirurgische Eingriffe werden zum Großteil auf solchen Bildern aufbauend geplant - intraoperativ erweisen sich Patientenbilder als nützliche und häufig verwendete Informationsquelle v.a. zur Entscheidungsfindung, zur Visualisierung und zur Navigation. Um von diesen Informationen im Operationssaal Gebrauch zu machen, muss der bilddarstellende Computer über dessen Eingabegeräte bedient werden - dabei ist die Mensch-Maschine-Interaktion jedoch bestimmten Limitationen unterworfen, allen vorweg der Einhaltung hygienischer Richtlinien, um den Patienten keiner Infektionsgefahr auszusetzen.

Weil es kaum generalisierbare Studien über die intraoperative Interaktion zwischen Nutzer und Maschine bei einer Bildbetrachtung und -manipulation gibt, wurde diesbezüglich eine Untersuchung der aktuellen Situation in deutschen OPs durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass erhebliche Abweichungen zwischen der Ist- und der Soll-Situation hinsichtlich der intraoperativen Verwendung von Patientenbildern bestehen. Während die Bedienung des bilddarstellenden Computers zum Großteil über mündliche Anweisungen des Operateurs an einen Assistenten im nicht sterilen Bereich realisiert wird, wollen Chirurgen eine Interaktion mit diesem Gerät v.a. aus Gründen der Zeiteinsparung direkt ausführen. Im Gegensatz zur ständig steigenden Anzahl an Funktionen und Features, die moderne Visualisierungs-Softwares bieten, wird tatsächlich nur ein reduzierter Funktionsumfang während des Eingriffs am Patienten benutzt.

Für eine Interaktion zwischen Mensch und Computer können prinzipiell mehrere Eingabegeräte wie (Laser-)Tastatur, Maus, Sprachsteuerung und Touchscreen verwendet werden, die sich unterschiedlich gut für den beschriebenen Nutzungskontext der intraoperativen Bildbetrachtung eignen. Um zu klären, welches dieser Geräte am gebrauchstauglichsten ist und ob eine Computerbedienung generell schneller durch den Chirurgen direkt oder indirekt über einen Assistenten zu erreichen ist, wurde eine Evaluation durchgeführt. Daraus resultierend wird offensichtlich, dass die Wahl des Eingabegeräts sehr großen Einfluss auf die Interaktionsdauer hat und wertvolle

Zeiteinsparungen vor allem unter Verwendung eines Touchscreens erzeugt werden können. Mit diesem Gerät kann insgesamt am effektivsten, am effizientesten und am zufriedenstellendsten gearbeitet werden. Vor dem Hintergrund, dass der OP bereits ein mit Instrumenten und Materialien überladener Arbeitsplatz ist, eignet sich der Touchscreen ebenfalls aufgrund seines geringen Platzbedarfs, da Informationen gleichzeitig ein- und ausgegeben werden. Ob der bilddarstellende Computer direkt oder über einen Assistenten indirekt bedient wird, hat bei einfachen und kurzzeitigen Interaktionen kaum Einfluss auf die Bediendauer - erst mit zunehmender Interaktionskomplexität führt ein Übertragen der Kontrolle an den Chirurgen zu signifikanten Zeiteinsparungen.

Moderne Visualisierungs-Softwares sind nur selten auf die Bedienung durch einen Touchscreen ausgelegt und teilweise mit solchen Eingabegeräten überhaupt nicht steuerbar. Aus diesem Grund wurden 4 Bedienkonzepte erstellt, die für den Kontext der intraoperativen Bildbetrachtung aus ergonomischer und anthropometrischer Sicht sowie hinsichtlich ihres Funktionsumfangs optimiert wurden. Sowohl in der modellbasierten Quantifizierung als auch in einer abschließenden Evaluation mit Nutzern hat sich gezeigt, dass möglichst einfach und schnell zu bedienende Konzepte am gebrauchstauglichsten sind, verglichen mit solchen, deren Bedienung zugunsten der Sehflächenmaximierung des Patientenbildes komplexer ausfällt.

Am erfolgreichen Ablauf einer MMI sind sowohl Mensch als auch Maschine gleichermaßen beteiligt. Für eine fortführende Ausformulierung des Optimierungsansatzes dieser Arbeit muss dementsprechend an beiden Seiten dieser Interaktion angeknüpft werden. Im Hinblick auf die Maschine können unterschiedliche Erweiterungen der vorgeschlagenen Bedienkonzepte umgesetzt werden wie zum Beispiel die Möglichkeit einer Software-Individualisierung. Auf diese Weise hat der Nutzer die Möglichkeit, das Konzept seinen persönlichen Bediengewohnheiten anzupassen, beispielsweise hinsichtlich des angebotenen Funktionsumfangs oder bezüglich seiner Körperhaltung beim Arbeiten (Links-, Rechtshänder). Im Fall eines Nutzerwechsels ist jedoch zu bedenken, dass die Profileinstellungen gegebenenfalls verändert werden müssen, was das Konzept dadurch vor allem im dynamischen Arbeitsfeld des OPs unflexibler macht und es sich somit vom Bedienverhalten des „plug-and-play“ entfernt. Die Implementierung von Verfahren der Umgebungsintelligenz (Ambient Intelligence) kann einen Teil dieser Dynamik kompensieren, etwa durch das Anpassen des akustischen Feedbacks an den Hintergrundgeräuschpegel oder durch die Adaption der Bildschirmhelligkeit an die Umgebungsbeleuchtung. Dennoch sei erwähnt, dass die Fehleranfälligkeit eines technischen Systems mit zunehmender Komplexität

