



Institut für Konstruktionstechnik  
und Technisches Design  
Universität Stuttgart  
Forschungs- und Lehrgebiet  
Technisches Design  
Prof. Dr.-Ing. T. Maier

Peter Schmid

## **Experimentelle Validierung von dreidimensionalen interaktiven Systemen in der Medizintechnik**

Bericht Nr. 715









# **Experimentelle Validierung von dreidimensionalen interaktiven Systemen in der Medizintechnik**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der  
Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Peter Schmid

geboren in Hechingen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter P. Pott

Tag der mündlichen Prüfung: 17.05.2023

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design

Universität Stuttgart

2023

**D 93**

**ISBN-13: 978-3-946924-22-7**

**Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design**  
**Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design**

Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon        +49 (0)711 685-66055

Telefax:      +49 (0)711 685-66219

E-Mail:        mail@iktd.uni-stuttgart.de

---

## Vorwort

„Die Neugier steht immer an erster Stelle des Problems,  
das gelöst werden will.“

(Galileo Galilaei)

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, der Universität Stuttgart.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier für das entgegengebrachte Vertrauen, die Betreuung der Arbeit und die wertvollen fachlichen Diskussionen, die einen entscheidenden Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter P. Pott für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für das äußerst angenehme Arbeitsumfeld und die sehr gute Zusammenarbeit. Mein Dank gilt auch allen Studierenden, wissenschaftlichen Hilfskräften sowie all jenen, die an den Probandenversuchen dieser Arbeit teilgenommen haben und somit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Matthias Sebastian Fischer M. Sc., Herrn Dr.-Ing. Daniel Holder, Herrn Ferdinand Patrick Langer M.Sc. sowie Herrn Dr.-Ing. Philipp Pomiersky und Herrn Karl-Egon Schmid für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mich in meiner Ausbildung und in meinem Werdegang stets bedingungslos unterstützt haben. Ich danke ihnen für ihre Motivation und ihren Rückhalt, um diese Arbeit erfolgreich fertigzustellen.



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abstract .....	XI
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung zu anderen Arbeiten .....	3
1.3 Struktur der Arbeit.....	5
2 Grundlagen .....	7
2.1 Interaktive Systeme .....	7
2.2 Berührungslose Interaktion .....	8
2.3 Mensch-Maschine-Interaktion.....	9
2.3.1 Mensch-Maschine-Schnittstelle.....	11
2.3.2 Virtuelle Stellteile als Anzeiger .....	12
2.4 Bewertung der Gebrauchstauglichkeit .....	14
2.5 Grundlagen der haptischen Wahrnehmung .....	15
2.5.1 Biologische Grundlagen der taktilen Wahrnehmung .....	17
2.5.2 Informationsverarbeitung des Menschen .....	22
2.6 Grundlagen des fokussierten Ultraschalls .....	24
3 Stand der Forschung und Technik .....	31
3.1 Handtrackingsysteme .....	31
3.2 Feedback im Raum.....	34
3.3 Zusammenfassung der relevanten Forschungsarbeiten.....	39
4 Herleitung der Versuchsparameter .....	42
4.1 Auswahl des Bedienelements im Kontext eines medizintechnischen Anwendungsfalls.....	42
4.2 Ableitung von Informationsinhalten und taktiler Darstellungsmöglich- keiten eines Sliders im Raum .....	45
4.3 Eingrenzung der taktil veränderlichen Gestaltungsparameter hinsicht- lich der Übermittlung taktiler Informationen .....	46
4.3.1 Bedienungsrichtung des Sliders.....	47
4.3.2 Verlaufsart der taktilen Skala .....	48
4.3.3 Taktile Kodierungsmöglichkeiten.....	49
4.3.4 Eingrenzung der taktilen Kodierungsmöglichkeiten.....	55

5	Versuchsplanung zur Prüfung der Versuchsparameter .....	60
5.1	Aufbau des virtuellen Sliders mit taktilem Feedback im Raum.....	60
5.1.1	Virtueller Slider .....	60
5.1.2	Taktiler Feedback im Raum .....	62
5.2	Versuchsaufbau .....	64
5.2.1	Klassifizierung der Probanden.....	65
5.2.1.1	Messung der Zweipunktdiskriminationsschwelle.....	66
5.2.1.2	Semmes-Weinstein Monofilament-Test .....	66
5.2.1.3	Vibrationsempfinden nach Rydel-Seiffer .....	67
5.2.1.4	Zweihand Koordination .....	67
5.2.2	Beschreibung Hauptaufgabe .....	68
5.2.3	Beschreibung Nebenaufgabe .....	70
5.3	Fragebogenentwicklung .....	71
6	Experimentelle Vorstudien.....	74
6.1	Bedienung mit dominanter und nicht dominanter Hand .....	74
6.2	Einfluss des Neigungswinkels des Ultraschallarrays auf die Ausführung der Stellaufgabe.....	78
7	Grundlagenorientierte Untersuchung des taktilen Feedbacks im Raum.....	85
7.1	Versuchsreihe 1: Erfassung von Wahrnehmungsschwellwerten.....	85
7.1.1	Hypothesen .....	85
7.1.2	Untersuchungsparameter .....	86
7.1.3	Versuchsablauf.....	89
7.1.4	Probandenkollektiv .....	91
7.1.5	Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung.....	93
7.1.6	Zusammenfassung der Ergebnisse und Überprüfung der Hypothesen .....	113
7.2	Versuchsreihe 2: Erkennung von Informationsinhalten .....	120
7.2.1	Hypothesen .....	120
7.2.2	Untersuchungsparameter .....	122
7.2.3	Versuchsaufbau und Versuchsablauf .....	125
7.2.4	Probandenkollektiv .....	127
7.2.5	Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung.....	129
7.2.6	Diskussion der Ergebnisse und Überprüfung der Hypothesen .	145
7.3	Evaluationsstudie: Visuelles vs. visuell und taktiler Feedback .....	152
7.3.1	Hypothese .....	153
7.3.2	Untersuchungsparameter .....	154
7.3.3	Versuchsaufbau und Versuchsablauf .....	155

---

7.3.4	Probandenkollektiv .....	157
7.3.5	Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung.....	159
7.3.6	Diskussion der Ergebnisse und Überprüfung der Hypothesen..	162
7.4	Fazit aus den drei Versuchsreihen zur Übertragung von taktilen Informationen bei der Handgestensteuerung.....	166
8	Zusammenfassung der Arbeit .....	170
9	Ausblick.....	174
	Literaturverzeichnis .....	177
	Anhang .....	187
A.1	Vorstudie - Inferenzstatistische Daten Bedienung mit dominanter und nicht dominanter Hand.....	187
A.2	Vorstudie - Inferenzstatistische Daten Neigungswinkel .....	188
A.3	Versuchsreihe VR01 - Inferenzstatistische Daten.....	189
A.4	Versuchsreihe VR02 - Inferenzstatistische Daten.....	202

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
a	asymmetrische Abstandsänderung
akad.	akademisch
A	Anzeiger
AG	Arbeitsgedächtnis
AM	Amplitudenmodulation
AR	Augmented Reality
Bd.	Band
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
d	Distance (Skalenabstand)
dB	Dezibel
df	Freiheitsgrade; englisch: degrees of freedom
DIN	Deutsches Institut für Normung
e.V.	eingetragener Verein
ebd.	ebenda
et al.	lateinisch: et alii; deutsch: und andere
etc.	et cetera
f., ff.	folgende (bei Literaturangaben)
gest.	gestisch
griech.	griechisch
H <sub>n</sub>	Nullhypothese
Hz	Hertz
I	Intensität
IG	Interfacegestalt



<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
IKTD	Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
I+	Intensitätssprung in positiver Richtung
I-	Intensitätssprung in negativer Richtung
ISO	International Organization for Standardization
Kap.	Kapitel
KG	Kurzzeitgedächtnis
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
lat.	lateinisch
LZG	Langzeitgedächtnis
max.	maximal
MHz	Megahertz
min.	minimal
mim.	mimisch
mm	Millimeter
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
n	Anzahl der Stichproben
n.a.	not available
N	Anzahl Ultraschallwandler
NUI	Natural User Interface
OP	Operation
p	Signifikanzwert
PG	Produktgestalt
PR	Prozentrang
r	Effektstärke

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
RA I	schnell adaptierende Sensoren, Typ I
RA II	schnell adaptierende Sensoren, Typ II
S	Stellteil
s	Stellweg
s	symmetrische Abstandsänderung
S.	Seite
SA I	langsam adaptierende Sensoren, Typ I
SA II	langsam adaptierende Sensoren, Typ II
SD	Standard Deviation
SG	sensorisches Gedächtnis
Sig. Anp.	angepasste Signifikanz
STM	spatiotemporale Modulation
UZG	Ultrakurzzeitgedächtnis
V	Verhalten
VDE	Verband der Elektrotechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VR	Virtual Reality
VR	Versuchsreihe
VR01	Versuchsreihe 1
VR02	Versuchsreihe 2
VR03	Versuchsreihe 3
W	Wahrnehmung
W	Wirkteil
WTS	Wiener Testsystem
$x_i$	Skalenabstand

Abkürzung	Bezeichnung
z	Teststatistik
z.B.	zum Beispiel

### Formelzeichen

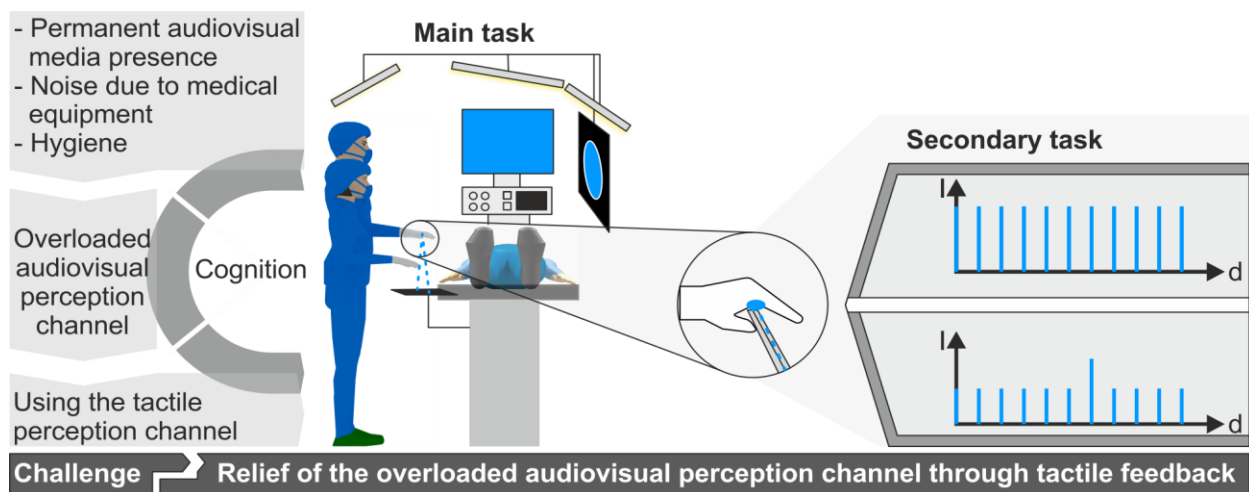
Symbol	Einheit	Erläuterung
A	m <sup>2</sup>	Membranfläche
$\alpha$	°	Neigungswinkel des Ultraschallarrays
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
dA	m <sup>2</sup>	Flächenelement
f	Hz	Frequenz
$\vartheta$	°	Neigung von r zur z-Achse
$J_0(x)$		Bessel-Funktion 0. Ordnung
k		Wellenzahl
$\underline{p}$	Pa	Schalldruck
$q_0$	m <sup>3</sup> /s	Schallflussamplitude
$\rho$	m	Abstand zum Flächenelement dA
$\rho_0$	Ws/m <sup>3</sup>	Schalldichte
R	m	Durchmesser Kolbenstrahler
r	m	Abstand Mittelpunkt Kolbenstrahler zu Punkt M
r'	m	Abstand vom Flächenelement zum Punkt M
t	s	Zeit
v	m/s	Schallschnelle
$\underline{\phi}$	m/s	Geschwindigkeitspotenzial
$\varphi$		Phasensprung
$\psi$	°	Winkel
$\emptyset$		Durchschnitt

**Anmerkung**

In dieser Arbeit wird im Interesse einer besseren Lesbarkeit nicht ausdrücklich in geschlechtsspezifische Personenbezeichnungen differenziert. Es soll an dieser Stelle aber darauf hingewiesen werden, dass gewählte männliche Formen stets adäquate weibliche und diverse Formen gleichberechtigt einschließen.

## Abstract

Interaction with medical equipment during a medical procedure in the operating room poses great challenges for the surgeon. During a medical procedure, the operation and control of medical equipment are carried out under constant compliance with strict hygiene regulations. Therefore, non-contact control of medical devices in the operating room offers essential advantages [HURSTEL & BECHMANN 2019]. However, touchless forms of interaction such as gaze, hand, and voice gesture control are poorly accepted for practical use in medicine due to insufficient feedback. Current gesture control systems usually only output audiovisual feedback about a function's selection. The permanent audiovisual media presence leads to an overload of human perception and information processing capability. Figure 1 gives an overview of the current heavy load on the audiovisual perception channel of surgeons and shows a potential solution for relieving the audiovisual perception channel by means of virtual controls with tactile feedback.



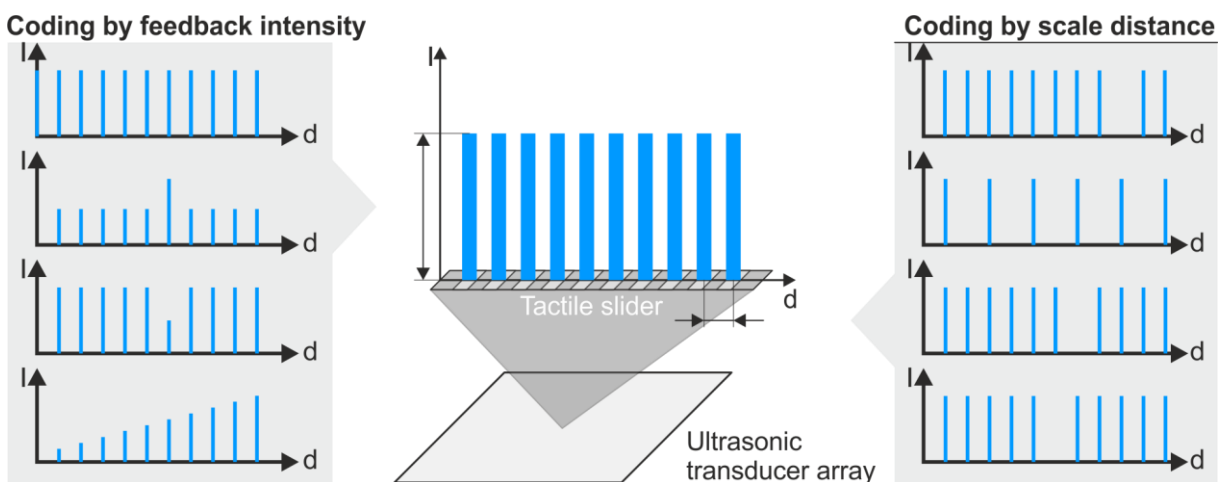
**Figure 1:** Visualization of the investigation target for the use of tactile feedback in the operating room

Studies by STEVENSON ET AL. [2013] verify a very high permanent noise level in current operating rooms, which makes concentrated work very difficult. Audiovisual feedback, as provided by current gesture control systems, consequently contributes to an increase in noise levels and does not relieve the surgeon's already heavily loaded audiovisual perception channel (see Figure 1). Therefore, the frequent request of surgeons results in haptic feedback similar to the operation via a physical control element, where direct feedback about the selection of a function is given. The aim of this work is to develop a human-machine interface that ensures safe, intuitive, and efficient operation without interfering with the surgeon's work. For this purpose, the advantage of contamination-free operation of gesture control is combined with tactile feedback based on ultrasonic waves (see Figure 1). Furthermore, another advantage of tactile information transmission is that

this perception channel is often underutilised. The basics related to this work are explained in Chapter 2. First, the definitions of non-contact HMI, usability, and the control element as an indicator are given. The chapter also deals with the basics of tactile perception and information processing, as well as the focusing of ultrasonic waves.

In Chapter 3, the state of the art and current research are discussed. First, various techniques and systems for the acquisition of hand-finger gestures are presented before the leap motion module used in the thesis is introduced. Also presented are various options and research projects for generating tactile feedback in the air, such as tactile gloves, focused air vortices, lasers, or ultrasonic waves. Currently, the use of focused ultrasonic waves is the most promising approach to generating tactile feedback in the air for hand gesture control. Therefore, this approach is pursued in the present work, and a test bench for investigating tactile feedback is built using the device STRATOS Explore from Ultrahaptics.

A virtual slider in the horizontal direction, which was provided as a scale with tactile snap-in points, was selected as the control element for this investigation (see Figure 2). Through the snap-in points of this tactile scale, information about the current system state can be transmitted to the user. For the optimal design of the feedback of the tactile scale, the tactile information contents for the transmission of information were derived, and the tactile variable parameters were analysed for this purpose. Based on this analysis, the feedback intensity as well as the scale distance of the individual snap-in points could be used to transmit information about the tactile slider (see Figure 2).



**Figure 2:** Schematic visualisation of tactile scales and coding feature possibilities for the transfer of information through the tactile perception channel

In the process, the range of the feedback intensity and distance of snap-in points as well as the perception of differences along the tactile scale ensure that the users achieve high adjustment accuracy and feel comfortable. The examination scenario is composed of a main task and a secondary task, especially a minimally invasive surgical scenario and

the parallel execution of an adjustment task (see Figure 1). The main task of the subjects is to perform a precision task on a medical phantom and to adjust in parallel a scale value given by the investigator.

Within the scope of three series of experiments, the potential of feedback intensity and scale distance for information transfer is investigated. The focus of the first series of experiments VR01 is on the optimal scale structure of the tactile scale for effective, efficient, and satisfactory execution of the adjustment task. For this purpose, 25 different experimental features are evaluated with respect to feedback intensity and scale distance on 31 subjects. According to the results, a scale distance between two snap-in points of 30.00 mm and a sound intensity of 1124 Pa are the most suitable basic parameters for the structure of a tactile scale for the execution of the main and secondary tasks. The limitation of the perception threshold between two snap-in points is at a scale distance of 30.00 mm with a feedback intensity of 674.4 Pa.

Based on this investigation, the difference threshold, which is important for the transmission of information about the tactile feedback, is investigated in test series VR02. Information about the coding feature of a tactile scale, e.g., a middle or a preferred value, can be transmitted by a sudden decrease or increase in intensity at a defined snap-in point. Furthermore, information can be provided by a sudden increase in the scale distance between two snap-in points. The sudden change of the feedback intensity as well as the sudden increase of the scale distance are done according to DIN 323-1 [1974]. Using these coding options, 20 experimental features for coding information are constructed and investigated using subject trials ( $n = 30$ ). For tactile information coding of a horizontal slider, encoding via a symmetrical sudden increase of the scale distance between two snap-in points from 30.00 mm to 75.00 mm ( $\varphi = 2.50$ ) is most suitable. This corresponds to the maximum value in the context of this investigation. The difference threshold for perceiving a change in the scale distance is reached at a level according to DIN 323-1 [1974] of  $\varphi = 1.60$  (48.00 mm).

In the final series of experiments VR03, it is investigated whether supporting tactile feedback contributed to a more effective and efficient performance of the main and secondary tasks than purely visual feedback on a screen. The aim is to adjust scale positions given by the investigator once with supportive tactile feedback and once without tactile feedback, only via visual feedback. For this purpose, the best-scoring test features from VR01 and VR02 are randomly tested with  $n = 15$  subjects. Based on this study, it can be shown that tactile feedback supports subjects in performing the main and secondary tasks effectively and efficiently.

In conclusion, the results reveal great potential for tactile feedback in order to transmit information by hand gesture control in the air. It should also be taken into account that this work examines purely discrete tactile feedback. Since very high recognition rates are already achieved here, investigations with higher intensity levels should be conducted. Especially, the combined presentation of tactile feedback with visual and acoustic stimuli opens up further promising application possibilities.



# 1 Einleitung

Mehr als 8.000 Jahre alt sind Knochenfunde, die Anzeichen von operativen Eingriffen vorweisen [SCHMITT & BEERES 2004]. Für diese Eingriffe waren und sind chirurgische Instrumente bis heute unerlässlich. Bereits zu Zeiten Hippokrates, welcher als Begründer der klassischen Chirurgie gilt, waren über 200 Instrumente an einem chirurgischen Eingriff beteiligt [SCHMITT & BEERES 2004, SIGELEN 2018]. Bis ins 19. Jahrhundert wurden Instrumente sehr aufwendig und aus edlen Materialien gefertigt und erfüllten nur eine Funktion. Mit der Erweiterung des Operationsfeldes und immer aufwendigeren Operationen (OP) wurden zahlreiche Spezialinstrumente entwickelt [SIGELEN 2018]. Weitere Meilensteine ergeben sich aus dem Einzug der Hochfrequenz-Chirurgie in den Operationssaal hin zur Integration von Computern. Mit der Erweiterung des Funktionsumfangs und der damit einhergehenden Steigerung der Komplexität nimmt der Dialogbetrieb zwischen Mensch und Maschine zu. Der Operationssaal der Zukunft ist geprägt von großen Bildschirmen und neuen Mensch-Maschine-Schnittstellen, den sogenannten Natural User Interfaces (NUI) [NORMAN 2010]. In Anbetracht von immer strengeren Hygienestandards als auch einer höheren Lärmbelastung im Operationssaal (vgl. Bild 1.1) versprechen Natural User Interfaces wie beispielsweise die Gestensteuerung eine Entlastung des gesamten Operationsteams. Die vorliegende Arbeit untersucht einen Ansatz zur Integration eines taktilen Feedbacks in die Handgestensteuerung zur Entlastung des audiovisuellen Wahrnehmungskanals des Chirurgen, um ein konzentriertes Arbeiten auch unter hoher Stressbelastung zu ermöglichen. Im ersten Kapitel wird die der Arbeit zu Grunde liegende Motivation (Kapitel 1.1) erörtert. Ebenfalls werden die Zielsetzung dieser Arbeit und die Abgrenzung zu anderen Arbeiten (Kapitel 1.2) dargelegt, bevor im abschließenden Unterkapitel die Struktur der Arbeit (Kapitel 1.3) vorgestellt wird.

## 1.1 Motivation

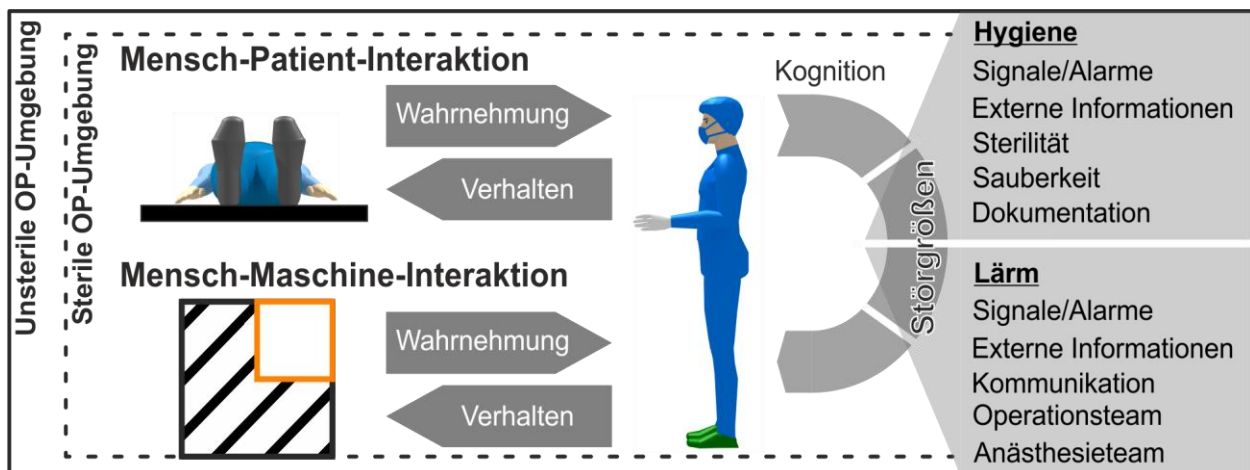
Bei einem medizinischen Eingriff stellt die Interaktion zwischen Operateur, Patient und Maschine einen sehr komplexen Prozess dar, welcher stark von Umweltfaktoren, wie beispielsweise Hygienebedingungen oder Lärm, beeinflusst wird (vgl. Bild 1.1). Der Fokus dieser Arbeit liegt im Folgenden auf der Interaktion zwischen Mensch und Maschine sowie auf den Umwelteinflüssen Lärm und Hygiene im Operationssaal. Die Interaktion mit medizinischen Geräten im OP erfolgt meist durch direkte Manipulation. Das bedeutet zur Einstellung der notwendigen Parameter ist eine direkte Berührung des Stellteils, sei es als reelles (Taster, Drehknopf etc.) oder virtuelles Stellteil (Touch-

Bedienelement), notwendig. Ein essentielles Problem besteht dabei in der Verunreinigung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, beziehungsweise der Stellteile der Eingabegeräte durch Körperflüssigkeiten und Gewebematerial des Patienten. LEINER & CHOJECKI [2008, S. 75] sprechen hier vom König-Midas-Effekt: „*Die Unsterilität eines berührten Objekts überträgt sich auf den Berührenden.*“ Folglich resultiert bei einer direkten Eingabe eine Kontamination der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die Interaktion, speziell die Bedienung von medizinischen Geräten wird dadurch eingeschränkt bzw. erschwert [LEINER & CHOJECKI 2008, HURSTEL & BECHMANN 2019]. Zur Platzierung von Benutzungsschnittstellen in der sterilen OP-Umgebung (siehe Bild 1.1) werden diese meist mit transparenten sterilen Einweghüllen überzogen, welche die Bedienung jedoch einschränken und die Nutzerakzeptanz merklich verringern [LEINER & CHOJECKI 2008]. Alternativ kann die Eingabe durch zusätzliches OP-Personal im unsterilen Bereich erfolgen. Das Problem dieser Lösung liegt in der Informationsweitergabe, da für die eingebende Person die Möglichkeit des Informationsverlusts besteht [HURSTEL & BECHMANN 2019, LEINER & CHOJECKI 2008]. Erfolgt eine direkte Interaktion des Operateurs im unsterilen Bereich müssen dessen Hände anschließend erneut sterilisiert werden [DRESSLER ET AL. 2011]. Abhilfe für diese Probleme kann nach HURSTEL & BECHMANN [2019] die Sprach- oder Gestenbedienung schaffen, da durch diese Technik ein direkter Kontakt mit unsterilen Eingabemedien unterbunden wird.

Ein weiteres Problem derzeitiger medizinischer Geräte stellt die Rückmeldung über akustische Signale und der damit verbundene Lärm dar (vgl. Bild 1.1). Die Lärmbelastung in Krankenhäusern ist ein internationales Thema und führt Studien zufolge zu hohen physischen Belastungen von Patienten sowie des Krankenhauspersonals [BERENTZEN & LENNARTZ 2010]. Untersuchungen zeigen, dass die Lärmbelastung in den letzten Jahren kontinuierlich zunimmt [BUSCH-VISHNIAC ET AL. 2005] und Operationssäle zu den Räumen mit den höchsten Lärmbelastungen zählen [SIEGMANN & NOTBOHM 2013]. Die Untersuchungen von SIEGMANN & NOTBOHM [2013] zeigen dabei Spitzenwerte der Lärmbelastung im Operationssaal von bis zu 105 dB. KRACHT ET AL. [2007] messen sogar Schallpegel von über 120 dB. Nach ALSHAMMARI ET AL. [2017] wird Lärm in Operationssälen durch die Mensch-Mensch-Interaktion, Mensch-Maschine-Interaktion und von Maschinen selbst verursacht. Untersuchungen von NOTBOHM & SIEGMANN [2012] belegen, dass unter den führenden Lärmquellen medizinische Geräte stehen, unter anderem vorwiegend durch das akustische Feedback.

Nach VDI 2058-3 [2014] führt eine andauernde Lärmbelastung zu einem Gefühl der

Belästigung, Verärgerung und des Unbehagens und resultiert in physiologischen Veränderungen v. a. des Herz-Kreislaufsystems. Kurzfristig wirkt sich ein zu hoher Schallpegel auf die Leistung, die Arbeitssicherheit und letztendlich auf die Patientensicherheit aus [EBD.]. Nach STEVENSON ET AL. [2013] beeinträchtigt die Lärmbelastung die mentale und kognitive Leistung des OP-Personals (siehe Bild 1.1). So werden beispielsweise das Kurzzeitgedächtnis, die Sprachverständlichkeit, und die Fehlerhäufigkeit negativ beeinflusst, wodurch ein konzentriertes Arbeiten im Operationssaal erschwert wird [EBD.]. Die Herausforderung neuer Interaktionstechnologien im OP liegt darin, eine MMS zu entwickeln, welche eine sichere, intuitive und effiziente Bedienung sicherstellt, ohne den Chirurgen in seiner Arbeit zu beeinträchtigen [WACHS ET AL. 2008]. Erste Ansätze der Gestensteuerung im medizinischen Bereich liefern beispielsweise die Arbeiten von BIZOTTO ET AL. [2014] oder O'HARA ET AL. [2014]. Allerdings besitzt diese Technologie noch zwei Schwachstellen. Zum einen fehlt es an einem Eingabevokeabular für Gesten [HURSTEL & BECHMANN 2019], zum anderen mangelt es an einem eindeutigen Feedback, welches dem Nutzer die korrekte Eingabe übermittelt [CABREIRA & HWANG 2016]. Daher erfährt die reine Gestenbedienung derzeit sehr geringe Akzeptanz im alltäglichen OP-Einsatz.



**Bild 1.1:** Einflussfaktoren bei der Interaktion zwischen Operateur, Patient und Maschine

## 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung zu anderen Arbeiten

Das vorangehende Kapitel 1.1 beschreibt eingehend zwei wesentliche Problemstellen der Bedienung von medizinischen Geräten im Operationssaal. Zum einen werden darin Hygienestandards vorgestellt, welche eine direkte und intuitive Interaktion mit Geräten behindern und zum anderen wird ein hoher Lärmpegel im Operationssaal diskutiert, der ein konzentriertes Arbeiten erschwert. Die Steuerung von medizinischen Geräten via

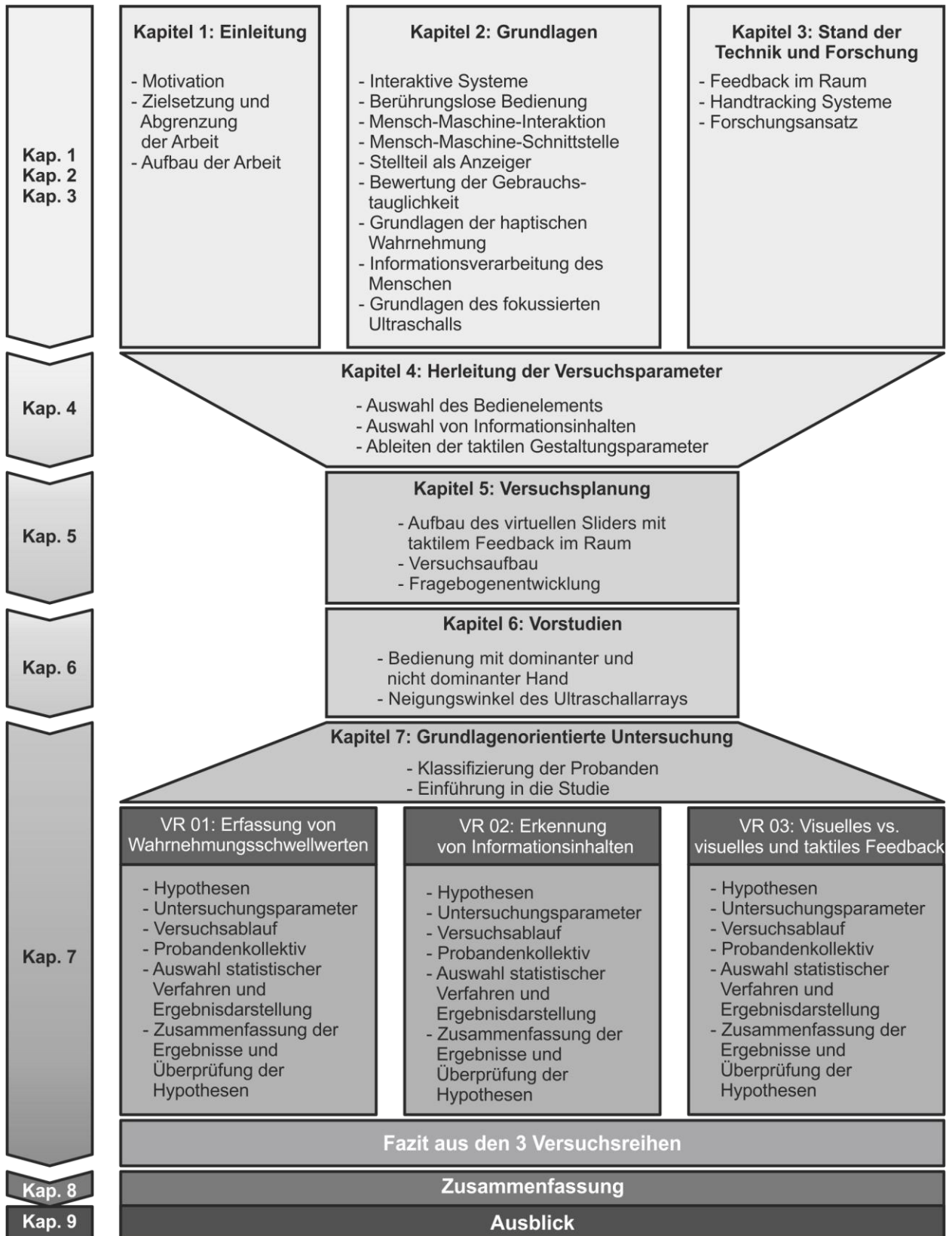
Gesten stößt indessen aufgrund des fehlenden direkten Feedbacks auf wenig Akzeptanz bei den Nutzern. Forschungsarbeiten, beispielsweise von FITCH ET AL. [2011], PIELOT ET AL. [2014] oder SCHWALK [2020] zeigen, dass taktile Anzeigen Informationen übertragen können und zu kürzeren Reaktions- und Antwortzeiten sowie geringeren Fehlerraten bei der Ausführung von Aufgaben führen. Insbesondere ist nach WICKENS & BAKER [1995] in virtueller Umgebung die Nutzung von visueller und haptischer Information wichtig. SON ET AL. [1996] empfehlen bei der Bearbeitung komplexer Aufgaben eine Kombination aus visuellem und haptischem Feedback. Das Ziel dieser Arbeit besteht demnach darin die Nutzer während der Ausführung einer Hauptaufgabe und der gleichzeitigen Steuerung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle mittels Handgesten zu unterstützen. Zur Entlastung des audiovisuellen Wahrnehmungskanals werden Informationen der Mensch-Maschine-Schnittstelle durch taktiles Feedback auf Basis von fokussierten Ultraschallwellen an den Nutzer übermittelt. Im Detail geht es um die Steigerung der Usability und des Komforts bei der Handgestensteuerung im Kontext einer Haupt- und Nebenaufgabe. Demgemäß erfolgt in Kapitel 7 nach jeder Untersuchung anhand eines Resultats eine Zusammenfassung zur Gestaltung des taktilen Feedbacks. Die Ergebnisse werden jeweils in die sich anschließende Untersuchung eingebunden. Zugleich können diese aber auch als eigenständige Gestaltungsempfehlungen für das Untersuchungsszenario angesehen werden. Die Möglichkeiten und Einflussparameter auf die Gestaltung von virtuellen Bedienelementen (vgl. MAIER & SCHMID [2019]) und des taktilen Feedbacks im Raum mittels Ultraschallwellen für die Interaktion zwischen Mensch und Maschine sind sehr vielfältig. Für die systematische und wissenschaftliche Untersuchung im Kontext eines medizinischen Szenarios sind daher die sinnvolle Eingrenzung der Komplexität der virtuellen Bedienelemente und der taktilen Feedbackmöglichkeiten essenziell. In der vorliegenden Arbeit dient die Steuerung der intrakorporalen Beleuchtung während eines chirurgischen Eingriffs als Untersuchungsszenario. Als Bedienelement wird ein Schieberegler (Slider) und als Informationsrückmeldung eine diskrete Eingabeart in Form einer taktilen Skala (vgl. Kapitel 4) ausgewählt. Da das Bedienelement Stellteil und Anzeiger vereint, ist die nutzergerechte Gestaltung und Auslegung des diskreten, taktilen Feedbacks für eine fehlerfreie Bedienung im Raum ausschlaggebend. Im Fokus der Studien steht die Auswahl von geeigneten Feedbackparametern für die Feedbackintensität und den Skalenabstand. Relevant sind vor allem Einflussgrößen für die Unterscheidbarkeit von taktilen Feedback bei der Handgestensteuerung im Raum zur Reduzierung von Eingabefehlern. Durch Einzel- und kombinierte Untersuchungen werden Ergebnisse generiert,

mit Hilfe derer Gestaltungshinweise für das diskrete, taktile Feedback für einen virtuellen Slider im Raum abgeleitet werden können. Die Untersuchung eines Sliders mit diskretem, ultraschallbasierten, taktilen Feedback im Raum während der parallelen Ausführung einer Hauptaufgabe ist in der bisherigen Forschung zum taktilen, ultraschallbasierten Feedback einzigartig.

### **1.3 Struktur der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in neun Kapitel (siehe Bild 1.2). Das einleitende Kapitel beschreibt die Thematik und definiert die Zielsetzung und Abgrenzung dieser Arbeit. In Kapitel 2 werden theoretische Grundlagen behandelt sowie Schlüsselbegriffe geklärt. Neben einer Einführung in interaktive Systeme erfolgt die Erörterung der Grundlagen der berührungslosen Bedienung als auch der Mensch-Maschine-Interaktion, Mensch-Maschine-Schnittstelle und Gebrauchstauglichkeit. Im Hinblick auf das taktile Feedback werden die anatomischen und physiologischen Grundlagen zur taktilen Wahrnehmung erarbeitet. Der menschliche Informations- und Wahrnehmungsprozess sowie die technischen Grundlagen zum fokussierten Ultraschall formen den Schluss des zweiten Kapitels. Kapitel 3 stellt den Stand der Technik und Forschung der Gestensteuerung mit berührungslosem, taktilen Feedback dar und präsentiert Forschungsergebnisse, die die Basis dieser Arbeit bilden. In Kapitel 4 werden die Untersuchungsparameter konkretisiert. Hierzu werden in einem ersten Schritt medizinische Geräte und Bedienelemente hinsichtlich der Eingabemodalitäten analysiert und ein konkretes Bedienelement ausgewählt. Es werden Möglichkeiten abgeleitet, welche Informationsinhalte mittels eines Sliders übertragen werden können und es folgen Überlegungen zur Kodierung und Übertragung dieser Informationsinhalte mittels des taktilen Feedbacks. Kapitel 5 beschreibt die Versuchsplanung sowie den technischen Aufbau des virtuellen, taktilen Sliders. Im sechsten Kapitel werden zwei Vorstudien beschrieben. In Kapitel 7 erfolgt die Untersuchung der abgeleiteten Informationsinhalte und deren taktile Darstellungsmöglichkeiten anhand von Probandenstudien. In der ersten Versuchsreihe werden zunächst die Grundparameter für den Verlauf einer taktilen Skala im Raum im Kontext einer Haupt- und Nebenaufgabe ermittelt. Darauf aufbauend werden in der zweiten Versuchsreihe die Ausprägungen der haptischen Merkmale sowie die Unterschiedsschwelle zur Wahrnehmung zweier verschiedener Reize im Detail untersucht. Die Evaluationsstudie vergleicht das unterstützende, taktile Feedback mit einem rein visuellen Feedback während der Gestensteuerung. Den Abschluss der Arbeit bilden

Kapitel 8 und Kapitel 9, welche die Erkenntnisse zusammenfassen und einen Ausblick über weitere mögliche Forschungsansätze darstellen.



**Bild 1.2:** Struktur der Arbeit

## 2 Grundlagen

Die Erarbeitung der Grundlagen, die zur Gestaltung des taktilen Feedbacks im Raum berücksichtigt werden müssen, erfolgt in diesem Kapitel. Dazu wird zunächst auf die Definition interaktiver Systeme (Kapitel 2.1) sowie auf die berührungslose Bedienung (Kapitel 2.2) eingegangen. Neben der Mensch-Maschine-Interaktion (Kapitel 2.3) sind ebenfalls Grundlagen bezüglich der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit (Kapitel 2.4) essenziell. Im Anschluss werden die Grundlagen zur haptischen Wahrnehmung (Kapitel 2.5) und zur Fokussierung von Ultraschallwellen (Kapitel 2.6) dargelegt.

### 2.1 Interaktive Systeme

Der Begriff „interaktive Systeme“ setzt sich aus dem Adjektiv „interaktiv“ und dem Nomen „System“ zusammen. Unter Interaktion (lat.: inter = zwischen; agere = handeln) ist die gegenseitige Beeinflussung oder das Zusammenwirken von Mensch und Maschine bei der Benutzung oder Bedienung von Produkten, Verfahren oder von allgemeinen Steuerungsprozessen zum Erreichen einer Zielvorgabe zu verstehen [CHARWAT 1994, S. 227], [BACKHAUS 2010, S. 138]. BOSENICK ET AL. [2006, S. 132] beschreiben Interaktion als den zielgerichteten Austausch von Energie und Information. System bezeichnet eine „*Einheit aus technischen Anlagen oder Bauelementen, die eine gemeinsame Funktion haben*“ [DUDEN 2023A] bzw. in der Naturwissenschaft die „*Gesamtheit von Objekten, die sich in einem ganzheitlichen Zusammenhang befinden und durch die Wechselbeziehungen untereinander gegenüber ihrer Umgebung abzugrenzen sind*“ [DUDEN 2023A].

DIN EN ISO 9241-210 [2008, S. 6] beschreibt ein interaktives System als eine Kombination aus Hardware, Software und/oder Dienstleistungen, bei welchen Eingaben von einem Benutzer getätigt oder Ausgaben an einen Benutzer übermittelt werden. Nach DAHM [2006] erfolgt bei einem interaktiven System eine Kommunikation zwischen Mensch und Computer zum Austausch von Informationen. Ziel interaktiver Systeme ist es, den Nutzer bei der Ausführung einer Aufgabe oder dem Erreichen eines Ziels zu unterstützen [DAHM 2006], [STONE ET AL. 2005], [DIX ET AL. 2004]. Insbesondere im Operationssaal leisten interaktive Systeme besonders in stressrelevanten Situationen einen Beitrag zur Entlastung des Nutzers. Nach HEINECKE [2012] ist ein System interaktiv, wenn der Benutzer durch eine Bedienhandlung den Arbeitsablauf des Systems beeinflussen kann.

## 2.2 Berührungslose Interaktion

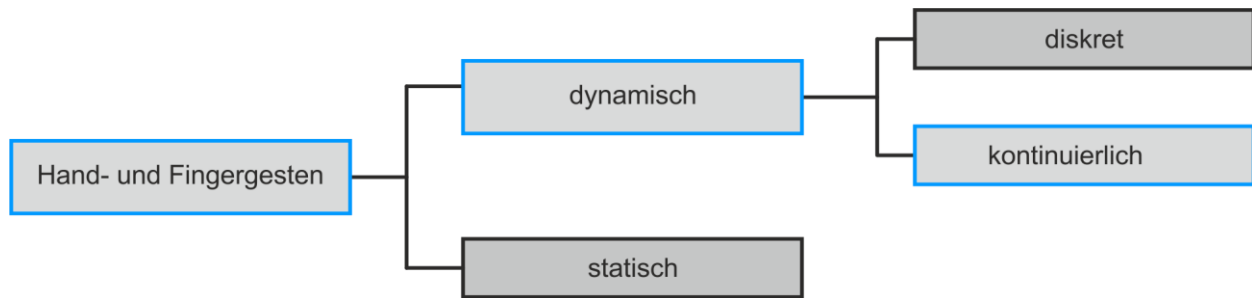
Die berührungslose Interaktion beschreibt allgemein alle berührungslosen Kommunikationsmöglichkeiten eines Menschen mit der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Eine Interaktion wird als berührungslos bezeichnet, sofern kein physischer Kontakt mit einer Maschine zur Steuerung dieser notwendig ist [PREIM & DACHSELT 2015, S. 459]. NORMAN [2010] und WIGDOR & WIXON [2011] beschreiben diese Benutzungsschnittstellen mit den natürlichen, dem Menschen geläufigen Interaktionsformen als Natural User Interfaces (NUI). Die gebräuchlichsten Interaktionsformen sind dabei die Sprach-, Gesten-, Blick- und Gedankensteuerung. Von besonderer Relevanz in der Medizintechnik ist neben der Sprachsteuerung die Interaktion via Gesten. SAFFER [2009, S. 2] definiert eine Geste als *„jede körperliche Bewegung, die ein digitales System ohne die Hilfe eines herkömmlichen Zeigegeräts, wie einer Maus oder eines Stifts erkennen und darauf reagieren kann.“* [SAFFER 2009, S. 2]. Nach DIN EN ISO 9241-960 [2018] ist eine Geste eine Bewegung oder Pose des Körpers bzw. von Körperteilen. Ganzkörpergesten nutzen den gesamten Körper als Kommunikationsmittel wohingegen zu den Teilkörpergesten Hand-, Arm-, Kopf- und Gesichtsgesten sowie auch Fußgesten gehören [GEIGER 2003]. In der berührungslosen Gestensteuerung werden dabei hauptsächlich Hand- und Fingergesten eingesetzt [KEISER 2015].

Bei Hand- und Fingergesten unterscheidet man weiter dynamische und statische Gesten (siehe Bild 2.1) [GEIGER 2003]. Dynamische Gesten übermitteln Informationen mittels Körperbewegungen über den Ablauf einer Bewegung wie beispielsweise beim Kopfnicken und gelten als natürliche Kommunikationsform. Nach PICKERING ET AL. [2007] sind dynamische Gesten aus Nutzersicht zu bevorzugen. Statische Gesten wie beispielsweise die Gebärdensprache sind Posen eines Körperteils und gelten als unnatürliche Form der Interaktion [GEIGER 2003]. Die Information wird durch zeitlich andauernde Körperhaltungen übermittelt, welche erlernt werden müssen und daher eine künstliche Art der Kommunikation darstellen. Eingaben im Raum werden mit Freihandgesten ausgeführt, welche als statische Posen der Hände exemplarisch mit unterschiedlich gespreizten Fingern oder als dynamische Gesten zur Navigation im Raum ausgeführt werden können [PREIM & DACHSELT 2015, S. 500].

Für die Bedienung eines taktilen Sliders im Raum sind die manipulativen, dynamischen Gesten relevant (siehe Bild 2.1). Dynamische Gesten lassen sich wiederum in diskrete und kontinuierliche Gesten unterteilen. Bei diskreten Gesten erfolgt die Systemantwort erst nach Ausführung der Geste. Diese bestehen aus exakt einem Bewegungsablauf,



welchem ein konkreter Gestenbefehl zugeordnet werden kann. Bei kontinuierlichen Gesten wird die absolute Position der Hand im Raum fortlaufend erkannt und an das System übermittelt. Die Eingabe erfolgt somit direkt während der Bewegung und der aktuelle Systemzustand kann direkt verändert werden. Kontinuierliche Gesten eignen sich somit zur stufenlosen Regelung eines Systemzustands oder zur kontinuierlichen Manipulation einer Regelgröße beispielsweise eine stufenlose Regelung der Musiklautstärke oder zum Dimmen einer Beleuchtung. [PREIM & DACHSELT 2015, S. 500]



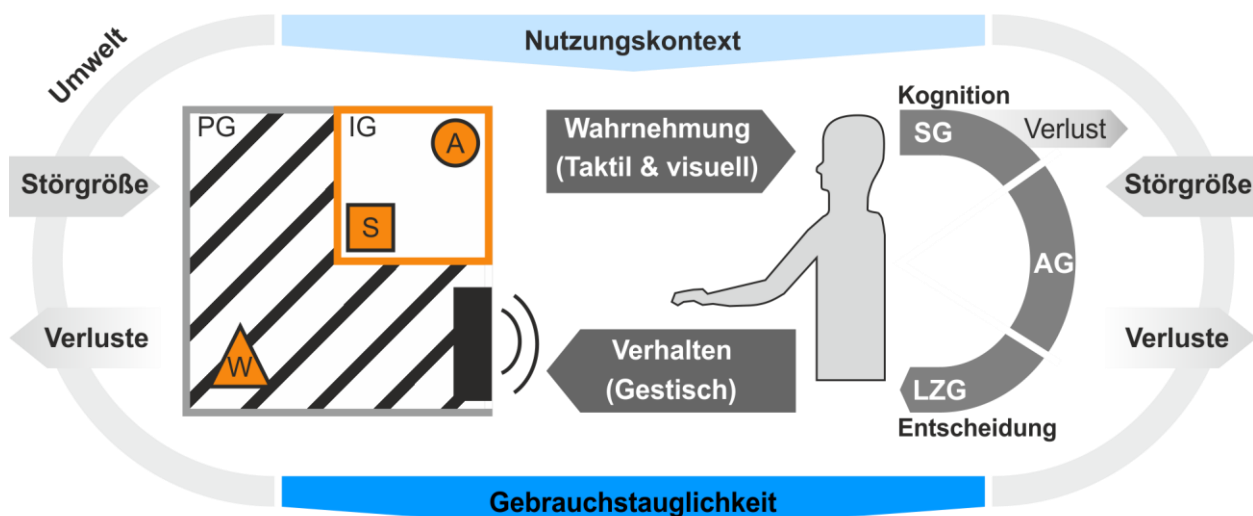
**Bild 2.1:** Klassifizierung von Hand- und Fingergesten in Anlehnung an Preim & Dachsel [2015]

## 2.3 Mensch-Maschine-Interaktion

Im Technischen Design wird zur Beschreibung der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) das Basisschema (siehe Bild 2.2) verwendet. Das Basisschema der Mensch-Maschine-Interaktion beschreibt den bidirektionalen Zusammenhang zwischen einer Maschine und dem Menschen sowie deren Interaktion und den Einflüssen bezüglich der Umwelt [SCHMID & MAIER 2017, S. 57]. Nach REEVES & NASS [1996] oder FISCHER [2006] verwendet der Mensch bei der Mensch-Maschine-Interaktion ähnliche Regeln wie bei der zwischenmenschlichen Kommunikation. Demzufolge stellt ZÜHLKE [2012, S. 195] die Interaktion als Kommunikation zwischen Mensch und Maschine dar und sieht dies als essenziellen Aspekt für die Benutzbarkeit einer Maschine. Für die Interaktion zwischen Mensch und Maschine sind die Prozesse der menschlichen Wahrnehmung und der Kognition von zentraler Bedeutung [BUTZ & KRÜGER 2017, S. 9].

Der Mensch wird als das informationsverarbeitende System betrachtet, wobei die Mensch-Maschine-Interaktion sich über die Teilprozesse der Informationsaufnahme (Wahrnehmung), Informationsverarbeitung (Erkennung) und der Informationsausgabe (Verhalten) beschreiben lässt [ASENDORPF 2009, S. 20, TIMPE 1967, S. 20ff.]. Bei der Ausführung einer Arbeitsaufgabe gehen dabei von der Produktgestalt (PG) mit der Teilgestalt Interface (IG) Informationen, Reize oder Signale aus, welche über die Wahrnehmungskanäle des Menschen aufgenommen werden. Dabei wirken sowohl auf

die Produktgestalt als auch auf den Nutzer und die Aufgabenausführung Umwelt- einflüsse, welche Störgrößen verursachen. Die wahrgenommenen Informationen werden entsprechend der Kognition (lat.: cognoscere = erkennen, erfahren) mit Hilfe des sensorischen Gedächtnisses (SG), des Arbeits- (AG) und des Langzeitgedächtnisses (LZG) verarbeitet und über das Verhalten des Menschen an die Maschine zurückgemeldet [SCHMID & MAIER 2017, S. 57], [SEEGER 2005, S. 23]. Im Kontext des Basisschemas wird der Prozessschritt des Verhaltens als Betätigung und Benutzung bezeichnet, durch welches das Wirkteil des Produkts gesteuert wird, was zur Aufgabenerfüllung beiträgt [SCHMID & MAIER 2017, S. 69]. Der Informationsaustausch zwischen Mensch und Maschine erfolgt dabei über die Benutzungs- oder Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS), welche auch als User Interface oder Interface bezeichnet wird (vgl. Kapitel 2.3.1). Das User Interface enthält diejenigen Komponenten eines Mensch-Maschine Systems, welche für die Interaktion mit dem Benutzer notwendig sind [BAGGEN & HEMMERLING 2000]. Nach SEEGER [2005, S. 133] wird unter dem Interface die „[...] Art und Anzahl der Stellteile und Anzeiger sowie deren Anordnung auf einem Tragwerk verstanden.“ Für eine erfolgreiche Interaktion muss die MMS daran angepasst werden, wie der Mensch Informationen aufnehmen und verarbeiten kann [SCHMIDTKE 1989, C 8.1.1 S. 1]. Im Fall der Interaktion mit einem virtuellen Bedienelement im Raum mit taktilen, ultraschallbasiertem Feedback obliegt dem taktilen Wahrnehmungskanal besondere Bedeutung. Die über den taktilen Wahrnehmungskanal aufgenommenen Sinneseindrücke in Form von taktilen Feedbackimpulsen werden kognitiv verarbeitet und resultieren in einer Sliding-Geste des Hand-Arm-Systems.

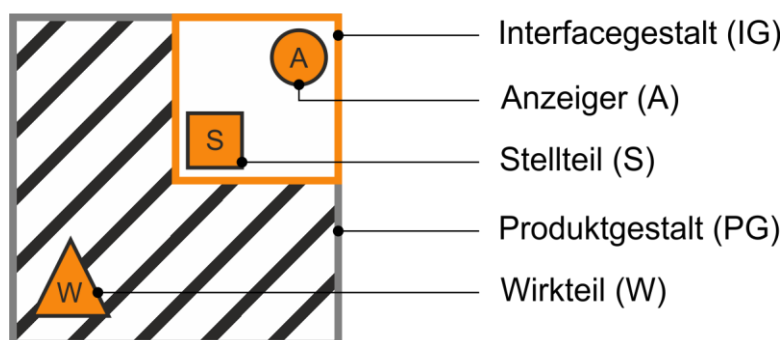


**Bild 2.2:** Basisschema der Mensch-Maschine-Interaktion für taktile Interfaces, eigene Darstellung in Anlehnung an SCHMID & MAIER [2017, S. 57]

### 2.3.1 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle umfasst nach Bullinger „alle Komponenten eines Arbeitssystems zur funktionellen Interaktion zwischen dem Menschen und einem technischen System“ [BULLINGER 1994, S. 335]. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle birgt nach DIN EN ISO 9241-110 [2008, S. 7] "alle Bestandteile eines interaktiven Systems (Software und Hardware), die Informationen und Steuerelemente zur Verfügung stellen, die für den Benutzer notwendig sind, um eine bestimmte Arbeitsaufgabe mit dem interaktiven System zu erledigen". Daraus lassen sich Anzeiger und Stellteile als grundlegende Elemente der MMS ableiten (siehe Bild 2.3). Nach SCHMID & MAIER [2017, S. 32] kann der Begriff Interface mit Schnittstelle übersetzt werden. Gemäß des Lehrstuhls Technisches Design der Universität Stuttgart (IKTD) umfasst das Interface diverse Interfaceelemente bestehend aus Anzeigern und Stellteilen zur Informationsein- und -ausgabe [EBD., S. 32]. Das Interface kann dabei über die „Art und Anzahl der Stellteile und Anzeiger“, „die Anordnung dieser auf einem Tragwerk“ sowie „alle Kontaktflächen zwischen Mensch und Maschine“ definiert werden [EBD.]. Eine abstrahierte Darstellung der Produktgestalt inklusive der Interfacegestalt ist in Bild 2.3 zu sehen. Die Produktgestalt ist veranschaulicht durch ein Quadrat mit den Interfaceelementen Stellteil (S), Anzeiger (A) und Wirkteil (W) [EBD., S. 34]. Das Wirkteil wird nicht den Interfaceelementen, sondern der Funktionsgestalt zugerechnet.

Die optimale Mensch-Maschine-Schnittstelle besteht in der geeigneten Gestaltung des Interfaces mit dessen Elementen (Anzeigern und Stellteile) hinsichtlich des Nutzers und der gestellten Aufgabe [STAPELKAMP 2010, S. 151]. Die Interfacegestalt inklusive ihrer Interfaceelemente muss die physischen, psychologischen und sozialen Aspekte des Menschen berücksichtigen [DIN EN 894-1 2009, S. 6], sodass auch Aufgaben hoher Komplexität selbstständig, sicher und störungsfrei durchgeführt werden können [SCHLICK ET AL. 2018, S. 530].



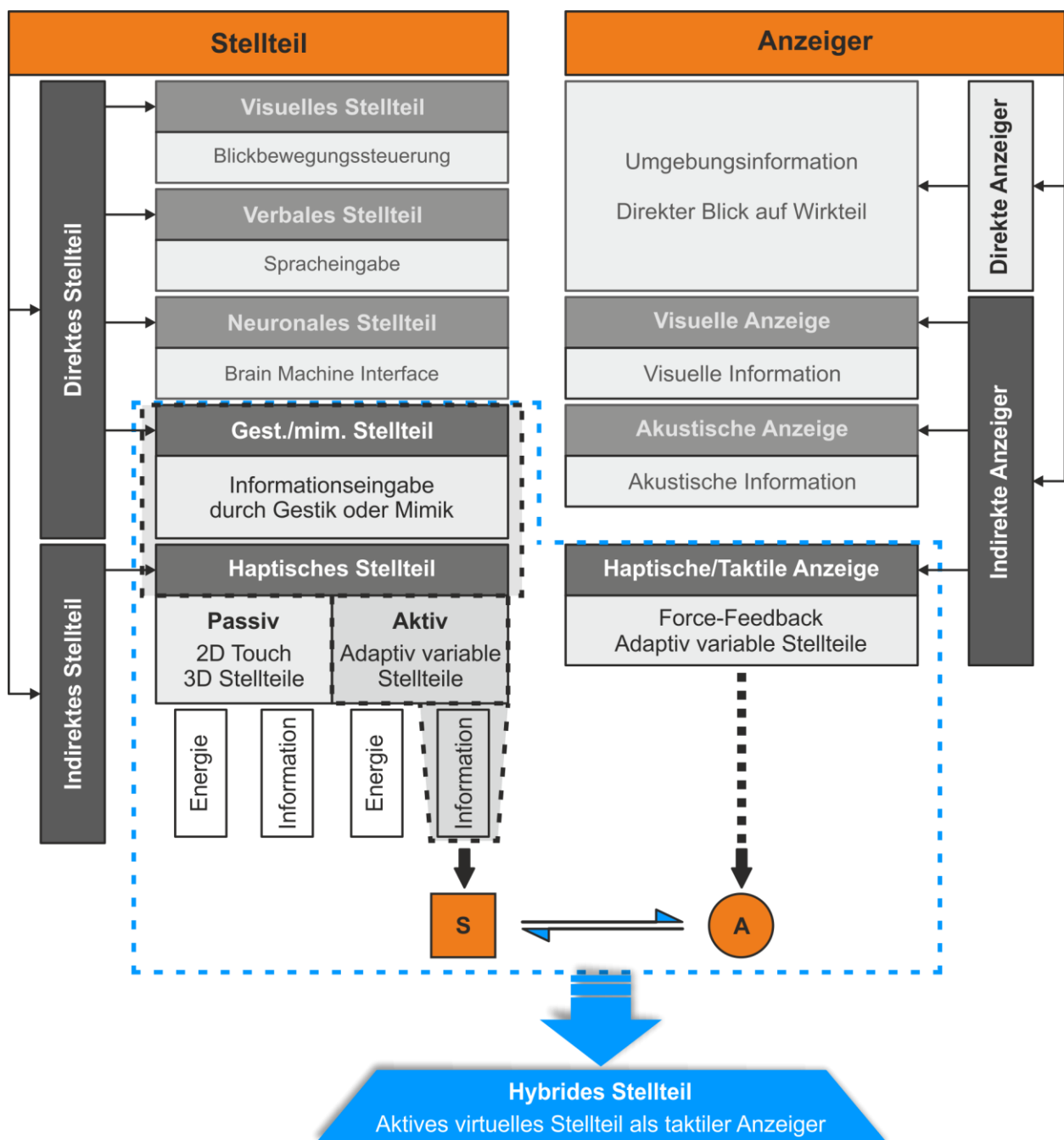
**Bild 2.3:** Abstrahierte Darstellung der Produktgestalt, eigene Darstellung in Anlehnung an SCHMID & MAIER [2017, S. 34]

### 2.3.2 Virtuelle Stellteile als Anzeiger

Bild 2.4 beschreibt den für diese Forschungsarbeit wichtigen Ansatz der Symbiose aus Stellteil und Anzeiger. Nach BULLINGER [1994] können durch Interaktion des Menschen mit Stell- bzw. Bedienteilen Informationen an ein technisches System übertragen werden. Bei Natural User Interfaces erfolgt die Steuerung eines Systems durch Anfassen, Schieben und Antippen von virtuellen Elementen oder Stellteilen mit der Hand oder mit Körperteilen. Zur Einteilung von physischen und virtuellen Stellteilen gibt es diverse Ansätze. SCHMID & MAIER [2017, S. 146f.] unterteilen in direkte und indirekte Stellteile (siehe Bild 2.4). Zu den direkten Stellteilen zählen die gestischen bzw. mimischen, visuellen, verbalen und neuronalen Stellteile. Die indirekten Stellteile umfassen die haptischen, virtuellen und physischen Stellteile, bei welchen eine indirekte Übersetzung zwischen Bedienhandlung des Nutzers und der Manipulation im System über Kopplungsparameter erfolgt. [EBD., S. 146f.]

Nach HAMPEL [2011, S. 19] können haptische Stellteile hinsichtlich der Feedback-erzeugung in aktive und passive Stellteile klassifiziert werden. Passive Stellteile erzeugen Stellkräfte über die Mechanik zwischen Stell- und Wirkteil [BUBB 2001, ANGUELOV ET AL. 2006]. Demgegenüber benötigen aktive Stellteile externe Energiequellen, um haptische Informationen mittels Aktoren und Sensoren zu übertragen [KERN 2009, S. 31]. Aktive Stellteile werden vorwiegend bei virtuellen Mensch-Maschine-Schnittstellen wie beispielsweise bei der Interaktion via Anzeigen oder interaktiver Oberflächen sowie für die Übermittlung zusätzlicher Informationen an den Nutzer verwendet [HAMPEL 2011, S. 20]. Der Informationstransfer an das System erfolgt dabei über gestische Veränderungen, welche mittels einer Erkennungssoftware erfasst werden [SCHMID & MAIER 2017, S. 148]. Eine weitere Klassifizierung von Stellteilen kann nach NEUDÖRFER [1981, S. 73] hinsichtlich der Übertragung von Information oder Energie erfolgen. Nach HAMPEL [2011, S. 19] unter Berufung auf BUBB [2004] kann ein aktives Stellteil somit neben der Informationseingabe durch den Benutzer auch zur Informationsausgabe an den Benutzer verwendet werden. HOYOS [1990] beschreibt in diesem Zusammenhang das Stellteil als Anzeiger. Die Information wird dabei über einen Anzeiger oder eine Anzeigeeinrichtung an den Nutzer rückgemeldet. In der Norm DIN EN 894-1 [2009, S. 5] wird der Anzeiger als „Gerät zur Darstellung von sich ändernden Informationen mit der Aufgabe, diese sichtbar, hörbar oder durch Berührung (taktil) unterscheidbar zu machen.“ beschrieben. Ziel ist die gerichtete Informationsübertragung von technischen Geräten zum Menschen, wobei Zustände oder Zustandsänderungen von Subsystemen, Arbeitsobjekten oder Prozessen

übermittelt werden [BULLINGER 1994, S. 335, SCHLICK ET AL. 2018, S. 431]. Anzeiger können ferner in direkte und indirekte Anzeiger unterteilt werden (siehe Bild 2.4) [SCHMID & MAIER 2017, S. 133]. Bei direkten Anzeigern kann die Information direkt abgelesen werden, beispielsweise anhand der Umgebungsinformation oder durch direkten Blick auf das Wirkteil [BULLINGER 1994, S. 335]. Indirekte Anzeiger wandeln die Informationen des Systems in eine für den Menschen wahrnehmbare Anzeige. Diese können weiter in optische, akustische und taktile Anzeiger klassifiziert werden (siehe Bild 2.4) [SCHMID & MAIER 2017, S. 133].



**Bild 2.4:** Klassifizierung von Stellteilen und Anzeigern in Anlehnung an SCHMID & MAIER [2017]

Für die vorliegende Forschungsarbeit sind vor allem aktive, virtuelle Bedienelemente in Kombination mit einem indirekten, taktilen Anzeiger relevant. Als taktile Anzeiger werden dabei Force-Feedback-Systeme genutzt, bei denen der Nutzer eine Rückmeldung über den Zustand des Systems beispielsweise durch Kraft- und/oder Momentänderung bzw. Rückkopplung (vgl. adaptiv variables Stellteil [HAMPEL 2011], [WINTERHOLLER 2019]) erhält [GRUNWALD & BEYER 2001, S. 161].

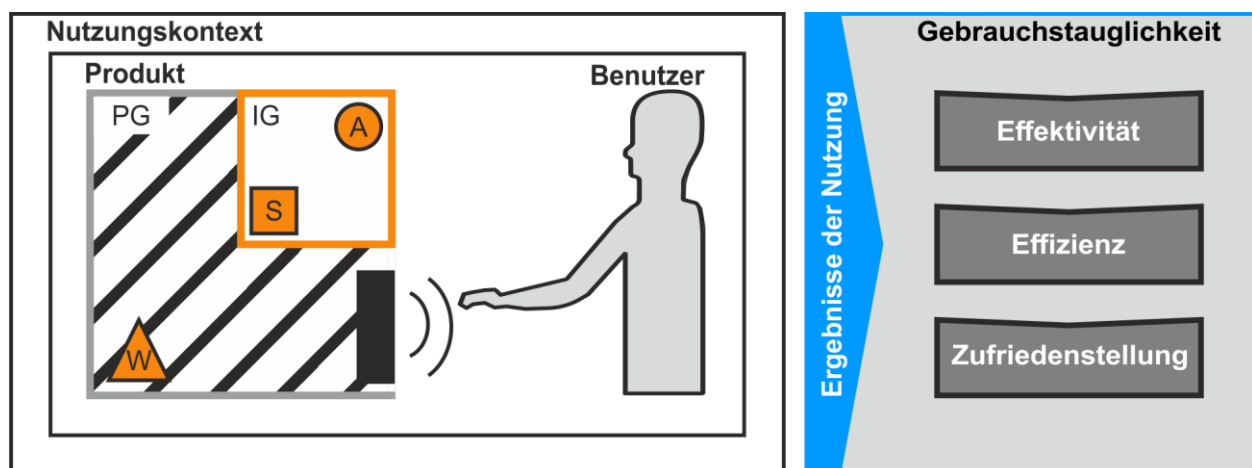
## 2.4 Bewertung der Gebrauchstauglichkeit

Die Qualität einer Interfacegestalt wird nach SCHMID & MAIER [2017, S. 36] anhand der Gebrauchstauglichkeit oder auch Usability beschrieben. Eine hohe Usability ist essentielles Ziel der menschenzentrierten Produktentwicklung [DIN EN ISO 9241-210 2019, S. 8] und umso besser, desto präziser der Informationsverarbeitungsprozess des Nutzers erfolgt [BACKHAUS 2010, S. 15]. Die Beschreibung der Gebrauchstauglichkeit kann anhand der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit einer Interaktion eines Nutzers mit einem Produkt, System oder einer Dienstleistung erfolgen und stellt das Ergebnis der Interaktion dar (siehe Bild 2.5) [DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 14f.]. Im Rahmen dieser Arbeit dient die Gebrauchstauglichkeit zur Bewertung der Interaktion zwischen Mensch und Maschine und daraus letztendlich auch zur Bewertung der verschiedenen Charakteristiken des taktilen Feedbacks bei der Ausführung einer Haupt- und Nebenaufgabe.

Die Effektivität dient zur Beschreibung der Genauigkeit und Vollständigkeit, mit welcher ein Benutzer das angestrebte Ziel erreicht [DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 18], [SCHMID & MAIER 2017, S. 36]. Nach DIN EN ISO 9241-11 [2018, S.18f.] bezeichnet Genauigkeit in diesem Kontext den Übereinstimmungsgrad zwischen dem tatsächlichen und dem angestrebten Ergebnis, wohingegen die Vollständigkeit ein Maß für den Erfüllungsgrad des angestrebten Ziels ist.

Die Effizienz beschreibt das Verhältnis zwischen dem erreichten Ziel und den dafür eingesetzten Ressourcen, wie beispielsweise menschlicher oder finanzieller Aufwand sowie Zeit oder Material [DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 19], [SCHMID & MAIER 2017, S. 37]. Der menschliche Aufwand beschreibt dabei den geistigen oder physischen Aufwand, welcher zur Erfüllung des Aufgabenziels eingesetzt wird, wobei sich dieser in Form von Überlastung als auch Unterforderung bemerkbar machen kann [DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 20]. Die Zufriedenstellung (Zufriedenheit) kann nur mittels einer subjektiven Bewertung durch den Nutzer erfasst werden und beschreibt neben der Reaktion des Nutzers dessen Akzeptanzverhalten zur Nutzung des Produkts [SCHMID & MAIER 2017, S. 37], [DIN EN

ISO 9241-11 2018, S. 20], [BACKHAUS 2010, S. 15]. Die Reaktion des Nutzers kann dabei in physische, kognitive und emotionale Reaktionen unterteilt werden und resultiert aus den Benutzererfordernissen und Benutzererwartungen, welche durch Erfahrungen mit ähnlichen Systemen oder durch Meinungen anderer Personen beeinflusst werden können [DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 11]. Zur Erreichung einer hohen Gebrauchstauglichkeit von Medizinprodukten liegt der Fokus auf dem methodischen Analysieren und Bewerten der Bedienbarkeit von Produkten gemäß dem Usability-Engineering [BACKHAUS 2010, S. 46], [IEC 62366-1 2015]. Nach SARODNIK UND BRAU [2010, S. 119] können die Methoden zur Usability-Evaluation in empirische und analytische Methoden eingeteilt werden. Die gängigste Methode der Usability-Evaluation ist die Durchführung von Nutzertests oder Benutzbarkeitstests [SARODNIK UND BRAU 2010, S. 163]. Dabei werden die Nutzer während der Ausführung einer bestimmten Aufgabe von Usability-Experten beobachtet und anhand von Beobachtungen, Interviews, Befragungen, Äußerungen und Messungen Ergebnisse abgeleitet. Nach [DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 37 - 40] gibt es aufgrund des Nutzungskontextes und der Zweckerfüllung keine allgemeingültigen Komponenten für die Messung der Gebrauchstauglichkeit. Es wird lediglich empfohlen jeweils einen Parameter für die Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit oder auch Zufriedenstellung zu erfassen.



**Bild 2.5:** Visualisierung des Zusammenhangs aus Produktnutzung und Gebrauchstauglichkeit in Anlehnung an DIN EN ISO 9241-11 [2018, S. 15]

## 2.5 Grundlagen der haptischen Wahrnehmung

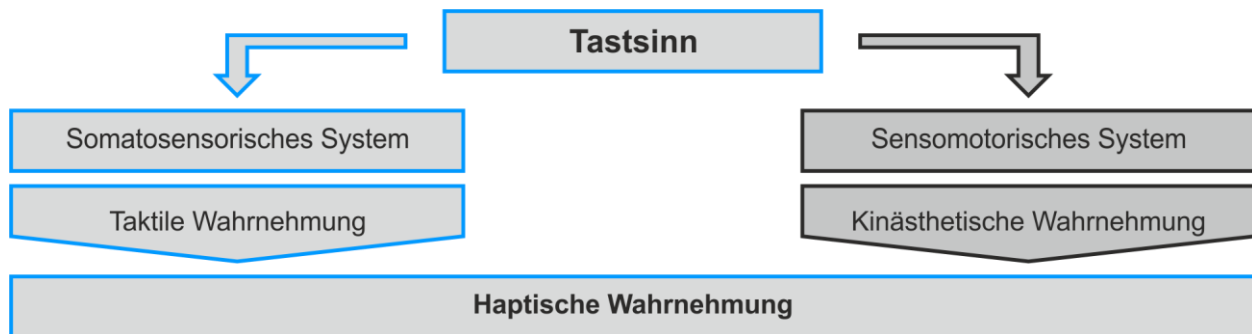
Der Begriff Haptik stammt aus dem Griechischen „háptein“ und bedeutet „heften, berühren, angreifen“ [DUDEN 2023B]. Nach JANDURA [1994] beschreibt der Begriff Haptik eine Interaktion mit der realen oder virtuellen Umgebung und befasst sich laut DUDEN [2023B] mit der Lehre vom Tastsinn. Der Tastsinn zählt neben dem Gehör-,

Gesichts-, Geruchs-, und Geschmackssinn zu den klassischen fünf Sinnesmodalitäten des Menschen [KERN 2009, PAPE ET AL. 2014, S. 701]. Die Aufgabe des Tastsinns besteht in der Erfassung der Grenzen des Körpers und der Umwelt sowie der Analyse, Beurteilung und Unterscheidung von Oberflächenbeschaffenheiten und Strukturen [DIN EN ISO 9241-910 2011], [PAPE ET AL. 2014, S. 707]. Mit Untersuchungen und Forschungsarbeiten zu biologischen Mechanismen der Reizwahrnehmung und -weiterleitung sowie von Steuer- und Regelprozessen von biologischen reizaufnehmenden und verarbeitenden Strukturen wird der Begriff Tastsinn mehr und mehr durch den Systemgedanken der Somatosensorik ersetzt [KANDEL 1996, S. 390]. So stellt nach GRUNWALD & BEYER [2001, S. 10] der Tastsinn heutzutage in der physiologischen und neurologischen Forschung einen übergeordneten Eigenschaftsbegriff dar, welcher sich wiederum nach Bild 2.6 aus dem somatosensorischen und sensomotorischen System zusammensetzt. Beim somatosensorischen System erfolgt die Reizwahrnehmung auf sensorischer Ebene ohne selbstständige, aktive, motorische Bewegung des Körpers und wird daher auch passive oder taktile Wahrnehmung genannt [RÉVÉSZ 1950], [GIBSON 1966]. Die taktile Wahrnehmung umfasst das Empfinden von Druck, Berührung, Dehnung und Vibration über Mechanorezeptoren in der menschlichen Haut, welche gemeinsam mit dem Temperatur- und Schmerzsinne die Oberflächensensibilität bilden [SHEPHERD 1993]. Im Gegensatz dazu beschreibt das sensomotorische System eine aktive Reizwahrnehmung auf sensorischer und motorischer Ebene durch eine selbstständige, aktive, motorische Bewegung des Körpers [RÉVÉSZ 1950], [GIBSON 1966]. Daher wird auch von aktiver oder auch kinästhetischer Wahrnehmung gesprochen, wobei über die Propriozeptoren im Skelett sowie in Knochen, Gelenken und Muskeln Rückmeldung über die Gelenkstellung und Muskelaktivität gegeben wird [GRUNWALD & BEYER 2001, S. 10], [HAGENDORFER 2011, S. 143]. Die kinästhetische Wahrnehmung wird auch als Tiefensensibilität bezeichnet [KANDEL 1996, S. 390]. Das Zusammenspiel des somatosensorischen sowie des sensomotorischen Systems, beispielsweise beim Berühren und Abtasten, wird als haptische Wahrnehmung bezeichnet (vgl. GRUNWALD & BEYER [2001, S. 10] oder HAGENDORFER [2011, S. 142]).

Für die Interaktion mit einer berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle mit ultraschallbasiertem Feedback bedeutet dies, dass bei der Interaktion mit einem virtuellen Bedienelement im Raum eine Überlagerung aus taktiler und kinästhetischer Wahrnehmung auftritt. Analog zur realen Welt wird bei der Interaktion im Raum das virtuelle Bedienelement berührt und abgetastet. Das ultraschallbasierte Feedback adressiert



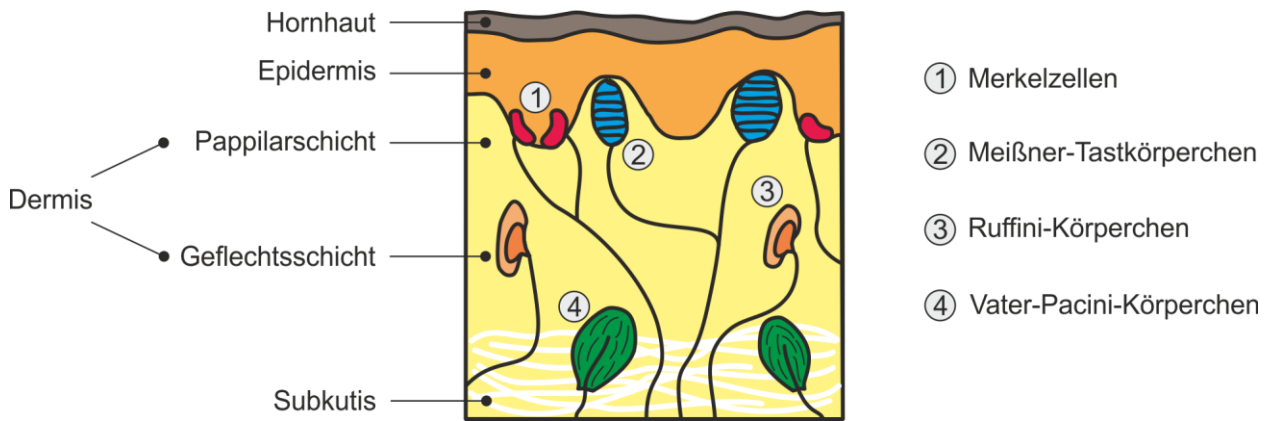
dabei die taktile Wahrnehmung, jedoch führt der Nutzer eine aktive Bewegung bei der Interaktion mit dem Bedienelement aus.



**Bild 2.6:** Einteilung des Tastsinns in Anlehnung an GRUNWALD & BEYER [2001]

### 2.5.1 Biologische Grundlagen der taktilen Wahrnehmung

Bei der Interaktion mit einer berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle mit ultraschallbasiertem Feedback stimulieren die in der Handfläche fokussierten Ultraschallwellen die taktile Wahrnehmung. Dabei werden vor allem die Mechanosensoren der unbehaarten Haut der Handfläche erregt [DIN EN ISO 9241-910 2011], [SHEPHERD 1993]. Die Haut des Menschen ist ein komplexes, lebenswichtiges Organ, welches als Grenzfläche zwischen wechselnden äußeren Umwelteinflüssen und inneren körperseitigen Bedingungen fungiert und neben einer Schutzfunktion den Austausch von Stoffen und Informationen mit der Umwelt ermöglicht [AUMÜLLER ET AL. 2017, S. 1286], [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 198]. Je nach Körperregion treten behaarte und unbehaarte Hautareale, wie beispielsweise die Handflächen oder Fußsohlen auf [MÖRIKE ET AL. 2001, S. 495], [SHEPHERD 1993, S. 224]. Die behaarte als auch die unbehaarte Haut lassen sich dabei in die drei Schichten Epidermis, Dermis und die Subkutis einteilen [MÖRIKE ET AL. 2001, S. 495], [AUMÜLLER ET AL. 2017, S. 1287], [FEIGENSPAN 2017, S. 641]. Ein schematischer Aufbau der unbehaarten Haut, wie sie an der Handfläche zu finden ist, ist in Bild 2.7 zu sehen. Neben dem Aufbau der Haut sind in den Hautschichten ebenfalls die entsprechenden Mechanosensoren, welche für die taktile Wahrnehmung von Druck-, Berührungs-, Dehnungs- und Vibrationsempfindungen verantwortlich sind, dargestellt. Auf Druck bzw. Druckänderungen reagieren gemäß Tabelle 2.1 Mechanosensoren wie die Merkelzellen, und Ruffini-Körperchen [SCHAAL ET AL. 2016, S. 165], wohingegen die Meissner-Tastkörperchen und Vater-Pacini-Körperchen auf Vibration reagieren [SPECKMANN ET AL. 2013, S. 63]. Die Verteilung der Mechanosensoren über die Körperfläche variiert sehr stark (vgl. Tabelle 2.1), wobei die Rezeptordichte an den Fingern am höchsten ist [PAPE ET AL. 2014, S. 707].



**Bild 2.7:** Schematischer Aufbau der menschlichen Haut sowie der integrierten Rezeptorzellen; eigene Darstellung in Anlehnung an FRINGS & MÜLLER [2019, S. 270]

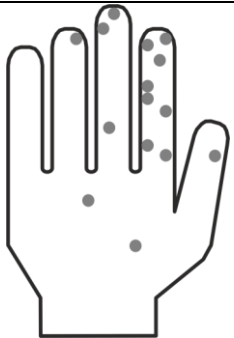


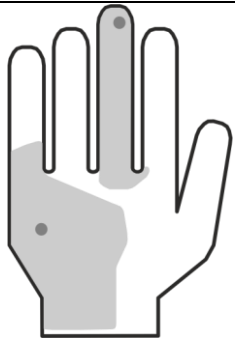
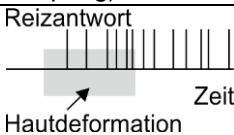
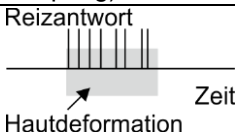
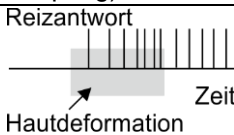
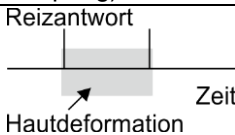
Die oberste Hautschicht ist die Epidermis und enthält keine Gefäße, jedoch freie Nervenendigungen und Merkelzellen [AUMÜLLER ET AL. 2017, S. 1288]. Die Epidermis ist ein mehrschichtiges zur Umwelt hin verhornendes Plattenepithel mit einer Dicke von 0,5 mm [SCHAAL ET AL. 2016], welches durch eine Basalmembran zur Dermis abgegrenzt ist [AUMÜLLER ET AL. 2017, S. 1288]. Nach FEIGENSPAN [2017, S. 642] besitzen die Merkelzellen eine kapselartige Struktur, in welche afferente Nervenendigungen eingebettet sind. Die Kapsel überträgt nur bestimmte mechanische Eigenschaften des Reizes, so dass diese eine Art Filter darstellt [FEIGENSPAN 2017, S. 642], [GRUNWALD & BEYER 2001, S. 28]. Die Merkelzellen (1) sind nach Bild 2.7 an der Grenze zwischen der Epidermis und der darunterliegenden Dermis, oberhalb der Basalmembran angesiedelt [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 210]. Merkelzellen (vgl. Tabelle 2.1) zählen zu den langsam adaptierenden (slowly adapting) (SA-I)-Rezeptoren, wobei über die gesamte Reizdauer an den Nervenendigungen ein Antwortsignal ausgegeben wird [AUMÜLLER ET AL. 2017, S. 1209], [GRUNWALD & BEYER 2001, S. 31]. Das Reiz-Antwortverhalten in Tabelle 2.1 zeigt dabei, dass auch nach der Hautdeformation (grauer Bereich) noch eine Reizantwort erfolgt. Der Durchmesser der rezeptiven Feldgröße beträgt an der Fingerbeere ca. 9 mm<sup>2</sup> bei einer Innervationsdichte von 100 Rezeptoren pro cm<sup>2</sup> (punktförmige Verteilung vgl. Tabelle 2.1) [PURVES ET AL. 2019, S. 186]. Dadurch wird die Oberflächenbeschaffenheit, Textur und Form eines Gegenstands sehr gut abgebildet [PURVES ET AL. 2019, S. 187]. Merkelzellen reagieren auf schwache, senkrecht auf die Haut wirkende mechanische Reize [PAPE ET AL. 2014, S. 706], besitzen mit einer Zweipunktschwelle von 0,5 mm die höchste räumliche Auflösung der Mechanosensoren (vgl. Tabelle 2.1) [PURVES ET AL. 2019, S. 187] und werden daher auch als Berührungs- und empfindlicher Drucksinn bezeichnet [AUMÜLLER ET AL. 2017, S. 1209].

Die darunterliegende Dermis kann in zwei weitere Schichten unterteilt werden (siehe Bild 2.7). Die Papillarschicht besteht aus Kollagenfasern und Bindegewebe, worin neben Lymphkapillaren, Nervenenden, Kapillarschlingen, Bindegewebs- und Immunzellen auch Mechanosensoren wie die Meißner-Tastkörperchen (vgl. Bild 2.7 (2)) eingebettet sind [AUMÜLLER ET AL. 2017, S. 1209]. Die Meißner-Tastkörperchen sind in den Fingerspitzen mit bis zu 150 Tastkörperchen pro  $\text{cm}^2$  vertreten und zählen zu den schnell adaptierenden (rapidly adapting) (RA-I)-Rezeptoren (siehe punktförmige Verteilung in Tabelle 2.1) [PURVES ET AL. 2019, S. 187]. RA-Rezeptoren senden dabei nur bei einer Zustandsänderung, das bedeutet beim Einsetzen und Enden des Stimulus ein Antwortsignal aus (vgl. Reiz-Antwortverhalten in Tabelle 2.1) [GOLDSTEIN 2008, S. 336]. Diese Mechanosensoren reagieren auf Druckänderungen [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 211] bzw. Vibrationen im Frequenzbereich von 5 - 50 Hz, welche typisch für auf der Hautoberfläche gleitende Gegenstände sind und bilden folglich die Geschwindigkeit einer Bewegung auf der Hautoberfläche ab [FEIGENSPAN 2017, S. 643]. Nach PURVES ET AL. [2019, S. 187] liegt die rezeptive Feldgröße bei  $22 \text{ mm}^2$  und das räumliche Auflösungsvermögen dieser Rezeptoren bei 3 mm. Nach AUMÜLLER ET AL. [2017, S. 1209] werden die Meißner-Tastkörperchen zur taktilen Erkennung von Gegenständen genutzt und bilden somit den Tast- und Berührungssinn.

Die darunterliegende Geflechtsschicht besteht aus ungeordneten Kollagenfasern, welche für die Dehnbarkeit der Haut verantwortlich sind [MÖRIKE ET AL. 2001, S. 496ff.], [FEIGENSPAN 2017 S. 643]. In dieser Hautschicht sind die Ruffini-Körperchen (3) (siehe Bild 2.7) anzutreffen [BIRBAUMER 2006]. Die Ruffini-Körperchen sind ein Gebilde aus Kollagenfasern, die von einer Nervenfasern umgeben sind und sich bei einer mechanischen Deformation der Haut verformen [PAPE ET AL. 2016, S. 706]. Ruffini-Körperchen kommen mit einer Innervationsdichte von 10 pro  $\text{cm}^2$  vergleichsweise selten vor, was sich auch in der rezeptiven Feldgröße mit  $60 \text{ mm}^2$  widerspiegelt (vgl. grauer Bereich in Tabelle 2.1) [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 211], [PURVES ET AL. 2019, S. 187]. Sie zählen zu den langsam adaptierenden (SA-II)-Rezeptoren (vgl. Reiz-Antwortverhalten in Tabelle 2.1) und sind in der Lage anhand des Dehnungsmusters der Haut die Richtung von Objektbewegungen zu detektieren [FEIGENSPAN 2017, S. 643], [PURVES ET AL. 2019, S. 187].

