



# DIPLOMARBEIT

zum Thema

Untersuchung des Einflusses räumlich getrennter Bedienelemente  
für mobile Assistenzsysteme auf die Arbeitsbeanspruchung des  
Nutzers

vorgelegt von Markus Graube  
im Studiengang Mechatronik, Jg. 2005  
geboren am 03.01.1985 in Königs Wusterhausen

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur  
(Dipl.-Ing.)

Betreuer: Dipl.-Ing. Jens Ziegler  
Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. Leon Urbas  
Tag der Einreichung: 17.11.2010



## Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

für

**Herrn Markus Graube**

### **UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES RÄUMLICH GETRENNTER BEDIENELEMENTE FÜR MOBILE ASSISTENZSYSTEME AUF DIE ARBEITSBEANSPRUCHUNG DES NUTZERS**

#### Zielsetzung:

Im Rahmen der Optimierung mobiler Anwendungen werden verschiedene Methoden zur ergonomischen Integration elektronischer Assistenzsysteme in den Interaktionsraum des menschlichen Bewegungsapparates untersucht. Dabei werden verschiedene Ansätze wie Wearable Computing, Augmented / Mixed Reality oder Tangible Device Interaction verfolgt. Die genannten Ansätze nutzen häufig das Prinzip der Trennung der motorischen oder multimodalen Bedienelemente von den visuellen Anzeigeelementen. Dabei ergibt sich die wissenschaftliche Fragestellung, wie sich diese Trennung auf die Arbeitsbeanspruchung auswirkt und welchen Einfluss auf die Arbeitsbeanspruchung die verwendete Interaktionsmetapher hat. Besondere Relevanz bekommt diese Frage im industriellen Nutzungskontext, da mobile Anwendungen in diesem Kontext sehr stark mit den Arbeitsaufgaben in der physikalischen Umwelt gekoppelt sind. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die beschriebene Fragestellung anhand eines prototypischen mobilen Assistenzsystems in einer industriellen Arbeitsumgebung empirisch zu untersuchen und Gestaltungsregeln zur Minimierung des gerätebedingten Einflusses auf die Arbeitsbeanspruchung zu definieren.

#### Arbeitsumfang:

- Analyse von Anzeige- und Bedienkonzepten für mobile Mensch-Maschine-Systeme im beschriebenen Kontext
- Konzeptionalisierung und Operationalisierung der wissenschaftlichen Fragestellung
- Gestaltung und Realisierung einer geeigneten Versuchsanordnung
- Durchführung und Auswertung der empirischen Untersuchungen
- Interpretation der Ergebnisse

Betreuer: Dipl.-Ing. Jens Ziegler

Ausgehändigt am: 19.05.2010

Einzureichen am: 03.11.2010

  
Prof. Dr.-Ing. Bernard Bäker  
Vorsitzender des Prüfungsausschusses



  
Prof. Dr.-Ing. Leon Urbas  
Verantwortlicher  
Hochschullehrer

## KURZFASSUNG

### **Untersuchung des Einflusses räumlich getrennter Bedienelemente für mobile Assistenzsysteme auf die Arbeitsbeanspruchung des Nutzers**

Zur Steigerung der Qualität werden Wartungstechniker bei ihren Rundgängen in Prozessanlagen mit digitalen Assistenzsystemen unterstützt. Dadurch soll diese Arbeit effizienter und weniger fehleranfällig gestaltet werden. Da sich jedoch konventionelle Eingabemetaphern dafür nur bedingt eignen, versucht man Eingabeelemente von dem Anzeigeelement räumlich zu trennen. Um den Einfluss einer solchen Trennung auf die Arbeitsbeanspruchung des Nutzers zu untersuchen, wurde ein Evaluationsexperiment mit zwei Versuchsgruppen durchgeführt. Dabei hat eine Versuchsgruppe festgelegte Wartungsrundgänge mit Hilfe von Assistenzsystemen mit abgesetzten Eingabegeräte durchgeführt und die andere Gruppe mit kombinierten Eingabegeräten.



(a) kombiniertes Eingabegerät



(b) abgesetztes Eingabegerät

Der Versuch wurde für die drei Interaktionsmetaphern Texteingabe, Navigation in strukturierten Daten und Navigation in Abbildungen mit jeweils angepassten Eingabegeräten durchgeführt. Als Beanspruchungsindikatoren wurden die Pupillengröße, die Zeitdauer und die subjektive Bewertung mit Hilfe des NASA-TLX gemessen.

Als Ergebnis zeigt sich, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Ausprägungen der Trennung für alle Interaktionsmetaphern existiert. Daher spricht von Standpunkt der Arbeitsbeanspruchung nichts gegen eine Trennung des Eingabegeräts vom Anzeigegerät. Zur Erhöhung der Qualität der Daten und Präzisierung der Aussage sollte der Versuch mit einigen Änderungen aber erneut durchgeführt werden.

Betreuer: Dipl.-Ing. Jens Ziegler  
Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. Leon Urbas  
Tag der Einreichung: 17.11.2010

## ABSTRACT

### **Investigation of the influence of spatially separated control elements for mobile assistance systems on the experienced load of the user**

Maintenance technicians are assisted during their operations in process plants with digital assistant systems to increase the quality. This should make the work more efficient and less error prone. Since conventional input metaphors are only limited suitable for this purpose, new input devices are developed which are separated from the display element. To investigate the influence of such a separation on the work load of the user, an evaluation experiment was conducted with two experimental groups. One group has performed specified maintenance tours with separated input devices and the other group with combined input devices.



**(a)** combined input device



**(b)** separated input device

The experiment was conducted for the three interaction metaphors text input, navigation in structured data and navigation in images. For each metaphor a suitable input device was used. The workload was measured with the indicators pupil size, time duration and a subjective evaluation with the NASA-TLX.

In this experiment no significant difference exists between the various forms of separation for all interaction metaphors. Therefore there is no reason rejecting a separation of the input device from the display device. Nevertheless to improve the quality of the data this investigation should be repeated with some modifications.

Mentor: Dipl.-Ing. Jens Ziegler  
University Professor: Prof. Dr.-Ing. habil. Leon Urbas  
Submit Date: 17.11.2010

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Verbreitung und Probleme von mobilen Geräten . . . . .	1
1.2 Industrieller Kontext . . . . .	2
1.3 Fragestellung . . . . .	3
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Mobile Interaktion . . . . .	6
2.1.1 Interaktion . . . . .	6
2.1.2 Mobilität . . . . .	9
2.1.3 Metaphern . . . . .	10
2.1.4 Betrachtetes Arbeitssystem . . . . .	11
2.1.5 Anforderungen an abgesetzte Eingabegeräte in der Industrie . . . . .	14
2.1.6 Einsatz konventioneller Eingabegeräte . . . . .	15
2.2 Ergonomie . . . . .	15
2.2.1 Ziel der Ergonomie . . . . .	15
2.2.2 Ergonomie in industriellen Arbeitsumgebungen . . . . .	16
2.2.3 Konzepte der Ergonomie . . . . .	17

2.2.4	Arbeitsbeanspruchung	17
2.2.5	Messmethoden der Arbeitsbeanspruchung	20
2.3	Stand der Forschung und Technik im Bereich der Ergonomie der mobilen Interaktion	27
<b>3</b>	<b>Evaluationsexperiment zur Gebrauchstauglichkeit</b>	<b>30</b>
3.1	Konzeptionalisierung	30
3.1.1	Erste Forschungshypothese	30
3.1.2	Unterscheidung von verschiedene Datenarten	31
3.1.3	Zweite Forschungshypothese	31
3.1.4	Vorgehen zur Prüfung der Forschungshypothesen	32
3.2	Versuchsordnung	32
3.2.1	Arbeitsumgebung	32
3.2.2	Genutzte Assistenzsysteme	33
3.2.3	Vorhandene Messmittel	36
3.3	Versuchsplanung	37
3.3.1	Variablen	37
3.3.2	Operationalisierung der Variablen	38
3.3.3	Konstanten	45
3.3.4	Aufnahme weiterer Daten	46
3.3.5	Störvariablen	46
3.3.6	Durchzuführende Aufgaben	47
3.3.7	Experimentdesign	52
3.3.8	Stichprobenauswahl	53
3.4	Versuchsablauf	53
3.4.1	Einweisung in den Versuch	54
3.4.2	Durchführung der Versuchsdurchgänge	54
3.4.3	Ausfüllen des Fragebogens	54

3.5	Statistische Auswertung . . . . .	54
3.5.1	Statistische Kenngrößen . . . . .	54
3.5.2	Operationale und statistische Hypothesen . . . . .	55
3.5.3	Fehlerwahrscheinlichkeiten . . . . .	57
3.5.4	Effektstärke . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Analyse der Evaluationsergebnisse</b>	<b>59</b>
4.1	Evaluationsdurchführung . . . . .	59
4.2	Deskriptive Statistik . . . . .	60
4.2.1	Betrachtung der demographischen Daten der Stichprobe . . . . .	60
4.2.2	Statistische Aufbereitung der Daten . . . . .	61
4.2.3	Betrachtung der abhängigen Variablen . . . . .	62
4.2.4	Betrachtung der Kontrollvariablen . . . . .	63
4.3	Inferenzstatistik . . . . .	64
4.3.1	Untersuchung der ersten Forschungshypothese . . . . .	64
4.3.2	Probleme der Auswertung bei der zweiten Forschungshypothese . . . . .	65
4.4	Weitere Prüfungen und Befunde . . . . .	66
4.4.1	Betrachtung der einzelnen NASA-TLX Dimensionen . . . . .	66
4.4.2	Vergleich der summierten Aufgabenzeit mit der Gesamtzeit bei textuellen Daten . . . . .	67
4.4.3	Prüfung auf Zusammenhang mit Kontrollvariablen . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>68</b>
5.1	Kritik an der Untersuchung . . . . .	68
5.1.1	Kritik am Untersuchungsdesign . . . . .	68
5.1.2	Kritik am Evaluationsverfahren . . . . .	69
5.1.3	Kritik an den Prototypen . . . . .	69
5.2	Bewertung der Operationalisierungen . . . . .	70

5.2.1	Bewertung des NASA-TLX . . . . .	70
5.2.2	Bewertung der Pupillengrößendaten . . . . .	70
5.2.3	Bewertung der Leistungsdaten . . . . .	71
5.3	Bewertung der Forschungshypothesen . . . . .	72
5.4	Erstellung von Gestaltungsregeln . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>74</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	74
6.2	Ausblick . . . . .	75
<b>A</b>	<b>Details zur Versuchsanordnung</b>	<b>I</b>
A.1	Details zur Aufgabenstellung . . . . .	I
A.2	Zeitplanung der Versuchsdurchführung . . . . .	V
A.3	Details zu den Assistenzsystemen . . . . .	VI
A.3.1	Aufbau der Hardware . . . . .	VI
A.3.2	Software-Details . . . . .	VI
A.4	In Fragebögen erhobene Fragen . . . . .	IX
A.4.1	Fragen des NASA-TLX . . . . .	IX
A.4.2	Fragen zu personenbezogenen Daten . . . . .	X
A.5	Kostenaufstellung . . . . .	XI
<b>B</b>	<b>Details zur Evaluationsauswertung</b>	<b>XII</b>
B.1	Grafiken zur Evaluationsauswertung . . . . .	XII
B.2	Tabellen zur Evaluationsauswertung . . . . .	XVIII
<b>C</b>	<b>Verwendete Werkzeuge</b>	<b>XXII</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XXIV</b>

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Untersuchungsdesign	5
2.1	Menschliche Kanäle für die Eingabe und Ausgabe von Informationen nach Kraiss [Kra06, S. 165]	7
2.2	Klassifikation von Eingabegeräten, angelehnt an Krauß [Kra03]	8
2.3	Einteilung der Mobilität nach Wittenberg [Wit04]	10
2.4	Arbeitssystem	12
2.5	Modell der Arbeitsbeanspruchung, angelehnt an Ribback [Rib03]	18
3.1	Arbeitsumgebung im GZAT	33
3.2	PDA-Befestigung	34
3.3	Scrollrad	35
3.4	Analogstick	35
3.5	Tastatur	36
3.6	EKG-Logger	36
3.7	Eyetracker iView [HFC10]	37
3.8	Operationalisierung der Trennung	41
3.9	Befestigungen der Eingabegeräte	41
3.10	Auswirkungen der Belastungen	45
3.11	Arbeitsumgebung für Aufgaben mit textbasierte Daten	48

3.12 Arbeitsumgebung für Aufgaben mit strukturierten Daten . . . . .	49
3.13 Arbeitsumgebung für Aufgaben mit abbildungs-basierten Daten . . . . .	50
3.14 Übersicht GZAT . . . . .	52
3.15 Experimentdesign . . . . .	53
3.16 Fehler 1. Art . . . . .	58
A.1 Abbildung in den Aufgaben für abbildungs-basierte Daten . . . . .	I
A.2 Aufbau der Hardware . . . . .	VI
A.3 Screenshots der Software für textuelle Daten . . . . .	VII
A.4 Screenshots der Software für strukturierte Daten . . . . .	VIII
A.5 Screenshots der Software für abbildungs-basierte Daten . . . . .	VIII
B.1 Filtereffekt auf die Pupillengrößen-Daten bei VP 22 im DG 3 bei den abbil- dungs-basierten Daten . . . . .	XII
B.2 Lernkurve . . . . .	XIII
B.3 NASA-TLX Daten . . . . .	XIII
B.4 Pupillengröße . . . . .	XIV
B.5 Zeitdauer . . . . .	XIV
B.6 NASA-TLX Bewertungen für textuelle Daten . . . . .	XV
B.7 NASA-TLX Bewertungen für strukturierte Daten . . . . .	XV
B.8 NASA-TLX Bewertungen für abbildungs-basierte Daten . . . . .	XVI
B.9 Effektivität der Aufgabenbearbeitung . . . . .	XVI
B.10 Vergleich Gesamtzeit und summierte Aufgabenzeit bei textuellen Daten . . . .	XVII

# TABELLENVERZEICHNIS

2.1 Vergleich von Eingabe- und Anzeigemetaphern . . . . .	10
3.1 Operationalisierung des Geschlechts . . . . .	43
3.2 Operationalisierung der beruflichen Ausrichtung . . . . .	43
3.3 Operationalisierung der Variablen für Farb-Sehschwäche . . . . .	43
3.4 Operationalisierung der Variablen für Legasthenie/Dyskalkulie . . . . .	44
3.5 Operationalisierung der aktuellen Verfassung . . . . .	44
3.6 Operationalisierung der verwendeten Variablen . . . . .	44
3.7 Dekomposition der Aufgabe für textbasierte Daten . . . . .	49
3.8 Dekomposition der Aufgabe für strukturierte Daten . . . . .	50
3.9 Dekomposition der Aufgabe für abbildungsbasierte Daten . . . . .	51
4.1 Kontrollvariablen . . . . .	60
4.2 Effektivität bei den abbildungsbasierten Daten . . . . .	64
4.3 t-Test für einzelne operationale Hypothesen . . . . .	65
4.4 Vergleich der Arbeitsbeanspruchungsdifferenz für verschiedene Interaktionsmetaphern . . . . .	66
A.1 Aufgaben textuelle Daten . . . . .	II
A.2 Aufgaben strukturierte Daten . . . . .	III

A.3	Aufgaben abbildungs-basierte Daten	IV
A.4	Zeitplanung der Versuchsdurchführung	V
A.5	Kostenaufstellung	XI
B.1	Lernkurve	XVIII
B.2	NASA-TLX Daten	XVIII
B.3	Pupillenauswertung	XVIII
B.4	Zeitdauer	XIX
B.5	NASA-TLX Bewertung für textuelle Daten	XIX
B.6	NASA-TLX Bewertung für strukturierte Daten	XX
B.7	NASA-TLX Bewertung für abbildungs-basierte Daten	XX
B.8	Effektivität der Aufgabenbearbeitung	XXI
B.9	Vergleich Gesamtzeit (GZ) und summierte Aufgabenzeit (AZ) bei textuellen Daten	XXI

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AS .....	Analogstick
CMMS .....	Computerized Maintenance Management System
DG .....	Durchgang
EF .....	Effektivität
EKG .....	Elektrokardiogramm
GZAT .....	Gerätezentrum der Automatisierungstechnik
HMD .....	Head-Mounted-Display
HR .....	Herzrate
HRV .....	Herzratenvariabilität
ICA .....	index of cognitive activity
IQR .....	Interquartilabstand
KG .....	Kontrollgruppe
NASA-TLX .....	NASA Task Load Index
PDA .....	Personal Digital Assistant
SR .....	Scrollrad
Tas .....	Tastatur
TG .....	Treatmentgruppe
TWI .....	Two-Wire-Interface (Datenbus)
VL .....	Versuchsleiter
VP .....	Versuchsperson(en)

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 VERBREITUNG UND PROBLEME VON MOBILEN GERÄTEN

Mobile elektronische Geräte haben sich in einem solchen Maß im persönlichen Leben der meisten Menschen etabliert, dass auf sie kaum noch verzichtet werden kann. Handy, Organizer und MP3-Player sind allgegenwärtig und werden zur Entspannung und zur Lösung von alltäglichen Problemen verwendet. Neben diesem persönlichen Konsumbereich bilden auch die Bereiche Sport und Tourismus stark wachsende Märkte für mobile elektronische Geräte. So werden in den meisten Museen mittlerweile Führungen durch ein ausleihbares elektronisches Mobilgerät unterstützt. Dabei werden Zusatzinformationen zu den Exponaten über einen Lautsprecher mitgeteilt. In Taiwan [HCC07] hat man dieses Konzept dahin weiterentwickelt, dass nun Informationen zusätzlich graphisch angezeigt werden und die Identifizierung des gewünschten Informationsgegenstands per RFID geschieht statt über die übliche manuelle Eingabe einer Nummer. Ähnliche erfolgreiche Konzepte für mobile Anwendungen lassen sich im Sport mit GPS-gestützten elektronischen Trainern, im Konsumbereich durch eine Vielzahl von Applikationen auf den Smartphones und auch im wachsenden Maße in der Industrie finden.

Gängige Interaktionsmechanismen funktionieren auf mobilen Geräten jedoch nur eingeschränkt. So ist das Display zur Anzeige kleiner als bei üblichen PC-Anwendungen, was die Menge der darstellbaren Informationen einschränkt. Auch die üblichen PC-Bedienkonzepte mit Maus und Tastatur können nicht übernommen werden. Für die Nutzung einer Maus fehlen ebene Untergründe und eine Tastatur ist für die mobile Nutzung zu groß und sperrig. Kleine Tastaturen haben den Nachteil, dass eine Mehrfachbelegung der Tasten erfolgt und dadurch die Zuordnung von gewünschter Aktion zu der Taste, die dafür durch den Nutzer zu betätigen ist, nicht mehr einfach ist. Auch Lumsden und Brewster [LB03] vertreten die Meinung, dass man sich auf Maus und Tastatur in der mobilen Interaktion nicht verlassen, sondern neue Wege ausprobieren sollte. Als Konsequenz haben sich für viele Domänen Touchscreens durchgesetzt, wobei auch hier Nachteile durch eine fehlende haptische Rück-

meldung und ein Verdecken von Anzeigeraum durch die bedienende Hand vorhanden sind.

Daher werden in verschiedenen Einrichtungen und auch am Lehrstuhl für Prozessleittechnik an der TU Dresden neue Bedienkonzepte entwickelt, die häufig eine Trennung von Bedien- und Anzeigeelementen vollziehen. Beispiele für solche abgesetzten Eingabegeräte aus unterschiedlichen Bereichen sind die Wii-Mote, ein Drehdrücksteller oder Twiddler. Dadurch können völlig neuartige Metaphern zur Interaktion mit dem technischen Gerät benutzt werden. Weiterhin kann damit erreicht werden, dass eine Interaktion im stärkeren Maße multimodal ablaufen kann und sich besser in den natürlichen Bewegungsablauf des Nutzers integriert. Die Trennung erlaubt auch, dass die Anzeige an anderen Positionen untergebracht werden kann, z. B. als Head-Mounted-Display (HMD), damit sie sich immer im Sichtbereich des Benutzers befindet.

## 1.2 INDUSTRIELLER KONTEXT

Die Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigenstunde stieg von 1991 bis 2006 in Deutschland um 32,4% [Hau07]. Um im Wettbewerb mithalten zu können, ist für jeden Betrieb eine Steigerung in diesem Maße notwendig. Ein möglicher Weg, dieses Ziel zu erreichen, besteht in der Erhöhung der Effizienz der Arbeitsabläufe. Dies versucht man unter anderem dadurch zu erreichen, dass man in zunehmendem Maße mobile Geräte einsetzt [AS09]. Diese erlauben die Bereitstellung situationsabhängiger Interaktionen und Informationen, eine Vereinfachung von Kommunikation, die Eingabe von Informationen sowie eine Lokalisierung und Identifizierung von Personen und Geräten. Eine dadurch realisierbare Minimierung von Zeiten und Ressourcen zur Informationsbeschaffung und Kommunikation ermöglicht eine Steigerung der Arbeitseffektivität und -effizienz, was einen Wettbewerbsvorteil darstellt [Wit04].

In der Industrie werden die Aufgaben immer dezentraler, flexibler und komplexer [Wit01, S. 88 ff.]. Einfache Aufgaben werden größtenteils automatisiert ausgeführt, so dass die zuständigen Mitarbeiter oft nur die Kontrolle oder Wartung der Maschinen als Aufgabebereich haben. Durch diese relativ wenig zeitintensive Arbeit mit der einzelnen Maschine kann ein Mitarbeiter die Verantwortung für viele verschiedene Maschinen übernehmen, die zudem weit verstreut liegen können. Dies erfordert eine gesteigerte Mobilität der Arbeiter. Zusätzlich muss der Arbeiter bei außerplanmäßigen Vorgängen in der Anlage spezielle Kenntnisse über den betreffenden Anlagenteil besitzen, die er auf Grund seiner vielfältigen anderen Tätigkeit nicht immer in einem solch hohen Detailgrad ausgeprägt hat. Hier ist das Nachschlagen in einer vollständigen Dokumentation der Maschine sinnvoll. Statt des umständlichen Mitführens dieser großen Dokumentationen auf Papier bietet sich ein Abruf der benötigten Informationen aus einem Instandhaltungs-Management-System (CMMS) auf ein elektronisches Assistenzsystem an. Hiermit können die Informationen schneller abgerufen und gefiltert werden. Die Zeitersparnis ist dabei immens, da z. B. 50% der Zeit von Wartungsingenieuren für das Suchen nach Informationen verwendet werden [BPBH06].

Weitere Vorteile von solchen Systemen ergeben sich auch für das Wartungspersonal, das bisher bei den regelmäßigen Anlagenrundgängen die aufgetretenen Probleme und durchgeführten Arbeiten auf vorgefertigten Formularen protokolliert. Diese Angaben müssen dann später im Büro per Hand in ein CMMS eingepflegt werden. Mit einem Assistenzsystem können diese Informationen schon während des Rundgangs (teil-)automatisiert protokolliert und dann automatisch übertragen werden. Somit können redundante Arbeitsschritte gespart werden und Fehler durch eine doppelte Datenhaltung vermieden werden.

Somit ist sowohl aus Sicht der Qualität als auch der Ökonomie ein Bedarf an solchen Assistenzsystemen vorhanden. Allgemein sieht Timpe in [Tim02, S.246] als Ziel von Unterstützungssystemen, Personen bei der Erreichung von Systemzielen im Bedarfsfall zu unterstützen. Mögliche Unterstützungsmöglichkeiten sind Hilfe bei Entscheidung, Planung, Diagnosen, Trainingsvorhaben, im Fehlermanagement usw.

Im industriellen Umfeld ist es besonders wichtig, dass diese Interaktionen sehr ergonomisch ablaufen, da die Handlungen des Benutzers stark an reale Prozesse in der Umwelt gekoppelt sind. Es besteht somit ein hohes Gefährdungspotential durch die umliegenden Anlagenteile für den Benutzer und daher sollte dieser neben seiner anspruchsvollen Tätigkeit möglichst keine zusätzliche Beanspruchung durch die Bedienung eines Unterstützungssystem erleben [BNSS01].

### 1.3 FRAGESTELLUNG

Am Lehrstuhl für Prozessleittechnik wurden in vorangegangenen Arbeiten verschiedene Assistenzsysteme zur Unterstützung von Arbeitern in der Prozessindustrie entwickelt. Als wichtiges Problemfeld wurde dabei die Wartung und Instandhaltung ausgewählt, da dort jährlich mehrere Prozent der Investitionskosten der Anlage ausgegeben werden [UZP09]. Bei den dafür entwickelten Geräten wurden abgesetzte motorische Bedienelemente mit einer Anzeige auf einem am Unterarm montierten PDA (Personal Digital Assistant) eingesetzt.

In den durchgeführten Evaluationen zur Gebrauchstauglichkeit wurden Befunde aufgezeigt, die eine höhere geistige Beanspruchung der Versuchspersonen bei einer Trennung von Eingabe- und Anzeigeelement vermuten lassen. So wurden z. B. bei Geräten mit fehlender Sichtverbindung zwischen Bedien- und Anzeigeelementen schlechtere Leistungen erzielt und Anmerkungen von Versuchspersonen geäußert, dass dieser Umstand auf sie belastend gewirkt hat. Auch bei Clawson [CLSC05] finden sich Hinweise auf diese These. Dort wurde festgestellt, dass das Schreiben von Texten auf mobilen Geräten bei fehlender Sichtverbindung zum Bediengerät zu einer geringeren Schreibgeschwindigkeit und höheren Fehlerrate führt. In diesem Kontext ist auch die Empfehlung der DIN EN ISO 6385 zu sehen, „angeichts der Tendenz, Aufgaben zunehmend psychisch anspruchsvoller zu gestalten, [...] die mit den Arbeitsmitteln verbundenen psychischen Aspekte“ zu beachten [DIN6385].

Daraus ergibt sich die Fragestellung, inwieweit die Trennung des Eingabegeräts vom Anzeigerät sich auf die Ergonomie auswirkt. In diesem Fall soll als Konzept für die Ergonomie die Höhe der Arbeitsbeanspruchung untersucht werden. Es wird im Folgenden also untersucht, ob eine Trennung der Interaktionsgeräte eine Erhöhung der Arbeitsbeanspruchung für den Benutzers bewirkt und ob eine solche Trennung von diesem Standpunkt aus sinnvoll ist. Die Fragestellung erweitert sich dahin, dass diese These abhängig von den verwendeten Interaktionsmetaphern untersucht werden soll. Hier ist zu prüfen, ob bei geeigneten Interaktionsmetaphern der Einfluss der Trennung auf die Arbeitsbeanspruchung geringer als bei anderen Interaktionsmetaphern ausfällt.

Zur Beantwortung dieser Fragen wird ein empirisches Experiment durchgeführt. Dabei wird die Arbeitsbeanspruchung von Versuchspersonen gemessen werden, während diese ein Assistenzsystem in den genannten Frageszenarien nutzen.

## 1.4 AUFBAU DER ARBEIT

Nachdem in Kapitel 1 die Motivation der Arbeit dargelegt, der zu betrachtende Kontext beschrieben und die sich ergebenden Fragestellungen herausgearbeitet wurden, soll kurz der weitere Aufbau dieser Arbeit erläutert werden (vgl. Abb. 1.1).

Um diese Fragestellungen zu beantworten, erfolgt im Kapitel 2 eine Auseinandersetzung mit den Grundlagen mobiler Eingabegeräte und deren spezifischen Interaktionskonzepten. Ebenso wird der Begriff *Arbeitsbeanspruchung* definiert, untersucht und in das Themengebiet eingeordnet. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Betrachtung des aktuellen Standes der Forschung und Technik zu dem Themengebiet.

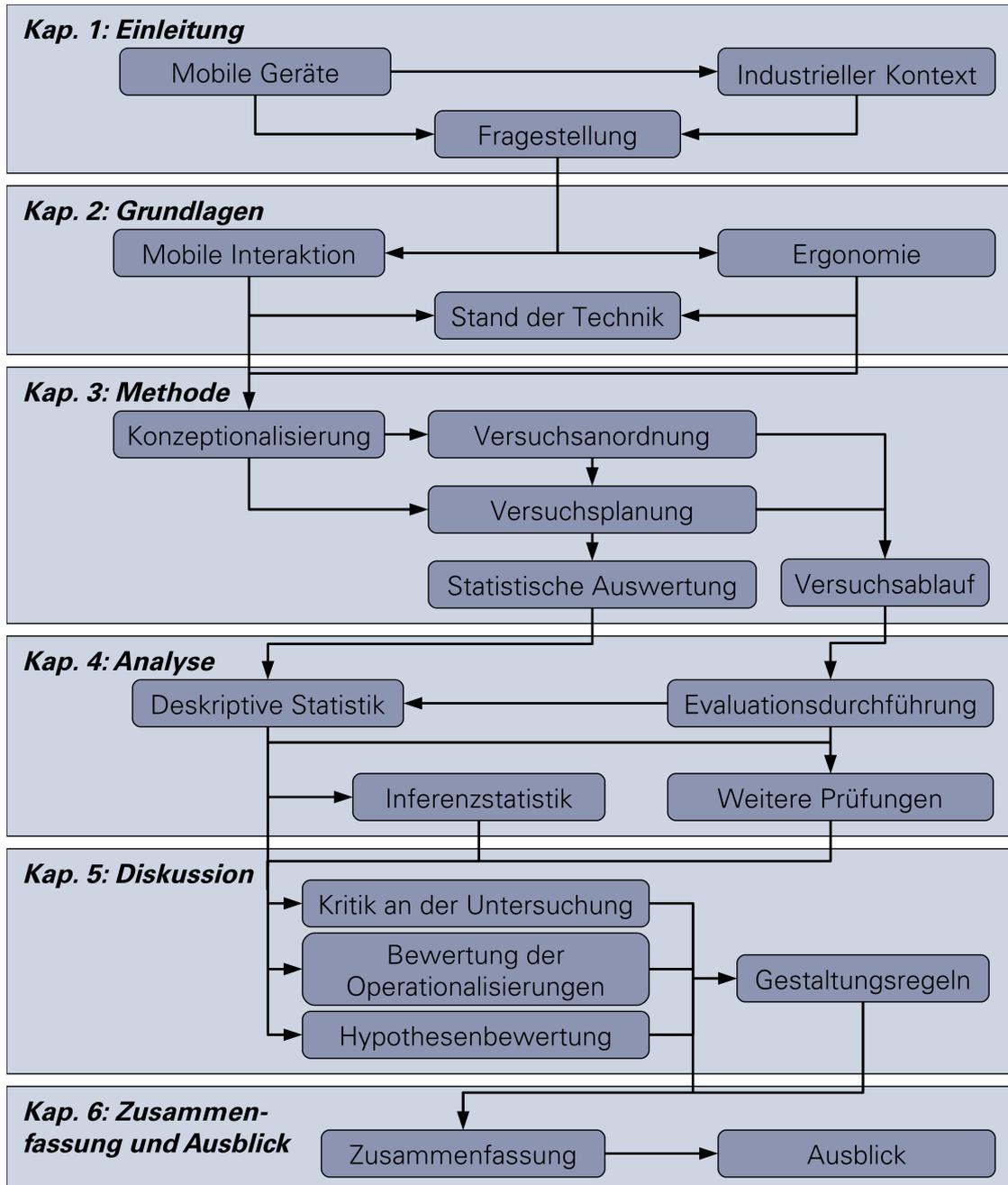
Im Kapitel 3 werden in der Konzeptionalisierung zwei Forschungshypothesen aufgestellt und ein Verfahren zu deren Untersuchung erarbeitet. Die dazu verwendete Versuchsanordnung wird beschrieben und das gewählte Experimentdesign erläutert. Dies beinhaltet die Operationalisierung der Untersuchungsgrößen sowie die Aufstellung von statistische Hypothesen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Beschreibung des Versuchsablaufs und der Planung der statistischen Auswertung.

Die Durchführung der Evaluation wird in Kapitel 4 beschrieben und deren Ergebnisse explorativ mit einer deskriptiven Statistik dargestellt. Nachfolgend werden die Ergebnisse entsprechend den vorgestellten Methoden ausgewertet und mit der Inferenzstatistik geprüft, ob sich die Aussagen auf die Allgemeinheit übertragen lassen. Als letzter Punkt im Kapitel wird auf weitere Prüfungen und Befunde eingegangen.

Das Kapitel 5 beginnt mit einer Kritik an der durchgeführten Untersuchung, im Speziellen an dem Untersuchungsdesign, dem Evaluationsverfahren und den Prototypen. Darauf aufbauend werden die Operationalisierungen bewertet und zu den Forschungshypothesen Stellung

genommen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Gestaltungsregeln abgeleitet.

Als Abschluss der Arbeit wird in Kapitel 6 die gesamte Untersuchung mit dem Vorgehen, der Ergebnissen und Bewertungen zusammengefasst und daraus Vorschläge zur weiteren Bearbeitung des Themas abgeleitet



**Abbildung 1.1:** Untersuchungsdesign

## 2 GRUNDLAGEN

Im folgendem Kapitel werden die grundlegenden Begriffe und Zusammenhänge des Themengebiets erklärt und abschließend der aktuelle Stand der Forschung und Technik auf dem Gebiet dargelegt.

### 2.1 MOBILE INTERAKTION

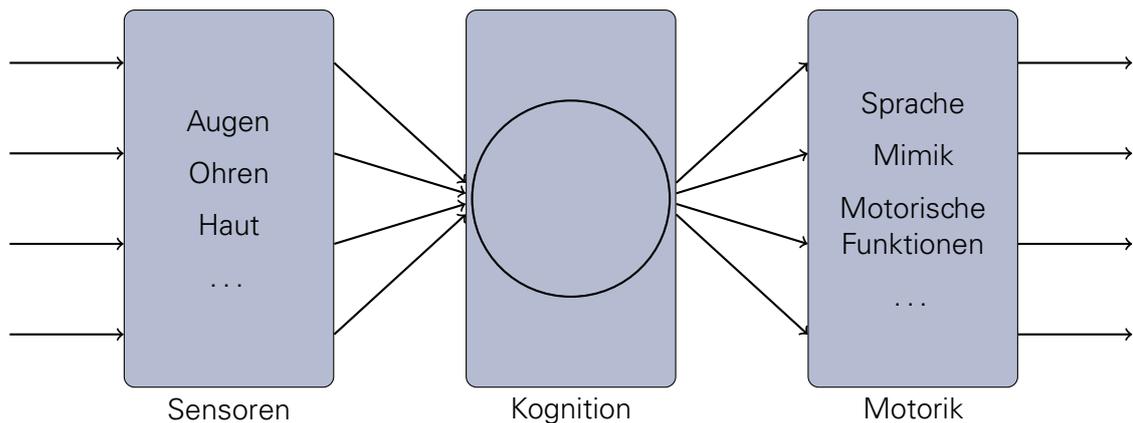
#### 2.1.1 Interaktion

Ein zentraler Begriff dieser Arbeit ist *Interaktion*. In der DIN EN ISO 11064-5 wird Interaktion definiert als

*„Austausch von Informationen zwischen einem Benutzer und einem System mittels der Mensch-System-Schnittstelle (HSI) zum Erreichen des angestrebten Zieles“* [DIN11064-5].

Der Austausch von Informationen zwischen dem Benutzer und dem System kann in zwei Richtungen stattfinden: vom Benutzer zum System und vom System zum Benutzer. Da der Mensch in der Lage ist, mit Hilfe einer Vielzahl von Kanälen Informationen aufzunehmen, zu verarbeiten und wieder auszudrücken, kann auch die Kommunikation für beide Richtungen mit einer unterschiedlichen Menge und Art von Kanälen ausgestattet sein [Kra06, S. 165]. Das Zusammenwirken der menschlichen sensorischen, kognitiven und motorischen Fähigkeiten ist dazu in Abbildung 2.1 dargestellt.

So können je nach Richtung verschiedene Geräte zum Einsatz kommen, z. B. für die Eingabe von Informationen ein Gestenerkennungssystem mit Unterstützung durch eine Spracheingabe. Die Ausgabe hingegen könnte über ein Display visuell dargestellt werden und als zusätzliche Alarmierung könnte eine haptische Rückmeldung genutzt werden.



**Abbildung 2.1:** Menschliche Kanäle für die Eingabe und Ausgabe von Informationen nach Kraiss [Kra06, S. 165]

### 2.1.1.1 Darstellung

Zum Übermitteln von Informationen zum Benutzer nutzt man verschiedene Arten der Darstellung. Dabei ist Darstellung nach der Definition der VDI/VDE 3699-1 [VDI3699-1] die „strukturierte und codierte Wiedergabe von Daten zwecks Wahrnehmung durch den Menschen“. Häufig werden Anzeigeelemente verwendet, die den visuellen Kanal des Menschen ansprechen, also Displays oder Bildschirme. Andere genutzte Möglichkeiten sind eine auditive oder taktile Ausgabe von Informationen durch Lautsprecher oder Braille-Displays. Prinzipiell ist jedoch eine Darstellung unter Einbeziehung eines jeden der sechs Sinne des Menschen möglich [Kra06, S. 165], also zusätzlich die Nutzung des Geschmacks-, Geruchs- und Gleichgewichtssinns.

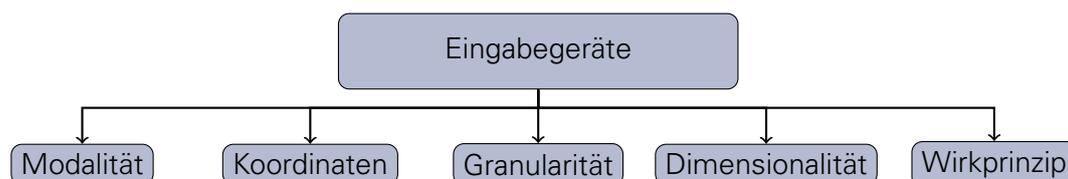
### 2.1.1.2 Bedienung

Die andere Richtung des Informationsaustausches erfolgt vom Benutzer zum Assistenzsystem und wird daher vom Menschen initiiert. Der Begriff *Bedienung* ist definiert als ein „Vorgang, bei dem ein Benutzer die Arbeitsweise einer bereits angewählten technischen Einrichtung (System, Gerät, Maschine) beeinflusst oder die Ausführung einer Funktion veranlasst“ [VDI3699-1]. Dies ist eine sehr weit gefasste Definition in der VDI/VDE 3699-1, die eine große Bandbreite an Bedienteilen umfasst. Dieses Ausmaß der Unterschiedlichkeit spiegelt sich auch in der Verwendung der verschiedenen Modalitäten wieder. Insgesamt ist die Menge der Informationen, die der Mensch ausgeben kann, groß. Sie ist jedoch geringer als bei der Informationsaufnahme, was sich auch in der Anzahl der verwendeten Bedienmodalitäten äußert [Kra06]:

- haptisch
- auditiv
- visuell

Bei Betrachtung des Marktes fällt auf, dass in den meisten Fällen eine Bedienung mit Hilfe einer Maus, einer Tastatur, eines Joysticks oder ähnlichen Geräten durchgeführt wird, indem man die motorische Modalität der Hand nutzt. Eine bisher weniger genutzte Möglichkeit besteht darin, Gesten von bestimmten Körperteilen auszuwerten. Dort ist neben der Nutzung der Hand auch eine Geste mit dem Kopf oder dem ganzen Körper realisierbar. Dies kann mit Hilfe von Kameras oder Bewegungssensoren geschehen. Ebenso kann eine auditive Bedienung über eine Spracheingabe genutzt werden. Diese Möglichkeit ist jedoch unter lauten Umgebungsbedingungen eingeschränkt, so dass in einer Prozessanlage dieses Verfahren nicht zum Einsatz kommen kann. Als neue Entwicklung ist eine visuelle Steuerung anzusehen, bei der über Blickbewegungen Aktionen ausgelöst werden können. Dazu müssen die Augen mit Hilfe eines Eyetrackers aufgenommen und die Bilder ausgewertet werden.