---

zunimmt. Weil der Eingriff am Patienten höchste Priorität hat, wird eine ergonomische Anordnung der Ein- und Ausgabegeräte im OP weniger berücksichtigt. Ein weiterer Optimierungsansatz wäre dementsprechend die Umsetzung der erarbeiteten anthropometrischen Positionierung des Touchscreen nahe dem Nutzer.

Im Hinblick auf den Menschen muss bei einer MMI gewährleistet sein, dass dieser einwandfrei mit der Visualisierungs-Software umgehen kann. Da im OP erhebliche Mängel bezüglich der Bedienung und der Erfahrung mit vielen Geräten identifiziert wurden, müssen für das Personal adäquate Schulungsmaßnahmen ergriffen werden. Findet die intraoperative MMI indirekt über einen Assistenten auf Anweisung des Operateurs statt, gilt es darüberhinaus, die Kommunikation unter den Personen im OP bzw. zwischen Chirurg und Assistent zu verbessern, um eine Bedienung möglichst schnell und fehlerfrei umzusetzen. Verbale Information könnten durch das Verwenden standardisierter Anweisungen („Zoom rein“) wie beim Arbeiten mit einer Sprachsteuerung erfolgen. Eine Rückmeldung des Empfängers in Form des Dialogprinzips der Disputatio („Zoom rein ausgeführt“) ermöglicht ein schnelles Identifizieren und Korrigieren aufgetretener Kommunikationsfehler.

Unter Berücksichtigung des auf den Ergebnissen dieser Arbeit aufbauenden Optimierungsansatzes kann der Workflow der intraoperativen Patientenbildbetrachtung und -manipulation effektiver, effizienter und zufriedenstellender gestaltet werden. Eine konsequente Fortführung dieser Arbeit würde durch die Entwicklung eines abgeleiteten funktionalen Software-Prototypen geschehen, der in das krankenhauserne PACS integriert und im Rahmen einer klinischen Studie untersucht wird.



# Literaturverzeichnis

- [AAAG00] ARENSEN, R.L. ; ANDRIOLE, K.P. ; AVRIN, D.E. ; GOULD, R.G.: Computers in Imaging and Health Care: Now and in the Future. In: *J Digit Imaging* 13 (2000), Nr. 4, S. 145–156
- [Ait82] AITKEN, R.J.: Quantitative noise analysis in a modern hospital. In: *Arch Environ Health* 37 (1982), Dec, Nr. 6, S. 361–364
- [And07] ANDERSON, J.R.: *Kognitive Psychologie*. 6. Auflage. Hungary : Spektrum Akademischer Verlag, 2007
- [AS68] ATKINSON, R.C. ; SHIFFRIN, R.M.: Human memory: a proposed system and its control processes. In: *The Psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*. New York : Academic Press, 1968
- [AZ99] ACCOT, J. ; ZHAI, S.: Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: An application of the steering law. In: *Proceedings of ACM CHI 1999 Conference on Human Factors in Computing Systems* (1999), S. 466–472
- [Bac04] BACKHAUS, C.: *Entwicklung einer Methode zur Analyse und Bewertung der Gebrauchstauglichkeit von Medizintechnik. PROMEDIKS - Prozessorientierte Medizintechnik in klinischen Systemen*. Berlin, Deutschland, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2004
- [BCCW06] BUCKLE, P. ; CLARKSON, P.J. ; COLEMAN, R. ; WARD, J.: Patient safety, systems design and ergonomics. In: *Appl Ergon* 37 (2006), Nr. 4, S. 491–500
- [BD02] BORTZ, J. ; DÖRING, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 3. überarbeitete Auflage. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2002
- [BE93] BORST, A. ; EGELHAAF, M.: Detecting visual motion: theory and models. In: *Rev Oculomot Res* 5 (1993), S. 3–27
- [BFS85] BAUM, A. ; FISHER, J. ; SINGER, J.: *Social psychology*. New York : Random House, 1985
- [BH68] BADDELEY, A.D. ; HITCH, G.: Working memory. In: *The Psychology of Learning and Motivation*. New York : Academic Press, 1968
- [Bil96] BILDSCHIRMARBEITSVERORDNUNG: Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten. In: *Bundesrechtsverordnung, Bundesrepublik Deutschland* (1996), Dezember