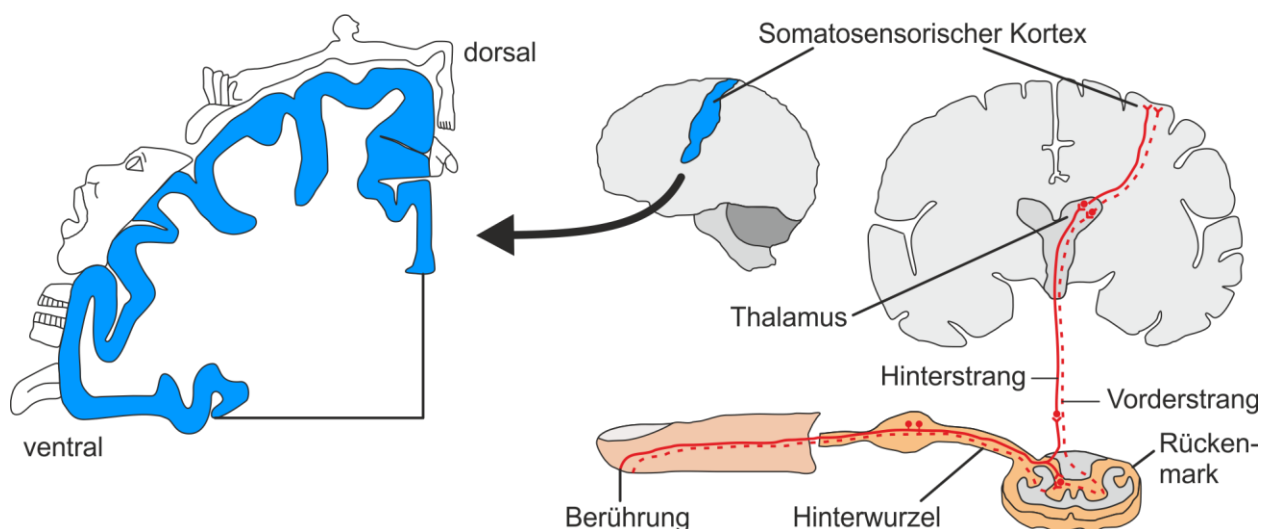
Die unterste Hautschicht, die Subkutis, stellt die Verbindung zwischen Haut und oberflächlicher Körperfazie her und führt die großen Blutgefäße, welche zur Versorgung der Haut nötig sind [MÖRIKE ET AL. 2001, S. 496ff.]. Eingebettet in diese Gewebsstruktur sind

die Vater-Pacini-Körperchen (4) (siehe Bild 2.7) zur Detektion von Vibrationen [MÖRIKE ET AL. 2001, S. 496ff.], [AUMÜLLER ET AL. 2017, S. 1293f.]. Vater-Pacini-Körperchen sind zwiebelartig umhüllte Nervenfasern [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 212] und werden durch eine sich ändernde Geschwindigkeit, welche ihrerseits sich abwechselnde mechanische Druckreize in Form von Vibrationen im Frequenzbereich von 40 - 1000 Hz [GRUNWALD & MÜLLER 2017] induziert, erregt [PAPE ET AL. 2014, S. 706], [SPECKMANN ET AL. 2013, S. 60]. Dabei handelt es sich um schnell adaptierende (RA-II)-Rezeptoren mit hoher Empfindlichkeit (vgl. Tabelle 2.1) [PAPE ET AL. 2014, S. 706], [PURVES ET AL. 2019, S. 186]. Nach PURVES ET AL. [2019, S. 186] liegt die Innervationsdichte bei 20 Rezeptoren pro  $\text{cm}^2$ . Die rezeptive Feldgröße erstreckt sich über einen ganzen Finger oder gar die Hand, wobei die räumliche Auflösung bei größer 10 mm liegt (vgl. grauer Bereich in Tabelle 2.1).

	Kleine rezeptive Felder		Große rezeptive Felder	
	Merkelzellen (1)	Meißner-Tastkörperchen (2)	Ruffini-Körperchen (3)	Vater-Pacini-Körper (4)
<b>Vorkommen</b>	Epidermis (Fingerspitzen)	Papillarleisten, oberflächliche Dermis	Dermis	Dermis und Subkutis
<b>Verteilung (Handfläche rechts)</b>				
<b>Adaptionsverhalten</b>	Langsam	Schnell	Langsam	Schnell
<b>Typ</b>	SA I (slowly adapting)	RA I (rapid adapting)	SA II (slowly adapting)	RA II (rapid adapting)
<b>Reiz-Anwort-verhalten</b>				
<b>Empfindung</b>	Vertikaler Druck, Hautdeformation	Hautberührung, Geschwindigkeit	Laterale Zugspannung	Beschleunigung
<b>Funktion</b>	Erkennung von Form und Textur, gute räumliche Auflösung	Wahrnehmung von niederfrequenten Vibrationen (20 bis 50 Hz), Wahrnehmung entgleitender Objekte	Druck, Scherkräfte	Höherfrequente Vibration (10 bis 1000 Hz)

**Tabelle 2.1:** Übersichtsdarstellung der Eigenschaften der Mechanorezeptoren in Anlehnung an FEIGENSPAN [2017, S. 644] und MÜLLER ET AL. [2022]

Bei der Reizweiterleitung (siehe Bild 2.8) übermitteln die Rezeptorzellen sogenannte Aktionspotentiale, kleine elektrische Signale auch Nervenimpulse genannt, über afferente Nervenfasern (siehe Bild 2.8) an das zentrale Nervensystem (Rückenmark und Gehirn) [GRUNWALD & BEYER 2001]. Im Rückenmark ziehen die afferenten mechanorezeptiven Nervenfasern über die Hinterstrangbahn in den Thalamus und das Kleinhirn [PAPE ET AL. 2014, S. 721], [GRUNWALD & BEYER 2001, S. 43]. Im Thalamus werden die gefilterten Signale zum somatosensorischen Kortex im Pariatallappen geleitet (siehe Bild 2.8 rechts) [GOLDSTEIN 2015, S. 334], [BIRBAUMER 2006, S. 311]. Dieser ist Untersuchungen von PENFIELD & RASMUSSEN [1950] zufolge analog einer Landkarte aufgebaut, wobei verschiedene Hautareale an verschiedenen Stellen des Kortex repräsentiert werden. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde der sensorische Homunkulus (vgl. Bild 2.8 links) abgeleitet [BIRBAUMER 2006, S. 312]. Zu sehen ist, dass die Körperareale, mit kleinen rezeptiven Feldern, wie beispielsweise die Fingerspitzen, die Mund- oder auch Fußregion, überproportionale Areale auf dem somatosensorischen Kortex einnehmen [BRANDES ET AL. 2019, S. 649]. Das Potenzial der somatosensorischen Areale des Hand- und Fingerbereichs ist daher für die Übertragung von taktilen Informationen besonders interessant und bildet die Grundlage für die Entlastung des audiovisuellen Wahrnehmungskanals des Operators während der Ausführung einer Haupt- und Nebenaufgabe im Operationssaal.



**Bild 2.8:** Reizweiterleitung vom Finger zum Gehirn (rechts) und sensorischer Homunkulus (links); eigene Darstellung in Anlehnung an [GOLDSTEIN 2008, S. 338, BIRBAUMER 2006, S. 312]



Informationsinhalte zu verstehen und anhand von im Langzeitgedächtnis gespeicherten mentalen Modellen, Mustern und Handlungsabfolgen zu interpretieren [MYERS 2014], [ZÜHLKE 2012, S. 18]. Die Wahrnehmung ist folglich für die Enkodierung, Filterung und Unterscheidung der Sinnesreize verantwortlich und steht dabei im engen Austausch mit dem Langzeitgedächtnis (siehe Bild 2.9) [KLUWE 2006, S. 37], [ZÜHLKE 2012, S. 18f.]. Die abschließende Phase in Bild 2.9 beschreibt die Handlungsentscheidung und das Antwortverhalten auf eine Information, wie bspw. eine Bewegungsreaktion [WICKENS ET AL. 2004, S. 121], [SCHLICK ET AL. 2010, S. 287].

Die Information, welche aus einem Sinnesreiz enkodiert wird, ist zentraler Faktor der Informationsverarbeitung. Der Begriff „Information“ stammt aus dem lateinischen „informatio“ und bedeutet Bildung oder Belehrung [DUDEN 2023C]. In der Wissenschaft wird unter Information der „Gehalt einer Nachricht, die aus Zeichen eines Codes zusammengesetzt ist“ verstanden [DUDEN 2023C]. Nach SHANNON & WEAVER [1976, S. 19 - 22] stellt die Information die Wahrscheinlichkeit dar innerhalb einer Nachricht einen bestimmten Zustand anzunehmen. Zur Berücksichtigung der Bedeutung der Information im Informationsverarbeitungsprozess entwickelte GITT [1994, S. 66] auf Basis der Sender-Empfänger-Theorie von SHANNON & WEAVER [1976] ein erweitertes Informationsmodell (siehe Bild 2.10). Dieses Informationsmodell ist in die fünf Ebenen Statistik, Syntax, Semantik, Pragmatik und Apobetik gegliedert [GITT 1994, S. 66] und eignet sich nach SCHMID & MAIER [2017, S. 50] im Bereich des Technischen Interface Designs am besten für die Beschreibung der wechselseitigen Informationsübertragung zwischen Mensch und Maschine. Die fünf Ebenen bedingen sich dabei gegenseitig und gelten sowohl für die Sender- als auch die Empfänger-Seite [GITT 1994, S. 91]. Diese werden auf der Sender-Seite von oben nach unten (top-down) und auf der Empfänger-Seite von unten nach oben (bottom-up) durchlaufen [SCHMID & MAIER 2017, S. 51]. Die erste Ebene, die Statistik, beschreibt analog zum Informationsmodell von SHANNON & WEAVER [1976] die statistische Anordnung von Zeichen oder Symbolen in Form eines Signals, welches vom Sender gesendet und vom Empfänger empfangen wird [GITT 1994, S. 64ff.]. Die zweite Ebene, die Syntax-Ebene (griech.: syntaxis = Anordnung, Lehre vom Satzbau), befasst sich mit Vereinbarungen, Codes und Regeln für die Generierung von Zeichen und Zeichenketten ungeachtet der späteren Interpretation [EBD., S. 67f.]. In Ebene 3, der semantischen Ebene (griech.: semantikos = bezeichnend, bedeutend), geht es um die Bedeutung der Zeichenkette. Durch die Interpretation des Codes und der Regeln wird der Information eine Bedeutung zugesprochen [EBD., S. 81].







Dazu werden in einem Feld planar angeordnete Ultraschallwandler phasenversetzt angesteuert, sodass die Ultraschallwellen in einem Fokuspunkt oberhalb des Arrays konstruktiv interferieren. Da der Fokuspunkt aufgrund des Frequenzbereichs des Ultraschalls von den Mechanosensoren der Haut nicht wahrgenommen werden kann [KANDEL ET AL. 2012], wird dieser mittels einer Hüllkurve moduliert. Die technologischen Grundlagen dazu werden in diesem Kapitel hergeleitet und erläutert.

Ultraschallwellen sind mechanische Schwingungen im nicht hörbaren Frequenzbereich des Menschen ( $> 20$  kHz) [LERCH ET AL. 2009], [KUTTRUFF 2004, S. 751]. Zur Erzeugung von Ultraschall werden in der Regel piezoelektrische Schallwandler genutzt, welche ein elektrisches Signal in eine mechanische Schwingung transferieren [WOOH & SHI 1999A], [SCHMERR 2015], [HASEGAWA ET AL. 2018]. In gasförmigen Medien und in Flüssigkeiten breitet sich die mechanische Schwingung in Form einer Longitudinalwelle aus. Diese mechanische Schwingung übt durch den akustischen Strahlungsdruck (Schalldruckpegel) einen Druck auf die Hautoberfläche aus, welcher über den taktilen Wahrnehmungskanal detektiert werden kann [DALECKI ET AL. 1995].

Zur gezielten Beschallung bestimmter Raumbereiche oder einzelner Raumpunkte werden lineare oder auch flächenartige Anordnungen von Ultraschallwandlern genutzt. Diese werden so abgestimmt, dass sich ihre Schallfelder konstruktiv überlagern. Für das Verständnis der Erzeugung und Steuerung eines Ultraschall-Strahlungsfeldes wird zunächst ein einzelner planarer Kolbenstrahler betrachtet. Das Schallfeld eines Arrays, bestehend aus  $N$  Ultraschallwandlern, kann als Summe der Einzelschallfelder eines jeden Kolbenstrahlers angesehen werden [PARK ET AL. 2006, S. 164], [LERCH ET AL. 2009, S. 145], [WOOH & SHI 1999B, S. 249].

$$p(r) = \sum_{i=1}^N p_i(r) \quad (2.1)$$

Der Kolbenstrahler wird als eine kreisförmige, starre Schallquelle angenommen, welche im Ruhezustand bündig in einer unendlich ausgedehnten schallharten Wand liegt. Der Berechnung des durch die schwingende Membran vor der Wand erzeugten Schallfeldes liegt das Huygenssche Prinzip zu Grunde, dass jeder Punkt einer Wellenfront einer Welle Ausgangspunkt für eine neue Elementarwelle ist [LERCH ET AL. 2009, S. 807f.], [JÄGER 2019, S. 17]. Gedanklich wird dazu die schwingende Ebene in infinitesimal kleine Volumenelemente zerlegt. Dabei wird jedes Flächenelement  $dA$  der Membran als

Elementarstrahler mit der Schallflussamplitude  $q_0 = v_0 dA$  betrachtet, der eine Kugelwelle aussendet (siehe Bild 2.11). Betrag und Phase der Schallschnelle sind über die Membranfläche  $A$  konstant. Das Schallfeld im Raum vor der Wand entsteht durch Interferenz der Felder aller Elementarstrahler. Da die Abstrahlung nur in den Halbraum vor der Wand erfolgt, muss der Faktor  $1/2$  in die Formel integriert werden. Nach LERCH ET AL. [2009, S. 149] und MÖSER [2005, S. 88] ergibt sich das Geschwindigkeitspotential in einem Punkt im Raum vor dem Kolbenstrahler durch Integration zu:

$$\underline{\Phi} = \frac{1}{2\pi} \int_A v_0 \frac{e^{-jkr}}{r} dA \quad (2.2)$$

Daraus folgt für den Schalldruck [LERCH ET AL. 2009, S. 149], [SCHMERR 2015, S. 117], [PARK ET AL. 2006, S. 164]:

$$\underline{p}(r) = j\omega\rho_0\underline{\Phi}(r) = \frac{j\omega\rho_0v_0}{2\pi} \int_A \frac{e^{-jkr}}{r} dA \quad (2.3)$$

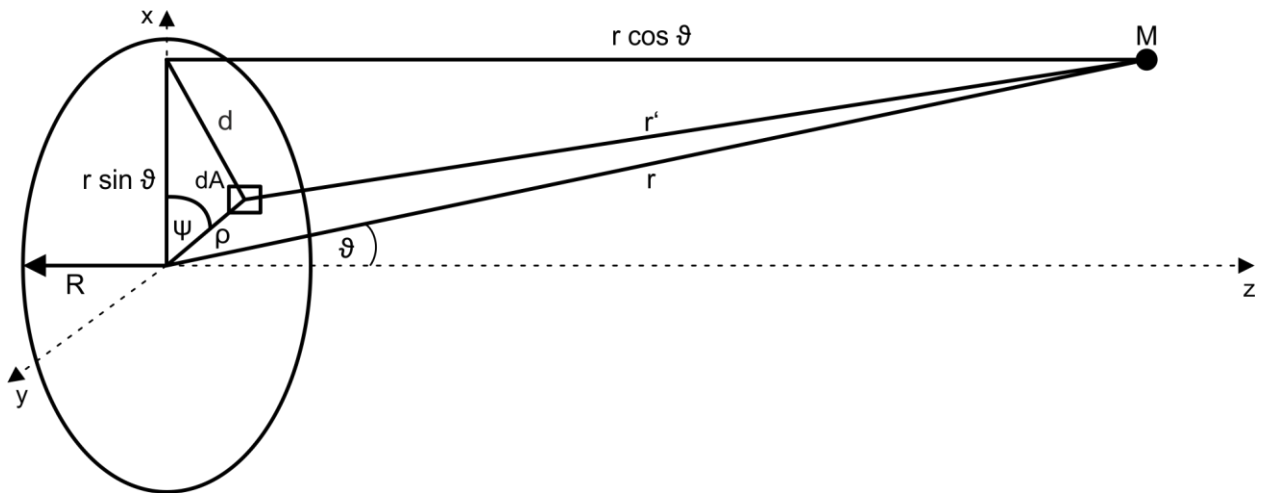
Die Lösung des Rayleigh-Integrals ist in geschlossener Form nicht möglich [LERCH ET AL. 2009, S. 149], [MÖSER 2005 S. 89], [PARK ET AL. 2006, S. 164]. Für eine Reihe von Spezialfällen gibt es jedoch analytische Lösungen. Bezüglich der Erzeugung des taktilen Feedbacks im Raum, welches im Fernfeld des Ultraschallwandler-Arrays angesiedelt ist, kann die Komplexität der Strahlungsberechnung deutlich reduziert werden. Das Fernfeld des Strahlers ist jener Ort des Schallfelds vor dem Strahler, dessen Abstand bedeutend größer ist als der Durchmesser des Strahlers ( $r \gg \emptyset$ ) [LERCH ET AL. 2009, S.156], [MÖSER ET AL. 2005 S. 90]. Dazu wird der Schalldruck an einem Punkt  $M$  im Raum vor dem kreisförmigen Strahler des Radius  $R$  als Interferenz der Teilschalldrücke der einzelnen Flächenelemente  $dA$  bestimmt (vgl. Bild 2.11). Der Radius  $\rho$  und der Winkel  $\psi$  beschreiben die Koordinaten des Flächenelements  $dA$ ,  $r$  den Abstand vom Mittelpunkt des Strahlers zum Punkt  $M$  und  $r'$  den Abstand vom Flächenelement zum Punkt  $M$  sowie der Winkel  $\vartheta$  die Neigung von  $r$  zur  $z$ -Achse. Das Geschwindigkeitspotential ergibt sich dabei zu:

$$\underline{\Phi} = \frac{1}{2\pi} \int_A v_0 \frac{e^{-jkr'}}{r'} dA = \frac{1}{2\pi} \int_{\rho=0}^R \int_{\psi=0}^{2\pi} v_0 \frac{e^{-jkr'}}{r'} \rho d\rho d\psi \quad (2.4)$$

Gemäß Bild 2.11 gelten folgende geometrische Beziehungen:

$$r'^2 = r^2 \cos^2 \vartheta + d^2 \quad (2.5)$$

$$d^2 = r^2 \sin^2 \vartheta + \rho^2 - 2r\rho \sin \vartheta \cos \psi \quad (2.6)$$



**Bild 2.11:** Berechnung des Fokuspunkts in Anlehnung an LERCH ET AL. [2009, S. 157]

Daraus folgt für Gleichung (2.5):

$$r'^2 = r^2 + \rho^2 - 2r\rho \sin \vartheta \cos \psi \quad (2.7)$$

Da der Abstand  $r$  deutlich größer ist als der Durchmesser  $\rho$  ( $r \gg \rho$ ), kann der Abstand  $r'$  näherungsweise wie folgt beschrieben werden:

$$r' = r \sqrt{1 + \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 - \frac{2\rho}{r} \sin \vartheta \cos \psi} \approx r - \rho \sin \vartheta \cos \psi \quad (2.8)$$

Mit dieser Näherung ergibt sich für das Geschwindigkeitspotential:

$$\underline{\Phi}(r, \vartheta) = \frac{v_0}{2\pi r} e^{-jkr} \int_{\rho=0}^R \int_{\psi=0}^{2\pi} e^{jk\rho \sin \vartheta \cos \psi} \rho d\rho d\psi \quad (2.9)$$

Mit Hilfe der Bessel-Funktion 0. Ordnung ( $J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{jx \cos \psi} d\psi$ ) [KINO 1987, S. 169]

folgt nach LERCH ET AL. [2009, S. 158] und AZHARI [2010, S. 164]:

$$\int_{\psi=0}^{2\pi} e^{jk\rho \sin \vartheta \cos \psi} d\psi = 2\pi J_0(k\rho \sin \vartheta) \quad (2.10)$$

Diese Formel kann nun geschlossen integriert werden. Das Geschwindigkeitspotential ergibt sich zu:

$$\underline{\Phi} = \frac{v_0}{r} e^{-jkr} \int_{\rho=0}^R \rho J_0(k\rho \sin \vartheta) d\rho \quad (2.11)$$

Unter Beachtung von  $\int x J_0(x) dx = x J_1(x)$  und durch Substitution von  $k\rho \sin \vartheta = x$  ergibt sich Gleichung (2.10) zu:

$$\int_{x=0}^{kR \sin \vartheta} \frac{x}{k \sin \vartheta} J_0(x) \frac{dx}{k \sin \vartheta} = \frac{x J_1(x)}{k^2 \sin^2 \vartheta} \Big|_0^{kR \sin \vartheta} = R^2 \frac{J_1(kR \sin \vartheta)}{kR \sin \vartheta} \quad (2.12)$$

Das Geschwindigkeitspotential ist somit definiert durch:

$$\underline{\Phi}(r, \vartheta) = v_0 R^2 \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{J_1(kR \sin \vartheta)}{kR \sin \vartheta} \quad (2.13)$$

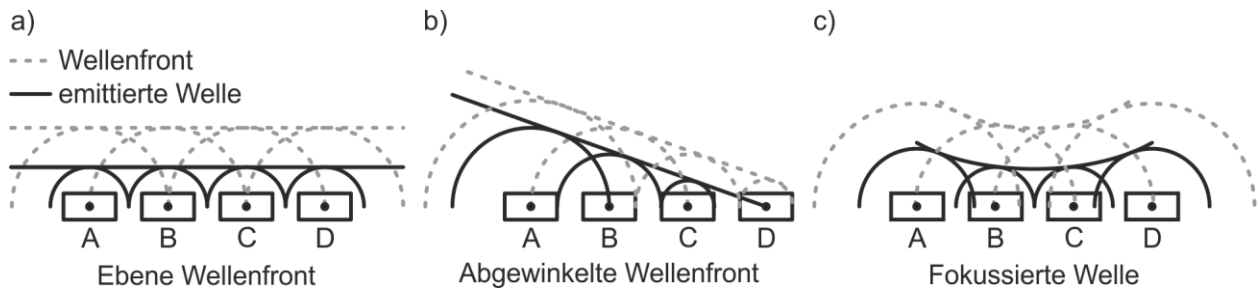
Nach Differentiation durch die Zeit ergibt sich der Schalldruck zu:

$$\underline{p}(r, \vartheta) = [j\omega \rho_0 v_0 R^2] \left[ \frac{e^{-jkr}}{r} \right] \left[ \frac{J_1(kR \sin \vartheta)}{kR \sin \vartheta} \right] \quad (2.14)$$

$$\underline{p}(r, \vartheta) = [j\rho_0 c k v_0 R^2] \left[ \frac{e^{-jkr}}{r} \right] \left[ \frac{J_1(kR \sin \vartheta)}{kR \sin \vartheta} \right] \quad (2.15)$$

Die Gleichung des Schalldrucks besteht aus drei separaten Termen. Der erste Term beschreibt die Amplitude des Schallfelds. Diese ist abhängig von der Fläche des Strahlers und der Frequenz. Der zweite Term zeigt die charakteristische Funktion einer Kugelwelle. Anhand des Nenners dieser Gleichung ist erkennbar, dass der Druck im Schallfeld mit zunehmendem Abstand des Punktes im Fernfeld abnimmt. Der Exponentialausdruck ist komplex und moduliert die Phase in Abhängigkeit von der Entfernung und der Zeit. Der dritte Term beschreibt die Bessel-Funktion und wird als Richtungsfaktor des Feldes bezeichnet. [AZHARI 2010, S. 165], [LERCH ET AL. 2009, S. 158f.]

Durch die gezielte Anordnung und Verschaltung mehrerer Kolbenstrahler können sogenannte Arrays gebildet werden, um den Schalldruck an einem definierten Punkt oder Bereich zu verstärken [PARK ET AL. 2006], [LONG ET AL. 2014]. Durch eine zeitverzögerte nichtlineare Ansteuerung der einzelnen Ultraschallwandler kann durch gleichphasige Überlagerung der Schallwellen beliebig im Raum eine Wellenfront erzeugt, gelenkt oder in einem Fokuspunkt fokussiert werden (vgl. Bild 2.12) [WOOH & SHI 1999A], [LERCH ET AL. 2009, S. 145]. Gemäß des Huygensschen Prinzips sind die vier Wandler in Bild 2.12 jeweils Ausgangspunkt einer Elementarwelle deren Wellenberge und Wellentäler konstruktiv interferieren. Zur Erzeugung einer ebenen Wellenfront (vgl. Bild 2.12a) werden alle vier Ultraschallwandler (A-D) mit demselben Signal angesteuert. Mit Hilfe einer zeit- oder phasenverzögerten Ansteuerung der Ultraschallwandler kann die Wellenfront abgewinkelt (vgl. Bild 2.12b) oder das Schallfeld in einem Punkt fokussiert werden (vgl. Bild 2.12c). [JÄGER 2019, S. 17]



**Bild 2.12:** Steuerung von Wellenfronten in Anlehnung an JÄGER [2019, S. 17]

Zur Erzeugung eines beliebigen taktilen Feedbacks im Raum ist es notwendig die Elementarwellen der einzelnen Ultraschallwandler zu lenken und zu fokussieren. Durch Fokussierung der Wellenfronten der einzelnen Elementarwellen in einem Punkt wird mittels konstruktive Interferenz im Fokuspunkt lokal ein höherer Druck erzielt, im Vergleich zu einem einzelnen Ultraschallwandler. Die Fokussierung und Lenkung erfolgt dabei durch die Ansteuerung der einzelnen Ultraschallwandler mittels eines Zeit- oder Phasenunterschieds. Aufgrund der konstanten Schallgeschwindigkeit kann über den Abstand des Ursprungs der Elementarwelle zum Fokuspunkt für jeden Ultraschallwandler der Zeit- und Phasenunterschied berechnet werden. Es ergibt sich der Zeitunterschied nach YUAN ET AL. [2019] bezüglich des Abstands des  $i$ -ten Ultraschallwandlers  $T_i(x_i, y_i, 0)$  und dem Brennpunkt  $M(x, y, z)$  zu:

$$t_i = \frac{(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z^2})}{c} \text{ [rad]} \quad (2.16)$$

Auf Basis des Zeitunterschieds der einlaufenden Elementarwellen im Fokuspunkt erfolgt ein phasenversetztes Ansteuern der Ultraschallwandler, damit die Ultraschallwellen im Fokuspunkt konstruktiv interferieren. Dazu kann anhand der Gleichung (2.16) der Phasenunterschied für jede Elementarwelle berechnet werden.

$$\rho_i = 2\pi f t_i \text{ [rad]} \quad (2.17)$$

Die alleinige Fokussierung der Ultraschallwellen auf der Hautoberfläche erzeugen keinen taktil wahrnehmbaren Stimuli beim Menschen, da der Frequenzbereich des Ultraschalls mit 20 kHz - 20 MHz zu hoch ist, um von den Mechanorezeptoren der menschlichen Haut wahrgenommen werden zu können (vgl. 0,4 Hz - 500 Hz [GESCHEIDER ET AL. 2002]). Daher ist es notwendig den Schalldruck im Fokuspunkt zusätzlich zu modulieren [MULOT ET AL. 2021], [YUAN ET AL. 2019, S. 2246]. Der Schalldruck wird mit Frequenzen in einem für den Menschen wahrnehmbaren Bereich nach GESCHEIDER ET AL. [2002] moduliert. Dieses sich periodisch ändernde bzw. bewegende Schalldruckfeld wird über die Mechanosensoren der Haut wahrgenommen.

Für die Modulation des Schallfelds gibt es derzeit zwei gebräuchliche Methoden. Zum einen kann bei der „räumlich-zeitlichen Modulation“ ein Stimulus durch die Bewegung des Fokuspunktes erreicht werden. Die Bewegung des Fokuspunktes kann dabei hinsichtlich des Ortes sowie der Intensität und Geschwindigkeit moduliert werden [MULOT ET AL. 2021]. Des Weiteren kann ein Stimulus durch sogenannte Amplitudenmodulation (AM) erreicht werden. Bei der Amplitudenmodulation wird die Intensität des Fokuspunktes in einem für den Nutzer wahrnehmbaren Rhythmus mit einer Frequenz zwischen 50 und 250 Hz periodisch geändert [IWAMOTO ET AL. 2008]. Dabei werden die Ultraschallwandler periodisch ein- und ausgeschaltet, wodurch die Mechanorezeptoren der Vater-Pacini-Körper stimuliert werden. Diese reagieren auf Vibrationsreize im Frequenzbereich von 20 - 1000 Hz, sind jedoch bei einer Frequenz zwischen 200 - 250 Hz am empfindlichsten [FRIER ET AL. 2022], [BISWAS ET AL. 2014]. Im Vergleich zur Amplitudenmodulation können mit der räumlich-zeitlichen Modulation stärkere Empfindungen und das Zeichnen von taktilen Formen und Konturen mit mehreren Fokuspunkten realisiert werden [HAJAS ET AL. 2020], [HOWARD ET AL. 2019]. Untersuchungen von HOWARD ET AL. [2019] zeigen jedoch, dass sich die Amplitudenmodulation besser für die Kennzeichnung einzelner Punkte im Raum eignet als die räumlich-zeitliche Modulation.

### 3 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die derzeitigen Systeme zur Erfassung von Freihandgesten (Kapitel 3.1) und die entsprechenden Technologien zur Erzeugung eines taktilen Feedbacks im Raum (Kapitel 3.2). Es werden dazu aktuelle Forschungsarbeiten zur Gestenerfassung und zum taktilen Feedback im Raum diskutiert sowie bestehende Lücken und der weitere Forschungsbedarf (Kapitel 3.3) aufgezeigt.

#### 3.1 Handtrackingsysteme

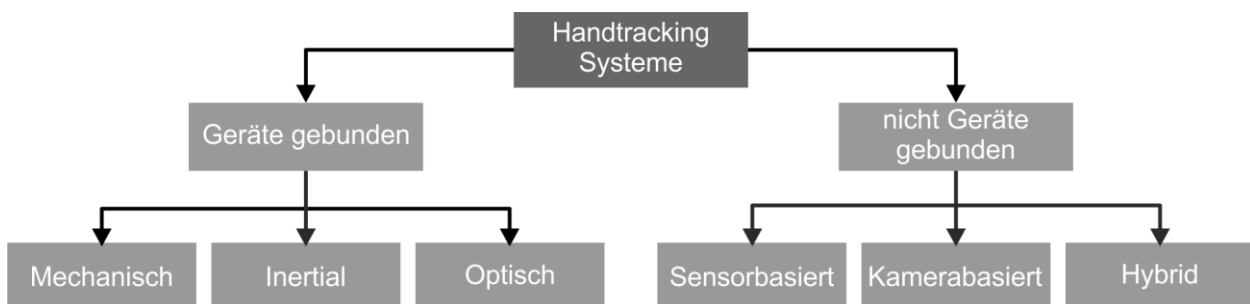
Aufgrund des Vorteils der kontaminationsfreien Interaktion in sterilen Bereichen (vgl. Kapitel 1.1) stellen medizinische Systeme und Assistenzsysteme in der Medizin sinnvolle Anwendungen für gestische Interaktionen dar [WACHS ET AL. 2011]. WACHS ET AL. [2008] zeigen beispielsweise, dass Chirurgen via Handgesten auf einem entfernten Bildschirm Navigationsaufgaben ausführen können. Ein weiteres Beispiel für die berührungslose Interaktion im OP-Saal liefern RITTER ET AL. [2009], welche Informationen aus einem virtuellen OP-Planungsmodell während der Operation via Handgesten abrufen. Anhand dieser Studien ist ersichtlich, dass Natural User Interfaces eine bedeutende Rolle in der zukünftigen Interaktion mit medizinischen Geräten einnehmen [SIM ET AL. 2021, S. 2].

Nach HOFFMEYER [2013] beschreibt der Begriff „Tracking“ das Erfassen der Position eines Objekts im Kontext eines zuvor festgelegten Koordinatensystems. Je nach Geste und Anwendungsfall werden für die Detektion von Freihandgesten im Raum unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Diese lassen sich nach PICKERING ET AL. [2007] oder NOWACK [2017] in gerätegebundene und nicht-gerätegebundene Technologien einteilen. Bild 3.1 zeigt eine Übersicht der Systeme bezüglich der Erkennungstechnologien von Gesten. Bei den gerätegebundenen Technologien handelt es sich um Systeme, bei welchen mit Wearables gearbeitet wird. Wearables sind Geräte, die am Körper getragen werden und mit deren Hilfe die Detektion der Körper- oder Handgesten von einem separat stehenden Empfänger erfolgt. Am gebräuchlichsten sind Handschuhe mit integrierten Sensoren zur Positionserfassung der Geste (vgl. Data Glove [ZIMMERMANN ET AL. 1987], Cyber Glove [KRAMER UND LEIFER 1989] oder Dexterous Hand Master [BOUZIT ET AL. 2002]). Die beschriebenen Systeme werden jedoch von den Nutzern häufig als umständlich empfunden [vgl. TURK 2002]. Nach PICKERING ET AL. [2007] sind diese Systeme aufgrund der geringen Nutzerakzeptanz auch bspw. wenig geeignet für Anwendungen in Fahrzeugen.

Zur nicht-gerätegebundenen Gestenerkennung zählen die kamerabasierten und sensorbasierten Erkennungssysteme. Dabei kommen unterschiedliche Technologien zum Einsatz. Die Wirkprinzipien der sensorbasierten Systeme gründen auf elektrischen oder magnetischen Feldern, Ultraschallwellen oder Radarstrahlung. [STECHER 2019, S. 18]

Eine weitere Möglichkeit für die Erfassung von Freihandgesten stellen kamerabasierte Systeme dar. Zur Identifizierung der Freihandgesten kommen diverse Kamerasysteme auf Basis von Farb-, Intensitäts- oder Tiefeninformationen zum Einsatz. Diese Informationen werden dazu genutzt, die Hand vom Hintergrund zu trennen und deren Eigenschaften (Form, Bewegung, etc.) zu erkennen. [WEICHERT ET AL. 2013]

2D-Kamerasysteme erfassen beispielsweise die Freihandgesten via einer RGB-Kamera, mit welcher mittels Farbsegmentierung oder Hintergrundsubtraktion Farb- oder Helligkeitswerte definierter Bildbereiche betrachtet und mit hinterlegten Mustern abgeglichen werden. Die gravierendste Schwäche dieser Systeme besteht in einer unzureichenden Beleuchtung. Bei der Nutzung von Infrarotkameras wird Strahlung im nahen Infrarotbereich genutzt. Allerdings geht bei dieser Technologie die Farbinformation verloren und starke Sonneneinstrahlung beeinflusst die Zuverlässigkeit dieses Systems [SHARMA ET AL. 2018].



**Bild 3.1:** Übersicht Gestenerkennungssysteme

Zuverlässiger arbeiten 3D-Kamerasysteme, welche neben 2D-Bildern zusätzlich eine Tiefeninformation liefern. Dadurch können Vordergrundobjekte deutlicher vom Hintergrund segmentiert werden. Time-of-Flight-Kameras nutzen die Lichtlaufzeit, indem moduliertes Licht im Nah-Infrarotbereich ausgesendet und von Oberflächen reflektiert wird. Anhand des Phasenunterschieds zwischen aus- und einlaufender Welle kann auf das Objekt referenziert werden. Eine weitere Alternative stellt die Gestenerfassung mittels einer Stereokamera dar. Dabei wird anhand der Einzelbilder der Kameras über die Querdisparität der Bildpaare die Entfernung zum Objekt bestimmt, analog des menschlichen Auges. Nachteil dieses Systems ist der hohe Rechenaufwand zur Mustererkennung. Da diese Systeme ebenfalls Intensitäts- oder Farbunterschiede nutzen, er-



geben sich weitere Einschränkungen analog zu 2D-Kamerasystemen. [STECHEER 2019] Bei den vorgestellten kamerabasierten Trackingverfahren kann ferner detailliert unterschieden werden, ob sich diese auf den gesamten Körper (Body Motion Tracking, bspw. Microsoft Kinect) beziehen oder nur auf einzelne Körperteile wie beispielsweise die Hand (Hand Motion Tracking, bspw. Leap Motion Controller) [FENG ET AL. 2021], [MCCARTNEY ET AL. 2015]. Um das taktile Feedback gezielt auf die Handinnenfläche oder auf ein einzelnes Fingerglied zu projizieren, eignet sich, nach Studien von FENG ET AL. [2021], SILVA ET AL. [2013], WEICHERT ET AL. [2013] aufgrund der höheren Genauigkeit der Leap Motion Controller besser als die Kinect Kamera von Microsoft. Insbesondere für medizinische Anwendungen sind aufgrund von Hygienebestimmungen und Sterilität kamerabasierte Trackingverfahren von Interesse (vgl. bspw. SHARMA ET AL. [2018], AMEUR ET AL. [2016]).

Im Rahmen der Untersuchungen zum taktilen Feedback einer berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle wird in Kombination mit dem Ultrahaptics STRATOS Explore (vgl. Kapitel 3.2) zur Handdetektion der Leap Motion Controller verwendet. Die Abmessung des Leap Motion Controllers betragen 80 x 30 x 12,7 mm [AMEUR ET AL. 2016], [POTTER ET AL. 2013]. Der Leap Motion Controller nutzt drei Infrarot-LED-Leuchten zur Belichtung des Objekts. Die reflektierte Infrarotstrahlung wird indessen von zwei CMOS-Kameras im Abstand von 40 mm zueinander erfasst und via USB-Kabel an den Computer weitergeleitet [YOUNG ET AL. 2020]. Die Beleuchtungs-LEDs als auch die Kameras arbeiten dabei im Spektrum des Nah-Infrarotbereichs [SHARMA ET AL. 2018]. Die Bilderfassungsrates reicht von 50 - 200 Hz [AMEUR ET AL. 2016], [OH ET AL. 2021]. Aufgrund der Kameraanordnung wird der Leap Motion Controller den stereovisuellen Systemen zugeordnet [WEICHERT ET AL. 2013]. Die Kameras liefern Stereofotos aus Graustufen im Infrarotbereich [SHARMA ET AL. 2018], welche Daten bezüglich der Handfläche, den Fingern und Fingerknochen der detektierten Hand enthalten [BASSILY ET AL. 2014], [NOVACEK & JIRINA 2021]. Mit Hilfe des Computers wird durch die Handverfolgungssoftware von Ultraleap die Grundstruktur der Hand auf Basis von Gelenken, Hand- und Fingerknochen modelliert [AMEUR ET AL. 2016], [BASSILY ET AL. 2014]. Folglich kann die Software die Position einzelner Finger genau bestimmen, selbst wenn diese durch andere Körperteile verdeckt sind [NOVACEK & JIRINA 2021]. Nach AMEUR ET AL. [2016] und SHARMA ET AL. [2018] besitzt der Leap Motion Controller zwei bedeutende Schwächen. Zum einen ist der Bereich für die Ausführung der Gesten nur in einem begrenzten pyramidenförmigen Raum mit einem Öffnungswinkel von  $140^\circ \times 120^\circ$  und einer Höhe von

100 - 800 mm möglich [AMEUR ET AL. 2016], [SHARMA ET AL. 2018]. Ein weiteres Problem stellen Streulicht sowie reflektiertes Licht von Kleidung oder Hand- bzw. Fingerschmuck dar, welche das detektierte Infrarotlicht zusätzlich aufhellen können [SHARMA ET AL. 2018]. Nach SIM ET AL. [2021] existiert beim Einsatz von Tracking-Technologien eine Lücke zwischen der virtuellen und der realen Welt, die geschlossen werden muss. Einen Ansatz dazu liefern natürliche Benutzerschnittstellen (NUI), bei welchen die Interaktion zwischen Mensch und Maschine bspw. durch Sprache, Berührung, Bewegung und sogar Gehirnwellen ausgeführt wird [MICHIDORI ET AL. 2019]. Nach SUZUKI & KOBAYASHI [2005] ist haptisches Feedback unumgänglich, um die Interaktion in virtueller Umgebung bzw. mit virtuellen Bedienelementen für den Benutzer realistischer zu gestalten und die Akzeptanz der Nutzer gegenüber einer virtuellen Interaktion zu steigern. In Kombination mit Motion Tracking-Systemen werden vor allem Untersuchungen mit haptischen Systemen, welche ein haptisches oder taktilen Feedback erzeugen durchgeführt [SIM ET AL. 2021]. Um ein haptisches oder taktilen Feedback zu erzeugen, gibt es zwei grundlegende Ansätze: die Nutzung von tragbaren Geräten, wie beispielsweise taktilen Handschuhen oder die Übertragung taktiler Reize in der Luft [HOSHI & SHINODA 2016]. Im Folgenden wird auf beide Möglichkeiten näher eingegangen.

### 3.2 Feedback im Raum

Den am weitesten entwickelte Ansatz zur Hand- und Fingerdetektion und gleichzeitiger Erzeugung eines taktilen, haptischen Feedbacks stellen Handschuhe mit Inertialsensoren zur Detektion der Fingerpositionen dar [MA & BEN-TZVI 2015], [BLAKE & GUROCAK 2009]. Das System „CyberGrasp“ nutzt die Vorteile eines Datenhandschuhs zur Positionsbestimmung und die eines Exoskeletts zur Erzeugung eines haptischen Force-Feedbacks [TURNER ET AL. 1998], [GU ET AL. 2016]. Ein ähnliches Technologieprinzip weist auch „Haptx“ auf. Hier sorgen pneumatische Stellteile für das Force-Feedback [PERRET & VANDER POORTEN 2018]. Ein bedeutender Nachteil dieser Technologien resultiert im Platz für die Sensorik und Aktorik, welche im oder auf dem Handschuh verbaut werden müssen. Daneben ergibt sich mit Fokus auf die Medizintechnik ein weiteres Problem, da mit den beschriebenen Systemen keine Arbeiten in einem sterilen Arbeitsbereich durchgeführt werden können. Die in diesem Absatz beschriebenen Technologien sind nur indirekt berührungslos, da sie zwar keine Berührung mit dem Interface erfordern, aber eine Berührung mit einem anderen, tragbaren Gerät. Trotz großer Weiterentwicklungs- und Miniaturisierungsbestrebungen der haptischen Handschuhe in den letzten Jahren ist

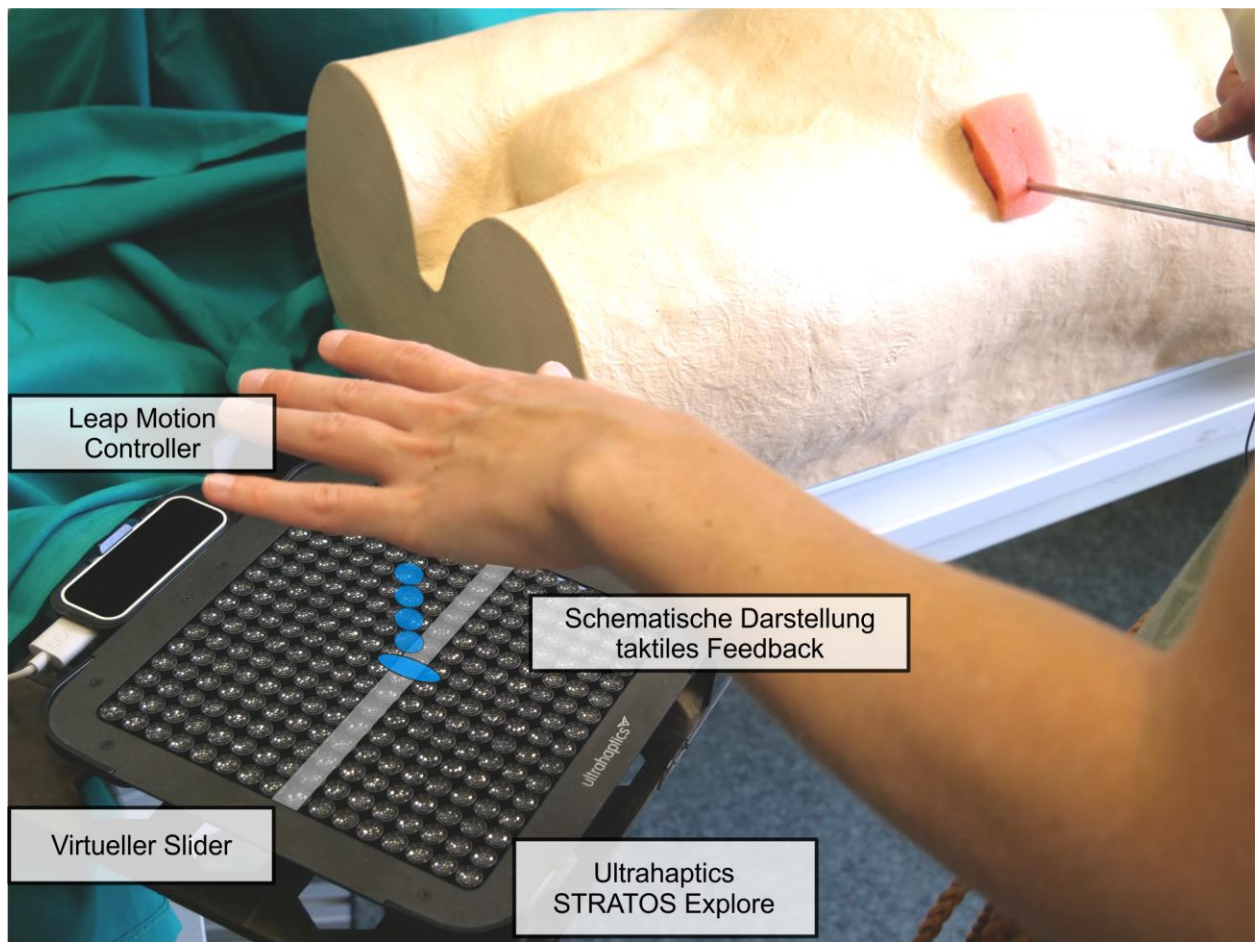
der Einsatz in der Medizin aufgrund von Hygienebestimmungen ungeeignet im täglichen Gebrauch. Mit Fokus auf die Medizin besteht Bedarf an einem berührungslosen haptischen oder taktilen Feedback im Raum. Die Reizung der Rezeptoren erfolgt dabei durch mechanische oder thermische Energie (bspw. durch Druck oder Vibration). Zur Erzeugung eines kontaktlosen, haptischen Feedbacks im Raum gibt es nach ARAFSHA ET AL. [2015] drei Forschungsansätze.

Ein Ansatz zur Erzeugung eines kontaktlosen, haptischen Feedbacks kann über einen verdichteten Luftstrom, welcher gezielt auf die Handfläche trifft, realisiert werden. Bei diesem System werden Luftringe in Form von Luftwirbeln in Richtung des Nutzers in den Raum appliziert, welche vom Nutzer wahrgenommen werden können [SODHI ET AL. 2013]. Mit Fokus auf die Medizin entwickelten BIANCHI ET AL. [2011] ein taktilen Feedback durch einen Luftstrahl, welches den Operateur bei der Palpation bei minimalinvasiven, robotergestützten Eingriffen unterstützen soll. Ziel ist es Veränderungen im Gewebe möglichst genau wahrzunehmen. Dabei wird das taktile Feedback in Form eines Luftstrahls direkt auf die Fingerkuppe appliziert [EBD.]. Aufbauend auf diesem System erweitern TSALAMLAL ET AL. [2013] den Interaktionsraum des taktilen Feedbacks auf eine Reichweite größer 10 cm. Aufgrund der geringen Reichweite des Feedbacks und der damit verbundenen Nähe zum Eingabegerät ist der Einsatzbereich der Luftströme sehr begrenzt.

Ein weiterer Ansatz zur Generierung von taktilem Feedback bei der Interaktion im Raum besteht in der Nutzung von Lasern. JUN ET AL. [2015] konnten den Nachweis erbringen, dass durch laserinduzierte, thermoelastische Effekte ein taktiles Gefühl auf der menschlichen Haut hervorgerufen werden kann. Die Forschergruppe um LEE ET AL. [2016] entwickelte das System Laser Stroke, mit welchem Bewegungen der Hand verfolgt und Konturen auf die Handfläche induziert werden können. Da die direkten Laserimpulse nur ein sehr begrenztes und individuell verschiedenes taktilen Feedback in Form von „Stechen“ oder „Wärme“ erzeugen, verfolgen KIM ET AL. [2021] einen neuen Ansatz unter der Verwendung von Laserplasma zur Erzeugung des taktilen Feedbacks. Weitere Ansätze zur Generierung eines taktilen Feedbacks unternahmen SPELMEZAN ET AL. [2017] mit der Applikation eines elektrischen Blitzes auf der Fingeroberfläche zur Erzeugung eines taktilen und thermischen Feedbacks. Ein in der Forschung stark fokussierter Ansatz ist die Nutzung von fokussiertem Ultraschall. Durch konstruktive Interferenz werden die Ultraschallwellen gezielt an einem Punkt im Raum gebündelt. Durch Modulation der Amplitude der Ultraschallfrequenz kann die Stärke der Empfindung des Fokuspunktes moduliert werden [IWAMOTO ET AL. 2008], [VAQUERO-MELCHOR & BERNARDOS 2019]. Trifft

der Fokuspunkt auf die menschliche Haut, wird durch den sich ändernden Schalldruck eine taktile Empfindung initiiert, welche über die Mechanorezeptoren in der Hand des Nutzers wahrgenommen werden kann [RAKKOLAINEN ET AL. 2021]. Der Vorteil gegenüber anderen Methoden ist die hohe zeitliche und räumliche Auflösung, wodurch eine genaue Fokussierung der Ultraschallwellen im Raum möglich ist [CHOUVARDAS ET AL. 2008], [RAKKOLAINEN ET AL. 2021]. Die Verwendung von Ultraschall im Raum für eine taktile Anzeige sowie die Entwicklung eines Prototyps, welcher einen fixen Fokuspunkt zur haptischen Wahrnehmung erzeugt, wurden erstmals von IWAMOTO ET AL. [2008] gezeigt. Durch Forschungsarbeiten von HOSHI ET AL. [2009A], HOSHI ET AL. [2010], HOSHI [2011] ist es möglich den Fokuspunkt im Raum gezielt zu bewegen und zu steuern. HOSHI [2012] konnte die Erkennung von Buchstaben auf der Handfläche, welche mittels ultraschall-basiertem Feedback auf diese projiziert wurden, nachweisen. Den Ansatz zur Erzeugung mehrerer gleichzeitiger Fokuspunkte lieferten CARTER ET AL. [2013] aus deren Arbeit ein erstes kommerziell erhältliches Ultraschallarray von Ultrahaptics entwickelt wurde [KORRES ET AL. 2017, S. 294], [RAIKKOLAINEN ET AL. 2021, S. 4]. Neben einigen eigenen prototypischen Aufbauten der jeweiligen Forschungsgruppen wird gegenwärtig zur Erzeugung des taktilen Feedbacks im Raum mittels Ultraschallwandler meist das Ultrahaptics von Ultraleap Ltd. eingesetzt (vgl. bspw. [HARRINGTON ET AL. 2018] oder [FRIEDRICH ET AL. 2022]). Die aktuellste am Markt erhältliche Version des Ultrahaptics, das STRATOS Explore, ist in Bild 3.2 dargestellt. Hierbei handelt es sich um ein Array aus 16 x 16 Ultraschallwandlern in Kombination mit einem Leap Motion Controller zur Generierung von taktilen Feedback im Raum für interaktive Interfaces. Im Gesamtsystem stellt das Ultrahaptics in Anlehnung an Bild 2.4 den Anzeiger und der Leap Motion Controller das Stellteil dar. Die Ultraschallwandler werden mit einer Frequenz von 40 kHz betrieben [GEORGOIU ET AL. 2018], [CILLES ET AL. 2019]. Zur Entwicklung unterschiedlicher Anwendungen stehen softwareseitig C#, C++ sowie Unity mit den Erweiterungskits von Leap Motion und Ultrahaptics zur Verfügung [GEORGOIU ET AL. 2018]. Die Erzeugung des Fokuspunktes erfolgt nach den im Kapitel 2.6 beschriebenen Grundlagen zur Erzeugung eines Fokuspunktes mittels konstruktiver Interferenz von Ultraschallwellen bei Phased Arrays.

Zur optimalen Wahrnehmung des Fokuspunktes wird eine Distanz von 5 mm - 700 mm zum Array empfohlen. Das Intensitätslevel im Fokuspunkt reicht von 0 % (0 Pa) bis 100 % (1124 Pa) gemessen im Abstand von 200 mm zum Ultraschallarray. [HOWARD ET AL. 2019]



**Bild 3.2:** Ultrahaptics STRATOS Explore mit virtuellem Slider und schematischer Darstellung des taktilen Feedbacks

Zur Wahrnehmung des ultraschallbasierten Feedbacks auf der menschlichen Haut muss der Fokuspunkt weiter moduliert werden. Dazu gibt es aktuell zwei verschiedene Ansätze. Zum einen kann die Empfindung durch Amplitudenmodulation einzelner oder mehrerer gleichzeitig auftretender statischer oder bewegter Fokuspunkte im Raum generiert werden [IWAMOTO ET AL. 2008], [HOSHI 2011], [CARTER ET AL. 2013], [HOWARD ET AL. 2019], zum anderen werden durch spatiotemporale Modulation (Raum-Zeit-Modulation) haptische Empfindungen durch die Verschiebung der Position des Fokuspunktes erzeugt [HOWARD ET AL. 2019]. Die Wahrnehmung des Fokuspunkts auf der Haut infolge der Amplitudenmodulation erfolgt durch die Ausübung von Druckschwankungen auf der Hautoberfläche. Die primären Mechanorezeptoren, die durch Druckschwankungen stimuliert werden, sind die Vater-Pacini-Körperchen. Die Empfindlichkeit der Stimulationsfrequenz dieser besitzt einen Bereich von 5 - 1.000 Hz, wobei die höchste Empfindlichkeit bei 200 Hz erreicht wird [KANDEL ET AL. 2012]. Studien von KANDEL ET AL. [2012] oder GIL ET AL. [2018] zeigen, dass durch eine niederfrequente Stimulation auch Meissner-Körperchen mit dieser Methode stimuliert werden können. Bei der spatiotemporalen Modulation

(STM) werden Meissner- und Vater-Pacini-Körperchen stimuliert [RAKKOLAINEN ET AL. 2021]. Neben der Wahrnehmung des Reizes sind vor allem die Parameter, die zur Detektion und Unterscheidung des Reizes notwendig sind von Interesse der Forschung. Dazu gibt es zahlreiche Studien, welche beispielsweise den Einfluss der Intensität des Schalldrucks [HOWARD ET AL. 2019], [MARCHAL ET AL. 2020], die Dauer des Reizes [GIL ET AL. 2018], [HOSHI ET AL. 2009B], die Amplituden-Modulations-Frequenz [CARTER ET AL. 2013], [HASEGAWA & SHINODA 2018], [RAZA ET AL. 2019], den Projektionsort auf der Hautoberfläche des Körpers [SUN ET AL. 2019], [MIZUTANI ET AL. 2019], [VO & BREWSTER 2015], die Lage des Fokuspunktes im Raum [WILSON ET AL. 2014], [RAZA ET AL. 2019] und die Anzahl an gleichzeitig auftretenden Fokuspunkten [CARTER ET AL. 2013], [ALEXANDER ET AL. 2011] untersuchen. SUN ET AL. [2019] und WILSON ET AL. [2014] wiederum untersuchten die Wahrnehmung des taktilen Feedbacks auf verschiedenen Handarealen sowie die Auswirkungen der Bewegung von Fokuspunkten auf der Haut. Andere Forschungsgruppen wie beispielsweise LONG ET AL. [2014] zeigten, dass die taktile Darstellung und Wahrnehmung von geometrischen Konturen, wie bspw. Ecken, Rundungen, Phasen etc. im Raum möglich ist. KORRES & EID [2016] belegen, dass Konturen auch mit einer Punktwolke (Haptogram) erzeugt werden können. FRIER ET AL. [2018] oder MARTINEZ ET AL. [2018] beschäftigten sich hingegen mit Untersuchungen zur Erzeugung und Wahrnehmung verschiedener Muster auf der Hand. HAJAS ET AL. [2020] untersuchten Unterschiede verschiedener Gestaltmuster bei einer statischen oder einer dynamischen Projektion der Kontur in die Handinnenfläche. Die Forschungen von FREEMAN ET AL. [2017] oder GEORGIU ET AL. [2022] zeigen, dass neben der Kontur auch die Textur eines virtuellen Objekts wahrgenommen werden kann. Die bedeutendste Anwendung von taktilen Feedback liegt derzeit im Bereich der Virtual oder Mixed Reality. Die Integration eines taktilen Feedbacks zur Exploration und Interaktion mit virtuellen Objekten erhält zunehmend Einzug in diese Forschungsbereiche. SAND ET AL. [2015] kombinieren ein Head-Mounted-Display mit einem Ultraschallarray inklusive Kamerasystem und weisen nach, dass die Empfindung der mentalen, körperlichen und zeitlichen Beanspruchung der Probanden durch das taktile Feedback geringer bewertet wird. Immer stärker rücken auch Anzeigen und Informationstafeln in den Fokus des berührungslosen taktilen Feedbacks. So untersucht beispielsweise LIMERICK [2020] in einer Studie die Reaktion auf die Wahrnehmung des taktilen Feedbacks und die Interaktion mit diesem anhand einer Informationstafel in der Öffentlichkeit. Im Automobilsektor existieren ebenfalls einige Forschungsprojekte zur Integration von ultra-

schallbasiertem Feedback im Fahrzeuginnenraum. GEORGIU ET AL. [2017] entwickelten beispielsweise ein gestenbasiertes Interface mit taktilem Feedback zur Steuerung der Lautstärke und der Gebläsestufe im PKW oder GIRDLER & GEORGIU [2020] geben bspw. einen Einblick in die Eignung der Nutzung des taktilen, ultraschallbasierten Feedbacks in Flugzeugcockpits und Simulatoren. Einen Ansatz für die Medizin liefern HUNG ET AL. [2013] und HUNG ET AL. [2014], welche eine Bildschirmanwendung mit ultraschallbasiertem Feedback im Raum zu Trainingszwecken von Kardiologen entwickelten, mit welcher pulsierende Blutgefäße dargestellt und wahrgenommen werden können. ROMANUS ET AL. [2019] entwickelten einen Ansatz zur Darstellung von Organen in Mixed Reality, mit welchem es dem Nutzer ermöglicht wird durch die Kombination mit ultraschallbasiertem Feedback im Raum den Herzschlag der virtuellen Anwendung wahrzunehmen.

### **3.3 Zusammenfassung der relevanten Forschungsarbeiten**

In der Medizintechnik ist der dominierende Wahrnehmungskanal bei der Interaktion zwischen Mensch und Maschine in erster Linie das visuelle Sinnessystem, gefolgt von akustischen Reizen. Dass dies vor allem in stressrelevanten und komplexen Situationen wie der Ausführung von parallelen Tätigkeiten zu Konflikten bei der Kommunikation zwischen Mensch und Maschine führen kann, wurde anhand wissenschaftlichen Untersuchungen belegt [SCHLICK ET AL. 2010, S. 972]. Nach ZÜHLKE [2012, S. 227] funktioniert die Kommunikation des Menschen mit einer Maschine dann möglichst gut und fehlerfrei, wenn möglichst viele Sinneskanäle beim Informationsaustausch beteiligt sind. Untersuchungen von SPENCE & HO [2008] zeigen, dass taktile Anzeigen dazu verwendet werden können, Nutzern, die visuell überfordert sind, komplexe Informationen zu vermitteln. Anhand der im vorangehenden Kapitel beschriebenen Forschungsarbeiten ist ersichtlich, dass es nur sehr wenige Untersuchungen zur Integration eines taktilen Feedbacks im Raum für virtuelle Bedienelemente gibt. Derzeitige Untersuchungen fokussieren vor allem die Simulation und Erzeugung von Fokuspunkten, Formen und Geometrien im Raum sowie die Optimierung der Leistungsparameter des Ultraschallarrays. Dabei steht die Untersuchung von Anzeigemöglichkeiten mittels taktilen Feedback im Fokus. Mit Blick auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle fehlt es an der Integration eines direkten, taktilen Feedbacks bei der Interaktion mit der Maschine. Die Übertragung von taktilen Informationen, wie beispielsweise bei der Bedienung über ein physisches Stellteil wird

bis dato bei der Handgestensteuerung nur wenig betrachtet. Tabelle 3.1 fasst die relevanten Forschungsarbeiten zusammen und verschafft einen Überblick.

FRIER ET AL. [2013] präsentieren ein berührungsloses taktiles Display, bei welchem mittels fokussierten Ultraschallwellen die Buttonauswahl mit einem taktilen Feedback unterstützt wird. RÜMELIN ET AL. [2017] unterstützen beispielsweise durch einen Feedbackimpuls die Auswahl eines Buttons im Raum. Ein ähnliches System nutzen auch FRIEDRICH ET AL. [2022] oder EVANGELOU ET AL. [2021], welche Untersuchungen zur User Experience durchführen und daraus Gestaltungsempfehlungen für die taktile Interaktion mit Buttons im Raum ableiten. ITO ET AL. [2018] integrieren mittels ultraschallbasiertem Feedback das Click-Gefühl in einen virtuellen Button im Raum und konnten nachweisen, dass dieses von den Probanden wahrgenommen werden kann. SCHMID ET AL. [2021A] untersuchten verschiedene Parameter der Feedbackintensität zur Erzeugung eines Click-Gefühls bei der Buttoneingabe. Studien von HARRINGTON ET AL. [2018], welche neben der Buttoneingabe auch die Bedienung von Schiebereglern via Gesten mit taktilen Feedback im Raum während der Ausführung einer Haupt- und Nebenaufgabe im Fahrsimulator untersuchten, zeigen, dass die Aufgabenerfüllung mit taktilen Feedback besser ist, als ohne Feedback und die Probanden weniger abgelenkt sind. Mit Fokus auf die Bedienung eines virtuellen Sliders untersuchten HOWARD ET AL. [2019] die Erkennung einer sprunghaften Änderung der Feedbackintensität entlang einer taktilen Linie im Raum. Die Erkennung einzelner Skalenpositionen durch Feedbackimpulse entlang eines virtuellen Sliders ist Gegenstand der Forschung von SCHMID ET AL. [2021B]. SCHMID ET AL. [2021B] zeigen somit einen neuen Ansatz auf, indem sie das Prinzip des Stellteils als Anzeiger nutzen und ein virtuelles Bedienelement mit einem ultraschallbasierten taktilen Feedback im Raum kombinieren. Ein bedeutender Forschungsansatz des taktilen Feedbacks liegt neben der Optimierung der technischen Parameter zur Erzeugung des taktilen Feedbacks (vgl. bspw. [RAZA ET AL. 2020], [FRIER ET AL. 2018]) in der Wahrnehmung und Erkennung einzelner Feedbackpunkte oder Muster bzw. Konturen oder Texturen auf der Hautoberfläche (vgl. bspw. [SAND ET AL. 2020]). Im Gegensatz zur Kombination des taktilen Feedbacks mit einer VR-Brille wird die taktile Kodierung von virtuellen Bedienelementen bei der Gestenbedienung in Kombination mit einem Bildschirm gegenwärtig nur wenig untersucht. Hier gibt es vereinzelt Forschungsansätze wie beispielsweise von ITO ET AL. [2018] oder FRIEDRICH ET AL. [2022], die sich meist auf die Kombination des taktilen Feedbacks mit der Buttoneingabe beschränken.



Die in diesem Kapitel genannten Forschungsarbeiten untersuchen allerdings nur bestimmte Bereiche des taktilen Feedbacks im Raum. Keine dieser Arbeiten nennt konkrete Parameter zur Gestaltung des taktilen Feedbacks für die Übertragung von Informationsinhalten im Kontext einer Haupt- und Nebenaufgabe. Zur Nutzung des virtuellen Stellteils bei der Handgestensteuerung als Anzeiger, analog eines physischen Stellteils, ist es daher notwendig die Feedbackparameter des taktilen Feedbacks näher zu untersuchen. Speziell bei der Ausführung von Aufgaben mit hoher Konzentration, wie beispielsweise im Operationssaal, müssen Informationen zwischen Mensch und Maschine über den Systemzustand oder eine Systemänderung eindeutig und sicher übertragen werden. Im folgenden Kapitel werden daher die für diese Forschungsarbeit relevanten Untersuchungsparameter konkretisiert und anschließend hinsichtlich einer effektiven, effizienten und zufriedenstellenden Bedienung der Mensch-Maschine-Schnittstelle untersucht.

Autor(en)	Fokus der Untersuchung
EVANGELOU ET AL. 2021	Untersuchungen zur Änderung der Latenzzeit und der Feedbackintensität bei der Buttonbedienung mit Fokus auf das Handlungsempfinden der Nutzer
FRIEDRICH ET AL. 2022	Untersuchung zum Einfluss des taktilen Feedbacks auf die Buttonbedienung
FRIER ET AL. 2013	Bedienung eines Displays über Buttons mit taktilen Feedback via fokussierten Ultraschallwellen
FRIER ET AL. 2018	Variation der Feedbackintensität, Modulationsfrequenz des Ultraschalls und der Position des Fokuspunktes zur Verbesserung der Wahrnehmung eines Feedbackpunktes auf der Hautoberfläche
HARRINGTON ET AL. 2018	Untersuchungen zur Bedienung eines virtuellen Buttons und eines Schiebereglers mit taktilen Feedback im Fahrzeugkontext
HOWARD ET AL. 2019	Bessere Aufgabenerfüllung mit taktilen Feedback
ITO ET AL. 2018	Entwicklung einer Methode zur Erzeugung eines Quasi-Clickgefühls in der Luft bei der Buttonbedienung
RAZA ET AL. 2020	Studien zur Entlastung des audiovisuellen Wahrnehmungskanals durch taktilen Feedback
RÜMELIN ET AL. 2017	Unterstützung der Buttonauswahl durch taktilen Feedback im Raum
SAND ET AL 2020	Untersuchungen zur Empfindung von taktilen Mustern auf der Haut mit Fokus auf die Wiederholungsrate, Musterlänge und Projektionsgeschwindigkeit.
SCHMID ET AL. 2021A	Untersuchung verschiedener Feedbackintensitätsverläufe zur Erzeugung des Click-Gefühls bei der Buttoneingabe
SCHMID ET AL. 2021B	Untersuchung zur Wahrnehmung von Änderungen der Feedbackintensität bei einer Slidinggeste
SPENCE & HO 2008	Aufbau und Studien zur Sliderbedienung mit einem diskreten Feedback auf Ultraschallbasis

**Tabelle 3.1:** Übersicht der relevantesten Forschungsarbeiten

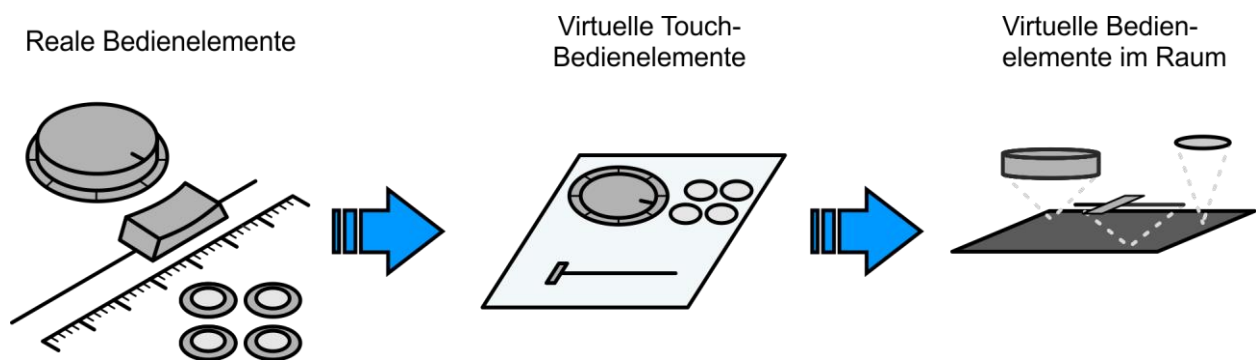
## 4 Herleitung der Versuchsparameter

Kapitel 3 legt den Stand der Forschung dar und zeigt, dass es vielversprechende Ansätze zur Implementierung von haptischem und taktilen Feedback zur Entlastung des audiovisuellen Wahrnehmungskanal bei der Gestensteuerung gibt, aber gleichzeitig noch erheblicher wissenschaftlicher Forschungsbedarf besteht. Das vierte Kapitel beschäftigt sich folglich mit der Herleitung der Versuchsparameter. Zunächst erfolgt die Auswahl des Bedienelements mit Fokus auf ein medizinisches Anwendungsszenario (Kapitel 4.1) und anschließend die Betrachtung von Informationsinhalten sowie deren Übersetzung in taktile Darstellungsmöglichkeiten für die Bedienung medizinischer Geräte (Kapitel 4.2). Das Kapitel 4.3 schließt mit der Herleitung der taktil veränderlichen Gestaltungsparameter bezüglich der Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwelle von Informationsinhalten im Raum ab.

### 4.1 Auswahl des Bedienelements im Kontext eines medizintechnischen Anwendungsfalls

Eine bedeutende Herausforderung bei der gebrauchstauglichen Entwicklung von medizinischen Geräten ist die Zunahme des Funktionsumfangs und der damit einhergehenden Steigerung der Komplexität bei der Bedienung. Die Entwicklungsgeschichte der Medizintechnik zeigt eine Zunahme von Stellteilen, Tastern und Knöpfen, welche die Bedienung und den Umgang mit medizinischen Geräten zunehmend verkompliziert und eine intuitive Bedienung erschwert, was anhand einer steigenden Zahl an Behandlungsfehlern zu beobachten ist [SIGELEN 2018]. In den letzten Jahren zeigt sich ein Wendepunkt in der Gerätekonstruktion, welcher maßgeblich durch den Einsatz von Touch-Bildschirmen ermöglicht wird (siehe Bild 4.1). Es werden dem Nutzer nur die primären Funktionen, welche explizit zur Behandlung benötigt werden auf dem Hauptbildschirm angezeigt [MAIER & SCHMID 2019]. Zusätzliche Auswahlfunktionen und Einstellungen werden auf sekundäre und tertiäre Bedienebenen gelegt, welche im Untermenü eingestellt werden können. Durch diese Reduktion der Komplexität wird eine Entlastung der Nutzer bewirkt. Daraus resultiert eine Steigerung der intuitiven Bedienung bei gleichzeitiger Reduktion von Bedienfehlern. In Kombination mit Bildschirmen kommen dabei zunächst sogenannte Softkeys zum Einsatz. Mittlerweile werden diese durch Touch-Bildschirme ersetzt. Durch den Einsatz von Touch-Bildschirmen erfolgt die direkte Manipulation und Auswahl der Funktion auf der Benutzeroberfläche. Zur Manipulation und Auswahl von Gerätefunktionen werden dabei virtuelle Tasten, sogenannte Buttons, Drehbedienelemente (Dreh-

steller) oder Schieberegler (Slider) implementiert (siehe Bild 4.1). Für die Entlastung des audiovisuellen Wahrnehmungskanal kann die Bestätigung der Eingabe über ein ergänzendes, taktiler Feedback unterstützt werden. Bei der Bedienung mittels Touch-Bildschirmen wird dies beispielsweise über Vibrationsmotoren, Piezzoaktoren und elektrostatische oder magnetische Felder erreicht. Studien von SCHMID & MAIER [2021] zeigen, dass die Bedienung eines Sliders auf einem Touchscreen während des Ausführens einer Hauptaufgabe durch ein diskretes, elektrotaktiler Feedback unterstützt werden kann. In der Medizin bleibt jedoch bei der direkten Auswahl von Gerätefunktionen das Problem der sterilen Bedienung, welche oberste Priorität im medizinischen Bereich insbesondere im Operationssaal besitzt, bestehen. Für die Gewährleistung der Sterilität und zum Schutz der medizinischen Geräte vor einer Beschädigung durch die Sterilisation werden diese derzeit mit transparenten Einwegüberzügen eingehüllt oder durch zusätzliches Personal aus dem unsterilen Bereich bedient [LEINER & CHOJECKI 2008].



**Bild 4.1:** Interfaceentwicklung von Bedienelementen medizinischer Geräte

Abhilfe schafft eine berührungslose Auswahl der Gerätefunktionen, wodurch ohne eine direkte Berührung der Bildschirmoberfläche mit dem vorhandenen Interface interagiert werden kann. Dazu können die vorhandenen virtuellen Bedienelemente der klassischen Touchbedienung wie Button, Drehsteller und Slider verwendet werden (siehe Bild 4.1). Die Eingabe eines präzisen Skalenwerts erfolgt auf Bildschirmen klassisch über eine Tastatur. Diese Tastatur kann auch auf Touchbildschirmen aufgerufen werden. Im Sinne einer intuitiven Bedienung und einer guten Gebrauchstauglichkeit des Geräts ist es oft sinnvoll die Auswahl an Parameterwerten zu beschränken und exaktere Einstellungen über ein Untermenü zu steuern. Ist der Eingabebereich begrenzt oder kann anhand einer vorgegebenen Liste ausgewählt werden, ist es sinnvoll die Tastatur auf der primären Bildschirmoberfläche durch eine gezielte Anzahl an Buttons zu reduzieren oder alternativ die Eingabe des Skalenwerts über einen Slider oder einen Drehsteller zu steuern. Die Bedienung über einen Drehsteller ermöglicht es die Auswahl an Elementen einer Liste

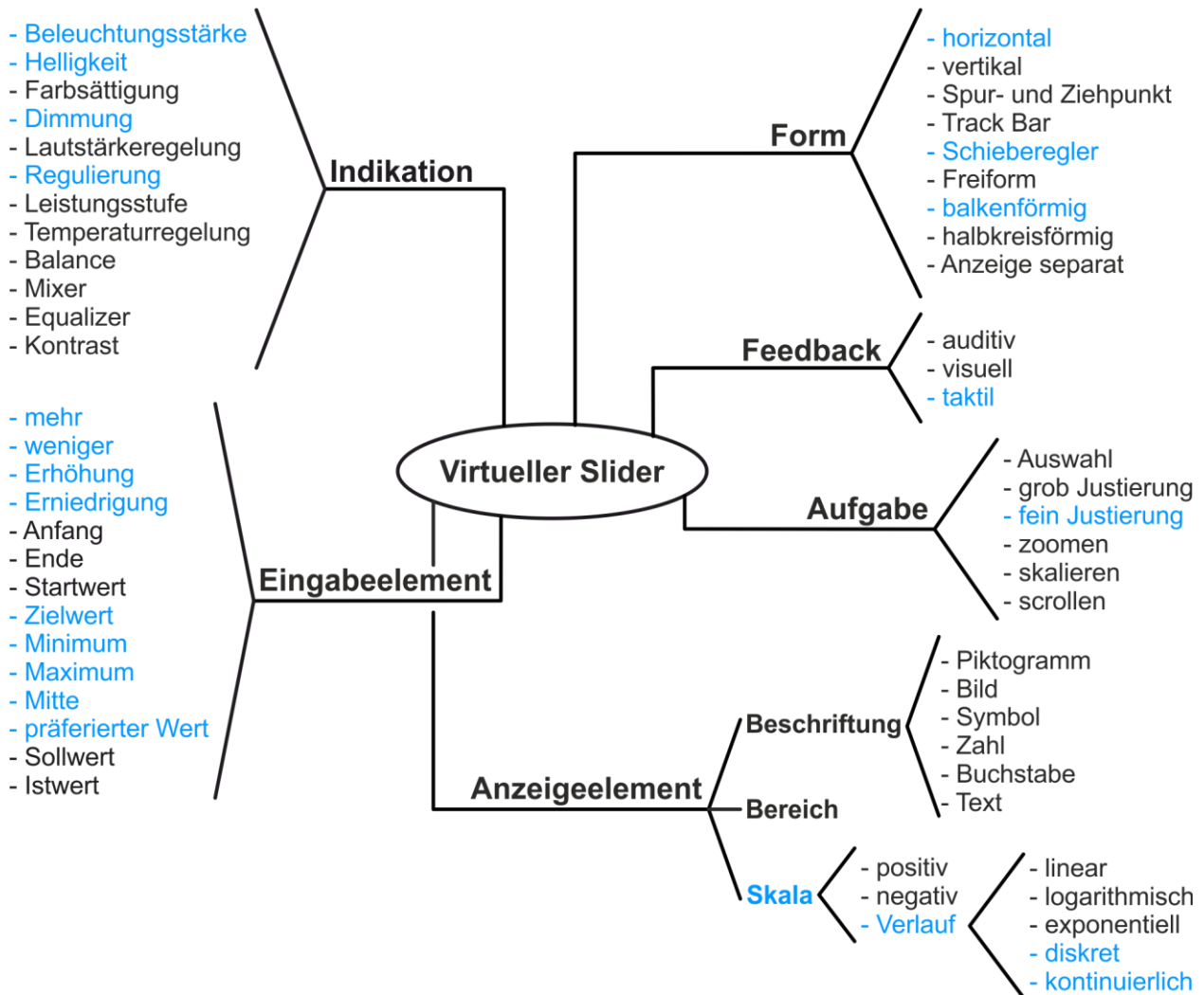
zu erhöhen, da eine Mehrfachbelegung in weiteren Rotationsdurchgängen aufgrund des geringen Platzbedarfs möglich ist. Die nahezu unendliche Auswahlmöglichkeit eines Drehbedienelements ist jedoch an eine steigende Komplexität der Bedienung gekoppelt. Durch die Mehrfachbelegung einzelner Skalenpositionen und der gleichzeitigen Ungewissheit in welcher Rotationsstufe man sich befindet, kann es zu Verwechslungen und letztendlich zu Bedienfehlern kommen. Folglich ist für die Bedienung über ein rotatorisches Bedienelement ein zusätzliches visuelles Feedback erforderlich. Eine Untersuchung im Rahmen der studentischen Arbeit von ACKERMANN [2020] unter Anleitung des Verfassers dieser Arbeit zeigt, dass die Aufgabenerfüllung bei der Blindbedienung über einen taktilen Drehsteller auf einer Touchbedienoberfläche unter nicht korrekt ausgeführten rotatorischen Bewegungen leidet. Als Ursache wird unter anderem eine fehlende Markierung der exakten Kreisbahn angegeben. Mit Fokus auf die Bedienung von medizinischen Geräten und mit Fokus auf eine gute Gebrauchstauglichkeit der Mensch-Maschine-Schnittstelle hinsichtlich der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit wird für die weitere Untersuchung eine geradlinige Bewegung ausgewählt. Die Bedienung erfolgt über einen taktilen Slider ohne Mehrfachbelegung der Skala. Als Bedienaufgabe im Operationssaal eignen sich dabei Regulierungsaufgaben beispielsweise von Leistungsstufen medizinischer Geräte (Absaugungsleistung eines Rauchabsauggeräts oder der Leistungsstufe eines HF-Generators) oder der Beleuchtungsstärke sowie der Zoomfunktion eines Kamerasystems im Operationsfeld. Allgemein handelt es sich bei diesen Aufgaben um die Ausführung präziser Stellaufgaben des Operateurs, bei denen eine bestimmte Gerätefunktion auf einem medizinischen Gerät über eine taktile Skala ausgewählt werden kann, während sich der Operateur gleichzeitig auf das Operationsfeld konzentriert. Für das konzentrierte Arbeiten im Operationsfeld ist ein detektierbares Feedback, welches der Operateur über den taktilen Wahrnehmungskanal wahrnimmt, notwendig. Die Entlastung des audiovisuellen Wahrnehmungskanals im Kontext einer Haupt- und Nebenaufgabe konnte anhand physischer und virtueller Bedienelemente in diversen Arbeiten wie bspw. [REISINGER 2009], [SCHMID ET AL. 2018], [SCHMID ET AL. 2019] oder [WINTERHOLLER 2019] nachgewiesen werden. Ein essentieller Bestandteil der Entlastung des audiovisuellen Wahrnehmungskanals ist die Übertragung von Informationen über den taktilen Wahrnehmungskanal. Welche Informationsinhalte dabei relevant sind und wie diese übertragen werden können, wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

## 4.2 Ableitung von Informationsinhalten und taktile Darstellungs-möglichkeiten eines Sliders im Raum

Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts (DFG 277535782) wurde die Informationskodierung über einen Slider auf einem elektrotaktilen Touchbildschirm untersucht. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden eine Expertenbefragung sowie Studien zu Informationsinhalten eines Sliders durchgeführt. Dazu wurden drei Experten am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Lehrstuhl Technisches Design der Universität Stuttgart gebeten, ihre Expertise bezüglich des Aufbaus und Charakters eines virtuellen taktilen Sliders zu äußern. Es wurde dabei die Methode des Mind-Mapping angewendet. Bild 4.2 gibt einen Überblick bezüglich der Äußerungen der Expertenanalyse. Ergänzend zur Expertenbefragung wurden am IKTD drei weitere Studien [ACKERMANN 2020], [BADER 2020] und [ZHENG 2021] unter Anleitung des Verfassers dieser Arbeit durchgeführt. In den Studien wurden Wahrnehmungsschwellwerte und Informationsinhalte hinsichtlich eines elektrotaktilen Feedbacks anhand eines virtuellen Sliders auf einem Touchbildschirm während einer Blindbedienung untersucht. Da der Slider in diesen Studien ebenfalls nur virtuell in Erscheinung tritt, können die grundlegenden Ergebnisse dieser Arbeiten bezüglich der Informationsdarstellung eines taktilen Sliders auf die Gestaltung eines taktilen Sliders im Raum übertragen werden. Die Studienergebnisse ergänzen die Expertenanalyse. Informationsinhalte sowie Doppelnennungen werden dabei zusammengefasst und in sechs Kategorien geclustert. Diese umfassen neben der Indikation, Form und Aufgabe des Sliders auch die Kategorien des Sliders als Eingabe- und Anzeigeelement sowie das Feedback.

Für die Forschungsarbeit im Sinne der Informationsübertragung über einen virtuellen taktilen Slider im Raum sind vor allem die Kategorien Eingabe- und Anzeigeelement im Sinne des Stellteils als Anzeiger von besonderer Bedeutung. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Nennungen sind in Bild 4.2 blau hervorgehoben. Untersuchungen von WINTERHOLLER [2019, S. 48] zufolge, lassen sich Informationsinhalte, welche über ein Drehbedienelement übertragen werden können in Lage- und Richtungsinformationen sowie in Informationen mit höherer Semantik einteilen. Nach WINTERHOLLER [2019, S. 48] wird unter einer Lageinformation eine Skalenposition verstanden, welche eine Markierung auf der Skala beinhaltet, wie beispielsweise die Kennzeichnung einer Skalenmitte, eines präferierten Werts, einen Bereichswechsel, Minimal- und Maximalwerte sowie Anfangs- und Endwert einer Skala. Als Richtungsinformation werden beispielsweise eine

Zu- oder Abnahme des veränderlichen Parameters entlang einer Skala verstanden und unter einer Information mit höherer Semantik fallen Informationen, welche beispielsweise über Buchstaben oder Ziffern repräsentiert werden [EBD].



**Bild 4.2:** Mit virtuellem Slider übertragbare Informationsinhalte

### 4.3 Eingrenzung der taktil veränderlichen Gestaltungsparameter hinsichtlich der Übermittlung taktiler Informationen

In diesem Kapitel werden die taktilen Parametereigenschaften der Versuchsmerkmale zur taktilen Kodierung von Informationen hergeleitet. Nach ZÜHLKE [2012, S. 81f.] kann die Aufmerksamkeit des Nutzers über die Verwendung verschiedener Arten der Informationskodierung gesteuert und gelenkt werden. Nach SAND ET AL. [2020] können die Parameter Dauer des Feedbacks, Intensität und Frequenz des Feedbacks genutzt werden, um Informationen über den taktilen Informationskanal zu übertragen. Die Einteilung von WINTERHOLLER [2019] in Lage- und Richtungsinformationen kann nach Untersuchungen von SCHMID ET AL. [2021B] auf Informationsinhalte eines virtuellen taktilen

Sliders im Raum übertragen werden. Der Ansatz dieser Forschungsarbeit fokussiert deshalb den Aufbau eines taktilen Sliders im Sinne des Stellteils als Anzeiger. Auf dieser Basis erfolgt die Gestaltung und der Aufbau des taktilen Feedbacks im Raum insbesondere der Feedbackverläufe zur Kennzeichnung von Lage- und Richtungsinformationen. Dabei wirkt sich eine Änderung der folgenden Untersuchungsparameter dieser Arbeit maßgeblich auf das taktile Feedback aus:

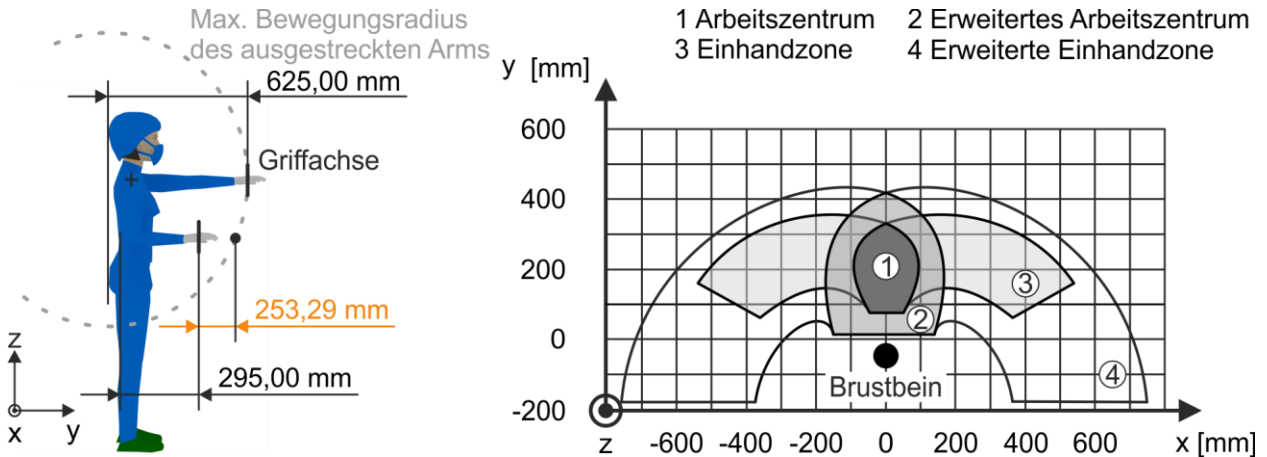
- Bedienungsrichtung des Sliders (anterior/medial)
- Verlaufsart der taktilen Skala (diskret/kontinuierlich)
- Taktile Kodierungsmöglichkeiten
- Feedbackintensität
- Skalenabstand

#### **4.3.1 Bedienungsrichtung des Sliders**

Empfehlungen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) zufolge entspricht für einen Steharbeitsplatz die bevorzugte Tiefe des Arbeitsbereichs der Ellenbogen-Griffachsenlänge [BGI/GUV-I 5048-2 2010, S. 26]. Ausschlaggebend für die Sliderlänge ist demnach der Ellenbogen-Griffachsenabstand der 5-Perzentil-Frau. Gemäß DIN 33402-2 [2005] beträgt dieser 295,00 mm (siehe Bild 4.3 links). Die größtmögliche Tiefe des Arbeitsbereichs wird durch die Bedienhöhe sowie die Reichweite in y-Richtung (vgl. Bild 4.3) bezüglich der Griffachse begrenzt. Demnach beträgt der maximale Aktionsradius in y-Richtung (anterior) hinsichtlich der Griffachse 625,00 mm bei der 5-Perzentil-Frau [DIN 33402-2 2005]. Gemäß der geometrischen Konstruktion (siehe Bild 4.3 links) ergibt sich die Sliderlänge einer 5-Perzentil-Frau in y-Richtung bei einer maximalen Reichweite des ausgestreckten Arms von 625 mm auf Höhe der Ellenbogen-Griffachse zu maximal 253,29 mm. Ein Slider mit einer Länge größer 253,29 mm kann demnach von einer 5-Perzentil-Frau nur unter Beugung des Oberkörpers und somit einer unkomfortablen Bedienung sowie der negativen Beeinflussung der Ausführung der Hauptaufgabe bedient werden. Deshalb resultiert die Implementierung eines Sliders in x-Richtung (medial).