Neben der Unterscheidung in der genutzten Modalität trennt Zühlke [Züh04, S. 233] zwischen koordinatengebenden und nicht-koordinatengebenden Eingabegeräten. In dieser Einteilung sind z. B. eine Maus und ein Touchpad koordinatengebende Eingabegeräte, wohingegen Gesten mit der Hand oder ein Tastendruck als nicht-koordinatengebende Eingaben aufgefasst werden. Weitere Unterscheidungsmerkmale hat Krauß [Kra03] in seiner Dissertation aufgezeigt. Sie liegen in der Granularität der Eingaben (kontinuierlich oder diskret), der Dimensionalität (ein-, zwei- oder dreidimensional), sowie dem Wirkprinzip, also ob die Geräte direkte oder indirekte Eingaben ermöglichen (vgl. Abbildung 2.2). So stellt eine Maus ein indirektes Eingabegerät dar, weil das Verschieben der Maus auf dem Untergrund auch eine Bewegung auf dem Display auslöst, der Ort der Maus aber nicht direkt die Position des Cursors bestimmt, da die Maus auch hochgenommen und an anderer Stelle abgesetzt werden kann. Das Betätigen eines Touchpads ist hingegen eine direkte Eingabe, die so auch einen etwas geringeren Anspruch an das menschliche Informationsverarbeitungssystem stellt.



**Abbildung 2.2:** Klassifikation von Eingabegeräten, angelehnt an Krauß [Kra03]

### 2.1.1.3 Anforderungen an zukünftige Interaktionskonzepte

In der Zukunft werden Interaktionen durch neuartige Konzepte ergänzt. So werden Geräte kontextabhängig Informationen anzeigen und Bedienhandlungen interpretieren. Außerdem sollte man die mobilen Geräte möglichst ohne Einschränkungen in der realen Welt benutzen können. Die Geräte sollten also am besten „hands-free“ und „eyes-free“ bedienbar sein [Wit04], was aber nicht in allen Anwendungsbereichen erreichbar sein wird.

Es ist laut Timpe [Tim02] eine multimodale Schnittstellengestaltung anzustreben: die natürli-

che menschliche Kommunikation nutzt verschiedene Wahrnehmungs- und Ausdrucksmittel parallel, die intuitiv und mit unterschiedlicher Gewichtung verwendet werden. Die Nutzung von Sprache, Mimik, Gestik, 3D-Wahrnehmung, kombiniertem Einsatz von Blick-, Sprach- und Hand-Interaktionen bildet die menschliche Kommunikation und somit für die Interaktion „ökologische Schnittstellen“.

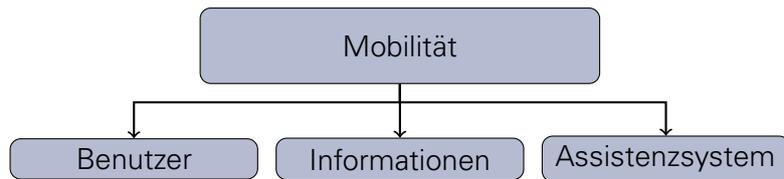
#### **2.1.1.4 Abgesetzte Eingabegeräte**

Bedienelemente und Anzeigeelemente können kombiniert sein bzw. sehr nah beieinander liegen. Somit bilden sie eine Einheit und können auch nur zusammen verwendet werden. Dies ist beispielsweise bei Touchscreens oder Handytastaturen der Fall. Andererseits ist es möglich, dass beide Elemente voneinander getrennt als einzelne Geräte existieren. In diesem Fall spricht man von einem *abgesetzten Eingabegerät*. Beispiele dafür bilden PC-Tastaturen oder Joysticks. Durch die Nutzung von abgesetzten Eingabegeräten können diese Bedienelemente an Körperstellen angebracht werden, die ein bequemes Arbeiten in einer Ruheposition ermöglichen. Als weiterer Vorteil ergibt sich die Möglichkeit, das Anzeigeelement an anderen Stellen unterzubringen, an denen bei einem kombinierten Eingabe- und Anzeigegerät eine Bedienung ungeeignet wäre. So ist eine Verwendung eines Head-Mounted-Displays nur mit dem Einsatz eines abgetrennten Eingabegeräts möglich. Andere Vorteile können sich ergeben, wenn mehrere Eingabeelemente genutzt werden, so dass für jede Interaktion das jeweils am besten geeignete verwendet werden kann.

#### **2.1.2 Mobilität**

Als Sonderfall der Interaktion gibt es die mobile Interaktion. Dabei bezieht Wittenberg den Begriff der Mobilität sowohl auf den Nutzer, das Assistenzsystem als auch die Informationen [Wit04], wie in Abb. 2.3 dargestellt ist. Die Mobilität des Benutzers ist eine faktisch umgesetzte Anforderung der Industrie, da diese Arbeiten an unterschiedlichen Orten durchgeführt werden soll. Damit der Arbeiter dabei durch ein elektronisches Assistenzsystem unterstützt werden kann, muss dieses ebenso mobil sein, d.h. in einem Maße kompakt und leicht sein, dass es vom Benutzer transportiert werden kann. Zuletzt müssen auch die Informationen mobil sein, damit das System an jedem Ort die gewünschten Informationen an den Nutzer ausgeben kann. Zur Erfüllung des letzten Punktes können z. B. Drahtlosnetzwerke eingesetzt werden, was aber im Weiteren nicht im Fokus dieser Arbeit stehen soll.

Durch diese Mobilität ergeben sich also immense Vorteile gegenüber stationären Systemen in der Ausprägung, dass Interaktionen flexibler und zeitsparender durchgeführt werden können. Eine Einschränkung sehen Lumsden, Brewster sowie Clawson [LB03, CLSC05] aber z. B. darin, dass die Nutzer nicht die gesamte Aufmerksamkeit auf das System verwenden können. In der Regel befindet sich der Nutzer mit dem mobilem Gerät in einer Situation,



**Abbildung 2.3:** Einteilung der Mobilität nach Wittenberg [Wit04]

die eine Beobachtung der Umwelt erfordert. So ist z. B. während eines Rundgangs in einer industriellen Anlage die Wahrscheinlichkeit von Gefahrenquellen höher als bei dem Arbeiten an einem stationären Ort.

### 2.1.3 Metaphern

Ein weiteres wichtiges Konzept in der Interaktion stellen Metaphern dar. Als Metaphern werden „Konzepte, die dem Benutzer bereits vertraut sind und die in der Anwendung benutzt werden, um das Verständnis des Benutzers und seine Fähigkeit zu unterstützen, das Verhalten der Applikation vorherzusagen“ laut der Definition in der DIN EN ISO 14915-1 [DIN14915-1] verstanden. Dabei können sowohl die Gestalt als auch die Funktionalität von bekannten physikalischen Metaphern übertragen werden. In der Literatur wird sich häufig entweder nur mit den Metaphern für die Eingabe [LB03, Pet08] oder für die Ausgabe [Sha07, Wic98] beschäftigt. Die Metaphern für Anzeige und Bedienung können sich sehr ähneln oder aber vollkommen unterschiedlich ausfallen, auch wenn sie dieselbe Aktion in dem System beschreiben. Dies ist schnell an einigen Beispielen zu sehen:

**Tabelle 2.1:** Vergleich von Eingabe- und Anzeigemetaphern

Aktion	Eingabemetapher	Anzeigemetapher
Nächstes Element	Handbewegung nach rechts	Cursor springt Feld weiter nach rechts
Löschen	Schütteln des Gerätes	Symbol explodiert oder verschwindet im Mülleimer
Aktivieren	Knopf drücken	akustisches Signal (passend zu ausgewähltem Element)
vorheriges/nächstes Listenelement	Rad drehen	an bisherige Anzeigestelle rotiert neues Element
Objekt auswählen	„Bild aufnehmen“ mit eingebauter Kamera	Bild des Objektes wird angezeigt
Cursor bewegen	Kippen des Eingabegeräts (Cursor verhält sich wie Masse in Gravitationsfeld)	Cursor bewegt sich auf der Anzeige

Die verwendete Bedienmetapher und Anzeigemetapher bilden zusammen die Interaktions-

metapher. Die Anzeigemetapher ist in dieser Untersuchung auf eine Anzeige auf einem Display eines PDA festgelegt. Auf die Bedienmetapher wird in der Arbeit ein größeres Gewicht gelegt, da sie in einem starken Zusammenhang mit den Eingabegeräten steht und somit zu dem Untersuchungsgegenstand. Um die Interaktionsmetapher zu variieren, reicht es prinzipiell aus, die Eingabemetapher durch Wahl eines anderen Bediengeräts zu verändern. Um die Interaktion jedoch ergonomisch zu gestalten, ist es ratsam auch die Anzeigemetapher so anzupassen, dass sie die Bedienmetapher widerspiegelt.

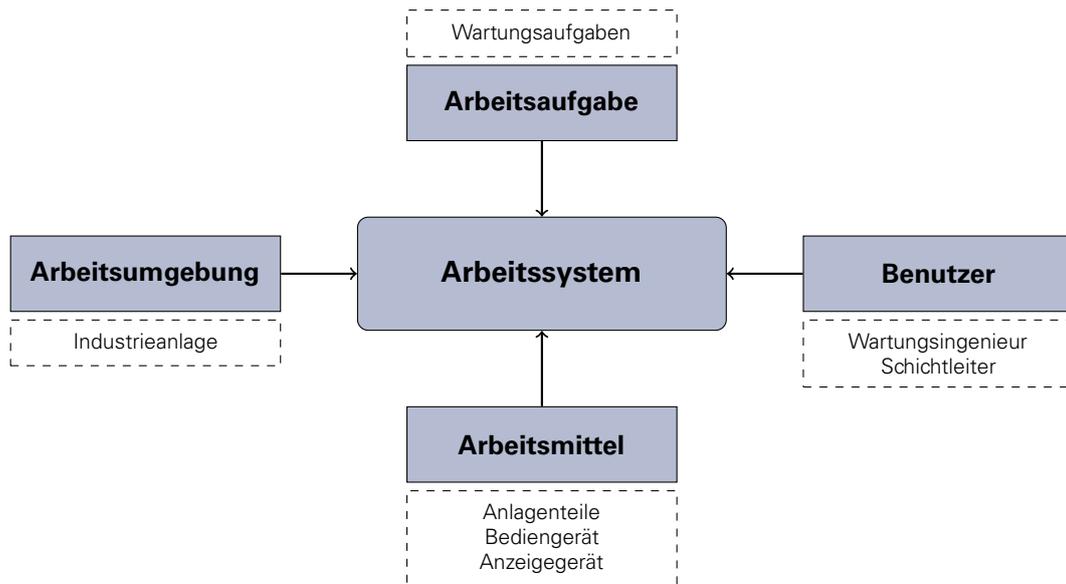
Für eine ergonomische Interaktion ist es vorteilhaft, wenn die Benutzer die verwendeten Metaphern kennen und diese nicht erst erlernen müssen. Weiterhin sollte versucht werden, einen Bruch zwischen der Anzeige- und der Bedienmetapher zu vermeiden. Wenn die Bedienung eine vollkommen andere Metapher nutzt als die Darstellung auf dem Anzeigegerät, ist die kognitive Leistung, die der Benutzer erbringen muss, relativ hoch. Ein solcher Bruch in der Interaktionsmetapher wäre z. B. gegeben bei der Nutzung eines nicht-koodinatengebenden Eingabegeräts mit einer Anzeige eines auf Koordinaten basierenden Cursors.

#### **2.1.4 Betrachtetes Arbeitssystem**

Die beschriebene Definition von Interaktion passt gut in den Zusammenhang mit dem Begriff des Arbeitssystems, in dem dieser Informationsaustausch stattfindet. Alle Begriffe rund um dieses Thema werden in der DIN EN ISO 6385 [DIN6385] definiert. Dort betrachtet man ein *Arbeitssystem* als

*„ein System, welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender/Benutzer mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems innerhalb des Arbeitsraumes und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen zu erfüllen.“*

Das Zusammenwirken von *Nutzer* und *Arbeitsmittel* ist hier als Austausch von Informationen zu sehen. Die angestrebten Ziele finden sich in der Erfüllung der *Arbeitsaufgaben* wieder und die Mensch-Maschine-Schnittstelle lässt sich als *Arbeitsmittel* sehen. Dabei finden diese Aktionen in einer *Arbeitsumgebung* statt. Diese vier Objekte legen damit eindeutig ein Arbeitssystem fest (vgl. Abb. 2.4). Daher werden im Folgenden diese Begriffe, wie in der Abbildung ersichtlich, in den speziellen Anwendungsfall eingeordnet, der in der Bearbeitung von Wartungsaufgaben durch einen Wartungsingenieur in prozessindustriellen Anlagen gegeben ist



**Abbildung 2.4:** Arbeitssystem

#### 2.1.4.1 Benutzer im Arbeitssystem

Auf der einen Seite ist der *Benutzer*, der in der Norm [DIN6385] als eine „Person, die innerhalb des Arbeitssystems eine oder mehrere Arbeitsaufgaben durchführt“, definiert ist. In dem hier betrachteten Fall ist dies ein Wartungsingenieur oder technischer Schichtleiter, der in einer Prozessanlage behördlich und innerbetrieblich vorgeschriebene Wartungsrundgänge durchführt [Wit08]. Dieser hat im Normalfall eine technische Ausbildung absolviert und besitzt Erfahrung mit den ihm verantworteten Arbeitsmitteln sowie den dahinterstehenden Prozessen. Außerdem kann von einer Erfahrung mit dem Umgang mit stationären Rechnern ausgegangen werden, sowie dass der Benutzer frei von physischen Grenzen und Behinderungen ist, da er sonst seine Tätigkeiten nicht ausführen könnte [Wit04]. Von Erfahrungen des Benutzers mit dem Umgang mit mobilen Geräten kann nicht ausgegangen werden, da die bisherige Nutzung dieser Geräteklassen bei den Benutzern nicht eingeschätzt werden kann. Zum Schutz vor Gefahren und Gefahrenstoffen trägt er Handschuhe und einen Helm. Außerdem führt er häufig benötigtes Werkzeug mit sich.

#### 2.1.4.2 Arbeitsmittel im Arbeitssystem

Auf der anderen Seite des (Arbeits-)Systems stehen die *Arbeitsmittel*. Als solche werden alle „Werkzeuge, einschließlich Hardware und Software, Maschinen [...] und andere im Arbeitssystem benutzte (System-)Komponenten“ angesehen [DIN6385]. Im speziellen Fall gehören zu den Arbeitsmittel die Anlagenteile, Geräte der Anlage und die dafür notwendigen Werkzeuge, also Pumpen, Motoren, Ventile, Schraubenschlüssel usw. Das für die Untersuchung wichtigste Arbeitsmittel ist aber das elektronische Assistenzsystem mit seinen Anzeige- und Bedienelementen. Das Ausgabegerät ist im vorliegenden Fall ein PDA oder

Smartphone und das Eingabegerät wird durch ein abgesetztes Bedienelement realisiert, das in Kapitel 3.2.2.2 genauer beschrieben wird.

### 2.1.4.3 Arbeitsaufgabe im Arbeitssystem

Wie in der Definition angegeben, erfolgt bei einer Interaktion der Austausch von Informationen nicht aus Selbstzweck, sondern zum Erreichen eines angestrebten Ziels. Dies ist in dem hier interessierenden Fall die Erfüllung einer *Arbeitsaufgabe*, welche in [DIN6385] als *„eine zur Erfüllung eines vorgesehenen Arbeitsergebnisses erforderliche Aktivität oder Anzahl von Aktivitäten des Arbeitenden/Benutzers“* definiert wird und in dem betrachteten Fall die Abarbeitung der zu erfüllenden Wartungsaufgaben ist. Diese bestehen einerseits aus ereignisorientierten Aufgaben z. B. bei Ausfällen, bei denen eine Erkennung, Lokalisierung und Diagnose des Fehlers erforderlich ist, sowie anschließend eine Fehlerbeseitigung und der Wiederanlauf des Prozesses durchgeführt werden muss [Wit03]. Andererseits existieren auch präventive Aufgaben, wie Wartung und Austausch von Teilen aus Altersgründen. Dabei sind typische Aufgaben laut Wittenberg [Wit04]:

- Kommunikation mit der Leitwarte und Anbietern von Geräten
- Geräte bedienen, montieren, demontieren
- Geräte prüfen
- Werte ablesen und einstellen

### 2.1.4.4 Arbeitsumgebung im Arbeitssystem

Das Arbeitssystem ist zusätzlich durch den „Arbeitsraum“ und die „Arbeitsumgebung“ festgelegt, wobei im Speziellen für den *Arbeitsraum* die gesamte Prozessanlage angenommen wird. Die Arbeitsumgebung ist in der Norm als *„physikalische, chemische, biologische, organisatorische, soziale und kulturelle Faktoren, die einen Arbeitenden/Benutzer umgeben“* definiert [DIN6385]. Die Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung der physikalischen Faktoren, da die anderen nicht im Fokus der Arbeit liegen. Zu den häufig vorkommenden physikalischen Faktoren gehören laut Schlick [SLB10]:

- Lärm, Geräusche
- Schwingungen, Vibrationen
- Dreck, Schmutz
- Klima, Temperatur
- Arbeitsbekleidung (Helm, Handschuhe, Arbeitsanzug)
- Beleuchtung
- Arbeitsstoffe

Eine erweiterte Beschreibung der Arbeitsumgebung eines Wartungsingenieurs und die daraus folgenden Anforderungen sind bei Burmeister [BPBH06] aufgeführt. Dort wird zusätzlich auf die schwierige Erreichbarkeit von einigen Geräten und den eingeschränkten Bewegungsraum hingewiesen. Boronowsky zieht außerdem den Schluss, dass die notwendige Schutzkleidung, bestehend aus Arbeitsanzug, Handschuhen und Helm, eine Nutzung von klassischen Eingabegeräten enorm erschwert [BNSS01].

### **2.1.5 Anforderungen an abgesetzte Eingabegeräte in der Industrie**

In der Industrie ergeben sich andere Randbedingungen und Voraussetzungen an das Arbeitsmittel Eingabegerät als es im Konsumbereich der Fall ist. Laut einer Studie von Burmeister [BPBH06] erfordern 85% der anfallenden Wartungsaufgaben ein beidhändiges Agieren des Wartungstechnikers. Somit ist in dieser und in anderen vergleichbaren Domänen anzustreben, dass das Eingabegerät freihändig benutzt werden kann. Wenn dies nicht möglich ist, sollte es einfach in eine Arbeitsposition gebracht werden können, in der man ergonomisch arbeiten kann, und dann so verstaut werden können, dass keine Behinderungen auftreten oder das Gerät verloren gehen kann.

Im industriellen Rahmen ergeben sich auch in anderen Bereichen neben der Anforderung an eine freihändige Bedienung unterschiedliche Voraussetzungen im Vergleich zum Verbraucherbereich. Es ist nicht notwendig, dass das elektronische Assistenzsystem schnell in der Jackentasche verstaut werden kann oder dass es erhöhte ästhetische Ansprüche erfüllt. Dadurch ergeben sich andere Möglichkeiten der Gestaltung für Bedien-, Anzeigeelemente und deren Kopplung. Es muss keine Integration des Bedienelements im Anzeigeelement erfolgen, um eine hohe Kompaktheit zu erreichen, wie es bei Smartphones der Fall ist. Weiterhin kann eine höhere Zeit zum Erlernen des Systems in Kauf genommen werden, wenn dies danach eine produktivere Arbeit ermöglicht. Eine Trennung von Bedien- und Anzeigeelementen kann durchaus erwünscht sein, um jedem Nutzer sein individuelles Eingabegerät zur Verfügung zu stellen oder um die Wartung des Assistenzsystems zu vereinfachen, da nun jedes Element einzeln ausgetauscht werden kann.

Zusätzlich gibt es noch besondere Interaktionseinschränkungen im industriellen Umfeld durch die Arbeitsumgebung. Dort gibt es Lärm, Schmutz und wenig Platz. So kann dort nicht die im Konsumentenbereich weit verbreitete Touchscreen-Technik verwendet werden. Durch die rauen Umgebungsbedingungen kann die Touchscreen-Folie durch die Bedienung mit einem Handschuh, z. B. bei einem Ölwechsel, verschmieren, verschleifen und damit unbrauchbar werden. Auch die Bedienung eines normalen Tastenfeldes ist durch Benutzung von Handschuhen stark eingeschränkt. Auch eine auditive Ein- und Ausgabe ist im industriellen Umfeld problematisch durch die üblicherweise hohe Geräuschkulisse [Wit04].

## 2.1.6 Einsatz konventioneller Eingabegeräte

Oft werden daher in industriellen Anlagen für die Eingabe motorische Konzepte verwendet, wohingegen für die Ausgabe ein visuelles Anzeigenkonzept gewählt wird. Für die Eingabe von Informationen wurde dabei vorwiegend konventionelle Eingabegeräte aus dem PC-Bereich eingesetzt. Diese sind aber auf Grund von verschiedenen Bedingungen nicht sehr geeignet, wie die nachfolgende Auflistung zeigt.

**Tastatur** Da eine Standard-PC-Tastatur für den mobilen Einsatz zu groß ist, besitzen viele Industrie-PDAs eine kleinere integrierte Tastatur. Bei der Verwendung von Handschuhen ist die Bedienung der Tasten jedoch sehr kompliziert, da auf Grund der geringen Größe und des geringen Abstand der Tasten mehrere gleichzeitig gedrückt werden können.

**Maus** Die Maus ist das Standardeingabegerät im Computerbereich. Die Anforderung einer sauberen Kapselung im industriellen Bereich gegen Schmutz kann erfüllt werden. Die fehlende Sicherheit, dass im mobilen Kontext jederzeit eine ebene Unterlage vorhanden ist, schließt dieses Eingabegerät aus.

**Touchscreens** Als Lösung für den Konsumbereich hat sich aus den beschriebenen Problemen der Touchscreen etabliert. Als Schwäche muss hier jedoch gesehen werden, dass kein direktes taktiles Feedback einer Eingabehandlung erfolgt. Diese wurde auch von den Herstellern erkannt, so dass in neuen Displays, neben einer akustischen und visuellen Anzeige, das Feedback durch einen Vibrationsmotor erzeugt wird. Weiterhin wird bei der Bedienung Anzeigeraum mit der bedienenden Hand verdeckt. Andere Probleme resultieren aus dem industriellen Kontext. So stellt die Verschmutzung des Displays ein Problem dar, wenn mit öligen Handschuhen gearbeitet wird. Die Bedienung erfolgt zudem normalerweise zweihändig, da in der einen Hand der PDA gehalten wird und die andere die Bedienhandlungen auf dem Touchscreen ausführt. Dies führt auch zu einer hohen Ungenauigkeit der Bedienung, da beide Hände miteinander koordiniert werden müssen [LB03]

## 2.2 ERGONOMIE

### 2.2.1 Ziel der Ergonomie

Heutzutage ist man bei der Entwicklung von Produkten angehalten, diese ergonomisch zu gestalten. Dafür ist zunächst zu klären, was dieser Begriff bedeutet. Backhaus [Bac10] vertritt die Meinung, dass diese „als wissenschaftliche Disziplin das Zusammenwirken von Menschen und anderen Elementen eines Arbeitssystems, mit dem Ziel, das menschliche

*Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit eines Systems zu optimieren“* untersucht. In der DIN EN ISO 6385 [DIN6385] werden die positiven Auswirkungen der Ergonomie betont, da bei einer richtigen Anwendung „[...] *Ergonomie die Leistung und Effizienz des Arbeitssystems einschließlich der Arbeitenden ohne nachteilige Wirkungen auf deren Gesundheit, Wohlbefinden oder Sicherheit [optimiert]*“. Somit ist die Vermeidung oder Minimierung von Schädigungen oder Beeinträchtigungen auf den arbeitenden Menschen ein wichtiges Ziel in der Arbeitsgestaltung. Weiterhin sieht Herczeg [Her09, S. 35] sogar das Ziel, dass Ergonomie einen Beitrag zu einer positiven Persönlichkeitsentwicklung leistet, sofern dies möglich ist.

Die Erreichung dieser Ziele kann durch die Gestaltung der einzelnen Elemente eines Arbeitssystems ermöglicht werden. In dieser Arbeit soll es um die Gestaltung der Arbeitsmittel, im Speziellen der Hardware und Software, gehen. Andere nicht beachtete Teilbereiche sind die Gestaltung der Arbeitsorganisation, der Arbeitsaufgaben, der Arbeitsumgebung und des Arbeitsraumes oder Arbeitsplatzes.

## **2.2.2 Ergonomie in industriellen Arbeitsumgebungen**

Im industriellen Umfeld ist es besonders wichtig, dass die Interaktion mit den Geräten ergonomisch abläuft. Die DIN ISO EN 9241-1 [DIN9241-1, S. 4] stellt fest, dass eine gute ergonomische Gestaltung bei jedem Produkt oder System von Bedeutung ist, aber in gewissen Fällen eine besondere Wichtigkeit besitzt. Alle Fälle kommen in industriellen Arbeitsumgebungen vor: eine *intensive Benutzung* ist dadurch gegeben, dass die Benutzer mit den Geräten während der gesamten Arbeitszeit interagieren. Zudem kommt es in der Industrie auf die *Genauigkeit der erbrachten Leistung* des Benutzers an, da diese direkt mit der Produktqualität zusammenhängt. Die *Akzeptanz des Nutzers* ist in der Industrie nicht so relevant, da der Arbeitgeber dem Benutzer vorschreiben kann, welches Gerät er zu verwenden hat. Andererseits fällt das Arbeiten mit einem akzeptiertem Gerät leichter.

Ähnlich argumentiert Wittenberg [Wit01, S. 12 ff.], der die Situation von Operateuren in prozessindustriellen Anlagen beschreibt und auf die hohen geistigen Anforderungen eingeht. Diese müssen mehrere dynamische, unabhängige Systeme unter Kontrolle behalten. Dies erfordert einen Teil der mentalen Ressourcen, so dass für das Verstehen und Nutzen der Schnittstelle und Arbeitsmittel nur der restliche Teil der mentalen Ressourcen übrig bleibt.

Für Bubb [Bub07] ist Ergonomie ein nicht zu unterschätzender wirtschaftlicher Faktor. Ergonomisch gestaltete Arbeitsmittel reduzieren Belastungen in allen Ebenen (medizinisch, psychologisch, sozial und ökologisch). Damit wird mittel- und langfristig die Krankenquote reduziert und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit, Produktivität und Qualität gesteigert.

Wenn es versäumt wird, die menschlichen Fähigkeiten bei der Bedienung von Geräten zu beachten, also Geräte ergonomisch zu gestalten, führt dies zu langweiliger, ermüdender Arbeit, bei der sich häufiger Fehler einstellen [DIN9241-1, S. 4]. Durch solche Fehlbedienung

können neben der Gefährdung der Sicherheit des Benutzers zusätzlich ernsthafte Konsequenzen für die Anlage auftreten, wie Zerstörung von Anlagenteilen oder Produktionsausfälle. Um dies zu vermeiden, ist die Reihenfolge, Vollständigkeit und Dokumentation der Arbeitsschritte wichtig. Durch eine gute Ergonomie werden diese wichtigen Anforderungen an die Arbeitsschritte in der Wartung unterstützt.

Zudem ist es in industriellen Anlagen weit schwieriger eine gute Ergonomie zu gewährleisten als es in anderen Umgebungen, wie z. B. einem Büroraum, der Fall ist [BPBH06]. Es existieren eine Reihe von Umgebungsbedingungen, die einen negativen Einfluss auf die Ergonomie besitzen (vgl. Auflistung von Schlick in Abschnitt 2.1.4.4).

## 2.2.3 Konzepte der Ergonomie

Für die Untersuchung interaktiver Systeme ist es notwendig zu definieren, welche Eigenschaften in welcher Weise die Produktqualität beeinflussen. Dabei ist laut Mahlke [Mah05] „das am stärksten verbreitete Konzept für eine solche Produktqualität interaktiver Systeme [...] das Usability-Konzept“. Die in [DIN9241-11] definierte Usability, auch Gebrauchstauglichkeit genannt, beschreibt „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“. Wickens [Wic98, S. 392] sieht zusätzlich einen anderen hohen Einfluss in der Ergonomie: Auch wenn die mit dem System erbrachte Leistung zufriedenstellend ist, also die Gebrauchstauglichkeit hoch ist, sollte eine Verbesserung des Systems angestrebt werden, wenn die auftretende *Arbeitsbeanspruchung* zu groß ist. Dieses andere wichtige Konzept der Arbeitsbeanspruchung wird im Folgenden näher betrachtet.

## 2.2.4 Arbeitsbeanspruchung

### 2.2.4.1 Definition der Arbeitsbeanspruchung

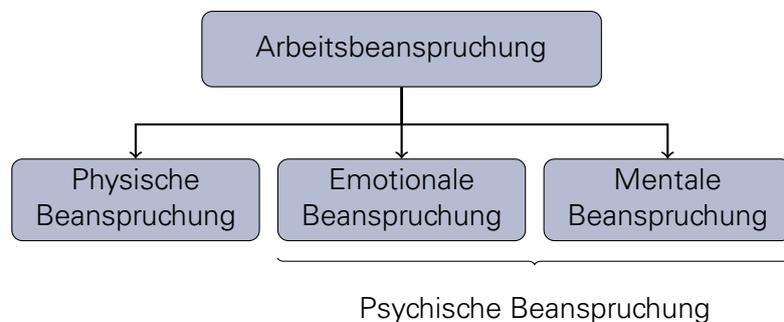
Die Arbeitsbeanspruchung ist ein Konzept in der Ergonomie, das ebenfalls in der DIN EN ISO 6385 [DIN6385] definiert wird als „*innere Reaktion des Arbeitenden/Benutzers auf die Arbeitsbelastung, der er ausgesetzt ist und die von seinen individuellen Merkmalen (z. B. Größe, Alter, Fähigkeiten, Begabungen, Fertigkeiten usw.) abhängig ist*“.

Dabei wird zwischen Belastung und Beanspruchung unterschieden. Die Norm [DIN6385] sieht die objektiv messbare *Arbeitsbelastung* als die „*Gesamtheit der äußeren Bedingungen und Anforderungen im Arbeitssystem, die auf den physiologischen und/oder psychologischen Zustand einer Person einwirken*“. Die Belastungen sind die Ursachen für die *Arbeitsbeanspruchung*, als ein subjektives Empfinden, das von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird.

Laut Lind und Sundvall [LS07] lässt sich Arbeitsbeanspruchung auch im Zusammenhang mit Effizienz sehen, welche, wie beschrieben, eine Unterskala der Gebrauchstauglichkeit und somit der Ergonomie ist. Effizienz ist die Menge der eingesetzten Ressourcen, um bestimmte Ziele zu erreichen. Zu diesen Ressourcen kann man Zeit genauso wie mentale Ressourcen zählen. Wenn eine größere Menge an mentalen Ressourcen aufgewendet werden muss, ist somit die Arbeitsbeanspruchung höher, weil der Benutzer sich stärker auf die Arbeitsaufgabe konzentrieren muss. In der Arbeit von Lumsden und Brewster [LB03] wird zusätzlich der Schluss zum mobilen Kontext gezogen, indem dabei auf die unabdingbare Wichtigkeit der Arbeitsbeanspruchung hingewiesen wird: da die Nutzer die reale Umgebung beobachten und mit ihr interagieren müssen, sollten weniger Ressourcen zur Verwendung des Assistenzsystems verwendet werden müssen. Andernfalls ergeben sich leicht Gefährdungsquellen für den Benutzer und andere Personen, da Gefahren zu spät oder gar nicht erkannt werden.

#### 2.2.4.2 Modell der Arbeitsbeanspruchung

Ein einheitliches und umfassendes Konzept zur Arbeitsbeanspruchung fehlt bisher weitgehend. Eine Trennung der Arbeitsbeanspruchung in einzelne Beanspruchungsarten erfolgt in der Literatur weder einheitlich noch eindeutig und auch bei einzelnen Autoren nicht scharf. Im Folgenden wird die von Ribback [Rib03] getroffene Unterscheidung verwendet, die stark auf Vorarbeiten von Manzey [Man98] aufbaut. Dabei wird zwischen emotionalen, mentalen und körperlichen Beanspruchungen unterschieden (vgl. Abb. 2.5).



**Abbildung 2.5:** Modell der Arbeitsbeanspruchung, angelehnt an Ribback [Rib03]

*Physische Beanspruchungen* entstehen auf Grund von körperlich-muskulären Belastungen, wie sie z. B. das Tragen von Lasten oder das Arbeiten in wenig ergonomischen Körperhaltungen darstellen. Nach einer längeren Belastungsphase äußern sie sich in körperlichen Beschwerden, wie Rückenschmerzen. Die körperliche Beanspruchung spiegelt sich gut in einem vermehrten Energieverbrauch, einer erhöhten Sauerstoffaufnahme und einer erhöhten Aktivität des Herz-Kreislauf-Systems wider. Somit kann sie über Erfassung einfacher Biosignale mit Hilfe eines EKG und einer Atmungsmessung bestimmt werden. Im Normalfall sollte die Nutzung eines mobilen Assistenzsystem nur geringe körperliche Belastungen

verursachen, da das Gerät auf den mobilen Einsatzzweck abgestimmt und damit leicht, portabel und ohne große Kraftaufwände und Stellwege bedienbar ist. Dies trifft vor allem in der betrachteten industriellen Arbeitsumgebung zu, da hier die Belastung durch die Wartungsaufgaben – z. B. Montieren eines Geräts oder Tragen eines Anlagenteils – körperlich weit höher eingeschätzt werden kann.

Der Mensch erlebt Belastungen aber nicht nur auf der körperlichen Ebene. Auch in der Psyche stellen sich Beanspruchungen ein, die ein ebenso großes negatives Potential besitzen. Die große Gefahr besteht darin, dass diese Belastungen und die daraus folgenden Beanspruchungen weit weniger offensichtlich sind. *Emotionale Beanspruchungen* werden durch ausführungsspezifischen Belastungsfaktoren (z. B. Zeitdruck, Lärm, Hitze, Gefahren, soziale Konflikte) ausgelöst (vgl. [Rib03]) und haben als Folge oft aversive Gefühle, wie Angst und Hilflosigkeit.

Ebenso wirkt sich die *mentale Beanspruchung* in der psychischen Ebene aus. Diese sieht Ribback als „*kognitive, eher nicht-emotionale Reaktion des menschlichen Informationsverarbeitungssystem auf äußere Belastungen [die,] durch aufgabenspezifische Faktoren wie Schwierigkeit und Komplexität bestimmt wird*“. Dabei wird häufig ein aufmerksamkeitstheoretisches Konzept verwendet, das von einer begrenzten Kapazität des menschlichen Informationsverarbeitungssystems ausgeht [Wic98]. Dabei werden Unterschiede in der mentalen Beanspruchung als Ausdruck unterschiedlich hoher Ausschöpfung dieser Kapazität gedeutet.

Eine Unterscheidung zwischen mentalen und emotionalen Beanspruchungen ist trotzdem schwierig, da beide Beanspruchungsarten im realen Arbeitsalltag häufig zusammen auftreten und sich beide in der psychischen Ebene ausdrücken, wobei die Reaktionen sehr ähnlich und kaum trennscharf sind. Die Differenzierung kann nur durch die verschiedenen Ursachen der Beanspruchungen erfolgen. Daher wird im Folgenden die emotionale und mentale Beanspruchung zu der *psychische Beanspruchung* zusammengefasst (vgl. [Rib03]). In der Literatur taucht in diesem Zusammenhang dafür auch der Begriff der kognitiven Beanspruchung auf.

Diese Zusammenfassung der emotionalen und kognitiven Komponenten verwendet auch die DIN EN ISO 10075-1 [DIN10075-1]. Dort werden Begriffe im Bereich der psychischen Belastung und Beanspruchung definiert und deren Ursachen und Wirkungen aufgezeigt. Eine Beschreibung, die die dort aufgezeigten Zusammenhänge näher erläutert, findet sich bei Herzceg [Her09]. Im Folgenden sollen die aus diesen Quellen gewonnen Erkenntnisse in den betrachteten Kontext eingeordnet werden.

Psychische Belastung ist „*die Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und psychisch auf ihn einwirken*“. Somit wirkt jede Tätigkeit, wobei im Folgenden die Arbeitstätigkeit betrachtet werden soll, auf die Psyche ein und bewirkt so „*Vorgänge des Anstiegs oder der Verminderung psychischer Beanspruchung*“. Diese Reaktionen sind weder positiv noch negativ besetzt. Durch diese können unmittelbar

Anregungseffekte oder beeinträchtigende Effekte und mittelbar andere Auswirkungen, wie z. B. Übungseffekte, auftreten. Die Erscheinungsform und -stärke dieser Folgen sowie deren Dauer, lang- oder kurzfristig, unterscheiden sich je nach den individuellen und situativen Voraussetzungen.

Die psychische Belastung wird durch eine Vielzahl von Randbedingungen beeinflusst: Anforderungen seitens der Aufgabe, physikalische Randbedingungen, soziale und organisationale Faktoren sowie gesellschaftliche Faktoren. Dabei hat man während der Durchführung eines Versuchs mit Versuchspersonen nur auf die ersten beiden Gruppen eine direkte Einflussmöglichkeit. So ist hier unter anderem die Dauer und der Verlauf der Tätigkeit, der Aufgabeninhalt und, als physikalische Bedingung, die Beleuchtung und Lärmkulisse einstellbar. Andere Eigenschaften, wie Gefahren durch die Aufgabe (explosive oder giftige Stoffe), lassen sich in einer Evaluation nicht verändern. Auch gesellschaftliche Faktoren, wie die wirtschaftliche Lage am Arbeitsmarkt, wirken auf die psychische Belastung ein, können jedoch in dieser Arbeit nicht untersucht werden.

Aus der Belastung wird abhängig von den individuellen Merkmalen eine psychische Beanspruchung. Diese ist als „*die unmittelbare (nicht die langfristige) Auswirkung der psychischen Belastung im Individuum in Abhängigkeit von seinen jeweiligen überdauernden und augenblicklichen Voraussetzungen, einschließlich der individuellen Bewältigungsstrategien*“ definiert. Dabei spielen z. B. das Anspruchsniveau, Motivation, Erfahrung, Gesundheit und die aktuelle Verfassung der betrachteten Person eine Rolle. Andere in diesem Zusammenhang in der Literatur gebrauchte Begriffe sind *mentale Beanspruchung*, *mental workload* und *cognitive workload* [Sch09].