- [Bit06] BITTERMANN, N.: Technologies and solutions for data display in the operating room. In: *J Clin Monitor Comp* 20 (2006), Nr. 3, S. 165–173
- [Ble92] BLEYER, S.: Medizinisch-technische Zwischenfälle in Krankenhäusern und ihre Verhinderung. In: ANNO, O. (Hrsg.) ; HARTUNG, C. (Hrsg.): *Mitteilungen des Instituts für Biomedizinische Technik und Krankenhaustechnik der Medizinischen Hochschule Hannover*. Hannover : Fachverlag für Krankenhaustechnik, 1992
- [BMD77] BENTLEY, S. ; MURPHY, F. ; DUDLEY, H.: Perceived noise in surgical wards and an intensive care area: an objective analysis. In: *Br Med J* 6101 (1977), Dec, Nr. 2, S. 1503–1506
- [BP08] BALDUS, T. ; PATTERSON, P.: Usability of pointing devices for office applications in a moving off-road environment. In: *Appl Ergon* 39 (2008), Nr. 6, S. 671–677
- [Bro58] BROADBENT, D.E.: *Perception and communication*. New York : Pergamon, 1958
- [Bro06] BROCKHAUS, F. A.: *Brockhaus Enzyklopädie*. Bd. 15. 21. Auflage. Mannheim : Brockhaus, 2006
- [Cam97] CAMPBELL, N.A.: *Biologie*. Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 1997
- [Cat85] CATTEL, J.M.: Über die Zeit der Erkennung und Benennung von Schriftzeichen, Bildern und Farben. In: *Phil Stud* 2 (1885), S. 635–650
- [Cha92] CHARWAT, H.J.: *Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation*. München : Oldenbourg, 1992
- [Cho57] CHOMSKY, N.: *Syntactic Structures*. Den Haag : Mouton, 1957
- [CKM04] CLEARY, K. ; KINSELLA, A. ; MUN, S.K.: OR 2020 workshop report: Operating room of the future. Chapter 2: Operational Efficiency and Workflow. In: *Workshop report, 18-20 March 2004* 1268 (2004), S. 15–23
- [CM99] CRAVEN, R.M. ; MCINDOE, A.K.: Advanced Devices for the Operating Room of the Future. In: *Brit J Anaesth* 83 (1999), Nr. 5, S. 747–749
- [CMN80] CARD, S. ; MORAN, T.P. ; NEWELL, A.: The Keystroke-Level Model for User Performance Time With Interactive Systems. In: *Communications of the ACM* 23 (1980), Nr. 7, S. 396–410
- [CMN83] CARD, S.K. ; MORAN, T.P. ; NEWELL, A.: *The psychology of human-computer interaction*. Hillsdale, N.J. : Erlbaum, 1983
- [Cro74] CROMER, A.H.: *Physics for the life sciences*. New York : McGraw Hill, 1974
- [Dah06] DAHM, M.: *Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion*. München : Pearson Studium, 2006



- [DGO<sup>+</sup>95] DONCHIN, Y. ; GOPHER, D. ; OLIN, M. ; BADIHI, Y. ; BIESKY, M. ; SPRUNG, C.L. ; PIZOV, R. ; COTEV, S.: A look into the nature and causes of human errors in the intensive care unit. In: *Crit Care Med* 23 (1995), Nr. 2, S. 294–300
- [DIN05] DIN 33042 Teil 2: Ergonomie. In: *DIN 33042 - Körpermaße des Menschen* (2005)
- [DIN08] DIN 1946 Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens. In: *DIN 1946 - Raumluftechnik* (2008)
- [DMT02] DREYER, K.J. ; MEHTA, A. ; THRALL, J.H.: *PACS: a guide to the digital revolution*. New York : Springer, 2002
- [DR99] DUMAS, J.S. ; REDISH, J.C.: *A Practical Guide to Usability Testing*. Bristol, UK : Intellect, 1999
- [DW08] DUL, J. ; WEERDMEESTER, B.: *Ergonomics for Beginners: A quick reference guide*. 3. Ausgabe. New York : CRC Press, 2008
- [EEW92] ENGLERT, F. ; EULER, S. ; WOLF, D.: Zur Variabilität sprachlicher Äußerungen in der sprecherunabhängigen Einzelworterkennung. In: MANGOLD, H. (Hrsg.): *Sprachliche Mensch-Maschine-Kommunikation*. München : Oldenbourg, 1992
- [Eul06] EULER, S.: *Grundkurs Spracherkennung*. 1. Edition. Wiesbaden : Vieweg, 2006
- [Fau03] FAULKNER, L.: Beyond the five-user assumption: Benefits of increased sample sizes in usability testing. In: *Behav Res Methods Instrum Comput* 35 (2003), Nr. 3, S. 379–383
- [Fel92] FELLBAUM, K.: Anwendungsaspekte der sprachlichen Mensch-Maschine-Kommunikation. In: MANGOLD, H. (Hrsg.): *Sprachliche Mensch-Maschine-Kommunikation*. München : Oldenbourg, 1992
- [Fit54] FITTS, P.M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. In: *J Exp Psychol* 47 (1954), Nr. 6, S. 381–391
- [FW73] FALK, S.A. ; WOODS, N.F.: Hospital noise-levels and potential health hazards. In: *N Engl J Med* 289 (1973), Oct, Nr. 15, S. 774–781
- [GHA<sup>+</sup>90] GILLAN, D.J. ; HOLDEN, K. ; ADAM, S. ; RUDISILL, M. ; MAGEE, L.: How does Fitts' Law fit pointing and dragging? In: *Proceedings of the CHI'90 Conference on Human factors in computing systems* (1990), S. 227–234
- [Gib50] GIBSON, J.J.: *Perception of the visual world*. Boston : Houghton, 1950