Um die Haupt- und Nebenaufgabe in einer für den Nutzer komfortablen Körperhaltung ausführen zu können, werden diese in der Einhandzone (siehe Bild 4.3) für die Betätigung mit der linken bzw. mit der rechten Hand nach [VDI 1980] angeordnet. Die Haupt- als auch die Nebenaufgabe werden auf variabel verstellbaren Grundplatten platziert, die an den

jeweiligen Nutzer angepasst werden können. Hinsichtlich der Sliderlänge zeigen Vorstudien von SCHMID ET AL. [2021B], SOLF [2020] und LACHENMAIER [2021], dass bei einer Sliderlänge von 300,00 mm eine für den Nutzer komfortable geradlinige mediale Bewegung des Unterarms in x-Richtung innerhalb des bevorzugten Bereichs für die Einhandbedienung möglich ist (vgl. Bild 4.3 rechts (3 Einhandzone)). Die Bedienung der berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle wird folglich in einer für den Benutzer komfortablen stehenden Körperhaltung in medialer Richtung (vgl. Bild 4.3) umgesetzt.



**Bild 4.3:** Geometrische Konstruktion der maximalen Sliderlänge (links); Horizontalschnitt durch den Greif- und Sehraum nach [VDI 1980] (rechts)

#### 4.3.2 Verlaufsart der taktilen Skala

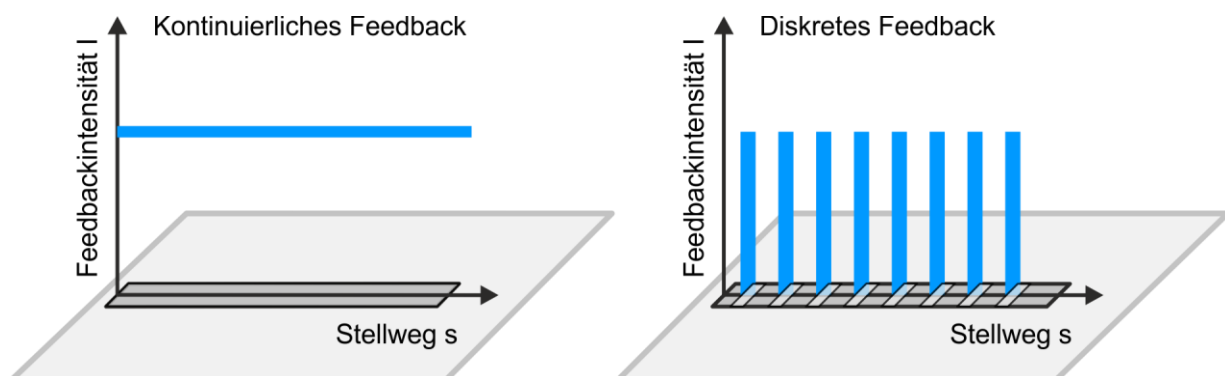
Neben der Ausrichtung und Länge des Sliders stellt die Verlaufsart einen weiteren Parameter dar. Nach SCHMID ET AL. [2020] stehen für die taktile Kodierung eines virtuellen, translatorischen Bedienelements verschiedene Eingabearten zur Verfügung, je nachdem, ob die Bedienaufgabe für ein diskretes oder kontinuierliches Feedback geeignet ist (siehe Bild 4.4). Die Möglichkeiten zur Informationskodierung bei diskretem und kontinuierlichem, taktilen Feedback basieren auf unterschiedlichen Intensitäts- und Skalenverläufen entlang des Stellwegs des Sliders (vgl. Tabelle 4.1). Diese unterscheiden sich vor allem in der Anzahl der Rastpunkte.

Bei einem kontinuierlichen Feedback ist permanent eine taktile Rückmeldung über die gesamte Sliderlänge vorhanden, welche vom Nutzer an der Handinnenfläche unabhängig der Bewegungsrichtung wahrgenommen wird (vgl. Bild 4.4). Das kontinuierliche Feedback wird in Bild 4.4 in Form eines horizontalen Balkens mit konstanter Feedbackintensität  $I$  dargestellt und besitzt keine definierten Rastpunkte. Wird der Slider losgelassen, verharrt er in dieser Position. Mit Hilfe eines kontinuierlichen Feedbacks lassen sich diverse Feedbackverläufe wie bspw. eine Zu- oder Abnahme sowie auch einzelne



Merkmale innerhalb des Verlaufs wie z. B. eine Mitte oder ein präferierter Wert darstellen. Die Darstellung von Merkmalen auf der taktilen Skala innerhalb des Feedbackverlaufs ist jedoch nur rein über eine Änderung der Feedbackintensität oder über die Änderung der Geometrie des auf die Handfläche projizierten Feedbacks (siehe SCHMID ET AL. 2021A) möglich. Für die Kodierung der Skalenmitte kommt dabei beispielsweise ein Intensitätssprung in positiver oder negativer Richtung zum Einsatz, was vom Nutzer als steile Flanke wahrgenommen wird (vgl. Tabelle 4.1). Alternativ kann die Merkmalskodierung auch über eine lokal begrenzte Verlaufsänderung erfolgen (vgl. Tabelle 4.1).

Ein Slider mit einem diskreten, taktilen Feedback besteht aus einzelnen Rastpunkten auf der taktilen Skala (vgl. Bild 4.4). Die Rastpunkte sind in Bild 4.4 zum besseren Verständnis als vertikale Balken dargestellt. Ein Balken entspricht dabei einem Feedbackimpuls mit der Feedbackintensität  $I$ . Die Rastpunkte in Form eines Feedbackimpulses auf die Innenfläche der Hand markieren die Skalenpunkte der taktilen Skala, welche vom Nutzer wahrgenommen werden können. Links und rechts neben der Rastposition ist kein Feedback zu spüren. Auch bei dieser Feedbackart ist es möglich verschiedene Feedbackverläufe (bspw. Zu-/Abnahme) sowie einzelne Merkmale (Mitte, präferierter Wert, Minimum, Maximum) darzustellen (vgl. Tabelle 4.1). Die Darstellung ist allerdings im Vergleich zu einem kontinuierlichen Feedback neben einer Änderung der Feedbackintensität oder der Geometrie des projizierten Feedbacks zusätzlich über die Änderung des Skalenabstands oder einer Kombination daraus möglich.



**Bild 4.4:** Schematische Darstellung taktiler Verlaufsarten

### 4.3.3 Taktile Kodierungsmöglichkeiten

Zur taktilen Kodierung der in Kapitel 4.2 identifizierten Informationsinhalte mittels eines taktilen Feedbacks im Raum werden im Folgenden Kodierungsmöglichkeiten zur Übertragung von Lage- und Richtungsinformationen sowie Informationen mit höherer Semantik hergeleitet. Dabei werden sowohl Kodierungsmöglichkeiten für eine kontinuierliche als

auch für eine diskrete Eingabeart berücksichtigt (vgl. Tabelle 4.1). Die Intensitäts- und Stellwegverläufe lassen sich ferner bei einer kontinuierlichen als auch einer diskreten Eingabe in taktile Kodierungsmerkmale und taktile Kodierungsverläufe unterteilen.

Das taktile Kodierungsmerkmal beschreibt eine einzelne Stelle, einen ausgewählten Rastpunkt entlang des Sliders, welche/r dem Nutzer durch eine taktile Intensitäts- oder Rastpunktabstandsänderung eine Markierung anzeigt. Diese Markierung kann beispielsweise eine Mitte, einen präferierten Wert, einen Maximal- oder Minimalwert sowie Anfang und Ende oder Bereichswechsel der Skala darstellen (vgl. Tabelle 4.1).

Bei taktilen Kodierungsverläufen erfolgt die Intensitäts- oder Skalenabstandsänderung über einen Bereich (vgl. Tabelle 4.1). Über diesen Bereich können beispielsweise eine Zu- oder Abnahme des taktilen Feedbacks entlang eines definierten Stellwegs auf der Skala dargestellt oder einzelne Skalenabschnitte hervorgehoben, gekennzeichnet oder separiert werden. Bei einem diskreten Feedback setzt sich ein Kodierungsverlauf aus mehreren aufeinanderfolgenden, sich ändernden Rastpunkten zusammen (vgl. Tabelle 4.1).

Bei einer kontinuierlichen Eingabeart erfolgt die Informationskodierung anhand der Änderung der Feedbackintensität. Nach Tabelle 4.1 ergeben sich hinsichtlich der Kodierung von Lageinformationen neun Kodierungsmerkmale sowie 15 Kodierungsverläufe. Für die Kodierung von Richtungsinformationen existiert kein Kodierungsmerkmal, welches die Semantik einer Richtung widerspiegelt (vgl. Tabelle 4.1). Die Richtungssemantik kann allerdings durch die Kodierung über einen zunehmenden und abnehmenden taktilen Intensitätsverlauf wiedergegeben werden. Diesbezüglich existieren in Tabelle 4.1 zwei Kodierungsmöglichkeiten.

Die Informationskodierung über ein taktilen Merkmal bei einer diskreten Eingabeart kann nach Tabelle 4.1 in die Änderung der Feedbackintensität und die Änderung des Skalenabstands unterteilt werden. Zur Kodierung von Lageinformationen existieren neun Kodierungsmerkmale, welche über eine Änderung der Feedbackintensität und sechs Kodierungsmerkmale, welche über eine Änderung des Skalenabstands realisiert werden können. Für die Kodierung von Lageinformationen über den Feedbackverlauf stehen für die Kennzeichnung der Informationsinhalte acht Kodierungsmöglichkeiten über die Änderung der Feedbackintensität und neun weitere Möglichkeiten über die Änderung des Skalenabstands zur Verfügung (vgl. Tabelle 4.1). Zur Kodierung von Richtungsinformationen über den Verlauf existieren gemäß Tabelle 4.1 zwei Möglichkeiten über die

Änderung der Feedbackintensität sowie zwei weitere Möglichkeiten über die Skalenabstandsänderung. Eine Kodierung von Richtungsinformationen über ein taktiles Merkmal führt ebenfalls zu keiner sinnvollen Anwendung.

Darüber hinaus können taktil kodierte Informationen mit höherer Semantik übertragen werden. Untersuchungen von beispielsweise SCHMID ET AL. [2021A] oder YOSHINO ET AL. [2012] zur Übertragung von taktil kodierten Informationen mit höherer Semantik über einen virtuellen taktilen Slider im Raum zeigen, dass die Erkennung verschiedener geometrischer Projektionen und Muster auf der Handinnenfläche möglich ist. Gemäß Tabelle 4.1 eignen sich dazu zweidimensionale Formen (2D-Formen), Buchstaben sowie Symbole. Die Repräsentation dieser Informationen kann ebenfalls kontinuierlich über ein Kodierungsmerkmal oder über den Verlauf erfolgen. Nach Tabelle 4.1 erfolgt bei einem kontinuierlichen Merkmal die Kodierung über eine impulsartige Projektion der Form, des Buchstabens oder Symbols entlang des Stellwegs. Die Kodierung über den Verlauf gelingt mit einer permanenten Projektion des Objekts, wobei die Größenänderung oder die Vollständigkeit der Darstellung des Objekts als Fortschrittsanzeige dient. Im Hinblick auf ein diskretes Feedback lassen sich Informationen bezüglich eines Merkmals durch eine zeitversetzte Projektion des Objekts entlang des Stellwegs oder über eine diskrete Projektion der Größenänderung oder Vollständigkeit der Darstellung des Objekts realisieren (vgl. Tabelle 4.1).



		Kodierungsmöglichkeiten						
		Kontinuierlich			Diskret			
		Kodierung durch Merkmal	Kodierung über Verlauf		Kodierung durch Merkmal		Kodierung über Verlauf	
		Änderung der Feedbackintensität			Änderung der Feedbackintensität	Änderung des Skalenabstands	Änderung der Feedbackintensität	Änderung des Skalenabstands
Lageinformation	Mitte							
	Präferierter Wert							
	Maximum					nicht sinnvoll		
	Minimum					nicht sinnvoll		
	Anfang/Ende					nicht sinnvoll	nicht sinnvoll	
	Bereichswechsel							
Richtungsinformation	Zunahme	nicht sinnvoll			nicht sinnvoll	nicht sinnvoll		
	Abnahme	nicht sinnvoll			nicht sinnvoll	nicht sinnvoll		
Höhere Semantik	2D-Formen							
	Buchstaben							
	Symbole							

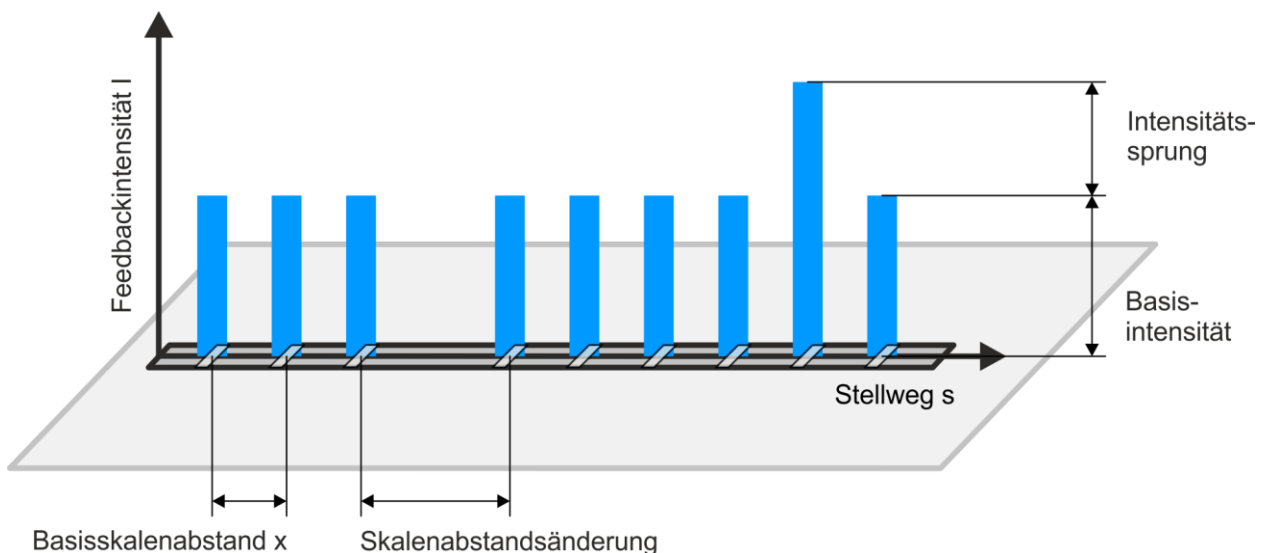
Tabelle 4.1: Übersichtstabelle hinsichtlich taktiler Kodierungsmöglichkeiten



#### 4.3.4 Eingrenzung der taktilen Kodierungsmöglichkeiten

Zur Eingrenzung der für die Untersuchungen relevanten Verläufe wird eine Vorauswahl auf Basis von Vorstudien des Verfassers getroffen. Anhand dieser wird entschieden, welche Kodierungsmöglichkeiten weiterverfolgt werden und welche nicht. Untersuchungen von SCHMID ET AL. [2021A] zeigen, dass eine geometrische Form wie exemplarisch ein Kreis, Quadrat oder Polygon über eine Änderung beispielsweise des Durchmessers oder des Kreisbogens zur Fortschrittsanzeige entlang eines virtuellen taktilen Sliders im Raum genutzt werden kann (siehe Tabelle 4.1). Die Nutzung der kontinuierlichen Änderung der Mustergeometrie für Richtungsinformationen ist bei der Ausführung einer exakten feinmotorischen Stellaufgabe weniger geeignet, da ein exaktes Abschätzen der infinitesimalen Geometrieänderung im Kontext des Gesamtkontinuums, dem Verhältnis zwischen minimaler und maximaler Ausdehnung des geometrischen Musters und das Auffinden der Zielposition, nur schwer möglich ist. Dies führt folglich zu einer höheren kognitiven Beanspruchung der Nutzer. Für die Ausführung der Stellaufgabe rein über das taktile Feedback muss bei einem kontinuierlichen Feedbackverlauf die Zielposition stets mit einer Markierung versehen sein. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch HAMPEL [2011] und WINTERHOLLER [2019] bei der Untersuchung der Kodierung von physischen Drehbedienelementen. Weitere Untersuchungen unter Anleitung des Verfassers zeigen, dass die Informationskodierung über einen taktilen Verlauf mittels Skalenabstandsänderung sich aufgrund der sehr engen Skalenabstände in den Randbereichen als zu ungenau für das Ausführen einer exakten Stellaufgabe erweist [ZHENG 2022]. Ebenfalls zeigen Untersuchungen an einem elektrotaktilen Touch-Bildschirm, dass die Kodierung von Lageinformationen über einen taktilen Verlauf ein präzises Einstellen einer Skalenposition weniger gut unterstützen, als ein markantes, eindeutiges Kodierungsmerkmal [EBD.]. Folglich werden diese Kodierungsmöglichkeiten für das Ausführen einer feinmotorischen Stellaufgabe nicht weiter betrachtet. Ein grundsätzliches Kriterium für die taktile Kodierung besteht darin, dass das taktile Merkmal der Kodierungsmöglichkeit unabhängig von der Skalenlänge einsetzbar ist. Ziel ist es, das taktile Merkmal sowohl auf einer kurzen Skala (z. B. drei- oder fünfstufig) als auch auf einer langen Skala (z. B. zehn- oder mehrstufig) einzusetzen. Dazu muss das taktile Merkmal prägnant und punktuell über einen einzigen Skalenpunkt wahrnehmbar sein. Bei der Ausführung einer feinmotorischen Stellaufgabe ist schlussendlich die Informationsübertragung über ein diskretes taktiles Feedback, bei welchem die Kodierung über einen Intensitätssprung oder eine Änderung des Skalenabstands

erfolgt, am besten geeignet. Im Folgenden wird die diskrete Eingabeart näher betrachtet. Der Verlauf des diskreten taktilen Feedbacks kann anhand einer diskreten taktilen Skala, schematisch in Form eines zweidimensionalen Koordinatensystems, beschrieben werden. Die diskrete taktilen Skala wird dabei durch die Verlaufparameter Feedbackintensität  $I$  und dem Skalenabstand  $x$  zwischen den Rastpunkten charakterisiert. Bild 4.5 zeigt die veränderlichen Parameter des diskreten Feedbacks. Auf der Abszisse in Bild 4.5 sind die einzelnen Skalenpositionen dargestellt, welche durch den Skalenabstand  $x$  voneinander getrennt sind. Die Skalenposition, auch Rastpunkt genannt, beschreibt die Position entlang des Stellwegs, an der ein taktilen Feedback zu spüren ist. Die Feedbackintensität entlang der Ordinate beschreibt die Stärke des taktilen Feedbacks und ist in Bild 4.5 zum besseren Verständnis in Form von Balken dargestellt. Der Intensitätssprung beschreibt die Auslenkung der Intensität eines definierten Skalenpunktes in positiver oder negativer Richtung im Vergleich zur Basisintensität.

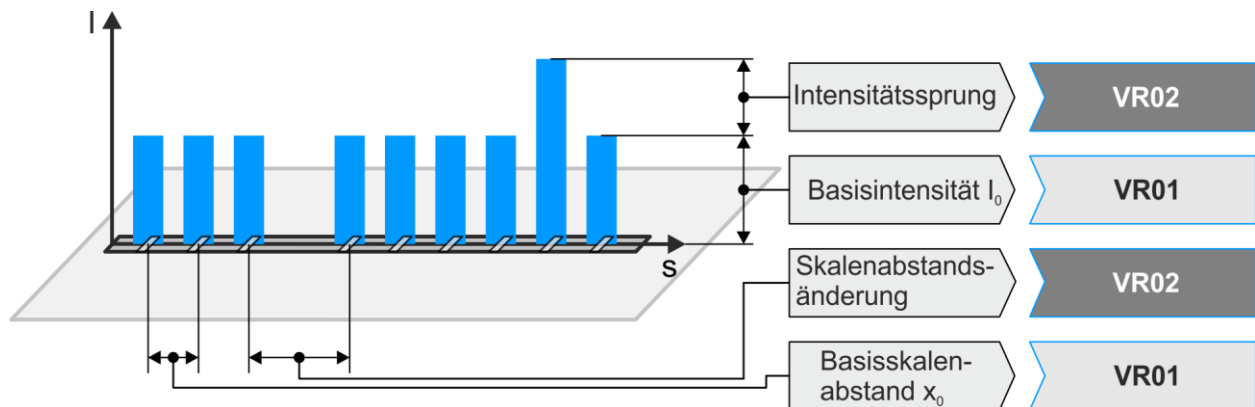


**Bild 4.5:** Schematische Darstellung der veränderlichen Parameter bei einem diskreten Feedback

Für den taktilen Slider werden auf Basis der diskreten Eingabeart Grundverläufe der taktilen Skala definiert. Die minimale Anzahl an Rastpunkten liefert eine Untersuchung von HAMPEL [2011, S. 136], wobei „eine Funktion [...] aus mindestens drei Rastpunkten bestehen“ soll. Auf Basis der vorangegangenen Eingrenzung der Kodierungsmöglichkeiten wird für das weitere Vorgehen ein zweistufiges Vorgehen ausgewählt. Für die Informationskodierung ist es erforderlich zunächst eine Basisskala zu definieren. Diese Basisskala besteht zum einen aus einem Basisskalenabstand  $x_0$  als auch aus einer Basisintensität  $I_0$  (siehe Bild 4.6). In Versuchsreihe VR01 werden zur Identifizierung von Wahrnehmungsschwellwerten einer taktilen Basisskala Grundverläufe ausgehend von



Bild 4.6 erstellt. Die Basisskala für die Versuchsreihe VR01 setzt sich aus einem über die Sliderlänge gleichbleibenden Skalenabstand und einer über die Sliderlänge gleichbleibenden Basisintensität zusammen. Die Feedbackintensität sowie der Skalenabstand werden in unterschiedlichen Kombinationen zueinander variiert. Die exakten Versuchsmerkmale für Versuchsreihe VR01 sind Kapitel 7.1.2 zu entnehmen.

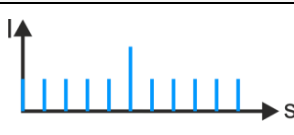
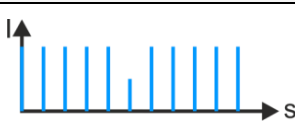
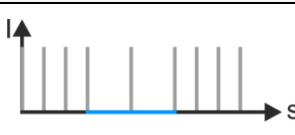
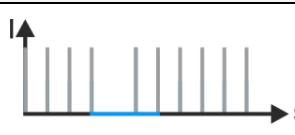
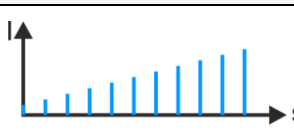
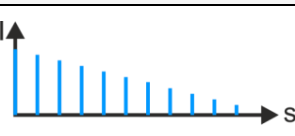


**Bild 4.6:** Zuordnung der Gestaltungsparameter zu den Versuchsreihen VR01 und VR02

Zur taktilen Kodierung von Informationsinhalten werden in der zweiten Versuchsreihe VR02 auf Basis der diskreten Eingabeart die Kodierungsmöglichkeiten aus Tabelle 4.1 näher betrachtet. Die Kodierungsmöglichkeiten über ein taktiler Merkmal für eine Lageinformation gründen auf einem Intensitätssprung (positiv/negativ) sowie einer sprunghaften Änderung des Skalenabstands (symmetrisch/asymmetrisch). Die Informationsinhalte „Mitte“, „Präferierter Wert“, „Maximum“, „Minimum“, „Anfang/Ende“ und „Bereichswechsel“ sind nach Tabelle 4.1 aus diesen vier Kodierungsmöglichkeiten aufgebaut und stellen entlang des Stellwegs letztendlich eine Markierung auf der Skala dar. Tabelle 4.2 fasst diese Kodierungsmöglichkeiten zusammen. Die Kodierung über einen Intensitätssprung kann in positiver und in negativer Richtung erfolgen. Ein Intensitätssprung in positiver Richtung zeichnet sich durch eine sprunghafte Intensitätserhöhung eines Skalenpunktes im Vergleich zur Basisintensität aus (vgl. Tabelle 4.2). Bei einem Intensitätssprung in negativer Richtung liegt die Intensität des taktilen Merkmal unterhalb der Basisintensität (vgl. Tabelle 4.2). Des Weiteren wird die Kodierung über eine symmetrische und asymmetrische Änderung des Skalenabstands untersucht. Bei einer symmetrischen Änderung des Skalenabstands ist der Skalenabstand vor und nach dem taktilen Merkmal gleich groß (vgl. Tabelle 4.2). Bei einer asymmetrischen Änderung des Skalenabstands ändert sich dieser nur vor dem taktilen Merkmal. Nach dem taktilen Merkmal ist wieder der Basisabstand implementiert (vgl. Tabelle 4.2). Somit nimmt der Proband bei der Bewegung der Hand von links nach rechts zum Beispiel beim Übergang

von Rastpunkt 5 auf 6 (taktiles Merkmal) die Änderung des Skalenabstands wahr. Eine asymmetrische Änderung des Skalenabstands mit einer Vergrößerung des Skalenabstands nach dem Merkmal ist unter Berücksichtigung der Bedeutungskompatibilität nach SCHMID & MAIER [2017, S. 174] nicht sinnvoll. Der Nutzer kann bei einem größeren Skalenabstand nach dem Merkmal nicht eindeutig klassifizieren, ob die Information beispielsweise den Übergang von Skalenposition 5 auf 6 oder den Übergang von Skalenposition 6 auf 7 betrifft. Hinsichtlich der Kodierungsmöglichkeit von Richtungsinformationen sind nach Tabelle 4.1 die beiden in Tabelle 4.2 dargestellten diskreten Kodierungsverläufe mittels Feedbackintensitätsänderung relevant.

Es resultieren somit nach Tabelle 4.2 sechs diskrete Kodierungsmöglichkeiten für Informationen entlang eines virtuellen taktilen Sliders im Raum. Vier Kodierungsmöglichkeiten für die Kennzeichnung von Lageinformationen sowie zwei Kodierungsmöglichkeiten für Richtungsinformationen. Aufgrund der Vielfalt an Parameterkombinationen wird im Folgenden nur die Kodierung von Lageinformationen weiterverfolgt. Die Kodierungsmöglichkeiten der Lageinformation sind dabei in Form eines Intensitätssprungs oder einer Änderung des Skalenabstands ausgeprägt. Die Tabelle 4.2 legt somit den Grundstein für die Parametrisierungen der taktilen Kodierungsmerkmale für die Versuchsreihe VR02, in welcher die Unterschiedsschwelle zur Erkennung eines Intensitätssprungs sowie der Änderung des Skalenabstands untersucht wird. Die exakten Versuchsparameter sind Kapitel 7.2.2 zu entnehmen.

Kodierungsmöglichkeiten (Lageinformation)			
Intensitätssprung		Skalenabstandsänderung	
Positiv	negativ	symmetrisch	Asymmetrisch
			
Kodierungsmöglichkeiten (Richtungsinformation)			
Zunahme		Abnahme	
			

**Tabelle 4.2:** Schematische Darstellung von Feedbackverläufen für die taktile Kodierung von Informationen

Durch die Eingrenzung der taktilen Kodierungsmöglichkeiten ist ersichtlich, dass die Feedbackintensität und der Skalenabstand die relevanten und veränderlichen Parameter für

---

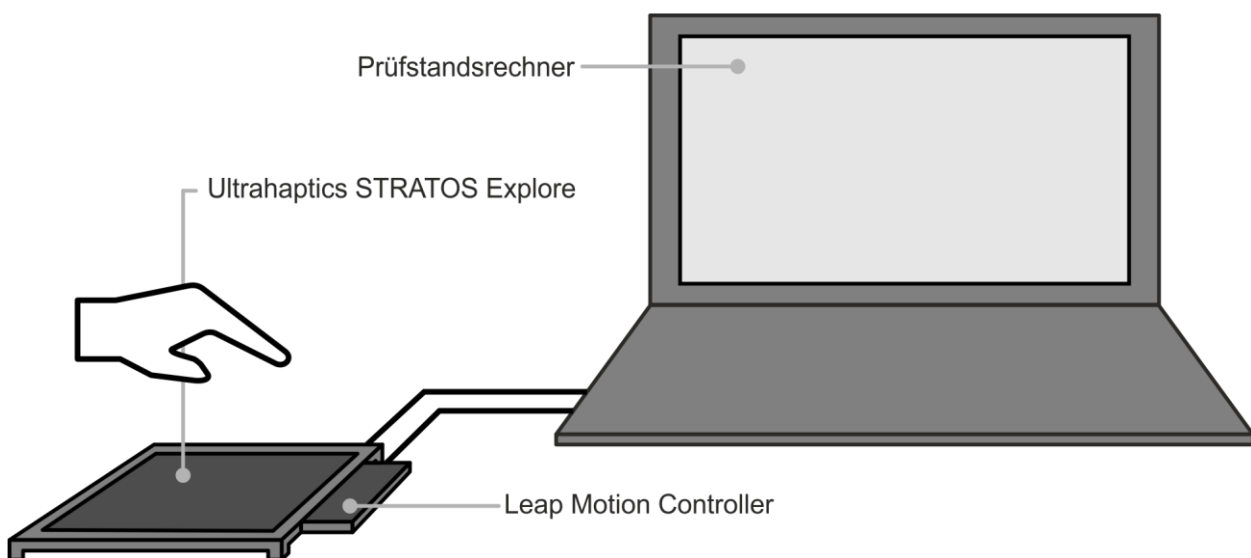
die Studien dieser Arbeit sind. Im Folgenden werden dazu verschiedene Grundverläufe der taktilen Skala sowie taktile Kodierungsmöglichkeiten zur Übertragung von Informationen aufgebaut, welche im Rahmen von Probandenstudien untersucht werden. Im nachfolgenden Kapitel wird ein virtueller, taktiler Slider aufgebaut, welcher hinsichtlich der Feedbackintensität als auch hinsichtlich des Skalenabstands je nach Studienziel variiert und angepasst werden kann. Ebenfalls erfolgt die Einbettung des taktilen Sliders in einen medizinischen Use-Case.

## 5 Versuchsplanung zur Prüfung der Versuchsparameter

In diesem Kapitel geht es um die Versuchsplanung und die dazu notwendigen Prüfstandskomponenten. Neben der Implementierung des virtuellen Sliders (Kapitel 5.1) erfolgt die Beschreibung des Gesamtaufbaus des Versuchs in Kapitel 5.2. Abschließend wird auf den Fragenbogen, welcher der Erfassung der Gebrauchstauglichkeit (vgl. Kapitel 5.3) dient, eingegangen.

### 5.1 Aufbau des virtuellen Sliders mit taktilem Feedback im Raum

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung des Aufbaus des taktilen Sliders mit taktilem Feedback im Raum. Für einen virtuellen Slider mit taktilem Feedback im Raum wird im Rahmen dieser Untersuchung hardwareseitig das Ultrahaptics STRATOS Explore (Ultrahaptics), bestehend aus dem Ultraschallarray und dem Leap Motion Controller verwendet (siehe Bild 5.1). Softwareseitig erfolgt die Implementierung des virtuellen Sliders mit taktilem Feedback im Raum in C# mittels der Software Visual Studio 2019. Die Verknüpfung der einzelnen Komponenten sowie die Steuerung des Prüfstands wird über die Software Unity (Version 2019.2.11f1) realisiert. Zur Generierung und Steuerung des virtuellen Sliders mit taktilem Feedback im Raum wird im Folgenden auf den Slider, das Handtracking sowie das taktile Feedback aufbauend aus den in Kapitel 4 erörterten veränderlichen Parameter einer taktilen Skala für die Gestenbedienung eingegangen.

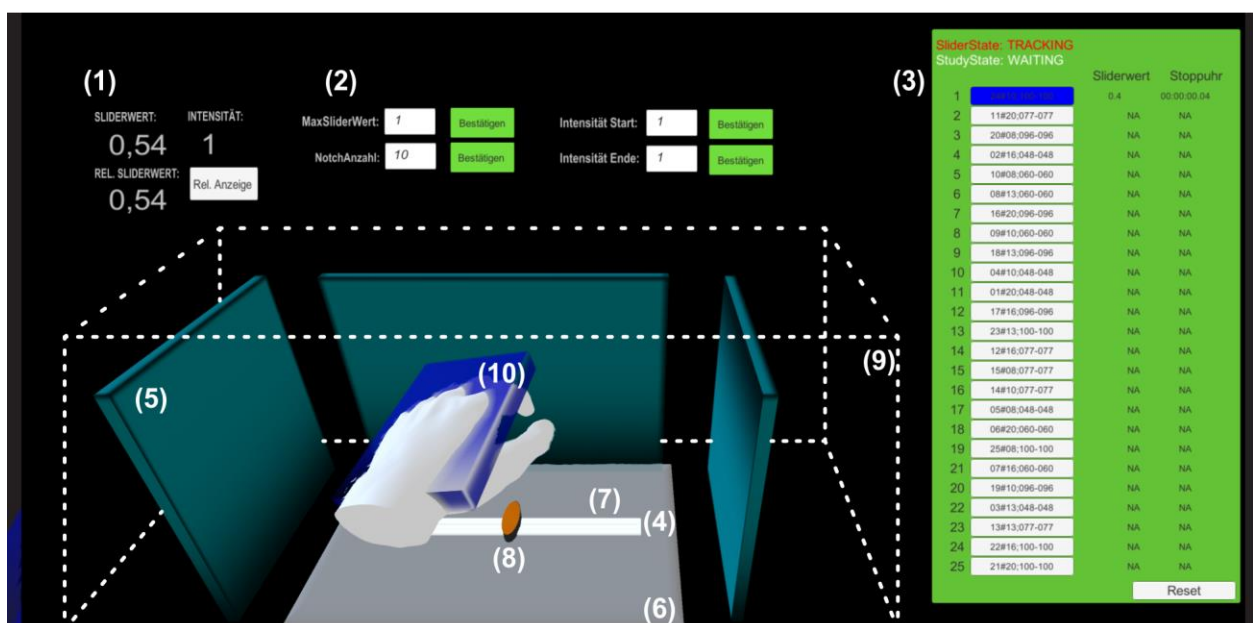


**Bild 5.1:** Schematische Darstellung des Ultraschallarrays mit Prüfstandsrechner

#### 5.1.1 Virtueller Slider

Bild 5.2 zeigt den Kontrollbildschirm des Versuchsleiters. Im oberen Drittel des Bildschirms befinden sich auf der linken Seite die Anzeigen des aktuellen Sliderwerts sowie

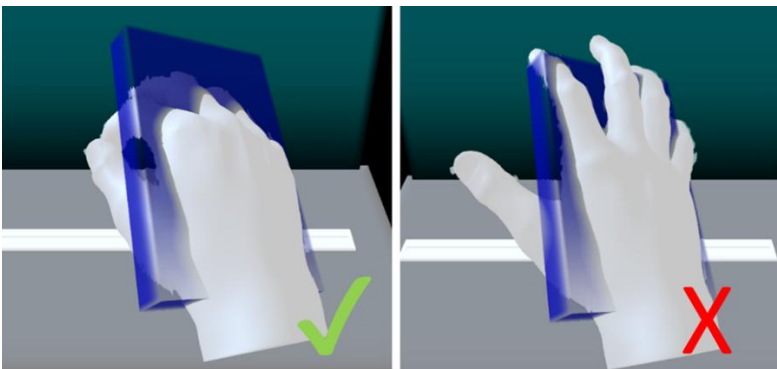
die aktuelle Intensität des jeweiligen Rastpunkts (1). Mittig ist die Start- und Endintensität sowie die Rastpunktanzahl des eingestellten Versuchsmerkmals zu sehen (2). Auf der rechten Seite sind die Versuchsmerkmale der jeweiligen Versuchsreihe in Form von Buttons (3) zu finden, welche vom Versuchsleiter angewählt werden. In der Mitte des Bildschirms ist der Slider (4) zu sehen. Anhand dieser Darstellung kann der Versuchsleiter den konkreten Stellvorgang des Probanden beobachten. Die blauen Quader (5), welche den Slider von drei Seiten umgeben, stellen die Begrenzung des Bedienraumes dar. Diese Quader geben ein taktiles Feedback aus, sobald der Proband den Bedienraum verlässt. Zur Implementierung der virtuellen Mensch-Maschine-Schnittstelle ist eine Visualisierung dieser in der Umgebung von Unity notwendig (vgl. Bild 5.2). Der implementierte virtuelle Slider besteht aus drei Objekten, einer Basisplatte (6), einer Führungsschiene (7) sowie dem Sliderelement (8). Der Slider kann durch Skalierung der Transformationsparameter in Unity angepasst werden, sodass insgesamt eine Bedienlänge des Sliders von 300,00 mm erreicht wird. Oberhalb der Basisplatte ist eine Führungsschiene platziert, entlang welcher der Slider verschoben werden kann. Für die Versuchsdurchführung wird der Slider mittig auf der Basisplatte platziert. Das Sliderelement ist in Form einer Ellipse mit einem Durchmesser von 20,00 mm auf der Hauptachse und 10,00 mm auf der Nebenachse ausgeführt.



**Bild 5.2:** Virtueller Slider in Unity

Zur berührungslosen Steuerung des Sliders via Gesten wird ein weiterer virtueller Quader (9) mit den Abmaßen 350 mm x 350 mm x 350 mm um das Ultraschallarray implementiert (siehe Bild 5.2). Dieser virtuelle Quader dient zur Beschränkung des

Interaktionsraums über dem Array. Befindet sich eine Hand innerhalb dieses Quaders kann mit dem Slider interagiert werden. Da die Ausführung der Studien blind, ohne visuelle Anzeige für die Probanden erfolgt, erstreckt sich der Interaktionsraum über die Fläche des Ultraschallarrays hinaus. Die Erfassung der Hand, auch Hand Tracking genannt, erfolgt über den am oberen Ende des Ultrahaptics angebrachten Leap Motion Controller (siehe Bild 5.1). Zur Vereinfachung der Handdetektion wird ein weiterer virtueller Quader (10) genutzt (siehe Bild 5.2). Der virtuelle Quader ist an die Größe einer 95-Perzentil Hand des Mannes [vgl. DIN 33402-2 2005] angepasst. Bei Personen mit großen Händen kann es daher zu Problemen beim Erfassen der Hand kommen, wenn sie ihre Hand spreizen. Die Finger sollten darum nicht voll durchgestreckt sein (siehe Bild 5.3). Die beiden Infrarotkameras des Leap Motion Controllers erfassen dabei den Mittelfinger. Der Mittelfinger entspricht der Mitte der Hand bei einer horizontalen Bewegung. Zur Steuerung des berührungslosen, virtuellen Sliders im Raum ist das Schiebement des Sliders mit dem Mittelfinger der Hand verknüpft und bewegt sich mit diesem entlang der Sliderabmessungen. Zur Steuerung wird die Hand in der Horizontalen orthogonal zur Schieberichtung des Sliders positioniert. Um ein versehentliches Verschieben des Sliders zu vermeiden, wird die Abweichung in orthogonaler Richtung bezüglich der Ulnar- und Radialabduktion (Bewegung zur Handkante/Bewegung zum Daumen) nach BLEYER ET AL. [2008] auf einen Winkel von  $\pm 20^\circ$  eingeschränkt.



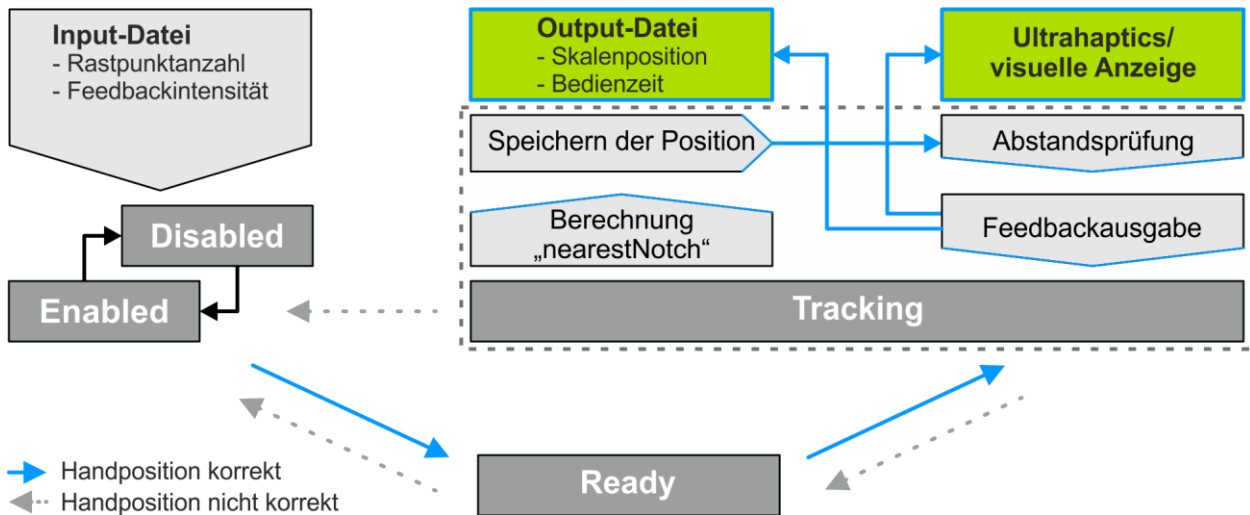
**Bild 5.3:** Virtuelle Box um die Hand des Nutzers

### 5.1.2 Taktiler Feedback im Raum

Das taktile Feedback der berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle wird als diskrete Skala mit taktilem Feedback implementiert. Feste, unbeeinflussbare Parameter der Untersuchung sind die Form sowie die Erregungsfrequenz des taktilem Feedbacks. Das taktile Feedback wird in Form eines Kreises an den Phalanx proximalis des Mittelfingers projiziert. Der Radius des Fokuspunkts des Feedbacks ist herstellerseitig auf 5 mm festgelegt. Neben dem Radius ist ebenfalls die Pulsfrequenz des Feedbacks mit

50 Hz vorgegeben. Da in der Untersuchung die Feedbackintensität und der Skalenabstand von Bedeutung sind, werden diese durch den dem Slider zugrundeliegenden Programmcode beeinflusst und während der Untersuchung entsprechend des zu prüfenden Versuchsmerkmals aktualisiert. Dazu werden die offenen Untersuchungsparameter (Feedbackintensität, Skalenabstand, Intensitätssprung und Skalenabstandsänderung) aus Kapitel 4 in das Skript des Sliders integriert. Schematisch kann der Programmablauf der berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle mit taktilem Feedback im Raum anhand eines einfachen Zustandsmodells beschrieben werden (vgl. Bild 5.4). Dieses Zustandsmodell nimmt die vier Zustände „Disabled“, „Enabled“, „Ready“ und „Tracking“ an. Zur Generierung der taktilen Versuchsmerkmale werden die Feedbackparameter anhand einer Input-Datei importiert. Die Inputdatei beinhaltet die Rastpunktanzahl sowie die jeweilige Feedbackintensität pro Rastpunkt (siehe Bild 5.4). Die Verteilung der Rastpunkte erfolgt linear, in gleichmäßigen Abständen, über den Stellweg. Zur Generierung der Rastpunkte wird im Skript die Gesamtanzahl an Rastpunkten sowie die Position des zuletzt erzeugten Rastpunkts benötigt. Die Daten der Inputdatei werden in randomisierter Reihenfolge mit den Buttons (3) auf der Steuerungsplattform des Versuchsleiters verknüpft (vgl. Bild 5.2). Anhand dieser Verknüpfung wird während des Versuchsablaufs ein Button nach dem anderen ausgewählt und die jeweilige FeedbackEinstellung getestet. Der Wechsel zwischen den Zuständen „Disabled“ und „Enabled“ wird vom Versuchsleiter über die Auswahl eines Buttons ausgelöst. Ist ein Versuchsmerkmal ausgewählt und befindet sich die Hand des Probanden innerhalb des virtuellen Quaders um den Slider (9), so wechselt das Programm in den Zustand „Ready“. Dabei wird die Hand des Probanden erfasst und dem Slider zugeordnet. Ist die Hand des Probanden im korrekten Winkel zum Slider ( $90^\circ \pm 20^\circ$ ) platziert, wechselt der Status in den Zustand „Tracking“. Ansonsten bleibt das System im Status „Ready“. Im „Tracking“-Status erfolgt die kontinuierliche Erfassung der Position des Mittelfingers und der Abgleich dessen mit der aktuellen Sliderposition (siehe Bild 5.4). Zunächst wird die Position des nachfolgenden Rastpunkts ermittelt und die Position als Variable „nearestNotch“ gespeichert. Auf Basis dessen wird der Abstand zwischen der aktuellen Position und dem nachfolgenden Rastpunkt bestimmt. Ist dieser kleiner bzw. gleich 10 % des Abstands zwischen zwei benachbarten Rastpunkten und weicht die Position des zuletzt erzeugten Rastpunkts vom nächstgelegenen Rastpunkt ab, so wird das taktile Feedback erzeugt. Liegt die Fingerposition innerhalb des Toleranzbereichs um den Rastpunkt, erfolgt die Ausgabe des taktilen Feedbacks. Parallel werden ebenfalls die visuelle

Anzeige sowie die Skalenwertanzeige des Versuchsleiters mit der Fingerposition abgeglichen und aktualisiert. Wird die Hand für drei Sekunden an einer Skalenposition ruhig gehalten ( $\pm 20\%$ ), so wird die erfasste Handposition in der Output-Datei gespeichert (vgl. Bild 5.4).



**Bild 5.4:** Zustandsmodell des Programmablaufs

## 5.2 Versuchsaufbau

Das nachfolgende Kapitel beschreibt den Gesamtaufbau des Versuchs. Ausgehend von der Beschreibung des Aufbaus des virtuellen Sliders und dem taktilen Feedback im Raum wird der in Bild 5.5 dargestellte Gesamtaufbau des Versuchs entwickelt. Dieser ist für die erste, zweite und dritte Versuchsreihe weitestgehend identisch. Lediglich in der dritten Versuchsreihe VR03 ist ein ergänzender Bildschirm zur Durchführung der Hauptaufgabe auf der rechten Seite nötig. Die Positionierung des Versuchsaufbaus (Haupt- und Nebenaufgabe) erfolgt unter Berücksichtigung ergonomischer Prinzipien am Arbeitsplatz. Das medizinische Phantom (1) zur Durchführung der Hauptaufgabe wird im erweiterten Arbeitszentrum platziert. Die Ausführung der Nebenaufgabe erfolgt in der erweiterten Einhandzone (vgl. Kapitel 4.3.1).

Im weiteren Verlauf wird zunächst der Vorversuch und anschließend die Haupt- und Nebenaufgabe beschrieben. Im Rahmen einer medizinischen Anwendung der ultraschallbasierten Mensch-Maschine-Schnittstelle liegt der Fokus des Versuchs auf einem minimalinvasiven Operationsszenario in der Laparoskopie. Mit dem am IKTD entwickelten Prüfstand kann die Bedienung der berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle hinsichtlich deren Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit unter Laborbedingungen realitätsnah anhand eines medizinischen Phantoms untersucht werden.





**Bild 5.5:** Gesamtaufbau des Versuchs

### 5.2.1 Klassifizierung der Probanden

Vor Versuchsbeginn erfolgt im Rahmen eines Vorversuchs die Erfassung von motorischen und sensitiven Fähigkeiten der Probanden, um gegebenenfalls Defizite zu erkennen und die Probanden gemäß Normstichproben zu klassifizieren. Zur Beschreibung der Stichprobe werden von den Probanden demographische Daten wie bspw. das Alter, Größe, Gewicht als auch Bildungsgrad, Hobby und die berufliche Tätigkeit mittels eines Fragebogens erfasst. Ebenfalls werden darin bekannte Vorerkrankung im Arm-, Hand-, Fingersystem der Probanden festgehalten. Eine detaillierte Beschreibung des Fragebogens erfolgt in Kapitel 5.3.

Anschließend erfolgt eine standardisierte Erfassung der taktilen Wahrnehmungsleistung sowie der sensomotorischen Leistungsfähigkeit des Hand-Arm-Systems der Probanden. Die taktilen Wahrnehmungsleistung der Probanden wird mit Hilfe der statischen Zweipunktdiskriminationsschwelle [GOLDSTEIN 2008, S.343], des Semmes-Weinstein Knickmonofilament-Tests [SCHORRMANN 2020] sowie dem Vibrationsempfinden nach Rydel-Seiffer [HILZ ET AL. 1998] erfasst. Zur Überprüfung der sensomotorischen Koordination zwischen Auge und Hand wurde das standardisierte Testverfahren Zweihand Koordination des Wiener Testsystems [SCHUHFRIED 2015] verwendet. Diese Untersuchungen

dienen zur Überprüfung des Probandenkollektivs auf vorliegende, taktile Einschränkungen bezüglich der taktilen Wahrnehmung, welche ggf. zum Ausschluss oder als Erklärung für starke Abweichungen bei der Studiendurchführung herangezogen werden können.

### **5.2.1.1 Messung der Zweipunktdiskriminationsschwelle**

Die Messung der Zweipunktdiskriminationsfähigkeit (siehe Bild 5.6a) als Teilkomponente der Oberflächensensibilität ist ein Standardmessverfahren in der orthopädischen Ergotherapie. Zur Ermittlung der Zweipunktdiskriminationsschwelle werden die Diskriminatoren in zufälliger Reihenfolge hinter einer Sichtschutzwand auf dem ersten Fingerglied des Mittelfingers und anschließend auf der Handinnenfläche aufgesetzt. Die Diskriminatoren werden in Längsrichtung für jeweils 3 Sekunden auf der Haut unter Wirkung des Eigengewichts aufgesetzt. Bei den Diskriminatoren handelt es sich um zwei Spitzen eines Kunststoffelements mit definierten Abständen. Für den Mittelfinger betragen die Abstände in aufsteigender Reihenfolge 2 mm bis 7 mm und für die Handinnenfläche 10 mm bis 14 mm [GOLDSTEIN 2008, S. 343]. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, die beiden Reize auf der Haut getrennt wahrzunehmen. Sobald ein Abstand als getrennt wahrgenommen wird, wird dieser vom Versuchsleiter dokumentiert. Bei gesunden Probanden beträgt die Zweipunktschwelle am Mittelfinger 5 mm und an der Handinnenfläche 12 mm.

### **5.2.1.2 Semmes-Weinstein Monofilament-Test**

Der Semmes-Weinstein Monofilament-Test (siehe Bild 5.6b) findet Anwendung in der Neurologie und Orthopädie. Mit Hilfe dieses Tests lassen sich Sensibilitätsstörungen und neuronale Schädigung sowie die Drucksensibilität der Haut identifizieren [SCHORRMANN 2020]. Zur Testung der Sensibilität werden Teststäbchen (Fa. Baseline) mit unterschiedlich großen Durchmessern des Monofilaments ( $\varnothing = 2,83$  mm,  $\varnothing = 3,61$  mm,  $\varnothing = 4,31$  mm,  $\varnothing = 4,56$  mm,  $\varnothing = 6,65$  mm) verwendet. Je nach Durchmesser des Filaments wird ein unterschiedlicher Druck auf die Haut des Probanden ausgeübt (0,07 g; 0,4 g; 2 g; 4 g und 300 g). Zur Testdurchführung wird die Hand des Patienten in Supination hinter einer Trennwand gelagert, sodass der Proband seine Hand nicht sehen kann. Anschließend wird die Handinnenfläche (palmar) mit dem Filament  $\varnothing = 2,83$  mm (normale Sensibilität) abgetastet. Das Monofilament wird dabei für 1,50 s senkrecht auf das zu testende Hautareal gedrückt bis es sich durchbiegt. Sobald der Patient eine Berührung spürt, gibt er dem Versuchsleiter eine verbale Rückmeldung. Sollte keine Re-

aktion auf das Monofilament  $\varnothing = 2,83$  mm erfolgen, wird der Test mit dem nächstgrößeren Filament fortgesetzt. Die Monofilamente  $\varnothing = 2,83$  mm bis  $\varnothing = 4,31$  mm werden jeweils dreimal auf der gleichen Stelle appliziert. Die Teststäbe  $\varnothing = 4,56$  mm und  $\varnothing = 6,65$  mm werden lediglich einmal auf die Haut aufgebracht, wobei zwischen den Applikationen eine Pause von 1,50 s berücksichtigt wird. [SCHORRMANN 2020]

### 5.2.1.3 Vibrationsempfinden nach Rydel-Seiffer

Vibrationsempfindungen werden mit Hilfe der Vater-Pacini-Körperchen wahrgenommen und über die peripheren sensorischen Bahnen zum sensorischen Kortex geleitet. Erkrankungen oder Einschränkungen der peripheren, sensorischen Bahnen können mit Hilfe des Vibrationsempfindens identifiziert werden. Die Untersuchung des Vibrationsempfindens erfolgt dabei an knöchernen Stellen des Körpers wie bspw. dem Metacarpale 2 (siehe Bild 5.6c). Dazu wird den Probanden am Metacarpale 2 eine schwingende Stimmgabel (128 Hz) nach Rydel-Seiffer aufgesetzt. Sobald der Proband keine Vibration mehr spürt, gibt er dem Versuchsleiter verbal Rückmeldung. Dieser notiert umgehend den Skalenwert der Rydel-Seifferskala an der Stimmgabel. Hinsichtlich des Skalenwerts kann eine Aussage über eine neuronale Störung getroffen werden (vgl. Tabelle 5.1)

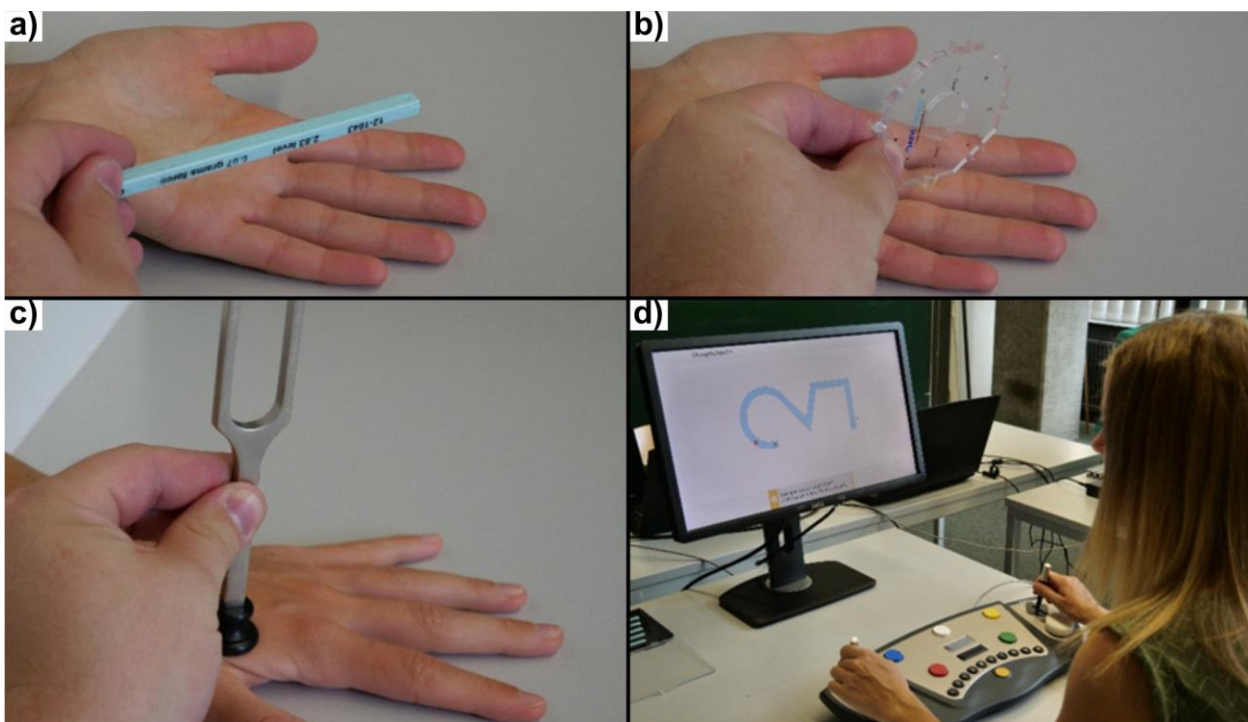
	Normwerte des Vibrationsempfindens gesunder Personen in verschiedenen Altersgruppen [HILZ ET AL. 1998]					
Alter [Jahre]	18 - 29	30 - 39	40 - 49	50 - 59	60 - 69	70 - 79
Normwerte am Metacarpale 2	7,2	7,1	7,1	7,0	7,0	6,2

**Tabelle 5.1:** Normwerte des Vibrationsempfindens gesunder Personen

### 5.2.1.4 Zweihand Koordination

Das Wiener Testsystem ist ein softwarebasiertes Konvolut von unterschiedlichen psychologischen Tests, welche vor allem in der psychologischen Diagnostik, wie beispielsweise in der Neuropsychologie, Eignungsdiagnostik (Human Resources), der Verkehrspsychologie oder der sportpsychologischen Forschung Einsatz finden. Dem Wiener Testsystem liegt eine Basis an Normstichproben zugrunde, wodurch eigens erfasste Daten verglichen und eingeordnet werden können. Im Rahmen der zeitgleichen Ausführung der Haupt- und Nebenaufgabe ist die Auge-Hand- und Hand-Hand-Koordination relevant. Genauer spielen die sensomotorische Koordination zwischen Auge und Hand und die Koordination zwischen linker und rechter Hand eine bedeutende Rolle. Daher wird zur Klassifizierung der Probanden die „Zweihand Koordination“ (Testform S2) des Wiener Testsystems verwendet (siehe Bild 5.6d). Die Zweihand Koordination erfasst die Geschwindigkeit und Genauigkeit der Koordinationsleistung bei feinen und präzisen Bewegungen. Die

Aufgabe der Probanden besteht darin, dass diese mit Hilfe von Joysticks einen roten Punkt möglichst schnell entlang einer am Bildschirm vorgegebenen Bahn von rechts nach links bewegen. Die Bahn besteht aus drei Bereichen (verkehrtes L, V-Form und Kreisbogen). Dabei kann der Punkt mit dem linken Joystick nur in vertikaler Richtung und mit dem rechten nur in horizontaler Richtung bewegt werden. Jedes Verlassen der Bahn wird mit einem akustischen Signal gekennzeichnet und als Fehler gewertet. Für jeden Durchlauf werden die Geschwindigkeit und Genauigkeit aufgezeichnet und mit der Normstichprobe verglichen. Hauptfaktoren der Einordnung der Probanden bezüglich der Normstichprobe nach Prozenträngen (PR) stellen die Faktoren „Mittlere Dauer Gesamt“, „Mittlere Fehlerdauer Gesamt“ und „Prozent Fehlerdauer Gesamt“ dar. Die „Mittlere Dauer Gesamt“ entspricht dabei der durchschnittlichen Zeit, die für die Durchgänge benötigt wird. Die „Mittlere Fehlerdauer Gesamt“ beschreibt die Zeit, in welcher sich der Punkt außerhalb des durch die Toleranzgrenze definierten Bahnbereichs über alle Durchgänge hinweg befindet. Das Verhältnis der „Gesamt Fehlerdauer“ zur Gesamtdauer wird durch die Variable „Prozent Fehlerdauer Gesamt“ beschrieben. Insgesamt werden vier Bahndurchläufe aufgezeichnet. [SCHUHFRIED 2015]



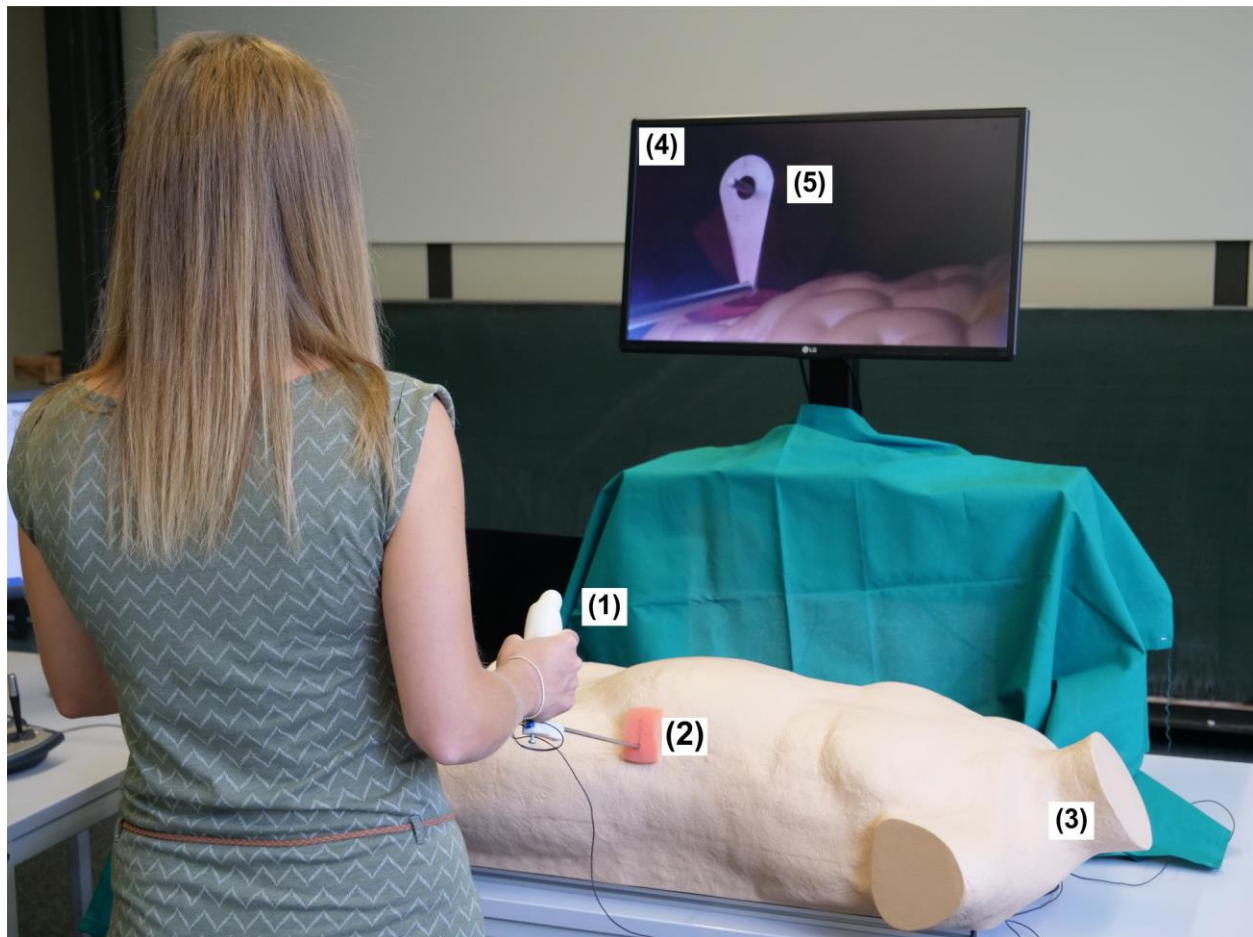
**Bild 5.6:** Übersichtsdarstellung der Vorversuche

### 5.2.2 Beschreibung Hauptaufgabe

Die Hauptaufgabe der Probanden ist in Bild 5.7 dargestellt. Die Hauptaufgabe besteht aus der Bedienung des Operationsinstruments (1), welches durch eine Öffnung (2) in den



Körper zur Erreichung des Operationsziels eingeführt wird. Bei einem minimalinvasiven, chirurgischen Eingriff in der Laparoskopie ist das präzise, genaue und konzentrierte Arbeiten des Chirurgen essentiell. Zur Simulation der feinmotorischen Tätigkeit eines Chirurgen wird ein am IKTD aufgebautes medizinisches Phantom (3) verwendet (siehe Bild 5.7).



**Bild 5.7:** Hauptaufgabe am medizinischen Phantom

Der Zugang zur Bauchhöhle (Abdomen) für den Chirurgen erfolgt durch eine Inzision auf der linken Körperseite des Phantoms. Der Blick in die beleuchtete Bauchhöhle des Phantoms wird dem Chirurgen mittels einer im Phantom integrierten GoPro-Kamera in Echtzeit auf einem Bildschirm (24 Zoll) ermöglicht (4). Das Arbeiten im Abdomen ist somit analog zu einer minimalinvasiven Operation gegeben. Die Versuchsdurchführung erfolgt im Stehen. Für die Versuchsdurchführung wird das medizinische Phantom auf einem Tisch vor dem Patienten platziert, sodass die Standposition des Probanden von diesem frei gewählt werden kann. Es wird darauf geachtet, dass die Hauptaufgabe im Arbeitszentrum des Probanden nach BULLINGER [1994] ausgeführt wird. Die Anordnung des Bildschirms erfolgt im Optimalsichtbereich des Probanden. Die Ausführung der feinmotorischen, chirurgischen Aufgabe erfolgt mit der dominanten Hand des Probanden. Da nach

MEINEL & SCHNABEL [1976] und TEIPEL [1988] eine feinmotorische Bewegung vor allem durch einen kleinräumigen Bewegungsablauf mit geringem Kraftaufwand aber einer hohen Anforderung an Präzision und Schnelligkeit einhergeht, wird für die Hauptaufgabe der Chirurgen ein feinmotorischer Testaufbau in Anlehnung an FLEISHMAN [1954] verwendet. In Anlehnung an FLEISHMAN [1954] wird die feinmotorische Tätigkeit des Chirurgen mit einer Metallöse ( $\varnothing_{\text{innen}} = 8,00 \text{ mm}$ ) über einem Metallstift ( $\varnothing_{\text{außen}} = 3,00 \text{ mm}$ ) umgesetzt (siehe Bild 5.7). Auf dem Bildschirm in Bild 5.7 ist das distale Ende des Operationsinstruments mit der angebauten Metallöse (5) dargestellt. Bei diesem Operationsinstrument handelt es sich um einen für die Versuche modifizierten Nachbau des „Radius T“ (Fa. Tübingen Scientific). Die Probanden halten die Metallöse möglichst ruhig über den Metallstift ohne diesen zu berühren. Dabei wird die Anzahl an Berührungen in Form von elektrischen Kontakten detektiert, wobei Mehrfachberührungen mit einer Latenzzeit  $< 50 \text{ ms}$  nicht berücksichtigt werden. Bei diesem Test liegt der Fokus auf einer präzisen Arm- und Handstellung wobei die Geschwindigkeit keine Rolle spielt.

### 5.2.3 Beschreibung Nebenaufgabe

Die Ausführung der Stellaufgabe (siehe Bild 5.8) erfolgt mit der nicht dominanten Hand über dem Ultraschallarray (1). Zur Vermeidung einer Ablenkung über akustische Reize werden die Versuche mit einem Gehörschutz in Form von Gehörschutzstöpseln durchgeführt. Bei jedem Versuchsdurchgang führen die Probanden ihre Hand in die Mitte des Ultraschallarrays und suchen von dort zunächst den linken Rand des Bedienraumes. Aus dieser Position muss nun die vorgegebene Skalenposition rein über das taktile Feedback eingestellt werden. Dazu bewegen rechtshändige Probanden ihre Hand nach medial (siehe Bild 5.8) bzw. linkshändige Probanden ihre Hand vom Körper weg in lateraler Richtung. Je nach Versuchsreihe muss nun die Zielposition abgezählt oder über eine Änderung im Feedbackverlauf erkannt werden. Ein mehrfaches Hin- und Herfahren über die taktile Skala ist dabei zulässig. Sind die Probanden überzeugt, dass die korrekte Skalenposition eingestellt ist, halten sie die Hand für  $3 \text{ s}$  ( $\pm 0,50 \text{ s}$ ) ruhig an dieser Position. Diese wird automatisch gespeichert. Der Versuchsleiter erklärt nach erfolgreicher Speicherung den Versuchsdurchgang für beendet und gibt dem Probanden verbal Rückmeldung über die Beendigung des Durchgangs. Anschließend erfolgt die Beantwortung des Fragebogens (2), welcher den Probanden auf einem separaten Bildschirm (24 Zoll) zur linken Seite präsentiert wird.



**Bild 5.8:** Nebenaufgabe am Ultrahaptics

### 5.3 Fragebogenentwicklung

Die frühe Integration der Nutzer ist der Kern des Usability-Engineerings. Die Norm DIN EN ISO 9241-210 [2019, S. 7] beschreibt die Gebrauchstauglichkeit als das „*Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen*“. Die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit des taktilen Sliders im Raum erfolgt nach DIN EN ISO 9241-11 [2018, S. 16] mittels der Erfassung empirischer Daten hinsichtlich der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit anhand eines Fragebogens. Die Dokumentation der demographischen Daten, der taktilen Wahrnehmungsleistung sowie der objektiven und subjektiven Versuchsdaten des taktilen Feedbacks wird vom Versuchsleiter im Interviewverfahren mit den Probanden durchgeführt. Die Antwortmöglichkeiten sind uni- bzw. bipolar durch numerische oder verbale Marken gekennzeichnet. Bei den bipolaren Antwortmöglichkeiten werden 7-stufige Ratingskalen mit äquidistanten Antwortmöglichkeiten verwendet. Im Nachfolgenden erfolgt die Beschreibung des Fragebogens. Der Aufbau des Fragebogens ist schematisch in Tabelle 5.5 dargestellt. Die Erfassung von demographischen Daten, gesundheitlichen Einschränkungen des Bewegungsapparats sowie des Herz-Kreislaufsystems und der taktilen Wahrnehmung dienen zur Beschreibung des Probandenkollektivs der jeweiligen

Versuchsreihe. Diese Daten werden vor Beginn des Hauptversuchs im Rahmen eines Vorversuchs durch den Versuchsleiter im Interviewverfahren erfragt bzw. abgeprüft (vgl. Kapitel 5.2.1).

Zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit des taktilen Feedbacks wird Abschnitt 4 des Fragebogens jeweils an die Versuchsreihen VR01, VR02 und VR03 angepasst (siehe Tabelle 5.5). Die Fragen des vierten Abschnitts werden jeweils nach jeder durchgeführten Stellaufgabe gestellt. Die Befragung dient zur Ermittlung der geeignetsten Parameter-einstellungen für ein taktilen Feedback im Raum bei der Bedienung eines Sliders. Anhand der objektiv gemessenen Werte können Aussagen zur Effektivität und Effizienz des taktilen Feedbacks abgeleitet werden. Die gemessenen Größen in Tabelle 5.5 umfassen dabei Daten und Zahlenwerten, die die Häufigkeit eines Ereignisses beschreiben, wie zum Beispiel die Aufgabenerfüllung der Haupt- und Nebenaufgabe, die Stelldifferenz oder auch kontinuierliche Daten wie beispielsweise die Bedienzeit. Zusätzlich werden die objektiv erfassten Messwerte um subjektive Daten aus der Befragung der Probanden ergänzt (siehe Tabelle 5.5). Der Fokus liegt auf der subjektiven Einstellung des Probanden gegenüber dem eingestellten taktilen Feedback, anhand dessen Aussagen zur Zufriedenheit der Probanden hinsichtlich der Interaktion mit dem taktilen Feedback abgeleitet werden können. Zur Vermeidung nutzungsbedingter Schäden ist in der Medizintechnik eine ergonomische Dialoggestaltung zwischen Mensch und Maschine ausschlaggebend [REUTER 2018]. Ein bedeutendes Kriterium für die Dialoggestaltung mit dem taktilen Feedback im Raum bei der Handgestenbedienug im Sinne der Informationsübertragung durch das Stellteil als Anzeiger ist die Selbstbeschreibungsfähigkeit [DIN EN ISO 9241-110 2008]. Die Selbstbeschreibungsfähigkeit ist dabei eng mit der Erlernbarkeit verknüpft. Bei einer hohen Selbstbeschreibungsfähigkeit des Produkts ist es für ungeübte oder unerfahrene Nutzer einfacher die Gerätebedienung zu erlernen. Die Selbstbeschreibungsfähigkeit als auch die Erlernbarkeit beeinflussen somit unmittelbar die Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit der Nutzer [BACKHAUS 2010, S. 15]. Konkret werden die Probanden dazu nach dem Sicherheitsgefühl, die richtige Skalenposition eingestellt zu haben, der Ausprägung, Präzision, Benutzungsgeschwindigkeit und Erlernbarkeit bezüglich der Parametereinstellungen des taktilen Feedbacks sowie der mentalen Beanspruchung während der Ausführung der Stellaufgabe befragt. Am Ende des Hauptversuchs besteht für die Probanden die Möglichkeit Anregungen zum taktilen Feedback und zum Versuchsdesign zu äußern.



<b>Untersuchungsziel</b>	<b>Versuchsreihe</b>
<b>1) Demographische Daten</b>	
Alter, Größe, Gewicht, Geschlecht, Bildungsgrad, Händigkeit, Nationalität, berufliche Tätigkeit, feinmotorisches Hobby, Musikinstrument, Raucher	VR01, VR02, VR03
<b>2) Gesundheitliche Einschränkungen des Bewegungsapparats</b>	
Durchblutungsstörungen, Einschränkungen im Arm-/Hand-/Fingerbereich	VR01, VR02, VR03
<b>3) Taktile Wahrnehmung</b>	
Zweipunktdiskriminationsschwelle am ersten Fingerglied des Mittelfingers	VR01, VR02, VR03
Zweipunktdiskriminationsschwelle an der Handinnenfläche	VR01, VR02, VR03
Semmes-Weinstein Knickmonofilament-Test	VR01, VR02, VR03
Vibrationsempfinden nach Rydel Seiffer	VR01, VR02, VR03
<b>4) Gebrauchstauglichkeit des taktilen Feedbacks</b>	
<b>Effektivität</b>	
Fehleranzahl	VR01, VR02, VR03
Aufgabenerfüllung der Nebenaufgabe	VR01, VR02, VR03
Stelldifferenz	VR01, VR02, VR03
<b>Effizienz</b>	
Bedienzeit	VR01, VR02, VR03
Mentale Beanspruchung	VR01, VR02, VR03
<b>Zufriedenheit</b>	
Gefühl richtig gestellt zu haben	VR01, VR02
Beurteilung der Ausprägung des Feedbacks	VR01, VR02
Beurteilung Präzision	VR01, VR02
Beurteilung der Benutzungsgeschwindigkeit	VR01, VR02
Beurteilung der Erlernbarkeit	VR01, VR02
<b>5) Allgemeine Anmerkungen zum taktilen Feedback und zum Versuch</b>	

**Tabelle 5.5:** Schematischer Aufbau des Fragebogens mit Zuordnung der Beurteilungskriterien zur entsprechenden Versuchsreihe

## 6 Experimentelle Vorstudien

Zur Eingrenzung der Parameter zur Gestaltung des taktilen Feedbacks und zur Finalisierung des Versuchsaufbaus werden im Rahmen der Forschungstätigkeit des Verfassers am Institut mehrere experimentelle Vorstudien, aufbauend auf den Untersuchungen von SCHMID ET AL. [2021B], durchgeführt. Im Detail werden der Einfluss der Bedienung mit dominanter und nicht dominanter Hand untersucht. Weiterführend folgen Untersuchungen im Hinblick auf den Einfluss des Neigungswinkels des Ultraschallarrays auf die Bedienung. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Vorstudien werden im folgenden Kapitel dargelegt.

### 6.1 Bedienung mit dominanter und nicht dominanter Hand

In Anbetracht eines medizinischen Use-Cases, wie bspw. eines minimalinvasiven Eingriffs, erfolgt die Bedienung in Form einer Nebenaufgabe, da sich der Operateur primär auf das Operationsfeld konzentriert. Aufbauend auf den Untersuchungen von SCHMID ET AL. [2021B] wird in dieser Studie der Einfluss der Bedienung mittels dominanter oder nicht dominanter Hand auf die Stellgenauigkeit, Bedienzeit sowie die Komfortbewertung experimentell ermittelt. Zugleich dient dieser Vorversuch dem Verfasser zur Konkretisierung der Versuchsparameter bezüglich der Feedbackintensität und des Skalenabstands. Dazu werden mit jeder Hand 16 Versuchsmerkmale untersucht (siehe Tabelle 6.1). Die Kodierung der Versuchsmerkmale setzt sich dabei aus der jeweiligen Hand (dominanter Hand, nicht dominanter Hand) und dem Versuchsmerkmal zusammen. Der Skalenabstand zwischen den Rastpunkten wird entsprechend der Untersuchung von SCHMID ET AL. [2021B] gewählt, was einem minimalen Skalenabstand von 15,00 mm entspricht. Die Abstufung der weiteren Skalenabstände in Tabelle 6.1 erfolgt auf Basis der Normzahlreihe R 10 [DIN 323-1 1974].

Die Bedienung mit dominanter und nicht dominanter Hand wird in dieser Studie jeweils mit einer schwachen, mittleren und starken Feedbackintensität untersucht (vgl. Tabelle 6.1). Nach SCHMID ET AL. [2021B] wird eine Feedbackintensität größer 38 % (427,12 Pa Schalldruck) für die Ausführung der Stellaufgabe empfohlen. Gemäß der Untersuchung von SCHMID ET AL. [2021B] wäre somit als schwache Intensität 48 % (539,52 Pa) zu wählen. Um dies zu überprüfen wird eine zusätzliche Intensitätsstufe aus dem Mittelwert der Intensitätsstufen von 38 % und 48 % gewählt. Dies entspricht einer Feedbackintensität von 43 % (483,32 Pa). Die mittlere Intensitätsstufe ergibt sich aus dem Mittel-

wert der Intensitätslevel 60 % (674,40 Pa) und 75 % (843,00 Pa) der Studie von SCHMID ET AL. [2021B] zu 68 % (764,32 Pa). Das starke Intensitätslevel wird aus der Studie von SCHMID ET AL. [2021B] mit 95 % (1067,80 Pa) übernommen. Somit ergeben sich die Versuchsmerkmale nach Tabelle 6.1.

Versuchsmerkmale	Jeweils für die Ausführung mit dominanter und nicht dominanter Hand															
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16
Intensität	43 %	48 %	68 %	95 %	43 %	48 %	68 %	95 %	43 %	48 %	68 %	95 %	43 %	48 %	68 %	95 %
Skalenabstand	15,00 mm				18,75 mm				30,00 mm				37,50 mm			

**Tabelle 6.1:** Versuchsmerkmale für die Ausführung der Stellaufgabe mit dominanter und nicht dominanter Hand

Die Hauptaufgabe der Probanden besteht darin mittels des taktilen Feedbacks auf einer Skalenanzeige 60 % einzustellen. Auf eine Nebenaufgabe wird in dieser Untersuchung verzichtet. Die Versuchsmerkmale werden den Probanden randomisiert präsentiert, wobei immer mit der dominanten Hand der Probanden begonnen wird. Nach jedem Versuchsdurchgang bewerten die Probanden das eingestellte Feedback hinsichtlich der Präzision und der Intensität anhand einer 7-stufigen Likert-Skala (siehe Bild 6.1). Es werden zusätzlich die Stellgenauigkeit sowie die Bedienzeit erfasst. Am Versuch nahmen 30 Probanden (7 weiblich, 23 männlich) aus dem Universitätsumfeld mit einer Altersspanne von 21 bis 37 Jahren teil ( $\bar{X} = 27,27$  Jahren,  $SD = 3,73$  Jahre) teil. Die Mehrheit der Probanden sind rechtshändig (90 %). Die Versuchsdauer beträgt ca. 20 Minuten.

**Wie würden Sie die Präzision der taktilen Skala beurteilen?**

0 (unpräzise)   
  1   
  2   
  3   
  4   
  5   
  6 (sehr präzise)

---

**Wie beurteilen Sie die Intensität des taktilen Feedbacks?**

0 (zu schwach)   
  1   
  2   
  3 (genau richtig)   
  4   
  5   
  6 (zu stark)

**Bild 6.1:** Fragebogen zur Bewertung der Präzision und Intensität des Feedbacks

Anhand der deskriptiven Auswertung konnte festgestellt werden, dass die Bedienung mit der nicht dominanten Hand zu geringfügig besseren Werten hinsichtlich der Aufgabenerfüllung, der Bedienzeit sowie der Bewertung der Präzision und der Bewertung der Feedbackintensität führt. Zur inferenzstatistischen Auswertung aller Versuchsergebnisse

dieser Arbeit wurde die Software SPSS 27 (IBM) verwendet. Die Versuchsergebnisse wurden zunächst auf eine Normalverteilung mittels eines Kolmogorov-Smirnov-Tests überprüft. Exemplarisch ist das Testergebnis für die Stellgenauigkeit in Tabelle 6.2 zu sehen. Liegt der Signifikanzwert  $p$  unter 0,05 kann mit 95-prozentiger Sicherheit eine Normalverteilung verworfen werden (vgl. Tabelle 6.2 bspw. V1 ( $p = 0,024$ )). Die Testergebnisse für die Bedienzeit, Präzision und Intensität sind im Anhang A.1 in Tabelle A.1.1 bis A.1.3 zu finden. Anhand dieser kann eine Normalverteilung der Daten ebenfalls negiert werden.

Versuchsmerkmal	Kolmogorov-Smirnov-Test		
	Teststatistik z	df	Signifikanzwert p
V1	0,123	60	0,024
V2	0,215	60	< 0,001
V3	0,230	60	< 0,001
V4	0,300	60	< 0,001
V5	0,074	60	0,200
V6	0,159	60	0,001
V7	0,277	60	< 0,001
V8	0,295	60	< 0,001
V9	0,131	60	0,012
V10	0,167	60	< 0,001
V11	0,221	60	< 0,001
V12	0,216	60	< 0,001
V13	0,106	60	0,094
V14	0,166	60	< 0,001
V15	0,233	60	< 0,001
V16	0,233	60	< 0,001

**Tabelle 6.2:** Normalverteilung der Daten bezüglich der Stellgenauigkeit

Die weitere Betrachtung der Versuchsergebnisse erfolgt mit Hilfe der inferentiellen Statistik. Da der Fokus der Studie auf der Bedienung mittels dominanter und nicht dominanter Hand lag, wurde ein Mann-Whitney-U-Test zur Unterschiedsprüfung herangezogen. Vereinzelt können dabei statistisch relevante Unterschiede in Anbetracht der Bedienung mit dominanter und mit nicht dominanter Hand gefunden werden (siehe blaue Felder Tabelle 6.3). Tabelle 6.3 enthält neben der Teststatistik  $z$  zusätzlich den Signifikanzwert  $p$ . Ein Signifikanzniveau von  $p \leq 0,05$  wird als signifikant,  $p \leq 0,01$  als hoch signifikant und  $p \leq 0,001$  als höchst signifikant bezeichnet (vgl. Blaufärbung Tabelle 6.3). Bezüglich der Stellgenauigkeit gibt es einen hoch signifikanten Unterschied bei V1 ( $z = -3,040$ ,  $p = 0,002$ ,  $n = 30$ ) zwischen der Bedienung mit dominanter und nicht dominanter Hand. Ebenfalls kann ein signifikanter Unterschied bei Versuchsmerkmal V16 ( $z = 2,538$ ,  $p = 0,011$ ,  $n = 30$ ) identifiziert werden. Hinsichtlich der Bedienzeit gibt es einen

signifikanten Unterschied bei Versuchsmerkmal V1 (siehe Tabelle 6.3). Zur Bewertung der Präzision des Feedbacks wird eine Unterschiedsprüfung mittels Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Es zeigt sich anhand Tabelle 6.3 ein hoch signifikanter Unterschied bei Versuchsmerkmal V1, ein signifikanter Unterschied bei Versuchsmerkmal V5 und V6, und jeweils ein hoch signifikanter Unterschied bei Versuchsmerkmal V9 und V10. Bezüglich der Bewertung der Feedbackintensität zeigt die Unterschiedsprüfung mittels Mann-Whitney-U-Test einen signifikanten Unterschied bei Versuchsmerkmal V1, V6 und bei Versuchsmerkmal V14 (vgl. Tabelle 6.3).

n=30	Versuchsmerkmal	Intensität	Skalenabstand	Stellgenauigkeit	Bedienzeit	Präzision	Intensität
Signifikante Unterschiede zwischen der Bedienung mit dominanter und nicht dominanter Hand	V1	43 %	15,00 mm	z = -3,040 p = 0,002	z = -2,269 p = 0,023	z = 3,017 p = 0,003	z = 2,448 p = 0,014
	V2	48 %		z = -1,620 p = 0,105	z = -0,370 p = 0,712	z = 1,776 p = 0,076	z = 0,863 p = 0,388
	V3	68 %		z = 0,408 p = 0,683	z = -1,101 p = 0,271	z = 1,532 p = 0,126	z = 1,602 p = 0,109
	V4	95 %		z = 0,335 p = 0,737	z = -0,946 p = 0,344	z = 0,150 p = 0,881	z = -0,319 p = 0,749
	V5	43 %	18,75 mm	z = -0,495 p = 0,620	z = -1,116 p = 0,264	z = 2,027 p = 0,043	z = 1,063 p = 0,288
	V6	48 %		z = -1,539 p = 0,124	z = -1,730 p = 0,084	z = 2,167 p = 0,030	z = 2,286 p = 0,022
	V7	68 %		z = -0,365 p = 0,715	z = 0,148 p = 0,882	z = 0,015 p = 0,988	z = 0,369 p = 0,712
	V8	95 %		z = 0,792 p = 0,429	z = 0,858 p = 0,391	z = 0,793 p = 0,428	z = 0,685 p = 0,494
	V9	43 %	30,00 mm	z = -0,111 p = 0,912	z = -1,079 p = 0,280	z = 3,007 p = 0,003	z = 1,865 p = 0,062
	V10	48 %		z = -0,593 p = 0,553	z = -1,855 p = 0,064	z = 3,289 p = 0,001	z = 1,504 p = 0,133
	V11	68 %		z = -0,661 p = 0,508	z = -1,042 p = 0,297	z = 1,283 p = 0,199	z = 1,264 p = 0,206
	V12	95 %		z = -0,514 p = 0,607	z = -1,020 p = 0,308	z = 0,387 p = 0,698	z = 0,316 p = 0,752
	V13	43 %	37,50 mm	z = 0,488 p = 0,625	z = -0,813 p = 0,416	z = 0,055 p = 0,956	z = -0,546 p = 0,585
	V14	48 %		z = 0,370 p = 0,711	z = -0,954 p = 0,340	z = 1,835 p = 0,066	z = 2,181 p = 0,029
	V15	68 %		z = -0,030 p = 0,976	z = -0,540 p = 0,589	z = 0,950 p = 0,342	z = 0,935 p = 0,350
	V16	95 %		z = 2,538 p = 0,011	z = -0,806 p = 0,420	z = 0,321 p = 0,748	z = 0,109 p = 0,913

p ≤ 0,05

p ≤ 0,01

p ≤ 0,001

**Tabelle 6.3:** Statistisch relevante Unterschiede zwischen der Bedienung mit der dominanten und nicht dominanten Hand

Auffällig bei der Unterschiedsprüfung ist, dass die zuerst geprüften Versuchsmerkmale mit der dominanten Hand bei der Unterschiedsprüfung immer schlechter abschneiden,

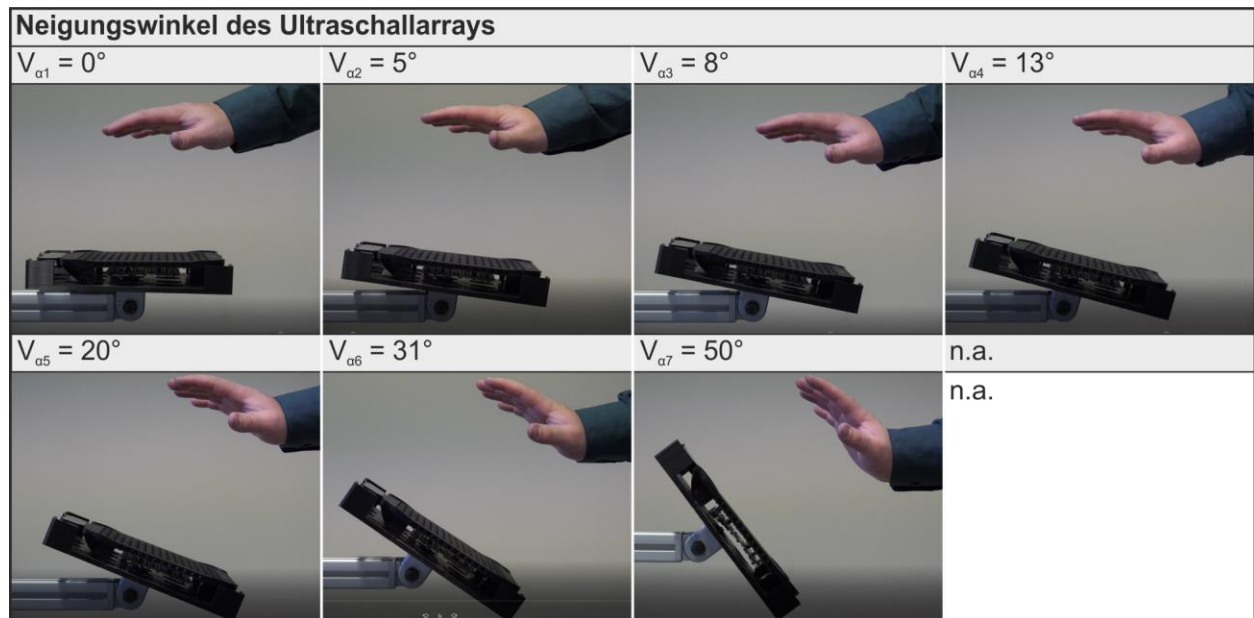
als die im Nachgang erfolgte Versuchsdurchführung mit der nicht dominanten Hand. Die statistisch relevanten Unterschiede treten mit Ausnahme von V16 meist nur bei einer Feedbackintensität von 43 % oder 48 % auf. Bei einem Intensitätslevel von 68 % oder 95 % kann meist kein statistisch relevanter Unterschied bei der Bedienung mit der dominanten oder nicht dominanten Hand festgestellt werden. Das bessere Abschneiden der Bedienung mittels der nicht dominanten Hand kann einem Lerneffekt der Probanden zugeordnet werden, da die zweite Durchführung der gleichen Versuchsmerkmale zu einem besseren Ergebnis oder einer besseren Bewertung führt. Mit Fokus auf ein minimalinvasives, chirurgisches Bedienszenario erfolgt daher die Durchführung der Hauptaufgabe (siehe Kapitel 5.2.2) in weiteren Untersuchungen mit der dominanten Hand und die Bedienung der berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle im Raum (siehe Kapitel 5.2.3) mit der nicht dominanten Hand. Für weitere Untersuchungen wird zudem die minimale Feedbackintensität auf 48 % gesetzt.