Je nach Art, Dauer und Größe der psychischen Beanspruchung kann diese bewältigt werden und es können sich positive Effekte, wie Aufwärmefekte oder Aktivierung entfalten. Dies geht mit Freude, Motivation, Leistungssteigerung und auch Kompetenzerwerb einher und ist daher anzustreben. Als Beispiel dafür dient der Befund, dass eine Aufgabe nach kurzer Eingewöhnungszeit weniger beanspruchend empfunden wird als beim Beginn der Tätigkeit.

Andererseits treten bei Nicht-Bewältigung der Beanspruchung häufig auch negative Effekte auf. Diese äußern sich in Ermüdung, Leistungsabfall, Ärger bis hin zu komplexen Erkrankungen. Diese sind durch einen Monotoniezustand, eine herabgesetzte Wachsamkeit oder psychische Sättigung gekennzeichnet. Als Auswirkungen solcher negativer Effekte sieht Rouse [REH93], dass Arbeiter nur eine verringerte Leistung erbringen bzw. ihre Leistung nicht über längere Zeit aufrecht erhalten können.

## **2.2.5 Messmethoden der Arbeitsbeanspruchung**

Im folgendem Abschnitt sollen bekannte empirische Messverfahren für die Arbeitsbeanspruchung aufgelistet, diskutiert und bewertet werden. Alternativ können analytische Verfahren verwendet werden, zu denen z. B. Expertenbeurteilungen und Simulationen gehören. Diese

werden aber nicht weiter behandelt, da sie nicht im Fokus des Interesses dieser Arbeit stehen. Weitere Informationen zur Verwendung von analytischen Messverfahren finden sich bei Lysaght et al. [LHD<sup>+</sup>89].

Eine empirische Messung der Ergonomie und speziell der Arbeitsbeanspruchung gestaltet sich als nicht trivial. Es wurden in vielen Arbeiten Messungen von Beanspruchungen durchgeführt, jedoch wird von vielen Autoren aufgrund der jeweils speziellen Fragestellung ein individuelles Vorgehen gewählt. Dies begründet sich darin, dass in der Literatur keine eindeutige Meinung herrscht, wie Arbeitsbeanspruchung gemessen werden kann [NESN02]. Das liegt zum Teil daran, dass die Arbeitsbeanspruchung nicht direkt bestimmt werden kann, da sie als innere Empfindung eines Menschen nicht gemessen werden kann und somit latent ist. Sie muss daher über Verwendung von manifesten Hilfsvariablen bestimmt werden. Insgesamt konnte sich also noch kein einheitliches Vorgehensmodell entwickeln, da auch in der Frage, was gemessen werden soll, keine Einigkeit besteht.

Ein anderes verschieden gelöstes Problem ergibt sich mit der Fragestellung, ob im Labor oder im Feld gemessen werden soll. Als ein generelles Problem bei der Messung im Labor stellt sich für O'Brien [O'B96, S. 182] die Tatsache heraus, dass teilweise ein großer Unterschied zwischen Labor und realer Welt besteht. In der Vielzahl der Untersuchungen im Labor werden die Aufgaben der Versuchspersonen (VP) nicht unterbrochen, nicht geändert und meist nur kurzzeitig durchgeführt. Weiterhin ergeben sich keine Konsequenzen für die VP aus schlechten Leistungen oder gemachten Fehlern. Dies ist in der Realität anderes und erhöht so die Beanspruchung für die Personen. Da man später Aussagen über die reale Welt treffen möchte, wäre es also notwendig die Bedingungen für die VP im Labor möglichst weit den in der Realität erlebten Bedingungen nachzubilden. Gewisse Aspekte kann man dort aber nicht nachbilden (Angst um Arbeitsplatz etc.), andere werden bewusst ausgeblendet, da diese Einflussfaktoren eine hohe Varianz besitzen und damit die Auswirkungen der interessierenden untersuchten Größe überdecken können (Unterbrechung von außen etc.).

In Anlehnung an Waard [Waa96] soll zunächst eine Betrachtung der wichtigsten methodischen Aspekte bei der Beurteilung von verschiedenen Indikatoren für die Arbeitsbeanspruchung gegeben werden.

**Sensitivität** Empfindlichkeit der Methode, mit der Unterschiede in der Arbeitsbeanspruchung erfasst werden können.

**Diagnostizität** Fähigkeit, die gemessene Beanspruchung auf bestimmten Aspekt der Belastung zurückzuführen, also der Zuordnung zu einer motorischen, emotionalen oder mentalen Beanspruchung.

**Interferenzfreiheit** Ausmaß, in dem der Messprozess den eigentlichen Handlungsablauf verändert und somit das Messergebnis verfälscht. Die durch die Messung hervorgerufene Beanspruchung sollte gering sein, die Messmethode also eine niedrige Intrusion besitzen.

**Experimentelle Anforderungen** Praktische Anforderungen an eine Methode, Voraussetzung an bestimmtes technisches Equipment und notwendiges technisches Wissen.

Eine Manifestierung der Beanspruchung kann laut O'Donnel und Eggemeier auf drei verschiedenen Ebenen erfolgen [OE86]: das subjektive Beanspruchungsempfinden, die physiologischen Auswirkungen und die Reaktionen auf der Leistungsebene. Die Reaktion auf eine gegebene Belastung kann in allen Ebenen unterschiedlich ausfallen, da die Indikatoren in den verschiedenen Ebenen unterschiedlich sensitiv für verschiedene Arten und Stärken der Belastungen sind. Somit ist eine vollständige Erfassung der Beanspruchung nur durch Messung von Indikatoren in allen drei Ebenen möglich [Röt10]. Im Folgenden werden drei Prinzipien beschrieben, die jeweils Indikatoren für eine Ebene bereitstellen können.

### 2.2.5.1 Selbstbeschreibungsmessungen

Subjektive Bewertungsmechanismen legen die Annahme zu Grunde, dass die Benutzer selber in der Lage sind, das Ausmaß ihrer Beanspruchung und die Grenzen ihrer Informationsverarbeitungskapazität zu bewerten. Sie wurden und werden für die Bestimmung der mentalen Beanspruchung eines Nutzers häufig verwendet, da sie einer direkten Messung sehr nahe kommen [O'B96, S. 188]. Laut Wickens [Wic98, S. 35] sind sie objektiven Methoden in gewissen Bereichen sogar überlegen, da eine Kondensierung vieler Faktoren dort schon einbezogen ist. Außerdem entfällt der Prozess, aus Unmengen gemessener Daten die wichtigen heraus zu extrahieren. So favorisieren verschiedene Autoren [MS92, HS88] subjektive Messungen aufgrund der höheren Validität. Als weitere große Vorteile zählen die niedrigen Kosten und der geringe Aufwand, eine solche Befragung durchzuführen und auszuwerten.

Problematisch sind dabei aber mehrere Faktoren. Zum einen kann die Messung erst nach dem Versuch durchgeführt werden. Ein Nachteil ist dabei die geringe Erinnerungsfähigkeit, so dass vor allem Beanspruchungsspitzen das Ergebnis beeinflussen [HS88]. Andererseits kann der Versuch für die Befragung unterbrochen werden, was in einer schlechten Interferenzfreiheit mündet. Zudem ist es nicht möglich, kontinuierlich den Beanspruchungszustand zu messen, da bei einer häufigen Unterbrechung wieder Belastungen auftreten. Weiterhin kann die Fragestellung von den VP unterschiedlich interpretiert werden. Bortz [Bor07, S. 182] weist daraufhin, dass schon geringfügige Veränderungen in der Formulierung der Frage das Antwortverhalten beeinflussen. Insofern ist der genaue Wortlaut eines Fragebogens immens wichtig und daher sollte für die Vergleichbarkeit ein standardisierter Fragebogen verwendet werden. Außerdem kann bezweifelt werden, ob die Benutzer ausreichend Fähigkeiten haben, sich selbst zu beobachten und die erlebte Beanspruchung richtig zu bewerten.

In der Forschung wird eine große Menge verschiedener standardisierter Fragebögen verwendet, deren am häufigsten verwendete von O'Brien [O'B96] aufgelistet wurden:

- Rating Scale Mental Effort (RSME)
- Activation Scale
- NASA Taskload Index (NASA-TLX)
- Subjective Workload Assessment Technique (SWAT)
- Modified Cooper-Harper Skala

### 2.2.5.2 Physiologische Messungen

Physiologische Messverfahren verfolgen das Ziel, mit Hilfe von Biosignalen und psychophysiologischen Parametern auf die Beanspruchung zu schließen. Sie besitzen eine Reihe von Vorteilen gegenüber subjektiven Methoden, da die Person keine direkte Interaktion mit dem Messgerät durchführen muss und daher keine Unterbrechung der Aufgabe für die Messung erforderlich ist. Somit ist eine objektive Bestimmung von Indikatoren für die erlebte Beanspruchung möglich. Weiterhin ist die Durchführung einer kontinuierlichen Messung mit einer hohen zeitlichen Auflösung möglich, was eine genaue Auswertung der Beanspruchung in Reaktion auf Belastungen zu bestimmten Zeitpunkten ermöglicht.

In einer Vielzahl von Arbeiten wurden verschiedene physiologische Messverfahren auf die Korrelation mit der Arbeitsbelastung bzw. Arbeitsbeanspruchung untersucht. Es wurde festgestellt, dass viele physiologische Messverfahren prinzipiell sensitiv für die Arbeitsbeanspruchung sind [WDD07], wobei jedes Verfahren sowohl Befürworter als auch Kritiker hat. Ein Problem besteht darin, eine hohe Intrusion für die VP und damit geringe Interferenzfreiheit zu vermeiden. Außerdem besitzen viele Verfahren diverse Querempfindlichkeiten. Nachfolgend wird eine Auflistung der am häufigsten verwendeten Indikatoren für die mentale Beanspruchung vorgenommen, die sich an Manzey [Man98] orientiert.

**Kardiovaskuläre Indikatoren** Ein wichtiges Verfahren zur Beanspruchungsbestimmung ist die Messung der Herzaktivität mithilfe eines Elektrokardiogramms (EKG). Als einfachstes Signal steht hier die *Herzrate (HR)* zur Verfügung [Mui09], bei der davon ausgegangen wird, dass ein schnellerer Herzschlag auf eine höhere Beanspruchung schließen lässt. Aufgrund der Einfachheit der Durchführung wird sie in vielen Untersuchungen als klassische Methode verwendet. Dass die Sensitivität in vielen Versuchen nachgewiesen wurde, zeigt eine Auflistung von Schwalm [Sch09]. Als Nachteile führt Nickel [NESN02] eine Sammlung von Einflussgrößen auf, zu denen z. B. die körperliche Verfassung und das Alter gehören.

Als weitere EKG-Größe zur Bestimmung der mentalen Beanspruchung kann die *Herzratenvariabilität (HRV)* verwendet werden. Dabei ist eine Betrachtung von verschiedenen Frequenzbändern notwendig [Man98]. Der Frequenzbereich im Band von 0.02 ... 0.06 Hz wird von langsam oszillierenden Trends dominiert. Das mittlere Frequenzband im Bereich von 0.07 ... 0.14 Hz ist abhängig von der Blutdruckregulation und wird als sensitiv für die Beanspruchung angesehen. Die Atemfrequenz bestimmt maßgeblich ein oberes Frequenzband

im Bereich von 0.15 . . . 0.50 Hz. Insgesamt erhält man ein Ergebnis, das weniger als die HR von der körperlichen Belastung einer Person abhängig ist [Man98].

Die Messung von EKG-Signalen ist insgesamt sehr unspezifisch, besitzt also keine Diagnostizität für eine bestimmte Beanspruchungsart, da sich die gemessene Beanspruchung nicht auf eine kognitive Beanspruchung, motorische Anforderungen oder emotionale Reaktionen zurückführen lässt [Man98]. Hering [Her99] fasst mehrere Untersuchungen zusammen, die auf Nachteile eingehen, die in einer hohen Trägheit der Herzrate, Schwierigkeiten bei der Interpretation der Herzratenvariabilität und der Abhängigkeit von anderen Faktoren (Tageszeit, Atmung, usw.) bestehen. Als weitere Einschränkungen dieser Verfahren sieht Röttger [Röt10], dass nur VP ohne Herz-Kreislaufkrankungen untersucht werden können. Ein großer Vorteil aller Indikatoren der Herzaktivität ist die geringe Artefaktanfälligkeit und einfache Durchführung, da für die Messung viele gute und kompakte EKG-Logger verfügbar sind, die die Bewegungsfreiheit der VP nur geringfügig einschränken.

Neben der Rhythmik des Herzschlages wird auch der dadurch aufgebaute Blutdruck von der empfangenen Beanspruchung beeinflusst [Man98]. Um diese Größe kontinuierlich in einer ausreichenden Genauigkeit bestimmen zu können, ist eine Messung mit Hilfe einer angelegten Kanüle notwendig. Dies ist in den meisten Fällen den VP nicht zumutbar. Auch hier ergeben sich große Abhängigkeiten von anderen Einflussgrößen.

**Okulomotorische Indikatoren** Andere häufig verwendete Verfahren zur Bestimmung der Beanspruchung beruhen auf der Messung von Parametern des Auges. Dazu hat sich in den letzten Jahren die Verwendung der Methode des Eyetracking signifikant erhöht [TA08], bei der mit Hilfe von einer Infrarotkamera das Auge und dessen Bewegung aufgenommen werden. Diese können als stationäre Systeme oder als portable Lösungen eingesetzt werden. Problematisch an diesen Systemen ist die Notwendigkeit einer Kalibrierung für jede VP und die hohen Anschaffungskosten für das Equipment. Außerdem können sich laut Poole und Ball Probleme bei der Kalibrierung durch ungünstiges Umgebungslicht, Kontaktlinsen oder Brillen der VP sowie ungewöhnliche Augenformen ergeben [PB05]. So ergibt sich laut Jacob und Karn [JK03] ein Anteil von 10–20 % der VP, bei denen keine Messung durchgeführt werden kann, wobei bei neueren Systemen diese Quote weiter gefallen sein dürfte. Die Verwendung von elektro-okulographischen Verfahren (EOG), die die Aktivität der Augenmuskulatur messen, wird weniger häufig angewendet, da durch das Anbringen von Elektroden im Gesicht eine Beanspruchung der VP gegeben ist [Her99].

Ein weit verbreitetes Verfahren ist die *Pupillometrie*, bei dem Merkmale der Pupille ausgewertet werden. Hier ergibt sich eine breite Basis empirischer Befunde, die die Pupillenreaktionen als sehr sensitiven, aber eher globalen Indikator mentaler Beanspruchung ausweisen [Man98]. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Weitung der Pupille ein guten Indikator für eine höhere globale Arbeitsbelastung darstellt [Waa96]. Die fehlende diagnostische Aussage zur zugrunde liegenden Ursachen sind in einer anwendungsorientierten Situation, wie sie im Fokus der Arbeit steht, nicht unbedingt notwendig. Bei der Nutzung dieses Merkmals muss

aber sichergestellt werden, dass die reflexhaften Pupillenreaktionen auf Grund einer Helligkeitsänderung oder Akkomodationsprozesse beim Nahsehen ausgeschlossen bzw. berücksichtigt werden. Deshalb sollte auf eine gleichmäßige Beleuchtung geachtet werden.

*Spontane* Lidschlüsse weisen einen Zusammenhang zu perceptiven Aspekten der mentalen Beanspruchung auf [Man98]. Die Spontanität der Lidschlüsse ist dadurch charakterisiert, dass diese nicht willentlich oder reflexhaft ausgelöst werden. Somit kann über die Messung der Lidschlaghäufigkeit auf die mentale Beanspruchung geschlossen werden. Dieser Zusammenhang konnte jedoch nur in Untersuchungen mit Aufgaben mit einer visuellen Beanspruchungskomponente bestätigt werden [Man98], dort weist diese Methode jedoch eine hohe Sensitivität auf [RPCN08].

Eine aufwändige Methode ist das Erfassen der Blickbewegung. Natürlicherweise blicken Personen die längste Zeit ihrer Handlungen auf die Dinge, mit denen sie sich beschäftigen. So kann aus der Betrachtungsdauer von bestimmten Objekten auf eine höhere mentale Beanspruchung von den dort positionierten Geräten geschlossen werden. Andere interessante Merkmale sind die Parameter der Sakkaden und Fixationen des Auges. So können die Zeiten, Häufigkeiten und die Abfolge von schnellen Blickzielbewegungen (Sakkaden) des Auges und dem dortigen Verweilen (Fixationen) als Indikatoren für mentale Beanspruchung verwendet werden [OE86].

**Hirnelektrische Indikatoren** Die Indikatorwirkung von hirnelektrischen Informationen leitet sich aus dem Zusammenhang von mentaler Beanspruchung und den zentralnervösen Prozessen im menschlichen Informationsverarbeitungszentrum her [Man98]. Dabei können zwei Verfahren unterschieden werden: die EEG-Spontanaktivität und das ereigniskorrelierte Potential.

Die EEG-Spontanaktivität gründet sich auf Spannungsveränderungen unterschiedlicher Amplitude und Frequenz, die sich von der Schädeldecke der zu untersuchenden Person abgreifen lässt. Dies ist ein sehr aufwändiges Verfahren, da das Signal in verschiedene Frequenzbänder aufgeteilt und untersucht werden muss. In der Zusammenfassung von Manzey zeigt sich ein inkonsistentes Bild, da verschiedene Frequenzbänder in unterschiedlichen Untersuchungen widersprüchliche Ergebnisse gezeigt haben. Problematisch ist eine Einstreuung von Artefakten z. B. durch Augenbewegungen, Lidschlüsse und motorische Bereitschaftssignale [Man98].

Als zweites Verfahren steht die Messung des ereigniskorrelierten Potentials zur Verfügung. Dieses bewertet die Abfolge von Spannungsveränderungen nach einem diskreten Ereignis. Da dieses Signal von der Spontanaktivität mit höheren Amplituden überlagert wird, sind vor der Auswertung spezielle Filter auf das Signal anzuwenden. Es zeigt sich eine hohe Sensitivität, aber ebenfalls eine hohe Artefaktanfälligkeit und ein geringer Signal-Rausch-Abstand, so dass das Verfahren in Feld- und Laborstudien kaum eingesetzt wurde.

**Atmung** Auch bestimmte Merkmale der Atmungscharakteristik sind abhängig von der mentalen Beanspruchung. So können als Indikatoren für die Beanspruchung die Atemfrequenz, die Atemvariabilität, das Atemzugvolumen und das Atemminutenvolumen gemessen werden. In verschiedenen von Manzey [Man98] untersuchten Arbeiten wurde belegt, dass bei steigender Beanspruchung der Mensch schneller, flacher und regelmäßiger atmet und dabei ein höheres Atemvolumen pro Minuten umsetzt. Eine Diagnostizität kann dabei nicht erkannt werden und auch die Sensitivität nimmt bei Betrachtung einzelner Merkmale stark ab. Eine Messung des Atemvolumens mit hoher Genauigkeit gestaltet sich als problematisch, so dass auch dieses Messverfahren eher selten angewendet wird.

**Andere Indikatoren** Andere verbreitete Möglichkeiten sind Messung der Gesichtstemperatur, der Muskelaktivität und des Hautleitwiderstands (elektrodermale Aktivität). Eine gute Übersicht findet sich dazu in der Dissertation von Hering [Her99]. Die meisten dieser Verfahren haben Nachteile aufgrund ihrer hohen Intrusion, also Einwirkung des Messmittels auf die Versuchsperson, oder ihrer ungenügenden Mobilität.

### 2.2.5.3 Leistungsmessung

Als letzte Gruppe der empirischen Messverfahren für die Beanspruchung schließen Leistungsmaße von einer bestimmten Leistung in einer Aufgabe auf die Beanspruchung der Person. Dabei ist zwischen der Leistungsmessung bei Primär- und Sekundäraufgaben zu unterscheiden. Beide Arten haben normalerweise eine große Interferenzfreiheit, da die Leistungen hinterher aus den Ergebnissen ausgewertet werden. Auch die experimentellen Anforderungen sind im Vergleich zu physiologischen Messungen eher gering.

**Primäraufgabe** Bei der Messung der Leistung in der eigentlichen Hauptaufgabe wird das Ergebnis der Aufgabenausführung ermittelt. Wenn die Belastung erhöht wird, müssen mehr kognitive Ressourcen eingesetzt werden und somit steigt die Beanspruchung. In gewissen Beanspruchungszuständen ist davon auszugehen, dass eine Erhöhung der Belastung auch einen negativen Einfluss auf die erbrachte Leistung hat. So kann man die erbrachte Leistung als einen Indikator für die Beanspruchung des Nutzers verwenden.

Je nach der spezifischen Aufgabenstellung müssen nun verschiedene Maße für die Leistung in der Primäraufgabe herangezogen werden [Waa96]. Beispiele sind Reaktionszeiten, Qualität der Antworten oder Zeitdauer einer Tätigkeit. Bei einer höheren Leistung kann man in bestimmten Belastungsbereichen davon ausgehen, dass der Nutzer eine geringere Beanspruchung erlebt hat. Andererseits können in anderen Situationen Nutzer mit der gleichen Leistung vollkommen andere Strategien des Einsatzes von Ressourcen verwendet haben. So kann ein Nutzer an die Leistungsgrenze gegangen sein, ein anderer hätte es jedoch auch noch geschafft, eine zusätzliche Aufgabe zu lösen. Positiv an der Messung der Leistung der

Hauptaufgabe ist die Tatsache, dass dies ein Maß ist, an dem man nicht nur für die Bestimmung der Arbeitsbeanspruchung interessiert ist, sondern es auch als direkte Zielgröße bei der Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen nutzt [OE86].

**Sekundäraufgabe** Eine weit verbreitete Methode zur Messung der Leistung ist die Nutzung einer Sekundäraufgabe. Hier sollen die neben der Aufgabenausführung noch freien Informationsverarbeitungsressourcen einer Person ermittelt werden. So ist neben der Hauptaufgabe eine zusätzliche Aufgabe zu stellen, die mit einer niedrigen Priorität bearbeitet werden soll. Diese Sekundäraufgabe besteht typischerweise aus einfachen Rechenoperationen oder ähnlichen mit der Hauptaufgabe nicht zusammenhängenden Aufgabenteilen [O'B96]. Die Messung der Leistung der Sekundäraufgabe erlaubt jedoch eine einfachere Interpretation der Ergebnisse. Bei einer höheren Beanspruchung hat der Nutzer weniger Zeit, die Nebenaufgabe zu bearbeiten und erzielt daher dort eine schlechtere Leistung.

Es ergibt sich aber ein Problem dadurch, dass die Nebenaufgabe die Natur der Hauptaufgabe verändert und somit die Arbeitsbeanspruchung verfälscht wird. Man kann versuchen, diesen Einfluss zu minimieren, indem man den Versuchspersonen intensiv die Priorität der Hauptaufgabe verdeutlicht, wohingegen die Nebenaufgabe nur bei auslastungsarmen Zuständen durchgeführt werden soll [O'B96].

## 2.3 STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK IM BEREICH DER ERGONOMIE DER MOBILEN INTERAKTION

Mit dem Stand der Forschung und Technik im Bereich der mobilen Interaktion bei Wartungstechnikern hat sich Fallmann [Fal02, Fal03] beschäftigt. Er kritisiert, dass häufig für die Erstellung von mobilen Assistenzsystemen Paradigmen aus der Bürowelt übernommen werden und nicht auf die speziellen Bedürfnisse der Wartungstechniker im Feld eingegangen wird. So ist deren Mobilität und die Möglichkeit, ihre Arbeit für andere Notfälle jederzeit zu unterbrechen, eine wichtige Voraussetzung für deren Leistung. Daher wurde in Fallmans Arbeit ein prototypisches Assistenzsystem entwickelt, das aus einem am Unterarm befestigtem PDA besteht. Somit kann ein beidhändiges Arbeiten ermöglicht werden. Es nutzt eine Steuerung über Gesten und besitzt einen RFID-Reader, um schnell durch Einscannen von Tags der Geräte zu diesen im Assistenzsystem zu springen. Weiterhin wurde in den Untersuchungen festgestellt, dass eine einfache Kommunikation mit anderen Personen, Kollegen oder Herstellern von Anlagenteilen für eine effiziente Arbeit wichtig ist.

In vielen Untersuchungen wird keine Unterscheidung zwischen Belastungen und Beanspruchungen vorgenommen. Es werden jedoch häufig Messmethoden verwendet, die zur Bewertung der Beanspruchung geeignet sind. Am stärksten sind dabei die Bereiche Automobilverkehr und Luftfahrt untersucht worden.

Scheufler [Sch02] hat verschiedene subjektive Methoden untersucht, die die situative Fahrerbelastung messen. Als Hauptbelastung diente das Führen eines Fahrzeugs in einem Simulator. Die Variation der Belastung erfolgte durch eine visuelle Zusatzaufgabe. Gemessen wurden die subjektiven Befindlichkeiten mit dem *NASA-TLX*, dem *Basler Befindlichkeitsfragebogen* und dem *Kurzfragebogen zur aktuellen Beanspruchung*. Daneben gab es ein Interview mit einer Videokonfrontation. Als Ergebnis stellt sich heraus, dass standardisierte Fragebögen ein gutes Verfahren darstellen, um die Belastung zu messen. Eine Verbesserung der Ergebnisse kann aber erreicht werden, indem die standardisierten Fragebögen an die Aufgabenstellung angepasst werden. Weiterhin sollten mehrere, sich ergänzende Methoden genutzt werden.

Eine explorative Studie zur Messung der mentalen Beanspruchung bei Dekodieraufgaben hat Ribback [Rib03] durchgeführt. Die mentale Beanspruchung wurde durch die Bearbeitung einer Dekodieraufgabe in verschiedenen Schwierigkeitsgraden verursacht, die den Einsatzkodes einer Feuerwehroleitstelle entlehnt waren. Während der Bearbeitung wurden EKG-Signale, Blutdruck, Hautleitwiderstand, Spontanreaktionen der elektrodermalen Aktivität, Atmungsparameter und EEG-Signale als physiologische Größen gemessen. Dabei wurde versucht, eine Beeinflussung des EEG durch Lidschläge herauszufiltern, indem EEG-Signale nur in Phasen ohne Lidschläge ausgewertet wurden. Die Beeinflussung der Herzrate durch tiefe Atemzüge wurde durch eine Mittlung über mehrere Minuten minimiert. Es zeigte sich, dass eine alleinige Erfassung subjektiver Beurteilungen zur mentalen Beanspruchung nicht valide genug ist. Erst durch physiologische Parameter konnten Effekte nach einer Lernphase erfasst werden.

In einer Untersuchung von de Greef et al. [GL09] wurden Änderungen der Pupillengröße und verschiedene Parameter der Augenbewegung als Indikator für die Beanspruchung gemessen, während die Arbeitsbelastung variiert wurde. Die Aufgabe bestand in der Bedienung eines elektronischen Kampfunterstützungssystems für die Marine. Als Referenz mussten die VP alle 100 Sekunden auf einer fünf-stufigen Skala ihre Beanspruchung angeben. Dabei wurde eine signifikante Korrelation zwischen der Pupillengröße und der Fixationszeit des Auges festgestellt. Dagegen musste die Messung der Fokuswechselfrequenz und Fokuswechselgeschwindigkeit des Auges verworfen werden, da dort keine signifikanten Effekte aufgetreten sind.

Ebenfalls im Verkehrsbereich ist die Dissertation von Hering [Her99] angesiedelt. Hier wurde mit Hilfe einer Nebenaufgabe die kognitive Beanspruchung im Straßenverkehr untersucht. Es zeigte sich dabei, dass sowohl eine Leistungsmessung über die Auswertung der Lenkbewegung als auch eine physiologische Messung der Herzrate signifikante Zusammenhänge mit der Belastung durch die Nebenaufgabe zeigen.

Mit der Beanspruchung von Kabinenpersonal auf transmeridianen Strecken beschäftigte sich Vejvoda [Vej01]. Es wurde dabei eine Messung der Gesamtbeanspruchung mit einer Vielzahl von Indikatoren eingesetzt. Als subjektive Methode kam der NASA-TLX zum Einsatz und als physiologische Methoden wurden die Messung der Herzfrequenz, des Kortisolgehalts im

Blut sowie die Messung des Blutdrucks eingesetzt. Alle Indikatoren haben gezeigt, dass während des Fluges eine höhere Belastung als in den Ruhepausen aufgetreten sind und dass Unterschiede in der Beanspruchung bei der Betreuung der unterschiedlichen Klassen eines Flugzeugs vorhanden sind. In der subjektive Bewertung war der Rückflug beanspruchender, wobei dies mit den physiologischen Verfahren nicht bestätigt werden konnte.

Die Auseinandersetzung mit abgesetzten Eingabegeräten in der Forschung konzentriert sich vor allem auf den Verbraucherbereich und dort im speziellen auf die Texteingabe. In der Untersuchung von Clawson [CLSC05] sollten VP mit abgesetzten Eingabegeräten, Twiddler und Mini-QWERTY-Tastaturen Texte schreiben. Der Versuch wurde mit und ohne Blickmöglichkeit auf den getippten Text sowie das Eingabegerät durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Schreibgeschwindigkeit als auch die Tippfehler analysiert. Es stellte sich heraus, dass sowohl Twiddler, als neuartiges Eingabegerät, als auch die Mini-Tastaturen im Normalfall geeignete Eingabegeräte im mobilen Kontext sind. Wurde jedoch die Sichtverbindung zu der Tastatur unterbrochen, verringerte sich die Schreibgeschwindigkeit stark, während die Fehlerrate stark anstieg. Dieser Effekt war bei Twiddler weit weniger ausgeprägt. So wurde geschlussfolgert, dass Mini-Tastaturen für die mobile Texteingabe nicht unter allen Umständen geeignet sind.

Die Studie von Witt und Kluge [WK08] untersuchte die Fähigkeit, eine einfache Interaktion mit einem mobilen Computer mit verschiedenen Eingabegeräten durchzuführen. Die Fähigkeit wurde mit Hilfe einer Leistungsmessung bestimmt, die durch Messung der Zeit für die Hauptaufgabe und eine Nebenaufgabe realisiert wurde. Als Domäne diente die Luftfahrtwartung, wobei neben Studenten auch Experten als VP rekrutiert wurden und der Versuch in einem realen Flugzeug durchgeführt wurde. Als Ergebnis zeigte sich, dass abgesetzte Eingabegeräte für eine ergonomische Bedienung gut geeignet sind. Am Besten hat in der Untersuchung ein Trackball abgeschnitten und mit etwas Abstand ein Datenhandschuh, der ebenfalls ein gutes Ergebnis erzielte.

Die in dieser Arbeit behandelte Fragestellung, inwieweit die Arbeitsbeanspruchung von der Trennung der Eingabegeräte und den Interaktionsmetaphern abhängt, wurde bisher in der Literatur noch nicht untersucht. Somit soll diese Arbeit diese Problematik erstmals untersuchen und kann späteren Arbeiten mit diesem Themengebiet als Grundlage dienen.

# 3 EVALUATIONSEXPERIMENT ZUR GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT

In der Einleitung wurden die Fragestellungen angerissen und motiviert. Nachdem im zweiten Kapitel einige Grundlagen betrachtet wurden, soll in diesem Kapitel das Konzept zur Untersuchung der Fragestellung dargelegt werden. Zuerst werden dazu die Fragestellungen in zwei Forschungshypothesen<sup>1</sup> konzeptionalisiert. Anschließend werden die verwendete Versuchsanordnung, die Versuchsplanung und der Versuchsablauf vorgestellt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Betrachtung der geplanten statistischen Auswertung.

## 3.1 KONZEPTIONALISIERUNG

### 3.1.1 Erste Forschungshypothese

Wenn man ein Eingabegerät von dem dazugehörigen Anzeigegerät trennt, ist davon auszugehen, dass sich die Beanspruchung bei der Bedienung erhöht. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Trennung so stark erfolgt, dass das Eingabegerät nicht mehr im direkten Sichtfeld ist, wenn man auf das Anzeigegerät schaut. Der Nutzer muss nun eine erhöhte kognitive Leistung erbringen, um ausgehend vom dargestellten Inhalt eine passende Eingabehandlung durchzuführen, die zu dem erwünschten Ergebnis führt. Weiterhin muss die visuelle Reaktion auf dem Anzeigegerät wieder mit der Eingabehandlung kognitiv in Einklang gebracht werden. Somit ist die zu untersuchende Hypothese eine gerichtete unspezifische Kausalhypothese und lautet:

#### **Forschungshypothese 1**

*Wenn ein Eingabegerät von dem Anzeigegerät räumlich getrennt wird, dann erhöht sich die*

---

<sup>1</sup>Definition nach Bortz [Bor07, S. 492]

*Arbeitsbeanspruchung bei der Bedienung für den Nutzer.*

Es existieren verschiedene Arten von Interaktionsmetaphern, die unterschiedlich hohe Einflüsse auf die Arbeitsbeanspruchung besitzen. So ist eine Texteingabe im Allgemeinen beanspruchender als das Scrollen durch eine Liste. Hier stellt sich die Frage, inwieweit sich die Arbeitsbeanspruchung von unterschiedlichen Interaktionsmetaphern bei der Trennung des Eingabegeräts vom Anzeigegerät ändert.

### **3.1.2 Unterscheidung von verschiedene Datenarten**

Dabei ist zu beachten, dass bestimmte Interaktionsmetaphern für gewisse Interaktionen gut und für andere kaum geeignet sind. So ist eine Texteingabe nur mit einer Tastatur ohne große Probleme möglich. Daher ist ein Vergleich zwischen verschiedenen Metaphern hinsichtlich der Arbeitsbeanspruchung nur dann sinnvoll, wenn jede Metapher in einer angemessenen Aufgabe genutzt wird. Daher werden die Eingabehandlungen anhand der zugrunde liegenden Daten in verschiedene Klassen eingeteilt. Dabei wird sich an die Klassifikation von Bürgy [Bür02, S. 57 f.] angelehnt:

- textuelle Daten (Freitexte, Zahlen)
- strukturierte Daten (Tabellen, Listen)
- abbildungsbasierte Daten (Abbildungen, Darstellungen, Zeichnungen, Bilder)

Im Unterschied zu Bürgy wurden die im Kontext nicht relevanten Video- und Audiodaten ausgeblendet sowie die drei verschiedenen Abbildungsklassen zu einer Klasse zusammengefasst. Eine ähnliche Unterteilung findet sich ebenfalls bei Chittaro [Chi06]. Bei den textuellen Daten interessiert die Eingabe von Freitexten und Zahlen. Die Kernaufgabe bei den strukturierten Daten ist die Navigation in den Tabellen, Listen und Bäumen, so dass Information ausgewählt und herausgesucht werden können. Mit einer analogen Navigation werden die abbildungsbasierten Daten bearbeitet. Auch hier interessiert das Finden und Lesen von Informationen aus Plänen, Zeichnungen und ähnlichen Abbildungen, die momentan größtenteils in Papierform vorliegen.

### **3.1.3 Zweite Forschungshypothese**

Die Eingabe von Texten ist nur mit einem großen Eingaberaum sinnvoll möglich. Diesen aber auch noch ohne Sichtkontakt gut bedienen zu können, erscheint fragwürdig. Somit wird die zweite Hypothese als eine gerichtete unspezifische Unterschiedshypothese formuliert:

#### **Forschungshypothese 2**

*Die Erhöhung der Arbeitsbeanspruchung bei der Trennung des Eingabegeräts ist abhängig*

von der durchzuführenden Interaktionsmetapher. Die durch die Trennung erzeugte Zunahme der Arbeitsbeanspruchung wird bei textuellen Daten größer sein als bei strukturierten und abbildungsbasierten Daten.

### 3.1.4 Vorgehen zur Prüfung der Forschungshypothesen

Für jede Klasse wird die Untersuchung mit einer angepassten Aufgabe untersucht, die angemessene Eingabemetaphern und ein spezielles Eingabeelement verwendet. Für die Texteingabe wird eine kleine Tastatur verwendet, für die Navigation in strukturierten Daten ein eindimensionales diskretes Eingabegerät mit zwei Tastern und für die Navigation ein zweidimensionales kontinuierliches Eingabegerät mit ebenfalls zwei Tastern. Eine detaillierte Vorstellung der verwendeten Geräte erfolgt in Kapitel 3.2.2.2.

Die aufgestellten Forschungshypothesen werden unter Laborbedingungen mit Hilfe eines Evaluationsexperiments mit verschiedenen Prototypen in einer typischen Arbeitsumgebung untersucht. Dafür werden Versuchspersonen in einer formativen Evaluation<sup>2</sup> typische Teile von Arbeitsaufgaben durchführen, die in der Wartung und Instandhaltung in Prozessanlagen vorkommen. Dabei wird die Arbeitsbeanspruchung der VP in Abhängigkeit von der Trennung des Eingabegeräts vom Anzeigegerät und der Nutzung der Interaktionsmetapher gemessen.

## 3.2 VERSUCHSANORDNUNG

Für den Versuch wurde eine neue Versuchsanordnung konzipiert, die sich aus den Teilen *Arbeitsumgebung*, *genutztes Assistenzsystem* und *vorhandene Messmittel* zusammensetzt. Diese werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

### 3.2.1 Arbeitsumgebung

Um eine Evaluation unter möglichst realitätsnahen Bedingungen durchführen zu können, wurde eine Umgebung gewählt, die einer Prozessanlage ähnelt. Dafür eignet sich das am Institut befindliche *Gerätezentrum für Automatisierungstechnik* (GZAT). Dies ist eine stillgelegte Prozessanlage, an der in den achtziger Jahren Studenten ausgebildet und Forschungsarbeiten zur Prozessleittechnik durchgeführt wurden. Sie besteht aus einer großen Anzahl von Rohren, Behältern, Druckluftanschlüssen, Ventilen, Pumpen und Sensoren (siehe Abb. 3.1). Dort liefen Prozesse zum Pumpen, Erwärmen, Filtern und Vermischen von Wasser. Durch den Aufbau der Anlage gibt es kleine Treppen und schmale Gänge, die sich aber noch bequem durchqueren lassen.

---

<sup>2</sup>Definition nach Hering [Her09, S. 217]



**Abbildung 3.1:** Arbeitsumgebung im GZAT

Man kann hier eine Evaluation ideal durchführen, da keines der Geräte mehr in Betrieb ist und somit keine gefährlichen Zustände für die Versuchsperson auftreten können. Trotzdem ist es möglich, viele der typischen Arbeitsaufgaben, die ein Wartungsingenieur in industriellen Anlagen zu bewältigen hat, nachzustellen (vgl. Kap. 2.1.4.3).

Weiterhin soll eine Geräuschkulisse durch Abspielen einer Aufnahme einer kaputten Pumpe in einer Industrieanlage auf einem MP3-Player generiert werden. Die Lichtverhältnisse sind durch eine künstliche Beleuchtung und der Abwesenheit von Tageslicht weitestgehend konstant und über den gesamten Untersuchungsraum gleichmäßig.