- [GJA93] GRAY, W.D. ; JOHN, B.E. ; ATWOOD, M.E.: Project Ernestine: Validating a GOMS analysis for predicting and explaining real-world task performance. In: *Hum-Comput Interact* 8 (1993), Nr. 3, S. 237–309
- [Glo80] GLOAG, D.: Noise: hearing loss and psychological effects. In: *Br Med J* 281 (1980), Nov, Nr. 6251, S. 1325–1327
- [Gro06] GROSSART, B.: Operative Medizin. In: DASCHNER, F. (Hrsg.) ; DETTENKOFER, M. (Hrsg.) ; FRANK, U. (Hrsg.) ; SCHERRER, M. (Hrsg.): *Praktische Krankenhaushygiene und Umweltschutz*. Heidelberg : Springer, 2006
- [GS72] GLASS, D.C. ; SINGER, J.E.: *Urban stress: Experiments on noise and social stressors*. New York : Academic Press, 1972
- [Har84] HARRIS, D.H.: Human factors success stories. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 28 (1984), Nr. 1, S. 1–5
- [Har96] HARRIS, R.L.: *Information Graphic: A Comprehensive Illustrated Reference*. Atlanta, Georgia : Management Graphics, 1996
- [HCS<sup>+</sup>06] HERWALDT, L.A. ; CULLEN, J.J. ; SCHOLZ, D. ; FRENCH, P. ; ZIMMERMAN, M.B. ; PFALLER, M.A. ; WENZEL, R.P. ; PERL, T.M.: A prospective study of outcomes, healthcare resource utilization, and costs associated with postoperative nosocomial infections. In: *Infect Control Hosp Epidemiol* 27 (2006), Nr. 12, S. 1291–1289
- [Hic52] HICK, W.E.: On the rate of gain of information. In: *Q J Exp Psychol* 4 (1952), S. 11–26
- [HMCB00] HOLLANDS, J.G. ; MCFADDEN, S. ; CASSIDY, H.A. ; BOOTHBY, R.: Visual Search Performance on LCD and CRT Displays: An Experimental Comparison. In: *Society for Information Display (SID) International Symposium Digest of Technical Papers* 31 (2000), Nr. 1, S. 292–295
- [Hol82] HOLAHAN, C.J.: *Environmental psychology*. New York : Random House, 1982
- [HPMB02] HOLLANDS, J.G. ; PARKER, H.A. ; MCFADDEN, S. ; BOOTHBY, R.: LCD versus CRT Displays: A Comparison of Visual Search Performance for Colored Symbols. In: *Hum Factors* 44 (2002), Nr. 2, S. 210–221
- [HT90] HODGE, B. ; THOMPSON, J.F.: Noise pollution in the operating theatre. In: *Lancet* 335 (1990), S. 891–894
- [IEC02] ISO/IEC Guide 73. In: *Risiko-Management - Wörterbuch - Leitfaden für die Berücksichtigung von Termini zum Risiko-Management in Normen* (2002)

- [Int09] INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION: *What is Ergonomics*. URL: [http://www.iea.cc/browse.php?contID=what\\_is\\_ergonomics](http://www.iea.cc/browse.php?contID=what_is_ergonomics), Stand: 18. August 2009
- [ISO98] DIN EN ISO 9241, Teil 5. In: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Anforderungen an Arbeitsplatzgestaltung und Körperhaltung* (1998)
- [ISO99a] DIN EN ISO 9241, Teil 11. In: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit - Leitsätze* (1999)
- [ISO99b] DIN EN ISO 9241, Teil 6. In: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit - Leitsätze für die Arbeitsumgebung* (1999)
- [ISO01] ISO/IEC 9126, Teil 1. In: *Software engineering - Product quality - Quality model* (2001)
- [ISO03] ISO/IEC 9126, Teil 2. In: *Software engineering - Product quality - External metrics* (2003)
- [JK96] JOHN, B.E. ; KIERAS, D.E.: The GOMS Family of User Interface Analysis Techniques: Comparison and Contrast. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 3 (1996), Nr. 4, S. 320–351
- [JM07] JANNIN, P. ; MORANDI, X.: Surgical models for computer-assisted neurosurgery. In: *Neuroimage* 37 (2007), Nr. 3, S. 783–791
- [JN89] JOHN, B.E. ; NEWELL, A.: Cumulating the science of HCI: from S-R compatibility to transcription typing. In: *Proceedings of the CHI'89 Conference on Human Factors in Computing Systems* (1989), S. 109–114
- [JPPR<sup>+</sup>07] JALOTE-PARMAR, A. ; PATTYNAMA, P.M.T. ; RIDDER, H. de ; GOOSSENS, R.H.M. ; FREUDENTHAL, A. ; SAMSET, E.: Surgical Workflow Analysis: Identifying Requirements for Surgical Information Systems. In: PIKAAR, R. (Hrsg.) ; KONINGSVELD, E. (Hrsg.) ; SETTELS, P. (Hrsg.): *Meeting Diversity in Ergonomics*. Amsterdam : Elsevier, 2007
- [JVM<sup>+</sup>02] JOHN, B.E. ; VERA, A. ; MATESSA, M. ; FREED, M. ; REMINGTON, R.: Automating CPM-GOMS. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Changing our world, changing ourselves* (2002), S. 147–154
- [Kar94] KARAT, C.M.: A Business Approach to Usability Cost Justification. In: BIAS, R.G. (Hrsg.) ; MAYHEW, D.J. (Hrsg.): *Cost Justifying Usability*. Boston : Morgan Kaufmann, 1994
- [KHW<sup>+</sup>09] KOLB, A. ; HOFMANN, M. ; WEHRL, H.F. ; REIMOLD, M. ; JUDENHOFER, M.S. ; LICHY, M.P. ; BOSS, A. ; SCHLEMMER, H. ; PICHLER, B.J.:

- Evaluation of the Clinical MR/PET System. In: *2. Forschungstreffen UKT - Siemens MED* (2009)
- [Kie88] KIERAS, D.E.: Towards a practical GOMS model methodology for user interface design. In: HELANDER, M. (Hrsg.): *Handbook of Human-Computer Interaction*. Amsterdam : Elsevier, 1988
- [KKT94] KAM, P.C. ; KAM, A.C. ; THOMPSON, J.F.: Noise pollution in the anaesthetic and intensive care environment. In: *Anaesthesia* 49 (1994), Nr. 11, S. 982–986
- [Kon05] KONINGSVELD, E.A.P.: Participation for understanding: An interactive method. In: *J Safety Res* 36 (2005), Nr. 3, S. 231–236
- [Kon06] KONINGSVELD, E.A.P.: The costs incurred by poor working conditions - A burden to society, a prospect to companies. In: *Proceedings of the European Productivity Conference* (2006)
- [Kon08] KONECZNY, S.: *Erfassung und Analyse von Schwachstellen in der Funktionsstelle OP deutscher Krankenhäuser*. Tübingen, Deutschland, Universität Tübingen, Dissertation, 2008
- [Kry70] KRYTER, K.D.: *The effects of noise on man*. New York : Academic Press, 1970
- [KSG79] KELSO, J.A.S. ; SOUTHARD, D. ; GOODMAN, D.: On the nature of human interlimb coordination. In: *Science* 203 (1979), S. 1029–1031
- [KVN03] KARAT, C.M ; VERGO, J. ; NAHAMOO, D.: Conversational Interface Technologies. In: JACKO, J.A. (Hrsg.) ; SEARS, A. (Hrsg.): *The Human-Computer Interaction Handbook*. Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates, 2003
- [KVW06] KAMPF, G. ; VOSS, A. ; WIDMER, A.F.: Die chirurgische Händedesinfektion zwischen Tradition und Fortschritt. In: *Hyg Med* 31 (2006), Nr. 7, S. 316–321
- [Lam68] LAMING, D.R.J.: *Information theory of choice-reaction times*. London : Academic Press, 1968
- [Lar95] LARSON, E.L.: APIC guideline for handwashing and hand antisepsis in health care settings. In: *Am J Infect Control* 23 (1995), Nr. 4, S. 251–269
- [Lem06] LEMKE, H.U.: The operating room and the need for an IT infrastructure and standards. In: *Int J CARS* 1 (2006), Nr. 3, S. 117–121
- [Lew95] LEWIS, J.R.: IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaires: Psychometric Evaluation and Instructions for Use. In: *Int J Hum-Comput Int* 7 (1995), Nr. 1, S. 57–78

- [LEW<sup>+</sup>04] LINGARD, L. ; ESPIN, S. ; WHYTE, S. ; REGEHR, G. ; BAKER, G.R. ; REZNICK, R. ; BOHNEN, J. ; ORSER, B. ; DORAN, D. ; GROBER, E.: Communication failures in the operating room: an observational classification of recurrent types and effects. In: *Qual Saf Health Care* 13 (2004), Nr. 5, S. 330–334
- [LF02] LOEB, R.G. ; FITCH, W.T.: A laboratory evaluation of an auditory display designed to enhance intraoperative monitoring. In: *Anesth Analg* 94 (2002), S. 362–368
- [LTK<sup>+</sup>04] LEMKE, H.U. ; TRANTAKIS, C. ; KÖCHY, K. ; MÜLLER, A. ; STRAUSS, G. ; MEIXENSBERGER, J.: Workflow analysis for mechatronic and imaging assistance in head surgery. In: *Computer Assisted Radiology and Surgery. Proceedings of the 18th International Congress and Exhibition* 1268 (2004), S. 830–835
- [LW09] LANGE, W. ; WINDEL, A.: *Kleine Ergonomische Datensammlung*. Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin : TÜV Media, 2009 (13. aktualisierte Auflage)
- [Mac92] MACKENZIE, I.S.: Fitts' Law as a Research and Design Tool in Human-Computer-Interaction. In: *Hum-Comput Interact* 7 (1992), S. 91–139
- [May99] MAYHEW, D.J.: *The usability engineering lifecycle : a practitioner's handbook for user interface design*. San Francisco : Morgan Kaufmann, 1999
- [Mil56] MILLER, G.A.: The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. In: *Psychol Rev* 63 (1956), S. 81–97
- [MJ07] MACKENZIE, I.S. ; JUSOH, S.: An Evaluation of Two Input Devices for Remote Pointing. In: *Engineering for Human-Computer Interaction*. Berlin : Springer, 2007
- [MKGS06] MATERN, U. ; KONECZNY, S. ; GERLINGS, T. ; SCHERRER, M.: Arbeitsbedingungen und Sicherheit am Arbeitsplatz OP. In: *Dtsch Arztebl* 103 (2006), Nr. 47, S. 3187–3192
- [MM96] MORRIS, R.W. ; MONTANO, S.R.: Response times to visual and auditory alarms during anaesthesia. In: *Anaesth Intensive Care* 24 (1996), S. 682–684
- [MNK99] MENOZZI, M. ; NAEPFLIN, U. ; KRUEGER, H.: CRT versus LCD: A pilot study on visual performance and suitability of two display technologies for use in office work. In: *Displays* 20 (1999), Nr. 1, S. 3–10
- [MO03] MCCANNON, M. ; O'NEAL, P.V.: Results of a national survey indicating information technology skills needed by nurses at time of entry into the work force. In: *J Nurs Educ* 42 (2003), Nr. 8, S. 337–340