## **6.2 Einfluss des Neigungswinkels des Ultraschallarrays auf die Ausführung der Stellaufgabe**

Eine weitere Vorstudie wird zur Bestimmung des Neigungswinkels des Ultraschallarrays durchgeführt. DIN EN ISO 9241-410 [2012] empfiehlt für die Neigung von Tastaturen einen Winkel von 0° bis 15° und VDI/VDE 3850-2 [2017, S. 11] beschreibt eine Dorsalflexion der Hand größer -50° als deutlich belastend. Im Rahmen dieser Studie wird untersucht, ob diese Empfehlungen auf eine berührungslose Mensch-Maschine-Schnittstelle auf Ultraschallbasis übertragen werden können und welchen Einfluss der Neigungswinkel auf eine effektive, effiziente und zufriedenstellende Bedienung ausübt. Für diese Untersuchung wird eine Feedbackintensität von 77 % bei einem Skalenabstand von 30,00 mm gewählt. Ausgehend von einer Basisintensität von 48 % entspricht die gewählte Feedbackintensität nach Normreihe R 10 [DIN 323-1 1974] einer mittleren Intensitätsstufe. Die Aufgabe der Probanden ist die Skalenposition „6“ anhand des taktilen Feedbacks einzustellen. Dabei wird der Neigungswinkel des Ultraschallarrays gemäß Tabelle 6.4 in sieben Stufen nach DIN 323-1[1974] Normalzahlreihe R5 randomisiert verstellt.

Parallel zur Nebenaufgabe wird am medizinischen Phantom die Konzentrationsaufgabe als Hauptaufgabe nach Kapitel 5.2.2 ausgeführt. Die Konzentrationsaufgabe stellt den Use-Case eines minimalinvasiven, chirurgischen Eingriffs dar. Nach jedem Versuchsdurchgang erfolgt die Bewertung des taktilen Feedbacks der Nebenaufgabe. Dabei wird die Stelleffektivität, Stelleffizienz sowie Zufriedenheit der Probanden objektiv erfasst bzw.

anhand eines Fragebogens nach Bild 6.2 subjektiv bewertet. Der Fokus der subjektiven Befragung liegt auf der mentalen Beanspruchung der Probanden nach [DIN EN ISO 9241-420 2011, S. 43] während der Ausführung der Stellaufgabe sowie der Bewertung der Präzision des taktilen Feedbacks.



**Tabelle 6.4:** Übersicht bezüglich der Neigungswinkel des Ultraschallarrays

Wie beurteilen Sie die mentale Beanspruchung während der Ausführung der Stellaufgabe?											
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
0	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Überhaupt nichts	Sehr, sehr schwach	Sehr schwach	Schwach	Mäßig	Ziemlich stark	Stark		Sehr stark			Sehr, sehr stark

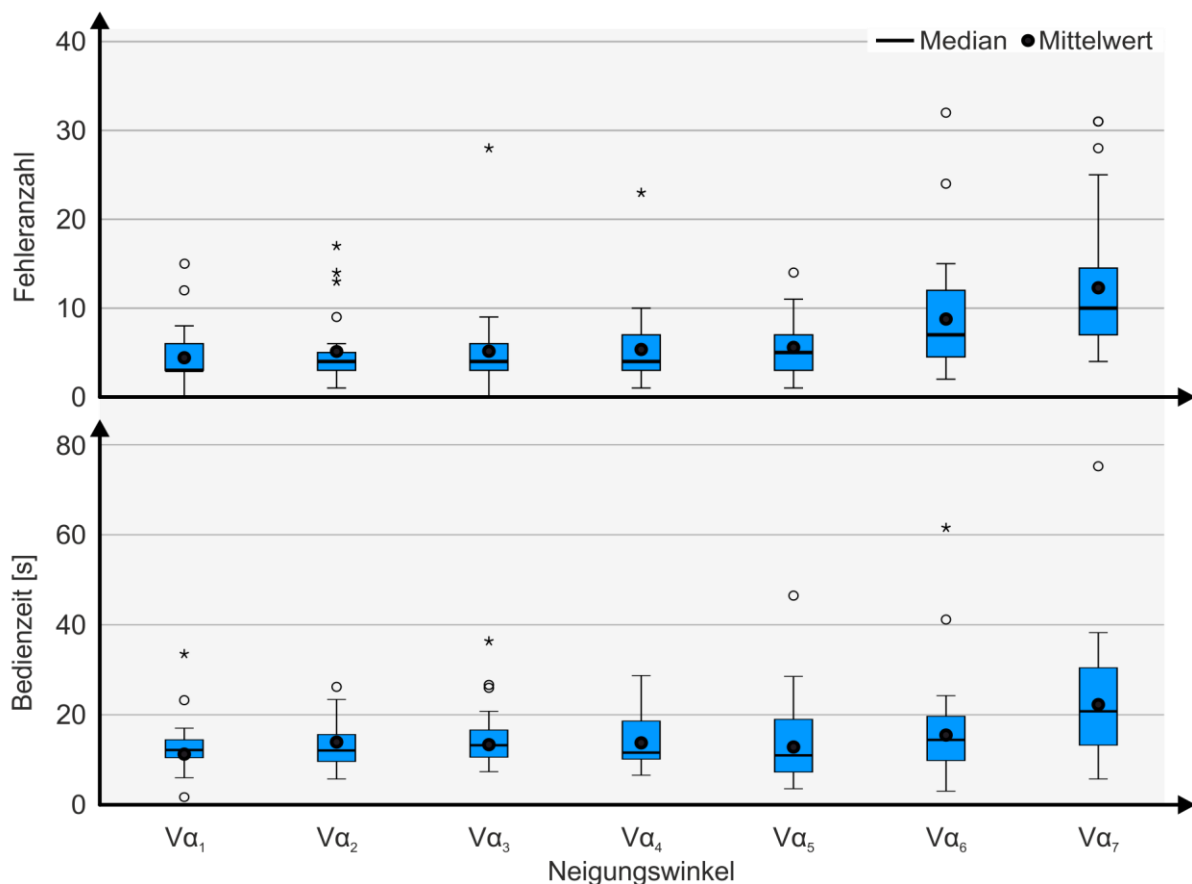
Wie beurteilen Sie die Präzision der taktilen Skala?						
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
0	1	2	3	4	5	6
(unpräzise)						(sehr präzise)

**Bild 6.2:** Bewertung der mentalen Beanspruchung und der Präzision des Feedbacks

An dieser Untersuchung nahmen insgesamt n = 31 Probanden mit einem durchschnittlichen Alter von 27,39 Jahren (SD = 6,05 Jahre) im Alter von 18 bis 50 Jahren teil. 16 Probanden sind männlich und 15 weiblich. 28 Personen des Probandenkollektivs sind rechtshändig und die Versuchsdauer beträgt ca. 20 Minuten.

Die Daten dieser Vorstudie als auch die Daten der Versuchsreihen VR01, VR02 und VR03 werden zum einen deskriptiv als auch inferenzstatistisch betrachtet und ausgewertet. Das relevante Vorgehen wird im Folgenden anhand eines Beispiels erläutert.

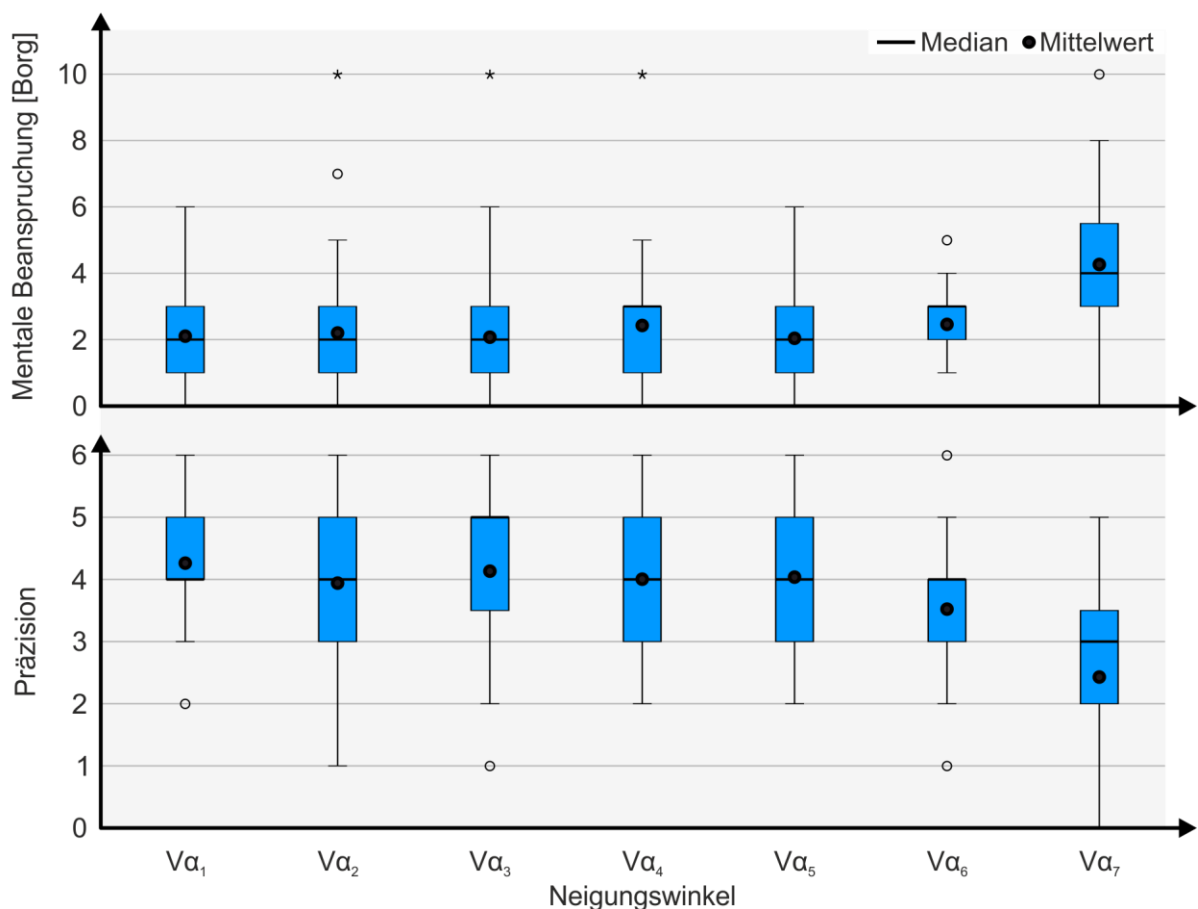
Die Fehleranzahl (siehe Bild 6.3) beschreibt die Anzahl an Kontakten zwischen der Öse und dem Metallstift. Die Anzahl der Fehler ist auf der Abszisse abgetragen. Auf der Ordinate sind die geprüften Versuchsmerkmale zu finden. Die Ergebnisdarstellung erfolgt anhand eines Box-Plot-Diagramms pro Versuchsmerkmal. Ein Box-Plot-Diagramm besteht aus zwei Whiskern, welche den Minimal- und Maximalwert der Versuchsergebnisse angeben. Die Box wird nach unten durch das untere Quartil (25 % der Daten) und nach oben durch das obere Quartil (75 % der Daten) begrenzt. Innerhalb der Box liegen die mittleren 50 % der Daten inklusive dem Medianwert, welcher als Balken gekennzeichnet ist. Der Abstand zwischen den beiden Quartilen wird als Interquartilsabstand bezeichnet und gibt die Streuung der Daten an. Je kleiner dieser Bereich, umso geringer ist die Streuung. Ausreißer werden in Form von Kreisen oder Sternen angegeben. Dabei werde Ausreißer mit einem Abstand zwischen dem eineinhalb- bis dreifachen Interquartilsabstand vom unteren oder oberen Quartil als einfache Ausreißer mit einem Kreis gekennzeichnet. Werte, die außerhalb dieses Bereichs liegen, werden als Extremwerte bezeichnet und mit einem Stern gekennzeichnet. In einem Box-Plot-Diagramm lassen sich somit Streu- als auch Lageinformationen abbilden. [HEDDERICH & SACHS 2018]



**Bild 6.3:** Deskriptive Auswertung Fehleranzahl und Bedienzeit



In Bild 6.3 ist ersichtlich, dass die Fehleranzahl mit steigendem Neigungswinkel des Ultraschallarrays zunimmt. Bei  $V\alpha_1$  liegt die durchschnittliche Fehleranzahl bei 4,42 Kontakten und steigt bis  $V\alpha_7$  auf einen Mittelwert von 12,29 Kontakten an. Ebenfalls steigt auch der Interquartilsabstand ab  $V\alpha_2$ , was eine größere Streuung der Fehleranzahl repräsentiert. Die durchschnittliche Bedienzeit zum Einstellen der vorgegebenen Skalenposition schwankt zwischen  $V\alpha_1$  und  $V\alpha_5$  zwischen 12,28 s und 13,87 s. Ab Neigungswinkel  $V\alpha_6$  ist ein Anstieg der Bedienzeit sowie eine Vergrößerung des Interquartilabstands zu erkennen. Die geringste Bedienzeit wird mit Versuchsmerkmal  $V\alpha_1$  erreicht. Hinsichtlich der mentalen Beanspruchung (siehe Bild 6.4) während der Ausführung der Nebenaufgabe schwanken die Mittelwerte der Bewertung zwischen einem minimalen Wert von 2,19 ( $V\alpha_5$ ) und der maximalen Beanspruchung von 4,42 ( $V\alpha_7$ ). Ab Neigungswinkel  $V\alpha_6$  ist eine ansteigende mentale Beanspruchung in Bild 6.4 zu erkennen. Dass der Neigungswinkel einen Einfluss auf die Präzision des taktilen Feedbacks ausübt, ist ebenfalls in Bild 6.4 erkennbar. Die Präzision wird ab einem Neigungswinkel von  $31^\circ$  ( $V\alpha_6$ ) im Mittel schlechter bewertet. Die beste Bewertung erreicht Neigungswinkel ( $V\alpha_1$ ).



**Bild 6.4:** Deskriptive Auswertung mentale Beanspruchung und Präzision

Zur Identifizierung inferenzstatistischer Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsmerkmalen stehen zunächst das Skalenniveau und die Verteilung der Versuchsdaten im Fokus. Da die Daten nicht in Klassen eingeteilt sind, kann der Kolmogorow-Smirnov-Test zur Prüfung auf eine Normalverteilung der Daten angewendet werden. Das Testergebnis ist im Anhang A.2 Tabelle A.2.1 bis A.2.4 zu finden. Anhand der Testergebnisse kann eine Normalverteilung der Daten verworfen werden. Da es sich um verbundene, abhängige Stichproben handelt und die Daten nicht normalverteilt sind, wird für die weitere Analyse der Versuchsergebnisse ein Friedman-Test verwendet. Dazu wird die Teststatistik mit dem kritischen Wert, der durch die Freiheitsgrade (df) bestimmten Chi-Quadrat-Verteilung verglichen [BORTZ & LIENERT 2008, S. 203 - 208], [JANSSEN & LAATZ 2013, S. 655ff.]. Hinsichtlich der zentralen Tendenzen der Versuchsmerkmale zeigt sich, dass sich diese signifikant unterscheiden (Chi-Quadrat (31) = 68,259,  $p < 0,001$ ,  $n = 31$ ). Um einen detaillierteren Überblick bezüglich der konkreten Unterschiede zwischen den sieben verschiedenen Versuchsmerkmalen zu erhalten, wird eine Folgeanalyse mittels eines Post-hoc-Tests nach Dunn-Bonferroni durchgeführt [JANSSEN & LAATZ 2013, S. 343 - 350]. Damit können gezielt statistisch relevante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Versuchsmerkmale kenntlich gemacht werden. Diese werden paarweise miteinander verglichen. Die paarweisen Vergleiche mit signifikanten Unterschieden sind in Tabelle 6.5 in Blau dargestellt. Tabelle 6.5 enthält neben der Teststatistik  $z$  analog zu Kapitel 6.1 den Signifikanzwert  $p$ . Ebenfalls wird im Verlauf zur Beurteilung der Bedeutsamkeit des Unterschieds zwischen den statistisch relevanten Versuchsmerkmalen die Effektstärke  $r$  in Form des Korrelationskoeffizienten nach Pearson angegeben. Die Effektstärke  $r$  dient zur Beurteilung der Bedeutsamkeit des Unterschieds zwischen den statistisch relevanten Versuchsmerkmalen. Ein Wert von  $r \geq 0,10$  entspricht einem geringen Effekt,  $r \geq 0,30$  einem mittleren Effekt und  $r \geq 0,50$  einem starken Effekt [COHEN 1988, S. 79f.]. Im Folgenden wird Tabelle 6.5 anhand eines ausgewählten Beispiels exemplarisch erläutert. Die Erfüllung der Hauptaufgabe, repräsentiert durch die Fehleranzahl, wird bei einem Neigungswinkel von  $V\alpha_6$  im Vergleich zum Neigungswinkel  $V\alpha_1$  höchst signifikant ( $z = -2,339$ ,  $p = < 0,001$ ,  $n = 31$ ,  $r = 0,42$ ) und im Vergleich zum Neigungswinkel von  $V\alpha_2$  als hoch signifikant schlechter ( $z = -2,097$ ,  $p = 0,003$ ,  $n = 31$ ,  $r = 0,38$ ) erledigt. Die Richtung des Unterschieds lässt sich anhand Bild 6.3 durch den Vergleich der Mittel- oder Medianwerte erkennen. Der Mittelwert von  $V\alpha_1$  (4,42 Kontakte) ist geringer als der von Versuchsmerkmal  $V\alpha_6$  (8,77 Kontakte), weshalb das Versuchsmerkmal  $V\alpha_6$  hinsichtlich der Fehleranzahl signifikant schlechter abschneidet als das

Versuchsmerkmal  $V\alpha_1$ . Anhand der Effektstärke  $r$  ist erkennbar, dass der Effekt bei beiden Paarungen als mittel einzustufen ist. Die Stelleffizienz wird durch die Bedienzeit sowie durch die mentale Beanspruchung repräsentiert (vgl. Bild 6.3 und Bild 6.4). Die geringste Bedienzeit wird mit dem Neigungswinkel von  $V\alpha_1$  erreicht. Gemäß Tabelle 6.5 und Bild 6.3 weist der Neigungswinkel  $V\alpha_7$  im Vergleich zum Neigungswinkel  $V\alpha_1$  eine signifikant höhere Bedienzeit auf. Der Neigungswinkel  $V\alpha_7$  erzeugt zudem gegenüber dem Neigungswinkel  $V\alpha_4$  und dem Neigungswinkel  $V\alpha_6$  eine hoch signifikant höhere mentale Beanspruchung. Nach Tabelle 6.5 und Bild 6.4 ist die mentale Beanspruchung beim Neigungswinkel  $V\alpha_7$  höchst signifikant höher im Vergleich zu den restlichen Neigungswinkeln  $V\alpha_1$ ,  $V\alpha_2$ ,  $V\alpha_3$  und  $V\alpha_4$ . Die Präzision des taktilen Feedbacks nimmt mit zunehmendem Neigungswinkel ab. Statistisch relevante Unterschiede treten dabei bei Paarungen  $V\alpha_1$ ,  $V\alpha_2$ ,  $V\alpha_3$ ,  $V\alpha_4$ ,  $V\alpha_5$  und  $V\alpha_6$  mit dem Neigungswinkel  $V\alpha_7$  auf (vgl. Tabelle 6.5).

n=31	Versuchsmerkmal	Fehleranzahl	Bedienzeit	Mentale Beanspruchung	Präzision
Signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen	$V\alpha_1 - V\alpha_2$	$z = -0,242$ $p = 1,000$ $r = 0,04$	$z = -0,478$ $p = 1,000$ $r = 0,09$	$z < 0,001$ $p = 1,000$ $r = 0,00$	$z = 0,694$ $p = 1,000$ $r = 0,12$
	$V\alpha_1 - V\alpha_3$	$z = -0,774$ $p = 1,000$ $r = 0,14$	$z = -0,935$ $p = 1,000$ $r = 0,17$	$z = 0,258$ $p = 1,000$ $r = 0,05$	$z = -0,048$ $p = 1,000$ $r = 0,01$
	$V\alpha_1 - V\alpha_4$	$z = -0,677$ $p = 1,000$ $r = 0,12$	$z = -1,022$ $p = 1,000$ $r = 0,18$	$z = -0,484$ $p = 1,000$ $r = 0,09$	$z = 0,548$ $p = 1,000$ $r = 0,10$
	$V\alpha_1 - V\alpha_5$	$z = -1,081$ $p = 1,000$ $r = 0,19$	$z = -0,326$ $p = 1,000$ $r = 0,06$	$z = 0,194$ $p = 1,000$ $r = 0,03$	$z = 0,629$ $p = 1,000$ $r = 0,11$
	$V\alpha_1 - V\alpha_6$	$z = -2,339$ $p < 0,001$ $r = 0,42$	$z = -0,717$ $p = 1,000$ $r = 0,13$	$z = -0,565$ $p = 1,000$ $r = 0,10$	$z = 1,29$ $p = 0,393$ $r = 0,23$
	$V\alpha_1 - V\alpha_7$	$z = -3,581$ $p < 0,001$ $r = 0,64$	$z = -2,152$ $p = 0,015$ $r = 0,39$	$z = -2,677$ $p < 0,001$ $r = 0,48$	$z = 2,984$ $p < 0,001$ $r = 0,54$
	$V\alpha_2 - V\alpha_3$	$z = -0,532$ $p = 1,000$ $r = 0,10$	$z = -0,457$ $p = 1,000$ $r = 0,08$	$z = 0,258$ $p = 1,000$ $r = 0,05$	$z = -0,742$ $p = 1,000$ $r = 0,13$
	$V\alpha_2 - V\alpha_4$	$z = -0,435$ $p = 1,000$ $r = 0,08$	$z = -0,543$ $p = 1,000$ $r = 0,10$	$z = -0,484$ $p = 1,000$ $r = 0,09$	$z = -0,145$ $p = 1,000$ $r = 0,03$
	$V\alpha_2 - V\alpha_5$	$z = -0,839$ $p = 1,000$ $r = 0,15$	$z = 0,152$ $p = 1,000$ $r = 0,03$	$z = 0,194$ $p = 1,000$ $r = 0,03$	$z = -0,065$ $p = 1,000$ $r = 0,01$

$p \leq 0,05$

$p \leq 0,01$

$p \leq 0,001$

**Tabelle 6.5:** Paarweise Vergleich der Neigungswinkel hinsichtlich signifikanter Unterschiede (Teil 1/2)

n=31	Versuchsmerkmal	Fehleranzahl	Bedienzeit	Mentale Beanspruchung	Präzision
Signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen	V $\alpha_2$ – V $\alpha_6$	z = -2,097 p = 0,003 r = 0,38	z = -0,239 p = 1,000 r = 0,04	z = -0,565 p = 1,000 r = 0,10	z = 0,597 p = 1,000 r = 0,11
	V $\alpha_2$ – V $\alpha_7$	z = -3,339 p < 0,001 r = 0,60	z = -1,674 p = 0,181 r = 0,30	z = -2,677 p < 0,001 r = 0,48	z = 2,290 p = 0,001 r = 0,41
	V $\alpha_3$ – V $\alpha_4$	z = 0,097 p = 1,000 r = 0,02	z = -0,087 p = 1,000 r = 0,02	z = -0,742 p = 1,000 r = 0,13	z = 0,597 p = 1,000 r = 0,11
	V $\alpha_3$ – V $\alpha_5$	z = -0,306 p = 1,000 r = 0,05	z = 0,609 p = 1,000 r = 0,11	z = -0,065 p = 1,000 r = 0,01	z = 0,677 p = 1,000 r = 0,12
	V $\alpha_3$ – V $\alpha_6$	z = -1,565 p = 0,091 r = 0,28	z = 0,217 p = 1,000 r = 0,04	z = -0,823 p = 1,000 r = 0,15	z = 1,339 p = 0,309 r = 0,24
	V $\alpha_3$ – V $\alpha_7$	z = -2,806 p < 0,001 r = 0,50	z = -1,217 p = 1,000 r = 0,22	z = -2,935 p < 0,001 r = 0,53	z = 3,032 p < 0,001 r = 0,54
	V $\alpha_4$ – V $\alpha_5$	z = -0,403 p = 1,000 r = 0,07	z = 0,696 p = 1,000 r = 0,13	z = 0,677 p = 1,000 r = 0,12	z = 0,081 p = 1,000 r = 0,01
	V $\alpha_4$ – V $\alpha_6$	z = -1,661 p = 0,052 r = 0,30	z = 0,304 p = 1,000 r = 0,05	z = -0,081 p = 1,000 r = 0,01	z = 0,742 p = 1,000 r = 0,13
	V $\alpha_4$ – V $\alpha_7$	z = -2,903 p < 0,001 r = 0,52	z = -1,130 p = 1,000 r = 0,20	z = -2,194 p = 0,001 r = 0,39	z = 2,435 p < 0,001 r = 0,44
	V $\alpha_5$ – V $\alpha_6$	z = -1,258 p = 0,459 r = 0,23	z = -0,391 p = 1,000 r = 0,07	z = -0,758 p = 1,000 r = 0,14	z = 0,661 p = 1,000 r = 0,12
	V $\alpha_5$ – V $\alpha_7$	z = -2,500 p < 0,001 r = 0,45	z = -1,826 p = 0,087 r = 0,33	z = -2,871 p < 0,001 r = 0,52	z = 2,355 p < 0,001 r = 0,42
	V $\alpha_6$ – V $\alpha_7$	z = -1,242 p = 0,496 r = 0,22	z = -1,435 p = 0,510 r = 0,26	z = -2,113 p = 0,002 r = 0,38	z = 1,694 p = 0,043 r = 0,30

p ≤ 0,05

p ≤ 0,01

p ≤ 0,001

**Tabelle 6.5:** Paarweise Vergleich der Neigungswinkel hinsichtlich signifikanter Unterschiede (Teil 2/2)

Da die Neigungswinkel zwischen 0° und 8° hinsichtlich ihrer Bewertung sehr eng beieinanderliegen und keine statistisch relevanten Unterschiede in der Bewertung vorweisen, wird für die weiteren Studien ein Neigungswinkel des Ultraschallarrays von 0° gewählt.

## **7 Grundlagenorientierte Untersuchung des taktilen Feedbacks im Raum**

Kapitel 7 beinhaltet die Probandenstudien. Insgesamt wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Der Fokus von Versuchsreihe VR01 liegt auf der Erfassung von Wahrnehmungsschwellwerten. Die Versuchsreihe VR02 dient zur Ermittlung der Unterschiedsschwelle eines taktilen Merkmals im Raum. Abschließend erfolgt eine Evaluationsstudie an einem medizinischen Phantom. Jede Versuchsreihe beginnt zunächst mit der Beschreibung der Untersuchungshypothesen. Anschließend erfolgt die Darlegung der Untersuchungsparameter sowie die Beschreibung des Versuchsaufbaus und -ablaufs. Die Beschreibung des Probandenkollektivs und der statistischen Auswerteverfahren bilden den Mittelteil, bevor zum Schluss die Ergebnisse dargestellt und abschließend zusammengefasst werden.

### **7.1 Versuchsreihe 1: Erfassung von Wahrnehmungsschwellwerten**

Die Gebrauchstauglichkeit ist ein wichtiger Bestandteil bei der Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die elementaren Faktoren der Gebrauchsqualität, die Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit bilden die Grundlage einer guten Usability (siehe Kapitel 2.4). Versuchsreihe VR01 ist daher als grundlegende Untersuchung zum Aufbau einer taktilen Skala im Raum als Anzeigeelement anzusehen. Die Identifizierung von Wahrnehmungsschwellwerten dient dazu Parametereigenschaften hinsichtlich der Feedbackintensität und des Skalenabstands zu erarbeiten, um die Stellaufgabe effizient, effektiv und zufriedenstellend auszuführen.

#### **7.1.1 Hypothesen**

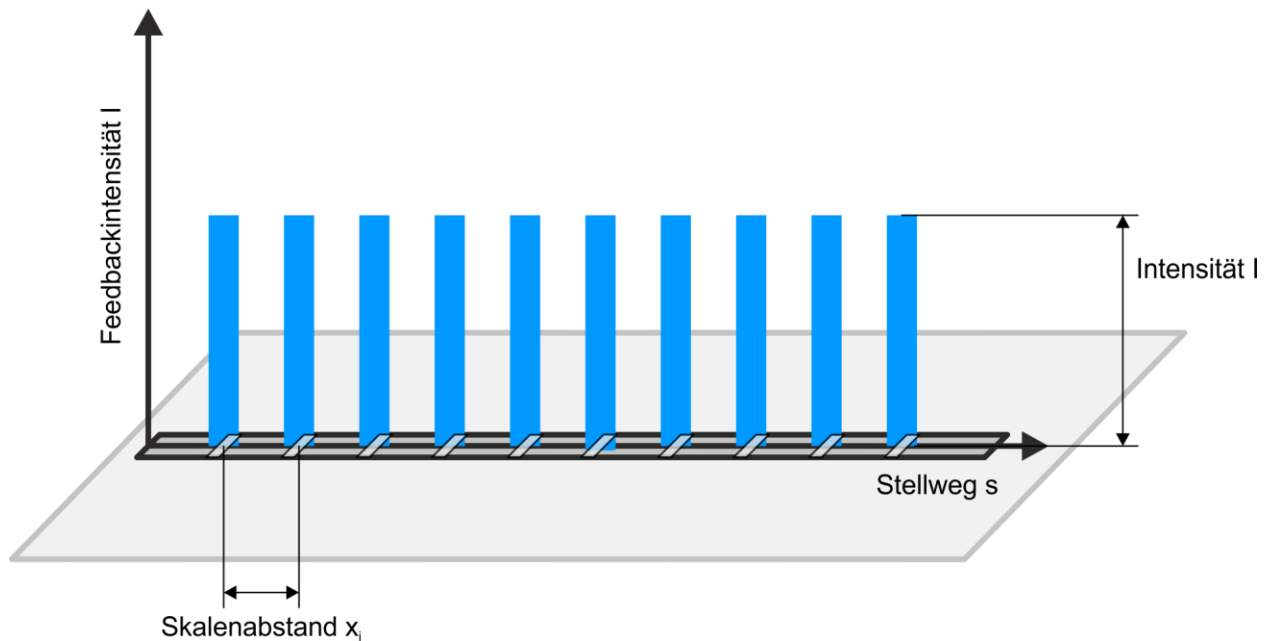
Mit Fokus auf die Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit des taktilen Feedbacks im Raum lassen sich detaillierte Untersuchungshypothesen ableiten. Die Untersuchungshypothesen benennen jeweils die messbaren Faktoren, welche sich explizit auf die Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit des taktilen Feedbacks auswirken. Bezüglich der Effektivität lassen sich beispielsweise die Aufgabenerfüllung der Haupt- und Nebenaufgabe sowie die Stellgenauigkeit erfassen. Die Effizienz der taktilen Skala kann anhand der Bedienzeit sowie der physischen als auch der mentalen Beanspruchung erfasst werden. Die Nutzerzufriedenheit lässt sich anhand der subjektiven Bewertung der Ausprägung, Präzision, Benutzungsgeschwindigkeit sowie der Erlernbarkeit des Feedbacks beurteilen. Anhand dieser Bewertungskriterien sind die folgenden detaillierten Untersuchungshypothesen in Tabelle 7.1 aufgestellt.

	H <sub>n</sub>	Beschreibung
Effektivität	H <sub>1</sub>	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.
	H <sub>2</sub>	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.
	H <sub>3</sub>	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.
	H <sub>4</sub>	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.
	H <sub>5</sub>	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.
	H <sub>6</sub>	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.
Effizienz	H <sub>7</sub>	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.
	H <sub>8</sub>	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.
	H <sub>9</sub>	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.
	H <sub>10</sub>	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.
Zufriedenheit	H <sub>11</sub>	Die <i>Ausprägung</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.
	H <sub>12</sub>	Die <i>Ausprägung</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.
	H <sub>13</sub>	Die <i>Präzision</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.
	H <sub>14</sub>	Die <i>Präzision</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.
	H <sub>15</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.
	H <sub>16</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.
	H <sub>17</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.
	H <sub>18</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.

**Tabelle 7.1:** Übersichtstabelle der Forschungshypothesen der ersten Versuchsreihe

### 7.1.2 Untersuchungsparameter

Zur Klärung, welche Auswirkungen die Parameter Feedbackintensität und Skalenabstand auf die Ausführung der Stellaufgabe haben, werden aufbauend auf den Herleitungen in Kapitel 4 insgesamt 25 verschiedene Parameterkombinationen gebildet (vgl. Bild 7.2). Ziel ist es, Basisparameter für das taktile Feedback der translatorischen Stellaufgabe zu identifizieren, die eine effektive, effiziente und zufriedenstellende Ausführung der Haupt- und Nebenaufgabe am Prüfstand erlauben. Zur Identifizierung von Basisparametern zum Aufbau einer taktilen Skala werden gezielt der Skalenabstand  $x_i$  sowie die Feedbackintensität  $I$  verändert (vgl. Bild 7.1). Die Parameterkombinationen für die Versuchsreihe VR01 werden auf Basis der Vorstudien in Kapitel 6 sowie Untersuchungen von SCHMID ET AL. [2021B] unter Anwendung der Normreihe R10 aufgebaut [DIN 323-1 1974, S. 2]. Die Normreihe R10 besteht aus sogenannten Normzahlen, welche für die Stufung von Größen verwendet werden, um die Versuchsmerkmale auf ein zielgerichtetes Minimum für die Versuchsdurchführung zu reduzieren. Die Normzahlen der Normreihe R10 sind gerundete Glieder mit einem Stufensprung von 1,25. Der Stufensprung beschreibt dabei den prozentuellen Zuwachs von Glied zu Glied [DIN 323-1 1974, S. 3].

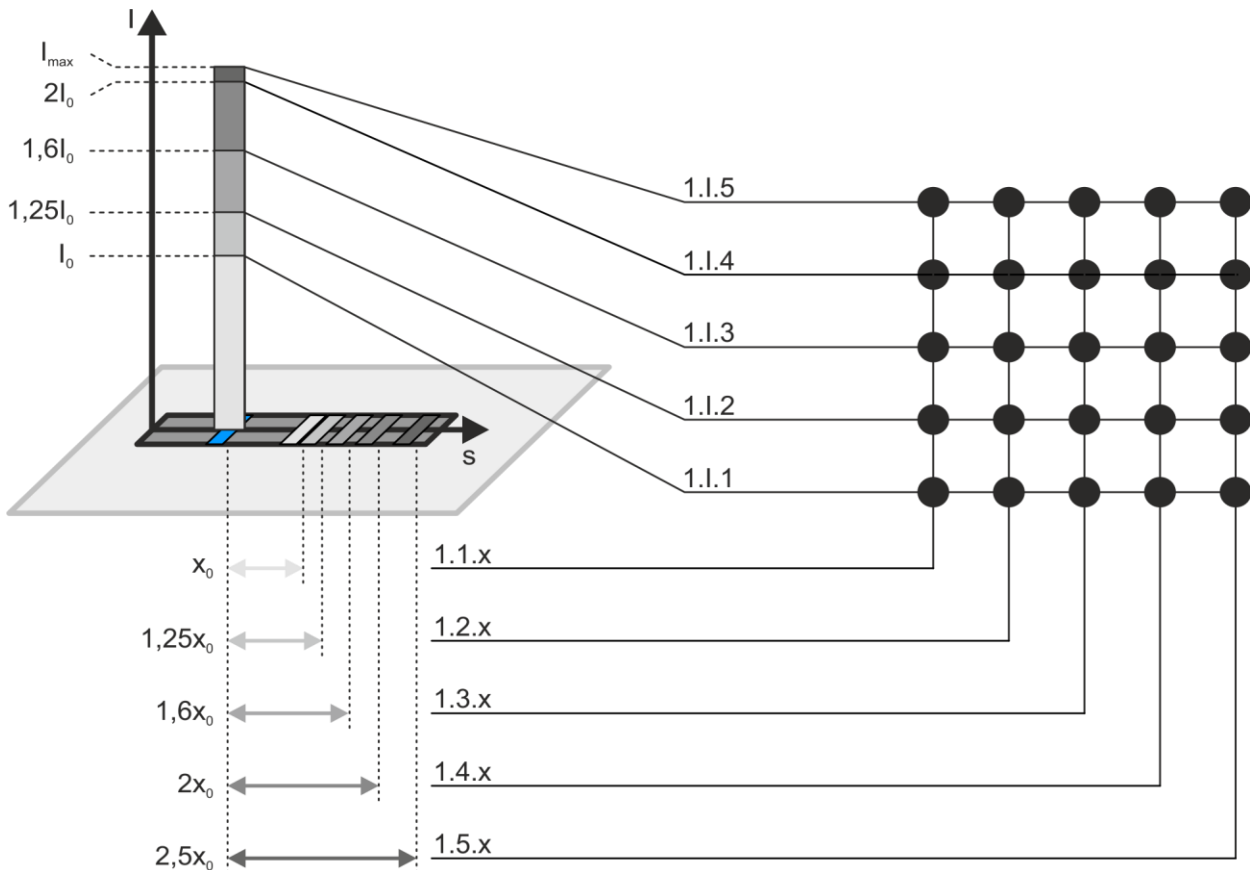


**Bild 7.1:** Schematische Darstellung Skalenverlauf VR01

Ziel der Versuchsreihe VR01 ist es einen Grundverlauf der taktilen Skala aufzubauen, mit welchem die Haupt- als auch die Nebenaufgabe bestmöglich ausgeführt werden. Gemäß HOWARD ET AL. [2019] liegt die 50 %-Erkennungsschwelle für einen einzelnen durch Amplitudenmodulation erzeugten Fokuspunkt des Ultrahaptics STRATOS im Durchschnitt zwischen einem Intensitätslevel von 48,70 % und 49,50 %, d. h. ca. 560 Pa Schalldruck. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch Untersuchungen von SCHMID ET AL. [2021B]. Auf Basis dieser Untersuchungen und den Vorstudien aus Kapitel 6 wird die Startintensität  $I_0$  auf 48 %, was einem Schalldruck von 540 Pa entspricht, festgelegt. Aufbauend auf dieser Startintensität lassen sich gemäß Bild 7.2 drei weitere Intensitätslevel anhand der Normreihe R10 ableiten. Ausgehend von einer Startintensität von 48 % ergeben sich durch die jeweilige Multiplikation mit dem Stufensprung des Faktors 1,25 aufsteigend die Intensitätslevel 60 %, 77 % und 96 %. Ein weiteres Intensitätslevel wird mit der maximalen Feedbackintensität  $I_{\max}$  von 100 % (1124 Pa) generiert. In Summe ergeben sich somit für die Versuchsreihe VR01 fünf Intensitätslevel (vgl. Bild 7.2).

Die Änderung des Skalenabstands erfolgt ebenfalls unter Anwendung der Normreihe R10 mit einem Stufensprung von 1,25. Basierend auf den Studienergebnissen der Vorstudien aus Kapitel 6 sowie den Ergebnissen von SCHMID ET AL. [2021B] wird für den minimalen Skalenabstand  $x_0$  ein Wert von 15 mm festgelegt. Unter Anwendung der Normreihe R10 ergeben sich folglich vier weitere Skalenabstände (18,75 mm, 23,10 mm, 30,00 mm, 37,50 mm). Die Entwicklung der Skalenabstände kann schematisch Bild 7.2 entnommen werden. In Kombination mit den Intensitätsleveln ergeben sich insgesamt 25 Kombi-

nationsmöglichkeiten für die taktile Basisskala, welche in Versuchsreihe VR01 untersucht werden. Die Kombinationsmöglichkeiten sind schematisch in Bild 7.2 dargestellt. Der Tabelle 7.2 kann die detaillierte Zusammensetzung der einzelnen Versuchsmerkmale aus dem Skalenabstand  $x_i$  und der Feedbackintensität  $I$  entnommen werden.



**Bild 7.2:** Kombination der Versuchsparameter VR01

Versuchsmerkmal	Skalenabstand $x_i$ [mm]	Feedbackintensität $I$ [%]	Schalldruck [Pa]	Schallpegel [dB]	Schallintensität [ $W/m^2$ ]
V1.1.1	15,00	48	539,52	148,62	727,78
V1.1.2	18,75	48	539,52	148,62	727,78
V1.1.3	23,10	48	539,52	148,62	727,78
V1.1.4	30,00	48	539,52	148,62	727,78
V1.1.5	37,50	48	539,52	148,62	727,78
V1.2.1	15,00	60	674,40	150,56	1137,63
V1.2.2	18,75	60	674,40	150,56	1137,63
V1.2.3	23,10	60	674,40	150,56	1137,63
V1.2.4	30,00	60	674,40	150,56	1137,63
V1.2.5	37,50	60	674,40	150,56	1137,63
V1.3.1	15,00	77	865,48	152,72	1870,68
V1.3.2	18,75	77	865,48	152,72	1870,68
V1.3.3	23,10	77	865,48	152,72	1870,68
V1.3.4	30,00	77	865,48	152,72	1870,68
V1.3.5	37,50	77	865,48	152,72	1870,68
V1.4.1	15,00	96	1079,04	154,64	2930,89

**Tabelle 7.2:** Tabellarische Übersicht der Merkmalsparameter VR01 (Teil 1/2)



Versuchsmerkmal	Skalenabstand $x_i$ [mm]	Feedbackintensität I [%]	Schalldruck [Pa]	Schallpegel [dB]	Schallintensität [ $W/m^2$ ]
V1.4.2	18,75	96	1079,04	154,64	2930,89
V1.4.3	23,10	96	1079,04	154,64	2930,89
V1.4.4	30,00	96	1079,04	154,64	2930,89
V1.4.5	37,50	96	1079,04	154,64	2930,89
V1.5.1	15,00	100	1124,00	155,00	3162,28
V1.5.2	18,75	100	1124,00	155,00	3162,28
V1.5.3	23,10	100	1124,00	155,00	3162,28
V1.5.4	30,00	100	1124,00	155,00	3162,28
V1.5.5	37,50	100	1124,00	155,00	3162,28

**Tabelle 7.2:** Tabellarische Übersicht der Merkmalsparameter VR01 (Teil 2/2)

### 7.1.3 Versuchsablauf

Die Versuchsdurchführung erfolgt in den Laborräumen des IKTD. Die Untersuchung der Versuchsmerkmale erfolgt randomisiert von Proband zu Proband. Nach der Begrüßung des Probanden erhält der Proband vom Versuchsleiter eine Einführung in den Versuchsaufbau sowie die Versuchsdurchführung und wird um das Einverständnis zur Erfassung seiner Kontaktdaten gebeten. Anschließend erfolgt die Erfassung demographischer Daten des Probanden im Interviewverfahren. Diese werden vom Versuchsleiter in einen Fragebogen eingetragen. Im Folgenden werden die taktilen Fähigkeiten des Probanden abgeprüft (vgl. Kapitel 5.2.1).

Nach dem Vorversuch gibt es eine kurze Erholungspause für den Probanden. Anschließend erhält dieser anhand einer Präsentation eine Einführung in den Hauptversuch vom Versuchsleiter. Der Fokus liegt dabei auf dem Aufbau des Feedbacks, der Versuchsdurchführung sowie der anschließenden Beantwortung des Fragebogens im Interviewverfahren. Danach erfolgt eine Übungsphase, in welcher der Proband sich mit der Nebenaufgabe auseinandersetzt, verschiedene Feedbackereinstellungen ausprobieren und sich mit der berührungslosen Bedienung identifizieren kann. Dem Probanden wird empfohlen zu Beginn jeder Stellaufgabe die Hand in der Mitte des Ultraschallarrays in einer Höhe von 200 mm zu halten und anschließend die linke Begrenzung des Bedienfelds zu suchen. Somit hat der Proband die korrekte Nullposition und kann bei einer Bewegung nach rechts die gewünschte Skalenposition einstellen. Zur Einhaltung der korrekten Bedienhöhe wird der Proband gebeten seinen Unterarm rechtwinklig zum Oberarm zu beugen. Das Ultraschallarray wird dann ca. 200 mm unterhalb der Handfläche platziert. Die Beugung des Unterarms ermöglicht dem Probanden eine weitestgehend komfortable Körperhaltung während der Bedienung und dient gleichzeitig als Orientierungshilfe zum korrekten Einhalten des Abstands zum Ultraschallarray.

Nachfolgend wird die Hauptaufgabe gemäß Kapitel 5.2.2 erklärt. Diese besteht aus einer Konzentrationsübung auf einem Bildschirm direkt vor dem Probanden, bei welcher der Proband eine Öse möglichst ruhig über einem Metallstift halten muss. Dazu wird zunächst die Bildschirmhöhe an den Probanden angepasst, bevor anschließend die korrekte Positionierung des Ultraschallarrays im Greifraum optimal zur parallelen Durchführung der Haupt- und Nebenaufgabe erfolgt. Damit sich der Proband nicht durch das akustische Rauschen der Ultraschallwandler beeinflussen lässt, werden die Versuche mit einem Gehörschutz in Form von Gehörschutzstöpseln durchgeführt.

Im nun folgenden Versuchsteil werden verschiedene Skalenabstände und Intensitätslevel des Feedbacks aus Tabelle 7.2 abgeprüft. Die Aufgabe des Probanden dabei ist es, rein über das Gefühl die Skalenposition „6“ einzustellen während er sich zeitgleich auf die Hauptaufgabe konzentriert. Ein mehrfaches Hin- und Herfahren auf dem virtuellen taktilen Slider ist dabei möglich. Vom Versuchsleiter erhält der Proband die Anweisung zunächst die Nullposition zu suchen und ausgehend von dieser sechs Skalenpunkte nach rechts zu stellen. Zur Speicherung der Position ist es notwendig, dass der Proband seine Hand für drei Sekunden ruhig an dieser Position hält. Die erfolgreiche Speicherung der Zielposition wird dem Probanden verbal mitgeteilt. Anschließend erfolgt die Bewertung des eingestellten Feedbacks anhand eines Fragebogens, welcher dem Probanden auf einem weiteren Bildschirm linker Hand präsentiert wird.

Zur Bewertung der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit der Parameter des taktilen Feedbacks werden neben objektiven Daten, wie der Fehleranzahl bzgl. der Hauptaufgabe, der Aufgabenerfüllung der Nebenaufgabe, der Stelldifferenz zwischen Soll- und Ist-Position sowie der Bedienzeit auch subjektive Daten anhand eines Fragebogens nach Kapitel 5.3 erfasst. Bild 7.3 zeigt die Antwortmöglichkeiten des Fragebogens aus Versuchsreihe VR01. Die Probanden werden dabei zunächst gefragt, ob sie sicher sind Position „6“ eingestellt zu haben. Dabei stehen die Antwortmöglichkeiten „ja“, „nein“ und „unsicher“ zur Auswahl. Die Bewertung der Feedbackintensität, des Skalenabstands, der Präzision, Benutzungsgeschwindigkeit und Erlernbarkeit erfolgt anhand von Gegensatzpaaren an einer 7-stufigen Likert-Skala (siehe Bild 7.3). Abschließend werden die Probanden nach der mentalen Beanspruchung gefragt, die sie während der Ausführung der Stellaufgabe empfinden. Als Bewertungsmaßstab wird die Borg Skala nach [DIN EN ISO 9241-420 2011, S. 43] verwendet. Die verbal geäußerten Antworten des Probanden werden vom Versuchsleiter im Fragebogen dokumentiert. Die Probanden erhalten für die Teilnahme an der Studie eine Aufwandsentschädigung.



Hinsichtlich des Vibrationsempfindens gibt es bei der vorhandenen Testpopulation ebenfalls keine Auffälligkeiten. Mit einem Mittelwert von 7,92 auf der Rydel-Seiffer-Skala liegen sie über dem Normwert von 7,2 [HILZ ET AL.1998].

n = 31	Minimum	Maximum	Median	Ø	SD
Alter [Jahre]	20	54	27	27,39	6,05
Größe [cm]	158	193	173	175,42	10,02
Gewicht [kg]	49	100	70	69,90	12,41
Geschlecht	51,60 % männlich, 48,40 % weiblich				
Bildungsgrad	74,20 % Hochschulabschluss, 19,40 % Abitur/Fachhochschulreife, 6,50 % Berufsausbildung				
Händigkeit	90,30 % rechtshändig, 9,70 % linkshändig				
Nationalität	90,30 % Deutsch, 3,20 % Chinesisch, 3,20 % Tunesisch, 3,20 % Ungarisch				
Berufliche Tätigkeit	61,30 % Bürotätigkeit, 35,50 % Studium, 3,20 % handwerkliche Tätigkeit				
Feinmotorisches Hobby	58,10 % kein feinmotorisches Hobby, 41,90 % feinmotorisches Hobby				
Musikinstrument	58,10 % spielen kein Musikinstrument, 41,90 % spielen ein Musikinstrument				
Durchblutungsstörungen	100 % keine Durchblutungsstörungen				
Einschränkungen im Hand-/Arm-/Fingerbereich	96,80 % keine Einschränkungen, 3,20 % Einschränkungen				
Raucher	100 % Nichtraucher				

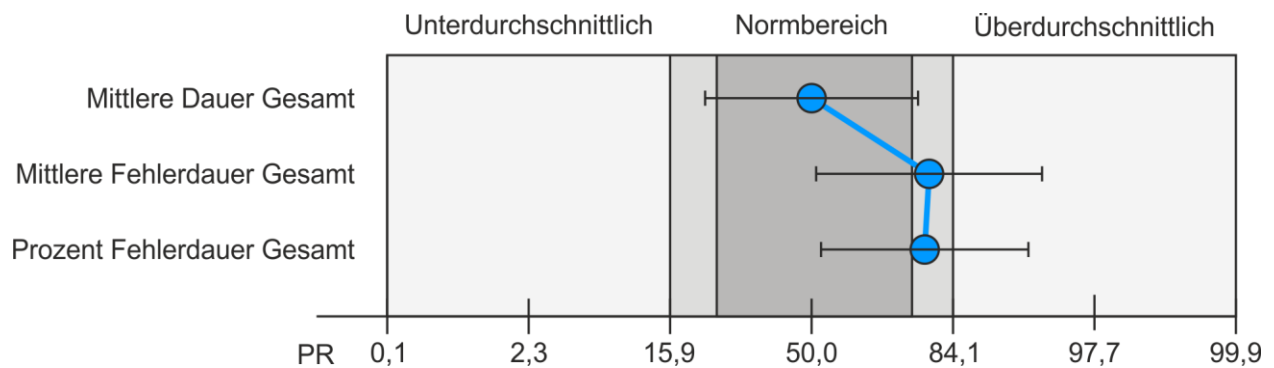
**Tabelle 7.3:** Probandenkollektiv Versuchsreihe VR01

n=31	Minimum	Maximum	Median	Ø	SD
Zweipunktschwelle Mittelfinger [mm]	2,00	5,00	4,00	3,87	0,76
Zweipunktschwelle Handinnenfläche [mm]	10,00	13,00	10,00	10,55	0,81
Semmes-Weinstein Monofilament-Test [g]	0,07	0,40	0,07	0,10	0,10
Vibrationsempfinden	7,00	8,00	8,00	7,92	0,19

**Tabelle 7.4:** Taktilen Empfinden Versuchsreihe VR01

Die Auge-Hand- und Hand-Hand-Koordination, kurz visuomotorische Koordination der Probanden wird anhand der Zweihand Koordination des Wiener Testsystems überprüft. Bild 7.4 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung. Die mittlere Versuchsdauer (Mittlere Dauer gesamt) liegt im Normbereich des Wiener Testsystems [SCHUHFRIED 2015]. Hinsichtlich der mittleren Fehlerdauer und dem Verhältnis der Gesamtfehlerdauer zur Gesamtdauer schneiden die Probanden durchschnittlich bis überdurchschnittlich ab [SCHUHFRIED 2015].

Anhand dieser Voruntersuchungen können keine Auffälligkeiten innerhalb der Stichprobe gefunden werden. Das Probandenkollektiv liegt folglich im Normbereich. Die Probanden üben somit keinen Einfluss aufgrund von unter- oder überdurchschnittlichen Fähigkeiten auf die Ergebnisse der Hauptuntersuchung aus.

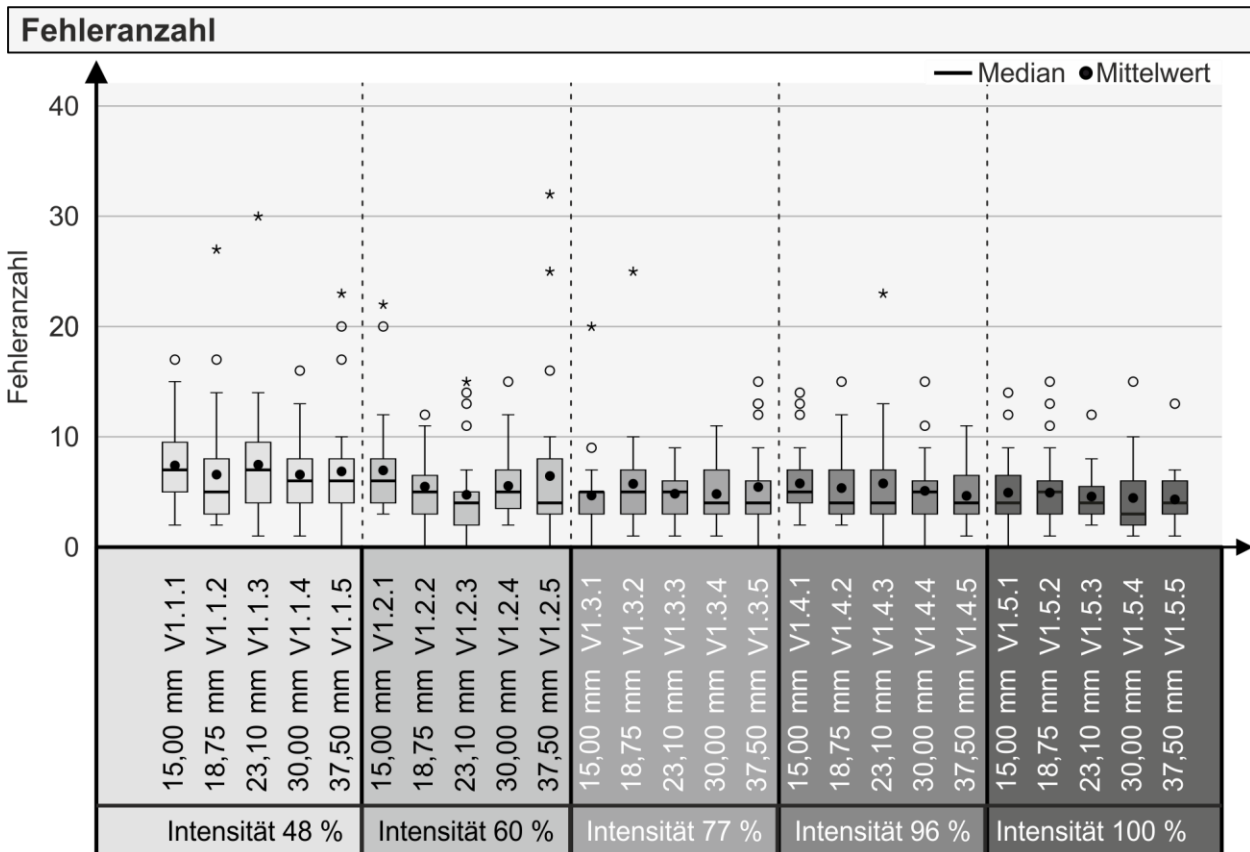


**Bild 7.4:** Untersuchungsergebnisse des Tests Zweihand Koordination nach Prozenträngen (PR)

### 7.1.5 Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen der ersten Versuchsreihe dargestellt und analysiert. Es erfolgt zunächst eine deskriptive und anschließend eine inferenzstatistische Betrachtung der Ergebnisse der objektiv und subjektiv erfassten Daten. Für die inferentielle Statistik werden die Versuchsergebnisse zunächst hinsichtlich einer Normalverteilung überprüft. Dazu wird für jede Testvariable analog zu Kapitel 6.2 ein Kolmogorov-Smirnov-Test durchgeführt.

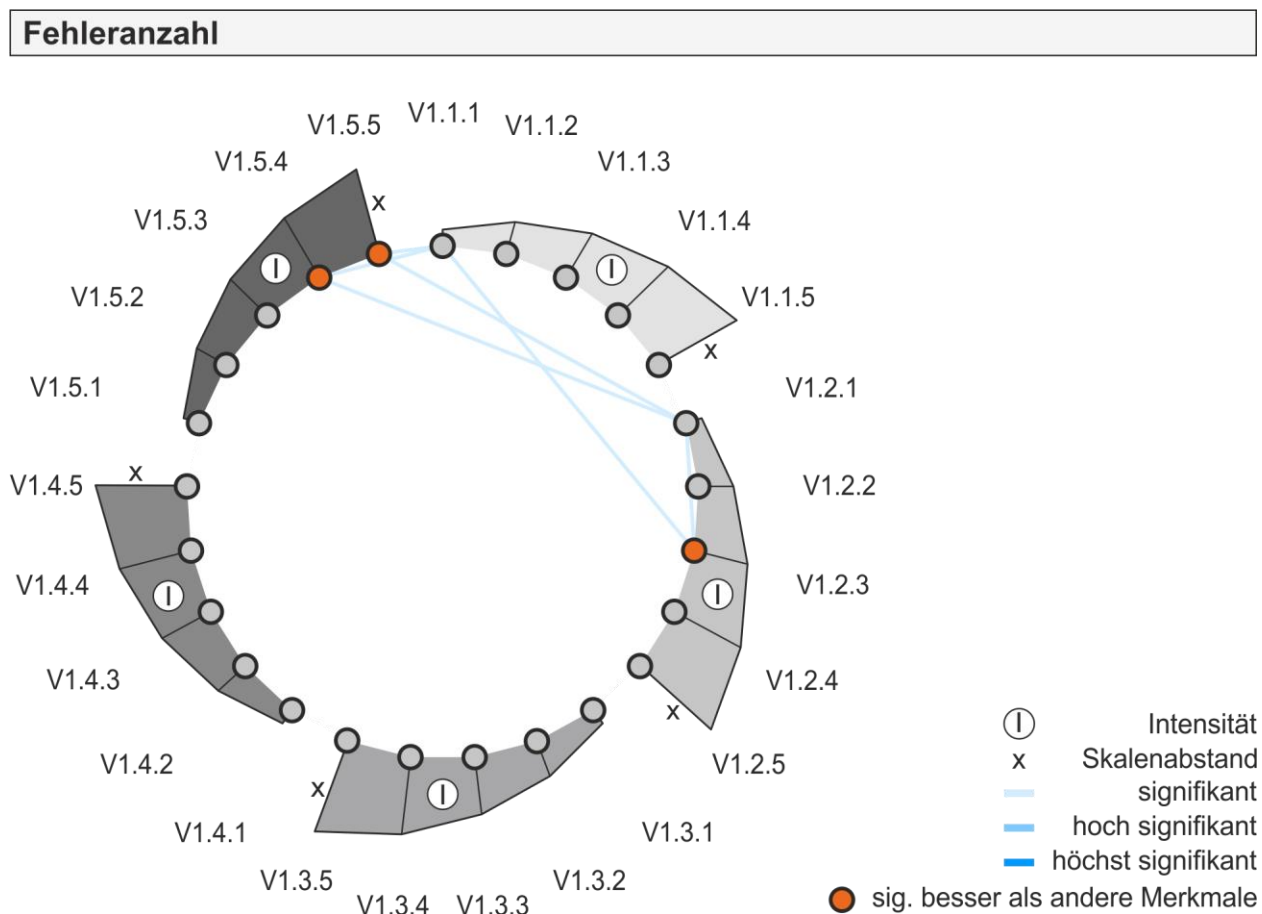
Die Aufgabenerfüllung der Hauptaufgabe spiegelt die Fehleranzahl wider (siehe Bild 7.5). An Bild 7.5 ist zu erkennen, dass die geringste absolute Fehleranzahl (0 Kontakte) mit den Versuchsmerkmalen V1.1.5, V1.2.2, V1.2.3, V1.2.5, V1.3.1, V1.3.5, V1.4.3, V1.4.4. und V1.5.1 erreicht wird. Die höchste Fehleranzahl erzielt Versuchsmerkmal V1.1.1 mit durchschnittlich 7,45 Kontakten. Die geringste durchschnittliche Fehleranzahl weist Versuchsmerkmal V1.5.5 (4,35 Kontakte) auf, gefolgt von den Versuchsmerkmalen V1.5.4 ( $\bar{\emptyset} = 4,48$ ) und V1.5.3 ( $\bar{\emptyset} = 4,61$ ). Hinsichtlich des Interquartilsabstands erreicht Versuchsmerkmal V1.3.1 (2 Kontakte) den geringsten und Versuchsmerkmal V1.1.3 (6 Kontakte) den größten Bereich. Erkennbar in Bild 7.5 ist, dass die Fehleranzahl mit zunehmender Feedbackintensität abnimmt. Bei einer Intensität von 48 % resultieren im Mittel 7,02 Kontakte wohingegen bei einer Intensität von 100 % durchschnittlich 4,68 Kontakte erreicht werden. Hinsichtlich des Skalenabstands schwankt die Fehleranzahl innerhalb eines Intensitätslevels. Es ist bei den Intensitätsniveau 48 %, 60 %, 77 % und 96 % jedoch erkennbar, dass der Medianwert der Fehleranzahl bei 15 mm auf einem höheren Wert als bei einem Skalenabstand von 37,50 mm liegt (vgl. Bild 7.5 bspw. V1.1.1 und V1.1.5). Wie stark die Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsmerkmalen sind, wird anhand von inferenzstatistischen Verfahren näher bestimmt.



**Bild 7.5:** Fehleranzahl der Hauptaufgabe VR01

Da es sich um verbundene, abhängige Stichproben handelt und die Daten nicht normalverteilt sind (vgl. Tabelle A.3.1 im Anhang A.3), wird für die weitere Analyse der Fehleranzahl ein Friedman-Test verwendet. Die zentralen Tendenzen der Versuchsmerkmale (Chi-Quadrat (24) = 65,918,  $p < 0,001$ ,  $n = 31$ ) zeigen, dass sich diese signifikant unterscheiden. Um einen detaillierteren Überblick bezüglich der konkreten Unterschiede zwischen den 25 verschiedenen Versuchsmerkmalen zu erhalten, wird eine Folgeanalyse mittels eines Post-hoc-Tests nach Dunn-Bonferroni durchgeführt. Damit können gezielt statistisch relevante Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen kenntlichgemacht werden. Diese werden paarweise miteinander verglichen (siehe Tabelle A.3.2 im Anhang A.3). Zwischen Versuchsmerkmal V1.1.1 und V1.5.4 gibt es einen signifikanten Unterschied ( $z = 7,435$ ,  $p = 0,021$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,34$ ) hinsichtlich der Fehleranzahl, dessen Effekt als stark eingestuft wird. Die Richtung des Unterschieds lässt sich anhand Bild 7.5 durch den Vergleich der Mittelwerte erkennen. Der Mittelwert von V1.1.1 ist mit durchschnittlich 7,45 Kontakten höher als der von Versuchsmerkmal V1.5.4 (4,48 Kontakte), weshalb das Versuchsmerkmal V1.1.1 hinsichtlich der Fehleranzahl signifikant schlechter abschneidet als das Versuchsmerkmal V1.5.4. Die Betrachtung der Parameter in Tabelle 7.2 zeigt, dass Versuchsmerkmal V1.5.4 einen doppelt so großen

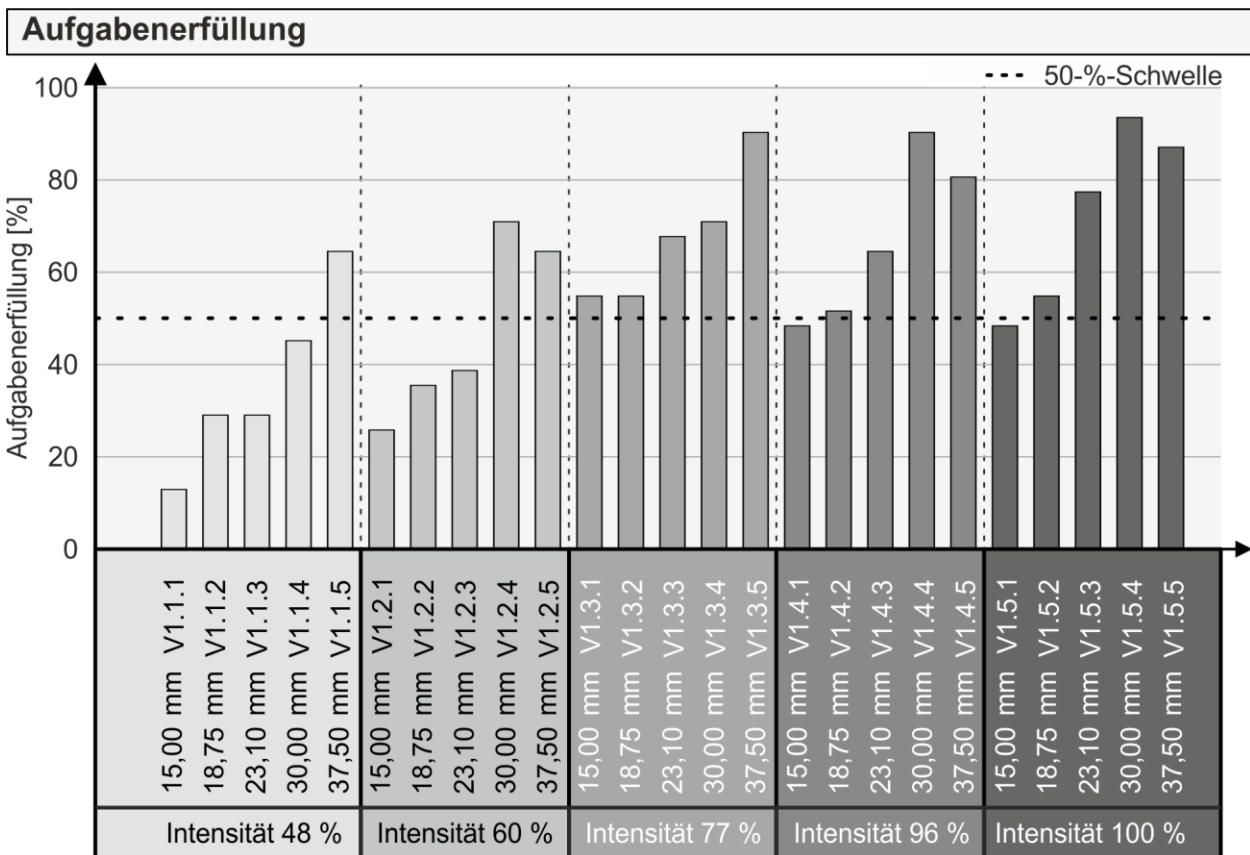
Skalenabstand in Kombination mit einer mehr als doppelt so hohen Intensität besitzt als Versuchsmerkmal V1.1.1. Am besten schneidet Versuchsmerkmal V1.5.5 mit einer durchschnittlichen Fehleranzahl von 4,35 Kontakten ab (siehe Bild 7.5). Bild 7.6 bietet eine graphische Übersicht über die statistisch relevanten Unterschiede. Dabei sind die Intensitätslevel aus Tabelle 7.2 in den Graustufen analog zum zugehörigen Box-Plot- oder Balkendiagramm gehalten (vgl. Bild 7.5). Die ansteigende graue Fläche steht dabei symbolisch für den zunehmenden Skalenabstand innerhalb der Gruppe mit gleichem Intensitätslevel. Versuchsmerkmale, die im Vergleich zu anderen signifikant besser abschneiden, werden durch einen orangefarbenen Kreis gekennzeichnet. Die grau hinterlegten Kreise hingegen schneiden nicht signifikant besser ab im Vergleich zu anderen Versuchsmerkmalen. Auffallend ist, dass die Versuchsmerkmale V1.5.4 und V1.5.5 im Vergleich zu den Versuchsmerkmalen mit einem Skalenabstand von 15,00 mm und einer Intensität von 48 % eine signifikant bessere Ausführung der Hauptaufgabe erreichen.



**Bild 7.6:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Fehleranzahl VR01

Bild 7.7 zeigt die Aufgabenerfüllung der Stellaufgabe. Die geringste Aufgabenerfüllung wird mit Versuchsmerkmal V1.1.1 (13 %) erreicht. Die beste Aufgabenerfüllung wird

hingegen mit Versuchsmerkmal V1.5.4 ( $\emptyset = 93,55\%$ ) gefolgt von den Versuchsmerkmalen V1.3.5 und V1.4.4 ( $\emptyset = 90,32\%$ ) sowie V1.5.5 ( $\emptyset = 87,10\%$ ) erzielt. Eine fehlerfreie Durchführung der Stellaufgabe kann bei keinem der Versuchsmerkmale nachgewiesen werden. Bei einer Intensität von 48 % und 77 % steigt die Aufgabenerfüllung bei zunehmendem Skalenabstand. Innerhalb dieser Intensitätsgruppen wird die beste Aufgabenerfüllung bei einem Skalenabstand von 37,50 mm erreicht. Bei einer Intensität von 60 %, 96 % und 100 % steigt die Aufgabenerfüllung jeweils bis zu einem Skalenabstand von 30,00 mm an und fällt anschließend wieder. Hinsichtlich der Wahrnehmungsschwelle zeigt sich, dass bei einer Feedbackintensität von 48 % ein Skalenabstand von 37,50 mm nötig ist um 50 % der Aufgaben korrekt auszuführen und bei einer Feedbackintensität von 60 % ein Skalenabstand von 30,00 mm. Bei einer Feedbackintensität von 77 % wird die 50 %-Schwelle bereits bei einem Skalenabstand von 15,00 mm erreicht und bei den Feedbackintensitäten 96 % und 100 % bei 18,75 mm. Die deskriptive Analyse zeigt, dass sowohl der Skalenabstand als auch die Intensität einen Einfluss auf die erfolgreiche Durchführung der Stellaufgabe haben.



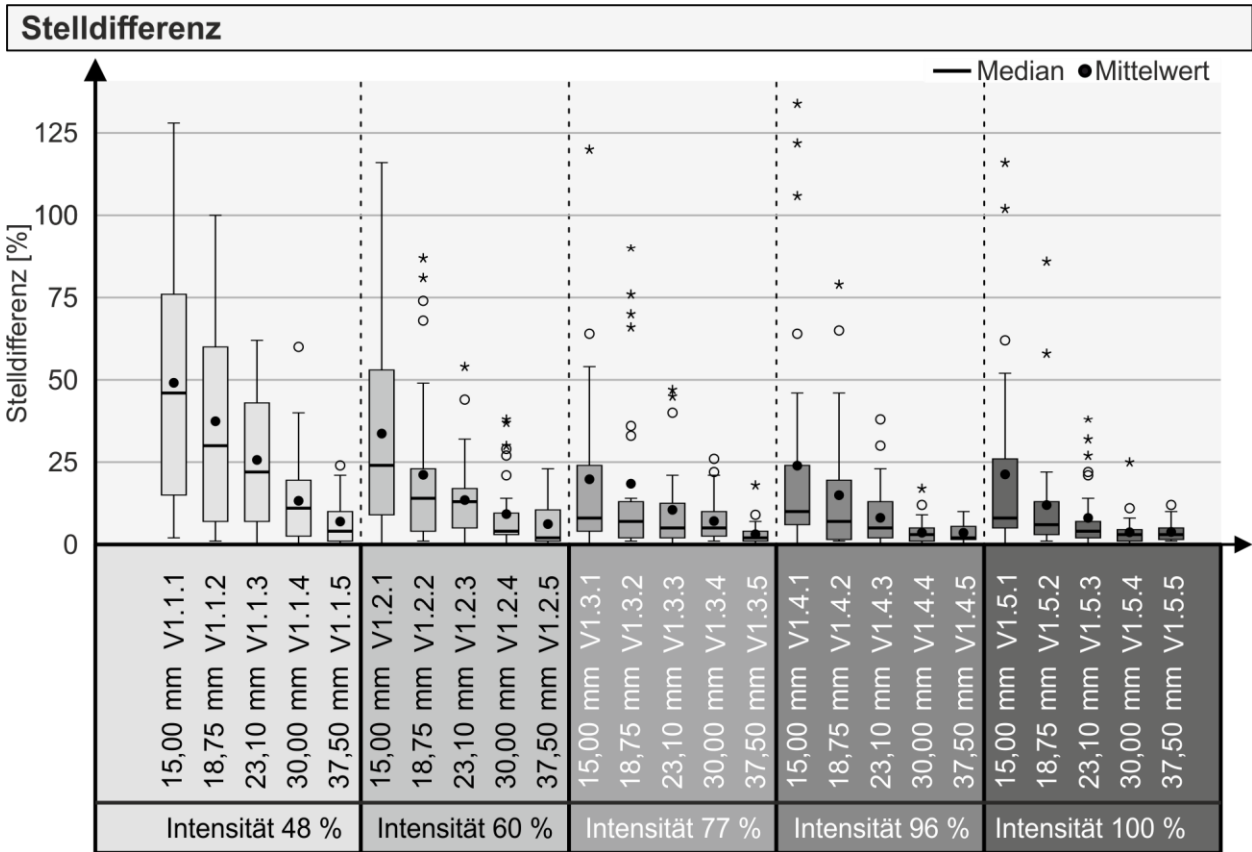
**Bild 7.7:** Aufgabenerfüllung der Nebenaufgabe VR01

Die Stelldifferenz ist in Bild 7.8 in Form eines Box-Plot-Diagramms dargestellt. Anhand dieses Parameters wird die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Position in Prozent

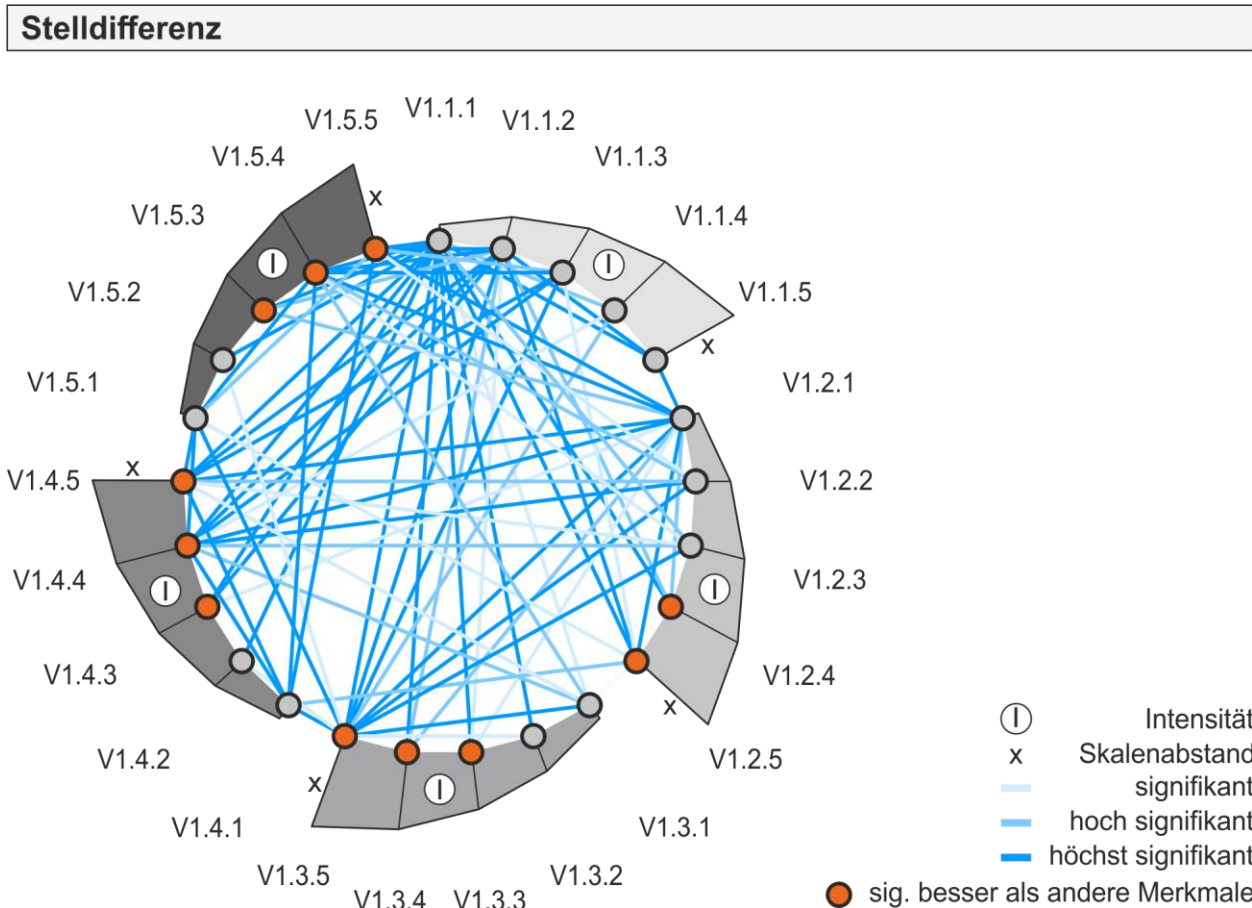


dargestellt. Auf der Ordinate wird dabei der Betrag der Abweichung abgetragen. Der Skalenabstand zwischen zwei benachbarten Skalenpositionen, zum Beispiel zwischen Skalenposition 6 und 7, entspricht dabei 100 %. Stellt der Proband beispielsweise auf die Skalenposition 6,5, entspricht dies einer Abweichung von 50 % und eine Stelldifferenz von 100 % einer Abweichung um eine volle Skalenposition (Skalenposition 7) von der Zielposition (Skalenposition 6). Wird eine Skalenposition größer als Skalenposition 7 eingestellt, ist die Abweichung größer 100 %. Entsprechendes gilt ebenfalls, falls eine Skalenposition kleiner Skalenposition 6 eingestellt wird. Die Skalenposition 5,5 entspricht folglich einer Abweichung von 50 % von der Zielposition. Die größte Abweichung zwischen Ist- und Sollwert von durchschnittlich 49 % wird mit Versuchsmerkmal V1.1.1 erreicht. Die geringste Stelldifferenz weist das Versuchsmerkmal V1.3.5 mit einer durchschnittlichen Abweichung von 3,10 % zum Sollwert auf. Den zweiten und dritten Platz in dieser Kategorie belegen die Versuchsmerkmale V1.4.5 ( $\bar{\sigma} = 3,50\%$ ) gefolgt von V1.4.4 ( $\bar{\sigma} = 3,60\%$ ). Die Abweichung von V1.5.4 liegt bei  $\bar{\sigma} = 3,71\%$  und von V1.5.5 bei  $\bar{\sigma} = 3,81\%$ . Anhand Bild 7.8 ist zu erkennen, dass die Stelldifferenz mit zunehmendem Skalenabstand geringer wird. Ein Beleg dafür zeigt sich im Interquartilsabstand. Dieser fällt bei einem Skalenabstand von 15,00 mm und 18,75 mm größer aus als bei einem Skalenabstand von 23,10 mm, 30,00 mm und 37,50 mm. Der größte Interquartilsabstand besitzt Versuchsmerkmal V1.1.1 und den geringsten Versuchsmerkmal V 1.3.5.

Das Testergebnis des Kolmogorow-Smirnov-Tests auf Normalverteilung ist in Tabelle A.3.3 im Anhang A.3 zu sehen. Anhand des Signifikanzwerts  $p$  (bspw. V1.1.1 oder V1.1.4) ist eine Normalverteilung zu verwerfen. Der durchgeführte Chi-Quadrat-Test (Chi-Quadrat (24) = 258,552,  $p < 0,001$ ,  $n = 31$ ) zeigt, dass zwischen den Versuchsmerkmalen signifikante Unterschiede vorliegen. Anhand des Post-hoc-Tests nach Dunn-Bonferroni können insgesamt 77 verschiedene Paarungen an Versuchsmerkmalen identifiziert werden, zwischen denen statistisch relevante Unterschiede bestehen (vgl. Bild 7.9 sowie Tabelle A.3.4 im Anhang A.3). Die graphische Übersicht in Bild 7.9 verdeutlicht die Erkenntnisse aus der deskriptivstatistischen Auswertung. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass Versuchsmerkmale mit einem geringeren Skalenabstand signifikant höhere Stelldifferenzen vorweisen als ein Versuchsmerkmal mit einem größeren Skalenabstand. Als Beispiel ist hier der höchst signifikante Unterschied zwischen Versuchsmerkmal V1.1.5-V1.1.1 ( $z = 12,210$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 31$ ,  $r = 2,19$ ) in der Gestalt zu nennen, dass ein größerer Skalenabstand eine höchst signifikant geringere Stelldifferenz hervorruft.