### 3.2.2 Genutzte Assistenzsysteme

Für diesen Versuch werden die benötigten Assistenzsysteme durch verschiedene funktionale Prototypen abgebildet. Dabei wird für jede Interaktionsmetapher ein auf die Daten zugeschnittenes System verwendet. Das jeweilige System verzichtet zum größtmöglichen Teil auf die Einbeziehung von anderen Interaktionsmetaphern als der für das System interessierenden. So wird z. B. bei der Texteingabe und dem abbildungsbasierten System auf eine Navigationsmöglichkeit fast vollständig verzichtet.

Alle Systeme besitzen dieselbe Grundstruktur (siehe Abb. A.2), die sich aus Vorarbeiten am Lehrstuhl entwickelt hat [GHRR09]. Die Struktur besteht aus einem Anzeigegerät, das über eine Bluetooth-Verbindung mit einer abgesetzten Box kommuniziert. An dieser Box können die verschiedenen Eingabegeräte per Kabel angeschlossen werden. Die Kommunikation zwischen dem Anzeigegerät und der Box erfolgt über das Bluetooth-Framework *P-Lite* [Zie08], zwischen der Box und den Eingabegeräten wird eine TWI-Verbindung verwendet.

Es existieren also für alle drei Interaktionsmetaphern funktionstüchtige Teilsysteme, die jeweils einen Teil eines Wartungsassistenzsystems nachbilden. Für ein endgültiges Produkt fehlen noch Funktionen wie Netzwerkanbindung und Schnittstellen zum CMMS.

### 3.2.2.1 Anzeigegerät

Als Anzeigegerät wurde ein Smartphone vom Typ *HTC Touch HD* verwendet [HTC10]. Dieses wird in einer Tasche am Unterarm mit Hilfe von Klettverschlüssen befestigt, so dass es den Nutzer in seiner Bewegungsfreiheit nicht einschränkt (siehe Abb. 3.2). Die Anzeige-



**Abbildung 3.2:** PDA-Befestigung

Module für Texte und Abbildungen bauen auf verschiedenen vorangegangenen Projektarbeiten am Lehrstuhl auf [NJM+10, URRS10]. Darstellungen von den wichtigsten Menüpunkten finden sich auf den Abbildungen A.3 und A.5. Die graphische Oberfläche für das System zur Navigation in strukturierten Daten ist in der parallelen Diplomarbeit von Hegewald [Heg10] entstanden und wurde auf das gestellte Problem mit einem neuen Eingabegerät angepasst. Abbildung A.4 zeigt die Programmoberfläche.

### 3.2.2.2 Eingabegeräte

Für die verschiedenen Klassen von Daten wurden jeweils passende Eingabegeräte ausgewählt. Sie bieten die Möglichkeit, sie sowohl neben dem Anzeigegerät zu befestigen als auch abgesetzt einzusetzen. Im kombinierten Modus mit dem Anzeigegerät können die Eingabegeräte mit Klettband neben dem Anzeigegerät am Unterarm befestigt werden. Für den abgesetzten Modus ist es möglich, sie mit Hilfe von Klettband an einen Werkzeuggurt zu befestigen, der auf der Hüfte getragen wird.

- Scrollrad (SR) für strukturierte Daten
- Analogstick (AS) für abbildungsbasierte Daten
- Tastatur (Tas) für textuelle Daten

**Scrollrad** Das Scrollrad ist ein eindimensionales diskretes Navigationselement mit Tastfunktion, das mit Hilfe eines ehemaligen Mausrads implementiert wurde, und zwei zusätzlichen Tastern. Es wird für die Navigation in strukturierten Daten verwendet. Es wurde

für diese Arbeit entwickelt und angefertigt und ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Detaillierte Informationen finden sich in einer gesonderten Dokumentation auf der DVD in der Datei [/Projekt/Text/Eingabegeräte/Eingabegeräte.pdf](#).



**Abbildung 3.3:** Scrollrad

**Analogstick** Der Analogstick (siehe Abbildung 3.4) wurde für die Navigation in abbildungs-basierten Daten im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und angefertigt. Er besitzt eine zwei-dimensionale kontinuierliche Richtungseingabe durch einen Fingerjoystick. Dieser besitzt zusätzlich eine Tastfunktion. Außerdem sind zwei weitere diskrete Taster neben dem Joy-stick angebracht. Alle anderen Informationen zu diesem Gerät wurden ebenfalls in die separate Dokumentation der gefertigten Eingabegeräte ausgelagert (auf der DVD unter [/Projekt/Text/Eingabegeräte/Eingabegeräte.pdf](#)).



**Abbildung 3.4:** Analogstick

**Tastatur** Für die Texteingabe wurde eine Tastatur verwendet, die in einem vorangegan-gen nicht veröffentlichten Projekt entstanden ist [HM08]. Diese wurde danach noch weiter-entwickelt und an die Aufgabe angepasst. Als Grundlage wurde ein externer numerischer Tastenblock für den PC benutzt. Sie besitzt 19 Tasten und ist in Abbildung 3.5 dargestellt.



**Abbildung 3.5:** Tastatur

### 3.2.3 Vorhandene Messmittel

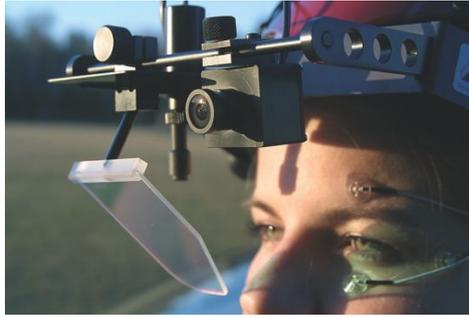
Zum Messen interessierender Variablen stehen verschiedene Geräte zur Verfügung. Um den Versuch nachvollziehen zu können, ist es wichtig, die Leistungsdaten dieser Geräte zu kennen.

Als physiologische Methode kann die Herzfrequenz mit Hilfe eines digitalen tragbaren EKG-Loggers *medilogAR12* (siehe Abb. 3.6) gemessen werden. Dieser besitzt eine 5-Kanal-Abtastung mit einer zeitlichen Auflösung von 4096 Hz bei einer 16-Bit-Auflösung. Dieses wurde für die Untersuchung von Prof. Malberg vom IBMT zur Verfügung gestellt. Die Anbringung der fünf Elektroden kann durch den Versuchsleiter oder nach kurzer Einweisung durch die Versuchspersonen erfolgen.



**Abbildung 3.6:** EKG-Logger

Außerdem ist die Messung von Augenparametern durch einen mobilen Eyetracker *iView* (siehe Abb. 3.7) möglich. Dieser wurde von der Firma HFC [HFC10] für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt. Es ist ein mono-okularer Eyetracker mit Infrarotbeleuchtung und einer zeitlicher Auflösung von 50 Hz. Er ist an einem Helm befestigt und verfügt über ein ausreichend langes Kabel, so dass er in der Versuchsumgebung ohne Einschränkung der Bewegungsfreiheit verwendet werden kann.



**Abbildung 3.7:** Eyetracker iView [HFC10]

Weiterhin werden durch das Assistenzsystem während der Benutzung Logdateien angelegt. In diesen sind die getätigten Eingaben mit dem Zeitstempel und dem Zustand, in dem sich das Assistenzsystem befunden hat, hinterlegt. Aus diesen Daten lässt sich z. B. der Grad der Aufgabenerfüllung und die dafür benötigte Zeit ermitteln.

Für das Erfassen von Antworten aus Fragebögen kann ein Computer mit der Software LimeSurvey (siehe Anhang C.2) eingesetzt werden. Dies erlaubt eine einfache Generierung und Beantwortung von Fragen sowie vielfältige Möglichkeiten zur Konvertierung der Daten in andere Formate.

### **3.3 VERSUCHSPLANUNG**

Mit den Mitteln dieser Versuchsanordnung wurde ein Versuch zur Messung der Arbeitsbeanspruchung gestaltet. Dazu wird zunächst der Zusammenhang zu dem zu untersuchenden Arbeitssystem dargestellt. Anschließend wird der Versuch mit den interessierenden Variablen, den dafür verwendeten Operationalisierungen, der von den VP durchzuführenden Versuchsaufgabe und dem verwendeten Experimentdesign vorgestellt.

Somit wird das in Kapitel 2.1.4 beschreibende Arbeitssystem für diesen Versuch wieder aufgegriffen. Die genutzten Arbeitsmittel wurden in Kapitel 3.2.2 und die Arbeitsumgebung in Kapitel 3.2.1 beschrieben. In Kapitel 3.3.6 folgt eine Beschreibung der Arbeitsaufgaben und Kapitel 3.3.8 vervollständigt das Arbeitssystem mit der Definition der Benutzer.

#### **3.3.1 Variablen**

In dem Versuch gibt es verschiedene Variablen, also Größen, die sich über den Verlauf des Versuches ändern. Dabei werden manche gezielt geändert, andere nur gemessen. Eine Einordnung aller im Versuch beachteten Variablen in verschiedene Klassen wird im Folgenden vorgenommen. Eine genauere Betrachtung der einzelnen Variablen erfolgt später in diesem Kapitel.

**Unabhängige Variablen** Folgende unabhängige Variablen werden variiert, um zu beobachten, welche Auswirkungen verschiedenen Ausprägungen dieser Variablen erzeugen:

- Trennung des Eingabegeräts
- Interaktionsmetapher

**Abhängige Variablen** Die interessierende Auswirkung der Variation der unabhängigen Variablen wird durch folgende abhängige Variable gemessen:

- Arbeitsbeanspruchung

**Kontrollvariablen** Zusätzlich werden folgende Variablen gemessen, da davon ausgegangen werden kann, dass sie einen zusätzlichen Einfluss auf die beobachtete abhängige Variable besitzen:

- Effektivität
- Alter
- Geschlecht
- Berufliche Ausrichtung
- Sehschwäche
- Lese-Rechtschreib-Schwäche
- Aktuelle Verfassung

**Störvariablen** Es existieren noch weitere Variablen, die einen Einfluss auf die abhängige Variable besitzen. Es ist jedoch nicht möglich, alle in Frage kommenden Variablen zu messen. Daher wird sich in Kapitel 3.3.5 damit beschäftigt, welche Variablen das Ergebnis beeinflussen können, wie groß deren Auswirkungen sind und wie die auftretenden Probleme gelöst werden können.

### 3.3.2 Operationalisierung der Variablen

Nachdem alle interessierenden Variablen aufgelistet wurden, sollen diese nun einzeln vorgestellt werden. Dabei wird die Frage beantwortet, warum sie aufgenommen, wie sie gemessen und operationalisiert werden.

#### 3.3.2.1 Operationalisierung der Arbeitsbeanspruchung

Die Arbeitsbeanspruchung ist die einzige abhängige Variable und wird insgesamt mit drei verschiedenen Operationalisierungen bestimmt. Dazu gehören der NASA Task-Load-Index,

der Pupillendurchmesser und die benötigte Zeitdauer für den Versuch. Dadurch kann man ein genaueres Bild von der Arbeitsbeanspruchung erhalten als bei Nutzung einer einzelnen Operationalisierung.

**NASA-TLX** Als physiologische Möglichkeit zur Bestimmung der Beanspruchung wird der NASA Task Load Index (NASA TLX) [HS88] benutzt. Dies ist ein standardisierter Fragebogen, der in sechs Dimensionen die Höhe der erlebten Beanspruchung der Gesamtbeanspruchung abfragt:

1. Körperliche Anforderungen
2. Geistige Anforderungen
3. Zeitliche Anforderungen
4. Leistung
5. Anstrengung
6. Frustration

Diese Methode wird in der Literatur häufig zur Messung von *mental workload* eingesetzt z. B. bei [Sch02], [LB03] und [Wic98, S. 394]. In der Untersuchung wurde eine deutsche Übersetzung von Seifert [Sei02, S. 149] verwendet, die von der Übersetzung von Giesa [Gie03, S. 119 ff.] nur in einer grammatischen Formulierung abweicht. Im Speziellen wurde das Verfahren von Röttger [Röt10] verwendet, der eine verkürzte Fassung des NASA-TLX benutzt, die auf die Wichtung der einzelnen Beanspruchungsdimensionen verzichtet und stattdessen einen ungewichteten Mittelwert errechnet. Dies erscheint zulässig, da verschiedene Untersuchungen (vgl. Zusammenfassung von Moroney et al. [MBE95]) eine Korrelation zwischen gewichtetem und ungewichteten Mittelwert gezeigt haben, die über  $r = 0.90$  liegt. Die Formulierung der Fragen ist im Anhang A.4 aufgeführt.

Dabei soll der NASA-TLX die Beanspruchung während des gesamten Arbeitsprozesses abbilden. Als Ergebnis kommt für jede VP und jede Experimentalbedingung ein intervallskalierter Wert zwischen 0 und 100 heraus, wobei höhere Werte einer höheren erlebten Beanspruchung entsprechen. In der späteren Betrachtung wird dieser Wert als *TLX* bezeichnet.

**Pupillendurchmesser** Die Daten der aktuellen Pupillengröße werden mit Hilfe des *iView*-Eyetrackers der Firma HFC aufgezeichnet. Als weiterer Indikator für die mentale Beanspruchung wird der mittlere Pupillendurchmesser während des Versuches ausgewertet, weil dieser einfach zu erheben und auf Grund seiner Mittelwertbildung unempfindlich gegen Rauschen ist [PKSH10]. Bei der Aufnahme dieses sehr sensitiven globalen Indikators [RPCN08] sind insbesondere Prozesse, die neben der Belastung eine Änderung der Pupillengröße verursachen, und Effekte, die das ordnungsgemäße Erkennen der Pupille erschweren, problematisch. Zu den erstgenannten gehören Lichtänderung ins Auge oder Fokusebenenänderung der Pupille. Durch eine gleichmäßige künstliche Beleuchtung und eine Versuchsanordnung, in der die VP nicht weiter als in 2 m Entfernung blicken muss, sollen diese Prozesse

minimieren. Die anderen Effekte können bei stark geschminkten Augenpartien und Brillenträgern auftreten, so dass bei der Einladung der VP gebeten wurde, auf Schminke zu verzichten.

Eine Verwendung anderer Operationalisierungen, wie z. B. dem ICA (index of cognitive activity) von Marshall [Mar02] oder dem MPDCR von Palinko [PKSH10], wird zunächst nicht vorgenommen, um Erfahrungen mit dem Gerät und der Qualität der erhaltenen Daten zu sammeln. Diese anderen Operationalisierungen sind in vielen Untersuchungen als gut geeignet bewertet worden, benötigen aber rauscharme Daten [PKSH10].

Nach dem Versuch wird von den auf Plausibilität geprüften und gefilterten Daten der Mittelwert gebildet. Bei der späteren Betrachtung der statistischen Werte wird zur Bezeichnung des Mittelwerts dieser Größe  $PG$  genutzt. Dies ist der Durchmesser der Pupille in Pixeln. Ein höherer Wert ist ein Indikator für eine höhere Beanspruchung.

**Zeitdauer** Zur Messung der Leistung wird nur die Primäraufgabe, die aus der Abarbeitung der Wartungsaufgaben besteht, bewertet. Eine Sekundäraufgabe wird nicht gestellt. Dabei wird die Zeit durch die Assistenzsoftware gestoppt, die die VP zur Ausführung der kompletten Wartungsaufgaben benötigt. Die so aufgenommene *Time-On-Task* sieht Tullis [TA08] zusätzlich als hervorragendes Maß für die Effizienz eines Produkts. Da die einzelnen Aufgaben alle an dem gleichen Ort stattfinden, kann die erste Eingabe am PDA als Startsignal und das Bestätigen des Logouts aus dem System als Endsignal verwendet werden. Bei unterschiedlichen Interaktionsmetaphern ist die grundsätzlich benötigte Zeitdauer verschieden. Dies ist jedoch nicht weiter nachteilig, da der Vergleich der Zeiten zwischen der Situation des abgesetzten und nicht abgesetzten Eingabegeräts nicht betrachtet wird. In der Auswertung wird dieser Wert als  $ZD$  bezeichnet. Eine höhere Zeitdauer spricht für eine stärkere Beanspruchung der VP.

### 3.3.2.2 Operationalisierung der räumlichen Trennung

Die räumliche Trennung ist eine der beiden unabhängigen Variablen. Sie wird nur in zwei Varianten unterschieden. In dem einen Fall wird das Eingabegerät direkt am Anzeigegerät befestigt. Im anderen Fall wird es an der Hüfte des Benutzer mit Hilfe eines Gurtes fixiert (siehe Abb. 3.8). Die Unterscheidung des Merkmals der räumlichen Trennung  $TR$  erfolgt deshalb in

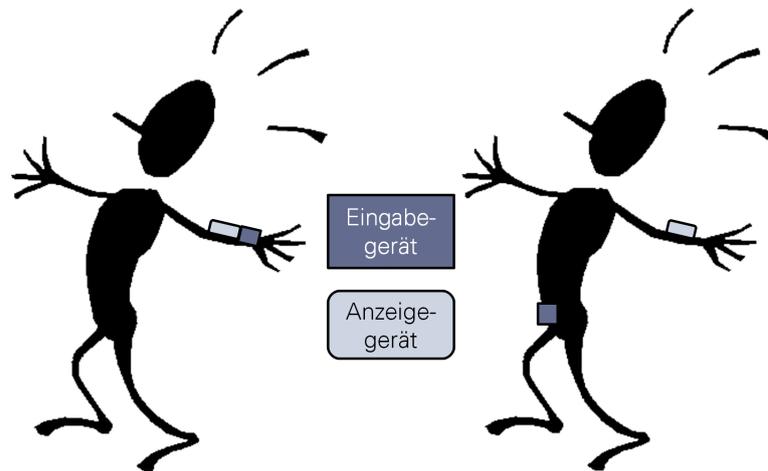
**Ab:** abgesetztes Eingabegerät

**Komb:** nicht abgesetztes, kombiniertes Eingabegerät

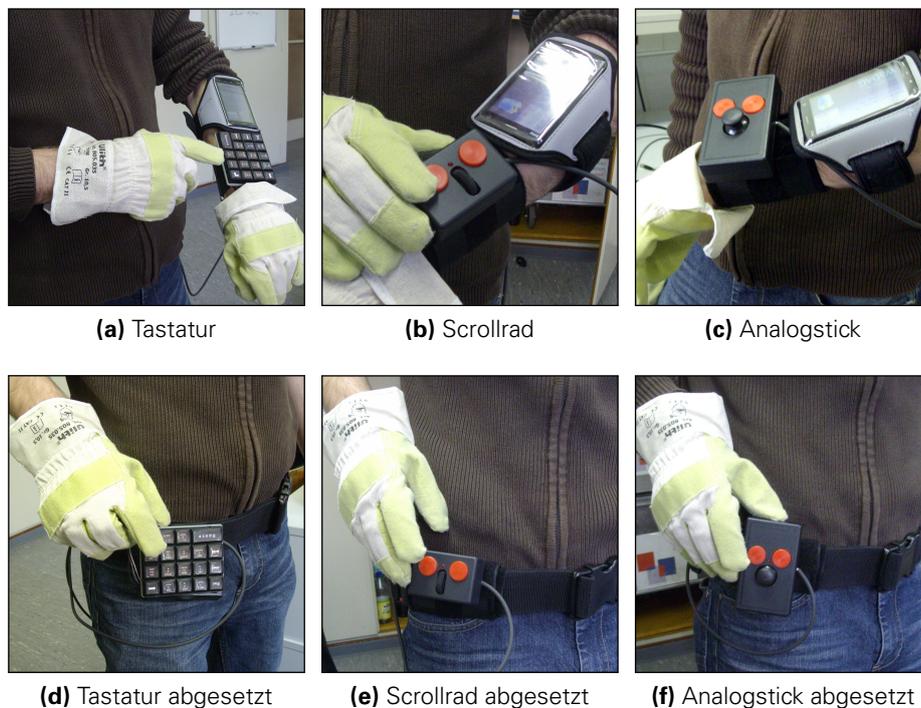
Als Alternative hätte die Operationalisierung durch eine feinere Unterteilung des Grads der Trennung gewählt werden können, z. B. als Distanz zwischen Eingabe- und Anzeigeelement

in cm. Das ist jedoch nicht sinnvoll, da das Merkmal für jede VP nur in zwei Ausprägungen vorkommt. Zudem müsste dieser Wert für eine Auswertung mit Hilfe anderer Körpermaße wieder normiert werden.

Die einzelnen Befestigungsarten für die Eingabegeräte sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Befestigung erfolgt im abgesetzt Modus an der rechten Hüften und im kombinierten Modus am linken Unterarm rechts neben dem Anzeigegerät, so dass eine einfache Bedienung mit der rechten Hand möglich ist.



**Abbildung 3.8:** Operationalisierung der Trennung



**Abbildung 3.9:** Befestigungen der Eingabegeräte

### 3.3.2.3 Operationalisierung der Interaktionsmetapher

Die andere unabhängige Variable ist die genutzte Interaktionsmetapher. Sie wird für die Art der zu bearbeitenden Daten angepasst. Dazu werden für die drei betrachteten Datenarten die vorgestellten Eingabegeräte verwendet und für die Interaktionsmetapher spezifische Aufgaben gestellt. Somit ergeben sich drei Ausprägungen dieses Merkmals *IM*. Die Unterscheidung erfolgt dabei in

**Text:** Verwendung von Textbasierten Daten (Tastatur)

**Strukt:** Verwendung von strukturierten Daten (Scrollrad)

**Abb:** Verwendung von Abbildungsbasierten Daten (Analogstick)

### 3.3.2.4 Operationalisierung der Kontrollvariablen

**Effektivität** Eine Bewertung der Arbeitsbeanspruchung ohne Bewertung des Grades der Aufgabenerfüllung ist wenig sinnvoll. Eine VP, die nur wenige Aufgaben korrekt bearbeitet hat, wird vermutlich eine geringere Beanspruchung erleben, da sie die Schwierigkeiten nicht als solche erlebt und wahrscheinliche einfachere Eingaben getätigt hat. Die Effektivität (*EF*) wird dabei in Anlehnung an die DIN EN ISO 9241-11 [DIN9241-11] folgendermaßen bestimmt:

$$EF = \frac{\sum \text{vollständig gelöste Aufgaben}}{\sum \text{alle Aufgaben}}$$

Dabei wird die Bewertung über den Grad der Aufgabenerfüllung durch Beobachtung der Wartungsaufgaben durch den Versuchsleiter (VL) vollzogen. Außerdem werden die Logdateien nach den Durchgängen ausgewertet, um die Effektivität der Bedienaufgaben automatisch zu berechnen.

Je nach verwendeten Daten gestalten sich die Aufgaben verschieden (siehe Kapitel 3.3.6) und somit auch die Bewertung des Erfüllungsgrades. Bei den textbasierten Aufgaben wird hierbei die Übereinstimmung des eingegebenen Texts mit dem vorgegebenen Text überprüft. Für die Auswertung der strukturierten Daten wird geprüft, ob die vorgegebenen Menüpunkte im Assistenzsystem ausgewählt wurden. Die abbildungsbasierten Daten können nur durch Überprüfung der von der VP auf dem Aufgabenzettel eingetragenen Daten mit den vorgegebenen verglichen werden.

**Alter** Das Alter der VP in Jahren wird als Pflichtangabe mit Hilfe des abschließenden Fragebogens aufgenommen. Die resultierende Variable *AGE* ist verhältnisskaliert. Sie soll vor allem zur Beschreibung der Stichprobe dienen.

**Geschlecht** Die Untersuchung der Ergebnisse in Abhängigkeit vom Geschlecht wird mit der nominalskalierten Variable *SEX* durchgeführt, deren Operationalisierung in Tabelle 3.1 aufgeführt ist. Auch diese Größe wird als Pflichtangabe per Fragebogen bestimmt und dient vorrangig der Beschreibung der Stichprobe.

**Tabelle 3.1:** Operationalisierung des Geschlechts

1	2
männlich	weiblich

**Berufliche Ausrichtung** Die berufliche Ausrichtung spielt bei der Verwendung der meisten technischen Geräte eine große Rolle. Personen mit einem technisch geprägten Umfeld fällt auch der Umgang mit neuen technischen Geräten leichter. Die gemessene Größe beschränkt sich auf die Selbsteinschätzung der beruflichen Ausrichtung, wird *BA* genannt und mit der in Tab. 3.2 dargestellten Zuordnung ordinalskaliert mit Hilfe eines Fragebogens aufgenommen, wobei dies keine Pflichtangabe war:

**Tabelle 3.2:** Operationalisierung der beruflichen Ausrichtung

1	2	3	4	5
nicht technisch	wenig technisch	mittelmäßig technisch	ziemlich technisch	sehr technisch

**Farb-Sehchwäche** VP mit einem eingeschränkten Farb-Sehvermögen können eine erhöhte Beanspruchung durch das Lesen von Texten erleben als nicht sehgeschwächte VP. Daher wurden die Merkmale Rot-Grün-Sehchwäche als *FSS\_RG* und Blau-Gelb-Sehchwäche als *FSS\_BG* per Fragebogen nominalskaliert als freiwillige Angabe aufgenommen. Zusätzlich konnten sonstige Sehchwächen in der Variable *FSS\_other* als Freitext nominalskaliert angegeben werden (siehe Tab. 3.3).

**Tabelle 3.3:** Operationalisierung der Variablen für Farb-Sehchwäche

<i>Farb_RG</i>		<i>Farb_BG</i>		<i>Farb_other</i>
ja	nein	ja	nein	Text

**Legasthenie/Dyskalkulie** Auch Einschränkungen in der Fähigkeit zu lesen, schreiben und rechnen kann die Beanspruchung während der Aufgaben erhöhen. Daher wurde die Variable für Legasthenie (Lese-Rechtschreib-Schwäche) als *LD\_LRS* und für Dyskalkulie (Rechen-schwäche) als *LD\_DYS* als freiwillige Angabe per Fragebogen nominalskaliert aufgenommen (siehe Tab. 3.4).

**Tabelle 3.4:** Operationalisierung der Variablen für Legasthenie/Dyskalkulie

<i>LD_LRS</i>		<i>LD_DYS</i>	
ja	nein	ja	nein

**Aktuelle Verfassung** Da die psychische Beanspruchung stark von der individuellen Verfassung der VP abhängig ist (siehe Kap. 2.2.4.2), wird diese per Fragebogen (keine Pflichtangabe) als *VERF* aufgenommen. Die Zuordnung der ordinalskalierten Variable zu den Ausprägungen der Verfassung ist in Tabelle 3.5 dargestellt.

**Tabelle 3.5:** Operationalisierung der aktuellen Verfassung

1	2	3	4	5
sehr schlechte Verfassung	schlechte Verfassung	mittlere Verfassung	gute Verfassung	sehr gute Verfassung

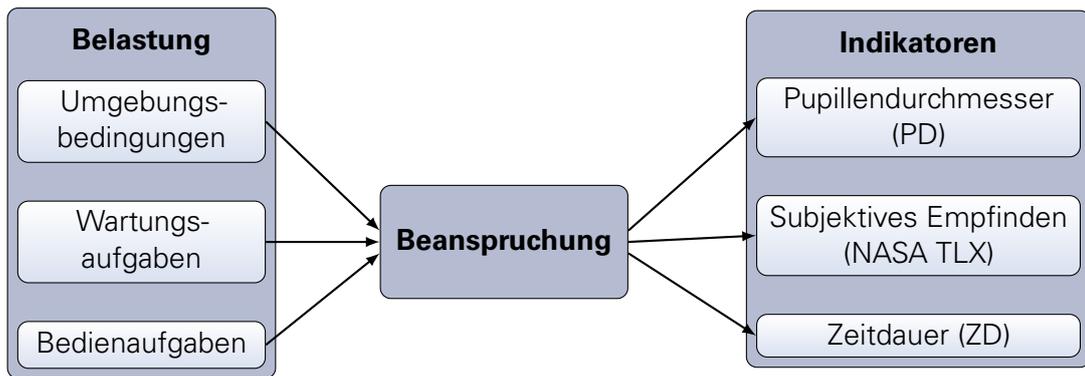
### 3.3.2.5 Zusammenfassung der operationalisierten Variablen

Eine Zusammenfassung der operationalisierten Variablen ist in Tabelle 3.6 aufgeführt. Dabei wird in der letzten Spalte angegeben, ob die betreffende Variable verhältnisskaliert (VS), intervallskaliert (IS) oder nominalskaliert (NS) ist.

**Tabelle 3.6:** Operationalisierung der verwendeten Variablen

Typ	Variable	Messgröße	Skalenart
abhängige Variable	Arbeitsbeanspruchung	<i>TLX</i>	IS
		<i>PG</i>	VS
		<i>ZD</i>	VS
unabhängige Variable	Interaktionsmetapher	<i>IM</i>	NS
	Trennung	<i>TR</i>	NS
Kontrollvariablen	Effektivität	<i>EF</i>	VS
	Alter	<i>AGE</i>	VS
	Geschlecht	<i>SEX</i>	NS
	berufliche Ausrichtung	<i>BA</i>	OS
	Rot-Grün-Schwäche	<i>FSS_RG</i>	NS
	Blau-Gelb-Schwäche	<i>FSS_BG</i>	NS
	Sonst. Farbsehschwäche	<i>FSS_other</i>	NS
	Legasthenie	<i>LD_LRS</i>	NS
	Dyskalkulie	<i>LD_DYS</i>	NS
Verfassung	<i>VERF</i>	OS	

Insgesamt erfolgt die Beeinflussung der einzelnen Komponenten, wie es in Abbildung 3.10 dargestellt ist. Die Belastung wirkt sich je nach Versuchsperson auf dessen Beanspruchung



**Abbildung 3.10:** Auswirkungen der Belastungen

aus, die mit Hilfe von mehreren Indikatoren bestimmt wird. Dabei werden für eine Interaktionsmetapher alle Belastungsanteile konstant gehalten mit Ausnahme der Belastung durch die Bedienung, da diese durch die Nutzung von verschiedenen Ausprägungen der Trennung variiert wird.

### 3.3.3 Konstanten

Die Beanspruchung der Versuchspersonen wird von verschiedenen Quellen beeinflusst, wobei aber nur einer dieser Ursachen, die Belastung durch die Bedienaufgaben, durch die abhängigen Variablen variiert wird. Die Änderung der Belastung erfolgt hierbei durch die Nutzung von verschiedenen Ausprägungen der Trennung der Eingabegeräte. Die anderen Einflussgrößen sollen konstant gehalten, damit sie keinen Einfluss auf die abhängigen Variablen ausüben. Dies ist bei einigen Größen kompliziert, da sie nicht direkt beeinflusst werden können.

Dazu gehören vor allem die Umgebungsbedingungen Licht, Lärm und Schmutz. Diese werden durch eine künstliche Beleuchtung und Beschallung des Versuchsraums dominiert, aber externe Lärmquellen sowie ein Einfluss des Tageslichts durch die kleinen Oberfenster kann nicht ausgeschlossen werden. Die Belastung für die VP wird auch dadurch möglichst konstant gehalten, dass alle VP dieselbe Arbeitsbekleidung verwenden. Diese besteht aus einfachen Arbeitshandschuhen aus Leder, dem Eyetracker-Helm sowie einem leicht gefüllten Rucksack, der das Mitführen von zusätzlichem Werkzeug symbolisiert.

Weiterhin soll die Belastung durch die Wartungsaufgaben an der Anlage konstant gehalten werden. Diese kann jedoch nicht direkt gemessen werden. Die Aufgaben sind aber aus einfachen Aktionen aufgebaut, die keine Interaktion mit anderen Menschen erfordern. Außerdem kann eine geringe Varianz der erforderlichen Zeit und Belastung durch kleine Wegstrecken erreicht werden, die die VP während eines Versuchs zurückzulegen hat.

### 3.3.4 Aufnahme weiterer Daten

Über die gesamte Zeitdauer des Versuches wird zusätzlich ein EKG-Signal von der VP mit dem vorgestellten EKG-Logger (vgl. Kap. 3.2.3) aufgenommen. Diese Daten werden in einer folgenden Untersuchung ausgewertet.

Für die Untersuchung der EKG-Signale ist das Wissen über einige Variablen der Versuchsperson notwendig, um gewisse Effekte erklären und einordnen zu können. Außerdem gibt es gewisse Fälle, wie z. B. einige Herzkrankheiten, die eine sinnvolle Auswertung nicht ermöglichen und daher ausgeschlossen werden müssen. Daher werden Fragen zu den folgenden Punkten im abschließenden Fragebogen gestellt:

- Größe
- Gewicht
- Blutdruck
- Herz-Kreislauf Erkrankungen
- Familiäre Herz-Kreislauf Erkrankungen
- Medikamente
- Krankheit

### 3.3.5 Störvariablen

Um eine hohe interne Validität der Untersuchung erreichen zu können, sollten die Unterschiede der abhängigen Variablen eindeutig auf eine Variation der unabhängigen Variablen zurückzuführen und nicht durch andere Variablen beeinflusst sein. Diese anderen Variablen, die das Experiment unwillentlich beeinflussen, nennt man *Störvariablen* [Bor07, S. 12 ff.]. Sie werden in diesem Kapitel näher betrachtet.

Beller [Bel08, S. 124 ff.] unterscheidet zwischen zwei Arten von Störvariablen: den personengebundenen und den situationsgebundenen. Bei den situationsgebundenen Störvariablen wurde sich bemüht, möglichst viele Störvariablen konstant zu halten. So werden alle Versuche am selben Ort durchgeführt mit dem gleichem VL. Störvariablen wie die Tageszeit konnten nicht konstant gehalten werden, können leider aber Einfluss auf die Messung der Arbeitsbeanspruchung besitzen.

Die personengebundenen Störvariablen haben mit unterschiedlichen Eigenschaften und Fähigkeiten der Personen zu tun. Zu denjenigen Eigenschaften, die einen Einfluss auf die Beanspruchung besitzen, gehören beispielsweise:

- Stress
- Gesundheit
- Durst

- Müdigkeit

Die Messung der aktuellen Verfassung als Kontrollvariable lässt auf einige dieser Variablen Schlüsse zu, kann sie aber nicht komplett beschreiben. Da die genannten Störvariablen nur immens schwierig operationalisier- und messbar sind, bleiben sie in dem Versuch unberücksichtigt. Durch Nutzung eines *Between-Subject-Design* (vgl. Kap. 3.3.7) werden diese Störvariablen aber durch die zufällige Aufteilung in eine der Versuchsgruppen randomisiert.

### 3.3.6 Durchzuführende Aufgaben

Die Versuchspersonen hatten verschiedene Teile von Wartungsaufgaben zu lösen, die in Prozessanlagen typischerweise vorkommen. Laut Fallmann [Fal02] verbringen Wartungsingenieure einen Großteil der Zeit damit, Informationen zu bestimmten Anlagenteilen herauszusuchen und zu untersuchen. Ein Assistenzsystem kann sie mit der Bereitstellung von Daten dabei unterstützen. Nichtsdestotrotz müssen die Arbeiter auch hier in den Daten navigieren und die interessierenden Informationen herauslesen. Die Daten können in verschiedenen Formen vorliegen (siehe Kapitel 3.1.2): als Abbildungen, als Texte oder strukturiert in Listen oder Tabellenform.

Weitere Aufgaben, die der Wartungsingenieur durchzuführen hat, liegen in der Dokumentation von Arbeitsschritten. Hierzu kann eine Auswahl aus einer Liste von häufig vorkommenden Ergebnissen möglich sein. In anderen Fällen ist es notwendig, einen Freitext oder Zahlen einzugeben.

Beide Aufgabentypen werden von den gestellten Aufgaben abgedeckt. Dabei sind die Aufgaben in einer Form gestellt, dass auch Personen ohne Kenntnisse zu Prozessanlagen diese lösen können. Der Interaktion mit der realen Welt, die eine wichtige Eigenschaft der Arbeitsumgebung ist, wird dadurch Rechnung getragen, dass notwendigerweise für die Erfüllung einer Aufgabe sowohl mit dem Assistenzsystem als auch der realen Umgebung gearbeitet werden muss. Die Interaktion mit der realen Welt wird durch das Lesen von Informationen oder dem Eintragen von Daten auf Zetteln realisiert. Somit ist dafür nur die Fähigkeit des Lesens und Schreibens erforderlich und keine tieferen Kenntnisse zu der Prozessanlage.

#### 3.3.6.1 Aufgabe für textbasierte Daten

Während eines Wartungsrundgangs treten häufiger Zustände oder Ereignisse auf, die nicht vorherzusehen sind. In diesen Fällen kann der Wartungsingenieur einen Freitext eingeben. Dies soll in dieser Aufgabe getestet werden.

Nach dem Login wird der VP eine Aufgabe angezeigt, die sie in der Anlage durchzuführen hat. Dabei auftretende Rückmeldungen, Fehler oder besondere Ereignisse soll sie im

Assistenzsystem in ein Textfeld eintragen. Die Aufgaben bestehen aus der Durchführung von verschiedenen Prüfungen oder dem Ablesen von Werten an Geräten oder Typenschildern. Damit dies für alle VP gleich aufwändig ist, muss die VP nur einfache Arbeiten an der Anlage durchführen, wie es das Öffnen eines Ventils oder Gehäuses darstellt. Die Ergebnisse der Aufgaben stehen auf Zetteln, die an den Anlagenteilen angebracht sind, die gerade bearbeitet werden.

Die VP kann jederzeit zwischen den Aufgaben wechseln, diese weiterbearbeiten oder sich ausloggen. Dabei werden die eingegebenen Texte gespeichert, damit sie später gegen die Referenztexte verglichen werden können. Auch bei dieser Aufgabe muss sich die VP nur im Umfeld einer Ventilgruppe (Abb. 3.11) aufhalten.



**Abbildung 3.11:** Arbeitsumgebung für Aufgaben mit textbasierte Daten

In Tabelle 3.7 ist die Dekomposition der Aufgabe für textbasierte Daten dargestellt. Die genaue Aufführung der einzelnen Aufgaben und Sollergebnisse ist in Tabelle A.1 dargestellt.

### 3.3.6.2 Aufgabe für strukturierte Daten

Viele Daten lassen sich oft gut in Tabellen, Listen oder Bäumen strukturieren. Die Strukturierung einer realen Anlage kann so in Anlagen, Teilanlagen, Anlagenteile baumartig aufgebaut werden[DIN10628]. Bei einem Wartungsrundgang kann die Struktur auch sinnvoll in einem Baum aufgebaut werden (Rundgang - Kontrollpunkt - Aufgabe - typische Rückmeldungen). Als letzter Punkt in der Ebene gliedern sich hier häufige Fehlerbeschreibungen, die bei Abarbeitung einer Aufgabe auftreten können, gut in die Baumstruktur ein.

Für die Bearbeitung dieser strukturierten Daten hat die VP einen Wartungsrundgang mit Hilfe des Assistenzsystems durchzuführen. An allen Aufgaben eines Kontrollpunkts in einer Anlage können dabei Fehler auftreten, die die VP aus einer Liste auszuwählen hat. Die Abarbeitung der Kontrollpunkte ist ohne Kenntnisse der Anlage oder Prozesse zu lösen, z.B. durch Aufschrauben eines Gehäuses und Lesen der darin befindlichen Informationen.