- [MSB91] MACKENZIE, I.S. ; SELLEN, A. ; BUXTON, W.A.S.: A comparison of input devices in element pointing and dragging tasks. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Reaching through technology* (1991), S. 161–166
- [Nie92] NIELSEN, J.: Finding usability problems through heuristic evaluation. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (1992), S. 373–380
- [Nie94] NIELSEN, J.: *Usability Engineering*. San Francisco : Morgan Kaufmann, 1994
- [Nie09] NIELSEN, J.: *Why You Only Need to Test with 5 Users*. URL: <http://www.useit.com/alertbox/20000319.html>, Stand: 24. August 2009
- [ODK97] OVIATT, S. ; DEANGELI, A. ; K., Kuhn: Integration and synchronization of input modes during multimodal human-computer interaction. In: *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems CHI'97* (1997), S. 415–422
- [OS86] OLSON, P.L. ; SIVAK, M.: On the nature of human interlimb coordination. In: *Hum Factors* 28 (1986), Feb, S. 91–96
- [Ovi99] OVIATT, S.: Ten myths of the multimodal interaction. In: *Communications of the ACM* 42 (1999), Nr. 12, S. 74–81
- [PAB<sup>+</sup>09] PANAIT, L. ; AKKARY, E. ; BELL, R.L. ; ROBERTS, K.E. ; DUDRICK, S.J. ; DUFFY, A.J.: The Role of Haptic Feedback in Laparoscopic Simulation Training. In: *J Surg Res* (2009)
- [Pat03] PATKIN, M: What surgeons want in operating rooms. In: *Minim Invasive Ther Allied Technol* 2003 (2003), Nr. 12, S. 256–262
- [PCA<sup>+</sup>09] PARIKH, S.S. ; CHAN, S. ; AGRAWAL, S.K. ; HWANG, P.H. ; SALISBURY, C.M. ; RAFII, B.Y. ; VARMA, G. ; SALISBURY, K.J. ; BLEVINS, N.H.: Integration of patient-specific paranasal sinus computed tomographic data into a virtual surgical environment. In: *Am J Rhinol Allergy* 23 (2009), Nr. 4, S. 442–447
- [PSD80] POSNER, M.I. ; SNYDER, C.R.R. ; DAVIDSON, B.J.: Attention and the detection of signals. In: *J Exp Psychol Gen* 109 (1980), S. 160–174
- [PSGD05] PUNT, M.M. ; STEFELS, C.N. ; GRIMBERGEN, C.A. ; DANKELMAN, J.: Evaluation of voice control, touch panel control and assistant control during steering of an endoscope. In: *Minim Invasive Ther Allied Technol* 14 (2005), Nr. 3, S. 181–187
- [PSP<sup>+</sup>96] POMERANTZ, S.M. ; SIEGEL, E.L. ; PROTOPAPAS, Z. ; B.I., Reiner ; PICKAR, E.R.: Experience and Design Recommendations for Picture Archiving an Communication Systems in the Surgical Setting. In: *J Digit Imaging* 9 (1996), Nr. 3, S. 123–130