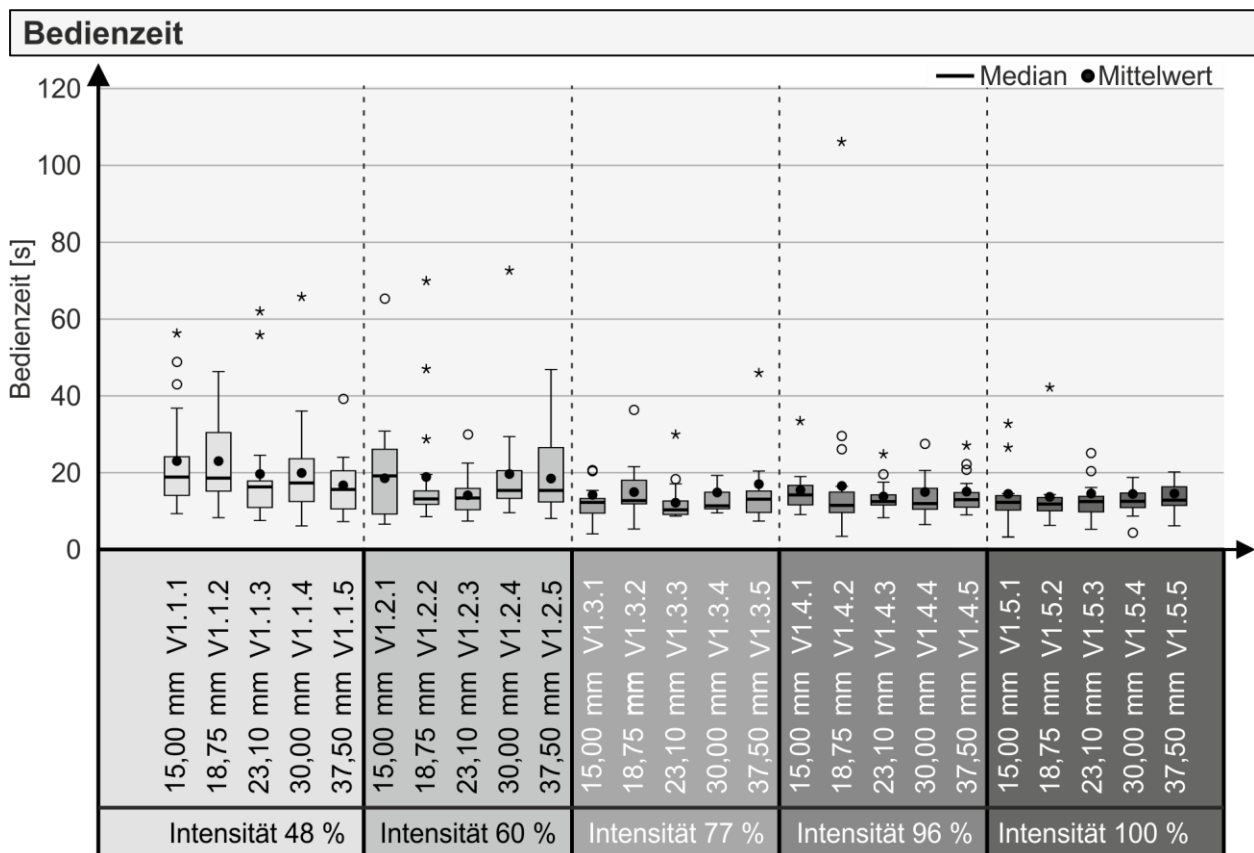


**Bild 7.8:** Stelldifferenz der Nebenaufgabe VR01



**Bild 7.9:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Stelldifferenz VR01

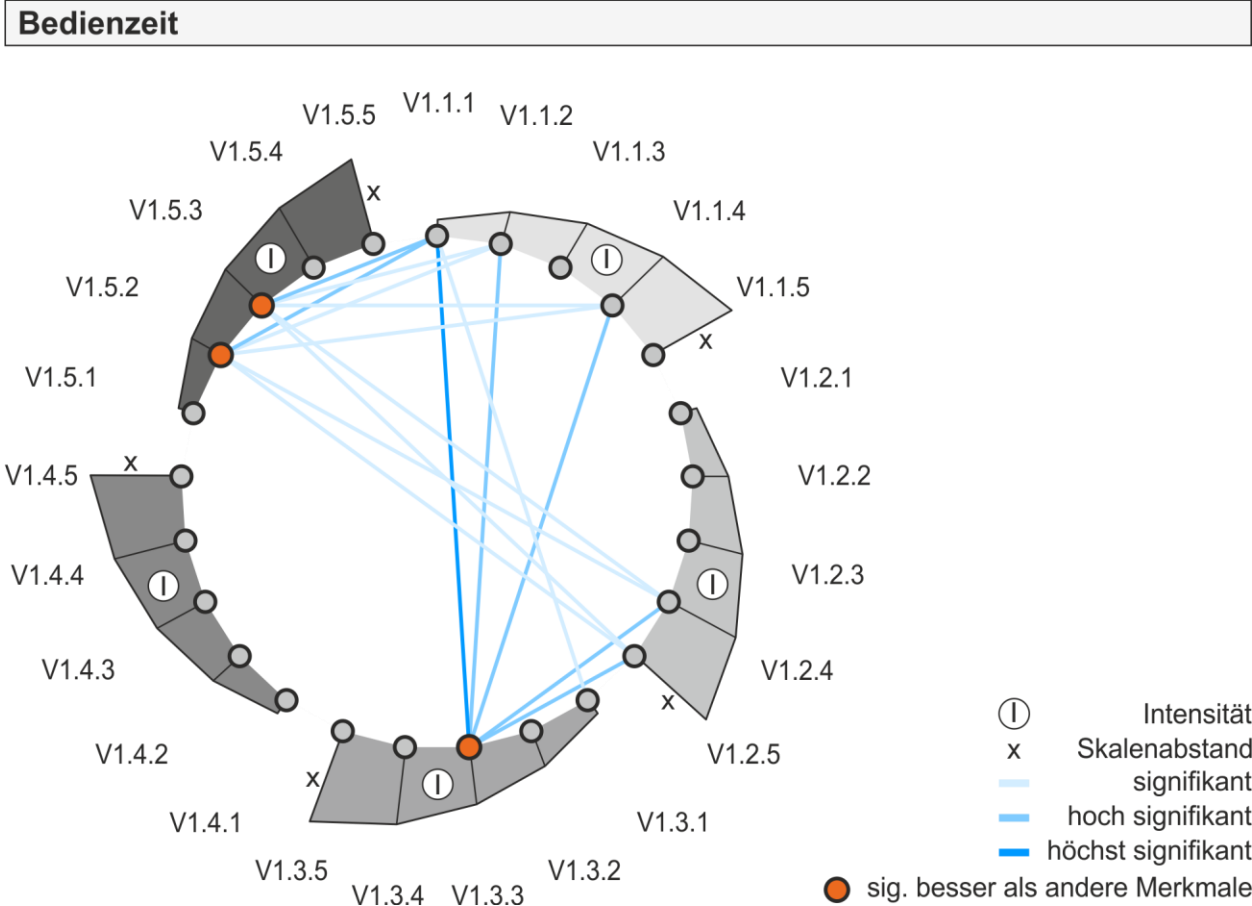
Das Box-Plot-Diagramm in Bild 7.10 zeigt die Bedienzeit, welche zur Erfüllung der Stellaufgabe gebraucht wird. Dabei umfasst die Bedienzeit, die Zeitdauer von der ersten Bewegung des Sliders bis hin zur Speicherung der Endposition. Anhand der Mittelwerte wird die geringste Bedienzeit mit Versuchsmerkmal V1.3.3 (12,17 s) erreicht. Die Versuchsmerkmale V1.5.2 ( $\bar{x} = 13,70$  s) und V1.4.3 ( $\bar{x} = 13,79$  s) erzielen den zweiten und dritten Platz. Die größte Bedienzeit hingegen liegt bei Versuchsmerkmal V1.1.1 ( $\bar{x} = 23,01$  s). Die Messwerte der Bedienzeit streuen dabei von 3,04 s (V1.5.1) bis 106,09 s (V1.4.2). Anhand Bild 7.10 sind tendenziell geringere Bedienzeiten und eine Reduktion der Streuung mit zunehmender Feedbackintensität erkennbar.



**Bild 7.10:** Bedienzeit der Nebenaufgabe VR01

Die Teststatistik des Kolmogorow-Smirnov-Tests befindet sich in Tabelle A.3.5. Anhand statistisch signifikanter Unterschiede (bspw. V1.1.1 oder V1.1.3) ist eine Normalverteilung zu verwerfen. Der durchgeführte Friedman-Test ( $\chi^2(24) = 91,723$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 17$ ) zeigt, dass zwischen den Versuchsmerkmalen signifikante Unterschiede vorliegen. In Summe liegen 16 verschiedene Paarungen an Versuchsmerkmalen vor, zwischen denen statistisch relevante Unterschiede bestehen (vgl. Bild 7.11 sowie Tabelle A.3.6). Die statistische Unterschiedsprüfung untermauert die sich in Bild 7.10 abzeichnende Tendenz, dass mit zunehmender Intensität die Bedienzeit geringer

ausfällt. Beispielsweise schneidet Versuchsmerkmal V1.3.3 hoch signifikant besser ab als Versuchsmerkmal V1.2.4 ( $z = 10,588$ ,  $p = 0,008$ ,  $n = 17$ ,  $r = 1,90$ ) bzw. hoch signifikant besser ab als V1.2.5 ( $z = 10,647$ ,  $p = 0,007$ ,  $n = 17$ ,  $r = 1,91$ ). Demgegenüber sind die Versuchsmerkmalspaarungen V1.5.2-V1.2.4, V1.5.2-V1.2.5, V1.5.3-V1.2.4 und V1.5.3-V1.2.5 als signifikant einzustufen (vgl. Bild 7.10, Bild 7.11 und Tabelle A.3.6).

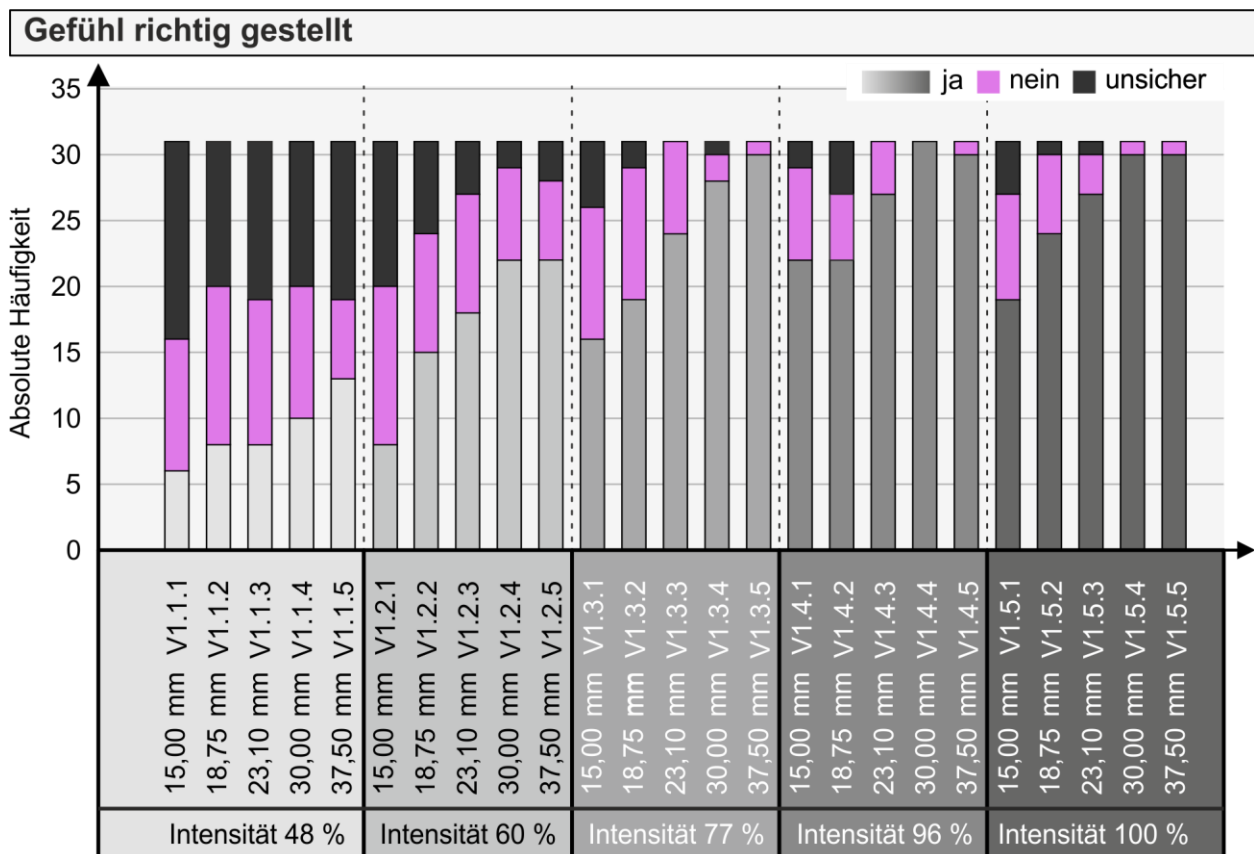


**Bild 7.11:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Bedienzeit VR01

Die folgenden Ergebnisse zeigen die subjektiv erfassten Daten und spiegeln die Antworten bezüglich des Komforts und der Zufriedenheit der Probanden bei der Bedienung der berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle mit taktilen Feedback wider.

Bild 7.12 zeigt die subjektiven Antworten der Probanden bezüglich der Frage, ob die Probanden das Gefühl haben die Stellaufgabe korrekt ausgeführt zu haben. Die Ordinate spiegelt dabei die Anzahl an Antworten, gruppiert in die Antwortmöglichkeiten („ja“, „nein“, „unsicher“) der Probanden wider. Erkennbar ist, dass die Einschätzung der Probanden tendenziell mit der objektiv erfassten Aufgabenerfüllung (vgl. Bild 7.7) übereinstimmt. Die Probanden haben bei einem größer werdenden Skalenabstand eher das Gefühl richtig gestellt zu haben (vgl. V1.3.1 bis 1.3.5 in Bild 7.12). Selbiges zeigt sich auch hinsichtlich

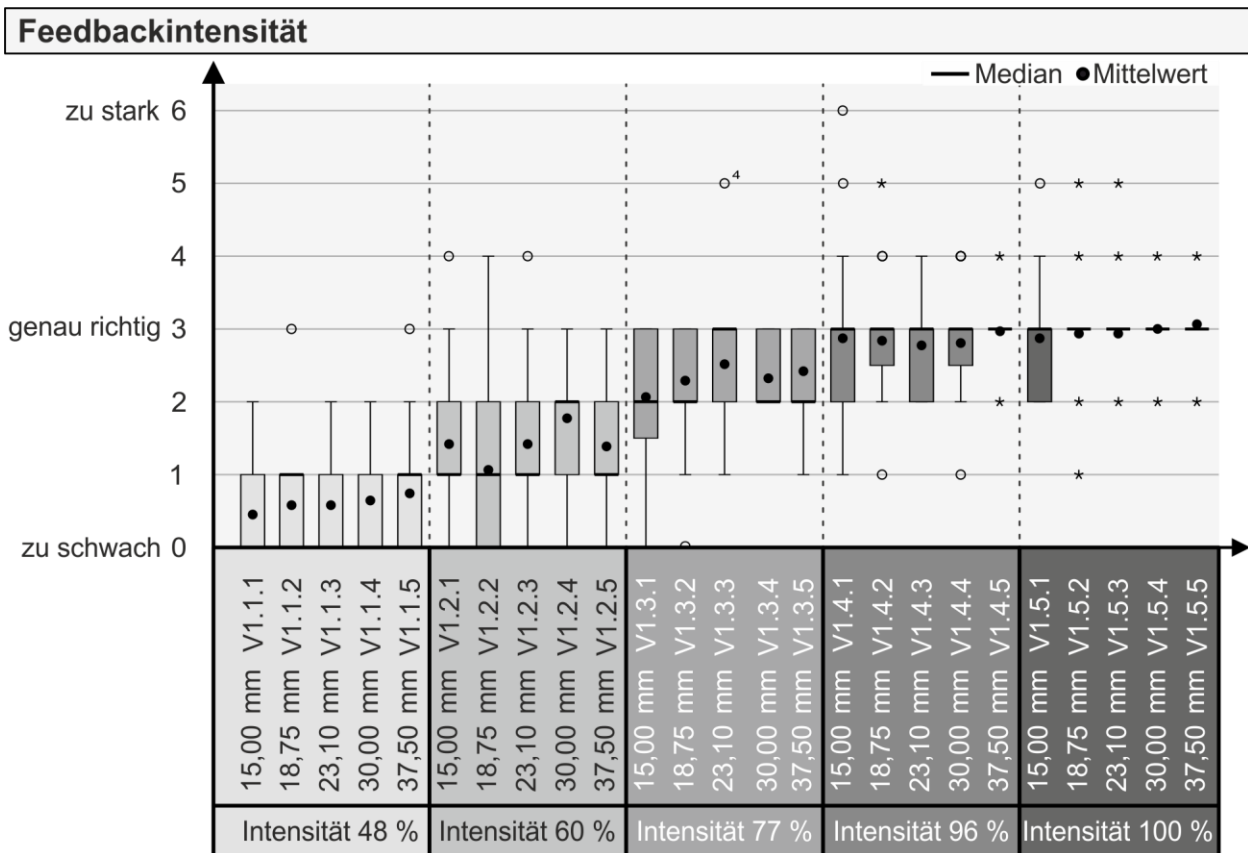
der Intensität. Bei einer Intensität von 48 % sind Probanden eher verunsichert (vgl. V1.1.1 bis V1.1.5) als bei einer Intensität von 96 % oder 100 % (vgl. V1.4.1 bis V1.5.5). Am sichersten fühlen sich die Probanden bei Versuchsmerkmal V1.4.4 (31 Ja-Stimmen). Auch die Versuchsmerkmale V1.3.5, V1.4.5, V1.5.4 und V1.5.5 mit je 30 Ja-Stimmen vermitteln den Probanden ein sicheres Gefühl die Aufgabe korrekt erfüllt zu haben. Dies spiegelt sich auch bei den objektiv erfassten Daten wider. In Bild 7.7 zeigen die Versuchsmerkmale V1.3.5, V1.4.4 und V1.5.4 eine Aufgabenerfüllungsrate von 90,00 % bis 93,55 %.



**Bild 7.12:** Subjektive Beurteilung, die Stellaufgabe korrekt ausgeführt zu haben VR01

Die Ausprägung des Feedbacks wird zum einen durch die Feedbackintensität als auch durch den Skalenabstand bestimmt. In diesem Abschnitt werden die beiden Parameter hinsichtlich deren subjektive Wirkung auf die Probanden näher untersucht. Die subjektive Bewertung der Feedbackintensität je Versuchsmerkmal ist in Bild 7.13 zu finden. Die Ergebnisdarstellung erfolgt anhand von Box-Plots. Die Bewertung der Feedbackintensität reicht von „zu schwach“ (vgl. bspw. V1.1.1) bis „etwas zu stark“ (vgl. bspw. V1.2.2). Die geringste Bewertung (vgl. Median) erhalten die Versuchsmerkmale V1.1.1, V1.1.3 und V1.1.4. Der Median dieser Versuchsmerkmale liegt bei „zu schwach“. Die Intensität des taktilen Feedbacks wird bei Versuchsmerkmal V1.5.4 ( $\varnothing = 3,00$ ) am besten bewertet und

als genau richtig klassifiziert. Das Versuchsmerkmal V1.4.5 ( $\bar{x} = 2,97$ ) belegt dabei den zweiten Platz, gefolgt von den Versuchsmerkmalen V1.5.2, V1.5.3 sowie V1.5.5 ( $\bar{x} = 2,94$ ). Ab einer Feedbackintensität von 77 % (vgl. V1.3.1 bis V1.3.5) wird die Intensität als tendenziell „genau richtig“ bewertet. Bei den Versuchsmerkmalen V1.4.1 bis V1.4.4 liegt der Median ebenfalls bei „genau richtig“. Eine nähere Betrachtung dieser Versuchsmerkmale zeigt, dass sich diese nur hinsichtlich des Skalenabstands unterscheiden. Anhand der Bewertung dieser Versuchsmerkmale scheint der Skalenabstand keine bedeutende Auswirkung auf die Feedbackintensität zu nehmen. Selbiges zeigt sich auch bei der Bewertung der Versuchsmerkmale V1.5.1 bis V1.5.5.

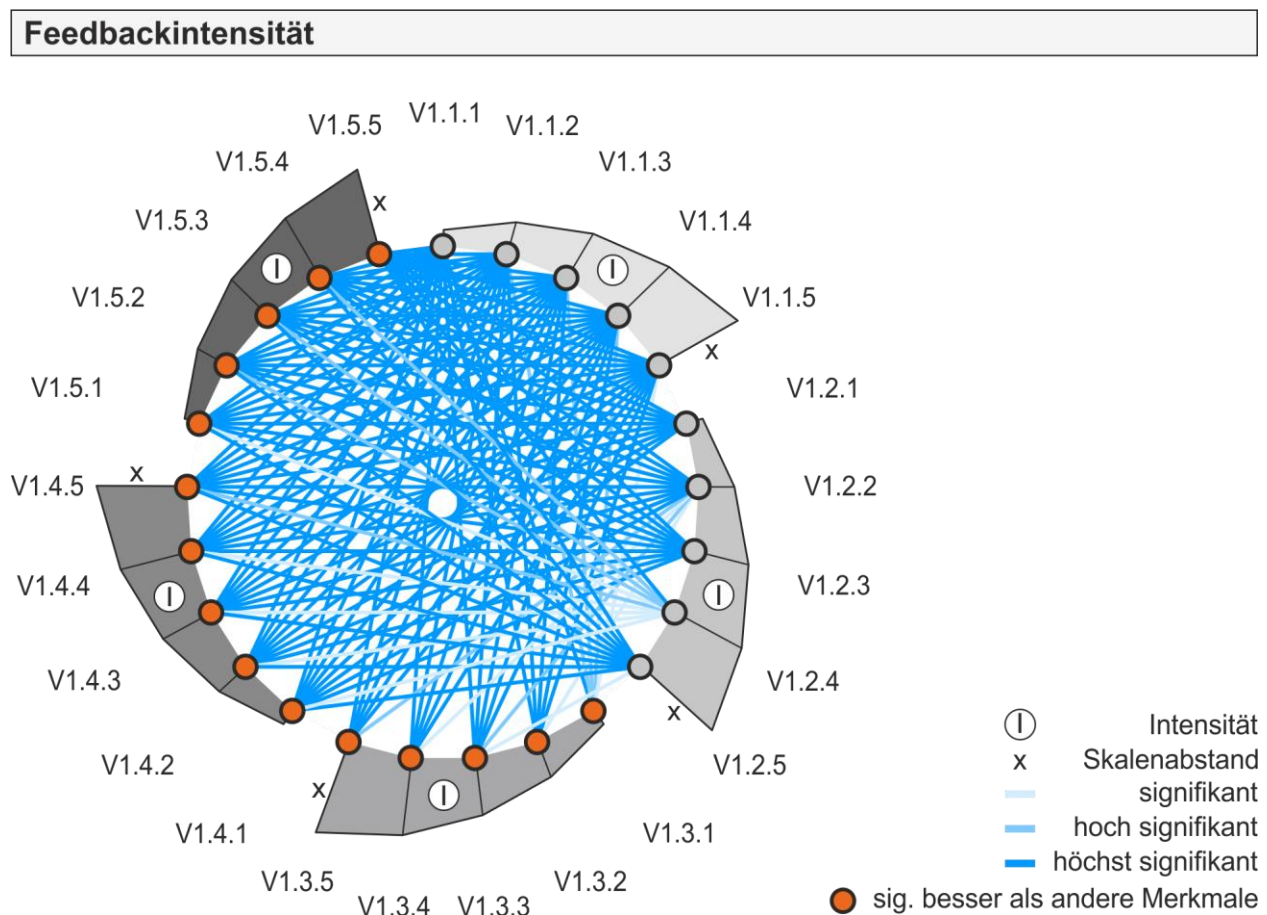


**Bild 7.13:** Bewertung der Feedbackintensität der taktilen Skala VR01

Zunächst erfolgt mittels eines Kolmogorov-Smirnov-Test eine Prüfung auf Normalverteilung der Daten. Anhand Tabelle A.3.7 (siehe Anhang A.3) sind die Daten nicht normalverteilt, weshalb auf einen Friedman-Test zurückgegriffen wird. Die Teststatistik zeigt, dass hinsichtlich der Versuchsmerkmale statistisch relevante Unterschiede vorhanden sind ( $\chi^2(24) = 531,824, p < 0,001, n = 31$ ). Zur genaueren Eingrenzung der Unterschiede wird ein anschließender Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni durchgeführt. Dabei können insgesamt 130 statistisch relevante Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen festgestellt werden (vgl. Tabelle A.3.8). Bild 7.14 gibt einen



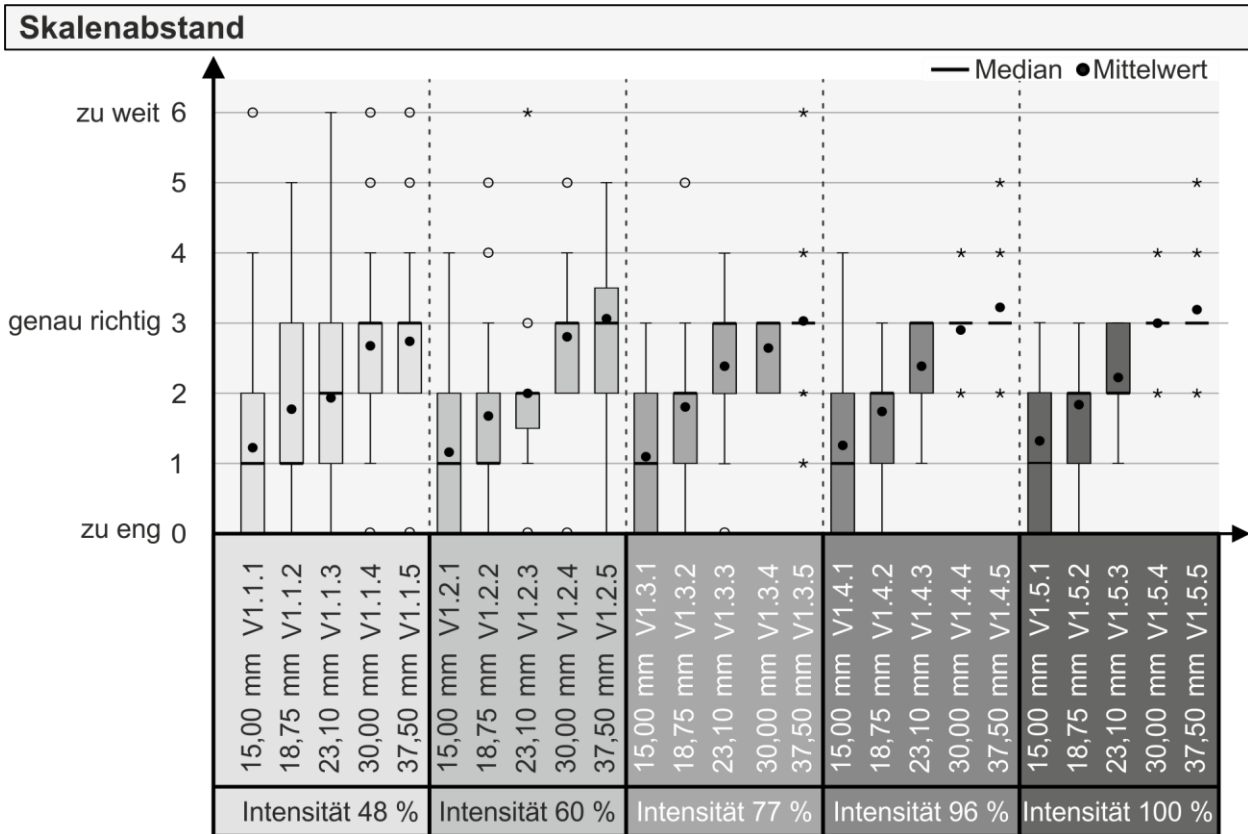
graphischen Überblick bezüglich des Zusammenhangs der Unterschiede. Daraus ist erkennbar, dass es ab einer Feedbackintensität von 77 % zu signifikanten, hoch und höchst signifikanten Unterschieden hinsichtlich der Ausprägung des Feedbacks kommt (vgl. bspw. V1.1.1-V1.3.1 ( $z = -9,129$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,64$ )). Analog zur Betrachtung der deskriptiven Statistik wird die Feedbackintensität ab einer Intensität von 77 % als tendenziell „genau richtig“ klassifiziert. Die Einstufung der Versuchsmerkmale V1.1.1 bis V1.2.5 als „zu schwach“ spiegelt sich in den statistisch signifikanten Unterschieden wider.



**Bild 7.14:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Intensität VR01

Ein weiterer Faktor der Ausprägung des Feedbacks wird durch den Skalenaufbau in Form des Skalenabstands repräsentiert. Die subjektiven Bewertungen des Skalenabstands sind in Bild 7.15 als Box-Plots dargestellt. Im Rahmen der Untersuchung wurde dieser von den Probanden von „zu eng“ (vgl. V1.1.1) bis „zu weit“ (vgl. V1.1.3) bewertet. Die Versuchsmerkmale V1.1.1, V1.1.2, V1.2.1, V1.2.2, V1.3.1, V1.4.1 und V1.5.1 werden am schlechtesten bewertet. Hier liegt der Mittelwert tendenziell bei „zu eng“. Über alle Intensitätsniveaus hinweg wird ein Skalenabstand von 30,00 mm (bspw. V1.1.4) und 37,50 mm (bspw. V1.1.5) von den Probanden als „genau richtig“ klassifiziert. Allerdings

streuen die Bewertungen allgemein stärker im Vergleich zu einer Intensität von 100 %. Bei den Versuchsmerkmalen V1.3.5, V1.4.4, V1.4.5, V1.5.4 und V1.5.5 fallen die Quartilswerte mit dem Median zusammen, was aus einer geringen Streuung der Bewertung resultiert. Bei diesen Versuchsmerkmalen sind jedoch auch extreme Ausreißer zu sehen, welche den Skalenabstand sowohl als „zu eng“ als auch „zu weit“ einstufen. Bei der Bewertung des Skalenabstands erreicht Versuchsmerkmal V1.5.4 ( $\varnothing = 3,00$ ) das beste Ergebnis, gefolgt von Versuchsmerkmal V1.3.5 ( $\varnothing = 3,03$ ) und V1.2.5 ( $\varnothing = 3,06$ ).

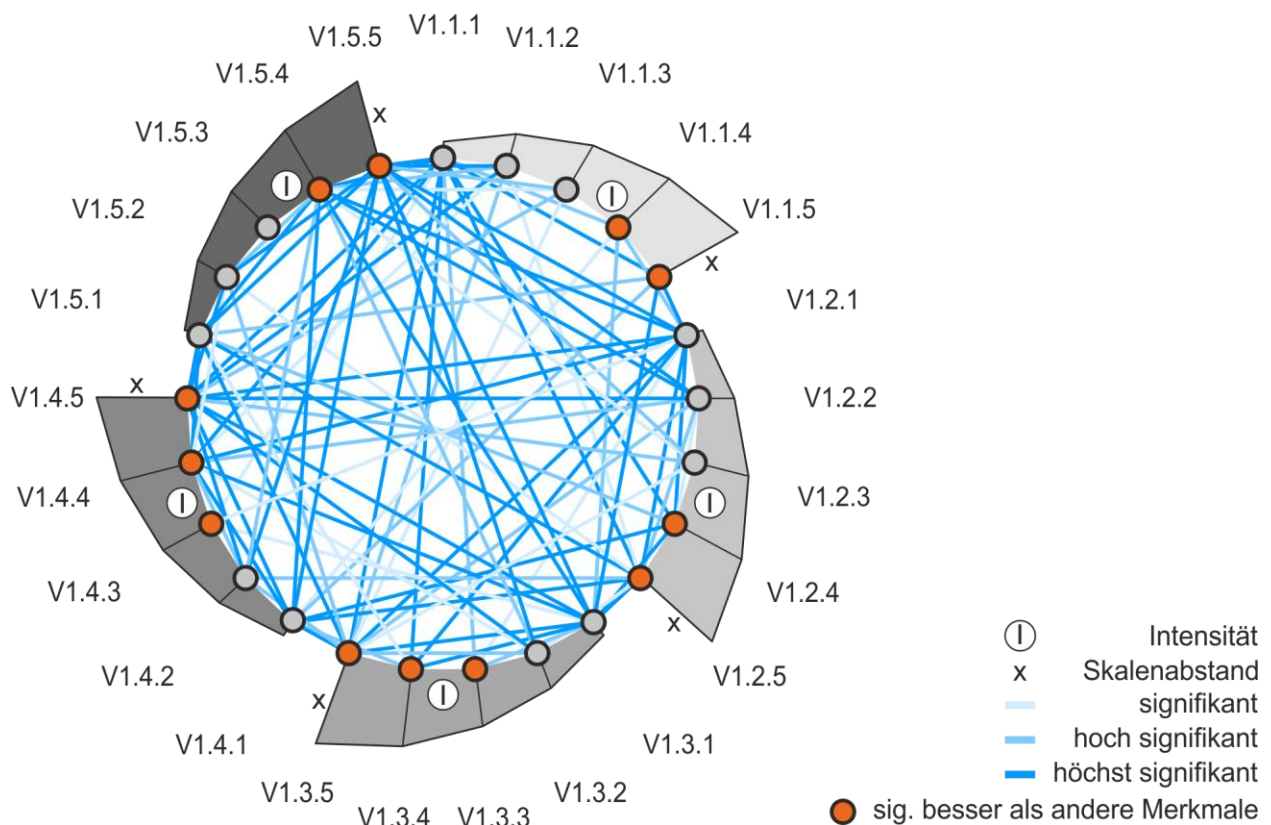


**Bild 7.15:** Bewertung des Skalenabstands der taktilen Skala VR01

Gemäß Tabelle A.3.9 (siehe Anhang A.3) liegt keine durchgehende Normalverteilung der Daten vor. Die Teststatistik des Friedman-Tests ( $\text{Chi-Quadrat}(24) = 291,968, p < 0,001, n = 31$ ) gibt Hinweise bezüglich signifikanter Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsmerkmalen. Bild 7.16 zeigt die Ergebnisse des Post-hoc-Tests nach Dunn-Bonferroni und gibt einen Überblick über die statistisch relevanten Beziehungen zwischen den einzelnen Versuchsmerkmalen von insgesamt 94 Paarungen. Die Testergebnisse sind in Tabelle A.3.10 im Anhang A.3 aufgelistet. Ungeachtet des Intensitätsniveaus wird ein Skalenabstand von 30,00 mm (bspw. V1.1.1-V1.1.4) oder 37,50 mm (bspw. V1.1.1-V1.1.5) als signifikant besser bewertet (vgl. Tabelle A.3.10 und Bild 7.16). Bei einer Feedbackintensität von 77 % und 96 % wird bereits ein Skalenabstand von 23,10 mm signifikant besser bewertet (vgl. bspw. V1.1.1-V1.3.3).

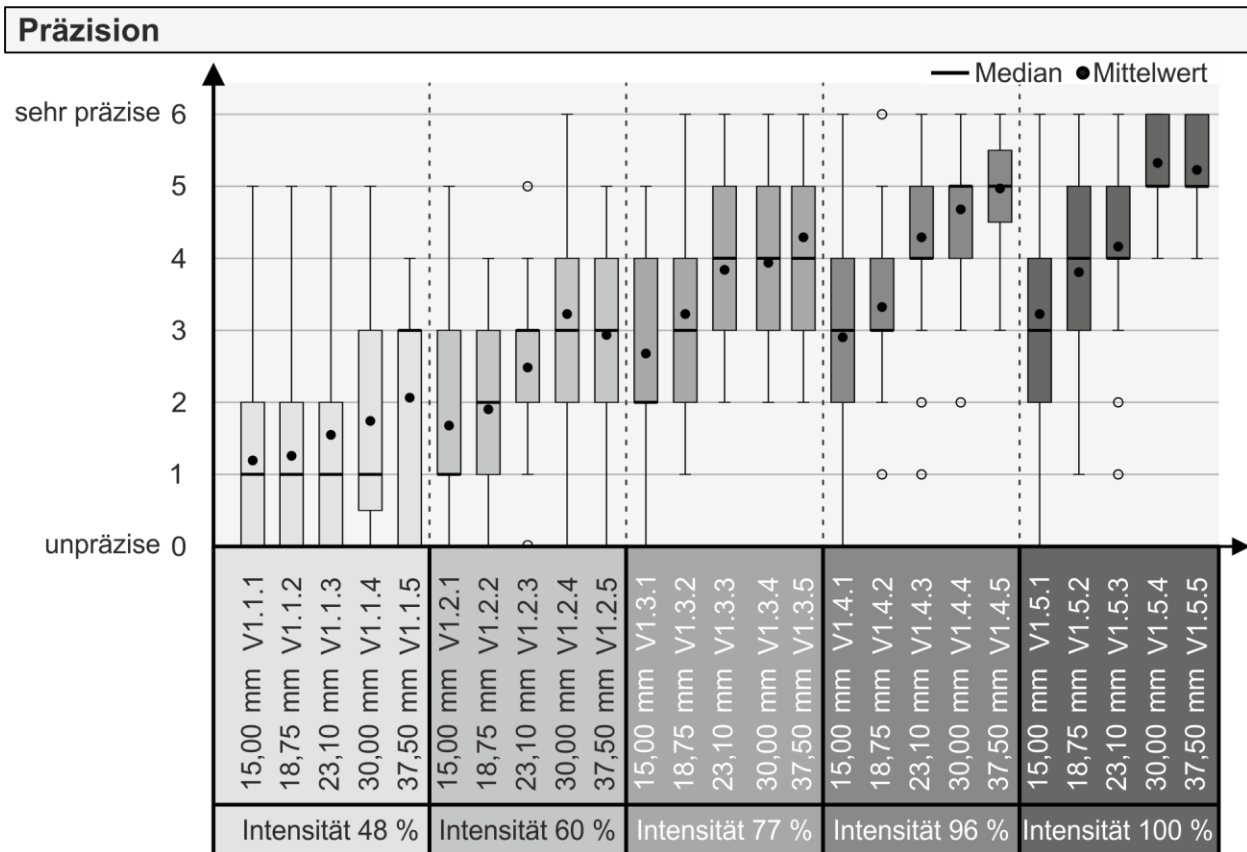


## Skalenabstand



**Bild 7.16:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Skalenabstands VR01

Die subjektive Bewertung der Präzision der taktilen Skala ist in Bild 7.17 in Form von Box-Plots veranschaulicht. Die Bewertung der taktilen Skala reicht von „unpräzise“ (vgl. V1.1.1 oder V1.1.2) bis hin zu „sehr präzise“ (vgl. V1.5.4 oder V1.5.5). Die schlechteste Bewertung erfahren die Versuchsmerkmale V1.1.1, V1.1.2, V1.1.3, V1.1.4 und V1.2.1, deren Medianwerte stark in Richtung „unpräzise“ tendieren (vgl. Bild 7.17). Die beste Bewertung erhalten die Versuchsmerkmale V1.5.4 ( $\bar{x} = 5,32$ ) und V1.5.5 ( $\bar{x} = 5,23$ ). 75 % der Probanden bewerten diese Versuchsmerkmale als nahezu „sehr präzise“. Die geringste Streuung in der Bewertung gibt es bei den Versuchsmerkmalen mit einer Intensität von 100 % und einem Skalenabstand von 30,00 mm (V1.5.4) und 37,50 mm (V1.5.5). Anhand Bild 7.17 ist erkennbar, dass die Präzision durchgehend mit zunehmendem Skalenabstand als auch mit zunehmender Feedbackintensität als präziser bewertet wird. Erkennbar ist ebenfalls, dass innerhalb eines Intensitätsniveaus ein Skalenabstand von 15,00 mm die schlechteste Präzisionsbewertung erhält. Folglich haben sowohl der Skalenabstand als auch die Feedbackintensität der taktilen Skala einen Einfluss auf die Präzisionsbewertung.

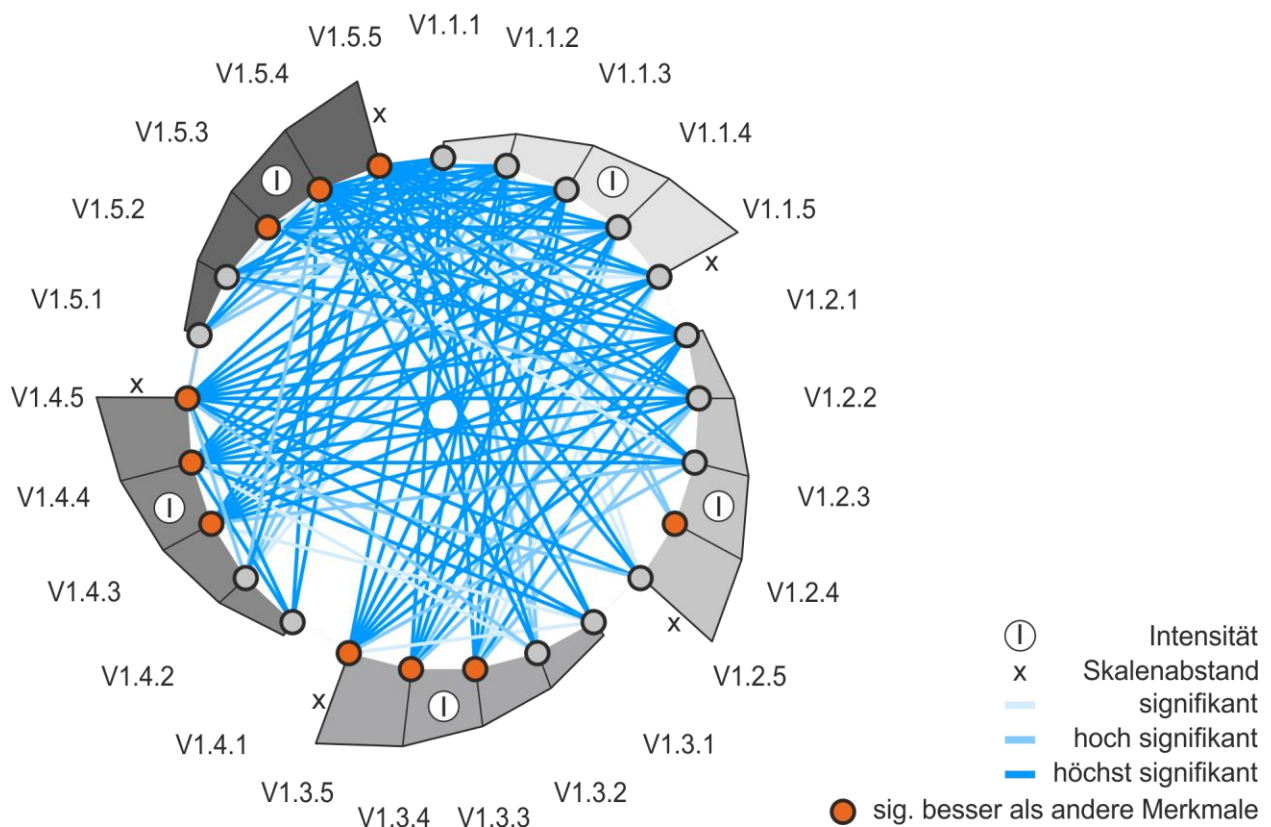


**Bild 7.17:** Bewertung der Präzision der taktilen Skala VR01

Gemäß dem durchgeführten Kolmogorov-Smirnov-Test (vgl. Tabelle A.3.11 Anhang A.3) sind die Daten überwiegend nicht normalverteilt. Gemäß der zweifaktoriellen Varianzanalyse für Ränge nach Friedman gibt es statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen (Chi-Quadrat (24) = 436,301,  $p < 0,001$ ,  $n = 31$ ). Die explizite Darstellung der Signifikanzwerte der paarweisen Vergleiche anhand eines Post-hoc-Tests nach Dunn-Bonferroni kann Tabelle A.3.12 im Anhang A.3 entnommen werden. Bild 7.18 gibt einen Überblick über die statistisch relevanten Unterschiedspaare (113 Paarungen). Es ist ersichtlich, dass ab einer Intensität von 77 % und einem Skalenabstand von 18,75 mm hinsichtlich der Präzisionsbewertung eine Häufung von statistisch signifikanten, hoch und höchst signifikanten Unterschieden auftritt, welche sich hinsichtlich einer zunehmenden Intensität weiter verdichtet (vgl. V1.3.2 bis V1.3.5 und V1.5.1 bis V1.5.5). Die meisten signifikanten, hoch und höchst signifikanten Unterschiede können dabei bei Versuchsmerkmal V1.5.4 gefolgt von Versuchsmerkmal V1.4.5 und V1.5.5 identifiziert werden. Die paarweisen Vergleiche fallen zugunsten der Versuchsmerkmale V1.4.5, V1.5.4 oder V1.5.5 aus (vgl. Tabelle A.3.12). Bei einem Skalenabstand von 15,00 mm tritt ein einziger hoch signifikanter Unterschied bei der Paarung V1.1.1-V1.5.1 auf ( $z = -8,323$ ,  $p = 0,003$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,49$ ). Dies zeigt, dass ein

geringer Skalenabstand von 15,00 mm durch eine stärkere Feedbackintensität (V1.1.1 (48 %), V1.5.1 (100 %)) kompensiert werden kann und bestätigt die Erkenntnisse aus der deskriptiven Statistik (vgl. Bild 7.17). Eine Präzisionssteigerung einhergehend mit der Vergrößerung des Skalenabstands lässt sich ebenfalls anhand Bild 7.17 und Bild 7.18 erkennen. Beispielsweise wird Versuchsmerkmal V1.3.5 signifikant präziser bewertet als V1.3.1 ( $z = -7,177$ ,  $p = 0,037$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,29$ ). Weitere Beispiele sind u. a. V1.4.1-V1.4.4, V1.4.1-V1.4.5, V1.4.2-V1.4.5 oder V1.5.1-V1.5.4, V1.5.2-V1.5.4 und V1.5.1-V1.5.5. Folglich trägt eine Vergrößerung des Skalenabstands zu einer statistisch relevanten Verbesserung der Präzisionsbewertung bei.

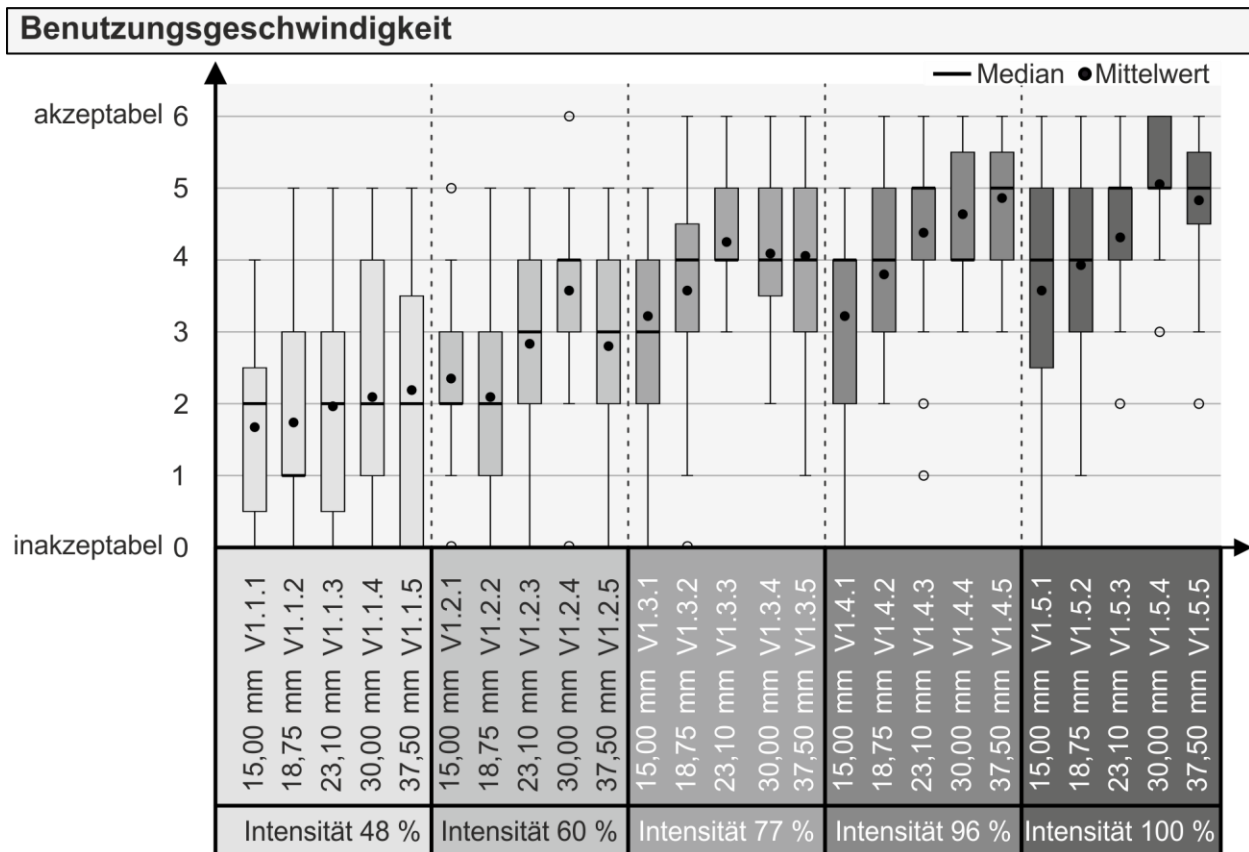
### Präzision



**Bild 7.18:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Präzision VR01

Die Box-Plots in Bild 7.19 zeigen die subjektive Bewertung der Benutzungsgeschwindigkeit. Die Bewertung der Benutzungsgeschwindigkeit reicht von „inakzeptabel“ (vgl. V1.1.1) bis hin zu „akzeptabel“ (vgl. V1.5.4). Die schlechteste Bewertung erzielt Versuchsmerkmal V1.1.1 mit einem Mittelwert von  $\bar{X} = 1,68$ . Am besten wird das Versuchsmerkmal V1.5.4 ( $\bar{X} = 5,06$ ) bewertet. Das Versuchsmerkmal V1.5.4 besitzt dabei die geringste Streuung der Bewertungen und die Mehrheit der Probanden bewertet die Benutzungsgeschwindigkeit als nahezu „akzeptabel“. Allerdings gibt es bei diesem

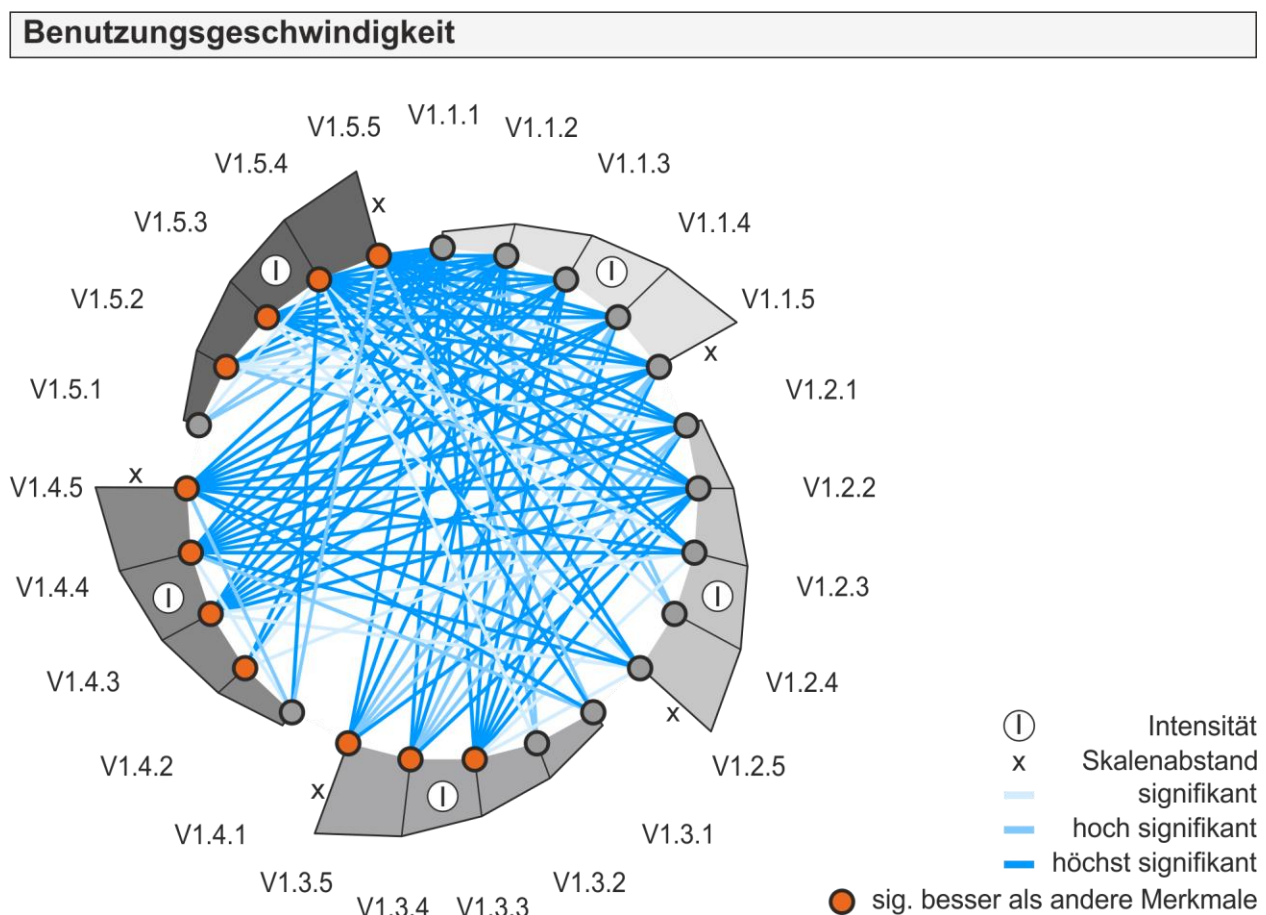
Merkmal einen Ausreißer in der Bewertung, in der Gestalt, dass ein Proband die Benutzungsgeschwindigkeit als mittelmäßig klassifiziert (siehe Kreis bei V1.5.4). In Bild 7.19 ist die Tendenz zu erkennen, dass gesamtbetrachtet die Benutzungsgeschwindigkeit mit zunehmender Intensität besser bewertet wird.



**Bild 7.19:** Bewertung der Benutzungsgeschwindigkeit der taktilen Skala VR01

Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigt, dass die Daten nicht durchgehend normalverteilt sind (vgl. Tabelle A.3.13 im Anhang A.3). Anhand des Friedman-Tests (Chi-Quadrat (24) = 364,100,  $p < 0,001$ ,  $n = 31$ ) mit anschließendem Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni ist ersichtlich, dass sich die Versuchsmerkmale signifikant voneinander unterscheiden. Die detaillierte Teststatistik ist in Tabelle A.3.14 im Anhang A.3 zu finden. Bild 7.20 gibt einen Überblick über die statistischen Beziehungen der einzelnen Versuchsmerkmale zueinander. Insgesamt gibt es 105 statistisch signifikante, hoch und höchst signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen. Nach Bild 7.20 werden die Versuchsmerkmale von V1.3.3 bis V1.5.5 mit Ausnahme von V1.4.1 und V1.5.1 signifikant, hoch und höchst signifikant besser bewertet, als die Versuchsmerkmale von V1.1.1 bis V1.3.2 (vgl. Tabelle A.3.14 in Anhang A.3). Eine Ausnahme bildet dabei V1.2.4. Dieses Versuchsmerkmal schneidet bezüglich V1.1.1 (V1.1.1-V1.2.4:  $z = -8,629$ ,  $p = 0,001$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,52$ ) und V1.1.2 (V1.1.2-V1.2.4:  $z = -8,645$ ,  $p = 0,001$ ,

$n = 31$ ,  $r = 1,43$ ) hoch signifikant besser ab. Das hinsichtlich der deskriptiven Statistik am besten bewertete Versuchsmerkmal V1.5.4 zeigt die meisten statistisch relevanten Unterschiede, in der Gestalt, dass diese zugunsten von V1.5.4 ausfallen (vgl. Bild 7.20). Die Anhäufung signifikanter, hoch und höchst signifikanter Unterschiede unterstützt somit die Tendenz der deskriptiven Statistik, dass gesamt betrachtet die Benutzungsgeschwindigkeit mit zunehmender Intensität besser bewertet wird. Ein inferenzstatistischer Nachweis, dass sich der Skalenabstand bei gleicher Feedbackintensität auf die Bewertung der Benutzungsgeschwindigkeit hoch signifikant auswirkt, kann anhand der Paarungen V1.4.1-V1.4.4, V1.4.1-V1.4.5, und V1.5.1-V1.5.4 beobachtet werden (vgl. Tabelle A.3.14 im Anhang A.3). Bei den Versuchsmerkmalen mit einer Intensität kleiner 96 % ist dieser Einfluss jedoch statistisch nicht relevant.

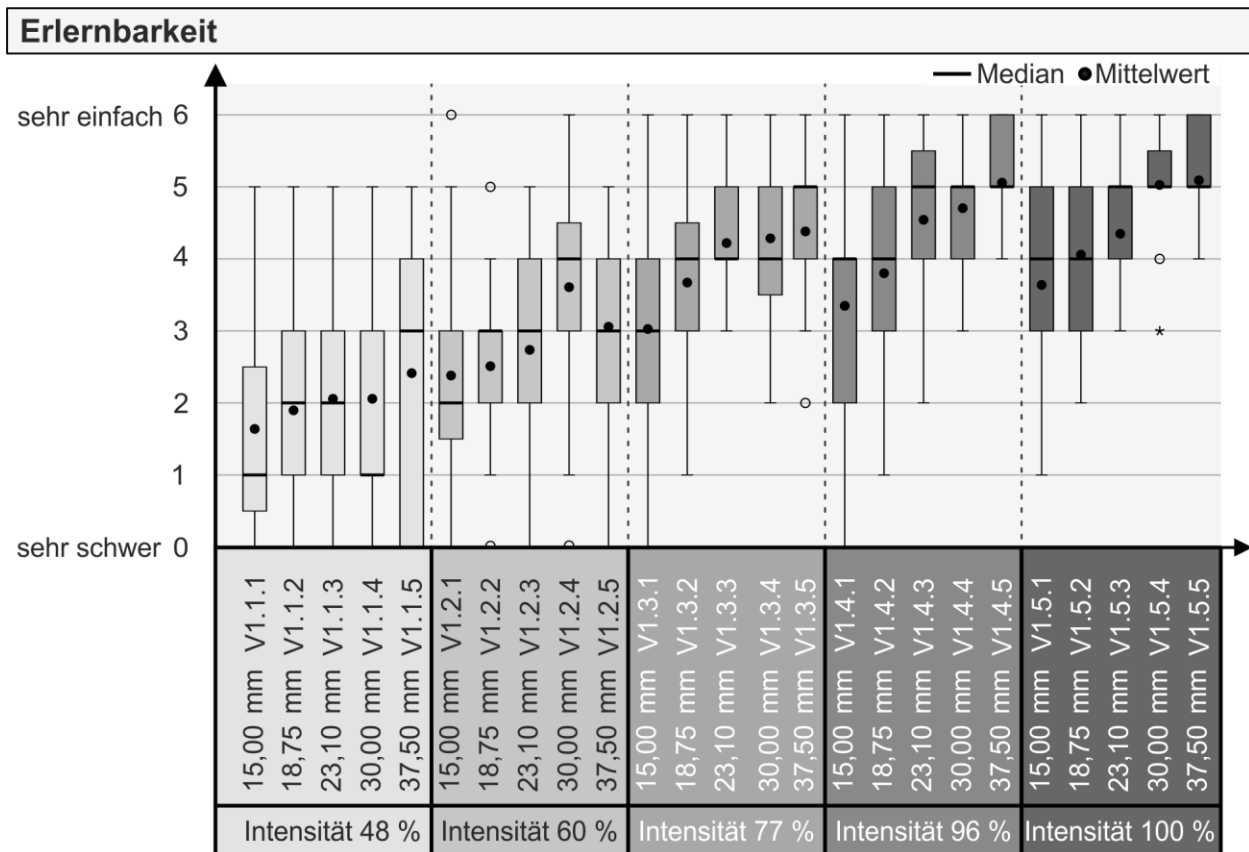


**Bild 7.20:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Benutzungsgeschwindigkeit VR01

Die subjektive Bewertung der Erlernbarkeit der taktilen Skala ist in Bild 7.21 zu sehen. Die Bewertung der Erlernbarkeit reicht von „sehr schwer“ (vgl. V1.1.1) bis „sehr einfach“ (vgl. V1.2.4). Die geringste Erlernbarkeit wird den Versuchsmerkmalen V1.1.1 ( $\bar{\sigma} = 1,65$ ) und V1.1.2 ( $\bar{\sigma} = 1,90$ ) zugeschrieben. Am besten wird hingegen die Erlernbarkeit bei



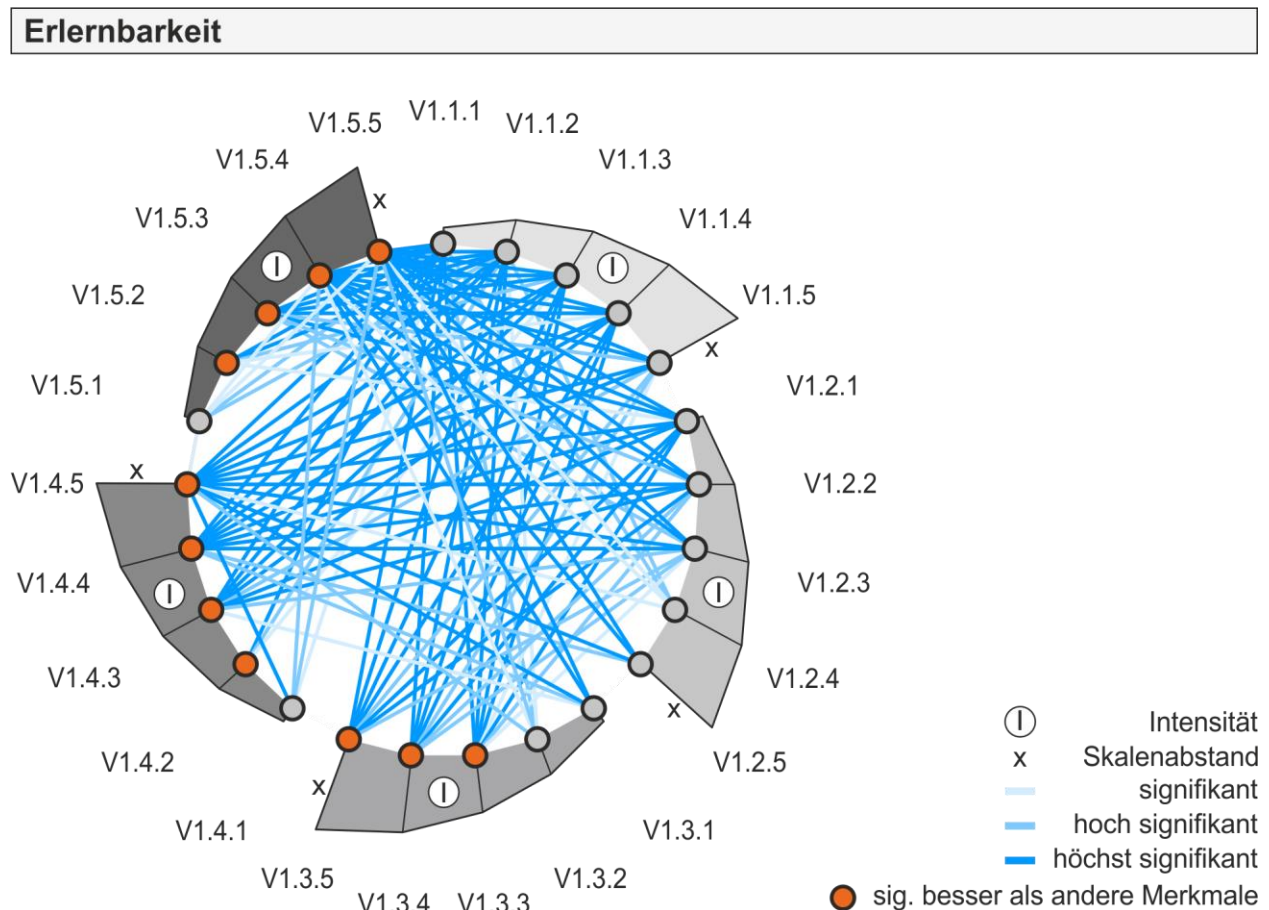
Versuchsmerkmal V1.5.5 ( $\emptyset = 5,10$ ), gefolgt von Versuchsmerkmal V1.4.5 ( $\emptyset = 5,06$ ) und V1.5.4 ( $\emptyset = 5,03$ ) bewertet. Bei diesen Versuchsmerkmalen bewerten 75 % der Probanden die Erlernbarkeit als nahezu „sehr einfach“. Gesamt betrachtet wird die Erlernbarkeit tendenziell mit einer zunehmenden Feedbackintensität besser bewertet. Anhand der Ausdehnung der Interquartilsabstände lässt sich ebenfalls die Tendenz erkennen, dass mit zunehmendem Skalenabstand die Erlernbarkeit besser bewertet wird.



**Bild 7.21:** Bewertung der Erlernbarkeit der taktilen Skala VR01

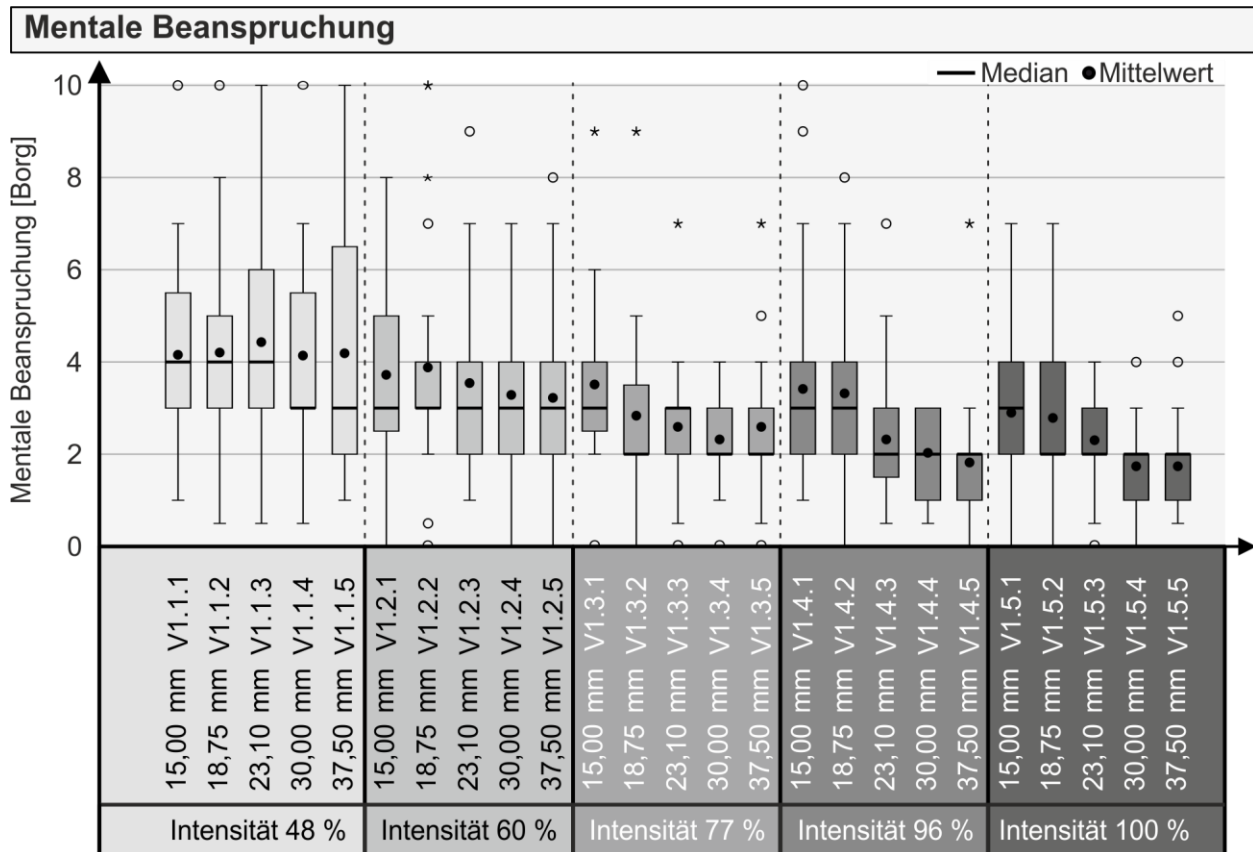
Gemäß den Ergebnissen des Kolmogorov-Smirnov-Tests in Tabelle A.3.15 in Anhang A.3 kann eine Normalverteilung der Daten verworfen werden. Anhand des Friedman-Tests (Chi-Quadrat (24) = 371,158,  $p < 0,001$ ,  $n = 31$ ) mit anschließendem Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni ist ersichtlich, dass es statistisch relevante Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen gibt. Die Teststatistik mit 108 Paarungen ist in Tabelle A.3.16 zu finden. Analog zur Benutzungsgeschwindigkeit tritt auch hier eine Häufung von signifikanten, hoch und höchst signifikanten Unterschieden aufsteigend von V1.3.2 auf. Gemäß Bild 7.22 werden die Versuchsmerkmale V1.3.3 bis V1.5.5 mit Ausnahme von V1.4.1 und V1.5.1 statistisch signifikant besser bewertet als die Versuchsmerkmale von V1.1.1 bis V1.3.1. Eine Ausnahme bildet dabei V1.2.4. Dieses Versuchsmerkmal schneidet bezüglich V1.1.1 (V1.1.1-V1.2.4:  $z = -8,484$ ,  $p = 0,002$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,52$ ) und

V1.1.2 (V1.1.2-V1.2.4:  $z = -7,935$ ,  $p = 0,007$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,43$ ) hoch signifikant besser ab. Eine zunehmende Feedbackintensität fördert folglich die Erlernbarkeit des taktilen Feedbacks und untermauert die Erkenntnisse aus der deskriptiven Analyse. Die Versuchsmerkmale V1.4.5, V1.5.4 und V1.5.5 weisen die meisten signifikanten, hoch und höchst signifikanten Unterschiede auf, wobei diese immer zu deren Gunsten ausfallen (vgl. Bild 7.22 und Tabelle A.3.16) und stützen somit die Erkenntnis der deskriptiven Statistik.



**Bild 7.22:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Erlernbarkeit VR01

Die Bewertung der mentalen Beanspruchung anhand der Borg Skala der Probanden ist in Bild 7.23 dargestellt. Anhand der Box-Plot-Diagramme ist zu erkennen, dass mit zunehmender Feedbackintensität und einem zunehmenden Skalenabstand die mentale Beanspruchung reduziert werden kann. Die stärkste mentale Beanspruchung erfahren die Probanden bei den Versuchsmerkmalen V1.1.1, V1.1.2 und V1.1.3 mit einem Median von 4 auf der Borg Skala, was einer „ziemlich starken“ Beanspruchung entspricht [DIN EN ISO 9241-420 2011, S. 43]. Die Versuchsmerkmale V1.5.4 und 1.5.5 generieren gemäß der Bewertung der Probanden die geringste durchschnittliche mentale Beanspruchung ( $\bar{\emptyset} = 1,74$ ), gefolgt von den Versuchsmerkmalen V1.4.5 ( $\bar{\emptyset} = 1,82$ ) und V1.4.4 ( $\bar{\emptyset} = 2,03$ ). Die Beanspruchung wird als „schwach“ eingestuft [DIN EN ISO 9241-420 2011, S. 43].

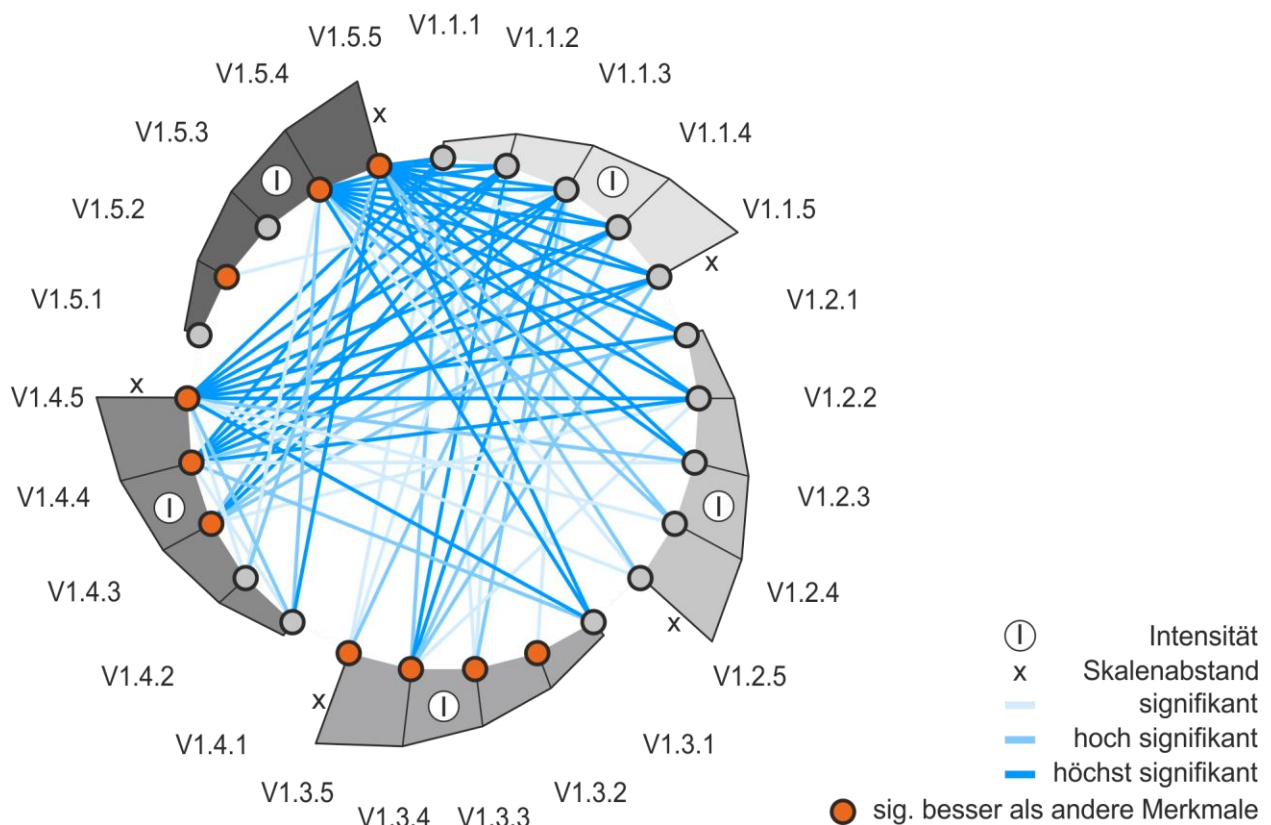


**Bild 7.23:** Bewertung der mentalen Beanspruchung VR01

Aufgrund der Verwerfung einer Normalverteilung (siehe Tabelle A.3.17 im Anhang A.3) wird die inferenzstatistische Untersuchung mittels eines Friedman-Tests mit anschließender Dunn-Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Dieser zeigt, dass statistisch relevante Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen vorhanden sind (Chi-Quadrat (24) = 269,577,  $p < 0,001$ ,  $n = 31$ ). Mittels des Post-hoc-Tests nach Dunn-Bonferroni können 76 signifikante, hoch und höchst signifikante Unterschiede identifiziert werden (vgl. Tabelle A.3.18). Anhand Bild 7.24 ist erkennbar, dass eine Häufung von statistisch relevanten Unterschieden bei den Versuchsmerkmalen V1.3.2 bis V1.3.5, V1.4.3 bis V1.4.5 und V1.5.4 und V1.5.5 auftreten. Diese schneiden im Vergleich zu den Versuchsmerkmalen V1.1.1 bis V1.3.1 signifikant, hoch und höchst signifikant besser ab. Folglich reduziert eine stärkere Feedbackintensität die mentale Beanspruchung der Probanden. Bei den Versuchsmerkmalen V1.4.4-V1.4.1 ( $z = 7,113$ ,  $p = 0,043$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,28$ ), und V1.4.5-V1.4.2 ( $z = 7,355$ ,  $p = 0,025$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,32$ ) kann je ein signifikanter Unterschied und bei den Versuchsmerkmalen V1.4.5-V1.4.1 ( $z = 8,452$ ,  $p = 0,002$ ,  $n = 31$ ,  $r = 1,52$ ) kann ein hoch signifikanter Unterschied identifiziert werden. Bei diesen Versuchsmerkmalen reduziert folglich die Vergrößerung des Skalenabstands die mentale Beanspruchung der Probanden.



### Mentale Beanspruchung



**Bild 7.24:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge der mentalen Beanspruchung VR01

#### 7.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Überprüfung der Hypothesen

Zur Erzielung einer guten Usability und Akzeptanz des taktilen Feedbacks im Raum ist es notwendig die Parameterwerte für die Feedbackintensität und den Skalenabstand hinsichtlich einer effektiven, effizienten und zufriedenstellenden Bedienung zu identifizieren. In diesem Kapitel werden daher die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe zusammengefasst und die für die weiteren Untersuchungen am besten geeignete Parameterkombination eingegrenzt und ausgewählt. Die Daten des jeweiligen Bewertungskriteriums der deskriptiven Statistik werden dazu aufgearbeitet und die Mittelwerte der Bewertungskriterien in einem normierten Netzdiagramm dargestellt. Die Netzdiagramme werden dabei hinsichtlich der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit (siehe Tabelle 7.5 und Tabelle 7.6) des taktilen Feedbacks gegliedert. Die Normierung der Daten erfolgt im Bereich von 0 bis 1, wobei 0 jeweils dem unzureichenden Ergebnis und 1 jeweils dem optimal möglichen Ergebnis der Bewertung eines jeden Kriteriums zugeordnet wird. Bei den objektiv erfassten Daten beispielsweise spiegelt die 0 bei der Fehleranzahl (siehe Tabelle 7.5) die maximale Anzahl an Fehlern wider, wohingegen die 1 für keine Fehler

steht. Bei den subjektiven Daten wie beispielsweise bei der Bewertung der Präzision markiert die Ziffer 1 die Bewertung „sehr präzise“ und die 0 die Bewertung „unpräzise“. Durch diese Normierung der Daten und Verbindung der einzelnen Mittelwerte der Versuchsmerkmale entsteht in Tabelle 7.5 und 7.6 über alle Bewertungskategorien hinweg eine schiffschraubenartige Kurve. Diese verläuft meist ansteigend innerhalb der Versuchsmerkmale eines Intensitätslevels (vgl. Stelldifferenz V1.1.1 bis V1.1.5 in Tabelle 7.5). Eine Ausnahme bildet dabei die Bedienzeit. Bei den anderen Bewertungskategorien sind jedoch ähnliche Verlaufsmuster zu finden. Diese schiffschraubenartige Kurve ist ebenfalls bei den Netzdiagrammen beispielsweise in Bild 7.24 zu finden, wo sie zur Visualisierung der zunehmenden Intensität und des zunehmenden Skalenabstands dient. Durch die zusammenfassende Darstellung in Tabelle 7.5 und 7.6 ist ersichtlich, dass gesamt betrachtet die Stellaufgabe sowohl mit einer zunehmenden Intensität als auch durch einen zunehmenden Skalenabstand besser ausgeführt wird. Im Folgenden erfolgt eine detailliertere Betrachtung hinsichtlich der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit.

Hinsichtlich der Effektivität (siehe Tabelle 7.5) kann zusammengefasst werden:

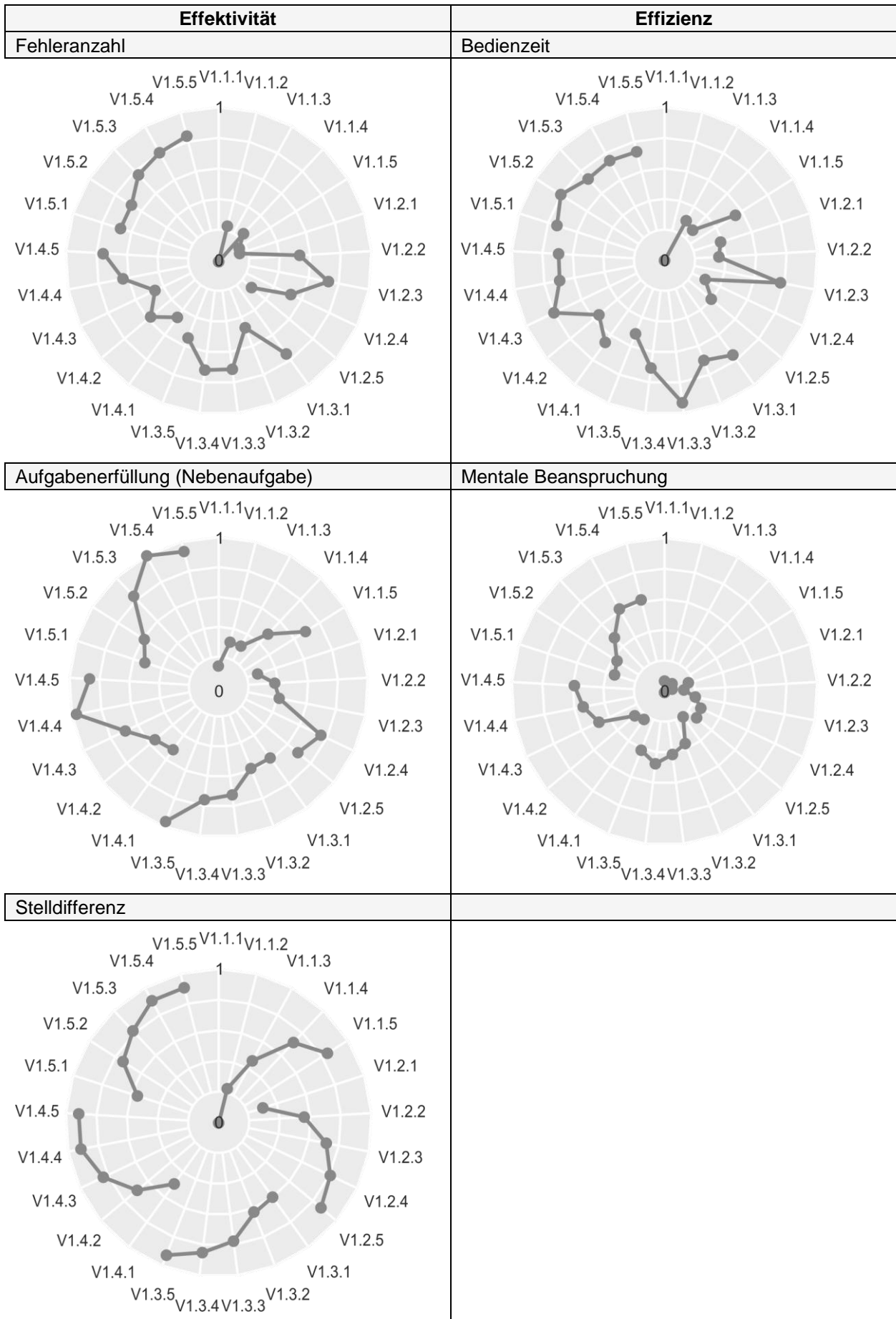
- Die Fehleranzahl innerhalb der Versuchsmerkmale gleicher Intensität schwankt, fällt aber gesamt betrachtet mit zunehmender Feedbackintensität geringer aus. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass ein stark ausgeprägtes Feedback weniger Aufmerksamkeit für die Ausführung der Nebenaufgabe erfordert. Erst ab einer Feedbackintensität von 96 % scheint der Skalenabstand Einfluss auf die Fehleranzahl zu nehmen. Bei den Versuchsmerkmalen V1.4.1 bis V1.4.5 (Ausnahme V1.4.3) und V1.5.1 bis V1.5.5 ist eine abnehmende Fehleranzahl mit zunehmendem Skalenabstand beobachtbar.
- Eine sehr geringe Intensität und ein sehr enger Skalenabstand erweisen sich als ungeeignet für das effektive Einstellen eines Skalenwerts mit Hilfe des taktilen Feedbacks. Die Aufgabenerfüllung steigt zum einen mit zunehmender Intensität und größerem Skalenabstand, wobei der Skalenabstand zur exakten Differenzierung der Skalenposition beiträgt.
- Die Stelldifferenz wird mit zunehmendem Skalenabstand geringer (ähnlicher Verlauf der Kurve in Tabelle 7.5), wobei die Amplitude der Flanke der Kurve (vgl. V1.1.1, V1.2.1, V1.3.1, V1.4.1 und V1.5.1) mit zunehmender Feedbackintensität geringer ausfällt. Demnach wird das Feedback deutlicher wahrnehmbar und reduziert Stellfehler.

Hinsichtlich der Effizienz (siehe Tabelle 7.5) können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Schwankungen der Bedienzeit werden mit zunehmender Feedbackintensität geringer und halten sich bei einer Feedbackintensität von 100 % (vgl. V1.5.1 bis 1.5.5) auf einem relativ konstanten Niveau zwischen 13,70 s und 14,54 s.
- Anhand der normierten Werte in Tabelle 7.5 und 7.6 ist kein Einfluss des Skalenabstands auf die Dauer der Bedienung zu erkennen. Selbiges spiegelt sich auch in den Box-Plot-Diagrammen in Bild 7.10 wider.
- Die Zunahme der Feedbackintensität führt zu einer Reduktion der mentalen Beanspruchung. Erst bei einer ausreichenden Intensitätsstufe von 77 % erfolgt eine weitere Reduktion der mentalen Beanspruchung über einen zunehmenden Skalenabstand (vgl. V1.4.1 bis V1.4.5 oder V1.5.1 bis V1.5.5).

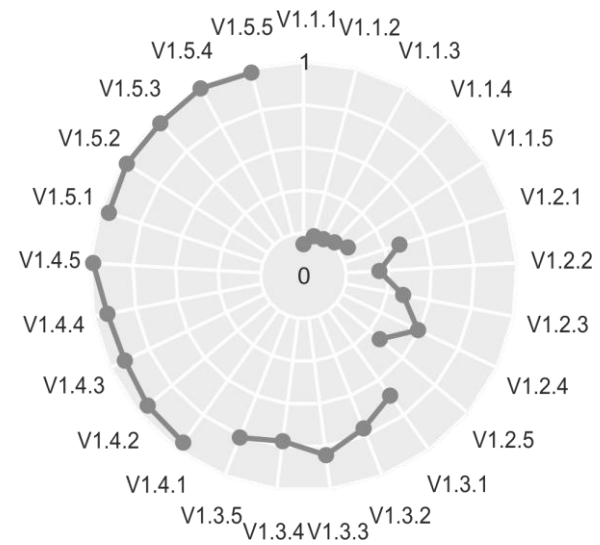
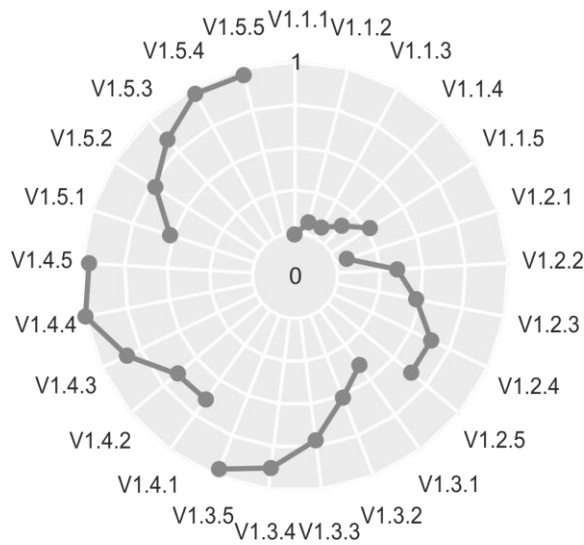
Anhand der Bewertung der Zufriedenheit (siehe Tabelle 7.6) lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Das Sicherheitsgefühl die richtige Skalenposition eingestellt zu haben steigt mit zunehmendem Skalenabstand und mit zunehmender Feedbackintensität.
- Die Ausprägung des taktilen Feedbacks wird sowohl durch die Feedbackintensität als auch durch den Skalenabstand beschrieben. Dabei wird bei einer geringeren Intensität ein größerer Skalenabstand besser bewertet (vgl. V1.1.5, V1.2.5, V1.3.5). Bei höheren Intensitätsstufen wird der maximale Skalenabstand (37,50 mm) hingegen etwas schlechter beurteilt (vgl. V1.4.5 und V1.5.5). Bei geringerer Feedbackintensität ist daher ein größerer Skalenabstand zu empfehlen.
- Die Präzision des taktilen Feedbacks kann durch die Feedbackintensität beeinflusst werden, in der Gestalt, dass eine zunehmende Feedbackintensität zu einem präziseren Skalenverlauf führt, was eine bessere Benutzungsgeschwindigkeit und Erlernbarkeit generiert. Ebenfalls beeinflusst der Skalenabstand die Präzision des Feedbacks dahingehend, dass sich ein größerer Skalenabstand positiv auf die Präzision der taktilen Skala auswirkt. Auch dies lässt sich in einer besseren Benutzungsgeschwindigkeit und Erlernbarkeit wiederfinden. Eine Ausnahme bildet dabei das Versuchsmerkmal V1.2.5. Dieser Intensitäts- und Skalenverlauf scheint die Probanden etwas zu verunsichern, was sich auch in den Bewertungskriterien Benutzungsgeschwindigkeit und Erlernbarkeit zeigt.