**Tabelle 3.7:** Dekomposition der Aufgabe für textbasierte Daten

Nr.	Titel	Beschreibung	Zweck
1	Aufgabe lesen	Ablesen der Aufgabenstellung auf dem PDA, Beispiel: „Führe Sichtprüfung an der Pumpe P004 durch“	Interaktion mit Anzeigegerät, Stellung der Aufgabe
2	Aufgabe bearbeiten	Bearbeitung der gestellten Aufgabe an der Anlage, z. B. „Öffnen des Gehäuses“	Interaktion mit Umwelt (Anlage), Hand vom Eingabegerät lösen
3	Text ablesen	Ablesen des Textes vom Zettel am Anlagenteil, Beispiele: „Leck am Anschlussflansch“	Interaktion mit Umwelt, entspricht Ergebnis der Aufgabe in der Anlage
4	Text eingeben	Eingeben des Textes ins Wartungsassistenzsystem mit Hilfe der Tastatur	Nutzung des Wartungsassistenzsystems zur Aufnahme von realen Daten
5	Nächste Aufgabe	Navigation zur nächste Aufgabe im Assistenzsystem	Abarbeitung einer Aufgabenliste

Trotzdem kann dem domänentypischen Primat der Interaktion mit der Anlage Rechnung getragen werden.

Der letzte Aufgabenteil stellt eine Prüfung eines Lagers dar, in der sich die VP aus der Baumstruktur die Informationen heraussuchen muss, welche Materialien im Lager vorhanden sein sollten. Diese müssen mit einer Liste auf einer Karteikarte verglichen werden, auf der steht, welche Materialien im Lager vorhanden sind. Als Ergebnis hat die VP auszuwählen, welche Materialien unvollständig sind.

Die Aufgabe finden alle im nahen Umfeld einer Kreiselpumpe statt (siehe Abb. 3.12). In Tabelle 3.8 ist die Dekomposition der Aufgabe für strukturierte Daten dargestellt und Tabelle A.2 enthält die Details über die Aufgaben und Ergebnisse.



**Abbildung 3.12:** Arbeitsumgebung für Aufgaben mit strukturierten Daten

**Tabelle 3.8:** Dekomposition der Aufgabe für strukturierte Daten

Nr.	Titel	Beschreibung	Zweck
1	Navigation	Navigation im Assistenzsystem zur Aufgabe	Interaktion mit Anzeigegerät, Übermittlung der Aufgabe
2	Aufgabenbearbeitung	Gehäuse öffnen bzw. Karteikarte aufsuchen, Informationen auf Zettel lesen	Interaktion mit Umwelt (Anlage), Hand vom Eingabegerät lösen, physische Belastung
3	Fehler eintragen	Eintragen des evtl. bei der Aufgabe aufgetretenen Fehlers	Dokumentation der Bearbeitung der Aufgabe

### 3.3.6.3 Aufgabe für abbildungsbasierte Daten

Ein weiterer typischer Aufgabenfall für Wartungsingenieure ist das Lesen von Informationen aus Abbildungen, Plänen und Zeichnungen. Dazu wird der VP jeweils auf dem PDA eine Aufgabe und eine für die Lösung notwendige Abbildung eingeblendet. In der Abbildung muss die VP nun einen Wert ablesen, eine Verbindung zu einem Objekt verfolgen oder ein Objekt lokalisieren. Dazu kann sie die Abbildung einstufig heranzoomen und das Bild zweidimensional verschieben. Die Lösung der Aufgabe hat die VP auf einen Aufgabenzettel einzutragen. Durch die gewonnenen Informationen wäre es dem Wartungsingenieur nun möglich, in der Anlage eine Wartungsaufgabe durchzuführen. Daher wird die VP eine auf dem Aufgabenzettel stehende Wartungsaufgabe durchführen, die aus einer einfachen Tätigkeiten, dem Öffnen oder Schließen eines Ventils, besteht. Danach ist die nächste Aufgabe zu lösen. Die VP kann jederzeit zu den vorangegangenen Aufgaben zurückkehren oder Aufgaben überspringen. Nach der letzten Aufgabe gibt es keine weitere Wartungsaufgabe an der Anlage. Dabei finden alle Aufgaben, die an der Anlage durchzuführen sind, an der in [Abbildung 3.13](#) dargestellten Ventilgruppe statt.



**Abbildung 3.13:** Arbeitsumgebung für Aufgaben mit abbildungsbasierten Daten

In Tabelle 3.9 ist die Dekomposition einer einzelnen Aufgabe für die abbildungsbasierten Daten dargestellt. Insgesamt hat die VP in allen Durchgängen sechs Aufgaben in vier verschiedenen Abbildungen zu absolvieren. Die Abbildungen sind im Anhang in Abb. A.1 dargestellt und die dazugehörigen Fragen und Sollantworten zeigt Tabelle A.3.

**Tabelle 3.9:** Dekomposition der Aufgabe für abbildungsbasierte Daten

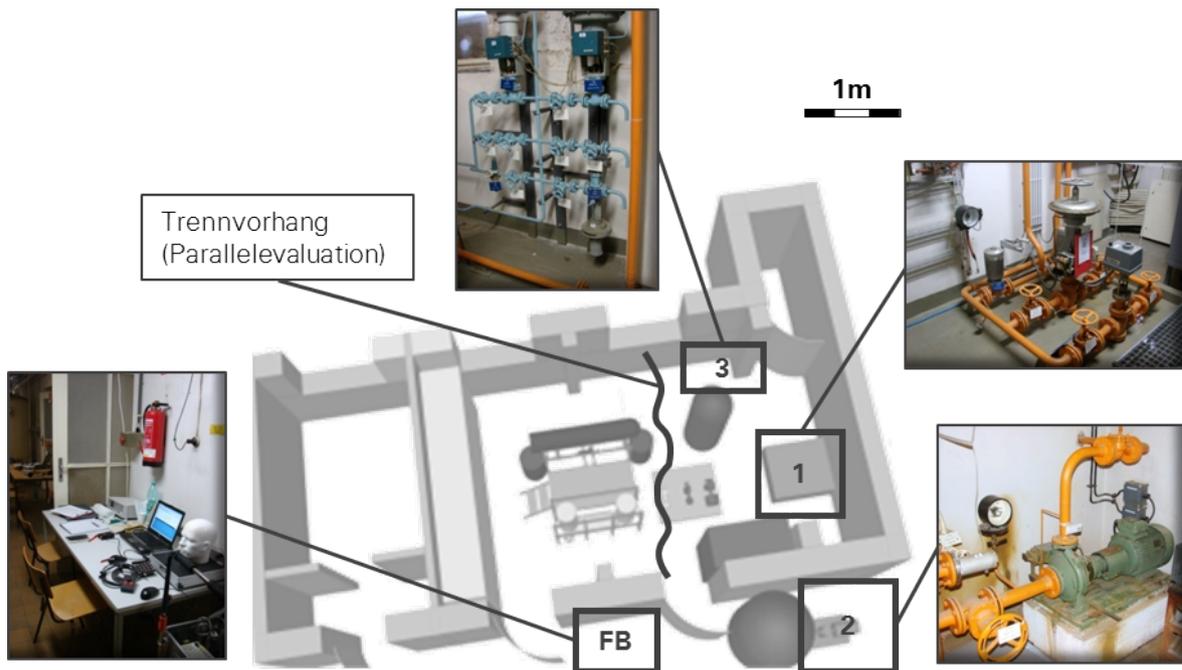
Nr.	Titel	Beschreibung	Zweck
1	Aufgabe lesen	Ablezen der Aufgabenstellung auf dem PDA, Beispiel: „Welche Temperatur hat die Sole in Behälter W3?“	Interaktion mit Anzeigegerät, Stellung der Aufgabe
2	Navigation in Abbildung	Navigieren (Zoomen und Verschieben) in zur Aufgabe zugehöriger Abbildung, Heraussuchen der gefragten Information	Interaktion mit Bediengerät
3	Ergebnis eintragen	Ergebnis der Aufgabe auf Aufgabenzettel mit Stift eintragen	Ergebnis zur Überprüfung festhalten, Hand vom Eingabegerät lösen
4	Wartungsaufgabe durchführen	Auf Aufgabenzettel zur jeweiligen Frage gehörende Wartungsaufgabe lesen und durchführen, Beispiel: „Schließe Ventil h103“	Interaktion mit Umwelt (Anlage), physische Belastung

### 3.3.6.4 Reihenfolge und Örtlichkeit der Aufgaben

Es wurde Wert darauf gelegt, die Aufgaben so zu stellen, dass sie für alle VP möglichst konstant sind und wenig Interpretationsspielraum durch die VP besteht. Eine weitere Einschränkung der Varianz ist durch eine feste Abarbeitungsreihenfolge der einzelnen Aufgaben vorgegeben. Zudem gibt es für jeden Aufgabentyp drei Versuchsdurchgänge, so dass sich die VP im ersten Durchgang (DG) mit dem Gerät und den Aufgaben vertraut machen können und dies im zweiten Durchgang vertiefen können. Erst im dritten Durchgang wird die eigentliche Messung durchgeführt. Durch die einfachen Aufgaben ist im dritten Durchgang kein weiterer großer Lerneffekt zu erwarten. Für alle Durchgänge sind die gleichen Aufgaben durchzuführen. Dabei unterscheiden sich jedoch die Ergebnisse der Aufgaben, die durch Zettel angezeigt werden.

Jede der drei Aufgabentypen, die durch die verschiedenen Interaktionsmetaphern gegeben sind, wird in einem anderem Teil des GZAT durchgeführt, so dass sich die einzelnen Aufgaben ohne große Wegstrecken erfüllen lassen. Die Orte, an denen die einzelnen Aufgaben stattfinden, sind in der durchzuführenden Reihenfolge in Abb. 3.14 dargestellt. Der in der Abbildung dargestellte Vorhang trennt die Evaluation von der zeitgleich durchgeführten

Parallelevaluation im Rahmen der Diplomarbeit von Hegewald [Heg10].



**Abbildung 3.14:** Übersicht GZAT

- 1** Aufgabe zu textuellen Daten
- 2** Aufgabe zu strukturierten Daten
- 3** Aufgabe zu abbildungsbasierten Daten
- FB** Bereich für Einweisung und Ausfüllen der Fragebögen

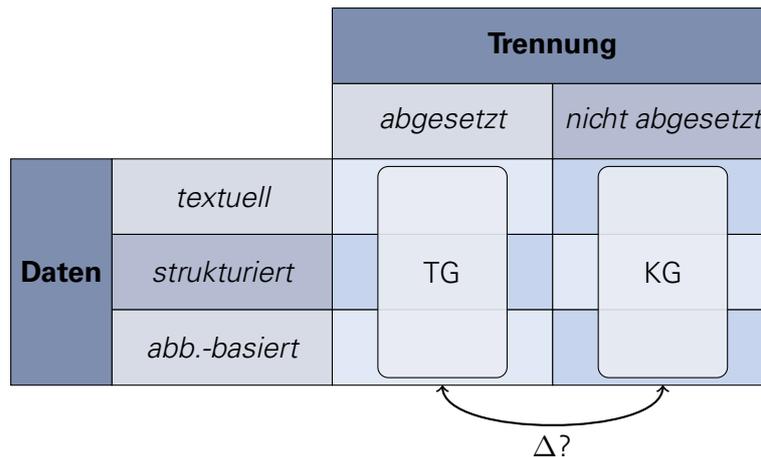
### 3.3.7 Experimentdesign

Da in dieser Untersuchung der Einfluss von zwei unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable geprüft wird, erhält man ein mehrfaktorielles Design. Aufgrund der Tatsache, dass zwei Ausprägungen der Trennung und drei verschiedenen Aufgabentypen untersucht werden, ergibt sich ein 2x3-Design.

Für diesen Versuch wird ein *Between-Subject-Design*<sup>3</sup> verwendet. Dabei wird die Stichprobe zufällig in zwei Versuchsgruppen aufgeteilt. Jeweils eine Gruppe vollführt den Versuch mit einer Ausprägung der Trennung, aber allen Ausprägungen der Datenart (vgl. Abb. 3.15). Dabei nutzt die Kontrollgruppe (KG) die nicht abgesetzten und die Treatmentgruppe (TG) die abgesetzten Eingabegeräte. Die VP werden dazu abwechselnd in die Versuchsgruppen eingeteilt.

Im Gegensatz zum *Within-Subject-Design* (Messwiederholungsdesign) treten keine Nach-

<sup>3</sup>Definition nach Nielsen [Nie94, S. 178 f.]



**Abbildung 3.15:** Experimentdesign

teile durch einen Lerneffekt auf. Dafür werden mehr Versuchspersonen benötigt um die gleiche Effektstärke wie bei einem Within-Subject-Design zu erreichen. Die Reihenfolge der zu testenden Eingabegeräte ist für alle VP gleich: zuerst die textbasierten Aufgaben, dann die abbildungsbasierten Aufgaben und zuletzt die Aufgaben mit den strukturierten Daten.

### 3.3.8 Stichprobenauswahl

Damit später Angaben über die Genauigkeit der Stichprobenergebnisse gemacht werden können, ist es notwendig, eine repräsentative Stichprobe auszuwählen. Das bedeutet, dass die Stichprobe die Population hinsichtlich der interessierenden Merkmale möglichst gut widerspiegelt [Bel08].

Die Versuchspersonen werden dazu in verschiedenen Vorlesungen der Professur (VL Mensch-Maschine-Interaktion und VL Prozessleittechnik) sowie in der Fachschaft akquiriert. Durch die Beschränkung auf Versuchspersonen aus dem akademischen Umfeld kann davon ausgegangen werden, dass die VP einen ähnlichen Grad der Computer-Affinität wie die Zielpopulation zeigen. Außerdem kann von einem technischen Grundverständnis ausgegangen werden. Als Aufwandsentschädigung erhalten die Versuchspersonen einen Kinogutschein.

Die meisten VP werden sowohl an dieser Evaluation als auch an der Evaluation im Rahmen der Diplomarbeit von Hegewald [Heg10] teilnehmen. Dabei finden die Evaluationen zeitlich parallel statt und die VP werden nach dem Abschluss der Evaluationen ausgetauscht.

## 3.4 VERSUCHSABLAUF

Der gesamte Versuchsablauf dauert für eine VP ca. 90 Minuten. Dazu gehört eine kurze Einweisung, die Durchführung des Versuchs und die Ausfüllung der NASA-TLX Fragebögen

und eines demographischen Fragebogens. Der geplante Zeitablauf ist in Abbildung A.4 im Anhang aufgeführt.

### **3.4.1 Einweisung in den Versuch**

Nach der Begrüßung wird der VP das Ziel der Evaluation erklärt, die genutzte Versuchsumgebung und die zu absolvierenden Aufgaben vorgestellt. Es wird erläutert, welche Messdaten erhoben werden und in welcher Reihenfolge die Versuche stattfinden. Nach einer Arbeitsschutzbelehrung bestätigt die VP, dass sie den Versuch freiwillig durchführt und frei in den Antworten des Fragebogens ist (siehe Einwilligungserklärung siehe [/Projekt/Evaluation/Material/Einwilligungserklärung/Einwilligungserklärung.pdf](#)). Anschließend füllt die VP den ersten Teil eines personenbezogenen Fragebogens aus. Danach werden die Messgeräte angelegt und kalibriert. Nach Einkleidung mit der Arbeitsbekleidung (Handschuhe, Rucksack) können die VP den Versuch beginnen.

### **3.4.2 Durchführung der Versuchsdurchgänge**

Jede VP absolviert nacheinander die Versuche in der festgelegten Reihenfolge: Text, Liste, Abbildung. Dafür erhält sie für jede Interaktionsmetapher eine kurze Einweisung und einen durch den VL geführten Durchgang, um sich währenddessen an das Gerät und die Aufgaben zu gewöhnen. Danach erfolgt ein durch den VL überwachter Durchgang und abschließend ein selbstständiger Durchgang, in dem die Messungen stattfinden. Anschließend wird der NASA-TLX zu diesem Versuch ausgefüllt.

### **3.4.3 Ausfüllen des Fragebogens**

Nach dem letzten Durchgang des letzten Versuchs kann die VP die Messmittel und die Arbeitsbekleidung ablegen. Abschließend erfolgt ein kurzer Fragebogen zur Bestimmung der demographischen Kennwerte der Stichprobe und zur Gewinnung einiger Kontrollvariablen, bevor die VP ihre Vergütung erhält.

## **3.5 STATISTISCHE AUSWERTUNG**

### **3.5.1 Statistische Kenngrößen**

Aus den operationalisierten Variablen können nach dem Experiment statistische Kenngrößen bestimmt werden. Dazu wird die interessierende Variable  $x$  über alle VP gemittelt und

als  $\mu_x$  bezeichnet. Dies ist dann der Mittelwert der Variable in der untersuchten Stichprobe. Neben dem Mittelwert interessiert häufig auch noch die Standardabweichung  $s_x$ .

Oft ist es sinnvoll, nur die Variablen von bestimmten VP-Gruppen zu betrachten, z. B. denjenigen VP, die ein abgesetztes Eingabegerät verwendet haben. Dann wird zur Ermittlung der Kenngrößen nur die Größen der entsprechenden VP verwendet und diese dann als  $\mu_x^{Ab}$  bzw.  $s_x^{Komb}$  bezeichnet. Genauso kann eine Beschränkung auf ein bestimmtes Eingabegerät erfolgen ( $\mu_x^{Text}$ ) bzw. eine Kombination von beiden ( $\mu_x^{Ab,Abb}$ ).

### 3.5.2 Operationale und statistische Hypothesen

Im Folgenden werden die aufgestellten Forschungshypothesen (vgl. Kap. 3.1) in operationale Hypothesen konkretisiert. Dazu werden sie mit den definierten Operationalisierungen der Variablen für die Versuchspopulation formuliert. Für jede operationale Hypothese ist eindeutig festgelegt, welcher Ausgang für oder gegen die Forschungshypothese spricht. Daraufhin werden die operationalen Hypothesen unter Angabe der beschriebenen Operationalisierungen in statistische Hypothesen übersetzt, die sich auf den interessierenden statistischen Kennwert beziehen. Diese können später dazu genutzt werden, um Signifikanzprüfungen vorzunehmen.

Die Beurteilung über eine statistische Hypothese erfolgt durch Überprüfung von zwei sich einander ausschließenden Hypothesen:

**H<sub>1</sub>:** *Alternativhypothese* ist die eigentlich interessierende Hypothese über den vermuteten Zusammenhang oder Unterschied zwischen den Variablen

**H<sub>0</sub>:** *Nullhypothese* behauptet das Gegenteil von H<sub>1</sub>, also das Nicht-Vorhandensein eines Zusammenhangs oder Korrelation zwischen den Variablen

Wenn H<sub>0</sub> mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann, dann bleibt als gültige Hypothese nur H<sub>1</sub> übrig. Somit kann die statistische Hypothese nicht widerlegt werden und kann als gültig angenommen werden. Wenn H<sub>0</sub> nicht ausgeschlossen werden kann, dafür aber eine Entscheidung gegen H<sub>1</sub> getroffen werden kann, ist die statistische Hypothese als falsch zu betrachten.

#### 3.5.2.1 Konkretisierung der ersten Forschungshypothese

Für die erste Forschungshypothese werden vier operationale Hypothesen formuliert, deren Erfüllung jeweils für die Gültigkeit der Forschungshypothese spricht.

### **Operationale Hypothese 1**

*Der bei dem Experiment bestimmte Mittelwert des NASA-TLX ist über alle Interaktionsmetaphern hinweg bei dem abgesetzten Eingabegerät größer als bei dem nicht abgesetzten Eingabegerät.*

Dies ist, ebenso wie die folgenden Hypothesen, eine gerichtete, unspezifische Hypothese, aus der sich die folgenden statistischen Hypothesen ergeben:

$$H_0: \mu_{TLX}^{Ab} \leq \mu_{TLX}^{Komb}$$

$$H_1: \mu_{TLX}^{Ab} > \mu_{TLX}^{Komb}$$

### **Operationale Hypothese 2**

*Die über den Versuchsdurchgang gemittelte Pupillengröße der VP ist über alle Interaktionsmetaphern hinweg bei dem abgesetzten Eingabegerät höher als bei Verwendung des nicht abgesetzten Eingabegeräts.*

$$H_0: \mu_{PD}^{Ab} \leq \mu_{PD}^{Komb}$$

$$H_1: \mu_{PD}^{Ab} > \mu_{PD}^{Komb}$$

### **Operationale Hypothese 3**

*Die Versuchspersonen benötigen über alle Interaktionsmetaphern hinweg im Mittel für die Aufgabenerfüllung weniger Zeit bei der Nutzung des abgesetzten Eingabegerät im Vergleich mit dem kombinierten Eingabe- und Ausgabegerät.*

$$H_0: \mu_{ZD}^{Ab} \leq \mu_{ZD}^{Komb}$$

$$H_1: \mu_{ZD}^{Ab} > \mu_{ZD}^{Komb}$$

#### **3.5.2.2 Konkretisierung der zweiten Forschungshypothese**

Die zweite Forschungshypothese wird in der gleichen Weise betrachtet. Auch hier werden wieder alle im Experiment aufgenommenen Indikatoren betrachtet und deren Differenz, die aus der Trennung stammt, bei den verschiedenen Interaktionsmetaphern verglichen. Auch hier spricht eine gültige operationale Hypothese für die Forschungshypothese.<sup>4</sup>

### **Operationale Hypothese 4**

*Bei dem Versuch tritt eine Differenz beim NASA TLX zwischen abgesetztem und nicht abgesetztem Eingabegerät auf. Diese Differenz ist bei der Bearbeitung von textbasierten Aufgaben höher als bei den Aufgaben mit strukturierten Daten.*

---

<sup>4</sup>Im Laufe der Diskussion der Untersuchung wird sich herausstellen, dass die aufgestellten operationalen Hypothesen zur zweiten Forschungshypothese mit dem gewählten Experimentdesign statistisch nicht untersucht und damit nicht überprüft werden können (vgl. Kap. 4.3.2).

Um diese und die folgenden Hypothesen statistisch einfach formulieren zu können, wird folgende Definition verwendet:

$$\Delta\mu_x^{\text{Text}} = \mu_x^{\text{Ab,Text}} - \mu_x^{\text{Komb,Text}} \quad (3.1)$$

$$\Delta\mu_x^{\text{Strukt}} = \mu_x^{\text{Ab,Strukt}} - \mu_x^{\text{Komb,Strukt}} \quad (3.2)$$

$$\Delta\mu_x^{\text{Abb}} = \mu_x^{\text{Ab,Abb}} - \mu_x^{\text{Komb,Abb}} \quad (3.3)$$

$$H_0: \Delta\mu_{TLX}^{\text{Text}} \leq \Delta\mu_{TLX}^{\text{Strukt}} \quad (\mu_{TLX}^{\text{Ab,Text}} - \mu_{TLX}^{\text{Komb,Text}} \leq \mu_{TLX}^{\text{Ab,Strukt}} - \mu_{TLX}^{\text{Komb,Strukt}})$$

$$H_1: \Delta\mu_{TLX}^{\text{Text}} > \Delta\mu_{TLX}^{\text{Strukt}}$$

### Operationale Hypothese 5

Bei dem Versuch tritt eine Differenz beim mittleren Pupillendurchmesser zwischen abgesetztem und nicht abgesetztem Eingabegerät auf. Diese Differenz ist bei der Bearbeitung von textbasierten Aufgaben höher als bei den Aufgaben mit strukturierten Daten.

$$H_0: \Delta\mu_{PD}^{\text{Text}} \leq \Delta\mu_{PD}^{\text{Strukt}}$$

$$H_1: \Delta\mu_{PD}^{\text{Text}} > \Delta\mu_{PD}^{\text{Strukt}}$$

### Operationale Hypothese 6

Bei dem Versuch tritt eine Differenz bei der benötigten Zeitdauer zwischen abgesetztem und nicht abgesetztem Eingabegerät auf. Diese Differenz ist bei der Bearbeitung von textbasierten Aufgaben höher als bei den Aufgaben mit strukturierten Daten.

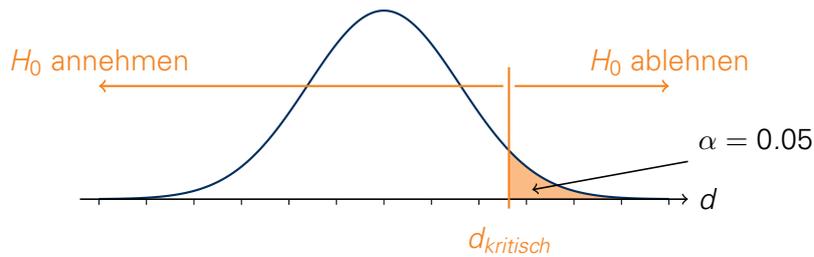
$$H_0: \Delta\mu_{ZD}^{\text{Text}} \leq \Delta\mu_{ZD}^{\text{Strukt}}$$

$$H_1: \Delta\mu_{ZD}^{\text{Text}} > \Delta\mu_{ZD}^{\text{Strukt}}$$

### 3.5.3 Fehlerwahrscheinlichkeiten

Ein Fehler 1. Art wird mit einer Wahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0.05$  toleriert. Das bedeutet, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % eine tatsächlich richtige Hypothese als falsch eingeschätzt wird (siehe Abb. 3.16). Daher wird dieser Fehler auch  $\alpha$ -Fehler und die Wahrscheinlichkeit Irrtumswahrscheinlichkeit genannt. Sowohl Beller [Bel08, S. 105] als auch Bortz [Bor05, S. 113 f.] sehen dies als Standardwert an, sofern eine Fehlentscheidung zugunsten der Hypothese keine sehr gravierenden Folgen bewirkt und keine explorative Untersuchung durchgeführt wird.

Auch für den  $\beta$ -Fehler oder den Fehler 2. Art wird die Empfehlung von Beller und Bortz [Bor05, Bel08] mit einer Wahrscheinlichkeit von  $\beta = 0.2$  übernommen.



**Abbildung 3.16:** Fehler 1. Art

### 3.5.4 Effektstärke

Um zu bestimmen, wann ein Effekt eine praktisch bedeutsame Größe annimmt, müssen Festlegungen für die Effektstärke getroffen werden. Die Effektstärke für eine Mittelwertdifferenz ergibt sich laut Cohen [Coh88] aus den betrachteten Mittelwerten der zu vergleichenden Gruppen  $m_A$  und  $m_B$  sowie deren gemeinsamer Varianz  $\sigma$ .

$$\epsilon = \frac{m_A - m_B}{\sigma} \quad (3.4)$$

Da die Mittelwerte und die Varianz unbekannt sind, wird die Effektstärke aus Schätzungen dieser Größen als  $d$  folgendermaßen bestimmt:

$$d = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{s} \quad (3.5)$$

Dabei sind  $\bar{x}_i$  die Mittelwerte der Stichproben und  $s$  die gemeinsame Varianz, die sich bei unterschiedlichen Stichprobengrößen laut Hartung [HKS08, S. 13 ff.] als

$$s = \sqrt{\frac{(n_A - 1)s_A^2 + (n_B - 1)s_B^2}{n_A + n_B}} \quad (3.6)$$

mit folgenden Variablen ergibt:

- $n_A$  Größe der Stichprobe A
- $n_B$  Größe der Stichprobe B
- $s_A$  Varianz der Stichprobe A
- $s_B$  Varianz der Stichprobe B

Bei der Betrachtung von Mittelwerten gelten laut Cohen [Coh88] folgende Richtgrößen für kleine, mittlere und große Effekte:

**kleiner Effekt:**  $\epsilon = 0.2$

**mittlerer Effekt:**  $\epsilon = 0.5$

**großer Effekt:**  $\epsilon = 0.8$

# 4 ANALYSE DER EVALUATIONSERGEBNISSE

## 4.1 EVALUATIONSDURCHFÜHRUNG

Die Evaluation konnte wie geplant mit 21 Versuchspersonen durchgeführt werden. Davon haben 10 VP die Wartungsaufgaben mit den abgesetzten und 11 VP mit den kombinierten Eingabegeräten durchgeführt. Alle VP konnten den Versuch erfolgreich abschließen und haben alle geforderten Daten in den Fragebögen angegeben.

In wenigen Fällen wurden vom VL die falschen Karteikarten angebracht, jedoch erkannt und bei der Auswertung berücksichtigt. So wurde bei VP 3 bei den strukturierten Daten im DG 3 eine Karteikarte des ersten Durchgangs angebracht und für VP 4 die Karte des zweiten statt des dritten Durchgangs bei den textuellen Daten befestigt.

Ein weiteres Problem bestand darin, dass bei VP 17 der Eyetracker ausgefallen ist und während des Versuches nicht wieder repariert werden konnte. Hinterher wurde als Ursache ein Wackelkontakt am Kabel des Eyetrackers festgestellt und behoben.

Bei zwei VP konnte die Aufgabe mit der Texteingabe nicht durchgeführt werden, da ein Wackelkontakt am Eingabegerät eine ordnungsgemäße Funktion verhinderte. So musste bei VP 5 und 11 direkt zu der Aufgabe mit den strukturierten Daten übergegangen werden und damit das Ausfüllen des NASA-TLX für die textuellen Daten ausgelassen werden. Bei VP 11 wurde am Ende des dritten Durchgangs bei den strukturierten Daten vergessen, einen weiteren Marker zu setzen. So können für diese Aufgabe die Pupillengröße und EKG-Daten nicht ausgewertet werden.

Als weiteres Problem stellte sich die Unzuverlässigkeit des PDA-Programms für die strukturierten Daten heraus. Das verwendete Grafik-Framework stürzte sehr häufig ab und daher

musste das Programm oft neu gestartet werden. Dadurch entstanden mehrere Logdateien, die in der Auswertung berücksichtigt werden.

Die gesamten Daten, die bei der Evaluation angefallen sind sowie die daraus erzeugten Ergebnisse und das Versuchsprotokoll befinden sich auf der DVD unter [/Projekt/Evaluation/Ergebnisse/](#).

## 4.2 DESKRIPTIVE STATISTIK

Zuerst wird die Stichprobe der Versuchspersonen beschrieben. Danach wird die Aufbereitung der Daten und anschließend die einzelnen Datensätzen mit ihren Mittelwerten und Verteilungsparametern vorgestellt.

### 4.2.1 Betrachtung der demographischen Daten der Stichprobe

Die Stichprobe bestand aus 3 Frauen und 18 Männer. Damit beträgt der Anteil an weiblichen Versuchspersonen 14 %. Weitere Kontrollvariablen der Stichprobe sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. So beträgt das durchschnittliche Alter 23.9 Jahre, wobei alle bis auf eine 30-jährige VP zwischen 22 und 25 Jahre alt waren. In der beruflichen Ausrichtung schätzen sich die Versuchspersonen mit einem Mittelwert von 4.6 als *ziemlich technisch* bis *sehr technisch* ein. Nur eine VP wich von dieser Einschätzung ab und schätzte sich selbst als *nicht technisch* ein. Auch die aktuelle Verfassung ist mit einem Mittelwert von 4.3, was einer *guten Verfassung* bis *sehr guten Verfassung* entspricht, und einer Standardabweichung von 0.8 heterogen verteilt. Nur zwei VP haben sich bei Versuchsbeginn schlechter gefühlt. Nur eine VP hat eine Rot-Grün-Farbsehschwäche angegeben und keine VP litt an anderen Farbsehschwächen, Legasthenie oder Dyskalkulie.

**Tabelle 4.1:** Kontrollvariablen

	min	mean	max	sd
Alter	22.00	23.86	30.00	1.71
berufl. Ausrichtung	1.00	4.57	5.00	0.93
Verfassung	2.00	4.29	5.00	0.78

## 4.2.2 Statistische Aufbereitung der Daten

### 4.2.2.1 Aufbereitung der Fragebogen-Daten

Um sicherzugehen, dass die VP die Fragen in ähnlicher Weise verstanden haben, werden die einzelnen Frage-Items mit Hilfe von Box-Plots untersucht. Ausreißer werden nach der Empfehlung von Komsta [Kom06] entfernt, da sie bei kleinen Stichproben große Auswirkungen auf den Mittelwert besitzen. Dabei wird davor mit dem Grubbs-Test geprüft, ob der Wert tatsächlich einen Ausreißer in der Messreihe darstellt. Außerdem muss das Komplement beim NASA-TLX in der Dimension Leistung gebildet werden, da die Antwortmöglichkeiten im Fragebogen im Gegensatz zu dem Original NASA-TLX vertauscht waren.

### 4.2.2.2 Aufbereitung der Eyetracker-Daten

Eine Filterung der Pupillengrößendaten, die aus dem Eyetracker kommen, ist unerlässlich, da die Zeiträume herausgefiltert werden müssen, in denen die VP die Augen nicht geöffnet hat oder der Eyetracker die Pupille nicht korrekt detektieren konnte. Andernfalls würden diese Daten, die mit einer Pupillengröße von 0 oder anderen unplausiblen Werten gespeichert wurden, die Ergebnisse stark verfälschen. Daher wird nach einem Beschneiden der Daten auf plausible Grenzen ein Filter eingesetzt, der bei einer zu hohen Abweichung des aktuellen Werts von den vorherigen Werten diesen als ungültig erklärt. Die Auswirkungen sind an einem Beispiel von VP 22 im dritten Durchgang der abbildungs-basierten Daten in Abbildung B.1 zu sehen. Abschließend werden nur die Daten der VP ausgewertet, die einen Anteil von über 60 % an gültigen Daten in den drei Wertungsdurchgängen aufweisen. Damit bleiben die Daten von 14 der 21 Versuchspersonen zur Auswertung. Unter den mittleren Pupillendurchmessergrößen befinden sich keine Ausreißer und müssen somit auch nicht entfernt werden.

### 4.2.2.3 Aufbereitung der Log-Daten

Die Logdateien werden automatisch ausgewertet und dabei wird die Effektivität und die benötigte Aufgabendauer aus den Zeitstempeln errechnet. Bei den textuellen Eingaben wird nur der Zeitraum zwischen der ersten und letzten Tasteneingabe einer Texteingabe gewertet, damit der physische Teil der Aufgabe herausgerechnet wird. Bei den anderen beiden Aufgabentypen ist eine solche Filterung nicht möglich, da die VP keine feste Interaktionsreihenfolge eingehalten haben. Die Zeiten werden auch, wie bei der Auswertung des NASA-TLX, von Ausreißern befreit. Die Auswertung der Effektivität bei den abbildungs-basierten Daten erfolgte manuell durch Vergleich mit der Musterlösung (siehe Tab.A.3).

### 4.2.3 Betrachtung der abhängigen Variablen

In einem ersten Schritt werden die Verteilungen von verschiedenen Variablen mit Hilfe von Boxplots<sup>1</sup> dargestellt und mit Hilfe des Mittelwerts und der Quartile untersucht. Dies kann erste Hinweise über die empirische Haltbarkeit der Thesen geben.

#### 4.2.3.1 Betrachtung der Lernkurve

Wie in Abb. B.2 und Tab. B.1 zu erkennen ist, erfolgt bei allen drei Interaktionsmetaphern eine Reduzierung der benötigten Gesamtzeit im Verlauf der drei Durchgänge. Dabei ist aber der Zeitunterschied zwischen dem zweiten und dritten Durchgang nur sehr gering. Daher kann davon ausgegangen werden, dass auch bei weiteren Durchgängen keine oder nur eine geringe Steigerung der Geschwindigkeit auftreten würde. Damit befindet sich der Lernprozess der VP schon im DG 3 nahe der Sättigung. Daher bestätigt sich die Annahme, dass im dritten Durchgang eine sinnvolle Messung durchgeführt werden kann.

#### 4.2.3.2 Betrachtung der NASA-TLX Daten

Bei Betrachtung der Daten des NASA-TLX (siehe Abb. B.3 und Tab. B.2) fällt auf, dass bei den textuellen Daten für beide Ausprägungen der Trennung die Verteilung sehr symmetrisch erscheint. Sowohl der Median als auch der Mittelwert ist bei den abgesetzten Eingabegeräten kleiner. Der Interquartilabstand (IQR) ist bei den Versuchsgruppen nahezu identisch. Auch bei den strukturierten Daten sind Median und Mittelwert im abgesetzten Modus kleiner. Die Verteilung beider Versuchsgruppen ist schief, so dass die Mittelwerte näher zusammenliegen als die Mediane. Der IQR der Kontrollgruppe ist fast doppelt so groß wie der der TG. Die abbildungsbasierten Daten zeigen ein ähnliches Bild, in dem auch Median und Mittelwert bei den abgesetzten Geräten kleiner ist. Ebenfalls liegt eine Schiefe bei beiden Gruppen vor, wodurch die Mediandifferenz deutlich kleiner als die Mittelwertdifferenz ist. Hier hat die Kontrollgruppe sogar einen mehr als doppelt so großen IQR.

Somit ergibt sich kein Hinweis darauf, dass eine der operationalen Hypothesen der ersten Forschungshypothese zutreffen könnte.

#### 4.2.3.3 Betrachtung der Pupillengrößendaten

In Abbildung B.4 und Tabelle B.3 sind die Daten der Pupillengrößen für beide Stichproben dargestellt. Bei den textuellen Daten zeigt sich in allen Parametern bei der Treatmentgruppe

---

<sup>1</sup>Bei allen Boxplots sind die Whisker maximal 1,5-mal so groß wie der Interquartilabstand. Größere Abstände werden als Ausreißer dargestellt.

ein höherer Wert bei symmetrischer Verteilung beider Stichproben und gleicher Standardabweichung und ähnlichem IQR. Mittelwert, Median, Maximum, Minimum und IQR unterscheiden sich bei den strukturierten Daten nur wenig, wobei die Treatmentgruppe durchweg etwas höhere Werte aufweist. Auch hier scheinen beide Verteilung ziemlich symmetrisch zu sein. Die Verteilungen bei den abbildungsbasierten Aufgaben sind beide schief. So ist der Median der KG und der Mittelwert der TG größer. Es ergibt sich bei allen Interaktionsmetaphern eine ähnliche Standardabweichung.

Diese Erkenntnisse lassen die Bestätigung der ersten Forschungshypothese bei den textuellen Daten möglich erscheinen.

#### **4.2.3.4 Betrachtung der Leistungsdaten**

Die Abbildung B.5 und die Tabelle B.4 zeigen die Leistungsdaten der VP. Der Mittelwert und alle Quartile liegen bei der TG unter denen der KG. Aber auch der IQR ist bei der TG etwa eineinhalb mal so groß. Bei den strukturierten Daten ist die Standardabweichung und der IQR in der KG größer, die Werte liegen aber mit Ausnahme des Minimums über denen der TG. Auch bei den abbildungsbasierten Daten ist die Standardabweichung der KG über 50 % größer als die der TG, während der IQR in der gleichen Größenordnung liegt. Das liegt an einem starken Maximum der KG. Die restlichen Quartile stimmen in etwa mit denen der TG überein.

Auch hier ergibt sich nur die Möglichkeit, dass die operationale Hypothese der ersten Forschungshypothese für die textuellen Daten zutrifft.