- [Ras00] RASKIN, J.: *The Humane Interface. New Directions for Designing Interactive Systems*. Crawfordsville : Addison Wesley, 2000
- [RL92] RAY, C.D. ; LEVINSON, R.: Noise pollution in the operating room: a hazard to surgeons, personnel, and patients. In: *J Spinal Disord* 5 (1992), Dec, Nr. 4, S. 485–488
- [Roh78] ROHRMANN, B.: Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung. In: *Z Sozialpsychol* 9 (1978), S. 222–245
- [Rud06] RUDLOF, C.: *Handbuch Software-Ergonomie - Usability Engineering*. 2. überarbeitete Auflage. Tübingen : Unfallkasse Post und Telekom, 2006
- [San06] SANDERSON, P.: The multimodal world of medical monitoring displays. In: *Appl Ergon* 37 (2006), Nr. 4, S. 500–512
- [SB72] SHAPIRO, R.A. ; BALAND, T.: Noise in the operating room. In: *N Engl J Med* 287 (1972), Nr. 24, S. 1236–1237
- [Sch89] SCHINDLER, H.: *Arbeitsgebiet Operationssaal*. 2. Auflage. Stuttgart : Ferdinand Enke Verlag, 1989
- [Shn00] SHNEIDERMAN, B.: The limits of speech recognition. In: *Communications of the ACM* 43 (2000), Nr. 9, S. 63–65
- [SKA<sup>+</sup>07] STEFELS, C.N. ; KNEISSNER, J. ; AARNINK, R.G. ; KAUFHOLZ, P. ; GRIMBERGEN, C.A. ; DANKELMAN, J.: Equipment control in a sterile environment using the Gyromouse and a new interface, the user interface (UI) wand. In: *Minim Invasive Ther Allied Technol* 16 (2007), Nr. 3, S. 163–172
- [Sme05] SMEDLEY, A.: The importance of informatics competencies in nursing: an Australian perspective. In: *Comput Inform Nurs* 23 (2005), Nr. 2, S. 106–110
- [SMT<sup>+</sup>06] SEXTON, J.B. ; MAKARY, M.A. ; TERSIGNI, A.R. ; PRYOR, D. ; HENDRICH, A. ; THOMAS, E.J. ; HOLZMUELLER, C.G. ; KNIGHT, A.P. ; WU, Y. ; PRONOVOST, P.J.: Teamwork in the operating room: frontline perspectives among hospitals and operating room personnel. In: *Anesthesiology* 105 (2006), Nr. 5, S. 877–884
- [SNC<sup>+</sup>95] SCHOMAKER, L. ; NIJTMANS, J. ; CAMURRI, A. ; MORASSO, P. ; BENOIT, C. ; GUIARD-MARIGNY, T. ; GOF, B. L. ; ROBERT-RIBES, J. ; ADJODANI, A. ; DEFEE, I. ; MUNCH, S. ; HARTUNG, K. ; BLAUERT, J.: A Taxonomy of Multimodal Interaction in the Human Information Processing System: Report of the Esprit Project 8579 MIAMI / Nijmegen University, NICI. 1995. – Forschungsbericht

- [SOBS08] STOLLE, H. ; OLAYA, J.C. ; BUSCHBECK, S. ; SAHM, H.: Technical solutions for a full-resolution auto-stereoscopic 2D/3D display technology. In: *Proceedings of the SPIE. Stereoscopic Displays and Applications XIX* 6803 (2008), S. 6803 0Q
- [SP97] SELHUBER, L. ; PARKER, A.: Optical characterisation of LCDs: Pitfalls and solutions. In: MACDONALD, L.W. (Hrsg.) ; LOWE, A.C. (Hrsg.): *Display systems*. London : Wiley, 1997
- [Squ87] SQUIRE, L.R.: *Memory and brain*. New York : Oxford University Press, 1987
- [SR06] SCHERRER, M ; RÜDEN, H.: Technische Hygiene. In: DASCHNER, F. (Hrsg.) ; DETTENKOFER, M. (Hrsg.) ; FRANK, U. (Hrsg.) ; SCHERRER, M. (Hrsg.): *Praktische Krankenhaushygiene und Umweltschutz*. Heidelberg : Springer, 2006
- [SRP07] SHARP, H. ; ROGERS, Y. ; PREECE, J.: *Interaction design: beyond human-computer-interaction*. 2. Auflage. Chichester : Wiley, 2007
- [SS03] SUZUKI, N. ; SUZUKI, S.: Surgery Simulation System with Haptic Sensation and Modeling of Elastic Organ That Reflect the Patients' Anatomy. In: *Surgery Simulation and Soft Tissue Modeling*. Berlin : Springer, 2003
- [Tre64] TREISMAN, A.M.: Monitoring and storage of irrelevant messages and selective attention. In: *J Verbal Learn Verbal Behav* 3 (1964), S. 449–459
- [Tro01] TROTZKE, I.: Die Humanisierung multimodaler HMI - die Bedeutung der Modalität und Situation der Mensch-Maschine-Interaktion. In: *2. IIR-Fachkongress „E-Car Infotainmentplattform & Telematikdienste für das Multimedia Auto“* (2001)
- [TSKI00] TRACTINSKY, N. ; SHOVAL-KATZ, A. ; IKAR, D.: What is Beautiful is Usable. In: *Interact Comput* 13 (2000), Nr. 2, S. 127–145
- [VDI00] VDI/VDE 3850 Teil 1. In: *VDI/VDE 3850 - Nutzergerechte Gestaltung von Bediensystemen für Maschinen* (2000)
- [VDI02] VDI/VDE 3850 Teil 2: Interaktionsgeräte für Bildschirme. In: *VDI/VDE 3850 - Nutzergerechte Gestaltung von Bediensystemen für Maschinen* (2002)
- [VDI04] VDI/VDE 3850 Teil 3: Dialoggestaltung für Touchscreens. In: *VDI/VDE 3850 - Nutzergerechte Gestaltung von Bediensystemen für Maschinen* (2004)
- [VDI06] VDI/VDE 6060. In: *VDI/VDE 6060 - Hygiene-Anforderungen an Raumlufttechnische Anlagen und -Geräte* (2006)