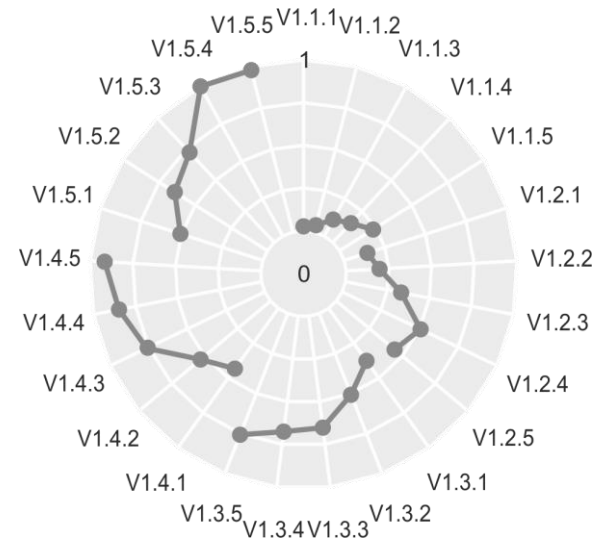
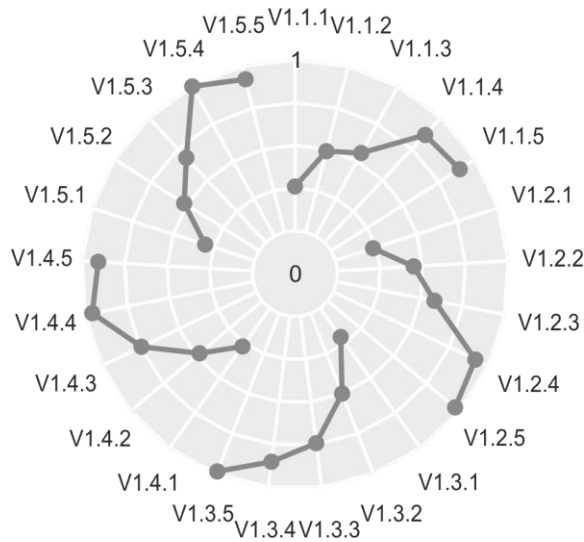


**Tabelle 7.5:** Zusammenfassung normierte Mittelwerte VR01 (Effektivität & Effizienz)

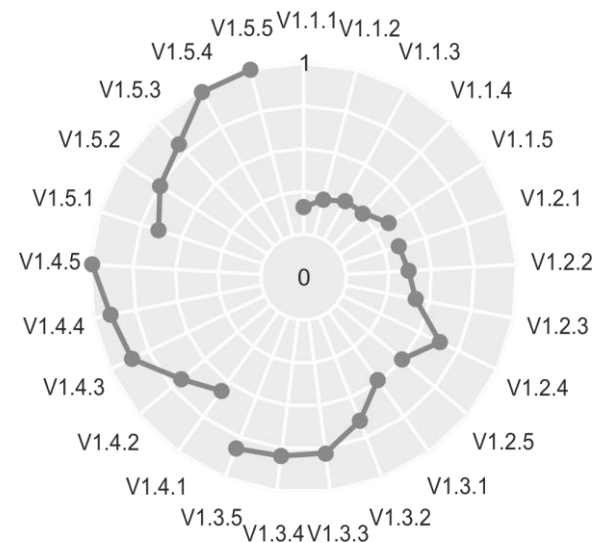
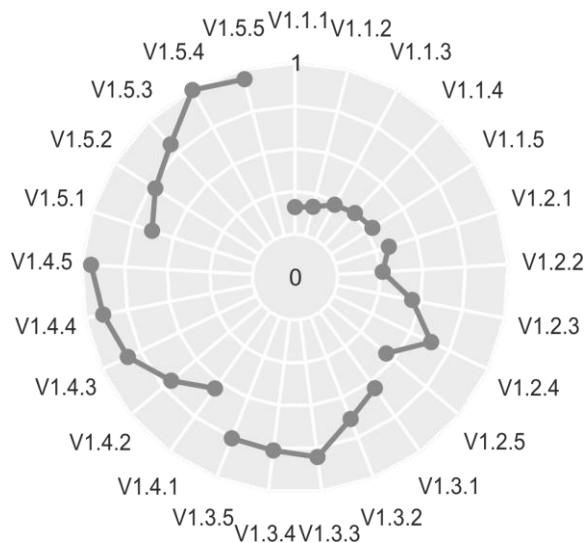
<b>Zufriedenheit</b>	
Gefühl richtig gestellt	Intensität



Skalenabstand	Präzision
---------------	-----------



Benutzungsgeschwindigkeit	Erlernbarkeit
---------------------------	---------------



**Tabelle 7.6:** Zusammenfassung normierte Mittelwerte VR01 (Zufriedenheit)

Die Übersicht über die Mittelwerte der jeweiligen Bewertungskategorie ist in Tabelle 7.7 zu finden. In der Tabelle sind die Versuchsmerkmale mit den jeweils besten Bewertungen mit drei Punkten bewertet (vgl. Tabelle 7.7 Fehleranzahl V1.5.5). Mit zwei Punkten und einem Punkt sind Versuchsmerkmale des zweiten und dritten Platzes markiert (vgl. Tabelle 7.7 V1.5.3 und V1.5.4). Auf Basis dieser Bewertungstabelle wird der Basisverlauf des taktilen Feedbacks für die nächste Versuchsreihe ausgewählt. Die meisten Bewertungen entfallen nach Tabelle 7.7 auf einen Skalenabstand von 30,00 mm (V1.5.4) und einen Skalenabstand von 37,50 mm (V1.4.5, V1.5.5). Die Versuchsmerkmale unterscheiden sich dabei hinsichtlich der Feedbackintensität um 4 %. Über alle Bewertungskategorien hinweg erhält das Versuchsmerkmal V1.5.4 die beste Bewertung. Ein Skalenabstand von 30,00 mm bei einer Intensität von 100 % ist somit für die Bedienung über einen horizontalen Slider im Raum für die Einstellung eines definierten Skalenwerts im Rahmen dieser Studie optimal. Nach ANSORGE & LEDER [2011, S. 44] ist die Schwelle einer empirisch erfassten Studie in der Psychophysik jener Wert, an dem 50 % wahrgenommen und 50 % nicht wahrgenommen werden. Da bei einem Skalenabstand von 30,00 mm bereits bei einer Intensität von 60 % (674,40 Pa) mehr als 50 % der Stellaufgaben korrekt ausgeführt werden (vgl. Bild 7.7), wird diese Parameterkombination (V1.2.4) als minimale Intensität für die Versuchsreihe VR02 ausgewählt.

Intensität [%]	48					60					77					96					100					
Skalenabstand [mm]	15,00	18,75	23,10	30,00	37,50	15,00	18,75	23,10	30,00	37,50	15,00	18,75	23,10	30,00	37,50	15,00	18,75	23,10	30,00	37,50	15,00	18,75	23,10	30,00	37,50	
Versuchsmerkmal	V1.1.1	V1.1.2	V1.1.3	V1.1.4	V1.1.5	V1.2.1	V1.2.2	V1.2.3	V1.2.4	V1.2.5	V1.3.1	V1.3.2	V1.3.3	V1.3.4	V1.3.5	V1.4.1	V1.4.2	V1.4.3	V1.4.4	V1.4.5	V1.5.1	V1.5.2	V1.5.3	V1.5.4	V1.5.5	
Fehleranzahl																								2	1	3
Aufgabenerfüllung														2				2						3	1	
Stelldifferenz														3				1	2							
Bedienzeit													3					1				2				
Mentale Beanspruchung																		1	2					3	3	
Gefühl richtig gestellt													1	2				3	2					2	2	
Intensität																				2	1	1		3	1	
Skalenabstand									1						2									3		
Präzision																				1				3	2	
Benutzungsgeschw.																				2				3	1	
Erlernbarkeit																				2				1	3	
Summe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	1	9	0	0	1	7	13	0	3	3	22	16	

**Tabelle 7.7:** Übersicht Bewertung der Mittelwerte VR01

Auf Basis der Zusammenfassung der Versuchsergebnisse erfolgt abschließend die Überprüfung der Hypothesen. Daraus resultierend wird der Basisverlauf für eine taktile Skala des taktilen Feedbacks festgelegt. Tabelle 7.8 visualisiert die oben genannten

Stichpunkte. Von Interesse ist der Einfluss der Feedbackintensität und des Skalenabstands auf die Bewertungskriterien. Ein grünes Feld bedeutet, dass die Hypothese  $H_n$  aus Tabelle 7.1 anhand der Untersuchung bestätigt werden kann und angenommen wird. Ein rotes Feld hingegen, dass die Hypothese  $H_n$  aus Tabelle 7.1 nicht bestätigt werden kann und daher verworfen wird. Basierend auf den Bewertungskriterien Fehleranzahl, Aufgabenerfüllung der Nebenaufgabe und Stelldifferenz ist erkennbar, dass die Feedbackintensität als auch der Skalenabstand Einfluss auf die Effektivität des taktilen Feedbacks nehmen. Demnach können die Hypothesen bezüglich der Effektivität ( $H_1$  bis  $H_6$ ) als bestätigt angesehen werden. Zur Überprüfung der Effizienz der taktilen Skala wurden die Hypothesen  $H_7$  bis  $H_{10}$  aufgestellt. Im Rahmen dieser Untersuchung können alle Hypothesen bis auf  $H_8$  bestätigt werden. Die Hypothese  $H_8$  muss allerdings anhand der Versuchsergebnisse abgelehnt und verworfen werden. Ein allgemeiner Einfluss des Skalenabstands auf die Bedienzeit kann nicht nachgewiesen werden. Die Hypothesen  $H_{11}$  bis  $H_{18}$  bezüglich der Zufriedenheit des taktilen Merkmals können allesamt bestätigt werden. Das Zusammenspiel aus Intensität und Skalenabstand ist demzufolge essenziell für eine zufriedenstellende Bedienung über ein taktilen Feedback.

	$H_n$	Beschreibung	$H_n$ verworfen
Effektivität	$H_1$	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.	Nein
	$H_2$	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.	Nein
	$H_3$	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.	Nein
	$H_4$	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.	Nein
	$H_5$	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.	Nein
	$H_6$	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.	Nein
Effizienz	$H_7$	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.	Nein
	$H_8$	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.	Ja
	$H_9$	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.	Nein
	$H_{10}$	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.	Nein
Zufriedenheit	$H_{11}$	Die <i>Ausprägung</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.	Nein
	$H_{12}$	Die <i>Ausprägung</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.	Nein
	$H_{13}$	Die <i>Präzision</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.	Nein

**Tabelle 7.8:** Ergebnis der Forschungshypothesenüberprüfung (Teil 1/2)



	H <sub>n</sub>	Beschreibung	H <sub>n</sub> verworfen
Zufriedenheit	H <sub>14</sub>	Die <i>Präzision</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte Hypothesenüberprüfung beeinflusst.	Nein
	H <sub>15</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.	Nein
	H <sub>16</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.	Nein
	H <sub>17</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch die Intensität des Feedbacks beeinflusst.	Nein
	H <sub>18</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch den Abstand der taktilen Skalenpunkte beeinflusst.	Nein

**Tabelle 7.8:** Ergebnis der Forschungshypothesenüberprüfung (Teil 2/2)

## 7.2 Versuchsreihe 2: Erkennung von Informationsinhalten

In der zweiten Versuchsreihe folgen Untersuchungen zur Identifizierung der Unterschiedsschwelle. Die Unterschiedsschwelle entspricht dem kleinstmöglichen Unterschied im Skalenverlauf, welcher von den Probanden wahrgenommen werden kann. Dieser Unterschied kann als Indikator einer Änderung im Skalenverlauf und somit einer Information gedeutet werden. Der Unterschied im Intensitäts- und Skalenverlauf des taktilen Feedbacks wird im Folgenden als taktiler Merkmal bezeichnet.

### 7.2.1 Hypothesen

Die Informationsübertragung über den taktilen Wahrnehmungskanal beruht auf der Wahrnehmung von Unterschieden im Skalenaufbau des Feedbacks im Raum. Dabei können Unterschiede im Skalenaufbau durch sprunghafte Änderungen im Intensitätsverlauf als auch im Skalenabstand kenntlich gemacht werden. Eine Änderung im Skalenverlauf kann dabei eine Vergrößerung oder Verkleinerung in Bezug zur Basisskala bedeuten. Genauer geht es um die Erkennung eines sprunghaften Intensitätsabfalls oder -anstiegs sowie die sprunghafte Vergrößerung oder Verkleinerung des Skalenabstands. Aus Versuchsreihe VR01 resultiert, dass ein kleinerer Skalenabstand als der Basisabstand von 30,00 mm zu einer schlechteren Aufgabenerfüllung beiträgt, weshalb eine Verkleinerung des Skalenabstands zur Informationskodierung nicht weiter betrachtet wird. Analog zu Versuchsreihe VR01 lassen sich detaillierte Untersuchungshypothesen formulieren. In Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit des taktilen Feedbacks im Raum der berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle werden die Gestaltungsspielräume der sprunghaften Intensitätsabsenkung, Intensitätssteigerung oder der Vergrößerung des Skalenabstands in die Untersuchungsparameter Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit weiter untergliedert. Die Effektivität kann durch die Aufgabenerfüllung der Haupt- und



Nebenaufgabe sowie der Stellgenauigkeit beschrieben werden. Hinsichtlich der Effizienz werden die Bedienzeit sowie die Bewertung der mentalen Beanspruchung als Indikator genutzt. Die Zufriedenheit der Nutzer wird mit Hilfe der subjektiven Bewertung der Ausprägung und Präzision des taktilen Merkmals sowie der Bewertung der Benutzungsgeschwindigkeit und Erlernbarkeit des taktilen Merkmals eruiert. Die detaillierten Untersuchungshypothesen sind in nachfolgender Tabelle (Tabelle 7.9) aufgelistet.

	H <sub>n</sub>	Beschreibung
Effektivität	H <sub>19</sub>	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>20</sub>	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>21</sub>	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.
	H <sub>22</sub>	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>23</sub>	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>24</sub>	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.
	H <sub>25</sub>	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>26</sub>	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>27</sub>	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.
Effizienz	H <sub>28</sub>	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>29</sub>	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>30</sub>	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.
	H <sub>31</sub>	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>32</sub>	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>33</sub>	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.
Zufriedenheit	H <sub>34</sub>	Die <i>Ausprägung</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>35</sub>	Die <i>Ausprägung</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>36</sub>	Die <i>Ausprägung</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.
	H <sub>37</sub>	Die <i>Präzision</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>38</sub>	Die <i>Präzision</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>39</sub>	Die <i>Präzision</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.

**Tabelle 7.9:** Hypothesen Versuchsreihe VR02 (Teil 1/2)

	H <sub>n</sub>	Beschreibung
Zufriedenheit	H <sub>40</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>41</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>42</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.
	H <sub>43</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>44</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.
	H <sub>45</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.

**Tabelle 7.9:** Hypothesen Versuchsreihe VR02 (Teil 2/2)

### 7.2.2 Untersuchungsparameter

Bei der Übertragung von Informationen über den taktilen Wahrnehmungskanal trägt die Erkennung von Unterschieden im Verlauf des taktilen Feedbacks eine bedeutende Rolle. Zur Identifizierung der Unterschiedsschwelle wird ausgehend von den Ergebnissen der Versuchsreihe VR01 ein taktiler Slider mit einer Basisskala, mit einem Skalenabstand von 30,00 mm und einer Feedbackintensität von 100 % aufgebaut. Die Sliderlänge wird aus der ersten Versuchsreihe VR01 übernommen und beträgt 300 mm. Innerhalb des Skalenverlaufs wird ein taktiler Merkmal eingebaut. Dieses taktile Merkmal ist ein Skalenpunkt, welcher sich entweder bezüglich der Feedbackintensität oder des Skalenabstands von den anderen Skalenpunkten unterscheidet. Die Kennzeichnung des Skalenpunktes erfolgt dabei über einen sprunghaften Intensitätsabfall oder –anstieg (siehe Bild 7.25). Des Weiteren besteht die Möglichkeit das taktile Merkmal via einer sprunghaften Änderung des Skalenabstands zu kennzeichnen (siehe Bild 7.26). In der zweiten Versuchsreihe wird das taktile Merkmal bei Skalenpunkt „6“ implementiert. Ziel ist es, dass der Proband zuvor die Möglichkeit besitzt, sich an die taktile Basisskala zu gewöhnen und sich hinsichtlich der Ausprägung des Unterschieds im Feedbackverlauf sensibilisiert. Insgesamt werden 20 Versuchsmerkmale mit diversen Abstufungen des taktilen Merkmals nach Tabelle 7.10 implementiert.

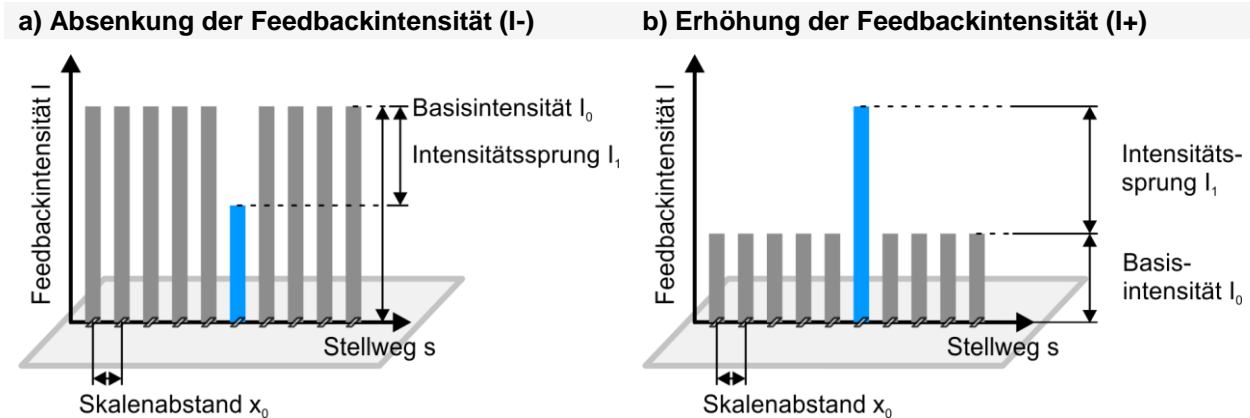
Die erste Kodierungsmöglichkeit eines taktilen Merkmals kann durch eine sprunghafte Intensitätsabsenkung (I-) beschrieben werden (siehe Bild 7.25a). Gemäß den Ergebnissen von VR01 wird für dieses Kodierungsmerkmal eine Basisskala mit einem Skalenabstand von 30,00 mm und einer Feedbackintensität von 100 % implementiert. Ausgehend von einer Basisintensität von 100 % wird diese an Skalenposition „6“ nach DIN 323-1 [1974] Normreihe R20 stufenweise abgesenkt. Da gemäß Versuchsreihe VR01

bei einem Skalenabstand von 30,00 mm eine Intensität unter 60 % zu einer Aufgabenerfüllung der Nebenaufgabe unter 50 % fällt, wird darauf geachtet, dass die Feedbackintensität des taktilen Merkmals bei mindestens 60 % bleibt. Daher ist eine Stufung gemäß der Normreihe R10 zu grob. Mit dieser Normreihe sind nur zwei Stufensprünge realisierbar. Die Normreihe R40 bietet hingegen zu geringe Unterschiede zwischen den Stufensprüngen. Folglich ergeben sich gemäß einer Stufung nach der Normreihe R20 vier Stufensprünge mit den Faktoren  $\varphi = \{1,12, 1,25, 1,40, 1,60\}$  [DIN 323-1 1974]. Die Versuchsmerkmale finden sich in Tabelle 7.10 (V2.1.1 – V2.1.4).

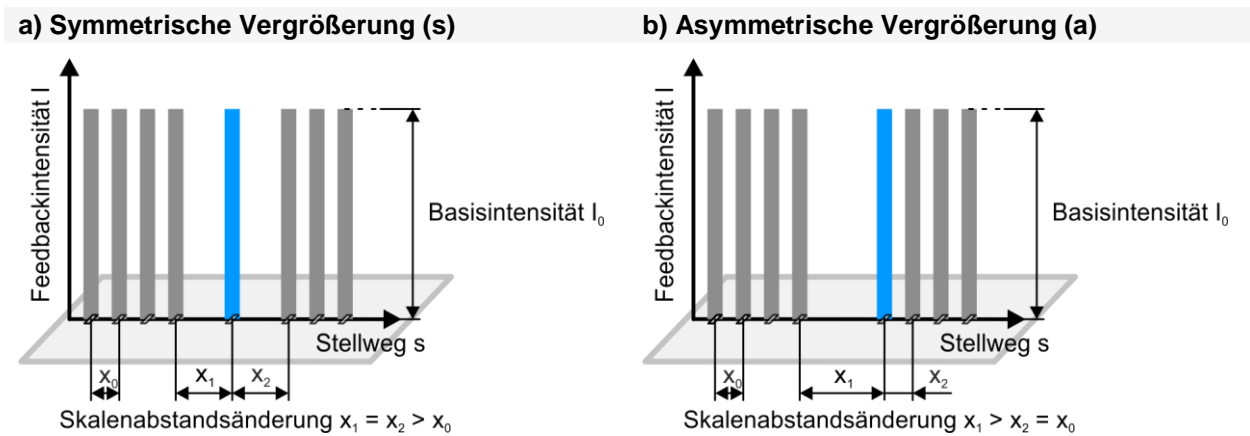
Eine weitere Kodierungsmöglichkeit bietet sich durch die sprunghafte Erhöhung (I+) des taktilen Merkmals an Skalenposition „6“ (siehe Bild 7.25b). Gemäß Versuchsreihe VR01 liegt bei einem Skalenabstand von 30,00 mm die Wahrnehmungsschwelle bei einer Feedbackintensität von 60 %. Im Gegensatz zur Kodierung aus vorherigem Absatz wird die Feedbackintensität des taktilen Merkmals nun ausgehend von 60 % gemäß der Normreihe R20 nach DIN 323-1 [1974] stufenweise erhöht. Folglich lassen sich mit den Faktoren  $\varphi = \{1,12, 1,25, 1,40, 1,60\}$  vier weitere Versuchsmerkmale aufbauen (vgl. Tabelle 7.10 V2.1.5 – V2.1.8). Eine weitere Überhöhung des taktilen Merkmals ist aufgrund des Erreichens der maximalen Intensitätsstufe des Ultraschallarrays nicht möglich. Eine weitere Kodierungsstrategie des taktilen Merkmals beruht ebenfalls auf einem positiven Intensitätssprung (I+) der Skalenposition „6“. Bei dieser Kodierungsstrategie wird die Feedbackintensität der Skalenposition auf 100 % gestellt und die Feedbackintensität der übrigen Skalenpunkte wird stufenweise nach der Normreihe R20 erniedrigt [DIN 323-1 1974]. Dabei ergeben sich ausgehend von einer Feedbackintensität von 100 % ebenfalls vier weitere Versuchsmerkmale (vgl. Tabelle 7.10 V2.1.9 – V2.1.12).

Eine weitere Kodierungsmöglichkeit ergibt sich über eine Änderung des Skalenabstands. Die Vergrößerung des Skalenabstands kann dabei symmetrisch (s: symmetrische Skalenabstandsänderung (Bild 7.26a)) oder asymmetrisch (a: asymmetrische Skalenabstandsänderung (Bild 7.26b)) erfolgen. Die Bilder 7.26a und b zeigen die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands. Bei einer symmetrischen Vergrößerung des Skalenabstands ist dabei der Abstand vor und nach Skalenpunkt „6“ gleich groß (vgl. Bild 7.26a). Bild 7.26b zeigt eine asymmetrische Änderung im Skalenverlauf. Bei einer asymmetrischen Änderung ist der Skalenabstand lediglich vor Skalenposition „6“ vergrößert. Der Skalenabstand von Position „6“ auf Position „7“ hingegen entspricht dem Basisabstand von 30,00 mm. Bei der Kodierung des taktilen Merkmals über eine Änderung im Skalenabstand wird der Basisabstand von 30,00 mm stufenweise nach der Normreihe

R10 vergrößert [DIN 323-1 1974]. Eine Abstufung gemäß R20 [DIN 323-1 1974] ist bei dieser Kodierungsmöglichkeit zu fein. Untersuchungen von SCHMID ET AL. [2021B] zeigen, dass sehr geringe Änderungen des Skalenabstands von den Probanden nur schwer unterscheidbar sind. Folglich ergeben sich für eine symmetrische und eine asymmetrische Änderung des Skalenabstands jeweils vier Stufensprünge mit den Faktoren  $\varphi = \{1,25, 1,60, 2,00, 2,50\}$  (V2.1.13 – V2.1.20) [DIN 323-1 1974]. Die detaillierte Beschreibung des taktilen Merkmals kann Tabelle 7.10 entnommen werden.



**Bild 7.25:** Kodierungsmöglichkeiten durch sprunghafte Intensitätsänderung



**Bild 7.26:** Kodierungsmöglichkeiten durch sprunghafte Skalenabstandsänderung

Versuchsmerkmal	Intensität				Skalenabstand			$\varphi$
	$I_0$ [%]	Schall-druck [Pa]	$I_1$ [%]	Schall-druck [Pa]	$x_0$ [mm]	$x_1$ [mm]	$x_2$ [mm]	
V2.1.1	100	1124,00	89	1000,36	30,00	30,00	30,00	1,12
V2.1.2	100	1124,00	80	899,20	30,00	30,00	30,00	1,25
V2.1.3	100	1124,00	71	798,04	30,00	30,00	30,00	1,40
V2.1.4	100	1124,00	63	708,12	30,00	30,00	30,00	1,60
V2.1.5	60	674,40	67	753,08	30,00	30,00	30,00	1,12
V2.1.6	60	674,40	75	843,00	30,00	30,00	30,00	1,25
V2.1.7	60	674,40	84	944,16	30,00	30,00	30,00	1,40

**Tabelle 7.10:** Übersicht Versuchsmerkmale VR02 (Teil 1/2)

Versuchsmerkmal	Intensität				Skalenabstand			$\varphi$
	$I_0$ [%]	Schall- druck [Pa]	$I_1$ [%]	Schall- druck [Pa]	$x_0$ [mm]	$x_1$ [mm]	$x_2$ [mm]	
V2.1.8	60	674,40	96	1079,04	30,00	30,00	30,00	1,60
V2.1.9	89	1000,36	100	1124,00	30,00	30,00	30,00	1,12
V2.1.10	80	899,20	100	1124,00	30,00	30,00	30,00	1,25
V2.1.11	71	798,04	100	1124,00	30,00	30,00	30,00	1,40
V2.1.12	63	708,12	100	1124,00	30,00	30,00	30,00	1,60
V2.1.13	100	1124,00	100	1124,00	30,00	39,00	39,00	1,25
V2.1.14	100	1124,00	100	1124,00	30,00	48,00	48,00	1,60
V2.1.15	100	1124,00	100	1124,00	30,00	60,00	60,00	2,00
V2.1.16	100	1124,00	100	1124,00	30,00	75,00	75,00	2,50
V2.1.17	100	1124,00	100	1124,00	30,00	39,00	30,00	1,25
V2.1.18	100	1124,00	100	1124,00	30,00	48,00	30,00	1,60
V2.1.19	100	1124,00	100	1124,00	30,00	60,00	30,00	2,00
V2.1.20	100	1124,00	100	1124,00	30,00	75,00	30,00	2,50

**Tabelle 7.10:** Übersicht Versuchsmerkmale VR02 (Teil 2/2)

### 7.2.3 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Neben der Erfassung der taktilen Fähigkeiten der Probanden im Rahmen eines Vorversuchs wird im Hauptversuch die Unterschiedsschwelle ermittelt, um Informationen mittels eines Unterschieds im Skalenverlauf zu transferieren. Die Untersuchung der einzelnen Versuchsmerkmale erfolgt randomisiert und mit jedem Probanden getrennt. Der Ablauf des ersten Versuchsteils erfolgt analog zur Versuchsreihe VR01. Nach der Begrüßung erhält der Proband eine kurze Einführung in den Gesamtversuch und das Versuchsziel der zweiten Versuchsreihe. Nach dem Ausfüllen der Einverständniserklärung zur Studienteilnahme erfolgt die Erfassung der taktilen Fähigkeiten bestehend aus der Zweipunktdiskriminationsschwelle [GOLDSTEIN 2008, S. 343], dem Semmes-Weinstein-Monofilament-Tests [SCHORRMANN 2020] und des Vibrationsempfindens [HILZ ET AL. 1998], wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben. Ebenfalls wird die Koordination der rechten und linken Hand mittels des Tests Zweihand Koordination des Wiener Testsystems [SCHUHFRIED 2015] erfasst.

Der Proband erhält im Anschluss an die Erfassung der taktilen Fähigkeiten eine theoretische Einführung in den Hauptversuch, bevor eine Erklärung des Aufbaus des Prüfstands folgt. Der Versuchsaufbau entspricht exakt demjenigen aus Kapitel 5.2 Bild 5.5. Die Hauptaufgabe aus Kapitel 5.2.2 bleibt bestehen und wird analog zu Versuchsreihe VR01 ausgeführt, lediglich der Skalenverlauf des taktilen Feedbacks der Nebenaufgabe ist um das taktile Merkmal (siehe Tabelle 7.10) erweitert. Dem Probanden wird zunächst verdeutlicht, dass es in der zweiten Versuchsreihe bezüglich der Nebenaufgabe

um die Erkennung von Informationsinhalten geht. Folglich um Unterschiede im Aufbau der taktilen Skala bezüglich der Intensitätsänderungen oder einer Änderung des Skalenabstands zu erkennen. Dazu wird dem Probanden ebenfalls wieder empfohlen, zu Beginn jeder Stellaufgabe die Hand in der Mitte des Ultraschallarrays in einer Höhe von 200 mm zu halten und anschließend die linke Begrenzung des Bedienfelds zu suchen. Somit hat der Proband die korrekte Nullposition und kann bei einer Bewegung nach rechts die komplette Skala abfahren. Anschließend werden dem Probanden taktile Beispiele (Extremwerte) für eine Intensitätsänderung oder eine Änderung des Skalenabstands gezeigt. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, das taktile Merkmal zu erkennen und auf die direkte Position rechts daneben zu stellen, während er sich zugleich auf die Hauptaufgabe konzentriert. Zielposition ist somit Skalenposition „7“. Ein wiederholtes Hin- und Herfahren auf dem virtuellen taktilen Slider ist dabei möglich. Insgesamt werden die 20 verschiedenen Skalenverläufe aus Tabelle 7.10 untersucht. Zur Speicherung der Position ist es notwendig, dass der Proband seine Hand für drei Sekunden ruhig an der von ihm eingestellten Zielposition hält. Die Speicherung der Zielposition wird dem Probanden verbal mitgeteilt. Anschließend erfolgt die Bewertung des eingestellten Feedbacks anhand eines Fragebogens, welcher dem Probanden auf einem weiteren Bildschirm linker Hand präsentiert wird.

Zur Bewertung der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit der Parameter des taktilen Merkmals werden neben objektiven Daten, wie der Fehleranzahl bzgl. der Hauptaufgabe, der Aufgabenerfüllung der Nebenaufgabe, der Stelldifferenz zwischen Soll- und Ist-Position sowie der Bedienzeit auch subjektive Daten anhand eines Fragebogens nach Kapitel 5.3 erfasst. Bild 7.27 zeigt die Antwortmöglichkeiten des Fragebogens aus Versuchsreihe VR02. Die Probanden werden dabei zunächst gefragt, ob sie sicher sind die direkte Skalenposition nach dem taktilen Merkmal eingestellt zu haben. Dabei stehen die Antwortmöglichkeiten „ja“, „nein“ und „unsicher“ zur Auswahl. Die Bewertung der Ausprägung des taktilen Merkmals, Präzision, Benutzungsgeschwindigkeit und Erlernbarkeit erfolgt anhand von Gegensatzpaaren an einer 7-stufigen Likert-Skala (siehe Bild 7.27). Abschließend werden die Probanden nach der mentalen Beanspruchung gefragt, die sie während der Ausführung der Stellaufgabe empfinden. Als Bewertungsmaßstab wird die Borg Skala nach [DIN EN ISO 9241-420 2011, S. 43] verwendet. Die verbal geäußerten Antworten des Probanden werden vom Versuchsleiter im Fragebogen dokumentiert. Für die Studienteilnahme wird den Probanden eine Aufwandsentschädigung ausbezahlt.



die der Handinnenfläche bei  $\emptyset = 10,30$  mm (SD = 0,79 mm) und damit innerhalb des Bereichs gesunder Erwachsener (vgl. [LEDERMAN & KLATZKY 2009], [CATLEY ET AL. 2013]). Die Sensibilität der Probanden liegt bei einem Medianwert von 0,07 g, was gemäß [SCHORRMANN 2020] ebenfalls ein alterstypisches Berührungsempfinden bestätigt. Das Vibrationsempfinden ist mit einem Durchschnittswert von 7,92 ebenfalls nicht auffällig [HILZ ET AL. 1998]. Hinsichtlich der taktilen Wahrnehmung können keine Auffälligkeiten bei den Probanden festgestellt werden, sodass diese ein vergleichbares Testkollektiv zur ersten Versuchsreihe bilden.

n=30	Minimum	Maximum	Median	$\emptyset$	SD
Alter [Jahre]	19	35	24	24,33	3,74
Größe [cm]	156	198	173	174,03	11,17
Gewicht [kg]	48	100	66,5	67,53	13,48
Geschlecht	50 % männlich, 50 % weiblich				
Bildungsgrad	53,30 % Hochschulabschluss, 46,70 % Abitur/Fachhochschulreife				
Händigkeit	86,70 % rechtshändig, 13,30 % linkshändig				
Nationalität	83,30 % Deutsch, 3,30 % Chinesisch, 3,30 % Italienisch/Deutsch, 3,30 % Spanisch, 3,30 % Syrisch, 3,30 % Tunesisch				
Berufliche Tätigkeit	76,70 % Studium, 23,30 % Bürotätigkeit, 0 % handwerkliche Tätigkeit				
Feinmotorisches Hobby	56,70 % kein feinmotorisches Hobby, 43,30 % feinmotorisches Hobby				
Musikinstrument	60 % spielen kein Musikinstrument, 40 % spielen ein Musikinstrument				
Durchblutungsstörungen	100 % keine Durchblutungsstörungen				
Einschränkungen im Hand-/Arm-/Fingerbereich	100 % keine Einschränkungen				
Raucher	96,70 % Nichtraucher, 3,30 % Raucher				

**Tabelle 7.11:** Probandenkollektiv VR02

n=30	Minimum	Maximum	Median	$\emptyset$	SD
Zweipunktschwelle Mittelfinger [mm]	2,00	6,00	4,00	3,90	1,09
Zweipunktschwelle Handinnenfläche [mm]	10,00	14,00	10,00	10,30	0,79
Semmes-Weinstein Monofilament-Test [g]	0,07	0,40	0,07	0,11	0,11
Vibrationsempfinden	7,00	8,00	8,00	7,92	0,24

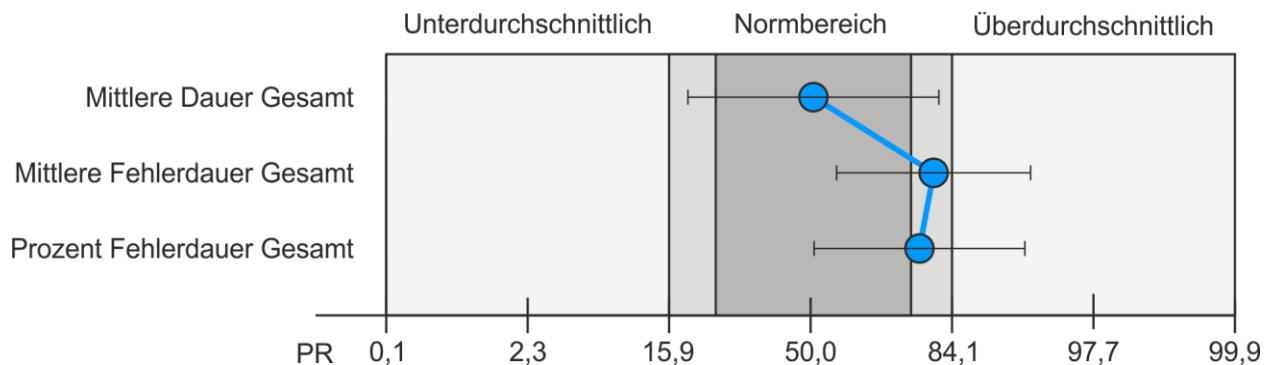
**Tabelle 7.12:** Taktilen Empfinden Versuchsreihe VR02

Die Ergebnisse der Untersuchung der visuomotorischen Koordination der Probanden mittels der Zweihand Koordination des Wiener Testsystems sind in Bild 7.28 dargestellt. Die mittlere Versuchsdauer (Mittlere Dauer gesamt) liegt im Normbereich des Wiener Testsystems [SCHUHFRIED 2015]. Hinsichtlich der mittleren Fehlerdauer und dem Verhältnis der Gesamtfehlerdauer zur Gesamtdauer schneiden die Probanden durchschnittlich bis überdurchschnittlich ab [SCHUHFRIED 2015].

Anhand dieser Voruntersuchungen können keine medizinischen Auffälligkeiten bezüglich der taktilen Wahrnehmung innerhalb des Probandenkollektivs gefunden werden. Das



Probandenkollektiv liegt folglich im Normbereich. Die Probanden üben somit keinen Einfluss aufgrund von unter- oder überdurchschnittlichen Fähigkeiten auf die Ergebnisse der Untersuchung der zweiten Versuchsreihe aus.



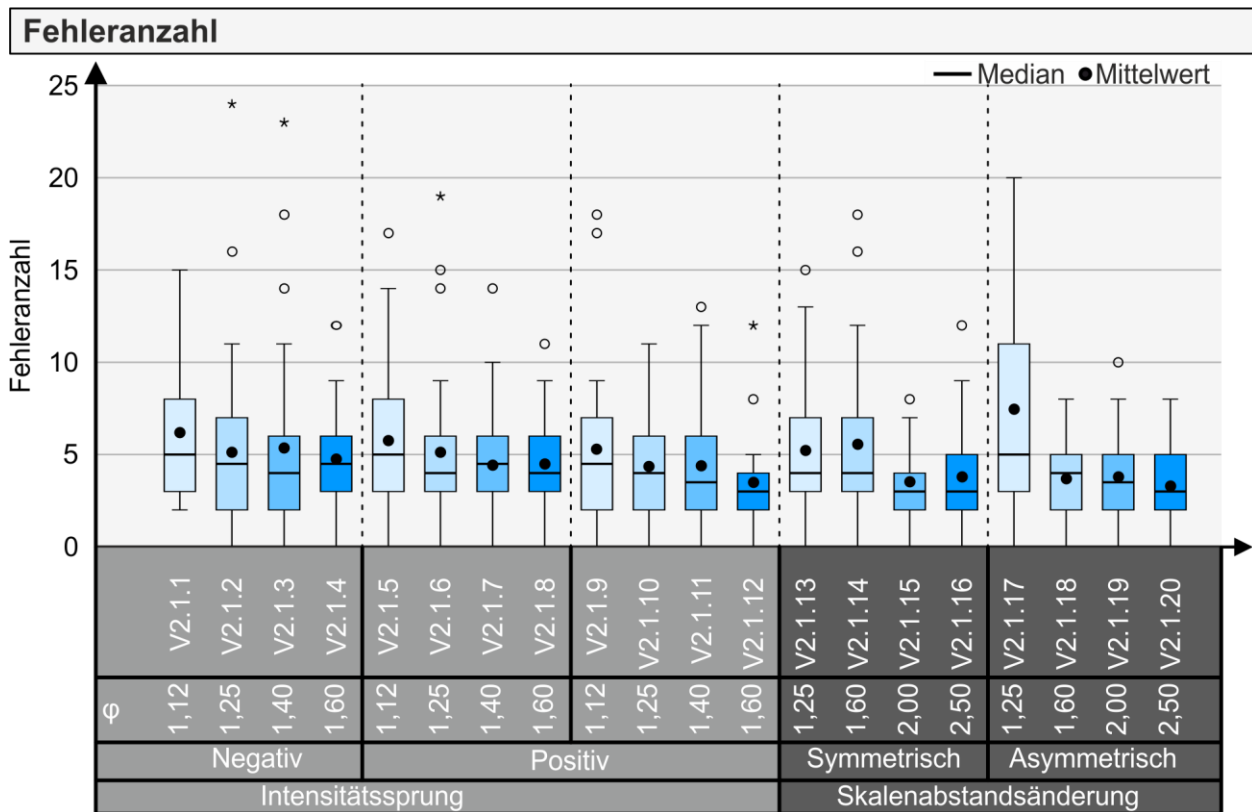
**Bild 7.28:** Ergebnisse des Tests Zweihand Koordination nach Prozenträngen (PR)

### 7.2.5 Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen der zweiten Versuchsreihe VR02 dargestellt und analysiert. Es erfolgt zunächst eine deskriptive und inferenzstatistische Betrachtung der Ergebnisse entsprechend der Parameter zur Beschreibung der Effektivität, Effizienz und der Zufriedenheit bei der Nutzung. Die Ergebnisdarstellung erfolgt analog zur Versuchsreihe VR01. Die Versuchsmerkmale sind in den Diagrammen in zwei Gruppen eingeteilt, je nachdem ob ein Intensitätssprung oder eine Änderung des Skalenabstands vorliegt. Die Gruppe Intensitätssprung lässt sich ferner in zwei weitere Gruppen hinsichtlich eines positiven oder negativen Intensitätssprungs und die Gruppe Skalenabstandsänderung bezüglich einer symmetrischen oder asymmetrischen Änderung des Skalenabstands weiter unterteilen. In diesen Untergruppen sind die Versuchsmerkmale aus Tabelle 7.10 zu finden. Die Farbsättigung des blauen Farbtons der einzelnen Versuchsmerkmale in den Diagrammen korreliert dabei mit dem Faktor  $\varphi$  des Stufensprungs nach DIN 343-1 [1974] (vgl. bspw. Bild 7.29). Die schiffschraubenartige Struktur innerhalb der Netzdiagramme spiegelt dabei den Stufensprung  $\varphi$  wider (vgl. bspw. Bild 7.30)

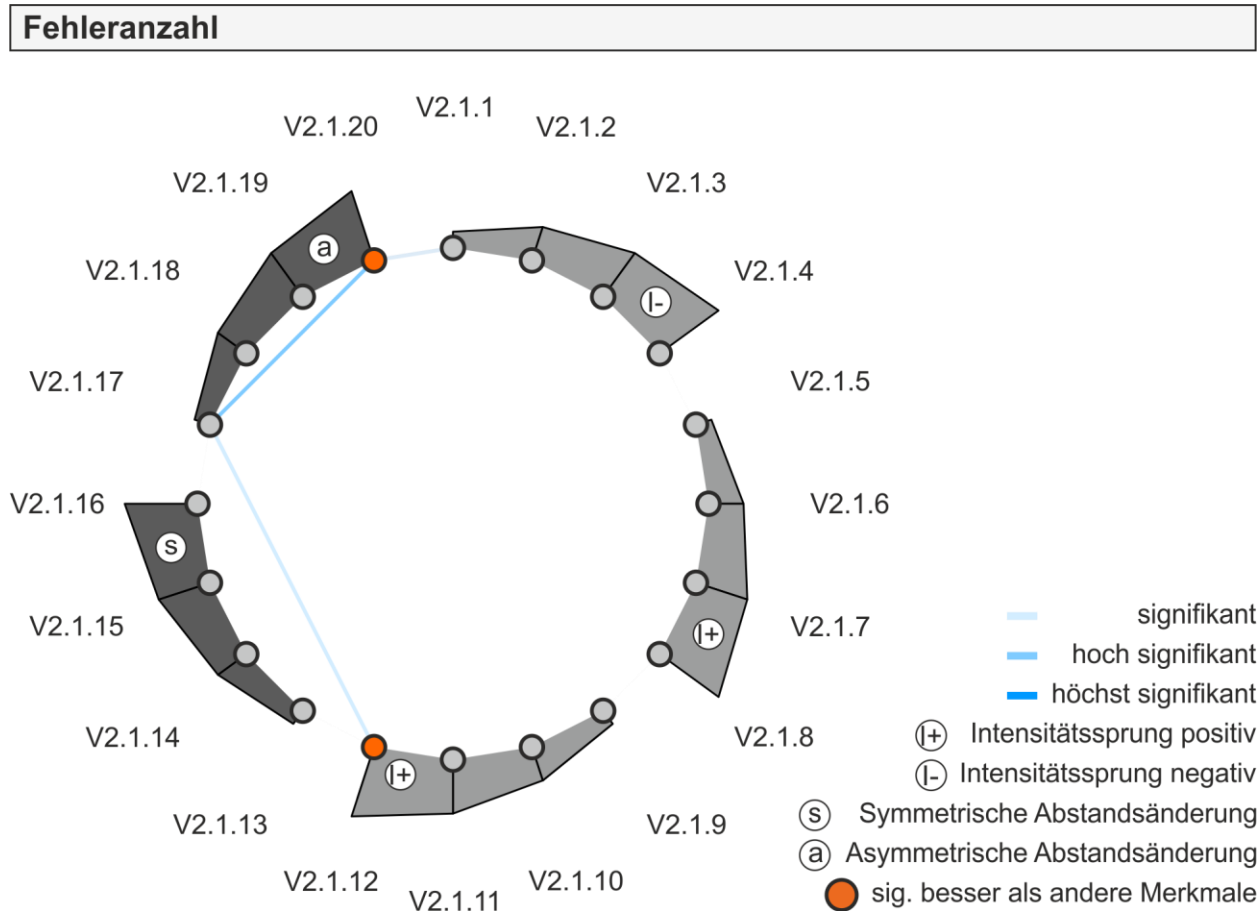
Die Aufgabenerfüllung der Hauptaufgabe ist in Bild 7.29 zu sehen. Die Fehleranzahl variiert von 0 Kontakten bis 24 Kontakten. Die geringste Fehleranzahl wird dabei mit Versuchsmerkmal V2.1.20 ( $\varnothing = 3,30$ ) erreicht. Den zweiten und dritten Platz bilden die Versuchsmerkmale V2.1.12 ( $\varnothing = 3,50$ ) und V2.1.15 ( $\varnothing = 3,53$ ). Die durchschnittlich größte Fehleranzahl wird mit Versuchsmerkmal V2.1.17 ( $\varnothing = 7,47$  Kontakten) erreicht. Die Fehleranzahl nimmt tendenziell bei den Versuchsmerkmalen V2.1.9 bis V2.1.12 und V2.1.17 bis V2.1.20 mit zunehmendem Faktor des Stufensprungs, bezüglich der

Intensität oder der Änderung des Skalenabstands, ab. Bei den Versuchsmerkmalen V2.1.13 bis V2.1.16 ist eine sprunghafte Abnahme der durchschnittlichen Fehleranzahl von Versuchsmerkmal V2.1.14 auf V2.1.15 zu erkennen, wobei diese von V2.1.15 auf V2.1.16 wieder zunimmt.



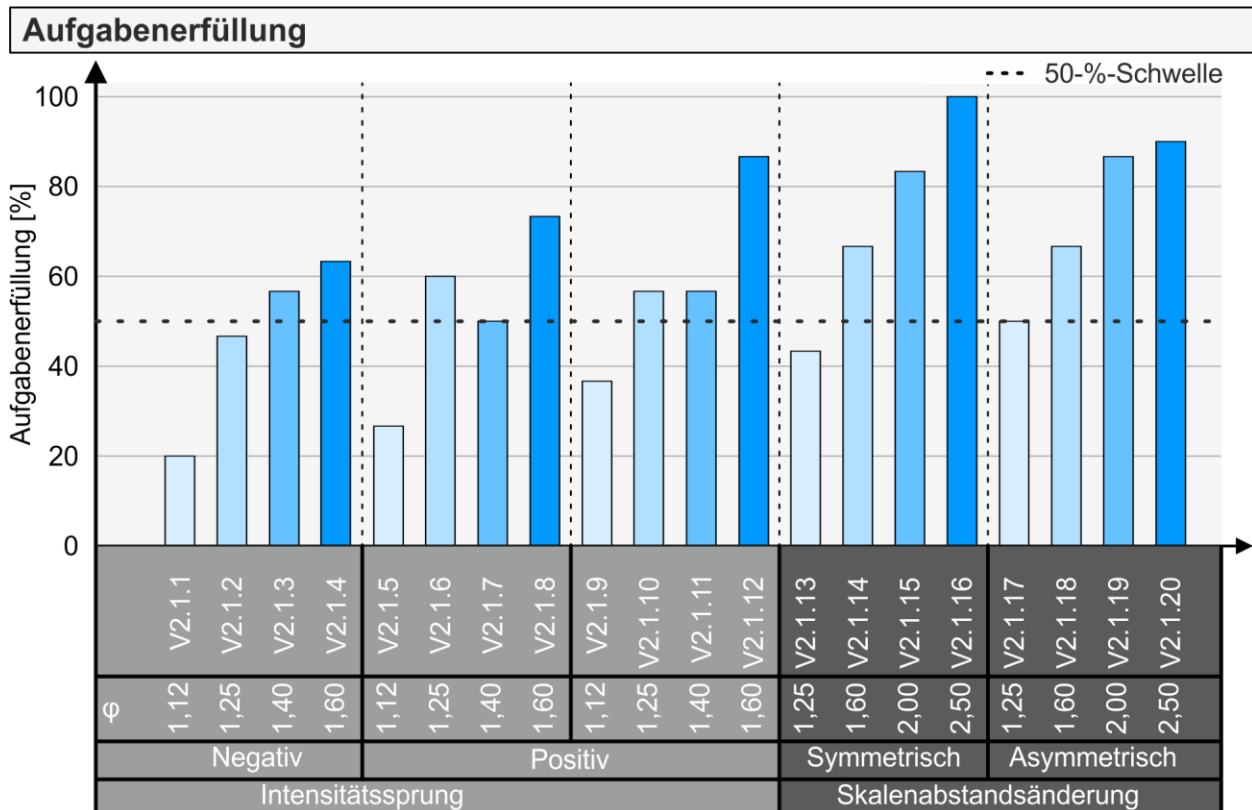
**Bild 7.29:** Fehleranzahl der Hauptaufgabe VR02

Da eine Normalverteilung negiert werden kann (vgl. Tabelle A.4.1 in Anhang A.4), wird die Unterschiedsprüfung mittels eines Friedman-Tests ( $\chi^2(19) = 53,543$ ,  $p < 0,001$ ,  $n=30$ ) mit anschließendem Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni durchgeführt. Die exakten statistischen Werte sind in Tabelle A.4.2 in Anhang A.4 zu finden. Insgesamt treten 3 Paarungen auf, bei denen sich die Fehleranzahl statistisch signifikant unterscheidet. Bild 7.30 gibt einen Überblick über die statistischen Beziehungen zwischen den Versuchsmerkmalen. Bei Versuchsmerkmal V2.1.20 werden signifikant weniger Fehler gemacht als bei V2.1.1 ( $z = 5,983$ ,  $p = 0,017$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,09$ ). Die Paarung V2.1.12-V2.1.17 ( $z = -5,767$ ,  $p = 0,030$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,05$ ) zeigt, dass mit einem Intensitätssprung von Faktor 1,6 (V2.1.12) signifikant weniger Fehler gemacht werden als mit einer Änderung des Skalenabstands von  $\phi = 1,25$  (V2.1.17). Darüber hinaus kann anhand der Paarung V2.1.20-V2.1.17 ( $z = 6,333$ ,  $p = 0,006$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,16$ ) gezeigt werden, dass eine Änderung des Skalenabstands um den Faktor  $\phi = 2,50$  ein hoch signifikant geringeres Fehlerniveau aufweist als eine Abstandsänderung um  $\phi = 1,60$ .



**Bild 7.30:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Fehleranzahl VR02

Bild 7.31 zeigt die Erfüllung der Nebenaufgabe in Form eines Balkendiagramms. Die Aufgabenerfüllung reicht von 20 % (V2.1.1) bis 100 % (V2.1.16). Die beste Aufgabenerfüllung erzielt V2.1.16 ( $\emptyset = 100\%$ ), gefolgt von den Versuchsmerkmalen V2.1.20 ( $\emptyset = 90\%$ ) sowie V2.1.12 und V2.1.19 ( $\emptyset = 86,67\%$ ). Mit Versuchsmerkmal V2.1.16 ist somit eine fehlerfreie Durchführung der Stellaufgabe möglich. Gesamtbetrachtet zeigt sich, dass die Aufgabenerfüllung der Nebenaufgabe mit zunehmendem Intensitätsunterschied (V2.1.1 bis V2.1.4, V2.1.5 bis V2.1.8 und V2.1.9 bis V2.1.12) bzw. Änderung des Skalenabstands (V2.1.13 bis V2.1.16 und V2.1.17 bis V2.1.20) tendenziell besser erfüllt wird. Ausnahme bildet das Versuchsmerkmal V2.1.7. Hinsichtlich der Wahrnehmungsschwelle kann festgestellt werden, dass bei einem Intensitätsabfall ein Stufensprung um  $\varphi = 1,40$  benötigt wird, bis 50 % der Stellaufgaben korrekt ausgeführt werden (vgl. V2.1.3). Die 50%-Schwelle für korrekt ausgeführte Stellaufgaben liegt bei einem sprunghaften Intensitätsanstieg bei einem Stufensprung von  $\varphi = 1,25$  (vgl. V2.1.6 und V2.1.10). Bei einer symmetrischen Änderung des Skalenabstands liegt die 50%-Schwelle bei einem Stufensprung von Faktor  $\varphi = 1,60$  (vgl. V2.1.14) und für eine asymmetrische Änderung des Skalenabstands bei einem Stufensprung von  $\varphi = 1,25$  (vgl. V2.1.17).



**Bild 7.31:** Aufgabenerfüllung der Nebenaufgabe VR02

Bild 7.32 zeigt die Stelldifferenz. Die geringste Stelldifferenz liefert Versuchsmerkmal V2.1.16 ( $\emptyset = 0,10\%$ ), gefolgt von Versuchsmerkmal V2.1.20 ( $\emptyset = 3,90\%$ ) und V2.1.15 ( $\emptyset = 4,30\%$ ). Tendenziell verringert sich die Stelldifferenz mit zunehmender Ausprägung des Unterschieds. Eine Ausnahme bildet das Versuchsmerkmal V2.1.7. Da die Daten nicht normalverteilt sind (siehe Tabelle A.4.3), wird zur Unterschiedsprüfung ein Friedman-Test ( $\text{Chi-Quadrat}(19) = 165,504$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ) mit anschließendem Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni herangezogen. Die signifikanten Unterschiede sind in Tabelle A.4.4 aufgelistet. Bei näherer Betrachtung ist ersichtlich, dass das Versuchsmerkmal V2.1.16 gegenüber allen anderen Versuchsmerkmalen signifikant, hoch und höchst signifikant besser abschneidet (vgl. Bild 7.33). Erkennbar in Bild 7.33 ist ebenfalls, dass eine Änderung des Skalenabstands (vgl. V2.1.15, V2.1.16 oder V2.1.18 bis V2.1.20) statistisch signifikant besser abschneidet. Bezüglich der Intensitätsabsenkung (V2.1.1 bis V2.1.4) können gemäß Bild 7.33 keine statistisch relevanten Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen nachgewiesen werden. Hinsichtlich eines Intensitätssprungs in positiver Richtung führt dieser bei einem Faktor von  $\phi = 1,60$  bei der Paarung V2.1.8-V2.1.5 ( $z = 5,750$ ,  $p = 0,032$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,05$ ) und bei der Paarung V2.1.12-V2.1.9 ( $z = 5,950$ ,  $p = 0,019$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,09$ ) zu einer signifikant geringeren Stelldifferenz als bei einem Stufensprung mit  $\phi = 1,12$ .

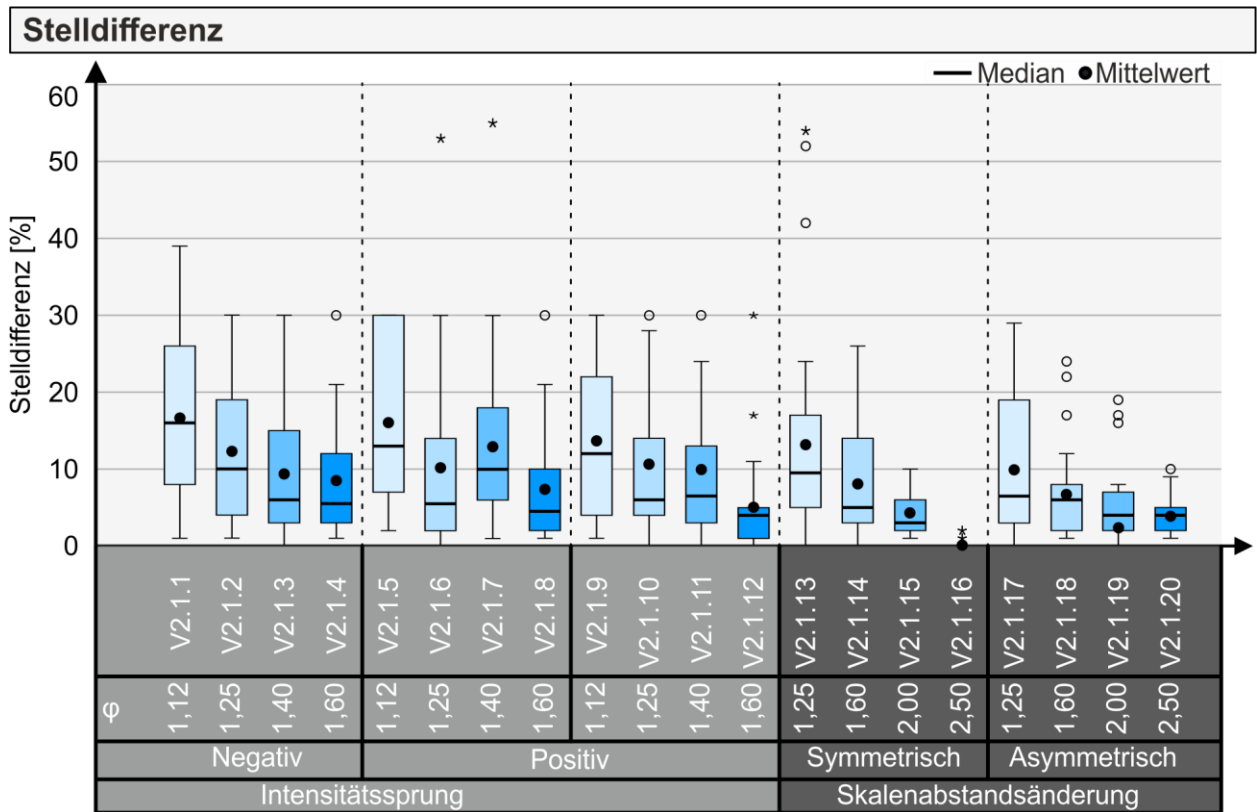


Bild 7.32: Stellendifferenz der Nebenaufgabe VR02

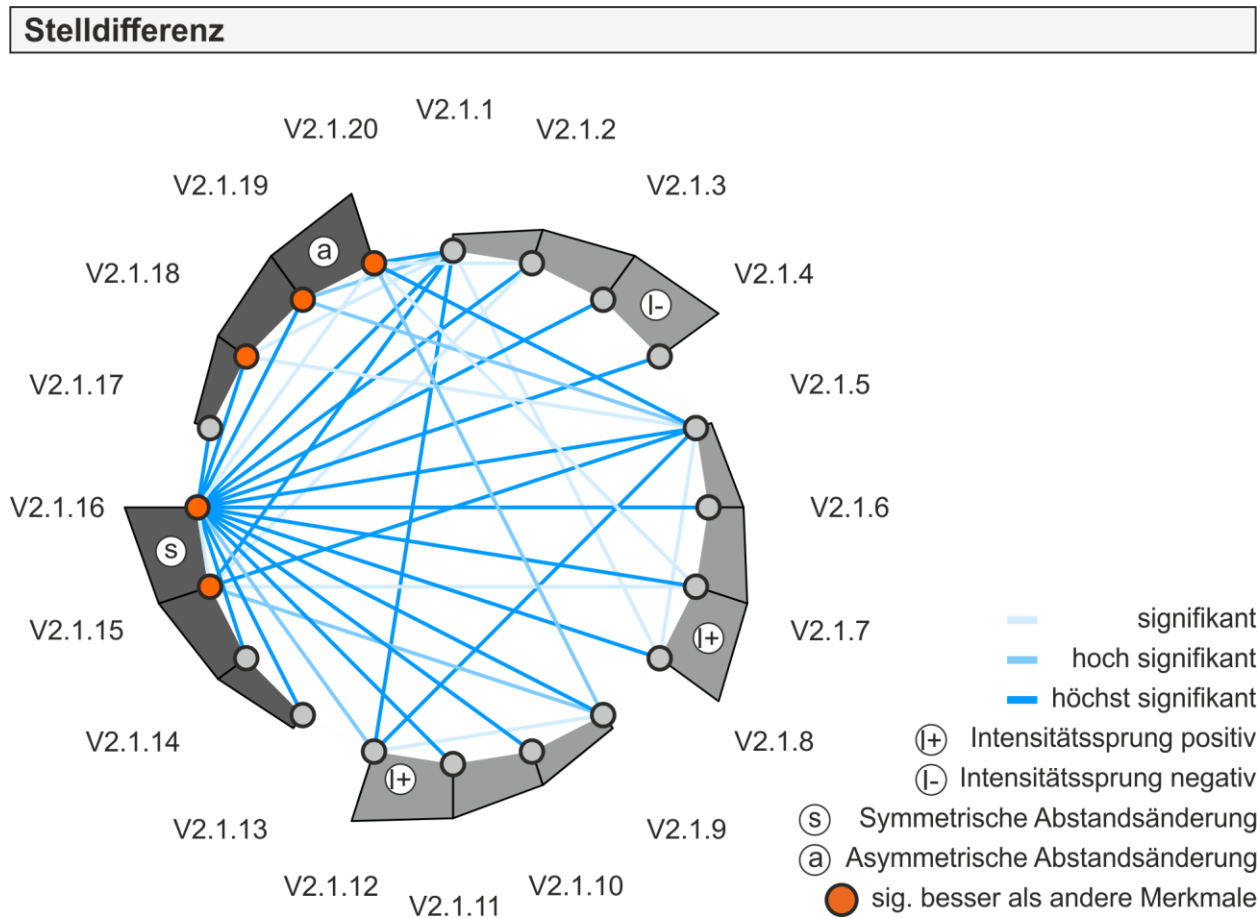
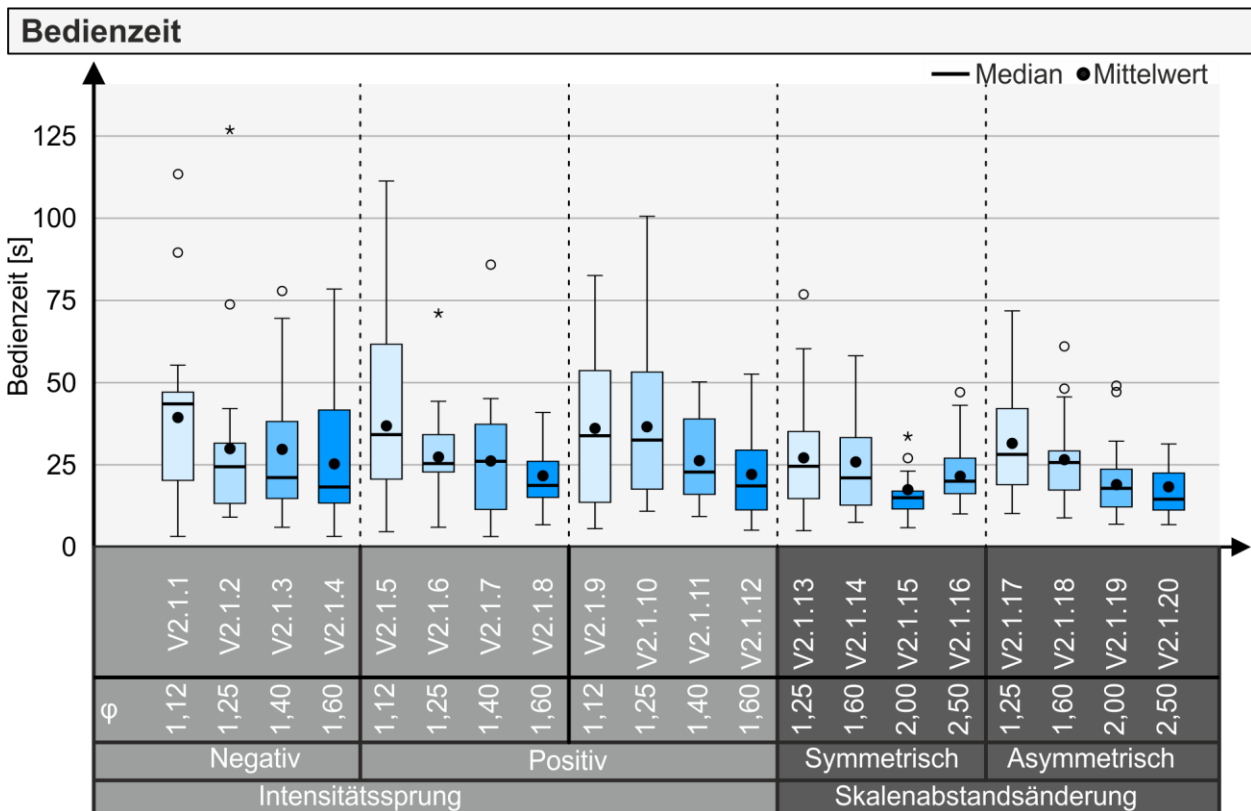


Bild 7.33: Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Stellendifferenz VR02

Das Box-Plot-Diagramm in Bild 7.34 zeigt die Bedienzeit, welche zur Erfüllung der Stellaufgabe gebraucht wird. Dabei umfasst die Bedienzeit, die Zeitdauer von der ersten Bewegung des Sliders bis hin zur Speicherung der Endposition. An den Box-Plots ist zu erkennen, dass die Bedienzeit mit zunehmender Ausprägung des Merkmals, sei es ein Intensitätssprung oder eine sprunghafte Änderung des Skalenabstands, geringer ausfällt. Eine Ausnahme bildet dabei das Versuchsmerkmal V2.1.16. Hier ist im Vergleich zu V2.1.15 ein Anstieg der Bedienzeit zu verzeichnen. Die geringste Bedienzeit wird mit Versuchsmerkmal V2.1.15 ( $\bar{\varnothing} = 17,43$  s) erreicht. Indessen liegt die längste Bedienzeit bei Versuchsmerkmal V2.1.1 ( $\bar{\varnothing} = 39,39$  s). Die Messwerte der Bedienzeit streuen dabei von 3,14 s (V2.1.7) bis 126,67 s (V2.1.2).

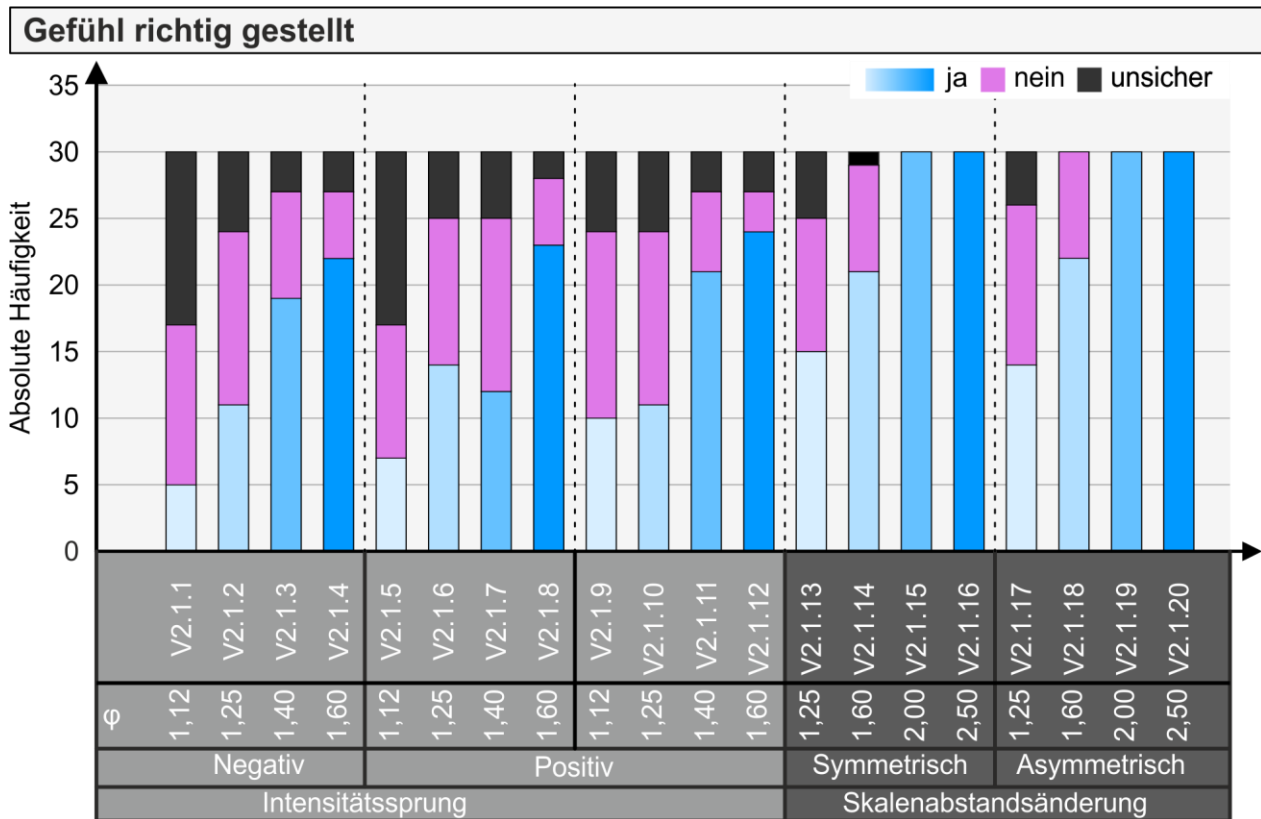


**Bild 7.34:** Bedienzeit der Nebenaufgabe VR02

Die Auswertung der statistisch relevanten Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen erfolgt nach einer negierten Normalverteilungsprüfung nach Kolmogorov-Smirnov (siehe Tabelle A.4.5) mittels eines Friedman-Tests mit anschließendem Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni. Der Chi-Quadrat-Test ( $\text{Chi-Quadrat}(19) = 62,805$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 22$ ) zeigt, dass hinsichtlich der Bedienzeiten signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Versuchsmerkmalen vorliegen. In Summe liegen acht verschiedene Paarungen an Versuchsmerkmalen vor, zwischen denen statistisch relevante Unterschiede bestehen (vgl. Bild 7.35 sowie Tabelle A.4.6). Anhand Bild 7.34 und





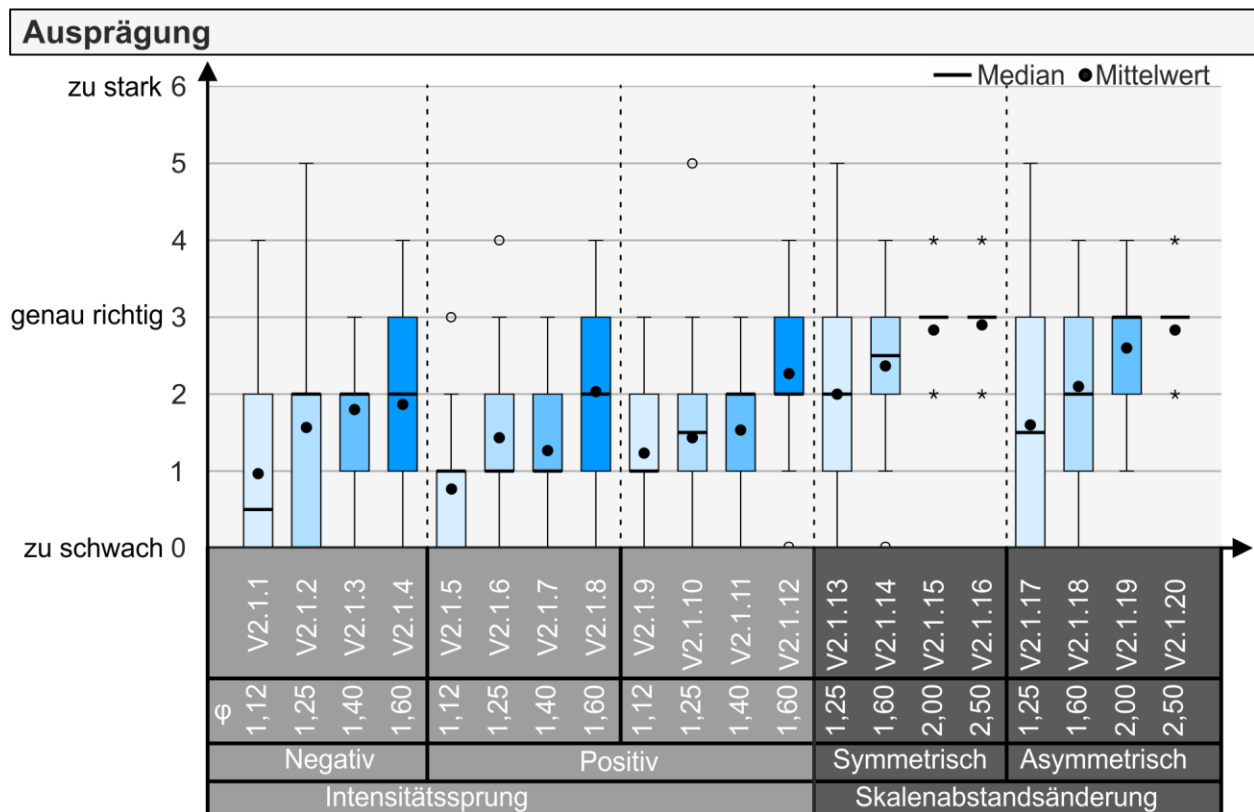


**Bild 7.36:** Subjektive Beurteilung, die Stellaufgabe korrekt ausgeführt zu haben VR02

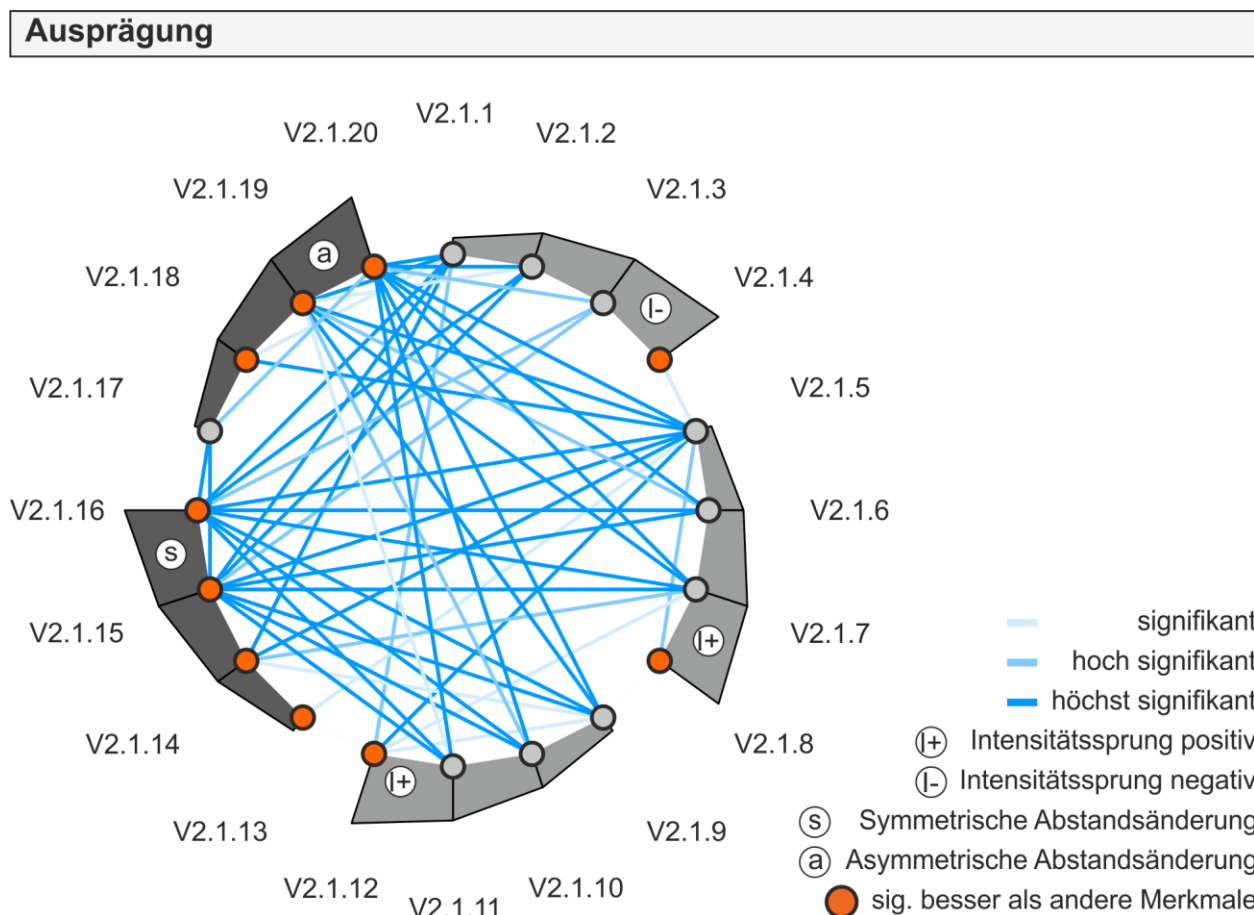
Die Bewertung der Ausprägung des taktilen Feedbacks ist in Bild 7.37 zu sehen. Allgemein ergibt sich die Tendenz, dass die Bewertung der Feedbackausprägung mit zunehmendem Unterschied des Intensitätssprungs bzw. mit zunehmender Änderung des Skalenabstands besser ausfällt. Die Ausprägung wird von Kodierungsmerkmal V2.1.16 ( $\bar{x} = 2,90$ ) als am besten beschrieben, gefolgt von V2.1.15 und V2.1.20 ( $\bar{x} = 2,83$ ) sowie V2.1.19 ( $\bar{x} = 2,60$ ). Allgemein wird die Ausprägung der untersuchten taktilen Merkmale als tendenziell eher „zu schwach“ beschrieben. Tendenziell bewerten anhand Bild 7.37 nur wenige Probanden die Ausprägung des taktilen Merkmals als „zu stark“.

Da eine Normalverteilung der Daten negiert werden kann (vgl. Tabelle A.4.7 im Anhang A.4), erfolgt ein Friedman-Test ( $\chi^2(19) = 214,735$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ) mit anschließendem Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni. Die Paarungen mit statistisch signifikanten Unterschieden sind im Anhang A.4 in Tabelle A.4.8 zu finden. Die Versuchsmerkmale V2.1.14 bis V2.1.16 und V2.1.18 bis V2.1.20 werden dabei signifikant, hoch und höchst signifikant besser bewertet im Vergleich zu denen mit einer Intensitätsabsenkung (vgl. Bild 7.38 bspw. V2.1.1-V2.1.15 ( $z = -10,000$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,83$ )) oder einem Intensitätssprung (vgl. Bild 7.38 bspw. V2.1.5-V2.1.15 ( $z = -11,133$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ,  $r = 2,03$ )).



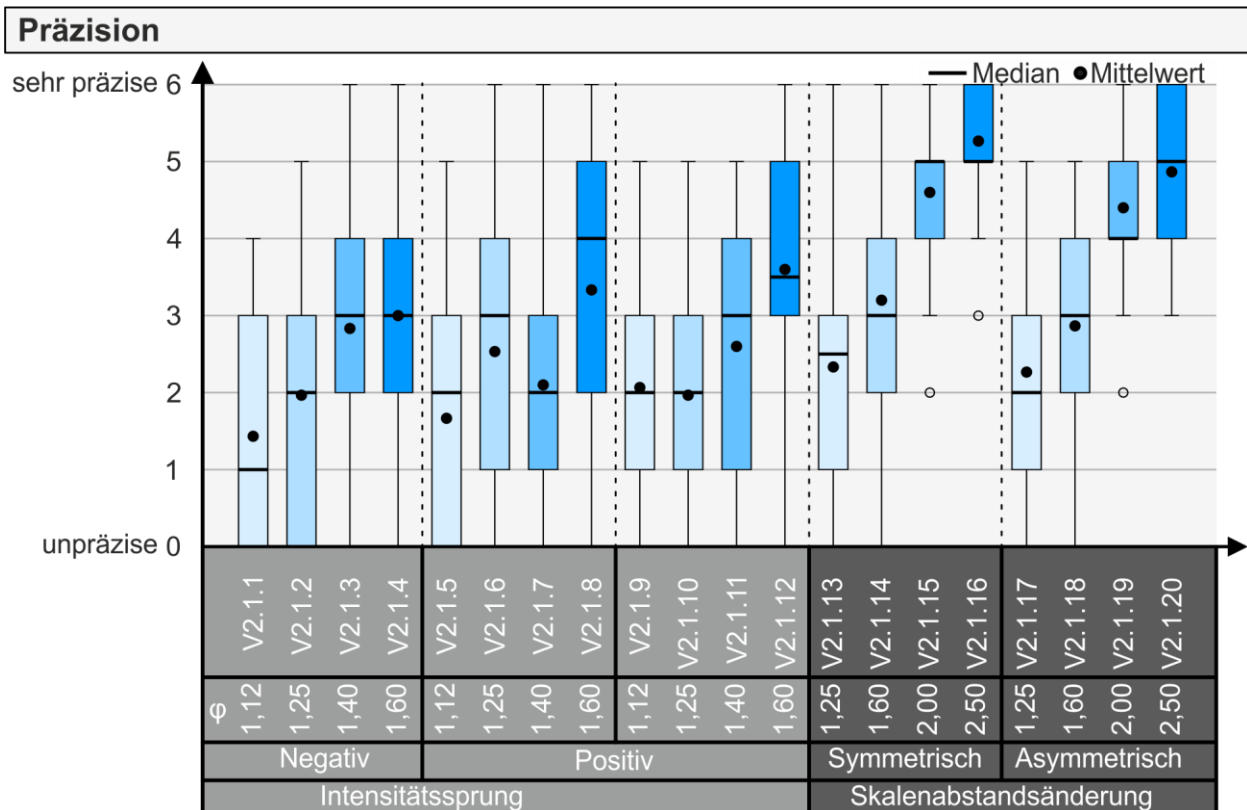


**Bild 7.37:** Bewertung der Ausprägung des taktilen Merkmals VR02



**Bild 7.38:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Ausprägung VR02

Die Bewertung der Präzision des taktilen Feedbacks ist in Bild 7.39 dargestellt. Erkennbar ist die Tendenz, dass die Präzision mit zunehmender Ausprägung des Unterschieds besser bewertet wird. Ebenfalls ist erkennbar, dass die Präzision hinsichtlich der Änderung des Skalenabstands als präziser beschrieben wird im Vergleich zu einer Intensitätsabsenkung oder einem Intensitätssprung. Nach Bild 7.39 schneidet Kodierungsmerkmal V2.1.16 hinsichtlich der Bewertung der Präzision am besten ab ( $\bar{x} = 5,27$ ), gefolgt von den Kodierungsmerkmalen V2.1.20 ( $\bar{x} = 4,87$ ) und V2.1.15 ( $\bar{x} = 4,60$ ).

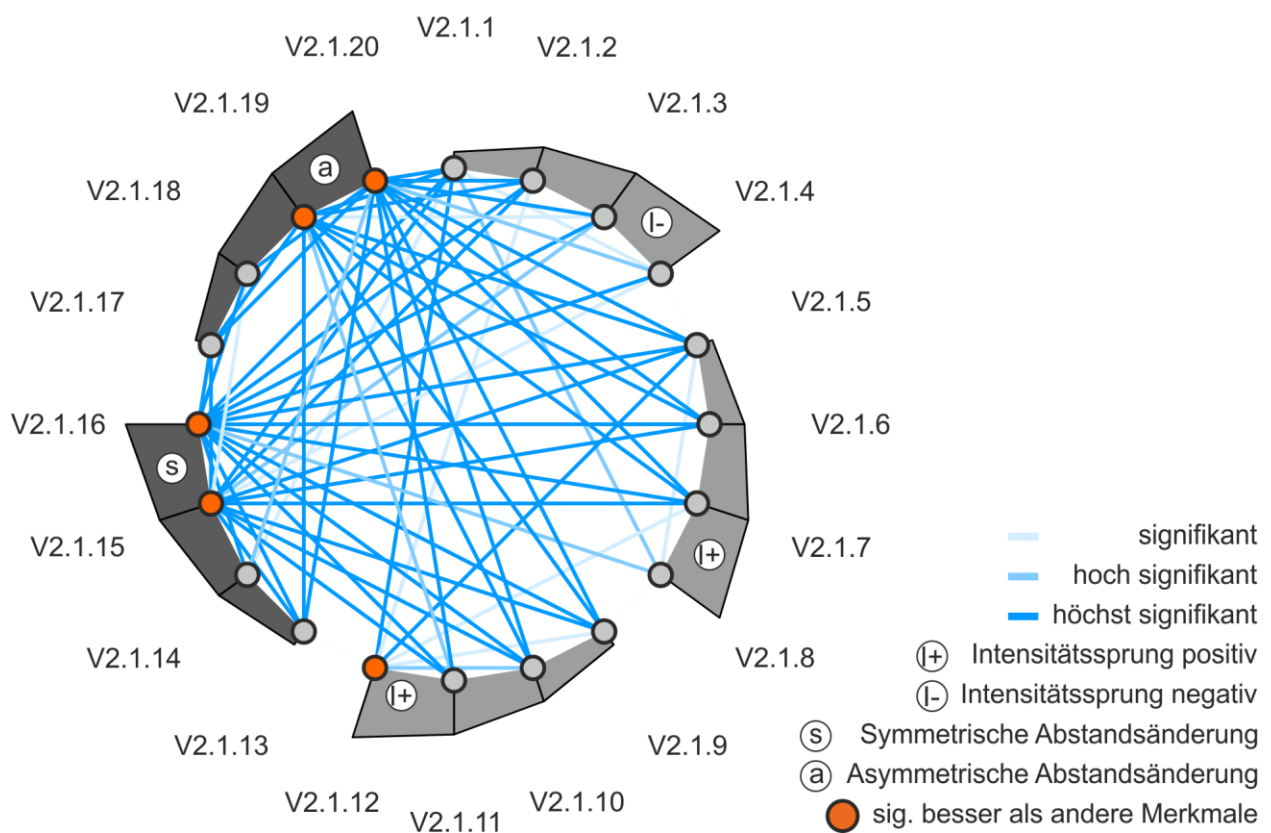


**Bild 7.39:** Bewertung der Präzision des taktilen Merkmals VR02

Da keine Normalverteilung der Daten vorliegt (vgl. Tabelle A.4.9 in Anhang A.4), kommt zur Überprüfung hinsichtlich statistisch relevanter Unterschiede ein Friedman-Test (Chi-Quadrat (19) = 270,061,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ) zur Anwendung. Anhand eines Post-hoc-Tests nach Dunn-Bonferroni sind statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen vorhanden (siehe Tabelle A.4.10). Bild 7.40 gibt einen Überblick über die statistisch interessanten Kombinationen. Dabei kann eine Häufung signifikanter, hoch und höchst signifikanter Unterschiede bei den Versuchsmerkmalen V2.1.15, V2.1.16, V2.1.19 und V2.1.20 festgestellt werden. Diese Versuchsmerkmale unterscheiden sich dabei in der Gestalt, dass diese als signifikant präziser eingestuft werden im Vergleich zu einer Intensitätsabsenkung (vgl. Bild 7.40 bspw. V2.1.1-V2.1.15 ( $z = -11,400$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ,  $r = 2,08$ ) oder einem Intensitätssprung (vgl. Bild 7.40

bspw. V2.1.5-V2.1.15 ( $z = -10,533$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,92$ ). Hinsichtlich der Kodierung über einen Intensitätssprung treten signifikante, hoch und höchst signifikante Unterschiede bei den Versuchsmerkmalen V2.1.4, V2.1.8 und V2.1.12 auf. Bei diesen Versuchsmerkmalen liegt jeweils eine sprunghafte Intensitätsänderung um den Faktor  $\varphi = 1,60$  vor. Eine Änderung um diesen Faktor wird hinsichtlich der sprunghaften Intensitätsänderung um Faktor  $\varphi = 1,12$  als signifikant präziser bewertet. Jedoch schneiden diese Versuchsmerkmale im Vergleich zu einer Skalenabstandsänderung statistisch signifikant schlechter ab.