#### **4.2.4 Betrachtung der Kontrollvariablen**

Ein Blick auf die Effektivität (vgl. Abb. B.9 und Tab. B.8) zeigt, dass sich für die strukturierten und textuellen Daten ein sehr homogener hoher Grad der Aufgabenerfüllung mit einzelnen Ausreißern ergibt. Sowohl die KG als auch die TG erreichte nahezu immer eine fehlerfreie Durchführung. Bei den abbildungsbasierten Daten ist eine deutliche Streuung nach unten zu erkennen. Ein t-Test bestätigt, dass die Effektivität der abbildungsbasierten Daten signifikant niedriger als bei den textuellen ( $t = 3.2$ ) und strukturierten Daten ( $t = 3.0$ ) ist.

Bei einer Untersuchung der abbildungsbasierten Aufgaben fällt auf, dass bestimmte Aufgaben in sehr hohem Anteil falsch beantwortet wurden. In Tabelle 4.2 ist die Effektivität über die einzelnen Aufgaben der Durchgänge aufgestellt. Es ist klar zu erkennen, dass die Aufgabe 3 im Durchgang 2 und die Aufgaben 1 und 3 im Durchgang 3 deutlich häufiger als die restlichen Aufgaben falsch beantwortet wurden.

Bei genauerer Betrachtung dieser Aufgaben (vgl. Tab. A.3) stellt sich heraus, dass die Aufgabenstellung anders interpretiert werden konnte. Ein Blick in die Ergebniszettel der ein-

zelenen VP bestätigt dies, da diese fast immer die gleiche – hier als falsch interpretierte – Antwort gegeben haben.

**Tabelle 4.2:** Effektivität bei den abbildungsbasierten Daten

	1	2	3	4	5	6
Durchgang 1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	1.00
Durchgang 2	1.00	1.00	0.62	1.00	1.00	1.00
Durchgang 3	0.67	1.00	0.67	0.95	1.00	1.00

## 4.3 INFERENZSTATISTIK

### 4.3.1 Untersuchung der ersten Forschungshypothese

Um die erste Forschungshypothese zu beurteilen, wonach abgesetzte Eingabegeräte eine höhere Arbeitsbeanspruchung als kombinierte verursachen, müssen die einzelnen operationalen Hypothesen untersucht werden. Dabei wird nach der Empfehlung von Vorberg und Blankenberger [VB99] vorgegangen. Dazu ist zuerst festzustellen, dass in allen Hypothesen auf einen quantitativen Unterschied in der zentralen Tendenz von zwei unabhängigen Stichproben geprüft wird.

Daher werden die interessierenden Variablen zuerst mit dem Shapiro-Wilk-Test [SW65] auf Normalverteilung geprüft. Weiterhin werden ein F-Test und ein Levene-Test durchgeführt. Falls beide positiv ausfallen, sind die zu vergleichenden Stichproben varianzhomogen. Diese Information ist für die folgenden Tests relevant. Falls beide Stichproben normalverteilt sind, wird zur Prüfung der operationalen Hypothese ein t-Test durchgeführt. Andernfalls wird nach Prüfung auf eine gleiche Verteilungsform mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test ein Zwei-Stichproben Wilcoxon-Test (auch Mann-Whitney-U-Test genannt) durchgeführt, um die operationalen Hypothesen zu prüfen, die in Kapitel 3.5.2.1 definiert wurden.

In Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse dieser statistischen Tests für die operationalen Hypothesen der ersten Forschungshypothese zu sehen. Dabei gibt  $d$  die Effektstärke nach Gleichung 3.5 an, wobei ein positiver Wert bedeutet, dass der Wert bei den abgesetzten Geräten größer ist.  $PWR$  bezeichnet die Teststärke (Entscheidungswahrscheinlichkeit eines Signifikanztests zugunsten einer tatsächlich wahren Alternativhypothese),  $t$  den t-Wert des t-Test und  $W$  die Testgröße des Wilcoxon-Tests, falls derjenige Test durchgeführt wurde. Als  $p$  findet sich der p-Wert des jeweils durchgeführten Tests. Die Variable  $NV$  zeigt an, ob beide Stichproben normalverteilt sind, und  $VH$  gibt an, ob beide Stichproben mit den unterschiedlichen Ausprägung der Trennung varianzhomogen sind. Für jede operationale Hypothese sind die statistischen Hypothesen für alle Interaktionsmetaphern aufgeführt. Dabei gibt  $OP$  die genutzte Operationalisierung und  $IM$  die verwendete Interaktionsmetapher an.

**Tabelle 4.3:** t-Test für einzelne operationale Hypothesen

	<i>OP</i>	<i>IM</i>	<i>d</i>	<i>PWR</i>	<i>NV</i>	<i>VH</i>	<i>t</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
OH 1.1	TLX	Tas	-0.48	0.00	✓	✓	24.50	-	> 0.05
OH 1.2	TLX	SR	-1.01	0.00	✓	✓	19.50	-	> 0.05
OH 1.3	TLX	AS	-0.60	0.00	✗	✓	-	35.50	> 0.05
OH 2.1	PD	Tas	0.91	0.62	✓	✓	26.00	-	> 0.05
OH 2.2	PD	SR	0.32	0.17	✓	✓	23.00	-	> 0.05
OH 2.3	PD	AS	0.04	0.06	✓	✓	23.00	-	> 0.05
OH 3.1	ZD	Tas	0.53	0.31	✓	✓	44.00	-	> 0.05
OH 3.2	ZD	SR	-0.81	0.00	✓	✓	24.50	-	> 0.05
OH 3.3	ZD	AS	-0.19	0.02	✗	✓	-	50.00	> 0.05

Die Beobachtung der Parameter für einige operationale Hypothesen legt den Verdacht nahe, dass für diese operationalen Hypothesen die Gültigkeit mit der umgekehrten Aussage besteht. So werden die in Kapitel 3.5.2.1 aufgestellten statistischen Hypothesen mit umgekehrten Ungleichheitszeichen geprüft. Eine Signifikanz der von der Aussage umgekehrten Hypothesen kann jedoch nur für den NASA-TLX bei den strukturierten Daten mit dem t-Test ( $t = 1.98$ ,  $PWR = 0.70$ ) bestätigt werden. Somit schätzt die TG die Beanspruchung bei Nutzung des Scrollrads geringer ein. Dieses Ergebnis wurde nicht erwartet, ist aber nachvollziehbar, da der sehr kleine Eingaberaum durch eine klare Anordnung der Eingabeelemente ohne Sichtkontakt gut bedient werden kann. Zudem ist die Armhaltung beim abgesetzten Betrieb natürlicher und das Gewicht am linken Arm ist geringer und damit körperlich weniger beanspruchend und behindernd.

#### 4.3.2 Probleme der Auswertung bei der zweiten Forschungshypothese

Bei der Untersuchung der zweiten Forschungshypothese hat sich ein schwerwiegender Fehler in der Planung und ein Problem in der Auswertung herausgestellt, die eine Prüfung der Hypothese nicht zulassen. Zum einen baut die zweite Forschungshypothese auf der ersten auf, da in dieser von einer Erhöhung der Beanspruchung bei einer Trennung ausgegangen wird. Da die erste Forschungshypothese aber abgelehnt wurde, ist das Prüfen auf die zweite nicht mehr sinnvoll.

Eine größere Einschränkung bewirkt jedoch ein Fehler im Experimentdesign, der eine statistische Auswertung der operationalen Hypothesen auch bei Bestätigung der ersten Forschungshypothese unmöglich macht. Da eine VP nur jeweils eine Ausprägung der Trennung getestet hat, kann für die einzelne VP kein Wert für die Beanspruchungsänderung durch die Trennung bestimmt werden. Ein solche Differenz zwischen den Werten im abgesetzten und kombinierten Modus ist jedoch für jede einzelne VP notwendig, um eine statistische Aussage über die Unterschiede in der Beanspruchungserhöhung zwischen den Interaktionsmetaphern zu erhalten.

**Tabelle 4.4:** Vergleich der Arbeitsbeanspruchungsdifferenz für verschiedene Interaktionsmetaphern

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max
TLX.Text	0.83	-6.04	-8.33	-4.38	-5.62	-0.83
TLX.Strukt	0.83	-3.75	-13.33	-7.97	-11.67	-11.67
TLX.Abb	0.00	-6.67	-3.33	-9.17	-24.58	-8.33
PG.Text	12.95	8.39	9.04	8.56	7.15	6.17
PG.Strukt	4.46	-0.09	1.48	2.74	6.46	2.75
PG.Abb	0.26	3.87	-3.96	0.33	4.29	-4.70
ZD.Text	-5.54	3.27	29.95	14.59	20.07	21.02
ZD.Strukt	22.00	-29.75	-27.50	-33.37	-53.00	-56.00
ZD.Abb	3.00	-0.25	7.50	-12.10	-0.25	-85.00

Um die Differenz der Arbeitsbeanspruchung zwischen abgesetzten und kombinierten Betrieb bei verschiedenen Interaktionsmetaphern dennoch in einem abgeschwächten Maß zu vergleichen, wurden in Tabelle 4.4 verschiedene Funktionen  $f()$  auf die Daten der Operationalisierung jeder Versuchsgruppe angewendet. Anschließend wurde die Differenz zwischen dem abgesetzten und kombinierten Modus gebildet. Als Funktionen wurden der Mittelwert, das Maximum, das Minimum und die drei Quartile (Q.25, Median und Q.75) angewendet.

$$\Delta f(x_{OP}^{IM}) = f(x_{OP}^{Ab,IM}) - f(x_{OP}^{Komb,IM})$$

Besonders die Zunahme fast aller Parameter der textuellen Daten gegenüber den strukturierten und abbildungsbasierten Daten in der Pupillengröße und Zeitdauer sind auffällig. Daraus kann die zweite Forschungshypothese gestützt aber nicht untersucht werden, ob die Trennung bei der Texteingabe eine höhere Beanspruchungssteigerung bewirkt als es bei den anderen Interaktionsmetaphern der Fall ist. Die Unterschiede zwischen dem Scrollrad (strukt. Daten) und dem Analogstick (abb. Daten) haben hingegen keine eindeutige Richtung. Dadurch dass die VP alle Eingabegeräte im abgesetzten Modus im NASA-TLX als weniger beanspruchend einschätzten, sind in dieser Operationalisierung keine großen Unterschiede erkennbar.

## 4.4 WEITERE PRÜFUNGEN UND BEFUNDE

### 4.4.1 Betrachtung der einzelnen NASA-TLX Dimensionen

Eine Betrachtung der einzelnen Dimensionen des NASA-TLX (siehe Abbildungen B.6, B.7 und B.8) zeigt, dass einzelne Dimensionen von den beiden Versuchsgruppen unterschiedlich bewertet wurden. In keiner Dimension haben sich jedoch die VP mit den abgesetzten Eingabegeräten signifikant beanspruchter gefühlt.

Aber die Gruppe ohne Trennung der Eingabegeräte schätzte die erbrachte Leistung bei der Navigation in strukturierten Daten signifikant schlechter ( $t = 2.42$ ) ein als die TG. Und auch bei der zeitlichen Anforderung hat sich die KG signifikant stärker beansprucht gefühlt ( $W = 20.5$ ). Der zweite Punkt überrascht, da beide Versuchsgruppen die gleichen Aufgaben ohne zeitliche Beschränkung oder andere zeitliche Komponente zu absolvieren hatten. Da dieser Effekt nur durch eine unklare Fragestellung zu erklären ist, wird zusätzlich ein modifizierte NASA-TLX aus dem Mittelwert der anderen fünf Dimensionen gebildet. Mit diesem Wert muss die in Kap.4.3.1 getätigte Aussage, dass die OH 1.2 in die andere Richtung zutrifft, wieder zurückgenommen werden. Ansonsten ändern sich bei der Betrachtung der Hypothesen aber keine Aussagen.

Bei den NASA-TLX Daten existiert für die Kontrollgruppe eine höhere Standardabweichung bei den textuellen und abbildungsbasierten Daten (vgl. Abb. B.3 und Tab. B.2). Dieser Unterschied ist aber nicht signifikant (vgl. Spalte GV in Tabelle 4.3).

#### **4.4.2 Vergleich der summierten Aufgabenzeit mit der Gesamtzeit bei textuellen Daten**

Ein Vergleich zwischen der Summe der Zeiten, die zum Eingeben des Textes notwendig sind (vgl Kap. 4.2.2.3), und der Gesamtzeit zur Bearbeitung des gesamten Rundgangs bei den textuellen Daten (siehe Abb. B.10 und Tab. B.9) zeigt, dass die abgesetzten Eingabegeräte bei der Betrachtung der Gesamtzeit leicht besser sind. Für die reine Texteingabe benötigten die VP allerdings länger. Dies kann daran liegen, dass die Tastatur am Unterarm eine einfachere Bedienung ermöglicht, während des Hantierens an der Anlage aber behindert. Dies kann auch die Bewertung der Anstrengung des NASA-TLX (vgl Abb. B.6 und Tab. B.5) bestätigen. Die VP mit dem Eingabegerät am PDA mussten sich mehr anstrengen, aber die Frustration bei der Eingabe war etwas niedriger. Daher schätzten sie die eigene Leistung schlechter ein. Dabei sind jedoch alle angesprochenen Effekte nicht signifikant.

#### **4.4.3 Prüfung auf Zusammenhang mit Kontrollvariablen**

Es wurden noch weitere Tests durchgeführt, die den Einfluss von den Kontrollvariablen auf die abhängigen Variablen prüfen. So wurde aber weder ein signifikanter Zusammenhang noch eine Tendenz von einem der Indikatoren für Arbeitsbeanspruchung mit dem Alter, der beruflichen Ausrichtung, der aktuellen Verfassung oder auch der Anzahl der Abstürze der Programme gefunden. Das kann auch an der Tatsache liegen, dass die Spreizung der Kontrollvariablen durch die Stichprobe nicht sehr groß waren. Gruppen, in denen sich dann nur ein oder zwei VP finden, lassen sich nicht im Vergleich mit der restlichen Stichprobe auswerten.

# 5 DISKUSSION

## 5.1 KRITIK AN DER UNTERSUCHUNG

### 5.1.1 Kritik am Untersuchungsdesign

Die in Kapitel 4 betrachteten Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund des Untersuchungsdesigns gesehen werden. Daher wird im Folgenden auf die Unzulänglichkeiten desselben und mögliche Auswege eingegangen. Zum einen beschränkte sich die Untersuchung nur auf Eingabegeräte, die sowohl getrennt als auch kombiniert mit dem Anzeigegerät implementiert werden können. Vollkommen außer Acht gelassen wurden Geräte, die nur räumlich getrennt eingesetzt werden können, wie z. B. Datenhandschuhe, Kopfgestenerkennung oder Fingertastaturen. Für diese Geräte kann aber prinzipiell keine Erhöhung der Arbeitsbeanspruchung bei einer Trennung untersucht werden, weil die Geräte nicht in einem nicht-abgesetzten Modus verwendet werden können.

Wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben ist ein statistischer Vergleich der Auswirkung der Trennung zwischen den einzelnen Interaktionsmetaphern in dem gewählten Experimentdesign nicht möglich. Eine VP hat nur jeweils eine Ausprägung der Trennung getestet und somit kann man für die einzelne VP keinen Wert für die Beanspruchungsänderung durch die Trennung bestimmen. Diese Problematik hätte durch Nutzung eines Within-Subject-Designs vermieden werden können. In diesem Fall hätte die VP bei der subjektiven Bewertung des NASA-TLX auch einen direkten Vergleich zwischen den verschiedenen Ausprägungen der Trennung gehabt, wodurch evtl. Ergebnisse mit geringerer Varianz entstanden wären. Dem entgegen steht der Nachteil der Vorerfahrung der VP durch die Nutzung des Gerätes bei der ersten Ausprägung der Trennung.

## 5.1.2 Kritik am Evaluationsverfahren

Weiterhin muss auch Kritik an dem verwendeten Evaluationsverfahren geäußert werden, da dieses wesentlich auf die Ergebnisse einwirkt. Laut Aussagen der VP beeinflusst die Handschuhgröße die Schwierigkeit der Bedienung maßgeblich. Da nur Handschuhe in der Größe *groß* zur Verfügung standen, haben VP mit kleinen Händen der Literatur und der Beobachtung zufolge eine höhere Beanspruchung erlebt [HM93]. Dieser mögliche Effekt ist erst am Ende der Versuche aufgefallen, so dass auch danach keine Aufnahme der Handgröße zur Kontrollzwecken oder eine Beschaffung kleinerer Handschuhe erfolgt ist. Es ist anzunehmen, dass sich durch diesen Effekt die Varianz in der Arbeitsbeanspruchung erhöht. Es bleibt jedoch zu prüfen, ob die Beschränkung auf eine Handschuhgröße nicht den Standardfall in der Industrie darstellt und damit eine realistische Umsetzung des Arbeitssystems bedeutet.

Durch die zeitgleich stattfindende Parallelevaluation im Rahmen der Diplomarbeit von Hegewald [Heg10], erfolgte für 11 der 21 VP eine Vorbelastung durch diesen zweiten Versuch. Da die VP jedoch etwa 20 Minuten Zeit hatten, sich zu erholen, sollten dadurch keine Einwirkungen auf diese Untersuchung entstanden sein. Auch eine Ablenkung während des Versuches durch die Parallelevaluation kann so gut wie ausgeschlossen werden, da durch die Trennung mit dem Vorhang kein Sichtkontakt und kaum Hörkontakt bestanden hat. Als möglicher Einfluss bleibt die Vorerfahrung von 10 VP, die im vorherigen Versuch von Hegewald ein Assistenzsystem verwendet haben, dessen Oberfläche der hier für strukturierte Daten eingesetzten Oberfläche sehr ähnelt, da es auf dieser aufbaut. In den erhobenen Daten konnte jedoch kein Hinweis auf einen solchen Zusammenhang entdeckt werden, zumal unterschiedliche Eingabegeräte verwendet wurden.

Es wurde nicht in einer realen Anlage evaluiert. Da aber Großteile einer industriellen Arbeitsumgebung nachgebildet wurden (Anlagen, Arbeitsbekleidung, Lärm, etc.), sollten die Unterschiede zu einer realen Anlage nur gering sein. Die in der realen Situation vorkommenden weiteren Beanspruchungen durch soziale Komponenten, Leistungsdruck und Gefährdungspotential konnten in der Untersuchung nicht mit einbezogen werden. Dies stand aber auch nicht im Fokus dieser Arbeit. Die Evaluation konnte ebenfalls nicht mit der Zielgruppe durchgeführt werden, was laut Witt und Kluge [WK08] eine Schwächung der Validität der Untersuchung bedeutet. Die Versuchspersonen haben eine andere Vorbildung, Motivation und Interessen als die Zielpopulation. Da die Stichprobe aber fast ausschließlich aus Studenten einer technischen Studienrichtung bestand, kann davon ausgegangen werden, dass die Abweichungen zur Zielgruppe nicht allzu groß sind.

## 5.1.3 Kritik an den Prototypen

Die Absturzhäufigkeit des Assistenzsystem für strukturierte Daten ist sehr hoch und verzerrt damit wahrscheinlich auch die Beanspruchung für die VP, bei denen Abstürze aufgetreten

sind. Dies trifft sowohl auf die subjektiv empfundene Beanspruchung als auch die objektiv über die Pupillengröße gemessene Beanspruchung zu. Davon abgesehen scheint die Qualität des Eingabegeräts und der Oberfläche beim Scrollrad gut zu sein, da von mehreren VP die Aussage getroffen wurde, dass das Arbeiten mit diesem System Spaß mache. Dieses als *Joy of use* bezeichnete Empfinden [Hat01] wird in dieser Arbeit nicht behandelt, ist aber ein anderer Aspekt in oder am Rand der Ergonomie, welches bei der Entwicklung ergonomischer Systeme berücksichtigt werden sollte.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die Anbringung der Eingabegeräte am Unterarm. Das Eingabeelement scheint, wie in Kapitel 4.4.2 für die Tastatur dargelegt, die VP beim Arbeiten an der Anlage zu behindern. Auch bei den anderen Geräten ist von einer Behinderung auszugehen. Dies kann durch die Beobachtung bestätigt werden, dass von vielen VP der linke Arm nur wenig beim Betätigen von Ventilen zur Hilfe genommen wurde. Ein Ursache davon kann in der unsicher wirkenden Befestigung durch das Klettband liegen.

## 5.2 BEWERTUNG DER OPERATIONALISIERUNGEN

### 5.2.1 Bewertung des NASA-TLX

Erstaunlich ist der Unterschied in der Bewertung der zeitlichen Anforderung, da in dieser Dimension des NASA-TLX kein Unterschied auf Grund der Trennung zu erwarten war. In beiden Gruppen existierte kein Zeitlimit für die Aufgaben und auch keine andere zeitliche Komponente. Der aufgetretene Unterschied ist auf eine unzureichende Einweisung in den Fragebogen zurückzuführen. Dafür sprechen ebenfalls die teilweise hohen Streuungen der anderen NASA-TLX Dimensionen.

Dennoch ist die Aufnahme einer Operationalisierung von subjektiven Daten in einem solchen Experiment sinnvoll, da die Ausführung einfach ist und Ergebnisse erzielt werden konnten, die mit anderen Methoden nicht erhebbbar sind. So zeigt der NASA-TLX das subjektiv niedrigere Empfinden von Beanspruchung bei Nutzung des abgesetzten Scrollrads. Damit kann die Einschätzung der Literatur, dass der NASA-TLX ein einfaches, aber gut geeignetes Maß für die Beanspruchung ist [Sch02, Wic98], unterstützt werden.

### 5.2.2 Bewertung der Pupillengrößendaten

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Qualität der Pupillengrößendaten ausbaufähig ist. Es gibt einen großen Anteil in den Daten, in dem die Pupille nicht ordnungsgemäß erkannt werden konnte. So konnte nur für einen Anteil von 66 % der VP die Pupillengröße ausgewertet werden, was erheblich unter dem in der Literatur angenommenen Wert von 80–90 % [JK03] liegt. Und in diesen auswertbaren Datensätzen fallen auch nur 83 % der Daten in plausible

Grenzen. Hier ist also durch eine genauere Kalibrierung sowie sorgfältigere Anbringung und Befestigung des Eyetrackers noch Verbesserungspotenzial vorhanden. Dennoch ist zu bezweifeln, ob die in den Literatur genannten Werte erreicht werden können, da die meisten Untersuchungen anderer Autoren in einer stationären Untersuchung ohne die zusätzlichen Probleme eines mobilen Eyetrackers ausgeführt wurden. Für diese Untersuchung sollten diesen Daten auf Grund der geringen Qualität nur als zusätzliches Maß bewertet werden.

Eine Steigerung der Qualität der Daten hätte erreicht werden können, wenn die Pupillengröße am Anfang des Versuches in einer Referenzsituation aufgenommen worden und alle nachfolgenden Daten als Differenz zu dieser Referenz ausgewertet worden wären. Dadurch verringerten sich Varianzen aufgrund von unterschiedlich großen Pupillen, unterschiedlichem Abstand und Winkel der Eye-Kamera zum Auge. Zusätzlich sollte in weiteren Untersuchungen darauf geachtet werden, dass ein Eyetracker verwendet wird, der einen sicheren Halt auf dem Kopf der VP garantiert und nicht rutscht. Dies ist in dem Versuch bei drei VP, deren Kopf zu klein für den Helm war, in einem Ausmaß passiert, dass die Daten nicht ausgewertet werden konnten. Zudem wird sich dadurch die Beanspruchung für die VP erhöht haben.

Bei einer gesteigerten Qualität mit weniger Rauschen kann als Operationalisierung für die Pupillengröße auch der ICA verwendet werden. Dieser erlaubt bei einer hohen zeitlichen Auflösung Aussagen über die mentale Beanspruchung unabhängig vom Umgebungslicht und kann daher weitere Erkenntnisse ermöglichen.

Als grundsätzliches Problem bleibt eine Intrusion [Mar02, PKSH10] durch den massiven Aufbau des Eyetrackers und durch den Spiegel, wobei dieser Einfluss durch ein moderneres Gerät wahrscheinlich erheblich gemindert werden könnte, da diese leichter und kompakter sind. Doch auch in diesem Fall ergibt sich ein Fehler in der Messung, wenn die VP nach unten blickt, was bei Untersuchung solcher abgesetzter Geräte während der Bedienhandlung fast immer der Fall ist. Durch die runde Form des Augapfels ist die Projektion der Pupille auf die Kameralinse dabei kleiner. Dieser Fehler ist aber im Vergleich zu den anderen eher klein einzuschätzen.

Die Nutzung eines Eyetrackers für eine Beanspruchungsmessung birgt im Ganzen einige Risiken und ist mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden. Diese Erfahrung deckt sich mit den Erfahrungen aus der Literatur [PB05, JK03]. Ob dieses Messmittel gute Aussagen zur Beanspruchung in anwendungsnahen mobilen Umgebungen zulässt, kann nach dieser Untersuchung und dem derzeitigen Literaturstand nicht verlässlich bestätigt werden. Dazu sind weitere Experimente notwendig.

### 5.2.3 Bewertung der Leistungsdaten

Die Lernkurve (vgl. Abb. B.2 und Tab. B.1) zeigt das erwartete Verhalten, dass die benötigte Zeitdauer im Laufe des Versuches sinkt. Damit wird die Validität dieser Operationalisierung

bestätigt. Dafür spricht ebenfalls, dass alle aufgenommenen Zeitdaten aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammen können, mit Ausnahme der KG bei den abbildungsbasierten Daten. Insgesamt kann man dieses Maß somit als einfach aber valide ansehen.

Bei einer genaueren zeitlichen Auswertung der Interaktionen könnte man mehr Informationen erzielen. Dafür sind Logdateien mit einer höheren Granularität sowie eine fest vorgegebene Interaktionsreihenfolge notwendig. Dies wurde bei den textuellen Daten schon umgesetzt und dadurch konnten erweiterte Erkenntnisse aus diesen zusätzlichen Daten gezogen werden (vgl. Kap. 4.4.2).

### 5.3 BEWERTUNG DER FORSCHUNGSHYPOTHESEN

Die erste Forschungshypothese muss abgelehnt werden, da keine der operationalen Hypothesen angenommen werden konnte. Die Hypothese trifft nicht einmal mit der Beschränkung auf eine der geprüften Interaktionsmetaphern oder Operationalisierungen zu. Im Gegenteil empfanden die Versuchspersonen die abgesetzten Geräte, im Speziellen das Scrollrad, subjektiv als weniger beanspruchend. Im Großen und Ganzen ist das ein für die Entwicklung positives Ergebnis, da keine Gründe gegen eine flexible Gestaltung von mobilen Eingabegeräten aufgezeigt werden konnten. Dabei stützt sich dieses Ergebnis vor allem auf die subjektiven Bewertungen und die Leistungsdaten, da die physiologischen Daten des Eyetrackers auf Grund der Messfehler nicht das gleiche Vertrauen entgegen gebracht werden kann. Für diese Ebene der Beanspruchung ist die noch ausstehende Untersuchung der EKG-Daten abzuwarten.

Die zweite Forschungshypothese konnte auf Grund eines Fehlers in dem Experimentdesign nicht untersucht werden. Die erhobenen Daten deuten aber darauf hin, dass die Hypothese zutreffen kann und somit die negativen Auswirkungen einer Trennung des Eingabegeräts bei einer Texteingabe größer sind als es bei der Navigation in strukturierten Daten der Fall ist.

Ein generelles Problem bei der Gestaltung von abgesetzten Eingabegeräten ist bei einigen Brillenträgern der Versuchsgruppe aufgetreten. Durch das häufige Hinunterblicken zum Anzeige- oder Bedienelement schauen diese, laut eigener Aussage, oft unter ihrer eigenen Brille hindurch. Dies erfordert eine häufige Umfokussierung des Auges und wird als belastend empfunden.

Teilweise liegen Effekte mit einer hohen Effektstärke vor, die aber trotzdem nicht signifikant sind. Dies ist bei der Pupillengröße und Nutzung der Tastatur ( $d = 0.92$ ) sowie bei der Zeitdauer für die strukturierten Daten ( $d = -0.81$ ) der Fall. Dies liegt an der zu hohen Varianz der Daten und der geringen Zahl der Versuchsteilnehmer. Um hier eine gute Teststärke von 95 % zu erreichen, wäre eine Größe jeder Gruppe von je 34 VP notwendig.

## 5.4 ERSTELLUNG VON GESTALTUNGSREGELN

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchung können folgende provisorische *Regeln zur Minimierung des gerätebedingten Einflusses auf die Arbeitsbeanspruchung* generiert werden:

1. Gegen eine Trennung von Ein- und Ausgabegerät ist vom Blickpunkt der Arbeitsbeanspruchung nichts einzuwenden.
2. Falls Ein- oder Ausgabegeräte am Arm oder den Händen angebracht werden sollen, ist darauf zu achten, dass sie ein möglichst geringes Gewicht besitzen und fest angebracht sind, damit sie den Benutzer beim Arbeiten mit der Umwelt nicht behindern.

Diese Regeln benötigen jedoch zur Fundamentierung und Erweiterung weitere Untersuchungen, da die bisher gewonnenen Daten nicht die Qualität haben, diese Regeln mit einer hohen Sicherheit zu untermauern.

# 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

## 6.1 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurde die Arbeitsbeanspruchung von Wartungsingenieuren bei der Nutzung von mobilen Eingabegeräten untersucht. Dies ist ein wichtiges Themenfeld, da durch eine Unterstützung der Wartungstechniker mit mobilen Assistenzsystemen die Effizienz gesteigert und die Fehleranfälligkeit verringert werden soll. Dabei muss jedoch die zusätzliche Beanspruchung der Benutzer durch das Assistenzsystem so gering sein, dass die dadurch ausgelösten negativen Effekte die positiven Möglichkeiten dieser Systeme nicht überdecken. Im Speziellen wurden neue Eingabegeräte untersucht, die getrennt vom Anzeigegerät verwendet werden können.

Zunächst wurden in der Literatur gängige Konzepte der mobilen Interaktion und Ergonomie untersucht. Es folgte eine Betrachtung möglicher Messverfahren zur Bestimmung der Beanspruchung. Als Hypothese wurde davon ausgegangen, dass eine Trennung des Bedienelementes von dem Anzeigegerät zu einer höheren Arbeitsbeanspruchung des Nutzers führt. Weiterhin wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Erhöhung der Arbeitsbeanspruchung bei einer Texteingabe größer als bei der Navigation in Daten ist.

Dazu wurde ein Evaluationsexperiment mit den drei Interaktionsmetaphern *Texteingabe*, *Navigation in strukturierten Daten* und *Navigation in Abbildungen* durchgeführt. Pro Interaktionsmetapher wurde ein Assistenzsystem mit einem passenden Eingabegerät entwickelt. Die Versuchspersonen hatten für jede Interaktionsmetapher einen festgelegten Wartungsrundgang mit Hilfe des passenden Assistenzsystems zu absolvieren, wobei die Befestigung der Eingabegeräte bei der einen Gruppe am Unterarm und bei der anderen Gruppe an der Hüfte erfolgte. Als Indikatoren für die Beanspruchung wurden dabei das subjektive Empfinden mit dem NASA-TLX, die Pupillengröße mit einem mobilen Eyetracker und die benötigte

Zeitdauer mit Logdateien aufgenommen.

In der durchgeführten Evaluation konnte gezeigt werden, dass eine räumliche Trennung von den Anzeige- und Bediengeräten nicht zwingend mit einer erhöhten Beanspruchung für den Bediener einhergeht. Somit muss die aufgestellte Hypothese verworfen werden. Im Gegenteil fühlten sich die Versuchspersonen bei der Nutzung des abgesetzten Scrollrads für die Navigation in strukturierten Daten teilweise weniger beansprucht als im kombinierten Modus. Die zweite Hypothese konnte auf Grund eines Planungsfehlers im Experimentdesign nicht untersucht werden.

Aus den Ergebnissen konnten zwei Gestaltungsregeln für die Entwicklung mobiler Eingabegeräte formuliert werden. Diese Regeln und die weiteren Ergebnisse bedürfen jedoch noch weiterer Untersuchungen, deren Ergebnisse eine höhere Qualität aufweisen.

## **6.2 AUSBLICK**

Durch die Arbeit konnte das Themengebiet nicht abschließend untersucht und bewertet werden. So sollte als erster Schritt die Auswertung der aufgenommenen EKG-Daten erfolgen. Aus den HRV-Signalen können als zusätzliche physiologische Parameter objektive Aussagen über die Beanspruchung ermittelt werden. Diese können die bereits auf Grundlage der Pupillengröße getroffenen Aussagen zur physiologischen Beanspruchung unterstützen oder neue Erkenntnisse in dieser Ebene erbringen. Da mit der Aufnahme und der Auswertung von EKG-Daten bereits mehr Erfahrung gesammelt wurde, ist es wahrscheinlich, dass die Daten sogar eine höhere Qualität aufweisen werden.

Weiterhin konnte die Untersuchung die zweite Forschungshypothese statistisch nicht beantworten und es haben sich einige neue Punkte ergeben, die es lohnt einer genaueren Untersuchung zu unterziehen. Daher sollte der Versuch mit den im Folgenden beschriebenen Änderungen wiederholt werden, um die Ergebnisse zu präzisieren und weitere Fragestellungen zu berücksichtigen.

Ein neuer Versuch sollte ein geändertes Experimentdesign verwenden, in dem jede VP beide Ausprägungen der Trennung erfährt. Dieser Wechsel zu einem Within-Subject-Design ermöglicht die statistische Untersuchung eines Vergleichs der Beanspruchungsänderung durch die Trennung zwischen verschiedenen Interaktionsmetaphern. Zugleich kann dann für die subjektive Bewertung über einen vergleichenden Fragebogen nachgedacht werden. Weiterhin sollte mit einer höheren Teilnehmerzahl gearbeitet werden, um gewisse Effekte mit einer höheren Sicherheit bestätigen oder ablehnen zu können. Als zusätzliche Operationalisierung für die Pupillengröße sollte der ICA verwendet werden. Dafür ist aber eine präzisere Kalibrierung und bessere Befestigung des Eyetrackers notwendig, damit ein Verrutschen des Eyetrackers nicht mehr auftreten kann. Zur Verbesserung der Qualität der NASA-TLX Daten sollte eine genauere Einweisung in den Fragebogen erfolgen. Ebenso ist eine Über-

arbeitung der Software aller Assistenzsysteme nötig, um die Stabilität der Programme zu erhöhen. Die Gestaltung der Arbeitsaufgaben sollte so erfolgen, dass auch bei den strukturierten und abbildungsbasierte Daten eine feste Interaktionsreihenfolge vorgegeben ist und die VP nicht entscheiden können, ob sie zuerst die Aufgabe in der Anlage durchführen oder zuerst die Aufgabe im Assistenzsystem bestätigen. Dabei sollten die Aufgabenstellungen für die abbildungsbasierten Daten so überarbeitet werden, dass Missverständnisse ausgeschlossen werden. Hier ist zu überlegen, ob der Untersuchungskontext einer industriellen Anlage nicht vernachlässigt werden kann und als Abbildungen einfach verständliche Bilder verwendet werden. Außerdem sollte für die Navigation in abbildungsbasierten Daten eine aktuellere Oberfläche gestaltet werden. Darüber hinaus sollte geprüft werden, in welchem Maße in der Industrie für die Wartungstechniker unterschiedliche Handschuhgrößen angeboten werden, und gegebenenfalls mehrere Handschuhgrößen für die VP zur Verfügung gestellt werden.

Eine weitere Bearbeitung des Themas ist anzustreben, da weder in dieser Arbeit noch in der Literatur ausreichend Erkenntnisse gewonnen wurden, die alle Fragen zur Entwicklung eines ergonomischen Assistenzsystem beantworten. Die Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit eines solchen System kann die Effizienz und Qualität von Arbeiten in der Industrie erhöhen und ist damit ein lohnendes Ziel der Forschung und Entwicklung. Für weitere Untersuchungen wurden einige Möglichkeiten aufgezeigt, die genutzt werden sollten, um diesen wichtige Aspekt in der Gestaltung von mobilen Geräten weiter zu erforschen.