- [VGS<sup>+</sup>97] VISARIUS, H. ; GONG, J. ; SCHEER, C. ; HARALAMB, S. ; NOLTE, L.P.: Man-machine interfaces in computer assisted surgery. In: *Comput Aided Surg* 2 (1997), Nr. 2, S. 102–107
- [Vir92] VIRZI, R.A.: Refining the test phase of usability evaluation: How many subjects is enough? In: *Hum Factors* 34 (1992), Nr. 4, S. 457–468
- [VRHD07] VILLENEUVE, J. ; REMIJN, J. S.L.M.and L. S.L.M.and Lu ; HIGNETT, S. ; DUFFY, A.E.: Ergonomic Intervention in hospital architecture. In: PIKAAR, R. (Hrsg.) ; KONINGSVELD, E. (Hrsg.) ; SETTELS, P. (Hrsg.): *Meeting Diversity in Ergonomics*. Amsterdam : Elsevier, 2007
- [Wac99] WACHSMUTH, I.: Mensch-Maschine-Kommunikation mit Gestik und Sprache. In: MIETHLING, W.D. (Hrsg.): *Sport und Informatik VI*. Köln : Sport und Buch Strauss, 1999
- [War79] WARD, W.D.: General auditory effects of noise. In: *Otolaryngol Clin North Am* 12 (1979), Aug, Nr. 3, S. 473–492
- [WE86] WINTERFELDT, D. von ; EDWARDS, W.: *Decision Analysis and Behavioral Research*. Cambridge : Cambridge University Press, 1986
- [Wer12] WERTHEIMER, M.: Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. In: *Z Psychol* 61 (1912), S. 161–265
- [WHR<sup>+</sup>06] WILBRIGHT, W.A. ; HAUN, D.E. ; ROMANO, T. ; KRUTZFELDT, T. ; FONTENOT, C.E. ; NOLAN, T.E.: Computer use in an urban university hospital: technology ahead of literacy. In: *Comput Inform Nurs* 24 (2006), Nr. 21, S. 37–43
- [Wik09a] WIKIPEDIA: *Auge*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Auge>, Stand: 29. September 2009
- [Wik09b] WIKIPEDIA: *RGB-Farbraum*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/RGB-Farbraum>, Stand: 29. September 2009
- [WM07] WISCHNEWSKI, N. ; MIELKE, M.: Prävention postoperativer Infektionen im Operationsgebiet. Empfehlung der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention beim Robert Koch-Institut. In: *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 50 (2007), Nr. 3, S. 377–393
- [WS04] WATSON, M. ; SANDERSON, P.: Sonification supports eyes-free respiratory monitoring and task time-sharing. In: *Hum Factors* 46 (2004), S. 497–517
- [WSE<sup>+</sup>08] WACHS, J.P. ; STERN, H.I. ; EDAN, Y. ; GILLAM, M. ; HANDLER, J. ; FEIED, C. ; SMITH, M.: A Gesture-based Tool for Sterile Browsing of Radiology Images. In: *J Am Med Inform Assoc* 15 (2008), Nr. 3, S. 321–323

- [YLHM01] YOUNG, P.M.C. ; LEUNG, R.M.W. ; HOA, L.M. ; MCGHEE, S.M.: An evaluation of the use of hand-held computers for bedside nursing care. In: *Int J Med Inform* 62 (2001), Nr. 2, S. 189–193
- [ZG99] ZIMBARDO, P.G. ; GERRIG, R.J.: *Psychologie*. Heidelberg/Berlin : Springer Verlag, 1999

# Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde über den Zeitraum von 2006 bis 2010 im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Universitätsklinikum Tübingen (UKT) und der Siemens AG, Geschäftsgebiet Image and Knowledge Management (IKM), durchgeführt. Ich möchte mich für die mir entgegengebrachte fachliche und persönliche Unterstützung bei mehreren Personen bedanken. An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Claus D. Claussen, der diese Arbeit als Doktorvater betreut hat und auf dessen Hilfe ich mich immer verlassen konnte. Des Weiteren danke ich herzlichst den Kollegen des UKT bzw. der wwH-c GmbH, Dr. Ulrich Matern, Martin Scherrer, Dirk Büchel, Diana Hagen und Thomas Gerlings, die mir bei fachlichen Fragen stets mit Rat und Tat äußerst kompetent zur Seite standen. Für die hervorragende Betreuung auf der Seite von Siemens danke ich Peter Huber, der als mein Ansprechpartner bei IKM immer ein offenes Ohr für mich hatte, Dr. Markus Blank ohne dessen Engagement diese Arbeit nie zustande gekommen wäre und Dr. Thomas Beyer für die anregenden Diskussionen. Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, meiner Schwester und meinen Freunden - darunter besonders Aee-Ni Park - ohne deren bedingungslose Unterstützung ich nie so weit gekommen wäre.