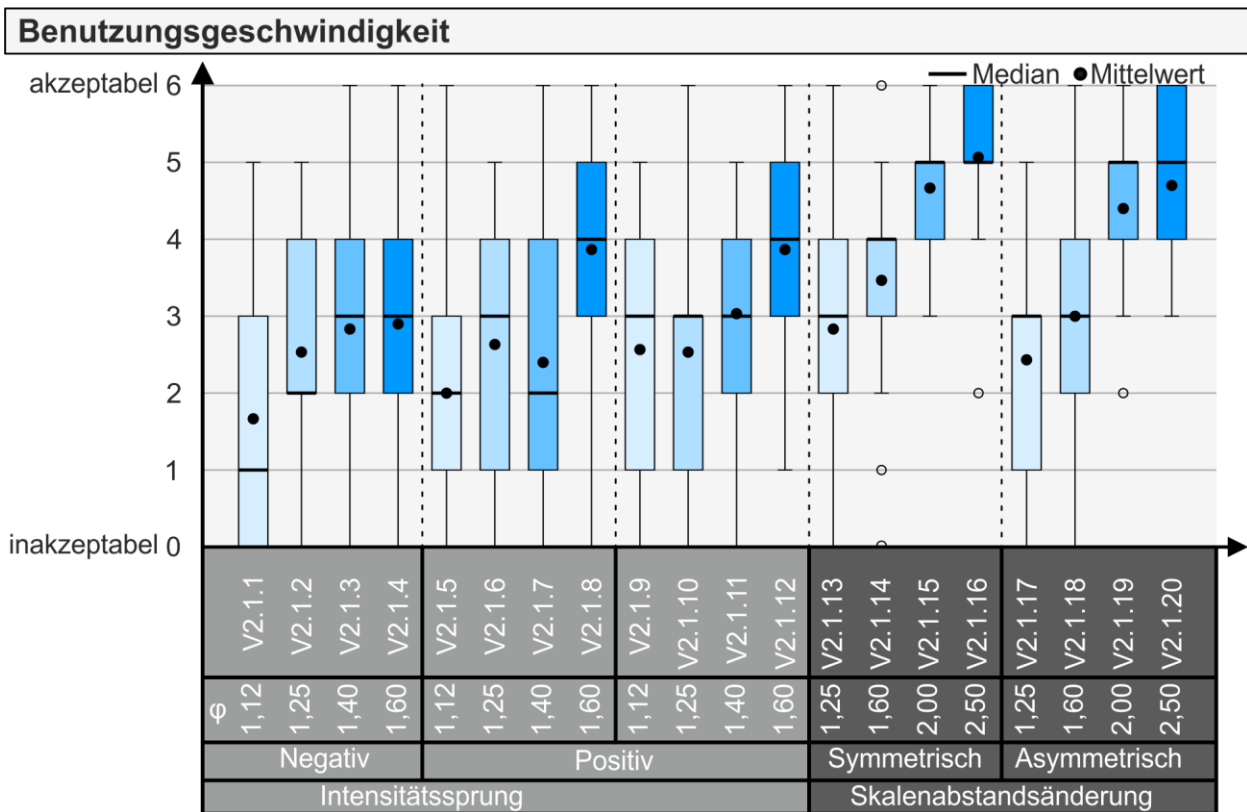
### Präzision



**Bild 7.40:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Präzision VR02

Die Einschätzung der Benutzungsgeschwindigkeit ist in Bild 7.41 zu sehen. Die Benutzungsgeschwindigkeit wird tendenziell mit einem stärker ausgeprägten Unterschied des Intensitätssprungs oder einem größeren Unterschied der Skalenabstandsänderung besser bewertet. Eine Ausnahme bildet hier allerdings das Versuchsmerkmal V2.1.7. Anhand Bild 7.41 ist ebenfalls zu erkennen, dass die Versuchsmerkmale V2.1.8 und V2.1.12 besser bewertet werden als die vergleichbaren Versuchsmerkmale V2.1.5 bis V2.1.7 bzw. V2.1.9 bis V2.1.11. Ebenfalls schneidet ein positiver Intensitätssprung tendenziell besser ab als ein negativer Intensitätssprung (vgl. Bild 7.41). Anhand der

deskriptiven Auswertung ist erkennbar, dass eine Änderung des Skalenabstands hinsichtlich der Benutzungsgeschwindigkeit tendenziell besser bewertet wird als ein Intensitätssprung. Die beste Bewertung erfährt dabei Versuchsmerkmal V2.1.16 ( $\bar{x} = 5,07$ ) vor V2.1.20 ( $\bar{x} = 4,70$ ) und V2.1.15 ( $\bar{x} = 4,67$ ).

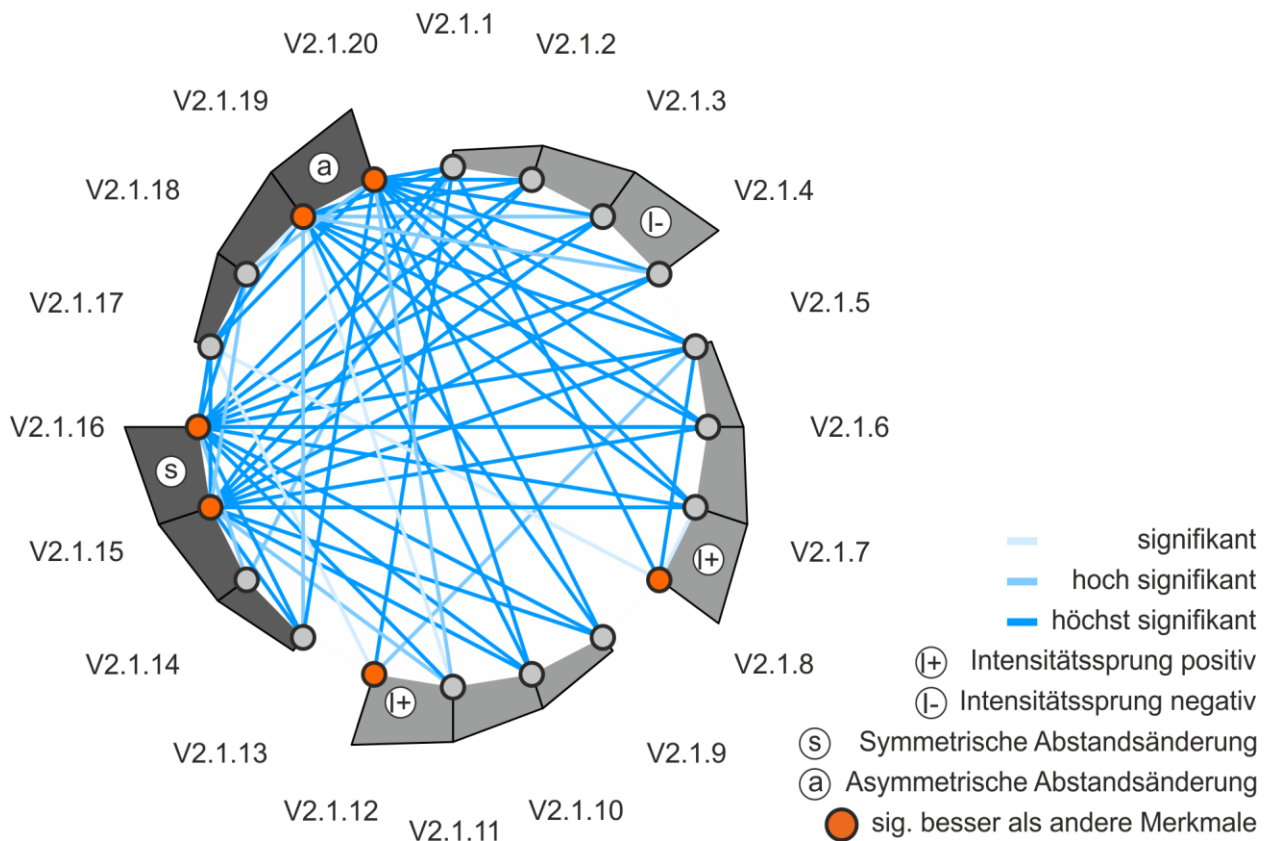


**Bild 7.41:** Bewertung der Benutzungsgeschwindigkeit VR02

Die Ergebnisse bezüglich einer Normalverteilung der Daten finden sich in Tabelle A.4.11. Da diese nicht bestätigt werden kann, wird zur weiteren Prüfung ein Friedman-Test (Chi-Quadrat (19) = 241,239,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ) mit anschließendem Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung konnten zwischen den Versuchsmerkmalen statistisch relevante Differenzen gefunden werden (vgl. Tabelle A.4.12 in Anhang A.4). Bild 7.42 gibt einen graphischen Überblick über die signifikanten Merkmalspaare. In Bild 7.42 ist erneut eine Häufung signifikanter, hoch und höchst signifikanter Unterschiede bei den Versuchsmerkmalen V2.1.15, V2.1.16, V2.1.19 und V2.1.20 zu erkennen. Diese schneiden hinsichtlich des paarweisen Vergleichs stets signifikant besser ab. Ebenfalls können zwei höchst signifikante Unterschiede bei den Versuchsmerkmalspaaren V2.1.1-V2.1.8 und V2.1.5-V2.1.8 sowie ein signifikanter Unterschied bei der Paarung V2.1.7-V2.1.8 identifiziert werden (vgl. Tabelle A.4.12). Dies lässt sich auch für die Versuchsmerkmalspaare V2.1.1-V2.1.12 und V2.1.5-V2.1.12 bestätigen. Folglich führt ein positiver Intensitätssprung um Faktor  $\phi = 1,60$  zu einer

statistisch relevant besseren Bewertung der Benutzungsgeschwindigkeit im Vergleich zu den Intensitätssprüngen um Faktor  $\varphi = 1,12$ . Am besten wird die Benutzungsgeschwindigkeit jedoch mit einer symmetrischen Änderung des Skalenabstands bewertet.

### Benutzungsgeschwindigkeit

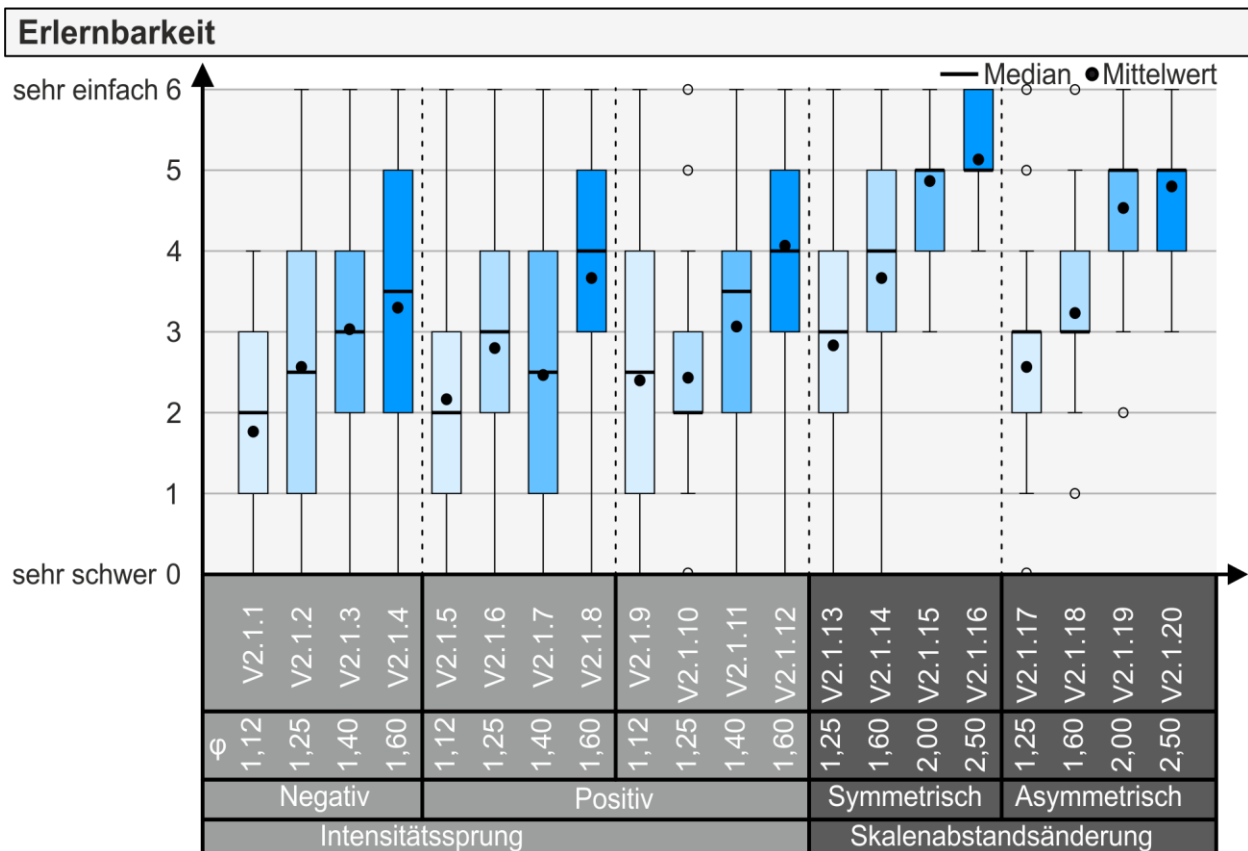


**Bild 7.42:** Paarweise Vergleiche statistischer Zusammenhänge Benutzungsgeschwindigkeit VR02

Bild 7.43 zeigt die Bewertung der Erlernbarkeit des taktilen Feedbacks. Die Bewertung fällt mit zunehmender Ausprägung des Unterschieds tendenziell besser aus. Unterbrochen wird dieser Verlauf lediglich durch die Versuchsmerkmale V2.1.7 und V2.1.10. Am besten wird die Erlernbarkeit bei Versuchsmerkmal V 2.1.16 ( $\bar{\varnothing} = 5,13$ ) gefolgt von V2.1.20 ( $\bar{\varnothing} = 4,87$ ) und V2.1.15 ( $\bar{\varnothing} = 4,80$ ) bewertet. Diese wird von der Mehrheit der Probanden als nahezu „sehr einfach“ klassifiziert. Die durchschnittlich schlechteste Bewertung der Erlernbarkeit erzielt Versuchsmerkmal V2.1.1 ( $\bar{\varnothing} = 1,77$ ). Gemäß der Bewertung der Probanden tendieren diese dazu, dass eine Kodierung über dieses Merkmal als nahezu „sehr schwer“ erlernbar ist.

Im Rahmen einer detaillierteren Untersuchung wird weiterführend eine Prüfung auf Normalverteilung durchgeführt. Diese kann anhand der Tabelle A.4.13 negiert werden,

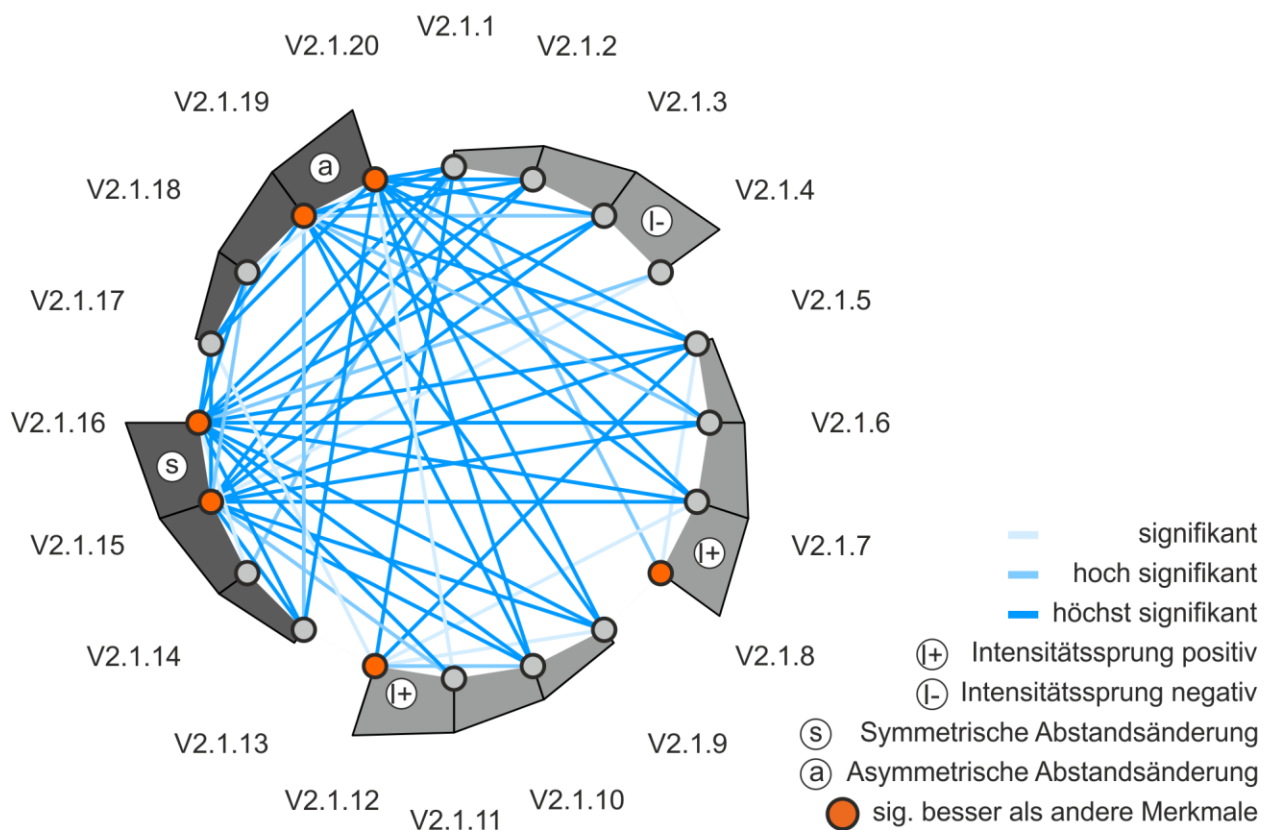
weshalb ein Friedman-Test ( $\chi^2(19) = 231,122, p < 0,001, n = 30$ ) herangezogen wird. Auf Basis dessen erfolgt ein paarweiser Vergleich mit einem Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni. Die detaillierte Teststatistik kann Tabelle A.4.14 entnommen werden. Bild 7.44 gibt einen graphischen Überblick über die statistisch relevanten Versuchsmerkmalspaare. Bezüglich der Erlernbarkeit zeigt sich ebenfalls eine Häufung signifikanter, hoch und höchst signifikanter Unterschiede bei den Versuchsmerkmalen V2.1.15, V2.1.16, V2.1.19 und V2.1.20. Die Erlernbarkeit dieser Versuchsmerkmale wird signifikant besser bewertet. Die Erlernbarkeit von Versuchsmerkmal V2.1.12 wird signifikant besser als V2.1.9 und V2.1.7, hoch signifikant besser als V2.1.10 und höchst signifikant besser als V2.1.1 und V2.1.5 bewertet (vgl. Tabelle A.4.14 und Bild 7.44). Selbiges lässt sich auch bei Versuchsmerkmal V2.1.8 erkennen. Dieses Versuchsmerkmal wird signifikant besser als V2.1.5 ( $V2.1.5-V2.1.8 z = -5,650, p = 0,041, n = 30, r = 1,03$ ) und hoch signifikant besser als V2.1.1 ( $V2.1.1-V2.1.8 z = -6,700, p = 0,002, n = 30, r = 1,22$ ) bewertet. Hinsichtlich der Erlernbarkeit eines negativen Intensitätssprungs können inferenzstatistisch keine Unterschiede zwischen den Versuchsmerkmalen nachgewiesen werden.



**Bild 7.43:** Bewertung der Erlernbarkeit VR02



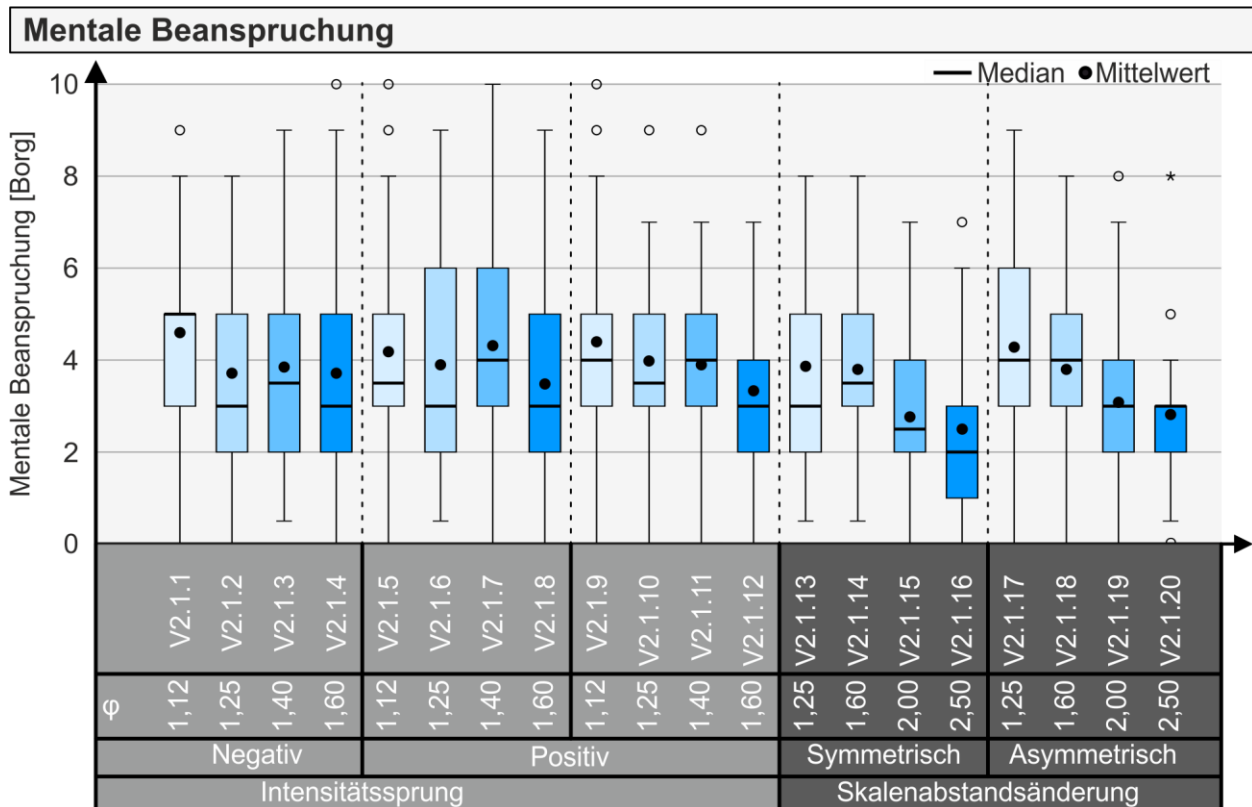
## Erlernbarkeit



**Bild 7.44:** Statistisch relevante Zusammenhänge Erlernbarkeit VR02

Die Bewertung der mentalen Beanspruchung ist in Bild 7.45 zu sehen. Tendenziell ist anhand der deskriptiven Analyse erkennbar, dass die mentale Beanspruchung der Probanden mit einer größeren Änderung im Skalenabstand geringer eingestuft wird. Ebenfalls ist erkennbar, dass die mentale Beanspruchung bei einer symmetrischen Änderung des Skalenabstands im Mittel geringer bewertet wird. Die geringste mentale Beanspruchung geht dabei von Versuchsmerkmal V2.1.16 ( $\bar{\varnothing} = 2,50$ ) aus. Bei diesem Versuchsmerkmal geben 50 % der Probanden an maximal einer schwachen Beanspruchung ausgesetzt zu sein. Im Hinblick auf eine Änderung des Skalenabstands wird Versuchsmerkmal V2.1.17 ( $\bar{\varnothing} = 4,28$ ) am schlechtesten bewertet.

Hinsichtlich der Versuchsmerkmale V2.1.1 bis V2.1.12 schwanken die Bewertungen mit zunehmendem Skalierungsfaktor des Intensitätssprungs. Bezüglich der Versuchsmerkmale mit einem positiven Intensitätssprung von  $\varphi = 1,60$  (V2.1.8 und V2.1.12) wird die mentale Beanspruchung bei diesen Versuchsmerkmalen geringer eingestuft als bei einem geringeren Stufensprung (vgl. bspw.  $\varphi = 1,40$  oder  $\varphi = 1,25$ ). Die stärkste mentale Beanspruchung übt Versuchsmerkmal V2.1.1 ( $\bar{\varnothing} = 4,60$ ) auf die Probanden aus. Die geringste mentale Beanspruchung erzeugt innerhalb dieser Gruppe V2.1.12 ( $\bar{\varnothing} = 3,33$ ).

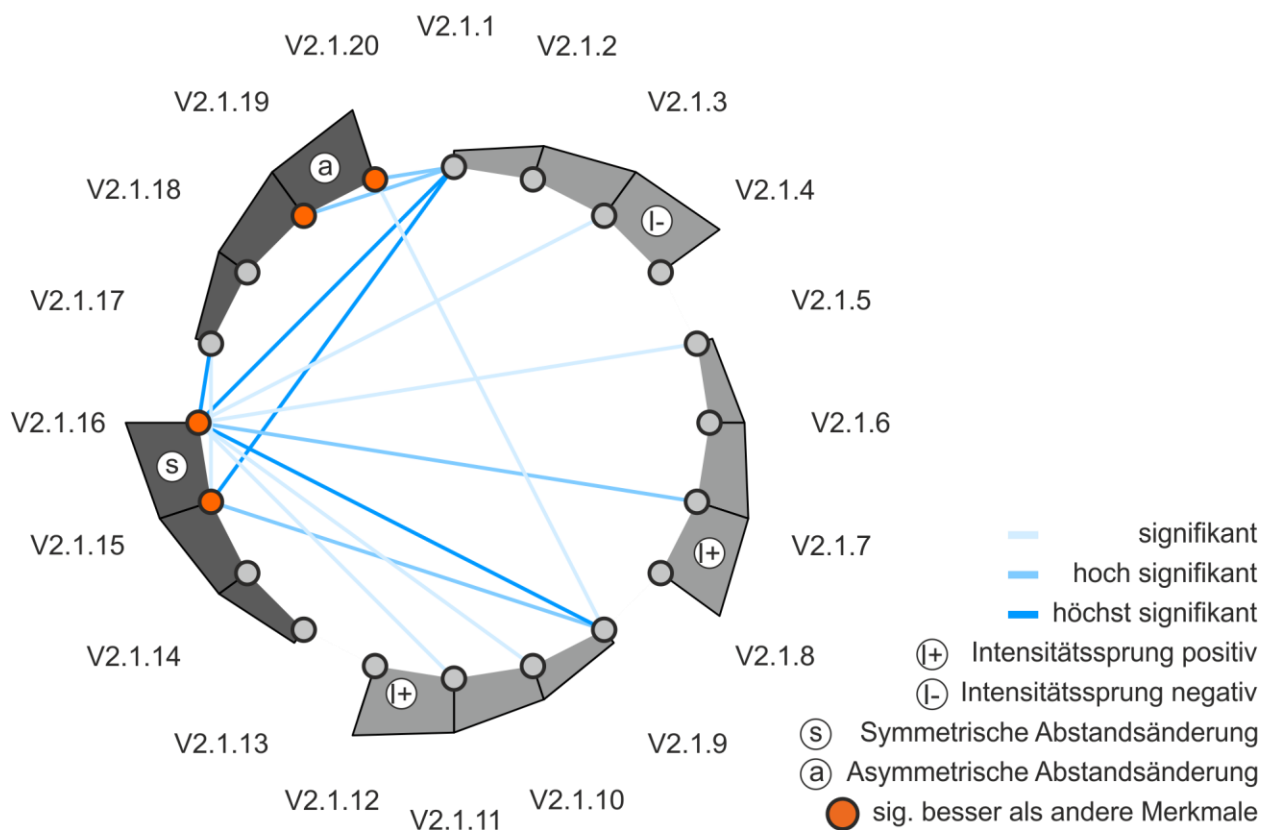


**Bild 7.45:** Bewertung der mentalen Beanspruchung VR02

Da eine Normalverteilung gemäß einem Kolmogorov-Smirnov-Test verworfen werden kann (vgl. Tabelle A.4.15 in Anhang A.4), erfolgt die Unterschiedsprüfung zwischen den Versuchsmerkmalen mittels eines Friedman-Tests (Chi-Quadrat (19) = 90,911,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ). Zur weiteren Lokalisierung der statistisch relevanten Unterschiede werden Post-hoc-Tests nach Dunn-Bonferroni durchgeführt. Die genauen Testergebnisse sind in Tabelle A.4.16 im Anhang A.4 aufgelistet. Bild 7.46 verschafft einen graphischen Überblick über die statistisch relevanten Testpaare. Statistisch relevante Unterschiede sind bei den Versuchsmerkmalen V2.1.15, V2.1.16, V2.1.19 und V2.1.20 zu finden. Diese treten dabei meist zwischen Intensitätssprüngen und Skalenabstandsänderungen auf (vgl. Bild 7.46 bspw. V2.1.16-V2.1.1 (z = 8,367,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,53$ ). Versuchsmerkmal V2.1.16 erfährt dabei eine stets signifikant, hoch und höchst signifikant geringere mentale Beanspruchung innerhalb der Paarung (vgl. Bild 7.46 und Tabelle A.4.16). Aber auch zwischen einer symmetrischen und asymmetrischen Skalenabstandsänderung treten signifikante Unterschiede auf. Versuchsmerkmal V2.1.17 übt hinsichtlich V2.1.15 eine signifikant (V2.1.15-V2.1.17 (z = -6,083,  $p = 0,013$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,11$ )) und gegenüber V2.1.16 (V2.1.16-V2.1.17 (z = -7,283,  $p < 0,001$ ,  $n = 30$ ,  $r = 1,33$ )) eine höchst signifikant höhere mentale Beanspruchung auf die Probanden aus.



### Mentale Beanspruchung



**Bild 7.46:** Statistisch relevante Zusammenhänge mentale Beanspruchung VR02

### 7.2.6 Diskussion der Ergebnisse und Überprüfung der Hypothesen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe zusammengefasst und das für die abschließende Untersuchung am besten geeignete Kodierungsmerkmal eingegrenzt und ausgewählt. Die Daten des jeweiligen Bewertungskriteriums der deskriptiven Statistik werden analog zur ersten Versuchsreihe aufgearbeitet und die Mittelwerte der Bewertungskriterien in normierten Netzdiagrammen dargestellt. Die Netzdiagramme werden dabei wieder hinsichtlich der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit (siehe Tabelle 7.13 und 7.14) des taktilen Feedbacks gegliedert. Die Normierung der Daten erfolgt im Bereich von 0 bis 1, wobei 0 jeweils dem unzureichenden Ergebnis und 1 jeweils dem optimal möglichen Ergebnis der Bewertung eines jeden Kriteriums zugeordnet wird.

Durch die zusammenfassende Darstellung in Tabelle 7.13 und 7.14 ist ersichtlich, dass gesamt betrachtet die Stellaufgabe sowohl mit einer zunehmenden Intensität als auch durch einen zunehmenden Skalenabstand besser ausgeführt wird. Im Folgenden erfolgt eine detailliertere Betrachtung hinsichtlich der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit.

Durch die Normierung der Daten und Verbindung der einzelnen Mittelwerte der Versuchsmerkmale entsteht analog zu Versuchsreihe VR01 in Tabelle 7.13 und 7.14 über alle Bewertungskategorien hinweg eine schiffschraubenartige Kurve. Diese verläuft meist ansteigend analog zum zunehmenden Faktor  $\varphi$  des Stufensprungs (vgl. bspw. Stelldifferenz V2.1.13 bis V2.1.16). Im Unterschied zu VR01 ist der Verlauf jedoch nicht homogen ausgeprägt. Ausnahmen bilden dabei vor allem die Kodierungsmerkmale mit einem Intensitätssprung wie beispielsweise bei der Stelldifferenz V2.1.5 bis V2.1.8. Durch die zusammenfassende Darstellung in Tabelle 7.13 und 7.14 ist ersichtlich, dass gesamt betrachtet die Kodierung einer taktilen Skala über eine Änderung im Skalenabstand zu besseren Ergebnissen hinsichtlich der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit führt.

Hinsichtlich der Effektivität (vgl. Tabelle 7.13) kann Folgendes zusammengefasst werden:

- Die Fehleranzahl ist bei der Kodierung über eine Änderung des Skalenabstands am geringsten. Allerdings muss diese bei einer symmetrischen Änderung mindestens den Faktor  $\varphi = 2$  und bei einer asymmetrischen Änderung den Faktor  $\varphi = 1,60$  betragen (vgl. V2.1.15 bzw. V2.1.18).
- Die Fehleranzahl sinkt mit zunehmendem Intensitätssprung. Die Reduktion ist aber schwächer ausgeprägt als bei einer Änderung des Skalenabstands.
- Die Aufgabe wird mit zunehmender Ausprägung des Intensitätssprungs oder Änderung des Skalenabstands besser erfüllt.
- Ebenfalls resultiert bei einem positiven Intensitätssprung eine bessere Aufgabenerfüllung der Stellaufgabe als bei einem negativen Intensitätssprung.
- Die Stelldifferenz nimmt mit zunehmender Ausprägung des Intensitätssprungs bzw. einer Änderung des Skalenabstands ab und ist bei einer Änderung des Skalenabstands geringer.
- Die Stelldifferenz ist bei einem symmetrischen Skalenabstand (V2.1.13 oder V2.1.14) höher als bei einer asymmetrischen Änderung des Skalenabstands (V2.1.17 oder V2.1.18).

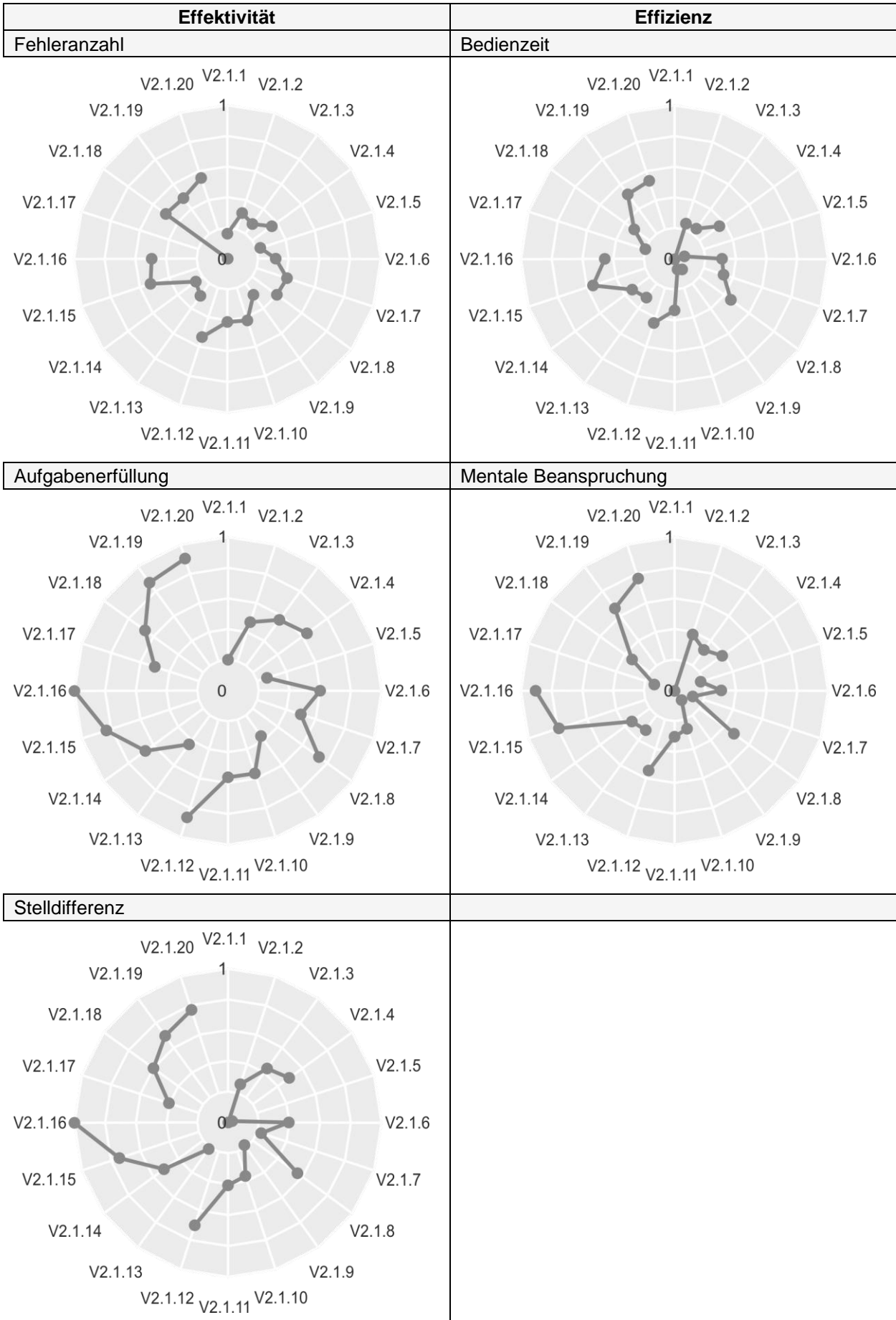
Die Effizienz (vgl. Tabelle 7.13) betreffend lassen sich folgende Aussagen generieren:

- Die Bedienzeit fällt mit zunehmendem Intensitätssprung und zunehmender Änderung des Skalenabstands.
- Bei der Änderung des Skalenabstands resultiert eine durchschnittlich geringere Bedienzeit als bei einem Intensitätssprung.

- Die mentale Beanspruchung verringert sich bei einem zunehmenden Intensitätssprung nur geringfügig und sinkt bei zunehmender Änderung des Skalenabstands am stärksten.

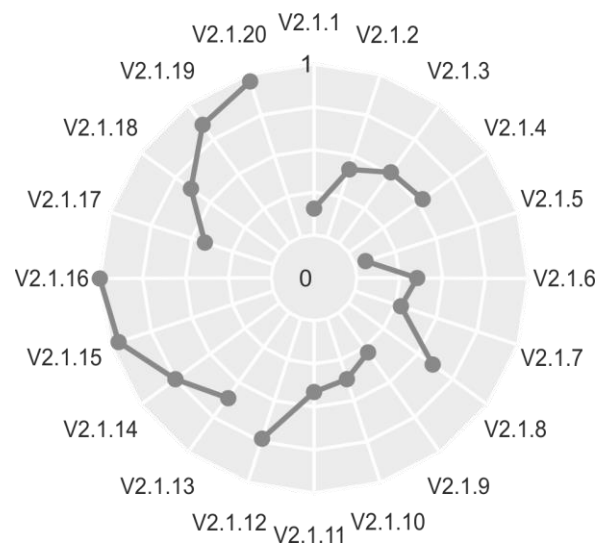
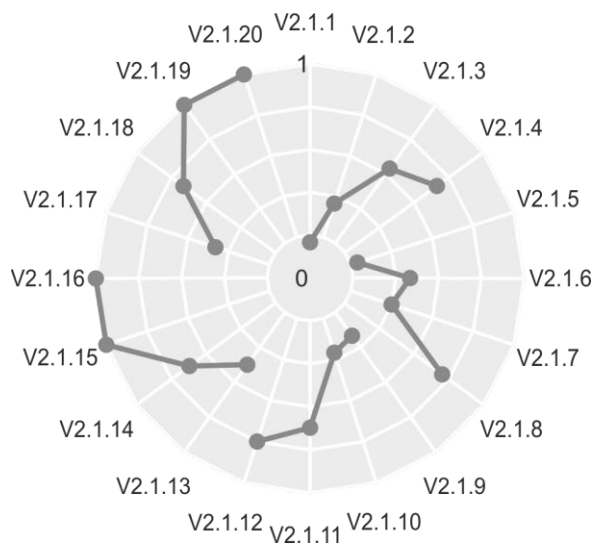
Zusammenfassend ergibt sich für die Zufriedenheit (vgl. Tabelle 7.14):

- Das Gefühl richtig gestellt zu haben ist bei einer Änderung des Skalenabstands stärker als bei einem Intensitätssprung. Dabei ist kein merklicher Unterschied zwischen einem symmetrischen und asymmetrischen Verlauf erkennbar. Es resultiert eine Zunahme der Bediensicherheit mit zunehmender Amplitude des Intensitätssprungs.
- Im Hinblick auf die Ausprägung wird eine Änderung im Skalenabstand besser bewertet als eine sprunghafte Intensitätsänderung. Eine symmetrische Änderung des Skalenabstands ist besser geeignet als eine asymmetrische Änderung. Mit zunehmendem Intensitätssprung und zunehmender Änderung im Skalenabstand wird die Ausprägung besser bewertet. Die Bewertungskurve ähnelt stark derer des Gefühls, richtig gestellt zu haben.
- Die Bewertung der Präzision verbessert sich mit zunehmendem Intensitätssprung und zunehmendem Sprung im Skalenabstand. Eine symmetrische Skalenabstandsänderung wird etwas besser bewertet als eine asymmetrische Änderung des Skalenabstands. Die Kodierung über die Änderung des Skalenabstands wird als präziser eingestuft als eine sprunghafte Änderung der Feedbackintensität.
- Selbiges ist auch bei der Bewertung der Benutzungsgeschwindigkeit und der Erlernbarkeit beobachtbar. Die Benutzungsgeschwindigkeit als auch Erlernbarkeit werden mit zunehmendem Intensitätssprung besser bewertet. Die Benutzungsgeschwindigkeit als auch die Erlernbarkeit werden bei einer Kodierung über eine Änderung im Skalenverlauf besser bewertet.

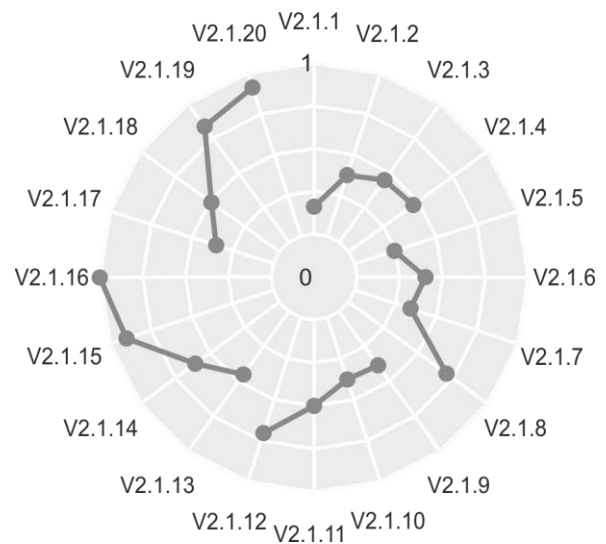
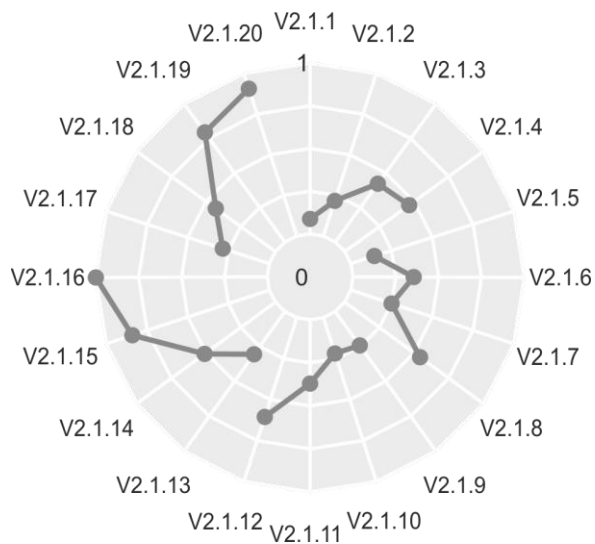


**Tabelle 7.13:** Zusammenfassung normierte Mittelwerte VR02 (Effektivität & Effizienz)

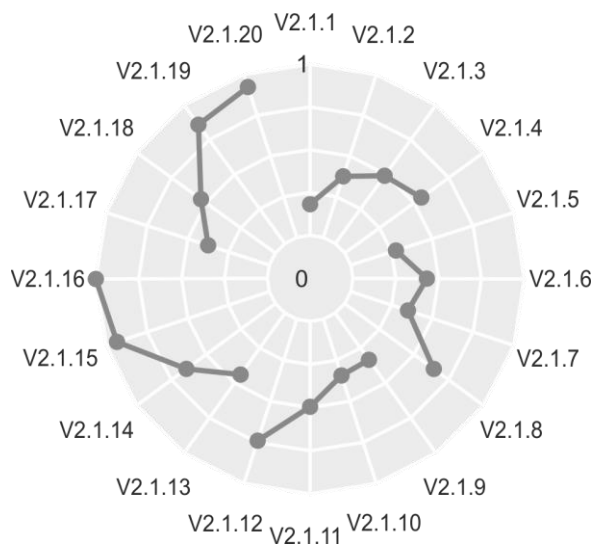
Zufriedenheit	
Gefühl richtig gestellt	Ausprägung



Präzision	Benutzungsgeschwindigkeit
-----------	---------------------------



Erlernbarkeit
---------------



**Tabelle 7.14:** Zusammenfassung normierte Mittelwerte VR02 (Zufriedenheit)

Eine Übersicht über die Mittelwerte der jeweiligen Bewertungskategorie ist in Tabelle 7.15 zu sehen. In Tabelle 7.15 sind die Versuchsmerkmale analog zu VR01 mit Punkten bewertet. Die meisten Bewertungen entfallen auf Kodierungsmerkmal V2.1.16. Für die Übertragung einer Information mittels dem taktilen Feedback eines horizontalen Sliders im Raum ist demnach eine sprunghafte symmetrische Änderung des Skalenabstands um den Faktor  $\varphi = 2,50$  am besten geeignet. Im Rahmen dieser Studie entspricht dies einer sprunghaften Vergrößerung des Skalenabstands von 30,00 mm auf 75,00 mm (vgl. Tabelle 7.10). Die Kodierung über eine asymmetrische Änderung des Skalenabstands wird anhand Tabelle 7.15 nur wenig schlechter bewertet. Die Kodierung über einen sprunghaften Intensitätsabfall entlang der taktilen Skala ist anhand dieser Studie zu verwerfen. Tabelle 7.15 zeigt jedoch, dass ein sprunghafter Intensitätsanstieg um Faktor  $\varphi = 1,60$  an einem Skalenpunkt nicht ganz zu verwerfen ist (vgl. V2.1.12). Aufgrund der Systemgrenzen des verwendeten Ultraschallarrays konnten allerdings in dieser Studie keine größeren Stufensprünge untersucht werden. Folglich sollte in weiterführenden Studien analysiert werden, ob ein Intensitätssprung mit Faktor größer  $\varphi = 1,60$  zu besseren Ergebnissen führt. In der anschließenden Versuchsreihe VR03 wird die unterstützende Wirkung des taktilen Feedbacks untersucht. Dazu wird die Stellaufgabe mit und ohne taktilem Feedback ausgeführt. Als Basis für das taktile Feedback dienen die Versuchsmerkmale V1.5.4 aus VR01 und V2.1.16 aus VR02, welche sowohl einzeln auch in Kombination untersucht werden.

Kodierungsart	Intensitätssprung												Skalenabstandsänderung							
	negativ				positiv								symmetrisch				asymmetrisch			
Skalierungsfaktor	1,12	1,25	1,40	1,60	1,12	1,25	1,40	1,60	1,12	1,25	1,40	1,60	1,25	1,60	2,00	2,50	1,25	1,60	2,00	2,50
Versuchsmerkmal	V2.1.1	V2.1.2	V2.1.3	V2.1.4	V2.1.5	V2.1.6	V2.1.7	V2.1.8	V2.1.9	V2.1.10	V2.1.11	V2.1.12	V2.1.13	V2.1.14	V2.1.15	V2.1.16	V2.1.17	V2.1.18	V2.1.19	V2.1.20
Fehleranzahl												2			1					3
Aufgabenerfüllung												1				3			1	2
Stelldifferenz															1	3				2
Bedienzeit															3				1	2
Mentale Beanspruchung															2	3				1
Gefühl richtig gestellt							1					2			3	3			3	3
Ausprägung															2	3			1	2
Präzision															1	3				2
Benutzungsgeschw.															1	3				2
Erlernbarkeit															2	3				1
Summe	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	0	0	16	24	0	0	6	20

**Tabelle 7.15:** Übersicht Bewertung der Mittelwerte VR02

Die Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt, dass es Unterschiede zwischen den taktilen Kodierungsmerkmalen gibt und ein positiver oder negativer Intensitätssprung sowie eine sprunghafte symmetrische oder asymmetrische Änderung des Skalenabstands die

Ausführung der Stellaufgabe beeinflussen. Die Überprüfung der Hypothesen aus Kapitel 7.2.1 erfolgt anhand der Zusammenfassung der Ergebnisse. Ein grünes Feld in Tabelle 7.16 bedeutet, dass die Hypothese  $H_n$  aus Tabelle 7.9 anhand der Untersuchung bestätigt werden kann und angenommen wird. Ein rotes Feld hingegen, dass die Hypothese  $H_n$  aus Tabelle 7.9 nicht bestätigt werden kann und daher verworfen wird. Die Bewertungskriterien Fehleranzahl, Aufgabenerfüllung und Stelldifferenz zeigen, dass sich eine Kodierung über einen positiven als auch negativen Intensitätssprung auf die Effektivität der Stellaufgabe auswirkt. Eine weitere Möglichkeit die Effektivität der Stellaufgabe zu beeinflussen besteht in der Kodierung über eine symmetrische oder asymmetrische Änderung des Skalenverlaufs. Folglich lassen sich die Hypothesen  $H_{19}$  bis  $H_{27}$  bestätigen. Die Hypothesen  $H_{28}$  bis  $H_{33}$  bezüglich der Effizienz der Kodierung einer taktilen Skala können ebenfalls bestätigt werden. Die Kodierung über einen Intensitätssprung in positiver oder negativer Richtung sowie die Kodierung über eine symmetrische oder asymmetrische Änderung im Skalenverlauf beeinflussen die Effizienz der Stellaufgabe in der Gestalt, dass sich eine Zunahme des Intensitätssprungs oder eine sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands positiv auf die Effizienz auswirkt. Die Zufriedenheit bei der Kodierung über ein taktiler Merkmal wird mit Hilfe der Hypothesen  $H_{34}$  bis  $H_{45}$  untersucht. Anhand der durchgeführten Untersuchungen kann bestätigt werden, dass eine Kodierung mittels eines positiven oder negativen Intensitätssprungs sowie über die sprunghafte Änderung im Skalenverlauf möglich ist. Damit können die Hypothesen angenommen werden.

	$H_n$	Beschreibung	$H_n$ verworfen
Effektivität	$H_{19}$	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	$H_{20}$	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	$H_{21}$	Die <i>Erfüllung der Hauptaufgabe</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.	Nein
	$H_{22}$	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	$H_{23}$	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	$H_{24}$	Die <i>Erfüllung der Nebenaufgabe</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.	Nein
	$H_{25}$	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	$H_{26}$	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	$H_{27}$	Die <i>Stellgenauigkeit der Nebenaufgabe</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.	Nein

**Tabelle 7.16:** Ergebnisse der Hypothesenüberprüfung (Teil 1/2)

	H <sub>n</sub>	Beschreibung	H <sub>n</sub> verworfen
Effizienz	H <sub>28</sub>	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>29</sub>	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>30</sub>	Die <i>Bedienzeit</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>31</sub>	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>32</sub>	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>33</sub>	Die <i>mentale Beanspruchung</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.	Nein
Zufriedenheit	H <sub>34</sub>	Die <i>Ausprägung</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>35</sub>	Die <i>Ausprägung</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>36</sub>	Die <i>Ausprägung</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>37</sub>	Die <i>Präzision</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>38</sub>	Die <i>Präzision</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>39</sub>	Die <i>Präzision</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>40</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>41</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>42</sub>	Die <i>Benutzungsgeschwindigkeit</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.	Nein
	H <sub>43</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsabfall des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein
H <sub>44</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch den sprunghaften Intensitätsanstieg des Feedbacks positiv beeinflusst.	Nein	
H <sub>45</sub>	Die <i>Erlernbarkeit</i> wird durch die sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands der taktilen Skala positiv beeinflusst.	Nein	

**Tabelle 7.16:** Ergebnisse der Hypothesenüberprüfung (Teil 2/2)

### 7.3 Evaluationsstudie: Visuelles vs. visuell und taktiler Feedback

Die dritte Versuchsreihe VR03 dient als abschließende Untersuchung und stellt ein rein visuelles Feedback bei der Bedienung des berührungslosen Sliders im Raum einem zusätzlich unterstützenden, taktilen Feedback gegenüber. Im Detail wird untersucht, ob eine taktile Skala im Raum unterstützend zu einem rein visuellen Feedback mittels einer visuellen Skalanzeige genutzt werden kann. Als Use Case dieser Untersuchung dient die Steuerung der intrakorporalen Beleuchtung während eines fiktiven minimalinvasiven chirurgischen Eingriffs unter Laborbedingungen am IKTD.



### 7.3.1 Hypothese

Beim Use Case zur Steuerung der Beleuchtungsstärke steht die Erhöhung oder Erniedrigung der Beleuchtungsstärke im Fokus. Dabei wird die Beleuchtungsstärke auf einen vom Operateur gewählten Wert eingestellt. Im Sinne einer berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle mit einer Bedienung über Hand-/Armgesten ist es daher notwendig die benötigten Skalenwerte anzuzeigen. Im Operationssaal mit Fokus auf eine sterile Bedienung bietet es sich an, die Skalenanzeige aus einem visuellen, akustischen oder taktilen Feedback oder aus einer Kombination dieser aufzubauen. Aufgrund des hohen Lärmpegels im Operationssaal (vgl. Kapitel 1.1) wird in dieser Studie das rein visuelle Feedback mittels einer Skalenanzeige gegen ein visuelles Feedback mit unterstützendem, taktilen Feedback untersucht. Die Probanden führen somit die Stellaufgaben einmal mit nur visuellem Feedback anhand einer Skalenanzeige und beim anderen Mal mit einem zusätzlichen taktilen Feedback zur visuellen Skalenanzeige aus. Die Untersuchung der Unterstützungsfähigkeit des zusätzlichen vorhandenen taktilen Feedbacks erfolgt anhand von Kriterien zur Beurteilung der Effektivität und Effizienz bezüglich der Ausführung der Haupt- und der Nebenaufgabe. Dazu werden detaillierte Forschungshypothesen formuliert (siehe Tabelle 7.17). Die Forschungshypothesen werden bezüglich der Haupt- und Nebenaufgabe unterteilt. Aufgrund der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung des unterstützenden, taktilen Feedbacks im Raum werden die Forschungshypothesen in die nachfolgenden objektiven und subjektiven Bewertungskriterien aufgeteilt. Die Effektivität der Ausführung der Haupt- und Nebenaufgabe wird anhand der jeweiligen Aufgabenerfüllung und der Stelldifferenz bewertet. Die Effizienz der Unterstützungsfähigkeit des zusätzlichen taktilen Feedbacks lässt sich anhand der Nebenaufgabe durch die Bewertungskriterien Bedienzeit sowie der mentalen Beanspruchung charakterisieren. Da das taktile Feedback aus Versuchsmerkmalen der Versuchsreihen VR01 und VR02 besteht, wird auf die Bewertung der Zufriedenheit verzichtet. Es resultieren folgende Untersuchungshypothesen für Versuchsreihe VR03:

	H <sub>n</sub>	Beschreibung
Effektivität	H <sub>46</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktilen Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>besseren Aufgabenerfüllung der Hauptaufgabe</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.
	H <sub>47</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktilen Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>besseren Aufgabenerfüllung der Stellaufgabe</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.
	H <sub>48</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktilen Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>geringeren Stelldifferenz</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.

**Tabelle 7.17:** Forschungshypothesen VR03 (Teil 1/2)

	H <sub>n</sub>	Beschreibung
Effektivität	H <sub>49</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>besseren Aufgabenerfüllung der Hauptaufgabe</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.
	H <sub>50</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>besseren Aufgabenerfüllung der Stellaufgabe</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.
	H <sub>51</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>geringeren Stelldifferenz</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.
Effizienz	H <sub>52</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktiles Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>geringeren Bedienzeit</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.
	H <sub>53</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktiles Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>geringeren mentalen Beanspruchung</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.
	H <sub>54</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>geringeren Bedienzeit</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.
	H <sub>55</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>geringeren mentalen Beanspruchung</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.

**Tabelle 7.17:** Forschungshypothesen VR03 (Teil 2/2)

### 7.3.2 Untersuchungsparameter

Für die Untersuchung der Unterstützungsfähigkeit des zusätzlichen vorhandenen taktilen Feedbacks werden je vier Versuchsmerkmale mit taktilen (V3.1.1 bis V3.1.4) und vier Versuchsmerkmale ohne taktilen Feedback (V3.2.1 bis V3.2.4) aufgebaut. Das taktilen Feedback basiert auf dem Basisskalenverlauf V1.5.4 aus Versuchsreihe VR01 (vgl. Tabelle 7.2). V1.5.4 besitzt eine Intensität von 100 % und einen Skalenabstand von 30,00 mm (vgl. Tabelle 7.18). Darüber hinaus werden weitere drei Versuchsmerkmale mit taktilen Feedback (V3.3.1 bis V3.3.3) und drei Versuchsmerkmale ohne taktilen Feedback (V3.4.1 bis V3.4.3) aufgebaut (vgl. Tabelle 7.18). Diese setzen sich aus den Versuchsmerkmalen V2.1.12 und V2.1.16 aus Versuchsreihe VR02 (vgl. Tabelle 7.10) zusammen. Das taktilen Feedback von V2.1.12 besteht aus einer Basisintensität  $I_0$  von 63 % und einem Basisskalenabstand  $x_0$  von 30,00 mm. An Skalenposition „6“ steigt die Feedbackintensität sprunghaft um den Faktor  $\varphi = 1,60$  auf 100 % an. V2.1.16 setzt sich aus einer Basisintensität  $I_0$  von 100 %, einem Basisskalenabstand  $x_0$  von 30,00 mm und einer sprunghaften symmetrischen Skalenabstandsänderung an Skalenposition „6“ um den Faktor  $\varphi = 2,50$  auf  $x_1 = 75,00$  mm zusammen. Zusätzlich wird eine Kombination aus einem Basisabstand  $x_0 = 30,00$  mm und einer Basisintensität von  $I_0 = 63$  % aufgebaut. Der Feedbackverlauf vereint die sprunghafte symmetrische Vergrößerung des Skalenabstands auf  $x_1 = 75,00$  mm mit einem positiven Intensitätssprung auf eine Feedback-

intensität von 100 %. Tabelle 7.18 gibt einen Überblick über die Versuchsmerkmale der Versuchsreihe VR03.

Versuchsmerkmal	Feedbackart	Intensität				Skalenabstand		
		$I_0$ [%]	Schall- druck [Pa]	$I_1$ [%]	Schall- druck [Pa]	$x_0$ [mm]	$x_1$ [mm]	$x_2$ [mm]
V3.1.1	taktil + visuell	100	1124,00	100	1124,00	30,00	30,00	30,00
V3.1.2		100	1124,00	100	1124,00	30,00	30,00	30,00
V3.1.3		100	1124,00	100	1124,00	30,00	30,00	30,00
V3.1.4		100	1124,00	100	1124,00	30,00	30,00	30,00
V3.2.1	visuell	0	0,00	0	0,00	30,00	30,00	30,00
V3.2.2		0	0,00	0	0,00	30,00	30,00	30,00
V3.2.3		0	0,00	0	0,00	30,00	30,00	30,00
V3.2.4		0	0,00	0	0,00	30,00	30,00	30,00
V3.3.1	taktil + visuell	63	708,12	100	1124,00	30,00	30,00	30,00
V3.3.2		100	1124,00	100	1124,00	30,00	75,00	75,00
V3.3.3		63	708,12	100	1124,00	30,00	75,00	75,00
V3.4.1	visuell	0	0,00	0	0,00	30,00	30,00	30,00
V3.4.2		0	0,00	0	0,00	30,00	75,00	75,00
V3.4.3		0	0,00	0	0,00	30,00	75,00	75,00

**Tabelle 7.18:** Versuchsmerkmale VR03

### 7.3.3 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Die dritte Versuchsreihe VR03 besteht analog zu den vorhergegangenen Versuchsreihen aus einem Vorversuch zur Überprüfung der taktilen Fähigkeiten der Probanden sowie dem anschließenden Hauptversuch, in welchem die taktilen Versuchsmerkmale im Rahmen eines fiktiven, minimalinvasiven, chirurgischen Eingriffs evaluiert werden. Die Versuchsdurchführung erfolgt analog zur Versuchsreihe VR01 und VR02. Der Hauptversuch ist ebenfalls aus der Ausführung der Hauptaufgabe sowie der parallelen Ausführung einer Stellaufgabe als Nebenaufgabe aufgebaut. Der Versuchsaufbau der dritten Untersuchung gleicht jenem aus den vorherigen Versuchsreihen, wird jedoch um einen Bildschirm mit Skalenanzeige für das visuelle Feedback erweitert. Die Hauptaufgabe besteht dabei unverändert aus der Ausführung der Konzentrationsaufgabe aus den Versuchsreihen VR01 und VR02. Die Nebenaufgabe der Probanden besteht wieder im Einstellen von zuvor vom Versuchsleiter definierten Skalenwerten mittels des virtuellen Sliders. In dieser Versuchsreihe kann jedoch die Zielposition entweder über das taktile oder das visuelle Feedback eingestellt werden. Das Abprüfen der Versuchsmerkmale erfolgt randomisiert. Als visuelles Feedback dient eine Skalenanzeige, welche den Probanden auf einem separaten Bildschirm präsentiert wird. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, ausgehend vom linken Ende des virtuellen Sliders, auf Anweisung des

Versuchsleiters die Skalenpositionen 4, 5, 6 oder 7 anhand des taktilen Feedbacks einzustellen (siehe Tabelle 7.19). Ob bei der Stellaufgabe ein taktiler Feedback vorhanden ist oder nicht, wird dem Probanden zuvor nicht mitgeteilt. Nimmt der Proband kein taktiler Feedback oder taktiler Merkmal entlang der Skala wahr, wird er gebeten einen Alternativwert von 60 %, 75 %, 80 % oder 90 % mittels der visuellen Anzeige auf Anweisung des Versuchsleiters einzustellen (siehe Tabelle 7.19). Der Alternativwert, der nur anhand der visuellen Anzeige eingestellt werden kann, korreliert dabei nicht mit dem Zielwert der taktilen Skala. Dadurch kann später nachvollzogen werden, ob das taktiler Feedback erkannt wurde und die Stellaufgabe vom Probanden mittels der taktilen Skala oder rein über die visuelle Anzeige ausgeführt wurde. Für die Versuchsdurchführung wird das Ultraschallarray im Greifraum optimal zur parallelen Durchführung der Hauptaufgabe positioniert. Ebenfalls erfolgt die Durchführung von mehreren Probeläufen der Versuchsdurchführung mit Gehörschutz und Bewertung des Feedbacks bevor die Versuchsergebnisse aufgezeichnet werden. Ein wiederholtes Abfahren des Sliders ist dabei zulässig. Das Speichern der Zielposition erfolgt, indem der Proband seine Hand an der von ihm identifizierten Zielposition für drei Sekunden ruhig hält. Die erfolgreiche Speicherung der Zielposition wird dem Probanden verbal mitgeteilt. Anschließend erfolgt die Bewertung der mentalen Beanspruchung (siehe Bild 7.47). Die Bewertungsskala wird dem Probanden auf einem weiteren Bildschirm linker Hand dargestellt. Die Dokumentation der Antworten des Probanden erfolgt durch den Versuchsleiter.

Wie beurteilen Sie die mentale Beanspruchung während der Ausführung der Stellaufgabe?

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
0	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Überhaupt nichts	Sehr, sehr schwach	Sehr schwach	Schwach	Mäßig	Ziemlich stark	Stark		Sehr stark		Sehr, sehr stark

**Bild 7.47:** Fragebogen VR03

Versuchsmerkmal	Feedbackart	Zielposition taktiler Feedback (Skalenposition)	Zielposition visuelles Feedback (Bildschirm) nach Anweisung des Versuchsleiters
V3.1.1	Taktile + visuell	4	80 %
V3.1.2		5	80 %
V3.1.3		6	80 %
V3.1.4		7	80 %
V3.2.1	visuell	4	80 %
V3.2.2		5	80 %
V3.2.3		6	80 %
V3.2.4		7	80 %

**Tabelle 7.19:** Übersicht der Zielpositionen VR03 (Teil 1/2)

Versuchsmerkmal	Feedbackart	Zielposition taktiler Feedback (Skalenposition)	Zielposition visuelles Feedback (Bildschirm) nach Anweisung des Versuchsleiters
V3.3.1	Taktile + visuell	6	80 %
V3.3.2		6	90 %
V3.3.3		6	90 %
V3.4.1	visuell	6	60 %
V3.4.2		6	75 %
V3.4.3		6	75 %

**Tabelle 7.19:** Übersicht der Zielpositionen VR03 (Teil 2/2)

### 7.3.4 Probandenkollektiv

Im Rahmen der Versuchsreihe VR03 erfolgt die Prüfung der Versuchsmerkmale anhand von 15 Probanden im Alter von 20 bis 26 Jahren ( $\bar{X} = 22,94$  Jahre,  $SD = 1,91$  Jahre). Die Beschreibung des Probandenkollektivs ist in Tabelle 7.20 zu finden. 68,75 % der Probanden sind männlich, 31,25 % weiblich. Hinsichtlich der Körpergröße ( $\bar{X} = 177,38$  cm,  $SD = 9,90$  cm) und auch der Körpermasse ( $\bar{X} = 72,19$  kg,  $SD = 11,77$  kg) sind diese mit den vorangegangenen Versuchsreihen vergleichbar. Bei den Probanden handelt es sich um Studierende im Bachelor- (56,25 %) und Masterstudium (43,75 %). Die Mehrheit ist rechtshändig (93,75 %), deutscher Staatsbürger (87,50 %), übt kein feinmotorisches Hobby aus (62,50 %) und spielt auch kein Musikinstrument (62,50 %). Beim Probandenkollektiv bestehen keine bekannten Durchblutungsstörungen und zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung bestehen keine Einschränkungen des Arm-/Hand- oder Fingerbereichs. 93,75 % sind Nichtraucher.

n=15	Minimum	Maximum	Median	$\bar{X}$	SD
Alter [Jahre]	20	26	23	22,94	1,91
Größe [cm]	160	197	175	177,38	9,90
Gewicht [kg]	48	92	73	72,19	11,77
Geschlecht	68,75 % männlich, 31,25 % weiblich				
Bildungsgrad	43,75 % Hochschulabschluss, 56,25 % Abitur/Fachhochschulreife				
Händigkeit	93,75 % rechtshändig, 6,25 % linkshändig				
Nationalität	87,50 % Deutsch, 6,25 % Griechisch, 6,25 % Indisch				
Berufliche Tätigkeit	0 % Bürotätigkeit, 100 % Studium, 0 % handwerkliche Tätigkeit				
Feinmotorisches Hobby	62,50 % kein feinmotorisches Hobby, 37,50 % feinmotorisches Hobby				
Musikinstrument	62,50 % spielen kein Musikinstrument, 37,50 % spielen ein Musikinstrument				
Durchblutungsstörungen	100 % keine Durchblutungsstörungen				
Einschränkungen im Hand-/Arm-/Fingerbereich	100 % keine Einschränkungen				
Raucher	93,75 % Nichtraucher, 6,25 % Raucher				

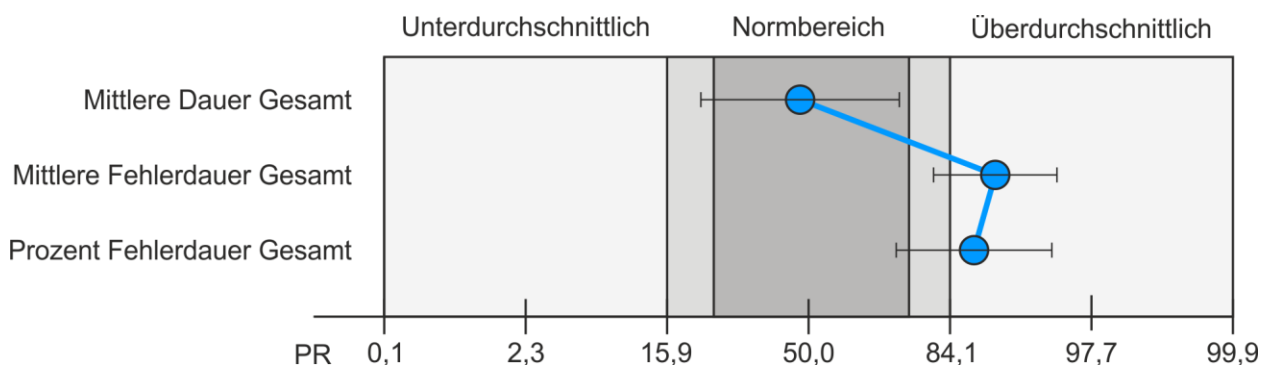
**Tabelle 7.20:** Probandenkollektiv VR03

Nach Erfassung der demographischen Daten werden die taktilen Fähigkeiten der Probanden analog zu den vorherigen Versuchsreihen betrachtet (siehe Tabelle 7.21). Die Zweipunktdiskriminationsschwelle am ersten Fingerglied des Mittelfingers beträgt durchschnittlich 4,44 mm (SD = 1,26 mm) und liegt daher leicht oberhalb der Schwelle von 4 mm (vgl. [LEDERMAN & KLATZKY 2009], [CATLEY ET AL. 2013]). Die Zweipunktdiskriminationsschwelle an der Handinnenfläche liegt im Durchschnitt bei 10,13 mm (SD = 0,34 mm) und nach LEDERMAN & KLATZKY [2009] und CATLEY ET AL. [2013] unterhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs von 12 mm. Die Berührungsempfindlichkeit gemäß des Semmes-Weinstein Monofilament-Tests liegt im Rahmen der Untersuchung im Mittel bei 0,10 g. Das Vibrationsempfinden nach Rydel-Seiffer ergibt einen durchschnittlichen Skalenwert 7,97 (SD = 0,12), was auf eine normale Reizweiterleitung schließen lässt [HILZ ET AL. 1998].

n=15	Minimum	Maximum	Median	Ø	SD
Zweipunktschwelle Mittelfinger [mm]	2,00	7,00	5,00	4,44	1,26
Zweipunktschwelle Handinnenfläche [mm]	10,00	11,00	10,00	10,13	0,34
Semmes-Weinstein Monofilament-Test [g]	0,07	0,40	0,07	0,10	0,10
Vibrationsempfinden	7,50	8,00	8,00	7,97	0,12

**Tabelle 7.21:** Daten bezüglich des taktilen Empfindens der Probanden

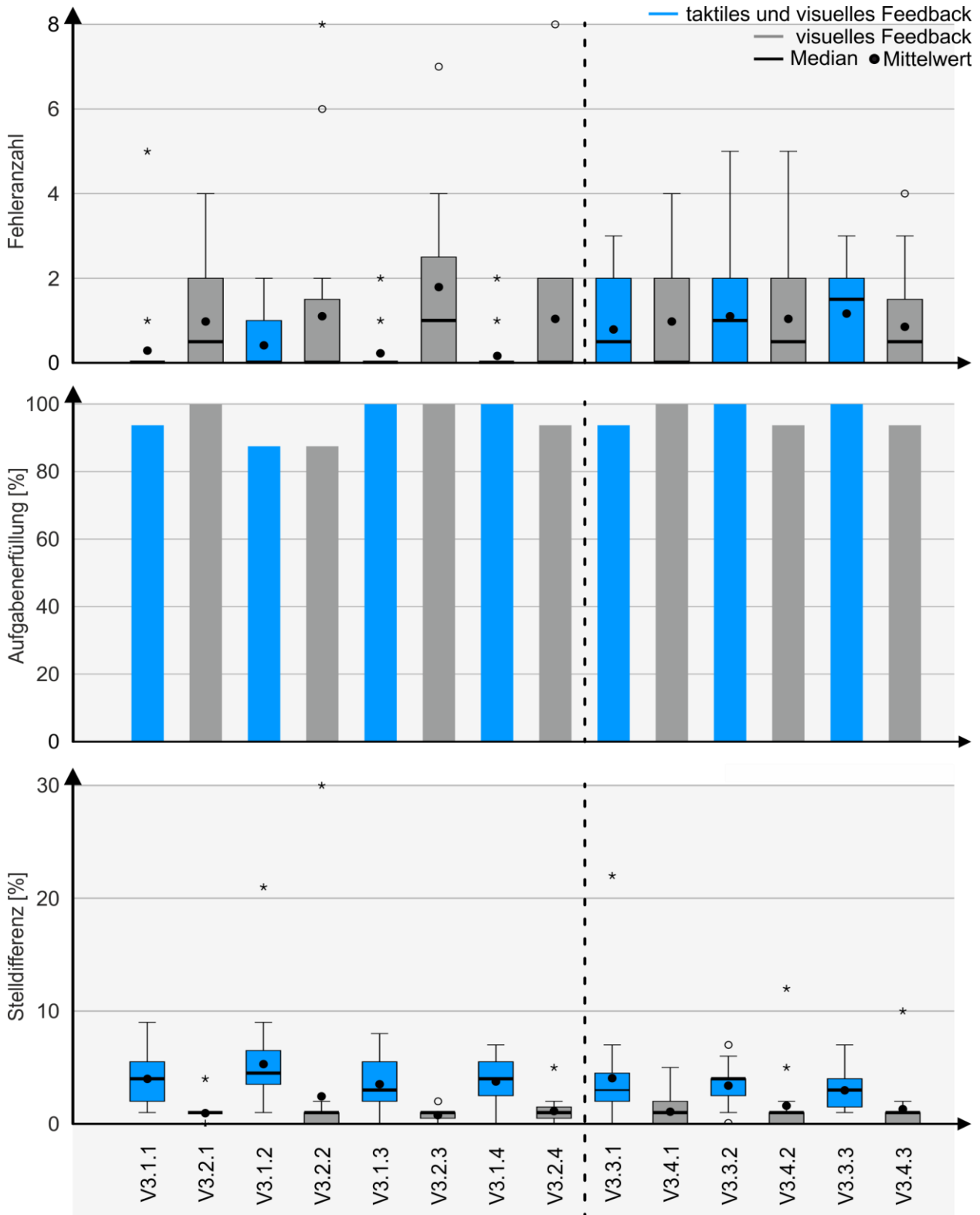
Die Ergebnisse der Zweihand Koordination können anhand Bild 7.48 betrachtet werden. Die mittlere Versuchsdauer (Mittlere Dauer gesamt) liegt im Normbereich des Wiener Testsystems. Hinsichtlich der mittleren Fehlerdauer und dem Verhältnis der Gesamtfehlerdauer zur Gesamtdauer schneiden die Probanden tendenziell überdurchschnittlich ab. Anhand dieser Voruntersuchungen können keine Auffälligkeiten innerhalb der Stichprobe gefunden werden. Das Probandenkollektiv liegt folglich im Normbereich. Die Probanden üben somit keinen Einfluss aufgrund von unter- oder überdurchschnittlichen Fähigkeiten auf die Ergebnisse der Hauptuntersuchung aus.



**Bild 7.48:** Untersuchungsergebnisse des Tests Zweihand Koordination nach Prozent-rängen (PR) VR03

### 7.3.5 Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Evaluationsstudie vorgestellt. Im Rahmen der Evaluationsstudie werden die Basisparameter der ersten Versuchsreihe VR01 sowie die Kodierungsmöglichkeiten einer Skalenposition mittels eines Intensitätssprungs als auch über eine Änderung im Skalenabstand gegen ein rein visuelles Feedback getestet. Es erfolgt zu jeder Testvariablen eine deskriptive Analyse der Versuchsergebnisse. Eine inferenzstatistische Untersuchung der Versuchsmerkmale ist aufgrund des geringen Datensatzes nicht möglich. Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt immer paarweise, infolgedessen die Ergebnisse mit unterstützendem, taktilen und rein visuellem Feedback stets nebeneinander abgebildet werden. Bei den Versuchsmerkmalen mit einer ungeraden zweiten Ziffer wird die Bedienaufgabe mit einem unterstützenden, taktilen Feedback ausgeführt, bei Versuchsmerkmalen mit einer geraden zweiten Ziffer erfolgt die Ausführung nur mit einem rein visuellen Feedback über die Skalenanzeige auf dem Bildschirm. Die Fehleranzahl gemessen anhand der Kontaktanzahl der Öse mit dem Metallstift ist in Bild 7.49 in Form von Box-Plots zu sehen. Dabei zeigt die Ordinate die Fehleranzahl entsprechend der Versuchsmerkmale. Erkennbar ist, dass die Fehleranzahl mit einem unterstützenden, taktilen Feedback geringer ausfällt als mit nur rein visuellem Feedback. Die Messwerte der Versuchsmerkmale V3.1.1 bis V3.1.4 streuen dabei zwischen 0 und 5 Berührungen. Im Hinblick auf die Versuchsmerkmale V3.2.1 bis V3.2.4 streuen die Messwerte von 0 bis 8 Kontakten und die durchschnittliche Fehleranzahl liegt höher als bei den Versuchsmerkmalen V3.1.1 bis V3.1.4. Bei den Versuchsmerkmalen V3.3.1 bis V3.3.3 ist die Zielposition mit einem unterstützenden, taktilen Merkmal kodiert, wohingegen bei V3.4.1 bis V3.4.3 nur ein rein visuelles Feedback vorliegt. Die Fehleranzahl mit einem unterstützenden, taktilen Merkmal erfordert mehr Aufmerksamkeit für die Nebenaufgabe, was in einer höheren Fehleranzahl der Hauptaufgabe resultiert (siehe Bild 7.49). Bei der Kodierung der Zielposition mit einem unterstützenden, taktilen Merkmal variiert die Berührungsanzahl analog zu einem rein visuellen Feedback zwischen 0 und 5 Berührungen. Die Medianwerte bei einer taktilen Kodierung liegen jedoch höher im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback. Das korrekte Einstellen der Zielposition ist in Bild 7.49 anhand von Balkendiagrammen dargestellt. Die Aufgabenerfüllung der Nebenaufgabe bei den Versuchsmerkmalen V3.1.1 bis V3.1.4 und V3.2.1 bis V3.2.4 zeigt keine auffälligen Abweichungen. Im Mittel wird die Aufgabe mit einem konstanten taktilen Feedback (V3.1.1 bis V3.1.4) ebenso erfolgreich ausgeführt wie mit einem rein visuellen Feedback (V3.2.1 bis V3.2.4).

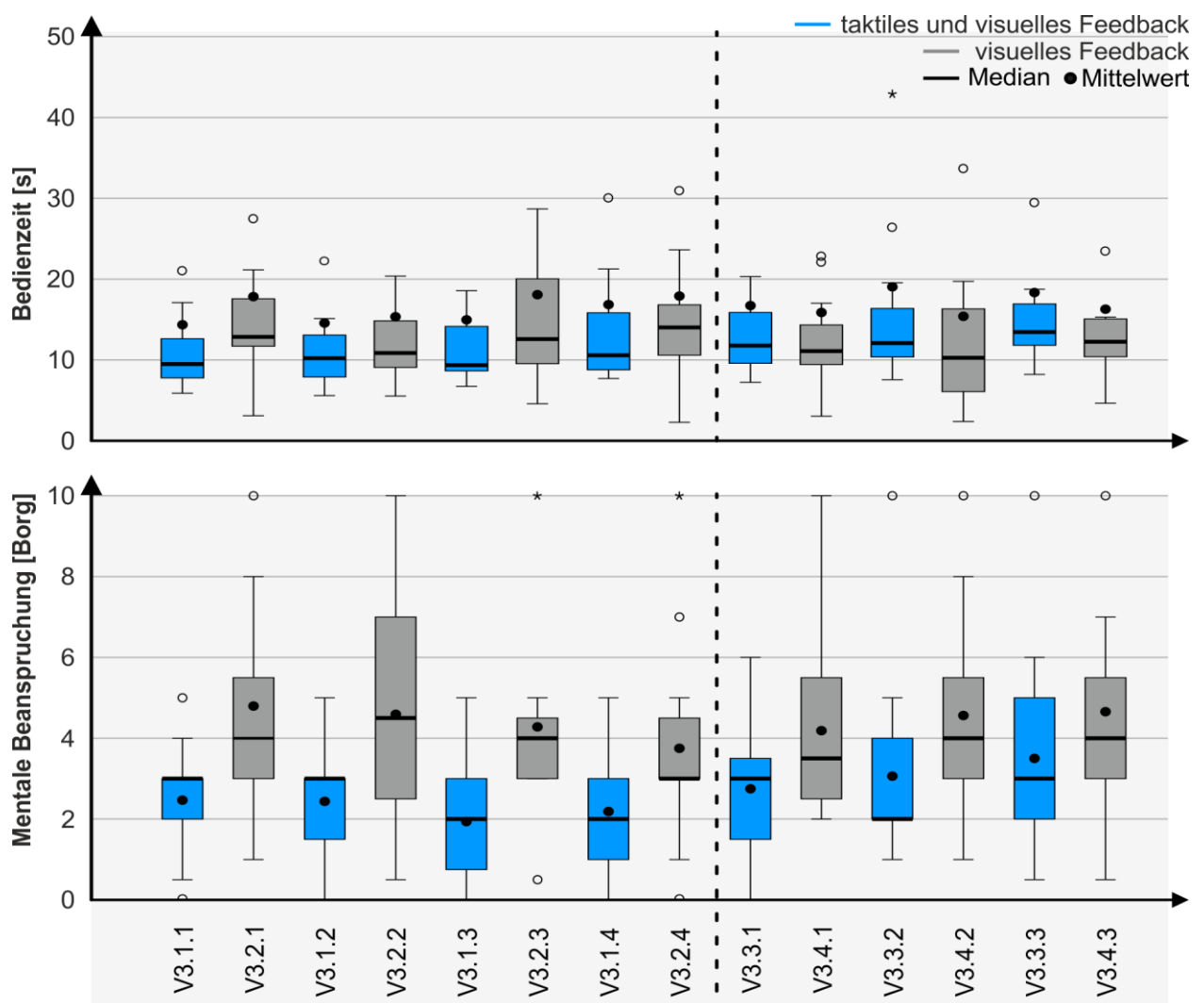


**Bild 7.49:** Ergebnisse Fehleranzahl, Aufgabenerfüllung und Stelldifferenz VR03

Bei der taktilen Kodierung der Zielposition mittels eines Intensitätssprungs (V3.3.1) liegt die Aufgabenerfüllung etwas unter der eines rein visuellen Feedbacks (V3.4.1). Bei der taktilen Kodierung mittels einer Änderung im Skalenabstand (V3.3.2) oder einer Kombination aus Skalenabstandsänderung und Intensitätssprung (V3.3.3) hingegen fällt die Aufgabenerfüllung besser aus als mit einem rein visuellen Feedback (vgl. V3.4.2 und



V3.4.3). Bild 7.49 zeigt ebenfalls die Stelldifferenz zwischen Soll- und Ist-Position der jeweiligen Versuchsmerkmale. Erkennbar ist, dass mit einem unterstützenden, taktilen Feedback durchschnittlich höhere Stelldifferenzen erreicht werden als über ein rein visuelles Feedback. Die Stelldifferenz des unterstützenden, taktilen Feedbacks bewegt sich bis auf zwei Ausreißer bei V3.1.2 und V3.3.1 zwischen 0 % und 10 %, was bei einem Basisskalenabstand  $x_0 = 30,00$  mm einer Abweichung zwischen 0,00 mm und 3,00 mm entspricht. Die Bedienzeit ist in Bild 7.50 dargestellt. Mit den taktilen Versuchsmerkmalen V3.1.1 bis V3.1.4 wird eine geringere Bedienzeit erreicht als mit einem rein visuellen Feedback (vgl. V3.2.1 bis 3.2.4). Ebenfalls fällt der Interquartilabstand bei den taktilen Versuchsmerkmalen geringer aus im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback. Die Betrachtung der Versuchsmerkmale V3.3.1 bis V3.3.3 zur Kodierung der Zielposition zeigt, dass zum Auffinden der Zielposition über das unterstützende, taktile Merkmal mehr Zeit in Anspruch genommen wird im Vergleich zur Einstellung über ein rein visuelles Feedback (V3.4.1 bis V3.4.3).

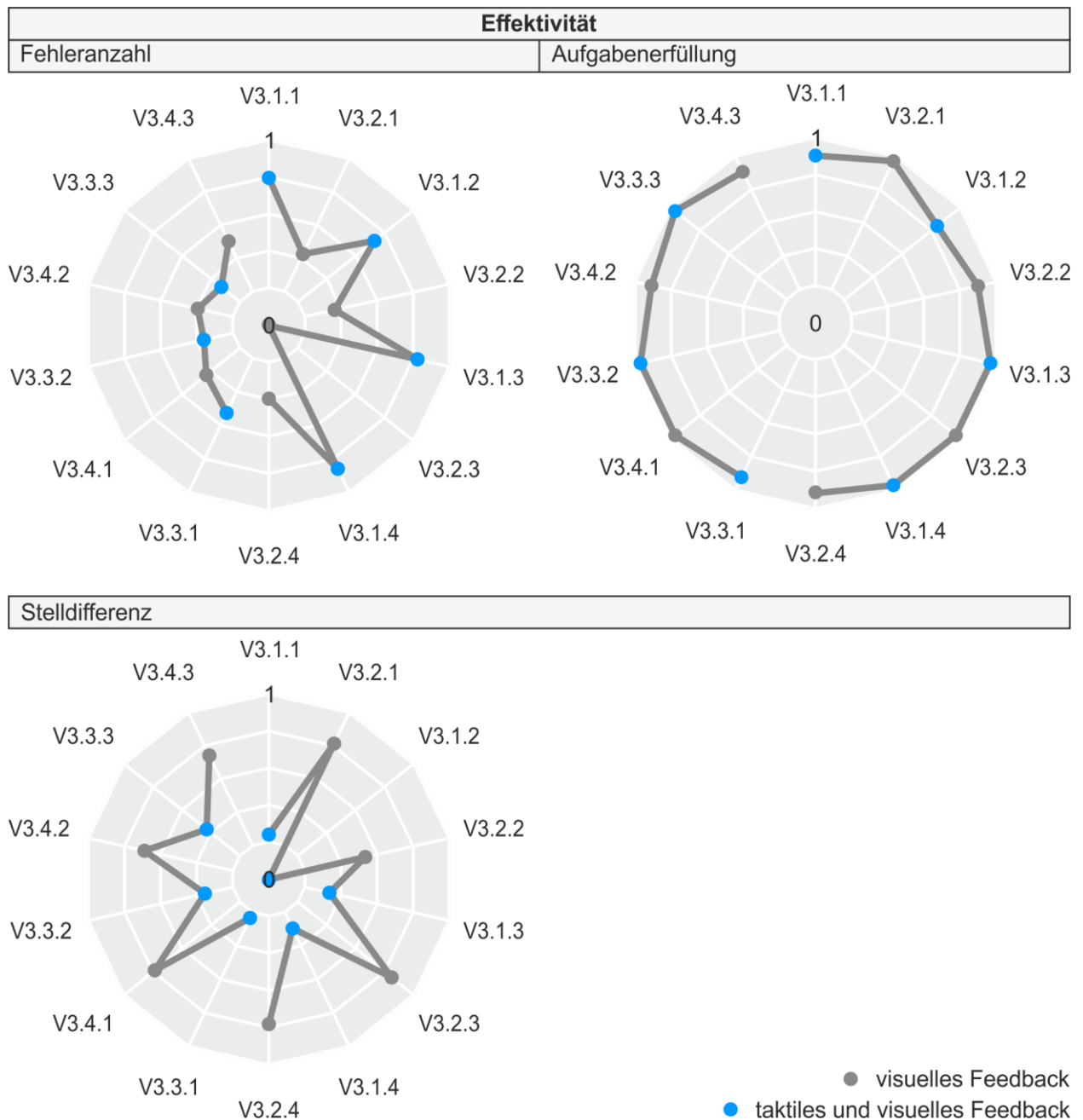


**Bild 7.50:** Ergebnisse Bedienzeit und Bewertung der mentalen Beanspruchung VR03

Die mentale Beanspruchung der Probanden während der Ausführung der Haupt- und Nebenaufgabe ist ebenfalls in Bild 7.50 dargestellt. Die mentale Beanspruchung der Probanden wird durch ein unterstützendes, taktilen Feedback (V3.1.1 bis V3.1.4) reduziert. Die maximale mentale Beanspruchung mit unterstützendem, taktilen Feedback beträgt 5 auf der Borg Skala wohingegen ohne taktilen Feedback (V3.2.1 bis V3.2.4) teilweise eine 10 vergeben wird. Hinsichtlich der Kodierung der Zielposition mittels eines taktilen Merkmals (V3.3.1 bis V3.3.3) liegt die Bewertung der mentalen Beanspruchung ebenfalls unter der des rein visuellen Feedbacks (vgl. V3.4.1 bis V3.4.3).