# A DETAILS ZUR VERSUCHSANORDNUNG

## A.1 DETAILS ZUR AUFGABENSTELLUNG

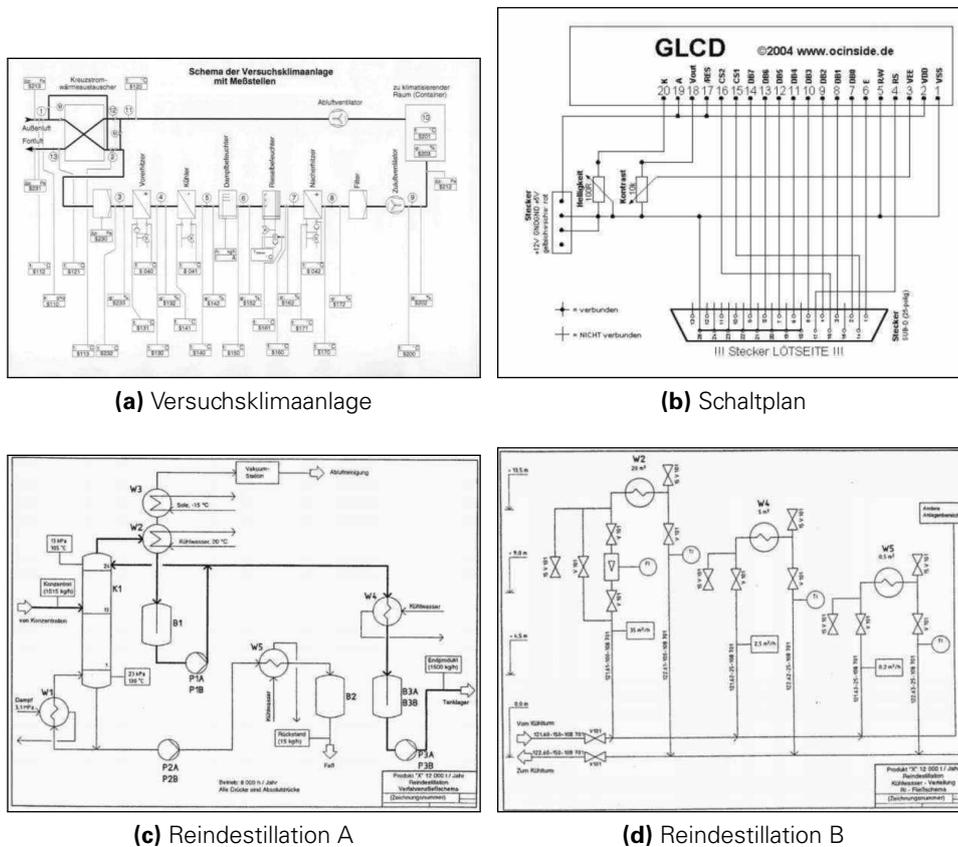


Abbildung A.1: Abbildung in den Aufgaben für abbildungs-basierte Daten

**Tabelle A.1:** Aufgaben textuelle Daten

<b>Aufgabe</b>	<b>Wartungs- aufgabe</b>	<b>Idealtypische Aufgaben- bearbeitung</b>	<b>Anfangs- zustand</b>	<b>Benötigte Utensili- en</b>	<b>Aufgabenanalyse</b>	<b>Idealtypische Ergebnisse</b>					
						<b>1. DG</b>	<b>#</b>	<b>2. DG</b>	<b>#</b>	<b>3. DG</b>	<b>#</b>
Funktions- prüfung H002	Großes Ventil schließen + wieder öffnen (4,5 leicht- gängige + 1 schwierig- e Umdre- hungen)	1. Ventil H002 auffin- den 2. Ventil bis zum An- schlag schließen und wieder öffnen 3. Rückmeldung lesen 4. Text eintragen	Ventil H002 öff- nen bis schwei- gängig + 1 Um- drehung; Karteikarte be- reitstellen	Karteikarte H002 + Klemm- brett tief hängend	1. Interaktion mit der prozess- technischen Umgebung durch Bewegung des Ventils und Entscheidung für Fehlerbe- schreibung 2. Eingabe von Text-Daten als Ergebnis der Interaktion	nicht voll- ständig schließ- bar	28	Riss an der Achse	17	Ölaustritt an Achse	19
Funktions- prüfung h717	Bücken + Ven- til schließen und öffnen (6,5 Umdre- hungen)	1. Ventil h717 auffin- den 2. Ventil bis zum An- schlag schließen und wieder öffnen 3. Rückmeldung lesen 4. Text eintragen	Ventil bis Anschlag öffnen; Karteikarte bereitstellen	Karteikarte h717 + Klemm- brett auf Boden- höhe	1. Interaktion mit der prozess- technischen Umgebung durch Bewegung des Ventils und Entscheidung für Fehlerbe- schreibung 2. Eingabe von Text-Daten als Ergebnis der Interaktion	Ventil klemmt	13	Ver- schraub- ung locker	20	Ventil schwer- gängig	19
Funktions- prüfung K102	Deckel ab- nehmen + Bücken + Zettel lesen + Deckel schließen	1. Kasten K102 auffin- den 2. Deckel öffnen (ab- nehmen) 3. Rückmeldung lesen 4. Text eintragen 5. Deckel schließen (aufsetzen)	Karteikarte bereitstellen; Gehäusedeckel aufsetzen	Kleine Karteikarte K102 in Gehäuse	1. Interaktion mit der prozess- technischen Umgebung durch Öffnen des Kastens und Ent- scheidung für Fehlerbeschrei- bung 2. Eingabe von Text-Daten als Ergebnis der Interaktion	Mehrere Risse	13	Wasser im Ge- häuse	17	Schrauben locker	16

54 54 54

**Tabelle A.2:** Aufgaben strukturierte Daten

Teilanlage	Gerät	Aufgabe	Beschreibung	Benötigte Utensilien	Korrekte Ergebnisse				
					1. Durchgang	2. Durchgang	3. Durchgang		
Teilanlage 1	Kreislaspumpe P1	I Typenschild lesen	ein vorgegebenes Feld vom Typenschild ablesen und aus Liste passenden Eintrag auswählen	Pumpe P1 mit Typenschild	Umdr = 2920	Leistung = 15kW	Spannung = 380 (Dreieck)	Typenschild lesbar machen	
		II Typenschild lesen	ein vorgegebenes Feld vom Typenschild ablesen und aus Liste passenden Eintrag auswählen	Pumpe P1 mit Typenschild	Cos phi = 0.9	Frequenz = 50 Hz	Strom = 29A	Typenschild lesbar machen	
		Sichtprüfung	Zettel auf Augenhöhe lesen	Karteikarte 'Sichtprüfung' + Klemmbrett	Pumpe stark verschmutzt	Dichtung beschädigt	Keine Fehler	Keine Fehler	Karteikarte bereitstellen
		Hörprüfung	Zettel auf Augenhöhe lesen	Karteikarte 'Hörprüfung' + Klemmbrett	Alles in Ordnung	Klopfende Geräusche	Keine Fehler	Keine Fehler	Karteikarte bereitstellen
Teilanlage 2	Handventil h720	Dichtheitsprüfung	Zettel auf Augenhöhe lesen	Karteikarte 'Dichtheitsprüfung' + Klemmbrett	Leckage	Keine Fehler	Keine Fehler	Karteikarte bereitstellen	
		Ventilbetätigung prüfen	Zettel über Kophöhe lesen	Karteikarte 'h720' + Klemmbrett	Erfolgreich geprüft	Ventil undicht	Ventil beschädigt	Karteikarte bereitstellen	
	Handventil h718	Ventilbetätigung prüfen	Zettel in Kniehöhe lesen	Karteikarte 'h718' + Klemmbrett	Erfolgreich geprüft	Erfolgreich geprüft	Erfolgreich geprüft	Karteikarte bereitstellen	
		T102 öffnen	Füllstandssensorgehäuse (Kopfhöhe) öffnen, Deckel 3 Umdrehungen abschrauben	runde Karteikarte 'T102'	Alles in Ordnung	Alles in Ordnung	Alles in Ordnung	Karteikarte bereitstellen, Gehäuse schließen	
	Wärmewasserbehälter B001	Sichtprüfung T102	Zettel in Füllstandssensor lesen	runde Karteikarte 'T102'	Keine Spannungsvorsorgung	Alles in Ordnung	Keine Spannungsvorsorgung	Karteikarte bereitstellen, Gehäuse schließen	
		Funktionsprüfung T102	Zettel in Füllstandssensor lesen	runde Karteikarte 'T102'	Alles in Ordnung	Alles in Ordnung	Alles in Ordnung	Karteikarte bereitstellen	
	Vorratslager L023	T102 schließen	Füllstandssensorgehäuse (Kopfhöhe) schließen, Deckel 3 Umdrehungen anschrauben	Karteikarte 'Lagerzettel L023'	Alles in Ordnung	Alles in Ordnung	Alles in Ordnung	Karteikarte bereitstellen, Gehäuse schließen	
		Öffnen Lagerprüfung	Kasten öffnen (2 Schritte)		Alles in Ordnung	Alles in Ordnung	Alles in Ordnung	Karteikarte bereitstellen, Gehäuse schließen	
		Schließen des Gehäuses	Vergleich Lagerzettel mit in PDA gespeicherten Infos Kasten schließen (2 Schritte)		Fett fehlt	Mehreres fehlt	Werkzeug fehlt	Karteikarte bereitstellen, Gehäuse schließen	
	Infos TA2	Vorratslager L023	Destilliertes Wasser Fett Werkzeug	Vergleich mit Daten auf Karteikarte	Schraubenschlüssel	1,0l	1,2l	1,0l	Auf richtige DG-Wahl der VP in Software achten
Destilliertes Wasser Fett Werkzeug			Vergleich mit Daten auf Karteikarte	Schraubenschlüssel	150g 28-Schraubenschlüssel	120g kein Werkzeug	50g 28-Schraubenschlüssel	80g 32-Schraubenschlüssel	

**Tabelle A.3:** Aufgaben abbildungsbasierte Daten

DG	Abbildung	Aufgabe	Fragestellung	Ergebnis	Wartungsaufgabe	Anfangszustand
DG1	Versuchsklimaanlage	Messnummer hinter Nacherhitzer	Welche Messnummer hat die Temperatur hinter dem Nacherhitzer?	\$170	h102 öffnen	Alle Ventile schließen; Durch vorherige VP alle mit Ausnahme von d101 geschlossen
	Schaltplan	Spannung rote Ader	Welche Spannung liegt an der roten Ader am Stecker (4-polig) an?	+5V	d102 öffnen	
		Widerstand Poti Kontrast	Wie hoch ist der Widerstand des Potentiometers für den Kontrast?	10k	h102 schließen	
Reindestillation A	Temperatur W2		Welche Temperatur hat das Kühlwasser, das durch den Behälter W2 fließt?	20 °C	h105 öffnen	
	Betriebsstundenzahl		Für welche Betriebsstundenzahl pro Jahr ist die Anlage ausgelegt?	8000 h/Jahr	h107 öffnen	
Reindestillation B	Fläche W4		Welche Fläche hat der Behälter W4?	5m <sup>2</sup>		
DG2	Versuchsklimaanlage	Position feuchter	Zwischen welchen Anlagenteilen ist der Dampfbefeuchter angeschlossen?	Kühler & Rie-selbefeuchter	h106 öffnen	Anfangszustand durch vorherigen DG eingestellt; h106, h103 und h104 schließen; H107, h105 öffnen
	Schaltplan	Spannung gelbe Ader	Welche Spannung liegt an der gelben Ader am Stecker (4-polig) an?	+12V	h107 schließen	
		Pin Signal VSS	An welchen Pin (Nr.) des Sub-D-Steckers geht das Signal VSS vom GLCD?	18-25	h103 öffnen	
Reindestillation A	Temperatur W3		Welche Temperatur hat die Sole in Behälter W3?	-15°C	h105 schließen	
Reindestillation B	Fläche W2		Welche Fläche hat der Behälter W2?	20 m <sup>2</sup>	h104 öffnen	
	Fläche W5		Welche Fläche hat der Behälter W5?	0,5 m <sup>2</sup>		
DG3	Versuchsklimaanlage	Messnummer hinter Zuluftventilator	Welche Messnummer hat die Temperatur nach dem Zuluftventilator?	\$200	h106 schließen	Anfangszustand durch vorherigen DG eingestellt; d101 schließen; H106, h102, h103, h104 öffnen
	Schaltplan	Position Messpunkt 4	Zwischen welchen Geräten liegt Messpunkt 4?	Vorerhitzer & Kühler	d102 schließen	
		Pin Signal RS	An welchen Pin (Nr.) des Sub-D-Steckers geht das Signal RS vom GLCD?	17	h103 schließen	
Reindestillation A	Massestrom	Endprodukt	Wie groß ist der Massestrom (kg/h) des Endprodukts, der in das Tanklager geht?	1500 kg/h	h104 schließen	
Reindestillation B	Volumenstrom zu W4		Für welchen Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h ist die Leitung zum Behälter W4 ausgelegt?	2,5 m <sup>3</sup> /h	d101 öffnen	
	Massestrom		Wie groß ist der Massestrom (in Tonnen pro Jahr) für den die Anlage ausgelegt ist?	12000 t/Jahr		

## A.2 ZEITPLANUNG DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Für den Ablauf der Versuchsdurchführung wurde ein Zeitplan erstellt, der eine einfache Durchführung des Experiments ermöglichen sollte. Dieser ist in Tabelle A.4 dargestellt. Der komplette Versuch dauert für eine VP demnach etwa 100 Min.

**Tabelle A.4:** Zeitplanung der Versuchsdurchführung

<b>Untersuchungsabschnitt</b>	<b>Dauer (Min.)</b>	<b>kumulierte Dauer (Min.)</b>
Begrüßung und Überblick über Versuchsablauf	5	5
Erklärung GZAT/Arbeitsaufgaben	5	10
Formale Angelegenheiten (EinVerErk u. ArbSchB)	5	15
Messung Ruhe-Blutdruck	1	16
Fragebogen personenbezogene Daten I	1	17
Messgeräte anlegen und kalibrieren (EKG + Eyetracker)	6	23
Einweisung Tastatur	3	26
1. Durchgang Tastatur	8	34
Pause	1	35
2. Durchgang Tastatur	5	40
Pause	1	41
3. Durchgang Tastatur	4	45
Ausfüllen NASA-TLX	2	47
Einweisung Scrollrad	3	50
1. Durchgang Scrollrad	8	58
Pause	1	59
2. Durchgang Scrollrad	5	64
Pause	1	65
3. Durchgang Scrollrad	4	69
Ausfüllen NASA-TLX	2	71
Einweisung Analogstick	3	74
1. Durchgang Analogstick	8	82
Pause	1	83
2. Durchgang Analogstick	5	88
Pause	1	89
3. Durchgang Analogstick	4	93
Ausfüllen NASA-TLX	2	95
Abnahme Messequipment	2	97
Fragebogen personenbezogene Daten II	2	99
Dank und Verabschiedung	1	100

## A.3 DETAILS ZU DEN ASSISTENZSYSTEMEN

### A.3.1 Aufbau der Hardware

In Abbildung A.2 ist das Zusammenspiel der einzelnen Hardwarekomponenten dargestellt. Weitere Informationen befinden sich in einer gesonderten Dokumentation (auf der DVD unter [/Projekt/Text/Eingabegeräte/Eingabegeräte.pdf](#)).

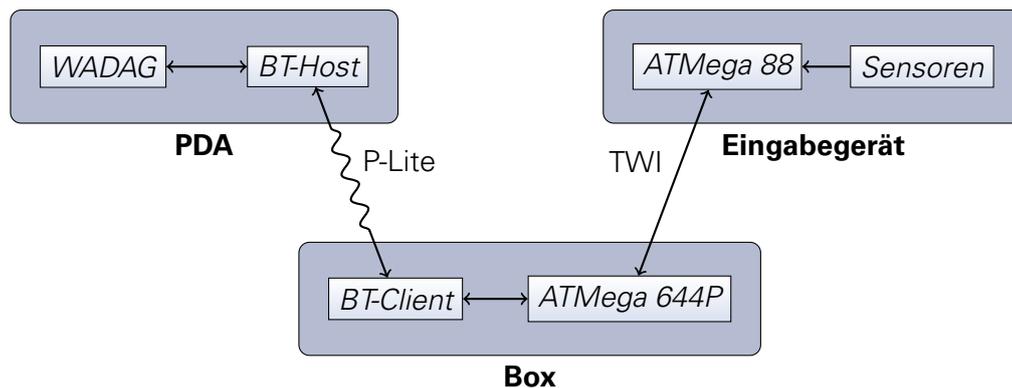


Abbildung A.2: Aufbau der Hardware

### A.3.2 Software-Details

Das Assistenzsystem für die Bearbeitung von textuellen Daten (siehe Screenshots in der Abbildung A.3) erlaubt eine Texteingabe über die angeschlossene Mini-Tastatur. Beim Login muss zuerst durch die Pfeiltasten die jeweilige Versuchspersonen-ID gewählt und mit **ENTER** bestätigt werden. Für die Texteingabe sind jeder Taste mehrere Buchstaben zugeordnet, die durch mehrmaliges Drücken der Taste nacheinander ausgewählt werden können. Nach Ablauf eines Timeouts oder Drücken einer anderen Taste wird der aktuell gewählte Buchstabe geschrieben. Zusätzlich stehen Tasten für den Wechsel zwischen Groß- und Kleinschreibung sowie Text- und Zahleneingabe zur Verfügung. Mit **ESC** ist ein Wechsel in das Sidebar-Menü möglich, in dem zur nächsten oder vorherigen Aufgabe gesprungen, der aktuelle Text gelöscht, die Hilfe aufgerufen, die Einstellungen zur Farbe und Textart geändert sowie sich ausgeloggt werden kann.

Die Bearbeitung der strukturierten Daten erfolgt durch einen Wechsel des aktuellen Fokus in einer Liste durch Drehen des Scrollrads. Beim Drücken der **OK**-Taste wählt man den selektierten Eintrag aus bzw. steigt in der gewählten Menüebene eine Stufe tiefer hinab. Das Drücken der **BACK**-Taste löst das Zurückgehen in die darüber liegende Menüebene aus. So muss beim Login zuerst durch Scrollen die VP-ID und danach die betreffende Durchgangsnummer ausgewählt werden. Dann kann durch durch mehrmaliges Bestätigen zur ersten

Aufgabe navigiert werden. Die Auswahl eines Aufgabenstatus muss erneut durch OK bestätigt werden. Daraufhin ändert sich die Farbe des Menüpunkts und zeigt damit den Zustand dieser Aufgabe an. Das Ausloggen geschieht in der obersten Menüebene durch Auswahl und Bestätigung des Menüpunkts *Logout*. Die Oberfläche ist auf den Screenshots in Abbildung A.4 zu sehen.

Der Start des Programms für abbildungsbasierte Daten erfolgt ebenfalls mit der Auswahl der VP-ID. Das geschieht durch das Nach-Oben- oder Nach-Unten-Bewegen des Analogsticks. Die Bestätigung erfolgt mit der OK-Taste. Danach muss auf dieselbe Weise der gewünschte Durchgang gewählt werden. Dieser startet mit der Fragestellung einer Aufgabe, die mit einem Tastendruck auf OK ausgeblendet werden kann. In der nun dargestellten Abbildung kann ein Zoomfenster durch Bewegen des Analogsticks verschoben werden. Durch Betätigen der Zoom-Taste, das Drücken des Analogsticks, zoomt man in den ausgewählten Bereich. Diesen kann man mit dem Analogstick bewegen oder wieder mit der Zoom-Taste herauszoomen. Eine Betätigung der OK-Taste führt zur nächsten Aufgabe, eine Betätigen der Back-Taste zur vorherigen. Die letzte Aufgabe wird nach einer zusätzlichen Bestätigung verlassen und man gelangt wieder in das Rundgangauswahlmenü. Die Oberfläche ist in der Abbildung A.5 mit einigen Screenshots dargestellt.



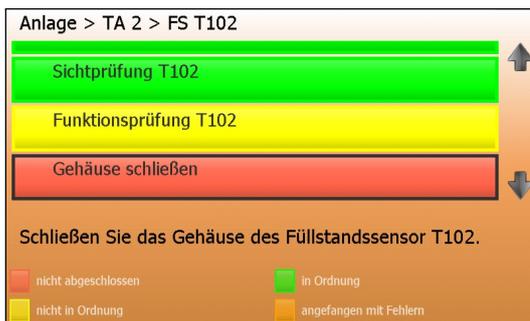
**Abbildung A.3:** Screenshots der Software für textuelle Daten



(a) Login



(b) Hauptmenü



(c) Aufgabe



(d) Bestätigung einer Auswahl

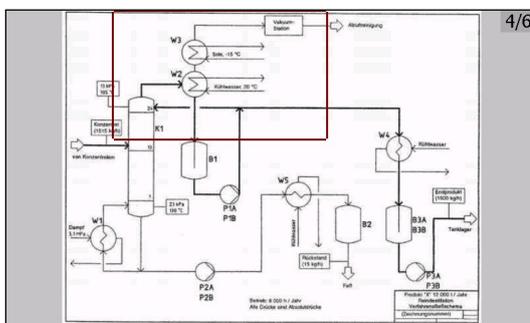
Abbildung A.4: Screenshots der Software für strukturierte Daten



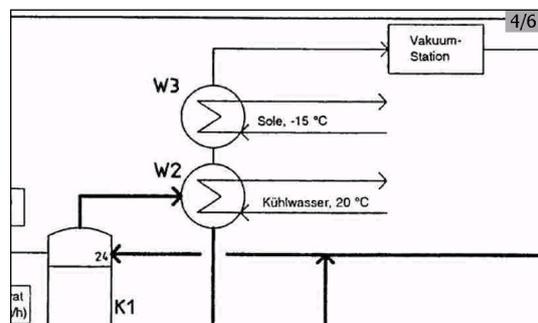
(a) Login



(b) Aufgabenbeschreibung



(c) Abbildung



(d) Zoom

Abbildung A.5: Screenshots der Software für abbildungsbasierte Daten

## A.4 IN FRAGEBÖGEN ERHOBENE FRAGEN

### A.4.1 Fragen des NASA-TLX

Folgende Fragen wurden in den drei NASA-TLX Fragebögen gestellt:

#### 1. Körperliche Anforderungen

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. Ziehen, Drücken, Drehen, Steuern, Aktivieren, ...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholbar oder mühselig?

gering ↔ hoch

#### 2. Geistige Anforderungen

Wie viel geistige Anstrengung war bei der Informationsaufnahme und der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen, ...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?

gering ↔ hoch

#### 3. Zeitliche Anforderungen

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt, mit dem Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Abfolge langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?

gering ↔ hoch

#### 4. Leistung

Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?

schlecht ↔ gut

#### 5. Anstrengung

Wie hart mussten sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?

gering ↔ hoch

#### 6. Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?

gering ↔ hoch

## A.4.2 Fragen zu personenbezogenen Daten

Die folgenden Fragen wurden zur Bestimmung der Eigenschaften der Stichprobe gestellt. Die Limesurvey-Daten, zum Importieren und Weiterverwenden, befinden sich auf der DVD in [/Projekt/Software/LimeSurvey/limesurvey\\_survey\\_arbeitsbeanspruchung.csv](#):

**VP** Bitte tragen Sie hier die zweistellige Versuchspersonen-ID ein, die Ihnen der Versuchsleiter zugewiesen hat. Bitte überprüfen Sie diesen Wert sehr sorgfältig.

→ numerischer Wert

**TR** Haben Sie in den Versuchen abgesetzte Eingabegeräte verwendet oder waren die Eingabegeräte direkt am Unterarm neben dem PDA angebracht?

→ Auswahl: abgesetztes Eingabegerät, Eingabegerät am PDA

**SEX** Sind Sie männlich oder weiblich?

→ Auswahl: weiblich, männlich

**AGE** Wieviel Jahre sind Sie alt?

→ numerischer Wert

**BA** Welche berufliche Ausrichtung besitzen Sie?

→ Auswahl: überhaupt nicht technisch, wenig technisch, mittelmäßig technisch, ziemlich technisch, sehr technisch, keine Angabe

**FSS** Ist Ihnen bekannt, dass Sie eine Rot-Grün-Sehschwäche oder eine andere Farbfehlsichtigkeit haben?

→ Auswahl: Rot-Grün-Sehschwäche, Blau-Gelb-Sehschwäche, keine Angabe

**LD** Ist Ihnen bekannt, dass Sie eine Lese-Rechtschreib-Schwäche oder eine Dyskalkulie haben?

→ Auswahl: Lese-Rechtschreib-Schwäche (Legasthenie), Dyskalkulie, Keine Angabe

**VERF** In welcher Verfassung befinden Sie sich momentan?

→ Auswahl: sehr gute Verfassung, gute Verfassung, mittlere Verfassung, schlechte Verfassung, sehr schlechte Verfassung

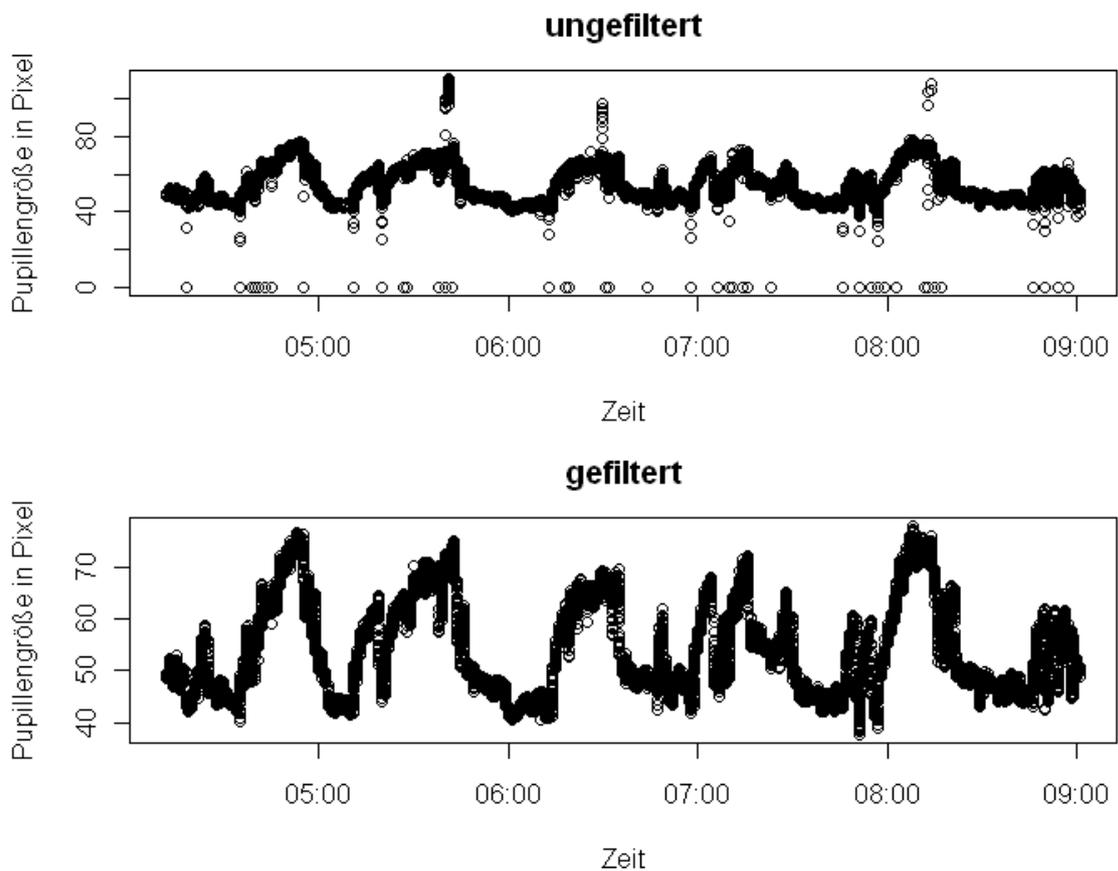
## A.5 KOSTENAUFSTELLUNG

**Tabelle A.5:** Kostenaufstellung

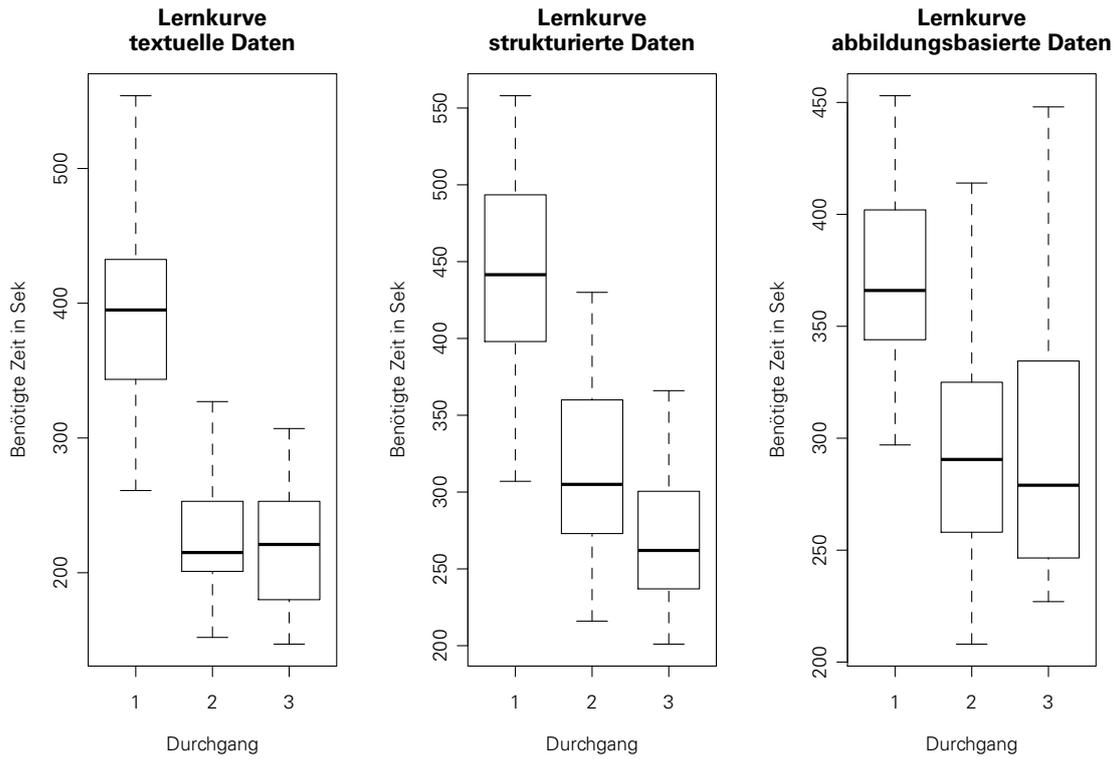
Datum	Händler	Anz.	Teil	Nr	Einzel	Gesamt	Total
09.07.10	HandyNow	1	Adpater USB-A/Stecker – USB-mini/Buchse	Z-BuchseA-miniUSB-Adapt- InLine	2.07 €	2.07 €	2.07 €
19.07.10	Conrad	2	3D-Joystick-Poti 10k	425664 - 62	1.43 €	2.86 €	
		2	Softtouch-Knopf	710047 - 62	0.52 €	1.04 €	3.90 €
20.07.10	ERNI	4	M8 Kabel einseitig konf., 4-polig, Feder gerade, 3 m PVC Versand	223767	5.49 €	21.94 €	26.89 €
21.07.10	M&M-Computer	2	Maus PS2	21633	3.90 €	7.80 €	7.80 €
20.07.10	Reichelt	4	Miniatur-Federleiste, Print, gerade, 2x 3-polig	MM FL 6G	0.34 €	1.36 €	
		4	ATMEGA AVR-RISC-Controller	ATMEGA 88-20 PU	3.15 €	12.60 €	
		4	IC-Sockel, 28-polig, superflach, gedreht, vergold.	GS 28P	0.35 €	1.40 €	
		4	Keramik-Resonator 8,00 MHz	CST 8,00	0.16 €	0.64 €	
		4	Metallschichtwiderstand 10,0 k-Ohm	METALL 10,0K	0.08 €	0.33 €	
		4	Keramik-Kondensator 100N	KERKO 100N	0.06 €	0.24 €	
		4	Elektrolytkondensator, 5x11mm, RM 2,0mm	RAD 10/35	0.04 €	0.16 €	
		4	LED, 3mm, Low Cost, rot	LED 3MM RT	0.06 €	0.24 €	
		4	Metallschichtwiderstand 100 Ohm	METALL 100	0.08 €	0.33 €	
		4	Kurzhubtaster 6x6mm, Höhe: 12,5mm, 12V, vert.	TASTER 3301D	0.14 €	0.56 €	
		1	2x40pol.-Stiftleiste, gerade, RM 2,54	SL 2X40G 2,54	0.27 €	0.27 €	
		1	Flachbandkabel AWG28, 10-pol., farb., 3m-Ring	AWG 28-10F 3M	2.70 €	2.70 €	
		4	Miniatur-Federleiste, Print, gerade, 2x 2-polig	MM FL 4G	0.25 €	1.00 €	
		4	Miniatur-Stiftleiste, Schneidklemm, 2x 2-polig	MM SL 4SK	0.23 €	0.92 €	
		4	Miniatur-Stiftleiste, Schneidklemm, 2x 3-polig Versand	MM SL 6SK	0.31 €	1.24 €	29.59 €
18.08.10	Conrad	1	Benzinschlauch	239364	0.95 €	0.95 €	
		1	Kunststoffgehäuse 72 x 26 x 50 mm	522635	3.07 €	3.07 €	
		1	Kunststoffgehäuse 101 x 60 x 26 mm	522635	2.45 €	2.45 €	
		1	Senkschrauben DIN964 M3x16	886705	1.49 €	1.49 €	
		1	Sechskantmutter verzinkt M3	886685	0.99 €	0.99 €	8.95 €
31.08.10	Thalia	6	Klemmbrett	4008110635408	2.99 €	17.94 €	17.94 €
02.09.10	UFA-Filmpalast	22	Kinogutschein		6.50 €	143.00 €	143.00 €
							<b>240.14 €</b>

# B DETAILS ZUR EVALUATIONSAUSWERTUNG

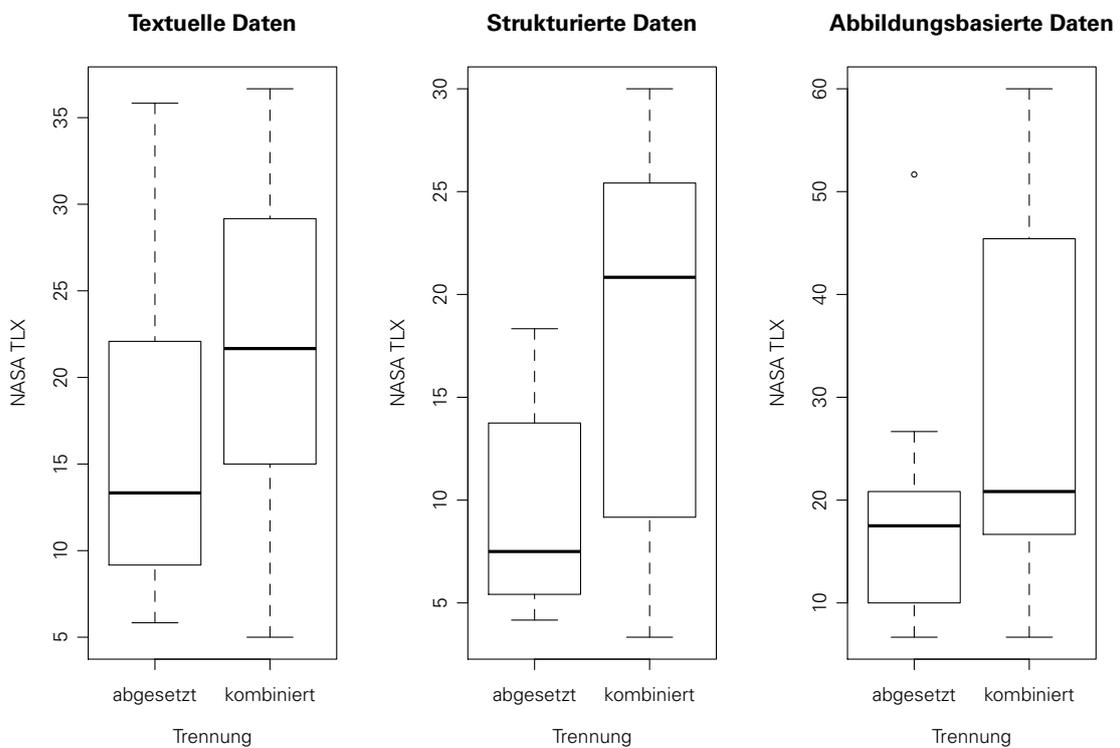
## B.1 GRAFIKEN ZUR EVALUATIONSAUSWERTUNG



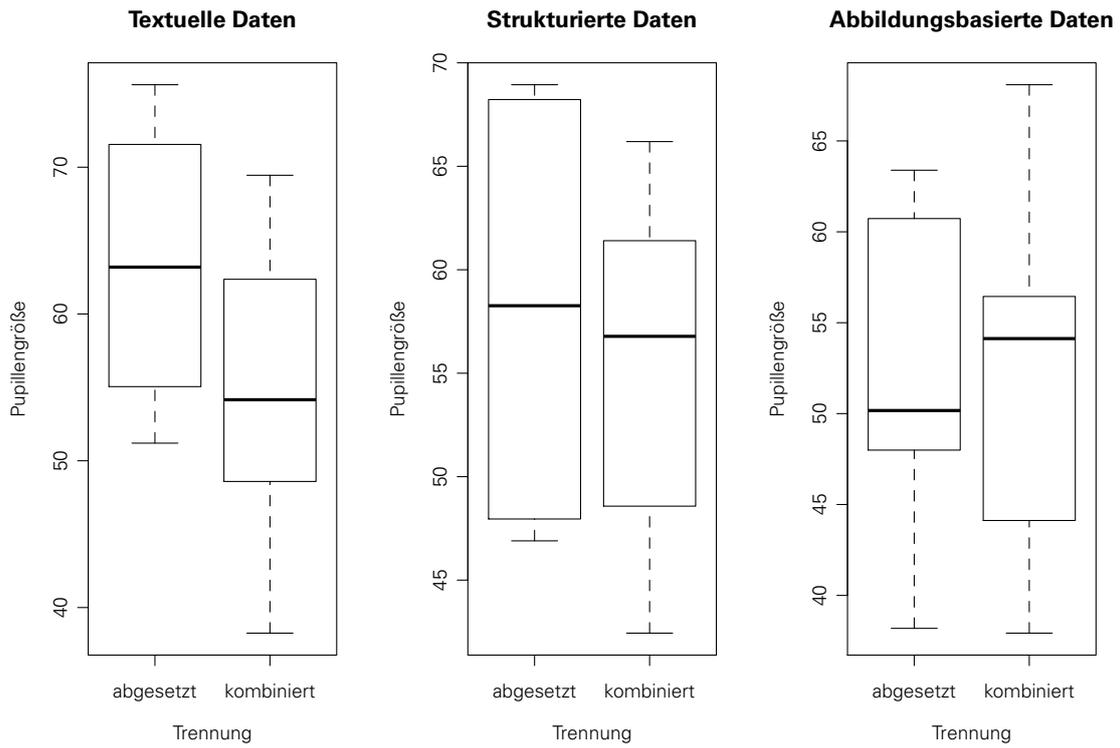
**Abbildung B.1:** Filtereffekt auf die Pupillengrößen-Daten bei VP 22 im DG 3 bei den abbildungsbasierten Daten



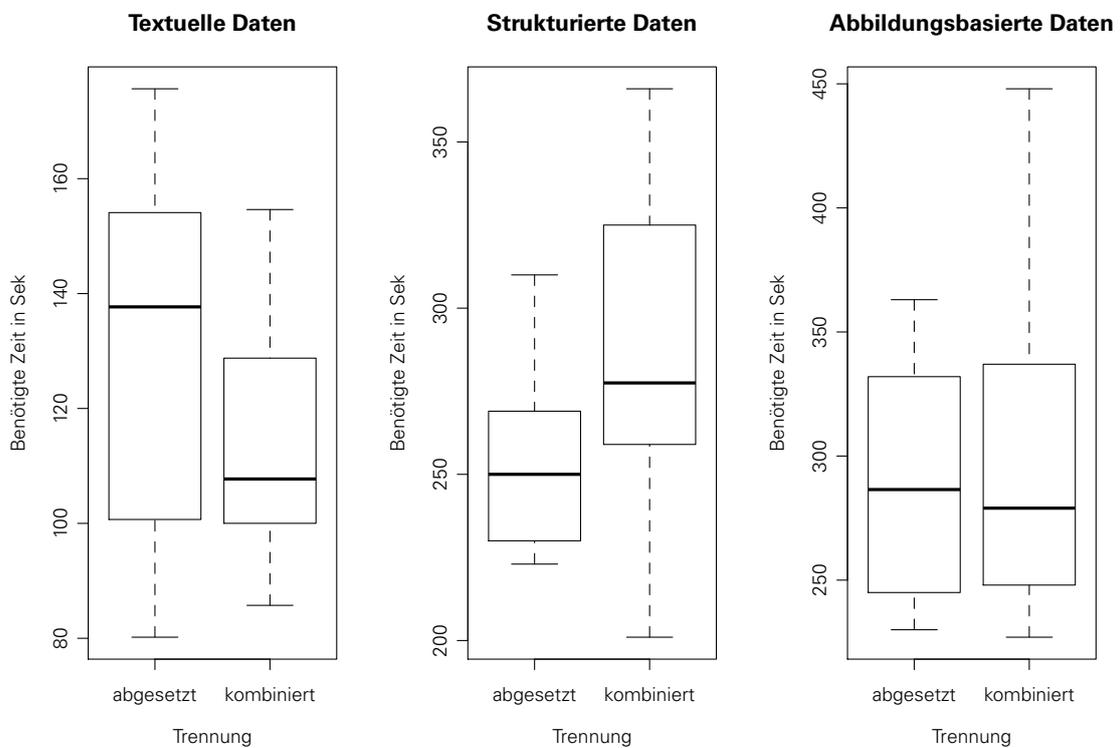
**Abbildung B.2:** Lernkurve



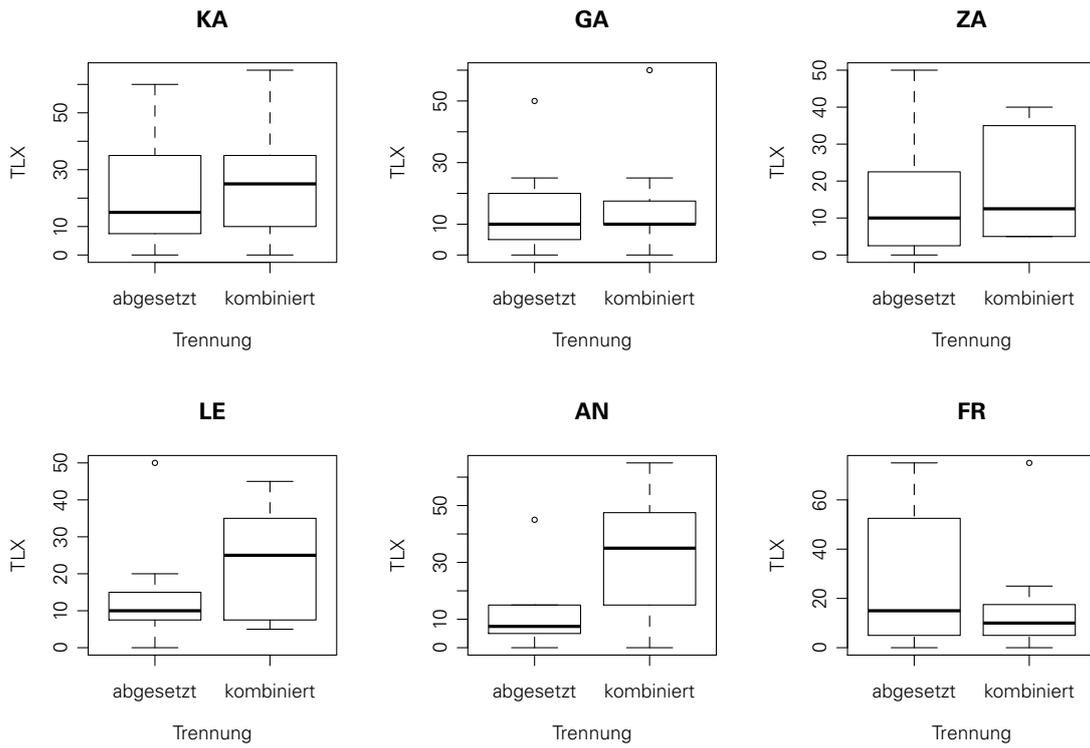
**Abbildung B.3:** NASA-TLX Daten



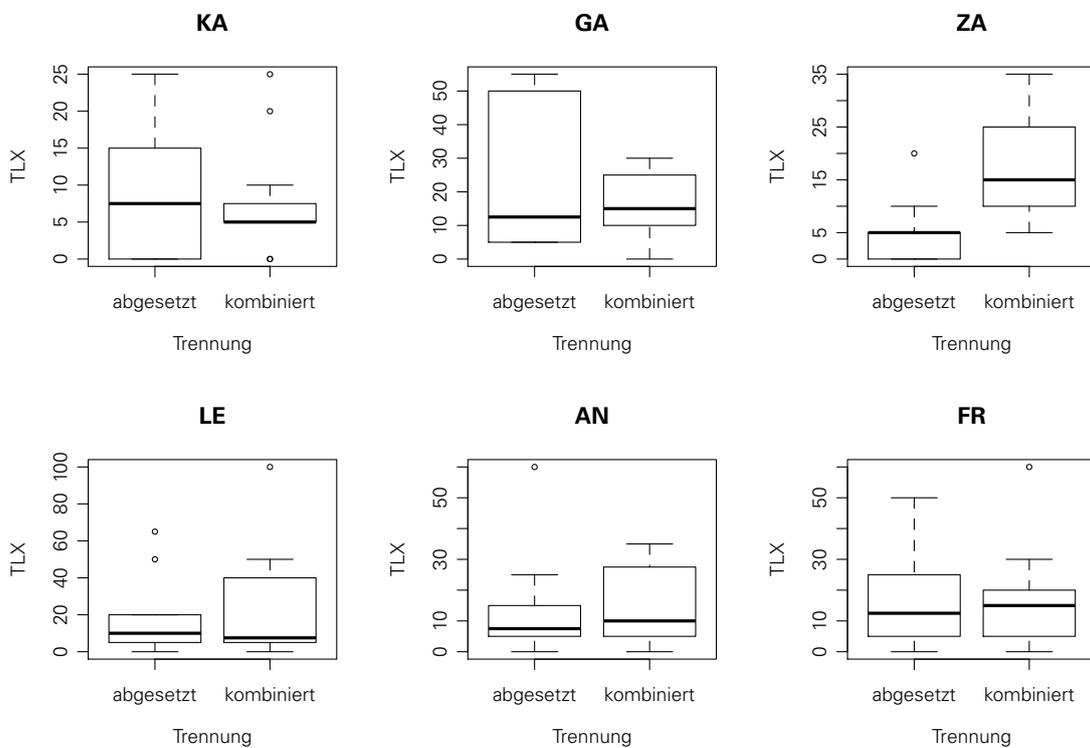
**Abbildung B.4:** Pupillengröße



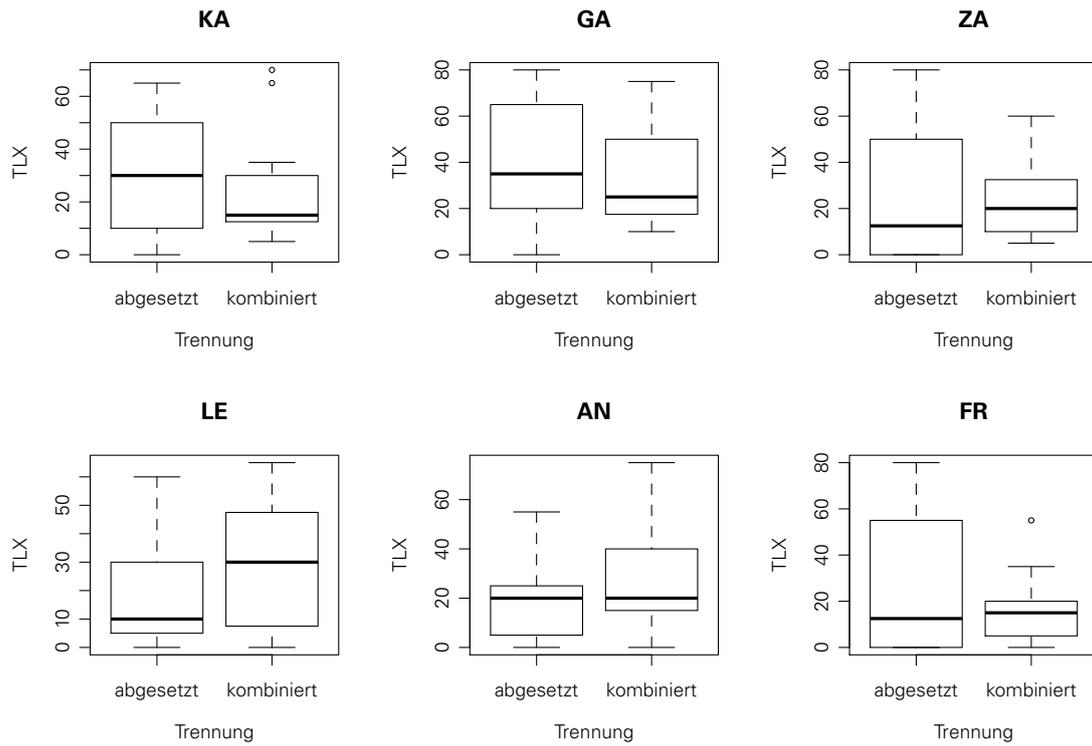
**Abbildung B.5:** Zeitdauer



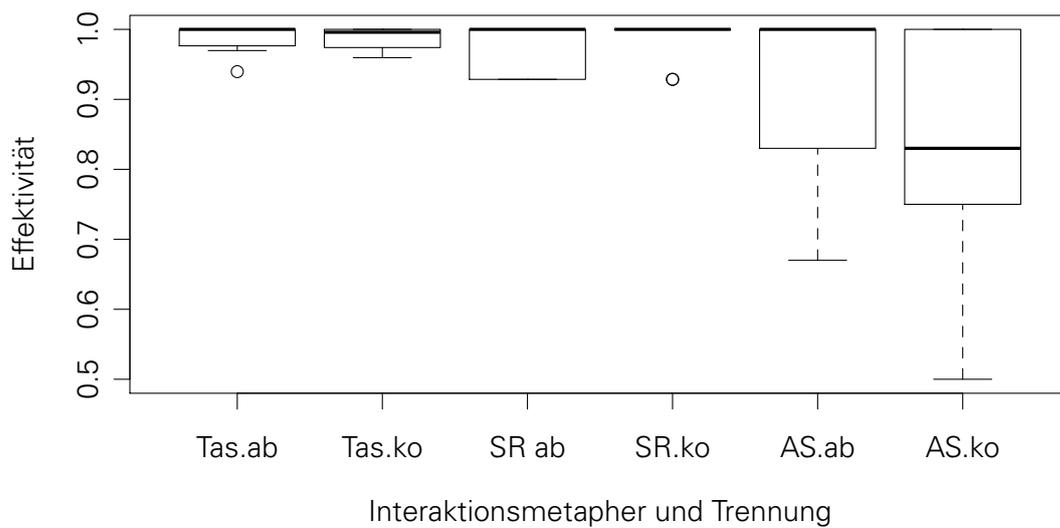
**Abbildung B.6:** NASA-TLX Bewertungen für textuelle Daten



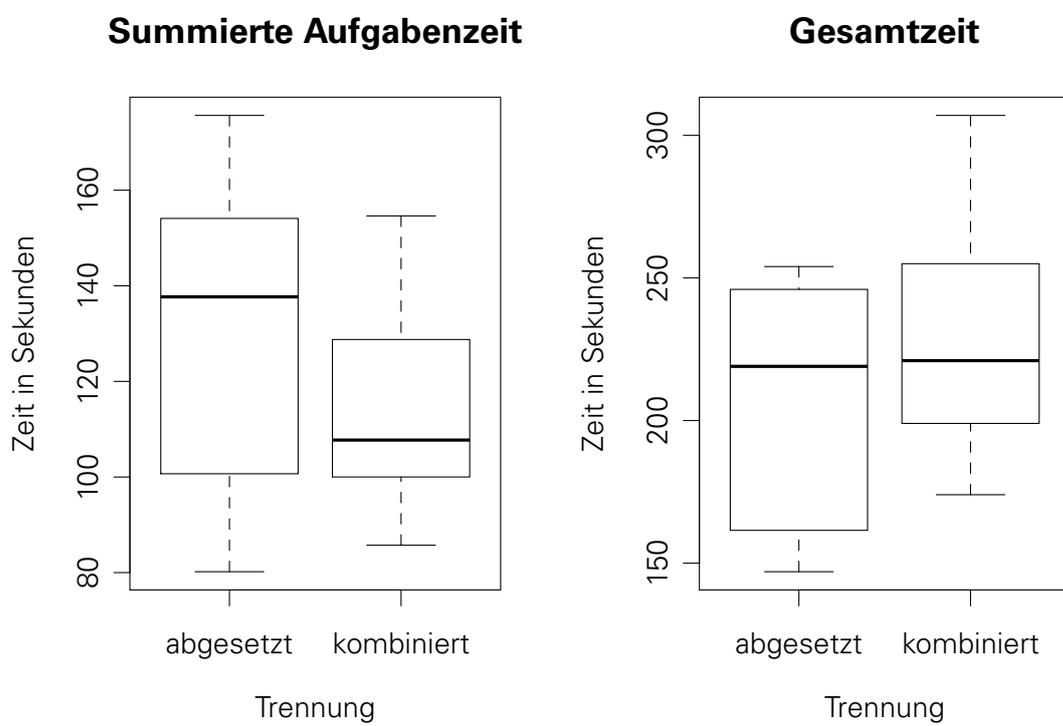
**Abbildung B.7:** NASA-TLX Bewertungen für strukturierte Daten



**Abbildung B.8:** NASA-TLX Bewertungen für abbildungsbasierte Daten



**Abbildung B.9:** Effektivität der Aufgabenbearbeitung



**Abbildung B.10:** Vergleich Gesamtzeit und summierte Aufgabenzeit bei textuellen Daten

## B.2 TABELLEN ZUR EVALUATIONSAUSWERTUNG

**Tabelle B.1:** Lernkurve

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max	IQR	sd
Text.DG1	261.00	343.50	395.00	389.58	432.50	554.00	89.00	74.11
Text.DG2	152.00	201.00	215.00	231.53	253.00	327.00	52.00	45.44
Text.DG3	147.00	184.75	221.00	218.94	252.75	307.00	68.00	43.45
Strukt.DG1	307.00	398.00	441.50	444.05	488.25	558.00	90.25	64.26
Strukt.DG2	216.00	273.00	305.00	315.32	360.00	430.00	87.00	63.28
Strukt.DG3	201.00	237.00	262.00	271.89	300.50	366.00	63.50	45.77
Abb.DG1	297.00	344.00	366.00	369.86	402.00	453.00	58.00	41.82
Abb.DG2	208.00	261.50	290.50	294.60	322.00	414.00	60.50	55.67
Abb.DG3	227.00	247.25	279.00	297.85	333.25	448.00	86.00	64.30

**Tabelle B.2:** NASA-TLX Daten

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max	IQR	sd
Text.ab	5.83	9.17	13.33	16.79	22.08	35.83	12.92	10.62
Text.ko	5.00	15.21	21.67	21.17	27.71	36.67	12.50	9.16
Strukt.ab	4.17	5.42	7.50	9.76	13.75	18.33	8.33	5.77
Strukt.ko	3.33	9.17	20.83	17.73	25.42	30.00	16.25	9.55
Abb.ab	6.67	10.00	17.50	20.00	20.83	51.67	10.83	13.58
Abb.ko	6.67	16.67	20.83	29.17	45.42	60.00	28.75	17.76

**Tabelle B.3:** Pupillenauswertung

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max	IQR	sd
Text.ab	51.20	56.98	63.19	63.30	69.52	75.62	12.54	10.57
Text.ko	38.25	48.59	54.16	54.74	62.36	69.45	13.78	10.08
Strukt.ab	46.90	48.48	58.26	58.09	67.87	68.94	19.38	11.75
Strukt.ko	42.44	48.58	56.78	55.35	61.40	66.19	12.83	8.30
Abb.ab	38.19	47.99	50.17	52.09	60.73	63.39	12.74	10.20
Abb.ko	37.92	44.12	54.13	51.76	56.44	68.09	12.32	10.01

**Tabelle B.4:** Zeitdauer

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max	IQR	sd
Text.ab	80.19	103.28	137.68	130.09	148.84	175.65	45.56	33.53
Text.ko	85.73	100.01	107.73	115.50	128.76	154.62	28.75	24.81
Strukt.ab	223.00	230.00	250.00	254.33	269.00	310.00	39.00	30.32
Strukt.ko	201.00	259.75	277.50	287.70	322.00	366.00	62.25	52.80
Abb.ab	230.00	249.25	286.50	291.80	327.75	363.00	78.50	50.20
Abb.ko	227.00	249.50	279.00	303.90	328.00	448.00	78.50	78.28

**Tabelle B.5:** NASA-TLX Bewertung für textuelle Daten

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max	IQR	sd
GA.ab	0.00	10.00	17.50	28.50	47.50	70.00	37.50	25.72
GA.ko	5.00	15.00	20.00	27.27	42.50	65.00	27.50	20.05
KA.ab	0.00	12.50	22.50	33.00	51.25	80.00	38.75	27.20
KA.ko	10.00	22.50	35.00	41.36	62.50	75.00	40.00	23.78
ZA.ab	0.00	1.25	12.50	24.50	43.75	80.00	42.50	28.81
ZA.ko	0.00	7.50	20.00	24.09	35.00	75.00	27.50	21.66
LE.ab	0.00	6.25	10.00	15.00	25.00	45.00	18.75	14.91
LE.ko	0.00	7.50	40.00	32.27	55.00	65.00	47.50	27.24
AN.ab	0.00	10.00	20.00	18.33	25.00	40.00	15.00	12.25
AN.ko	0.00	12.50	20.00	29.55	47.50	75.00	35.00	25.05
FR.ab	0.00	0.00	12.50	22.00	35.00	80.00	35.00	27.71
FR.ko	0.00	5.00	15.00	20.45	27.50	60.00	22.50	21.03

**Tabelle B.6:** NASA-TLX Bewertung für strukturierte Daten

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max	IQR	sd
GA.ab	0.00	10.00	17.50	28.50	47.50	70.00	37.50	25.72
GA.ko	5.00	15.00	20.00	27.27	42.50	65.00	27.50	20.05
KA.ab	0.00	12.50	22.50	33.00	51.25	80.00	38.75	27.20
KA.ko	10.00	22.50	35.00	41.36	62.50	75.00	40.00	23.78
ZA.ab	0.00	1.25	12.50	24.50	43.75	80.00	42.50	28.81
ZA.ko	0.00	7.50	20.00	24.09	35.00	75.00	27.50	21.66
LE.ab	0.00	6.25	10.00	15.00	25.00	45.00	18.75	14.91
LE.ko	0.00	7.50	40.00	32.27	55.00	65.00	47.50	27.24
AN.ab	0.00	10.00	20.00	18.33	25.00	40.00	15.00	12.25
AN.ko	0.00	12.50	20.00	29.55	47.50	75.00	35.00	25.05
FR.ab	0.00	0.00	12.50	22.00	35.00	80.00	35.00	27.71
FR.ko	0.00	5.00	15.00	20.45	27.50	60.00	22.50	21.03

**Tabelle B.7:** NASA-TLX Bewertung für abbildungs-basierte Daten

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max	IQR	sd
GA.ab	0.00	10.00	17.50	28.50	47.50	70.00	37.50	25.72
GA.ko	5.00	15.00	20.00	27.27	42.50	65.00	27.50	20.05
KA.ab	0.00	12.50	22.50	33.00	51.25	80.00	38.75	27.20
KA.ko	10.00	22.50	35.00	41.36	62.50	75.00	40.00	23.78
ZA.ab	0.00	1.25	12.50	24.50	43.75	80.00	42.50	28.81
ZA.ko	0.00	7.50	20.00	24.09	35.00	75.00	27.50	21.66
LE.ab	0.00	6.25	10.00	15.00	25.00	45.00	18.75	14.91
LE.ko	0.00	7.50	40.00	32.27	55.00	65.00	47.50	27.24
AN.ab	0.00	10.00	20.00	18.33	25.00	40.00	15.00	12.25
AN.ko	0.00	12.50	20.00	29.55	47.50	75.00	35.00	25.05
FR.ab	0.00	0.00	12.50	22.00	35.00	80.00	35.00	27.71
FR.ko	0.00	5.00	15.00	20.45	27.50	60.00	22.50	21.03

**Tabelle B.8:** Effektivität der Aufgabenbearbeitung

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max	IQR	sd
Tas.ab	0.94	0.98	1.00	0.99	1.00	1.00	0.02	0.02
Tas.ko	0.96	0.98	1.00	0.99	1.00	1.00	0.02	0.02
SR.ab	0.93	0.93	1.00	0.98	1.00	1.00	0.07	0.04
SR.ko	0.93	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.00	0.03
AS.ab	0.67	0.83	1.00	0.92	1.00	1.00	0.17	0.12
AS.ko	0.50	0.75	0.83	0.85	1.00	1.00	0.25	0.17

**Tabelle B.9:** Vergleich Gesamtzeit (GZ) und summierte Aufgabenzeit (AZ) bei textuellen Daten

	min	Q.25	median	mean	Q.75	max	IQR	sd
AZ.ab	80.19	103.28	137.68	130.09	148.84	175.65	45.56	33.53
AZ.ko	85.73	100.01	107.73	115.50	128.76	154.62	28.75	24.81
GZ.ab	147.00	165.25	219.00	206.75	243.00	254.00	77.75	44.06
GZ.ko	174.00	200.25	221.00	228.70	254.50	307.00	54.25	42.65

# C VERWENDETE WERKZEUGE

## C.1 PROGRAMMIERUNG

### C.1.1 PDA

- Microsoft .NET Framework 3.5 Service Pack 1
- .NET Compact Framework 3.5 Redistributable
- Windows Mobile 6 Professional SDK Refresh
- Microsoft Visual Studio 2008 Professional Edition
- Power Toys for .NET Compact Framework 3.5

Dabei sind alle Werkzeuge, bis auf Visual Studio, kostenlos erhältlich unter:

<http://www.microsoft.com/downloads/en/default.aspx>

### C.1.2 Microcontroller

- AVRStudio 4.18 SP2 (<http://www.atmel.com/>)
- WinAVR 20100110 (<http://winavr.sourceforge.net/>)
- AVRISP mkII (als ISP-Programmiergerät)
- Doxygen 1.7.1 (<http://www.doxygen.org>)

### **C.1.3 Auswertung**

- Python 2.7 (<http://www.python.org/>)
- R 2.10.1 (<http://www.r-project.org/>)
- cat aus dem Paket UnxUtils (<http://unxutils.sourceforge.net/>)
- iconv aus dem Paket GnuWin32 (<http://gnuwin32.sourceforge.net/>)

## **C.2 EVALUATION**

- LimeSurvey 1.87+ (<http://www.limesurvey.org/>)
- moreganize (<http://moreganize.com/>)

## **C.3 KONSTRUKTION**

- Eagle 5.10 (<http://www.cadsoft.de/>)
- SolidWorks 2008

## **C.4 TEXTVERARBEITUNG**

- MiKTeX 2.9 (<http://miktex.org/>)
- OpenOffice 3.2.1 (<http://de.openoffice.org/>)
- Microsoft Office 2010

## **C.5 SONSTIGES**

- MyMobileR für Screenshots vom PDA (<http://www.mymobiler.com/>)

# LITERATURVERZEICHNIS

- [AS09] ALEKSY, M. ; STIEGER, B.: Challenges in the Development of Mobile Applications in Industrial Field Service. In: *2009 International Conference on Network-Based Information Systems*, 2009, 586–591
- [Bac10] BACKHAUS, C.: *Usability-Engineering in der Medizintechnik*. Springer, 2010
- [Bel08] BELLER, S.: *Empirisch forschen lernen Konzepte, Methoden, Fallbeispiele, Tipps*. 2., überarb. Aufl. Bern : Huber, 2008
- [BNSS01] BORONOWSKY, M. ; NICOLAI, T. ; SCHLIEDER, C. ; SCHMIDT, A.: Winspect-A Case Study for Wearable Computing Supported Inspection Tasks. In: *iswc*, 2001, S. 163
- [Bor05] BORTZ, J.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler : mit 242 Tabellen*. 6. Auflage. Heidelberg : Springer, 2005
- [Bor07] BORTZ, J.: *Forschungsmethoden und Evaluation : für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. überarb. Aufl., [Nachdr.]. Berlin : Springer-Verl, 2007
- [BPBH06] BURMEISTER, R. ; POHL, C. ; BUBLITZ, S. ; HUGUES, P.: SNOW-A multimodal approach for mobile maintenance applications. In: *15th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, 2006. WETICE'06*, 2006, S. 131–136
- [Bub07] BUBB, H.: Ergonomische Arbeitsbewertung. In: *Arbeitsleben!: Arbeitsanalyse - Arbeitsgestaltung - Kompetenzentwicklung*. kassel university press GmbH, 2007, S. 152–177
- [Bür02] BÜRGY, C.: An Interaction Constraints Model for Mobile and Wearable Computer-Aided Engineering Systems in Industrial Applications. (2002)
- [Chi06] CHITTARO, L.: Visualizing information on mobile devices. In: *Computer* 39 (2006), Nr. 3, S. 40–45

- [CLSC05] CLAWSON, J. ; LYONS, K. ; STARNER, T. ; CLARKSON, E.: The impacts of limited visual feedback on mobile text entry for the twiddler and mini-qwerty keyboards. In: *Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2005. Proceedings, 2005*, S. 170–177
- [Coh88] COHEN, J.: *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Routledge, 1988
- [DIN10075-1] Norm DIN EN ISO 10075-1 November 2000. *Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 1: Allgemeines und Begriffe*
- [DIN10628] *Fließschemata für verfahrenstechnische Anlagen - Allgemeine Regeln*. März 2001
- [DIN11064-5] Norm DIN EN ISO 11064-5 Oktober 2008. *Ergonomische Gestaltung von Leitzentralen – Teil 5: Anzeigen und Stellteile*
- [DIN14915-1] Norm DIN EN ISO 14915-1 April 2003. *Software-Ergonomie für Multimedia-Benutzungsschnittstellen - Teil 1: Gestaltungsgrundsätze und Rahmenbedingungen*
- [DIN6385] Norm DIN EN ISO 6385 Mai 2004. *Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen*
- [DIN9241-1] Norm DIN EN ISO 9241-1 Februar 2002. *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten Teil 1: Allgemeine Einführung*
- [DIN9241-11] Norm DIN EN ISO 9241-11 Januar 1999. *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit - Leitsätze*
- [Fal02] FALLMAN, D.: Wear, point, and tilt: designing support for mobile service and maintenance in industrial settings. In: *Proceedings of the 4th conference on Designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques*. London, England : ACM, 2002, 293–302
- [Fal03] FALLMAN, D.: Enabling physical collaboration in industrial settings by designing for embodied interaction. In: *Proceedings of the Latin American conference on Human-computer interaction, 2003*, S. 51
- [GHRR09] GRAUBE, M. ; HEGEWALD, J. ; ROSENBAUM, L. ; ROSSMANN, P.: *Dokumentation Projektseminar M3I 2008/09*. unveröffentlichte Projektseminararbeit : Technische Universität Dresden, 2009
- [Gie03] GIESA, H.: *Die Bewertung der Verlässlichkeit von Mensch-Maschine-Systemen*. Düsseldorf : VDI-Verl., 2003
- [GLOLO9] GREEF, T. de ; LAFEVER, H. ; OOSTENDORP, H. van ; LINDENBERG, J.: Eye Movement as Indicators of Mental Workload to Trigger Adaptive Automation.

In: *Foundations of Augmented Cognition. Neuroergonomics and Operational Neuroscience*. 2009, S. 219–228

- [Hat01] HATSCHER, M.: Joy of use – Determinanten der Freude bei der Software-Nutzung. In: *Mensch & Computer* Bd. 1, 2001, S. 445–446
- [Hau07] HAUF, S.: Produktivität und Lohnkosten. In: *STATmagazin* (2007), Oktober, Nr. 31.10.2007
- [HCC07] HUANG, Y. ; CHANG, T. ; CHUANG, W.: An Interactive Handheld Device-Based Guide System Using Innovative Techniques. In: *Second International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2007)*, 2007, 217–217
- [Heg10] HEGEWALD, J.: *Empirische Untersuchung von Interaktionskonzepten für die Mensch-Maschine-Interaktion mit mobilen Endgeräten in Prozessanlagen*. Diplomarbeit : TU Dresden, 2010
- [Her99] HERING, K. P.: *Situationsabhängiges Verfahren zur standardisierten Messung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr: Literaturübersicht und empirische Felduntersuchung*, Universität zu Köln, Diss., 1999
- [Her09] HERCZEG, M.: *Software-Ergonomie Theorien, Modelle und Kriterien für gebrauchstaugliche interaktive Computersysteme*. 3., vollst. überarb. und erw. Aufl. München : Oldenbourg, 2009
- [HFC10] HFC GMBH: *Human Factors Consult GmbH*. 2010 <http://www.human-factors-consult.de>. – zuletzt abgerufen am 26.08.2010 um 17:38
- [HKS08] HARTUNG, J. ; KNAPP, G. ; SINHA, B. K.: *Statistical meta-analysis with applications*. Hoboken N.J. : Wiley, 2008
- [HM93] HALLBECK, M. S. ; MCMULLIN, D. L.: Maximal power grasp and three-jaw chuck pinch force as a function of wrist position, age, and glove type. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 11 (1993), Nr. 3, S. 195–206
- [HM08] HEINIG, N. ; MURAWSKI, L.: *Mobile Mensch-Maschine-Interaktion - SHIVA 3000*. unveröffentlichte Projektseminararbeit : TU Dresden, 2008
- [HS88] HART, S. G. ; STAVELAND, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: *Human mental workload* 1 (1988), S. 139–183
- [HTC10] HTC CORPORATION: *Technische Daten HTC Touch HD*. 2010 <http://www.htc.com/de/product/touchhd/specification.html>. – zuletzt abgerufen am 11.08.2010 um 09:54
- [JK03] JACOB, R. ; KARN, K.: Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In: *Mind* 2 (2003), Nr. 3, S. 4

- [Kom06] KOMSTA, L.: Processing data for outliers. In: *The Newsletter of the R Project* (2006), Mai, Nr. 6/2, S. 10–13
- [Kra03] KRAUSS, L.: *Entwicklung und Evaluation einer Methodik zur Untersuchung von Interaktionsgeräten für Maschinen- und Prozessbediensysteme mit grafischen Benutzungsoberflächen*, Lehrstuhl für Produktionsautomatisierung, Universität Kaiserslautern, Diss., 2003
- [Kra06] KRAISS, K.: *Advanced man-machine interaction : fundamentals and implementation*. Springer, 2006
- [LB03] LUMSDEN, J. ; BREWSTER, S.: A paradigm shift: alternative interaction techniques for use with mobile & wearable devices. In: *Proceedings of the 2003 conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative research*, 2003, S. 210
- [LHD<sup>+</sup>89] LYSAGHT, R. J. ; HILL, S. G. ; DICK, A. O. ; PLAMONDON, B. D. ; LINTON, P. M.: *Operator Workload: Comprehensive Review and Evaluation of Operator Workload Methodologies*. Juni 1989
- [LS07] LIND, M. ; SUNDVALL, H.: Time Estimation as a Measure of Mental Workload. In: *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. 2007, S. 359–365
- [Mah05] MAHLKE, S.: Vom Usability Testing zur Evaluation des Nutzererlebens. In: *Zustandserkennung und Systemgestaltung - 6. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*. Düsseldorf, Germany: VDI Verlag (2005), S. 251–254
- [Man98] MANZEY, D.: Psychophysiologie mentaler Beanspruchungen. In: *Ergebnisse und Anwendungen der Psychophysiologie*. Göttingen; Seattle : Hogrefe-Verlag für Psychologie, 1998, S. 799–864
- [Mar02] MARSHALL, S.: The Index of Cognitive Activity: measuring cognitive workload. In: *Proceedings of the IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants*, 2002, 7–5 - 7-9
- [MBE95] MORONEY, W. F. ; BIERS, D. W. ; EGGEMEIER, F. T.: Some Measurement and Methodological Considerations in the Application of Subjective Workload Measurement Techniques. In: *The International Journal of Aviation Psychology* 5 (1995), Nr. 1, S. 87
- [MS92] MUCKLER, F. A. ; SEVEN, S. A.: Selecting performance measures: 'Objective' versus 'subjective' measurement. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 34 (1992), Nr. 4, S. 441–455
- [Mui09] MUIGG, A.: *Implizites Workloadmanagement*. München, TU München, Diss., 2009

- [NESN02] NICKEL, P. ; EILERS, K. ; SEEHASE, L. ; NACHREINER, F.: Zur Reliabilität, Validität, Sensitivität und Diagnostizität von Herzfrequenz- und Herzfrequenzvariabilitätsmaßen als Indikatoren psychischer Beanspruchung. In: *Z Arb wiss* 56 (2002), S. 22–36
- [Nie94] NIELSEN, J.: *Usability engineering*. [Updated ed.]. San Francisco Calif. : Morgan Kaufmann Publishers, 1994
- [NJM<sup>+</sup>10] NEUBAUER, M. ; JUGERT, S. ; MODES, V. ; SCHOOB, A. ; STEINERT, D.: *Gestaltung und Implementierung von Benutzeroberflächen für kleine Anzeigen - Oberseminar WS 2009/10*. unveröffentlichte Projektseminararbeit : TU Dresden, 2010
- [O'B96] O'BRIEN, T.: *Handbook of human factors testing and evaluation*. Lawrence Erlbaum Associates, 1996
- [OE86] O'DONELL, R. ; EGGEMEIER, F.: Workload assessment methodology. In: *Handbook of perception and human performance*. 2 (1986), S. 42–1
- [PB05] POOLE, A. ; BALL, L. J.: Eye tracking in human-computer interaction and usability research: current status and future prospects. In: *Encyclopedia of human computer interaction* (2005), S. 211–219
- [Pet08] PETZOLD, B.: *Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage*. Herbert Utz Verlag, 2008
- [PKSH10] PALINKO, O. ; KUN, A. L. ; SHYROKOV, A. ; HEEMAN, P.: Estimating cognitive load using remote eye tracking in a driving simulator. In: *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications*, 2010, S. 141–144
- [REH93] ROUSE, W. B. ; EDWARDS, S. L. ; HAMMER, J. M.: Modeling the dynamics of mental workload and human performance in complex systems. In: *IEEE transactions on systems, man and cybernetics* 23 (1993), Nr. 6, S. 1662–1671
- [Rib03] RIBBACK, S.: *Psychophysiologische Untersuchung mentaler Beanspruchung in simulierten Mensch-Maschine-Interaktionen*, Universität Potsdam, Diss., August 2003
- [Röt10] RÖTTGER, S.: *Die Struktur menschlichen Verhaltens bei der Steuerung dynamischer Systeme*, TU Berlin, Diss., März 2010
- [RPCN08] RECARTE, M. ; PÉREZ, E. ; CONCHILLO, . ; NUNES, L.: Mental workload and visual impairment: differences between pupil, blink, and subjective rating. In: *The Spanish journal of psychology* 11 (2008), Nr. 2, S. 374–385
- [Sch02] SCHEUFLER, I.: Qualitative Bestimmung der situativen Fahrerbelastung. In: *38. BDP-Kongress für Verkehrspsychologie / Arbeitsgruppe 7: Verkehr und Information - Die Optimierung des Mobilitätssystems*, 2002, 18 Seiten

- [Sch09] SCHWALM, M.: *Pupillometrie als Methode zur Erfassung mentaler Beanspruchungen im automotiven Kontext*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Diss., 2009
- [Sei02] SEIFERT, K.: *Evaluation multimodaler Computer-Systeme in frühen Entwicklungsphasen*, TU Berlin, Diss., 2002
- [Sha07] SHARP, H.: *Interaction design : beyond human-computer interaction*. 2nd ed. Wiley, 2007
- [SLB10] SCHLICK, C. ; LUCZAK, H. ; BRUDER, R.: Arbeitsumgebung. In: *Arbeitswissenschaft*. 2010, S. 769–947
- [SW65] SHAPIRO, S. S. ; WILK, M. B.: An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). In: *Biometrika* 52 (1965), Dezember, Nr. 3/4, S. 591–611
- [TA08] TULLIS, T. ; ALBERT, B.: *Measuring the user experience : collecting, analyzing, and presenting usability metrics*. Elsevier/Morgan Kaufmann, 2008
- [Tim02] TIMPE, K.: *Mensch-Maschine-Systemtechnik : Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. 2. Aufl., Stand: Februar 2002. Düsseldorf : Symposium, 2002
- [URRS10] ULBRICHT, E. ; RANGE, M. ; RCIHTER, S. ; STECKLER, A.: *Gestaltung und Implementierung von Benutzeroberflächen für kleine Anzeigen - Oberseminar WS 2009/10*. unveröffentlichte Projektseminararbeit : TU Dresden, 2010
- [UZP09] URBAS, L. ; ZIEGLER, J. ; PFAB, M.: Mobile Mensch-Maschine-Interaktion für Betrieb und Wartung in der Prozessindustrie. In: *6. Berlin-Aachener Symposium Informationstechnologien für Entwicklung und Produktion in der Verfahrenstechnik*, 2009
- [VB99] VORBERG, D. ; BLANKENBERGER, S.: Die Auswahl statistischer Tests und Maße. In: *Psychologische Rundschau* 50 (1999), Nr. 3, 157–164. <http://www.psycontent.com/content/e6531752032700g2/>
- [VDI3699-1] Norm VDI/VDE 3699-1 Mai 2005. *Prozessführung mit Bildschirmen: Begriffe*
- [Vej01] VEJVODA, M.: Untersuchungen zur Beanspruchung des Kabinenpersonals auf transmeridianen Strecken. In: *DGLR-Bericht 2001-06 „Human Factors bei der Entwicklung von Fahrzeugen“* (2001), S. 57–63
- [Waa96] WAARD, D. de: *The measurement of drivers' mental workload*, University of Groningen, Diss., 1996
- [WDD07] WANG, L. ming ; DUFFY, V. ; DU, Y.: A Composite Measure for the Evaluation of Mental Workload. In: *Digital Human Modeling*. 2007, S. 460–466
- [Wic98] WICKENS, C.: *An introduction to human factors engineering*. New York : Longman, 1998

- [Wit01] WITTENBERG, C.: *Virtuelle Prozessvisualisierung am Beispiel eines verfahrenstechnischen Prozesses*, Gesamthochschule Kassel, Diss., 2001
- [Wit03] WITTENBERG, C.: A requirement analysis for the use of mobile devices in service and maintenance. In: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2003* Bd. 4, 2003, S. 4033 – 4038
- [Wit04] WITTENBERG, C.: Benutzeranforderungen für den Einsatz von mobilen Endgeräten in der Industrieautomatisierung. In: *at-Automatisierungstechnik/Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik* 52 (2004), Nr. 3/2004, S. 136–146
- [Wit08] WITTENBERG, C.: Is multimedia always the solution for human-machine interfaces? - a case study in the service & maintenance domain. In: *Systems, Signals and Image Processing, 2008. IWSSIP 2008. 15th International Conference on*, 2008, S. 393 –396
- [WK08] WITT, H. ; KLUGE, E. M.: Studying Input Device Performance: An End-User Driven Experiment in wearIT@work. In: *First International Conference on Advances in Computer-Human Interaction*, 2008, 9–15
- [Zie08] ZIEGLER, J.: *Entwurf, Realisierung und Test eines Frameworks zur Interaktion mobiler Benutzerendgeräte mit speziellen Bedienelementen*. Diplomarbeit : Technische Universität Dresden, 2008
- [Züh04] ZÜHLKE, D.: *Useware-Engineering für technische Systeme : mit 39 Tabellen*. Berlin [u.a.] : Springer, 2004

# SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tag dem Prüfungsausschuss der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik eingereichte Diplomarbeit zum Thema:

*Untersuchung des Einflusses räumlich getrennter Bedienelemente für mobile Assistenzsysteme auf die Arbeitsbeanspruchung des Nutzers*

vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Dresden, den 17.11.2010

Markus Graube