### **7.3.6 Diskussion der Ergebnisse und Überprüfung der Hypothesen**

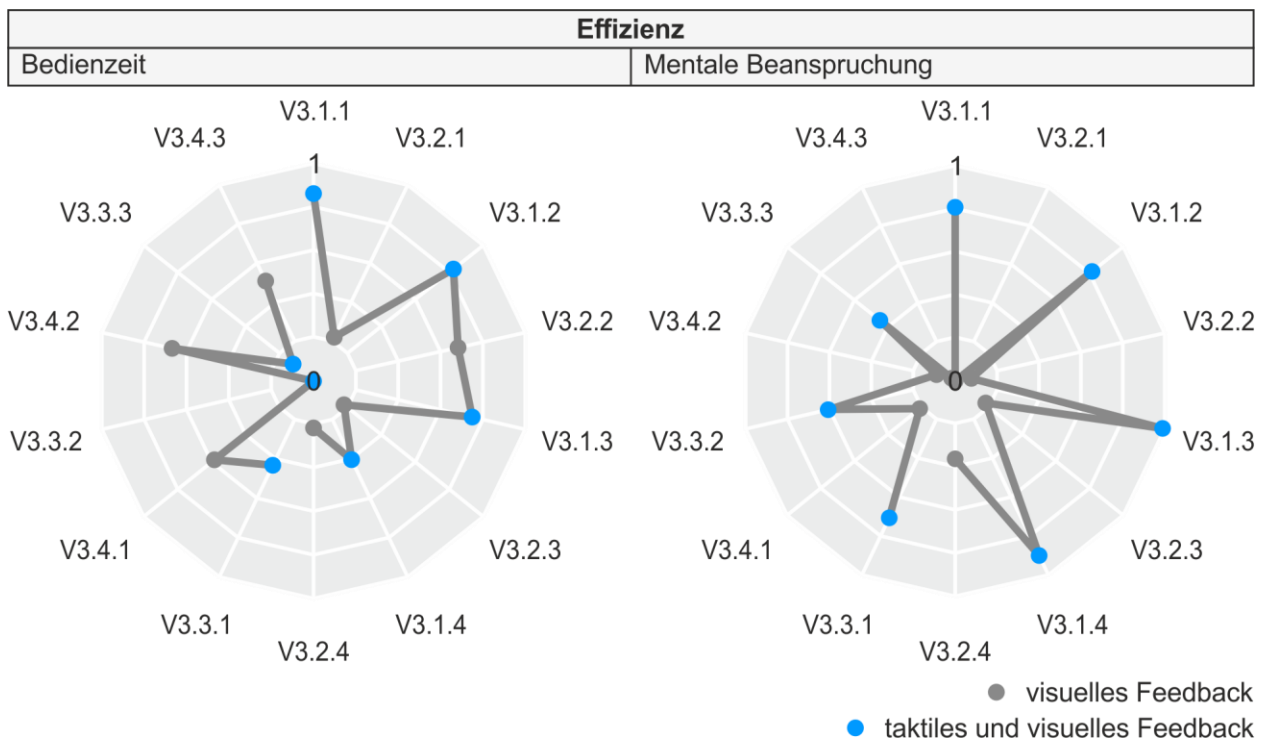
Die Ergebnisse der Evaluationsstudie werden in diesem Kapitel zusammengefasst und diskutiert. Die Evaluationsstudie dient dem Vergleich zwischen einem reinen visuellen Feedback und einem unterstützenden, taktilen Feedback bei der Ausführung einer Stellaufgabe im Raum via Gestensteuerung. Dabei wird das Einstellen eines zuvor definierten Skalenwerts zum einen anhand eines diskreten, taktilen Feedbacks in Form einer einfachen taktilen Skala im Raum und zum anderen mit Hilfe eines taktilen Kodierungsmerkmals untersucht. Die Daten des jeweiligen Bewertungskriteriums der deskriptiven Statistik werden analog zu den vorhergehenden Versuchsreihen aufgearbeitet und die Mittelwerte der Bewertungskriterien in normierten Netzdiagrammen dargestellt. Die Normierung der Daten erfolgt im Bereich von 0 bis 1, wobei 0 jeweils dem unzureichenden Ergebnis und 1 jeweils dem optimal möglichen Ergebnis der Bewertung eines jeden Kriteriums zugeordnet wird. Die Netzdiagramme werden hinsichtlich der Effektivität und Effizienz (siehe Tabelle 7.22 und 7.23) des taktilen Feedbacks gegliedert. Die Effektivität der Steuerung des virtuellen Sliders im Raum wird anhand der Fehleranzahl, Aufgabenerfüllung und der Stelldifferenz beschrieben. Die Fehleranzahl ist mit einem unterstützenden, diskreten taktilen Feedback (vgl. Tabelle 7.22 V3.1.1, V3.1.2, V3.1.3, V3.1.4) geringer als bei einem rein visuellen Feedback (vgl. Tabelle 7.22 V3.2.1, V3.2.2, V3.2.3, V3.2.4). Ein diskretes taktilen Feedback bei einer einfachen Stellaufgabe unterstützt demnach die Ausführung der Hauptaufgabe. Das Einstellen über ein taktilen Merkmal auf der Skala (Kodierung über sprunghafte Intensitätsänderung und Skalenabstandsänderung) führt zu einer stärkeren Ablenkung bei der Hauptaufgabe im Vergleich zum Einstellen des Skalenwerts auf einer diskreten, taktilen Skala ohne Kodierungsmerkmal. Eine Verbesserung der Fehleranzahl durch ein taktilen Feedback im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback ist in Tabelle 7.22 nicht erkennbar.



**Tabelle 7.22:** Normierte Mittelwerte der Fehleranzahl, Aufgabenerfüllung und Stelldifferenz VR03

Hinsichtlich der Ausführung der Nebenaufgabe ist kein bedeutender Unterschied zwischen der Bedienung mit diskretem, taktilen Feedback und der Bedienung über ein rein visuelles Feedback erkennbar. Ebenfalls führt die Kodierung über ein taktilen Feedback zu keiner besseren Aufgabenerfüllung im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback. Die Stelldifferenz (siehe Tabelle 7.22) ist bei der Einstellung über eine reine visuelle Anzeige geringer (wird mit Werten gegen 1 beschrieben) als über eine diskrete, taktile Skala (wird mit Werten gegen 0 beschrieben). Dieses Ergebnis könnte auf die detailliertere Auflösung der visuellen Skala zurückzuführen sein. Anhand der visuellen Anzeige

konnten die Probanden genau nachvollziehen, wie weit sie von der Zielposition abweichen. Bei der taktilen Skala konnten die Probanden die Abweichung erst beim Erreichen der nachfolgenden Skalenposition mit Ausgabe des nächsten Feedbackimpulses spüren. Daher ist die erzielte Abweichung in Versuchsreihe VR03 mit bis zu 3 mm als sehr gutes Ergebnis anzusehen. Die Bewertung der Effizienz erfolgt über die Bedienzeit und die mentale Beanspruchung während der Bedienung. Die Bedienzeit ist bei der Ausführung der Stellaufgabe mit einem unterstützenden, diskreten, taktilen Feedback geringer im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback (vgl. Tabelle 7.23 V3.1.1 bis V3.2.4). Beim Einstellen über ein taktiler Merkmal auf der Skala liegt die Bedienzeit etwas über der von einem reinen visuellen Feedback. Die Ergebnisse der Bewertung der mentalen Beanspruchung bei der Ausführung der Stellaufgabe zeigen, dass die Stellaufgabe mit einem taktilen Feedback als auch mit einem taktil kodierten Merkmal entlang der taktilen Skala geringer ausfällt (werden mit Werten gegen 1 normiert), als bei der Ausführung mit einem rein visuellen Feedback.



**Tabelle 7.23:** Normierte Mittelwerte der Bedienzeit und mentale Beanspruchung VR03  
 Im sich anschließenden Teil erfolgt die Überprüfung der Hypothesen aus Kapitel 7.3.1. Eine Visualisierung bezüglich der Annahme oder Verwerfung der Hypothese ist in Tabelle 7.24 dargestellt. Ein grünes Feld in Tabelle 7.24 bedeutet dabei, dass die Hypothese bestätigt werden kann und angenommen wird. Ein rotes Feld hingegen, dass die Hypothese abgelehnt und verworfen wird.

Hinsichtlich der Fehleranzahl bewirkt ein unterstützendes, diskretes, taktiles Feedback eine Reduktion der Fehleranzahl. Somit kann die Hypothese H<sub>46</sub> bestätigt werden. Die taktile Kodierung einer Skalenposition führt hingegen zu keiner Reduktion der Fehleranzahl, weshalb die Hypothese H<sub>49</sub> verworfen wird. Die Aufgabenerfüllung wird auch mit einem unterstützenden, diskreten, taktilen Feedback oder mit der Kodierung über ein taktilen Merkmal nicht besser ausgeführt als mit einem rein visuellen Feedback. Daher werden die Hypothesen H<sub>47</sub> und H<sub>50</sub> abgelehnt. Hinsichtlich der Stelldifferenz werden die Hypothesen H<sub>48</sub> und H<sub>51</sub> ebenfalls abgelehnt, da im Rahmen dieser Untersuchung ein unterstützendes, diskretes, taktilen Feedback als auch die Kodierung über ein taktilen Merkmal keine geringere Stelldifferenz liefert als ein rein visuelles Feedback.

Die Hypothese H<sub>52</sub> zur Bedienzeit bei der Ausführung der Stellaufgabe mit unterstützendem, diskreten, taktilen Feedback wird angenommen, da die Bedienzeit durch das taktile Feedback reduziert wird im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback. Die Hypothese H<sub>54</sub> bezüglich der Kodierung über ein taktilen Merkmal wird verworfen, da keine Reduktion der Bedienzeit festgestellt werden kann. In Bezug auf die mentale Beanspruchung werden beide Hypothesen H<sub>53</sub> und H<sub>55</sub> angenommen. Ein unterstützendes, diskretes, taktilen Feedback als auch die Kodierung über ein taktilen Merkmal reduzieren in dieser Studie die mentale Beanspruchung im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback.

	H <sub>n</sub>	Beschreibung	H <sub>n</sub> verwerfen
Effektivität	H <sub>46</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktilen Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>besseren Aufgabenerfüllung der Hauptaufgabe</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Nein
	H <sub>47</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktilen Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>besseren Aufgabenerfüllung der Stellaufgabe</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Ja
	H <sub>48</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktilen Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>geringeren Stelldifferenz</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Ja
	H <sub>49</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>besseren Aufgabenerfüllung der Hauptaufgabe</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Ja
	H <sub>50</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>besseren Aufgabenerfüllung der Stellaufgabe</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Ja
	H <sub>51</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>geringeren Stelldifferenz</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Ja

**Tabelle 7.24:** Zusammenfassung Hypothesenüberprüfung (Teil 1/2)

	H <sub>n</sub>	Beschreibung	H <sub>n</sub> verwerfen
Effizienz	H <sub>52</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktilen Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>geringeren Bedienzeit</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Nein
	H <sub>53</sub>	Ein <i>unterstützendes, taktilen Feedback</i> bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe führt zu einer <i>geringeren mentalen Beanspruchung</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Nein
	H <sub>54</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>geringeren Bedienzeit</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Ja
	H <sub>55</sub>	Die Integration eines <i>taktilen Merkmals</i> in den taktilen Skalenverlauf führt bei der Ausführung einer translatorischen Stellaufgabe zu einer <i>geringeren mentalen Beanspruchung</i> als bei der Ausführung über ein rein visuelles Feedback.	Nein

**Tabelle 7.24:** Zusammenfassung Hypothesenüberprüfung (Teil 2/2)

## 7.4 Fazit aus den drei Versuchsreihen zur Übertragung von taktilen Informationen bei der Handgestensteuerung

In Kapitel 7.4 folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse, der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Die Ergebnisse beziehen sich dabei auf den Skalen- aufbau des taktilen Feedbacks eines berührungslosen virtuellen Sliders im Kontext einer Haupt- und Nebenaufgabe. Ausgangspunkt der Untersuchung ist ein 300 mm langer horizontal ausgerichteter Slider, welcher über eine Schiebegeste bewegt werden kann (vgl. Kapitel 4.3.1). Dieser Slider ist mit einer taktilen Skala versehen, die dem Nutzer während der Ausführung der Schiebebewegung über fokussierte Ultraschallwellen ein Feedbackimpuls in die Handinnenfläche projiziert und so Rückmeldung über die aktuelle Skalenposition vermittelt (vgl. Kapitel 2.6). Der Fokus der Untersuchungen liegt darin, ein effektives, effizientes aber auch zufriedenstellendes Feedback der taktilen Skala zu generieren, welches den Nutzer bei der Ausführung einer Haupt- und Nebenaufgabe unterstützt (vgl. Kapitel 2.4).

Eine vergleichende, zusammenfassende Darstellung basierend auf Versuchsreihe VR03 ist in Bild 7.51 zu sehen. Die Normierung der Daten erfolgt im Bereich von 0 bis 1, wobei 0 jeweils dem unzureichenden Ergebnis und 1 jeweils dem optimal möglichen Ergebnis der Bewertung eines jeden Kriteriums zugeordnet wird.

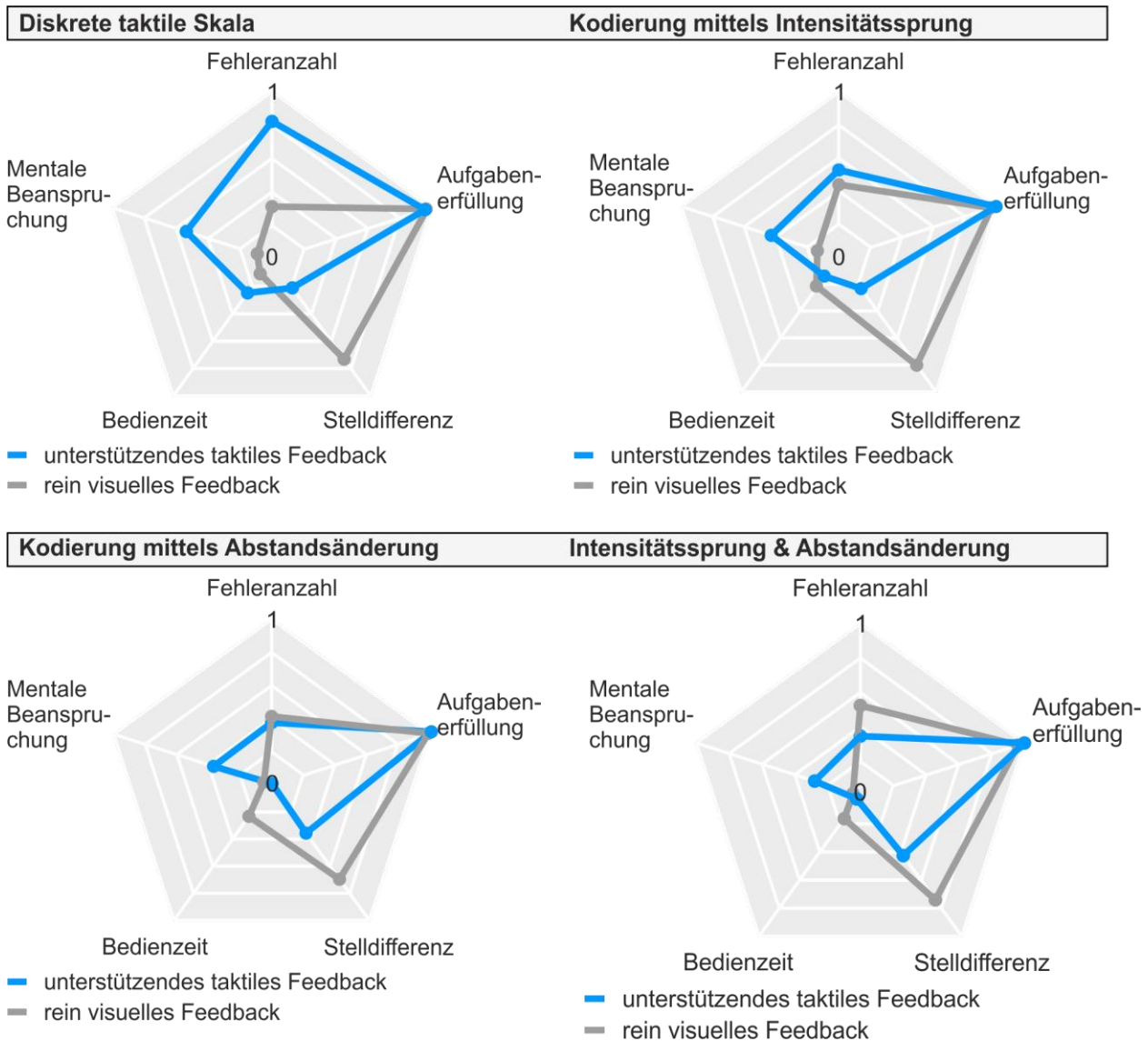
Die effektive, effiziente und zufriedenstellende Ausführung der Haupt- und Nebenaufgabe kann maßgeblich durch die Feedbackintensität als auch durch den Skalenabstand beeinflusst werden. Für die Bedienung über einen horizontalen Slider im Raum zur Einstellung eines definierten Skalenwertes ist anhand der durchgeführten Untersuchungen als Basisverlauf ein Skalenabstand von 30,00 mm bei einer Intensität von

100 % optimal. Eine Intensität von 100 % entspricht dabei einem Schalldruck von 1124,00 Pa. Der nächst größere Skalenabstand in dieser Untersuchung (37,50 mm) führt lediglich bei der Ausführung der Hauptaufgabe, der Bewertung der mentalen Beanspruchung sowie der Erlernbarkeit zu einer besseren Bewertung. Für die weitere Optimierung der taktilen Skala wären weitere Studien mit dem Fokus auf einen Skalenabstand zwischen 30,00 mm und 37,50 mm zweckmäßig. Hinsichtlich der Intensität ist zu klären, ob eine Intensität größer der derzeitigen Leistungsgrenze des Ultraschallarrays von 100 % (1124,00 Pa) zu noch besseren Ergebnissen führt. Anhand der durchgeführten Studien ist weiter ersichtlich, dass mit einem unterstützenden, diskreten, taktilen Feedback die Effektivität und Effizienz der Aufgabenbewältigung gesteigert werden kann und die Probanden weniger stark von der Hauptaufgabe abgelenkt werden als mit einem rein visuellen Feedback (siehe Bild 7.51). Die förderliche Wirkung eines unterstützenden, taktilen Feedbacks zeigen auch Studien von VO & BREWSTER [2015]. Darüber hinaus bestehen keine merklichen Unterschiede hinsichtlich der Erfüllung der Stellaufgabe mit und ohne unterstützendem, taktilen Feedback. Allerdings ist die Stelldifferenz bei der Ausführung mit taktilen Feedback größer, was auf die geringere Detaillierung der Skaleneinteilung des taktilen Feedbacks zurückzuführen ist. Hinsichtlich der Effizienz der Stellaufgabe folgen aus einem unterstützenden, diskreten, taktilen Feedback eine Reduktion der Bedienzeit sowie eine geringere mentale Beanspruchung während der Ausführung der Haupt- und Nebenaufgabe.

Die Übertragung von Informationen über den taktilen Wahrnehmungskanal ist anhand eines Unterschieds im Skalenverlauf des taktilen Feedbacks möglich. Anhand Versuchsreihe VR02 und VR03 kann eine definierte Skalenposition im Skalenverlauf über eine sprunghafte Änderung der Feedbackintensität, eine sprunghafte Änderung des Skalenabstands oder einer Kombination aus beiden gekennzeichnet werden. Basierend auf der Bewertungstabelle in Kapitel 7.2.6 wird eine Änderung im Skalenabstand von den Probanden dabei am besten wahrgenommen. Demnach ist eine sprunghafte symmetrische Vergrößerung des Skalenabstands von 30,00 mm auf 75,00 mm ( $\varphi = 2,50$ ) für die Kennzeichnung eines Unterschieds im Skalenverlauf bei der Bedienung über einen horizontalen Slider im Raum für die Einstellung eines definierten Skalenwertes optimal. Ein Unterschied im Skalenverlauf bei dem 50 % der Stellaufgaben korrekt ausgeführt werden, kann dabei bereits bei einem Stufensprung von  $\varphi = 1,60$  (48,00 mm) erreicht werden. Offen bleibt jedoch, ob eine weitere Vergrößerung des Skalenabstands zu noch besseren Ergebnissen hinsichtlich der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit führt. Eine



Kodierung im Feedbackverlauf, welche die taktilen und kinästhetischen Sensoren des Menschen stimuliert, führt zu einem besseren Bedienerfolg als eine rein taktile Stimulation der Mechanorezeptoren. Folglich ist die Kodierung einer Skalenposition geprägt durch eine intramodale Informationsübertragung im haptischen Wahrnehmungskanal.



**Bild 7.51:** Vergleichende Darstellung der Bedienung mit und ohne unterstützendem, taktilen Feedback VR03

Die vergleichende Untersuchung der Ausführung der Stellaufgabe mit und ohne taktilen Feedback zeigt, dass bei der Kodierung einer präferierten Skalenposition keine merkliche Verbesserung bezüglich der Fehleranzahl, der Aufgabenerfüllung oder der Bedienzeit auftreten (vgl. Bild 7.51). Die Stelldifferenz ist höher, was allerdings ebenfalls auf den geringeren Detaillierungsgrads der taktilen Skala zurückzuführen ist. Die Stelldifferenz liegt jedoch unter Ausschluss eines Ausreißers unter 10 %, was einer Abweichung von



kleiner 3 mm zur Zielposition in dieser Studie entspricht. Einzig die mentale Beanspruchung wird durch die taktile Kodierung des präferierten Skalenwerts reduziert.

Im Rahmen des untersuchten, statischen Use-Cases unterstützt das taktile Feedback eines virtuellen Sliders bei der Handgestensteuerung die Ausführung einer Haupt- und Nebenaufgabe. Ob dies auch auf einen dynamischen Anwendungsfall übertragen werden kann, ist anhand dieser Studie nicht belegbar, bietet aber Potenzial für weiterführende Untersuchungen. Ein taktiler Feedback in Form einer diskreten, taktilen Skala kann folglich zur Unterstützung bei der Bedienung eines virtuellen, translatorischen Bedienelements im Raum eingesetzt werden. Unterschiede in Form einer Änderung der Feedbackintensität oder des Skalenabstands entlang der taktilen Skala können wahrgenommen werden und für die Kennzeichnung einer Skalenposition genutzt werden. Vor allem die Reduktion der mentalen Beanspruchung und einer ähnlich guten Ausführung der Haupt- und Nebenaufgabe bei rein visuellem und unterstützendem, taktilen Feedback verdeutlichen das Potenzial des taktilen Feedbacks bei der Handgestensteuerung zur Steigerung der Gebrauchstauglichkeit. Ein Ansatzpunkt für weiterführende Studien bildet an diesem Punkt die multimodale Informationsübertragung. Von Interesse ist dabei, ob durch die Kombination des taktilen Feedbacks mit einem akustischen oder anderartigen visuellen Feedback sowie der Kombination aus allen drei eine weitere Steigerung der Gebrauchstauglichkeit bei der Handgestensteuerung erzielt werden kann. Das Vorhandensein des taktilen Feedbacks in dieser Arbeit führt letztendlich zur Steigerung der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit bei der Steuerung eines virtuellen Sliders über eine Handgeste.

## 8 Zusammenfassung der Arbeit

Wie Studien beispielsweise von HURSTEL & BECHMAN [2019] zeigen, sind Hygienebestimmungen, sterile Oberflächen und Lärm nicht zu unterschätzende Faktoren in einem OP-Saal, die das OP-Personal zusätzlich belasten. Daher gibt es zahlreiche Forschungsansätze die Beanspruchung des OP-Personals zu reduzieren. Ein bedeutender Ansatz liegt in der Steuerung medizinischer Geräte mittels Blick-, Sprach-, Körper- oder Handgesten. Allerdings treten die Nutzergruppen diesen Technologien mit Skepsis und geringer Akzeptanz entgegen, da meist eine direkte, aktive Rückmeldung des Systems bezüglich der getätigten Eingabe fehlt oder unzureichend kommuniziert wird. Das Verlangen der Nutzergruppe liegt in einem direkten Feedback analog der Eingabe über ein physisches Bedienelement. Der Fokus der vorliegenden Arbeit besteht aus einem unterstützenden, diskreten, taktilen Feedback bei der Handgestensteuerung im Kontext der Medizintechnik. Im Kern geht es um das taktile Feedback bei der Bedienung eines virtuellen, berührungslosen Sliders im Raum.

In einem ersten Schritt werden dazu in Kapitel 2 die Grundlagen behandelt, welche für den Aufbau des taktilen, ultraschallbasierten Feedbacks erforderlich sind. Neben der Eingrenzung der berührungslosen Bedienung bildet ein Kernpunkt die Mensch-Maschine-Schnittstelle mit dem Fokus des Stellteils als Anzeiger. Da das Feedback über den taktilen Wahrnehmungskanal detektiert wird, ist es notwendig die biologischen und physiologischen Grundlagen der taktilen Wahrnehmung sowie die technischen Grundlagen zur Fokussierung und Steuerung von Ultraschallwellen im Raum zu betrachten.

Das dritte Kapitel setzt sich mit dem Stand der Technik und Forschung auseinander. Dazu werden zunächst aktuelle Systeme sowie Forschungsansätze und Prototypen zur Hand- und Handgestendetektion sowie zur Erzeugung von taktilem Feedback im Raum betrachtet und analysiert. Dabei wird der Forschungsbedarf analysiert, Probleme und Defizite aufgezeigt und das Forschungsvorhaben dieser Arbeit hinsichtlich der Untersuchung des diskreten, taktilen Feedbacks eines virtuellen, berührungslosen Sliders eingegrenzt.

Kapitel 4 befasst sich anschließend mit der Herleitung der Versuchsparameter. Dazu werden Bedienelemente von medizinischen Geräten und Informationsinhalte, welche mittels eines taktilen Sliders übertragen werden können, analysiert. Anschließend erfolgt die Transformation der Informationsinhalte in taktile Darstellungsmöglichkeiten für einen virtuellen Slider im Raum mit Fokus auf die Steuerung von medizinischen Geräten. Die

Ableitung von taktil veränderlichen Gestaltungsparametern mit Fokus auf die Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwelle erfolgt in Kapitel 4.3. Es werden konkrete Parameter hinsichtlich der Ausrichtung des Sliders, der Sliderlänge, der Eingabeart, der Verlaufparameter bezüglich der Feedbackintensität und des Skalenabstands sowie dem Neigungswinkel des Ultraschallarrays erarbeitet und ausgewählt.

Die Planung und der Aufbau der Studie sind Bestandteil von Kapitel 5. Dazu wird zunächst der virtuelle Slider mit taktilen Feedback implementiert und der Gesamtaufbau des Versuchs beschrieben. Den Abschluss des fünften Kapitels bildet die Entwicklung des Fragebogens zur Bewertung der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit der Untersuchungsparameter.

In Kapitel 6 erfolgen Vorstudien angesichts der Bedienung des Sliders mit der dominanten und nicht dominanten Hand sowie zur Eingrenzung der Intensitätslevel sowie des Skalenabstands. Ebenfalls erfolgt eine Vorstudie zur Untersuchung des Einflusses des Neigungswinkels des Ultraschallarrays.

Insgesamt werden drei Versuchsreihen zur Identifizierung von Wahrnehmungsschwellwerten, der Unterschiedsschwelle sowie zur Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit eines unterstützenden, taktilen Feedbacks im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback durchgeführt (vgl. Kapitel 7).

Zu Beginn einer jeden Versuchsreihe werden neben den demographischen Daten wie beispielsweise Alter, Geschlecht, Händigkeit etc. die taktilen Fähigkeiten der Probanden erfasst. Dabei kommen standardisierte Tests der Neurowissenschaften zum Einsatz, wie beispielsweise die Messung der Zweipunktdiskriminationsschwelle oder der Semmes-Weinstein-Monofilament-Test sowie die Messung des Vibrationsempfindens nach Rydel-Seifer. Da die Probanden während des Versuchs gleichzeitig eine Haupt- und Nebenaufgabe ausführen, wird die Koordination zwischen linker und rechter Hand mittels des Tests „Zweihand Koordination“ des Wiener Testsystems gemessen.

Während des Hauptversuchs besteht die Aufgabe der Probanden in der Ausführung einer Konzentrationsaufgabe im inneren eines medizinischen Phantoms in Anlehnung an ein Operationsszenario und dem parallelen Einstellen eines zuvor definierten Skalenwerts des virtuellen Sliders im Raum mit Hilfe des taktilen Feedbacks.

An der ersten Versuchsreihe (vgl. Kapitel 7.1) nahmen insgesamt 31 Probanden teil. Das Ziel der ersten Versuchsreihe liegt in der Identifizierung eines Basisverlaufs der taktilen Skala in Bezug auf die Feedbackintensität und den Skalenabstand. Dazu werden den

Probanden 25 Versuchsmerkmale mit unterschiedlichen Feedbackintensitäten und Skalenabständen nach DIN 323-1 [1974] in randomisierter Weise präsentiert. In Bezug auf die Gebrauchstauglichkeit des taktilen Feedbacks wurden die Versuchsmerkmale anhand der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit mittels objektiver und subjektiver Daten wie beispielsweise der Aufgabenerfüllung, Bedienzeit, Beurteilung der Intensität oder Präzision des Feedbacks durch die Probanden bewertet. Die Ergebnisdarstellung erfolgte zum einen deskriptiv durch Balken- und Box-Plot-Diagramme als auch durch inferenzstatistische Betrachtung der Ergebnisse der jeweiligen Bewertungskategorien mittels des Friedman-Tests mit Post-hoc-Test nach Dunn-Bonferroni. Durch eine anschließende Diskussion der Ergebnisse und einer Hypothesenüberprüfung konnte im Rahmen dieser Studie für die parallele Ausführung einer Haupt- und Nebenaufgabe ein Skalenabstand von 30,00 mm und einem Schalldruck von 1124,00 Pa als idealen Aufbau der taktilen Skala identifiziert werden. Die Wahrnehmungsschwelle liegt bei einem Skalenabstand von 30,00 mm und einem Schalldruck von 674,40 Pa.

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe werden genutzt, um in der zweiten Versuchsreihe (VR02) taktile Parameter hinsichtlich der Kodierung einer gewünschten Skalenposition zu untersuchen. Untersucht wurde die Unterschiedsschwelle von 20 verschiedenen Kodierungsmerkmalen, welche sich nach DIN 323-1 [1974] definierten Faktoren aus einem Intensitätssprung in positiver als auch negativer Richtung sowie einer sprunghaften Änderung des Skalenabstands zusammensetzten. Insgesamt 30 Probanden nahmen an der Studie teil. Das Ziel der Studie lag auf einer effektiven, effizienten und zufriedenstellenden Bedienung des taktilen Sliders im Raum, welche wiederum mittels eines Fragebogens analog zu Versuchsreihe VR01 erfasst wurde. Die Auswertung der Studie erfolgte analog zur Versuchsreihe VR01 mittels deskriptiver und inferenzstatistischer Verfahren. Infolgedessen ist für die taktile Kodierung innerhalb eines Skalenverlaufs eines horizontalen Sliders die Kodierung über eine symmetrische, sprunghafte Vergrößerung des Skalenabstands von 30,00 mm auf 75,00 mm ( $\varphi = 2,50$ ) am besten geeignet. Dies entspricht dem Maximalwert von 75,00 mm im Rahmen dieser Untersuchung. Die Unterschiedsschwelle zur Wahrnehmung einer Änderung im Skalenverlauf wird bei einem Stufensprung um  $\varphi = 1,60$  (48,00 mm) erreicht.

In einer abschließenden Versuchsreihe VR03 wurde untersucht, ob durch ein zusätzliches taktiler Feedback die Ausführung der Haupt- und Nebenaufgabe hinsichtlich der Effektivität und Effizienz im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback verbessert wird. Dazu wurde zum einen der Basisverlauf aus Versuchsreihe VR01 als auch die Kodierung

einer gewünschten Skalenposition mittels eines Intensitätssprungs, einer sprunghaften Änderung des Skalenabstands als auch die Kombination daraus (vgl. VR02) mit der Bedienung über ein rein visuelles Feedback einer Skalenanzeige verglichen. An dieser Studie nahmen insgesamt 15 Probanden teil. Anhand der deskriptiven Auswertung der Daten mittels Balken- und Box-Plot-Diagrammen konnte gezeigt werden, dass durch das unterstützende, diskrete, taktile Feedback des virtuellen Sliders im Raum eine effektivere und effizientere Ausführung der Haupt- und Nebenaufgabe im Vergleich zu einem rein visuellen Feedback möglich und die mentale Beanspruchung niedriger ist.

Die Arbeit schließt mit einem Fazit aus den drei Versuchsreihen, woraus das Potenzial des taktilen Feedbacks zur Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit bei der Handgestensteuerung von medizinischen Geräten ersichtlich wird.

## 9 Ausblick

Die Untersuchungen dieser Arbeit legen eine erste Basis für den Gestaltungsspielraum eines taktilen Feedbacks im Raum zur Unterstützung bei der Gestensteuerung. Gleichzeitig bietet es einen Schritt zur Reduktion der Komplexität virtueller Bedienelemente, indem derzeitige, virtuelle Bedienelemente in den Raum zur Handgestensteuerung transferiert werden, aber dem Nutzer dennoch eine taktile Rückmeldung geben. Diese Arbeit beschreibt einen Aspekt der Möglichkeiten der Gestaltung solch eines taktilen Feedbacks bei der Handgestensteuerung. In dieser Hinsicht werden in diesem Kapitel weitere auf dieser Arbeit aufbauende mögliche Forschungsansätze aufgezeigt.

Im Hinblick auf den Einsatz des virtuellen Sliders mit taktilen Feedback im Raum in einem medizinischen Kontext ist es zunächst erforderlich, die Studie mit der eigentlichen Fokusgruppe, bestehend aus Chirurgen und OP-Personal, zu wiederholen und die in dieser Studie generierten Ergebnisse zu validieren. In gleicher Weise müssen die derzeit ermittelten Parameter im Rahmen einer repräsentativen Studie im Hinblick auf die Bedienung mit OP-Handschuhen evaluiert werden. Im folgenden Entwicklungsschritt könnte dann der virtuelle Slider mit diskretem, taktilen Feedback in ein medizinisches Gerät wie zum Beispiel die Beleuchtungssteuerung im Behandlungsraum oder die Zoomfunktion auf einem Bildschirm integriert werden, welcher dann anhand von ersten klinischen Studien nach IEC 62366-1 [2015] getestet werden könnte. Gleichwohl ist dabei auch eine Kombination des taktilen Feedbacks von virtuellen Bedienelementen im Raum mit AR- oder VR-Anwendungen zu Trainings- und Ausbildungszwecken denkbar.

Neben den beschriebenen weiterführenden anwendungsbezogenen Forschungs- und Entwicklungsansätzen bezüglich der Eignung des taktilen Feedbacks im Kontext der Medizintechnik bieten ebenfalls grundlagenorientierte Forschungsthemen weitere Ansatzpunkte.

Die bisherigen Untersuchungen wurden mit einem ortsfesten Ultraschallarray (Ultrahaptics STRATOS Explore) durchgeführt. Ortsfest bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Kameramodul zur Gestendetektion und das Ultraschallarray zur Feedbackgenerierung fest miteinander verbunden sind. Dadurch wird der derzeitige Bedienradius zur Ausführung der Handgeste mit taktilen Feedback zum einen durch den Öffnungswinkel der Kamera und zum anderen durch den Ausgaberaum des Feedbacks aufgrund von physikalischen Bedingungen bezüglich der Fokussierung der Ultraschallwellen

begrenzt. Eine interessante Forschungsfrage besteht daher in der Erweiterung der Ausgabefläche des taktilen Feedbacks durch beispielsweise die Entkopplung des Kamerasystems vom Ultraschallarray oder der Kopplung mehrerer Ultraschallarrays und der damit verbundenen Erweiterung des Eingabebereichs. Relevante Forschungsfragen ergeben sich überdies hinsichtlich der maximalen Sliderlänge und der maximal sinnvollen Anzahl an Rastpunkten eines virtuellen berührungslosen Sliders.

Die bisherigen Untersuchungen berücksichtigen unterdessen lediglich die Bedienung eines virtuellen, taktilen Sliders, welcher über eine plane horizontale Eingabebewegung bedient wird. Im Rahmen weiterer Studien wäre es daher förderlich einen vertikalen Slider, welcher in dieser planen Ebene senkrecht zum horizontalen Slider aufgebaut wird, zu untersuchen. Neben einer planen, horizontalen Anordnung des Ultraschallarrays wäre es ferner ebenfalls denkbar, Untersuchungen zu einem senkrecht in der Wand integrierten Ultraschallarrays durchzuführen.

Ein weiterer Forschungsansatz besteht in der Untersuchung des taktilen Feedbacks weiterer Eingabemöglichkeiten, wie beispielsweise über eine Rotations- oder eine Auswahlbewegung, das sog. Tapping. Dazu sind Untersuchungen mit einem virtuellen Drehbedienelement oder mit einem virtuellen Button nötig. Hinsichtlich der Buttonbedienung existieren erste grundlegende Untersuchungen von VO & BREWSTER [2015], FRIEDRICH ET AL. [2022] oder SCHMID ET AL. [2021A], die allerdings noch keine Aussage über konkrete Feedbackparameter zulassen.

Zur Übertragung von Informationen via taktilen Feedback sind ferner weitere Skalenverläufe von Interesse. Beispielsweise könnten neben einer linearen Zu- oder Abnahme auch exponentielle oder quadratische Funktionen genutzt werden. Neben der Ausführung als diskretes, taktilen Feedback wäre zugleich die Ausführung über sich ändernde Geometrien, Formen, Symbole oder Buchstaben als Flächenprojektion oder dreidimensionales virtuelles Gebilde im Raum, ähnlich einem Hologramm mit taktiler Rückmeldung, denkbar. Dazu sind elementare Studien bezüglich der Erkennbarkeit von diversen Geometrien, Formen, Buchstaben oder Symbolen zwangsläufig nötig.

Ein fundamentaler Schritt der taktilen Informationsübertragung bei der berührungslosen Bedienung einer virtuellen Mensch-Maschine-Schnittstelle im Raum besteht in der Kombination verschiedener virtueller Bedienelemente und deren Eingabemodalitäten im Hinblick auf die Feedbackgestaltung und den Einfluss auf eine effektive, effiziente und zufriedenstellende Bedienung. Die Erkenntnisse der Resultate solch einer Untersuchung

ließen sich in einem Gestaltungskatalog für den Einsatz der verschiedenen Bedienelemente mit einer entsprechenden Feedbackmodalität hinsichtlich des Bedienszenarios zusammenfassen. Daran angliedern lassen sich auch Untersuchungen zur multimodalen Informationsübertragung hinsichtlich der Kombination des taktilen Feedbacks mit einem akustischen oder visuellen Feedback sowie der Kombination aus allen drei Möglichkeiten.

Ein weitläufigerer Forschungsansatz liegt in der Kombination virtueller berührungsloser Mensch-Maschine-Schnittstellen mit taktilem Feedback und Künstlicher Intelligenz (KI) zur Analyse der Bediensituation und adaptiven Anpassung des taktilen Feedbacks beziehungsweise der Feedbackmodalität. Denkbar wäre hier die sensorbasierte Erfassung stressrelevanter Parameter wie beispielsweise Lärm im OP oder Puls bzw. Blutdruck des Chirurgen wobei über Künstliche Intelligenz die Daten ausgewertet und die Mensch-Maschine-Schnittstelle oder das Bedienelement an die jeweilige Situation adaptiv angepasst werden.

Darüber hinaus könnte das taktile Feedback im Raum und die Handgestensteuerung für die Bedienung von medizinischen Robotern in der Chirurgie genutzt werden. Es wäre damit möglich, mittels der Handgestensteuerung menschliche Bewegungen auf einen Roboterarm wie beispielsweise eine Greifbewegung zu übertragen und gleichzeitig via Ultraschallwellen dem Benutzer ein taktiles Feedback bei der Präparation von anatomischen Strukturen zurückzumelden. Dazu müssten allerdings weitere Untersuchungen zu möglichen weiteren Projektionsorten des taktilen Feedbacks durchgeführt werden.

Anwendungsmöglichkeiten über die Medizintechnik hinaus ergeben sich beispielsweise im Mobilitätssektor zur Bedienung des Infotainmentsystems. Anwendungsmöglichkeiten könnten die Regulierung der Lautstärke des Radios oder die Einstellung der Gebläsestufe während der Fahrt sein. Auch im Hinblick auf die Covid-19-Pandemie ergeben sich Anwendungsfelder für die berührungslose Interaktion zum Beispiel bei der Bedienung von Bank- oder Fahrkartenautomaten sowie von interaktiven Informationstafeln.



## Literaturverzeichnis

- ALEXANDER ET AL. 2011 Alexander, J., Marshall, M. T., Subramanian, S.: Adding haptic feedback to mobile tv. In: CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '11). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2011, S. 1975–1980.
- ALSHAMMARI ET AL. 2017 Alshammari, D., Sica, M., Osailan, S., Hong Tuan, V., Talon, I., Schneider, A., Kuhn, P., Zores, C., Moog, R., Becmeur, F.: Noise in a university operating theatre during the course of pediatric surgical procedures. In: *Current Pediatric Research* (2017), 21 (4), S. 572-576.
- AMEUR ET AL. 2016 Ameer, S., Khalifa, A. B., Bouhleb, M. S.: A comprehensive leap motion database for hand gesture recognition. In: 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), Tunisia, 2016, S. 514-519.
- ANGUELOV ET AL. 2006 Anguelov, N., Blossy, S., Schmauder, M.: Steigerung der Wertanmutung von Bedienteilen im Kfz-Innenraum durch psychohaptische Kenngrößen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaften (GfA) (Hrsg.): *Dokumentation des 52. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses: Innovationen für Arbeit und Organisation* (Stuttgart). Dortmund: GfA-Press, 2006.
- ANSORGE & LEDER 2011 Ansoerge, U.; Leder, H.: *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2011.
- ARAFSHA ET AL. 2015 Arafsha, F., Zhang, L., Dong H., El Saddik, A.: Contactless haptic feedback: state of the art. In: *IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*, 2015, S. 1-6.
- ASENDORPF 2009 Asendorpf, J. B.: *Persönlichkeitspsychologie - für Bachelor*. Heidelberg: Springer, 2009.
- AUMÜLLER ET AL. 2017 Aumüller, G., Aust, G., Conrad, A., Engele, J., Kirsch, J., Maio, G., Mayerhofer, A., Mense, S., Reißig, D.: *Duale Reihe Anatomie. 4., aktualisierte Auflage*, Thieme, Stuttgart, 2017.
- AZHARI 2010 Azhari, H.: *Basics of Biomedical Ultrasound for Engineers*. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2010.
- BACKHAUS 2010 Backhaus, C.: *Usability-Engineering in der Medizintechnik: Grundlagen – Methoden - Beispiele*. Berlin: Springer, 2010.
- BAGGEN & HEMMERLING 2000 Baggen, R., Hemmerling, S.: Evaluation von Benutzbarkeit in Mensch-Maschine-Systemen. In: Kolrep, H., Timpe, K. P. (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systemtechnik*. Wiesbaden, Gabler, 2000.
- BASSILY ET AL. 2014 Bassily, D., Georgoulas C., Guettler, J., Linner, T., Bock, T.: Intuitive and Adaptive Robotic Arm Manipulation using the Leap Motion Controller. In: *ISR/Robotik 2014: 41<sup>st</sup> International Symposium on Robotics*, 2014, S. 1-7.
- BERENTZEN & LENNARTZ 2010 Berentzen, J., Lennartz, S.: Arbeitsplatz Operationsabteilung: Physische Belastungen für OP-Personal - Möglichkeiten der Gesundheitsförderung und Prävention. In: *OP-Journal* (2010), 26, S. 48–53.
- BGI/GUV-I 5048-2 2010 Ergonomische Maschinengestaltung von Werkzeugmaschinen der Metallbearbeitung. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin, Dezember 2010.
- BIANCHI ET AL. 2011 Bianchi, M., Gwilliam, J. C., Degirmenci, A., Okamura, A. M.: Characterization of an air jet haptic lump display. In: *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2011, S. 3467-3470.
- BIRBAUMER 2006 Birbaumer, N., Schmidt, R. F.: *Biologische Psychologie. 6. Aufl.*, Berlin: Springer-Medizin-Verlag, 2006.
- BISWAS ET AL. 2014 Biswas, A., Manivannan, M., Srinivasan, M. A.: Vibrotactile sensitivity threshold: nonlinear stochastic mechanotransduction model of the Pacinian Corpuscle. In: *IEEE transactions on haptics*, 8(1), 2015, S. 102–113.
- BIZZOTTO ET AL. 2014 Bizzotto, N., Costanzo, A., Bizzotto, L., Regis, D., Sandri, A., Magnan, B.: Leap motion gesture control with OsiriX in the operating room to control imaging: first experiences during live surgery. In: *Surgical innovation*, 21(6), 2014, S. 655–656.
- BLAKE & GUROCAK 2009 Blake, J., Gurocak, H. B.: Haptic Glove With MR Brakes for Virtual Reality. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14(5), 2009, S. 606–615.
- BLEYER ET AL. 2008 Bleyer, T., Hold, U., Rademacher, U., Windel, A.: Belastungen des Hand-Arm-Systems als Grundlage einer ergonomischen Produktbewertung. Fallbeispiel: Schaufeln. In *Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Medizin (baua)*, 2008, S.1-121.
- BOSENICK ET AL. 2006 Bosenick, T., Hassenzahl, M., Müller-Prove, M.: Usability Professionals 2006. In: *IUUI – Intuitive use of user interfaces*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2006.
- BOUZIT ET AL. 2002 Bouzit, M., Burdea, G. C., Popescu, G., Boian, R.: The Rutgers Master II—New design force-feedback glove. In: *IEEE/ASME Trans.Mechatron.*, vol. 7, no. 2, 2002, S. 256–263.
- BORTZ & LIENERT 2008 Bortz, J., Lienert, G. A.: *Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung: Leitfaden für die verteilungsfreie Anaöyse kleiner Stichproben. 3. Auflage*. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2008.

- BRANDES ET AL. 2019 Brandes, R., Lang, F., Schmidt, R. F.: Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie. 32. Auflage. Spribger Verlag GmbH Austria 2019.
- BUBB 2004 Bubb, H.; Rausch, H.: Mit welchen Bedienelementen können Autos gelenkt werden? Steuerung von Kraftfahrzeugen.  
[http://www.integral2.iaw.rwth-aachen.de/course.php?co\\_id=27&co\\_inst=216&SID=fa45de769dc6ea7e31d5aaa1445873ce](http://www.integral2.iaw.rwth-aachen.de/course.php?co_id=27&co_inst=216&SID=fa45de769dc6ea7e31d5aaa1445873ce), zuletzt aktualisiert am 19.01.2004, zuletzt geprüft am 13.06.2008.
- BUBB 2001 Bubb, H.: Haptik im Kraftfahrzeug. In: Jürgensohn, T.; Timpe, K.-P. (Hrsg.): Kraftfahrzeugführung, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2001, S. 155–175.
- BULLINGER 1994 Bullinger, H.-J.: Ergonomie - Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung. Stuttgart: Teubner, 1994.
- BUSCH-VISHNIAC ET AL. 2005 Busch-Vishniac, I. J., West, J. E., Barnhill, C., Hunter, T., Orellana, O., Chivukula, R.: Noise levels in John Hopkins Hospital. In: The Journal of the Acoustical Society of America (2005), 118, S. 3629-3645.
- BUTZ & KRÜGER 2017 Butz, A., Krüger, A.: Mensch-Maschine-Interaktion. 2. erweiterte Auflage, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2017.
- CABREIRA & HWANG 2016 Cabreira, A. T., Hwang, F.: How Do Novice Older Users Evaluate and Perform Mid-Air Gesture Interaction for the First Time? In: Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction (NordiCHI '16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 122, 2016, S. 1–6.
- CARTER ET AL. 2013 Carter, T., Seah, S. A., Long, B., Drinkwater, B. W., Subramanian, S.: UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In: Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2013. S. 505–514.
- CHARWAT 1994 Charwat, H. J.: Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation. 2. Aufl., München: Oldenbourg Verlag, 1994.
- CATLEY ET AL. 2013 Catley, M.J., Tabor, A., Wand, B.M., Moseley, G. L.: Assessing tactile acuity in rheumatology and musculoskeletal medicine - how reliable are two-point discrimination tests at the neck, hand, back and foot? Rheumatology (Oxford), 52(8), 2013, S. 1454-61.
- CHOUVARDAS ET AL. 2008 Chouvardas, V. G., Miliou, A. N., Hatalis, M. K.: Tactile displays: Overview and recent advances. Displays, 29(3), 2008, S. 185–194.
- CILLES ET AL. 2019 Chilles, J., Frier, W., Abdouni, A., Giordano, M., Georgiou, O.: Laser Doppler Vibrometry and FEM Simulations of Ultrasonic Mid-Air Haptics. In: IEEE World Haptics Conference (WHC), 2019, S. 259-264.
- COHEN 1988 Cohen, J.: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2nd ed. Hillsdale N.J, L. Erlbaum Associates, 1988.
- DAHM 2006 Dahm, M.: Grundlagen der Mensch-Computer-Interaktion. München: Pearson Education Deutschland GmbH, 2006.
- DALECKI ET AL. 1995 Dalecki, D., Child, S. Z., Raeman C. H., Carstensen E. L.: Tactile perception of ultrasound. In: The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 97, no. 5, 1995, S. 3165–3170.
- DIN 323-1 1974 Normzahlen und Normzahlreihen. Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, August 1974.
- DIN 33402-2 2005 Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dezember 2005.
- DIN EN 894-1 2009 Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Januar 2009.
- DIN EN ISO 9241-11 2018 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, November 2018.
- DIN EN ISO 9241-110 2008 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, September 2008.
- DIN EN ISO 9241-210 2019 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, März 2020.
- DIN EN ISO 9241-410 2012 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 410: Gestaltungskriterien für physikalische Eingabegeräte. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dezember 2012.
- DIN EN ISO 9241-420 2011 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 420: Auswahlverfahren für physikalische Eingabegeräte. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Oktober 2011.
- DIN EN ISO 9241-910 2011 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, November 2011.
- DIN EN ISO 9241-960 2018 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 960: Rahmen und Anleitung zur Gestensteuerung. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Januar 2018.
- DIX ET AL. 2004 Dix, A.; Human-computer interaction. 3rd ed., Pearson/Prentice-Hall, Harlow England, New York, 2004.
- DRESSLER ET AL. 2011 Dressler, C. R., Neumuth, T., Fischer, M., Abri, O., Strauss, G.: Intraoperative Bedienung einer elektronischen Patientenakte durch den Operateur. In: HNO 59 (2011), S. 900-907.

- DUDEN 2023A Duden - Die deutsche Rechtschreibung. Cornelsen Verlag GmbH, 2023: (online) <https://www.duden.de/rechtschreibung/System> (abgerufen am 09.01.2023)
- DUDEN 2023B Duden - Die deutsche Rechtschreibung. Cornelsen Verlag GmbH, 2023: (online) <https://www.duden.de/rechtschreibung/Haptik> (abgerufen am 09.01.2023)
- DUDEN 2023C Duden - Die deutsche Rechtschreibung. Cornelsen Verlag GmbH, 2023: (online) <https://www.duden.de/rechtschreibung/Information> (abgerufen am 09.01.2023)
- EVANGELOU ET AL. 2021 Evangelou, G., Limerick H., Moore, J.: I feel it in my fingers! Sense of agency with mid-air haptics. In: IEEE World Haptics Conference (WHC), 2021, S. 727-732.
- FEIGENSPAN 2017 Feigenspan, A.: Prinzipien der Physiologie. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.
- FENG ET AL. 2021 Feng, Y., Uchidiuno, U. A., Zahiri, H. R., George, I., Park, A. E., Mentis, H.: Comparison of Kinect and Leap Motion for Intraoperative Image Interaction. *Surgical innovation*, 28(1), 2021, S. 33-40.
- FISCHER 2006 Fischer, K.: What computer talk is and is not: Human-computer conversation as intercultural communication. Bd. 17, Saarbrücken: AQ-Verlag, 2006.
- FITCH ET AL. 2011 Fitch, G. M., Hankey, J. M., Kleiner, B. M., Dingus, T. A.: Driver comprehension of multiple haptic seat alerts intended for use in an integrated collision avoidance system. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 14, Nr. 4, 2011, S. 278-290.
- FLEISHMAN 1954 Fleishman, E. A.: Dimensional analysis of psychomotor abilities. *Journal of Experimental Psychology*, 48, 1954, S. 437-454.
- FREEMAN ET AL. 2017 Freeman, E., E., Anderson, R., Williamson, J., Graham Wilson, Brewster, S. A.: Textured surfaces for ultrasound haptic displays. In: *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, S. 491-492.
- FRIEDRICH ET AL. 2022 Friedrich, M., Bernhagen, M., Widmann, L., Bullinger, A.: Get in touch with mid-air haptic feedback: Human centered design of feedback patterns. *GfA-Frühjahrskongress*, Magdeburg, 2022.
- FRIER ET AL. 2013 Yoshino, K., Shinoda, H.: Visio-Acoustic screen for contactless touch interface with tactile sensation. *World Haptics Conference (WHC)*, 2013, S. 419-423.
- FRIER ET AL. 2018 Frier, W., Ablart, D., Chilles, J. S., Long, B., Giordano, M., Obrist, M., Subramanian, S.: Using Spatiotemporal Modulation to Draw Tactile Patterns in Mid-Air. *EuroHaptics*. In: Prattichizzo, D.; Shinoda, H.; Tan, H. Z.; Ruffaldi, E.; Frisoli, A. (Hrsg.): *Haptics: Science, Technology, and Applications*. Springer International Publishing, 2018, S. 270-281.
- FRIER ET AL. 2022 Frier, W., Abdouni, A., Pittera, D., Georgiou, O., Malkin, R.: Simulating Airborne Ultrasound Vibrations in Human Skin for Haptic Applications. In: *IEEE Access*, 10, 2022, S. 15443-15456.
- FRINGS & MÜLLER 2019 Frings, S., Müller, F.: *Biologie der Sinne*. Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- GEIGER 2003 Geiger, M.: *Berührungslose Bedienung von Infotainment-Systemen im Fahrzeug*. Universität München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Dissertation, 2003.
- GEORGIU ET AL. 2017 Georgiou O., Biscione, V., Harwood, A., Griffiths, D., Giordano, M., Long, B., Carter, T.: Haptic In-Vehicle Gesture Controls. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Adjunct (AutomotiveUI '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2017, S. 233-238.
- GEORGIU ET AL. 2018 Georgiou, O., Jeffrey, C., Chen, Z., Tong, B. X., Chan, S. H., Yang, B., Harwood, A., Carter, T.: Touchless Haptic Feedback for VR Rhythm Games. *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2018, S. 553-554.
- GEORGIU ET AL. 2022 Georgiou, O., Martinez, J., Abdouni A., Harwood, A.: Mid-air Haptic Texture Exploration in VR. In: *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 2022, S. 964-965.
- GESCHIEDER ET AL. 2002 Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J., Pope, J. V., Verrillo, R. T.: A four-channel analysis of the tactile sensitivity of the fingertip: frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation. *Somatosensory & motor research*, 19(2), 2002, S. 114-124.
- GIBSON 1966 Gibson, J. J.: *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin, 1966.
- GIL ET AL. 2018 Gil, H., Son, H., Kim, J. R., Oakley I.: Whiskers: Exploring the Use of Ultrasonic Haptic Cues on the Face. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 658, 2018, S. 1-13.
- GIRDLER & GEORGIU 2020 Girdler, A., Georgiou, O.: Mid-Air Haptics in Aviation - creating the sensation of touch where there is nothing but thin air. *ArXiv*, abs/2001.01445, 2020.
- GITT 1994 Gitt, W.: *Am Anfang war die Information*. 2. Aufl., Neuhausen-Stuttgart: Hänssler, 1994.
- GOLDSTEIN 2008 Goldstein, E. B.: *Wahrnehmungspsychologie - Der Grundkurs*. Irtel, H. (Hrsg.), 7. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- GOLDSTEIN 2015 Goldstein, B. E.: *Wahrnehmungspsychologie*. Irtel, H. (Hrsg.), 9. Auflage, Heidelberg: Spektrum Verlag, 2015.

- GRUNWALD & BEYER 2001 Grunwald M.; Beyer L.: Der bewegte Sinn: Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2001.
- GRUNWALD & MÜLLER 2017 Grunwald, M.; Müller, S.: Wissenschaftliche Grundlagen der Palpation. In: Lehrbuch der Osteopathischen Medizin. Mayer, J., Standen, C., Barral, J.-P. [Hrsg.], Elsevier, Urban & Fischer, 2017, S. 251-265.
- GU ET AL. 2016 Gu, X., Zhang, Y., Sun, W., Bian, Y., Zhou, D., Kristensson, P. O.: Dexmo: An Inexpensive and Lightweight Mechanical Exoskeleton edback in VR. In: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, San Jose, CA, USA, 2016, S. 1991–1995.
- HÄNSEL ET AL 2016 Hänsel, F., Baumgärtner, S. D., Kornmann, J. M., Ennigkeit, F.: Kognition. In: Hänsel, F.; Baumgärtner, S. D.; Kornmann, J.; Ennigkeit, F. [Hg.], Springer-Lehrbuch. Sportpsychologie. Heidelberg, Berlin: Springer 2016, S. 23-52.
- HAGENDORFER 2011 Hagendorf, H., Krummenacher, J., Müller, H.-J., Schubert, T.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit: Allgemeine Psychologie für Bachelor. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- HAJAS ET AL. 2020 Hajas, D., Pittera, D., Nasce, A., Georgiou O., Obrist, M.: Mid-Air Haptic Rendering of 2D Geometric Shapes With a Dynamic Tactile Pointer. In: IEEE Transactions on Haptics, vol. 13, no. 4, S. 806-817, 2020.
- HAMPEL 2011 Hampel, T.: Untersuchungen und Gestaltungshinweise für adaptive multifunktionale Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Dissertation, 2011.
- HARRINGTON ET AL. 2018 Harrington, K., Large, D. R., Burnett, G., Georgiou O.: Exploring the Use of Mid-Air Ultrasonic Feedback to Enhance Automotive User Interfaces. In: Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018, S. 11-20.
- HASEGAWA ET AL. 2018 Hasegawa, S., Konyo, M., Kyung, K.-U., Nojima, T., Kajimoto, H.: Haptic Interaction (Bd. 432). Singapur: Springer Singapore, 2018.
- HASEGAWA & SHINODA 2018 Hasegawa, K., Shinoda, H.: Aerial vibrotactile display based on multiunit ultrasound phased array. In: IEEE Trans. Haptics 11(3), 2018, S. 367–377.
- HEDDERICH & SACHS 2018 Hedderich, J., Sachs, L.: Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. 16. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2018.
- HEINECKE 2012 Heinecke, A. M.: Mensch-Computer-Interaktion. Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- HILZ ET AL.1998 Hilz, M., J., Axelrod, F. B., Hermann, K., Haertl, U., Duetsch, M., Neundörfer, B.: Normative values of vibratory perception in 530 children, juveniles and adults aged 3-79 years. J Neurol Sci., 159 (2), 1998, S. 219-225.
- HOFFMEYER 2013 Hoffmeyer, A.: Integration komplexer dynamischer Systeme in Augmented-Reality-Anwendungen im Fabriklebenszyklus und in der Fabrikplanung. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2013.
- HOSHI & SHINODA 2016 Hoshi, T., Shinoda, H.: Airborne Ultrasound Tactile Display. In: Kajimoto, H., Saga, S., Konyo, M. (eds) Pervasive Haptics. Japan: Springer, 2016.
- HOSHI 2011 Hoshi, T.: Development of aerial-input and aerial-tactile-feedback system. In: IEEE World Haptics Conference, 2011, S. 569-573.
- HOSHI 2012 Hoshi, T.: Development of portable device of airborne ultrasound tactile display. In: Proceedings of SICE Annual Conference (SICE), 2012, S. 290-292.
- HOSHI ET AL. 2009A Hoshi, T., Iwamoto T., Shinoda, H.: Non-contact tactile sensation synthesized by ultrasound transducers. In: World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2009, S. 256-260.
- HOSHI ET AL. 2009B Hoshi, T., Abe, D., Shinoda, H.: Adding tactile reaction to hologram. In: RO-MAN 2009-The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2009, S. 7-11.
- HOSHI ET AL. 2010 Hoshi, T., Takahashi, M., Iwamoto, T., Shinoda, H.: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound. In: IEEE transactions on haptics, 3(3), 2010, S. 155-165.
- HOWARD ET AL. 2019 Howard, T., Gallagher, G., Lécuyer, A., Pacchierotti C., Marchal M.: Investigating the Recognition of Local Shapes Using Mid-air Ultrasound Haptics. In: IEEE World Haptics Conference (WHC), 2019, S. 503–508.
- HOYOS 1990 Graf, C. H.: Ingenieurpsychologie. Verlag für Psychologie, Dr. C. J. Hogrefe, Göttingen, 1990.
- HUNG ET AL. 2013 Hung, G. M. Y., John, N. W., Hancock, C., Gould, D. A., Hoshi, T.: UltraPulse-simulating a human arterial pulse with focussed airborne ultrasound. In: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference vol. 2013, 2511-4. 2013, S. 2511–2514.
- HUNG ET AL. 2014 Hung, G.M.Y., John, N.W., Hancock, C., Hoshi, T.: Using and Validating Airborne Ultrasound as a Tactile Interface within Medical Training Simulators. In: Bello, F., Cotin, S. (Hrsg.), Biomedical Simulation, ISBMS 2014, Lecture Notes in Computer Science, vol 8789. Springer, Cham, 2014, S. 30-39.
- HURSTEL & BECHMANN 2019 Hurstel, A., Bechmann, D.: Approach for Intuitive and Touchless Interaction in the Operating Room. J, 2(1), 2019, S. 50-64.

- IEC 62366-1 2015 Medical devices - Part 1: Application of usability engineering to medical devices. International Organization for Standardization, 2015
- ITO ET AL. 2018 Ito, K., Okamoto, S., Ellekey, H., Yamada, Y.: High-Quality Texture Display: The Use of Vibrotactile and Variable-Friction Stimuli in Conjunction. In: Hasegawa, S., Konyo, M., Kyung, K.-U., Nojima, T.; Kajimoto, H. [Hg.], *Lecture Notes in Electrical Engineering, Haptic Interaction*, Singapore: Springer Singapore, 2018, S. 125-130.
- IWAMOTO ET AL. 2008 Iwamoto, T., Tatezono, M., Hoshi, T., Shinoda, H.: Airborne ultrasound tactile display. In: *ACM SIGGRAPH 2008 new tech demos (SIGGRAPH '08)*. Association for Computing Machinery, New York, Article 1, 2008.
- JÄGER 2019 Jäger, A.: Airborne ultrasound phased arrays. Universität Darmstadt, Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Mess- und Sensortechnik, 2019.
- JANDURA 1994 Jandura, L., Srinivasan, M.: Experiments on Human Performance in Torque discrimination and Control. In: *Dynamic systems and control. Presented at 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Radcliffe, C. (Hrsg.), New York, American Society of Mechanical Engineers, 1994, S. 369-375.
- JANSSEN & LAATZ 2013 Janssen, J., Laatz, W.: *Statistische Datenanalyse mit SPSS - Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013
- JUN ET AL. 2015 Jun, J.-H., Park, J.-R., Kim, S.-P., Min Bae, Y., Park, J.-Y., Kim, H.-S., Choi, S., Jung, S. J., Hwa Park, S., Yeom, D.-I., Jung, G.-I., Kim, J.-S., Chung, S.-C.: Laser-induced thermoelastic effects can evoke tactile sensations. *Scientific reports*, 5, 2015.
- KANDEL 1996 Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M. [Hrsg.]: *Neurowissenschaften: Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum Akademischer verlag 1996.
- KANDEL ET AL. 2012 Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., Hudspeth, A. J.: *Touch*. In: *Principles of Neural Science*, 5th ed., New York, McGraw-Hill Publishing, 2012, S. 498–529.
- KEISER 2015 Keiser, T.: *Gestensteuerung im Pflegeumfeld – Das Projekt Ge-niAAL*. Norderstedt: Books on Demand, 2015.
- KERN 2009 Kern, T. A.: *Biologische Grundlagen haptischer Wahrnehmung*. In: Kern, T. A. (Hrsg.): *Entwicklung Haptischer Geräte. Ein Einstieg für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- KIM ET AL. 2021 Kim, H.-S., Kim, K. B., Lee, J.-H., Jung, J.-J., Kim, Y.-J., Kim, S.-P., Choi, M.-H., Yi, J.-H., Chung, S.-C.: Mid-Air Tactile Sensations Evoked by Laser-Induced Plasma: A Neurophysiological Study. *Frontiers in neuroscience*, 15, 2021.
- KINO 1987 Kino, G. S.: *Acoustic Waves: Devices, Imaging, and analog Signal Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1987.
- KLUWE 2006 Kluwe, R. H.: Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung. In: Zimolong, B., Konradt, U. (Hrsg.): *Ingenieurpsychologie*. Göttingen: Hogrefe Verlag GmbH & Co. KG, 2006, S. 35-70.
- KORRES & EID 2016 Korres, G., Eid, M.: Haptogram: Ultrasonic Point-Cloud Tactile Stimulation. *IEEE Access*, 4, 2016, S. 7758–7769.
- KORRES ET AL. 2017 Korres, G., Aujeszyk T., Eid, M.: Characterizing tactile rendering parameters for ultrasound based stimulation. In: *IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 2017, S. 293-298.
- KRACHT ET AL. 2007 Kracht, J. M., Busch-Vishniac, I. J., West, J. E.: Noise in the operating rooms of Johns Hopkins Hospital. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121 (5 Pt1), 2007, S. 2673–2680.
- KRAMER UND LEIFER 1989 Kramer J., Leifer L.: *The talking glove: An expressive and receptive verbal communication aid for deaf, deaf-blind and non-vocal*. In: *Tech Report*, Stanford University, Uninc Santa Clara County, 1989.
- KUTTRUFF 2004 Kuttruff, H. *Akustik: eine Einführung*. Stuttgart-Leipzig: S.Hirzel Verlag, 2004.
- LEDERMAN & KLATZKY 2009 Lederman, S. J., Klatzky, R. L.: Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(7), 2009, S. 1439–1459.
- LEE ET AL. 2016 Lee, H., Cha, H., Park, J., Choi, S., Kim, H.-S., Chung, S.-C.: LaserStroke: Mid-air Tactile Experiences on Contours Using Indirect Laser Radiation. In: Rekimoto, J., Igarashi, T., Wobbrock, J. O., Avrahami, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16 Adjunct)*. Association for Computing Machinery, New York, 2016, S. 73–74.
- LEINER & CHOJECKI 2008 Leiner, U., Chojecki, P.: Berührungslose Interaktion im Operationssaal. In: Lucke, U., Kindsmüller, M. C., Fischer, S., Herczeg, M. & Seehusen, S. (Hrsg.): *Workshop Proceedings der Tagungen Mensch & Computer 2008, DeLFI 2008 und Cognitive Design 2008*, Berlin: Logos Verlag, 2008 S. 75-78.
- LERCH ET AL. 2009 Lerch, R., Sessler, G., Wolf, D.: *Technische Akustik*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- LIMERICK 2020 Limerick, H.: Call to interact: communicating interactivity and affordances for contactless gesture controlled public displays. In: *Proceedings of the 9TH ACM International Symposium on Pervasive Displays (PerDis '20)*, Association for Computing Machinery, New York, 2020, S. 63-70.

- LONG ET AL. 2014 Long, B., Seah, S. A., Carter, T., Subramanian, S.: Rendering volumetric haptic shapes in mid-air using ultrasound. In: *ACM Transactions on Graphics*, 33(6), 2014, S. 1–10.
- MA & BEN-TZVI 2015 Ma, Z., Ben-Tzvi, P.: RML Glove - An Exoskeleton Glove Mechanism With Haptics Feedback. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(2), 2015, S. 641–652.
- MAIER & SCHMID 2019 Maier, T., Schmid, M.: *Hybride adaptive Interfacesysteme – vom realen zum virtuellen HMI oder umgekehrt?* Future Mobility, Technische Akademie Esslingen e.V. (TAE), 2019.
- MARCHAL ET AL. 2020 Marchal, M., Gallagher, G., Lécuyer, A., Pacchierotti, C.: Can Stiffness Sensations Be Rendered in Virtual Reality Using Mid-air Ultrasound Haptic Technologies? In: *Haptics: Science, Technology, Applications: 12th International Conference, EuroHaptics 2020*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2020 S. 297-306.
- MARTINEZ ET AL. 2018 Martínez, J., Griffiths, D., Biscione, V., Georgiou, O., & Carter, T.: Touchless Haptic Feedback for Supernatural VR Experiences. In: *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2018, S. 629-630.
- MCCARTNEY ET AL. 2015 McCartney, R., Yuan, J., Bischof, H.: *Gesture Recognition with the Leap Motion Controller*, 2015.
- MEINEL & SCHNABEL 1976 Meinel, K. & Schnabel, G.: *Bewegungslehre. Abriß einer Theorie der Bewegung*. Berlin: Volk und Wissen, 1976.
- MICHIDORI ET AL. 2019 Michidori, Y., Takayama, K., Sugita, K.: Implementation of multi-modal interface for VR application. In: *IEEE 10th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST)*, 2019, S. 1-4.
- MIZUTANI ET AL. 2019 Mizutani, S., Fujiwara, M., Makino Y., Shinoda, H.: Thresholds of Haptic and Auditory Perception in Midair Facial Stimulation. In: *IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*, 2019, S. 1-6.
- MÖRIKE ET AL. 2001 Mörike, K. D., Betz, E., Mergenthaler, W.: *Die Biologie des Menschen*. 15. Auflage, Wiebelsheim: Quelle & Meyer Verlag, 2001.
- MÖSER 2005 Möser, M.: *Technische Akustik*. 6. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- MULOT ET AL. 2021 Mulot, L., Gicquel, G., Zanini, Q., Frier, W., Marchal, M., Pacchierotti, C., Howard, T.: DOLPHIN: A Framework for the Design and Perceptual Evaluation of Ultrasound Mid-Air Haptic Stimuli. In: Jain, E., Olivier, A.-H.; Di Luca, M.; Zibrek, K.; Fribourg, R. (Hrsg.) *ACM Symposium on Applied Perception 2021 (SAP '21)*. Association for Computing Machinery, Article 2, 2021, S. 1-10.
- MÜLLER ET AL. 2022 Müller, S. M., Winkelmann, C., Grunwald, M.: *Lehrbuch Haptik: Grundlagen und Anwendung in Therapie, Pflege und Medizin*. Springer: Berlin, Heidelberg, 2022.
- MYERS 2014 Myers, D. G.: *Psychologie*. Berlin Heidelberg, Springer, 2014.
- NEUDÖRFER 1981 Neudörfer, A.: *Anzeiger und Bedienteile. Gesetzmässigkeiten und systematische Lösungssammlungen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981.
- NORMAN 2010 Norman, D. A.: Natural User Interfaces Are Not Natural. *Interactions*, 17(3), 2010, S. 6-10.
- NOTBOHM & SIEGMANN 2012 Notbohm, G., Siegmann, S.: *Lärmbelastung von Personal und Patienten im Krankenhaus - eine aktuelle Literaturlauswertung*. In: *Jahrestagung für Akustik DAGA 12 der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA)*, Darmstadt, 2012.
- NOVACEK & JIRINA 2021 Novacek, T., Jirina M.: Project MultiLeap: Making Multiple Hand Tracking Sensors to Act Like One. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*, 2021, S. 77-83.
- NOWACK 2017 Nowack, T. F.: Mensch-Technik-Interaktion mittels Freiraumgesten. In: Witte, H. (Hrsg.): *Berichte aus der Biomechatronik*, Band 15, 2017.
- OH ET AL. 2021 Oh, Y., Schäfer, T., Rütger, B., Toussaint, M., & Mainprice, J.: A System for Traded Control Teleoperation of Manipulation Tasks using Intent Prediction from Hand Gestures. In: *2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 2021, S. 503-508.
- O'HARA ET AL. 2014 O'Hara, K., Gonzalez, G., Sellen, A., Penney, G., Varnavas, A., Mentis, H., Criminisi, A., Corish, R., Rouncefield, M., Dastur, N., Carrell, T.: Touchless interaction in surgery. In: *Communications of the ACM*, 57(1), 2014, S. 70-77.
- PAPE ET AL. 2014 Pape, H. P., Kurtz, A., Silbernagl, S.: *Physiologie*. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Thieme Verlag, 2014.
- PARK ET EL. 2006 Park, J. S., Song, S. J., Kim, H. J.: Calculation of Radiation Beam Field from Phased Array Ultrasonic Transducers Using Expanded Multi-Gaussian Beam Model. In: *Solid State Phenomena*, 110, 2006, S. 163-168.
- PENFIELD & RASMUSSEN 1950 Penfield, W., Rasmussen, T.: *The cerebral cortex of man*. New York, Macmillan 1950.
- PERRET & VANDER POORTEN 2018 Perret, J., Vander Poorten E.: Touching Virtual Reality: A Review of Haptic Gloves. In: *ACTUATOR 2018, 16th International Conference on New Actuators*, 2018, S. 1-5.

- PICKERING ET AL. 2007 Pickering, C. A., Burnham, K. J., Richardson, M. J.: A Research Study of Hand Gesture Recognition Technologies and Applications for Human Vehicle Interaction. In: 2007 3rd Institution of Engineering and Technology Conference on Automotive Electronics, 2007, S. 1-15.
- PIELOT ET AL. 2014 Pielot, M., Henze, N., Heuten, W., Boll, S.: Evaluation of Continuous Direction Encoding with Tactile Belts. In: HAID '08: Proceedings of the 3rd International Workshop on Haptic and Audio Interaction Design, 2008, S. 1-10.
- POTTER ET AL. 2013 Potter, L. E., Araullo, J., Lewis C.: The Leap Motion controller. In: Shen, H., Smith, R., Paay, J., Calder, P., Wyeld, T. (Hrsg.): Proceedings of the 25th Australian Computer-Human Interaction Conference on Augmentation, Application, Innovation, Collaboration - OzCHI '13, ACM Press, 2013, S. 175-178.
- PREIM & DACHSELT 2015 Preim, B., Dachselt, R.: Interaktive Systeme. Berlin Heidelberg: Springer, 2015.
- PURVES ET AL. 2019 Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., McNamara, J. O., & Williams, S. M.: Neuroscience. Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D. (Hrsg.). 6. Auflage, Sinauer Associates, Oxford University Press, 2019.
- RAKKOLAINEN ET AL. 2021 Rakkolainen, I., Freeman, E., Sand, A., Raisamo, R., Brewster, S.: A Survey of Mid-Air Ultrasound Haptics and Its Applications. In: IEEE transactions on haptics, 14(1), 2021, S. 2-19.
- RAZA ET AL. 2020 Raza, A., Hassan, W., Ogay, T., Hwang, I., Jeon, S.: Perceptually Correct Haptic Rendering in Mid-Air Using Ultrasound Phased Array. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(1), 2020, S. 736-745.
- REEVES & NASS 1996 Reeves, B., Nass, C.: The media equation: How people treat computers, television, and new media like real people and places. Cambridge University Press, 1996.
- REISINGER 2009 Reisinger, J.: Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen. Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Dissertation, 2009.
- REUTER 2018 Reuter, C.: Sicherheitskritische Mensch-Computer-Interaktion. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018.
- RÉVÉSZ 1950 Révész, G.: Psychology and art of the blind. New York: Longmans Green, 1950.
- RITTER ET AL. 2009 Ritter, F., Hansen, C., Wilkens, K., Köhn, A., Peitgen, H.-O.: Benutzungsschnittstellen für den direkten Zugriff auf 3D-Planungsdaten im OP. i-com, 8(1), 2009, S. 24-31.
- ROMANUS ET AL. 2019 Romanus, T., Frish, S., Maksymenko, M., Frier, W., Corenthy, L., Georgiou O.: Mid-Air Haptic Bio-Holograms in Mixed Reality. In: 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), 2019, S. 348-352.
- RÜMELIN ET AL. 2017 Rümelin, S., Gabler, T., Bellenbaum, J.: Clicks are in the Air: How to Support the Interaction with Floating Objects through Ultrasonic Feedback. In: Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 2017, S. 103-108.
- SAFFER 2009 Saffer, D.: Designing gestural interfaces. Beijing, Cambridge: O'Reilly, 2009.
- SAND ET AL. 2015 Sand, A., Rakkolainen, I., Isokoski, P., Kangas, J., Raisamo, R., Palovuori K.: Head-mounted display with mid-air tactile feedback. In: Zhao, Q., Thalmann, D., Spencer, S. N., Wu, E., Lin, M. C., Wang, L. (Hrsg.): Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '15). Association for Computing Machinery, New York, 2015, S. 51-58.
- SAND ET AL. 2020 Sand, A., Rakkolainen, I., Surakka, V., Raisamo, R., Brewster, S.: Evaluating Ultrasonic Tactile Feedback Stimuli. In: Haptics: Science, Technology, Applications: 12th International Conference, EuroHaptics 2020, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2020, S. 253-261.
- SARODNICK & BRAU 2010 Sarodnick, F., Brau, H.: Methoden der Usability Evaluation. Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung. 2. Aufl., Bern: Verlag Hans Huber, 2010.
- SCHAAL ET AL. 2016 Schaal, S.; Kunsch, K.; Kunsch, S.: Der Mensch in Zahlen. Berlin Heidelberg: Springer 2016.
- SCHLICK ET AL. 2010 Schlick, C. M., Luczak, H., Bruder, R.: Arbeitswissenschaft, 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- SCHLICK ET AL. 2018 Schlick, C., Bruder, R., Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Berlin Heidelberg: Springer, 2018.
- SCHMERR 2015 Schmerr, L. W.: Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays (Bd. 215). Cham: Springer International Publishing, 2015.
- SCHMID & MAIER 2017 Schmid, M., Maier, T.: Technisches Interface Design - Anforderungen, Bewertung und Gestaltung. Berlin Heidelberg: Springer 2017.
- SCHMID ET AL. 2018 Schmid, P., Janny, B., Maier, T.: Evidence Based Data For The Design Of Rotary Control Elements For Fine Motor Adjustment Tasks With Respect To The Elderly User. In: Proceedings Of The 20th Congress Of The International Ergonomics Association (IEA 2018). Volume IX: Aging, Gender And Work, Anthropometry, Ergonomics For Children And Educational Environments, 2018, S. 168-177.

- SCHMID ET AL. 2019 Schmid, P., Winterholler, J., Maier, T.: Untersuchung zum Entlastungspotential des visuellen Informationskanals durch das nutzerzentrierte Design eines Drehbedienelements. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2019.
- SCHMID ET AL. 2020 Schmid, P., Bader, M., Maier, T.: Tactile Information Coding by Electrotactile Feedback. In: Proceedings of the 4th International Conference on Computer-Human Interaction Research and Applications, 2020.
- SCHMID ET AL. 2021A Schmid, P., Junger, P., Maier, T.: Untersuchung zur nutzerzentrierten Feedbackgestaltung im Raum anhand virtueller Bedienelemente. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021.
- SCHMID ET AL. 2021B Schmid, P., Langer, F., Maier, T.: Mid-Air Interaction by Way of a Virtual Slider in a Medical Use Case. In: N. L. Black, W. P. Neumann, & I. Noy (Hrsg.): Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021): Bd. Volume IV: Healthcare and Healthy Work, Springer International Publishing. 2021, S. 443-450.
- SCHMID & MAIER 2021 Schmid, P., Maier, T.: Electro-Tactile Feedback to Provide Assistance to Touchscreen Interaction of the Elderly. In: Proceedings of the AHFE 2021 Virtual Conference on Human Factors and Ergonomics in Healthcare and Medical Devices, Advances in Human Factors and Ergonomics in Healthcare and Medical Devices, 2021, S. 271-278.
- SCHMIDTKE 1989 Schmidtke H.: Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Koblenz: Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr, 1989.
- SCHMITT & BEERES 2004 Schmitt, J. M., Beeres, M.: Geschichte und Trends der Medizintechnologie. BVMed Bundesverband Medizintechnologie e.V. (Hrsg.), Berlin, 2004.
- SCHORMANN 2020 Schormann, N.: Spitzengefühl beweisen – Semmes-Weinstein Monofilament Test. *physiopraxis*, 18(02), 2020, S. 38–39.
- SCHUHFRIED 2015 Schuhfried, G.: Manual: Zweihand Koordination. Version 34. Schuhfried GmbH, Mödling, 2015.
- SCHWALK 2020 Schwalk, M.: Entwicklung und Untersuchung vibrotaktile Muster im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktions- und Technisches Design, Dissertation, 2020.
- SCHWEGLER & LUCIUS 2016 Schwegler, J., Lucius, R.: Der Mensch. Anatomie und Physiologie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2016.
- SEEGER 2005 Seeger, H.: Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme - Industrial Design Engineering. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- SHANNON & WEAVER 1976 Shannon, C. E., Weaver, W.: Mathematische Grundlagen der Informationstheorie. München: Oldenbourg Verlag, 1976.
- SHARMA ET AL. 2018 Sharma, A., Yadav, A., Srivastava, S., Gupta, R.: Analysis of movement and gesture recognition using Leap Motion Controller. In: *Procedia Computer Science*, 132, 2018, S. 551-556.
- SHEPHERD 1993 Shepherd, D. M.: Neurobiologie: mit 34 Tabellen. Übersetzt und bearbeitet von Boeckh, V. Berlin Heidelberg: Springer, 1993.
- SIEGMANN & NOTBOHM 2013 Siegmann, S., Notbohm, G.: Noise in hospitals as a strain for the medical staff. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* (2013), 133, 2013.
- SIGELEN 2018 Sigelen, A.: Vom Aderlass zu Nanoskop - Eine Geschichte der Medizintechnik. L + H Verlag Berlin Thies Schröder e.K., 2018.
- SILVA ET AL. 2013 Silva, E. S., Abreu, J., Almeida, J. H. P. D., Teichrieb, V., Ramalho, G. A.: Preliminary Evaluation of the Leap Motion Sensor as Controller of New Digital Musical Instruments. In: *Proceeding of the 14th Brazilian Symposium on Computer Music*, 2013.
- SIM ET AL. 2021 Sim, D., Baek, Y., Cho, M., Park, S., Sagar, A. S. M. S., Kim, H. S.: Low-Latency Haptic Open Glove for Immersive Virtual Reality Interaction. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(11), 2021.
- SODHI ET AL. 2013 Sodhi, R., Glisson, M., Poupyrev, I.: AIREAL: tactile gaming experiences in free air. In: *ACM SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies (SIGGRAPH '13)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 2, 1, 2013.
- SON ET AL. 1996 Son, J. S., Howe, R., Wang J., Hager, G. D.: Preliminary results on grasping with vision and touch. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS '96*, vol.3, 1996, S. 1068-1075.
- SPECKMANN ET AL. 2013 Speckmann, E.-J., Hescheler, J., Köhling, R.: Physiologie: mit 88 Tabellen. Erwin-Josef Speckmann [Hrsg.], 6. Auflage. München: Elsevier Verlag, 2013.
- SPELMEZAN ET AL. 2017 Spelmezan, D., Sahoo, D. R., Subramanian, S.: Sparkle: Hover Feedback with Touchable Electric Arcs. In: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*. Association for Computing Machinery, New York, 2017, S. 3705-3717.
- SPENCE & HO 2008 Spence, C., Ho, C.: Tactile and Multisensory Spatial Warning Signals for Drivers. In: *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 1, Nr. 2, 2008, S. 121-129.
- STAPELKAMP 2010 Stapelkamp, T.: Interaction- und Interfacedesign. Berlin Heidelberg: Springer, 2010.



- STECHEER 2019 Stecher, M. W.: Ergonomische Gestaltung und Bewertung berührungsfreier Gestensteuerungen für Nutzfahrzeuge. Technische Universität München, Lehrstuhl Ergonomie, Dissertation, 2019.
- STEVENSON ET AL. 2013 Stevenson, R. A., Schlesinger, J. J., Wallace, M. T.: Effects of divided attention and operating room noise on perception of pulse oximeter pitch changes: a laboratory study. *Anesthesiology* 118, 2013, S. 376-381.
- STONE ET AL. 2005 Stone, D., Jarrett, C., Woodroffe, M., Minocha, S.: *User Interface Design and Evaluation*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2005.
- SUN ET AL. 2019 Sun, C., Nai, W., Sun, X.: Tactile sensitivity in ultrasonic haptics: Do different parts of hand and different rendering methods have an impact on perceptual threshold? *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(3), 2019, S. 265-275.
- SUZUKI & KOBAYASHI 2005 Suzuki, Y., Kobayashi, M.: Air jet driven force feedback in virtual reality. In: *IEEE computer graphics and applications*, 25(1), 2005, S. 44-47.
- TEIPEL 1988 Teipel, D.: *Diagnostik koordinativer Fähigkeiten*. München: Profil, 1988.
- TIMPE 1967 Timpe, K.-P.: *Ingenieurpsychologie und Automatisierung*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1967.
- TSALAMLAL ET AL. 2013 Tsalamlal, M. Y., Ouarti, N., Ammi, M.: Psychophysical study of air jet based tactile stimulation. In: *2013 World Haptics Conference (WHC)*, 2013, S. 639-644.
- TURK 2002 Turk, M.: Gesture Recognition. In: Hale K. S., Stanney K. M. (Hrsg.): *Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications (Human Factors and Ergonomics)*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2002, S. 223-237.
- TURNER ET AL. 1998 Turner, M., Gomez, D. H., Tremblay, M. R., Cutkosky, M.: Preliminary Tests of an Arm-Grounded Haptic Feedback Device in Telemanipulation. In: *ASME IMECE Haptic Symp.* 1998, 64, 1998, S. 145-149.
- VAQUERO-MELCHOR & BERNARDOS 2019 Vaquero-Melchor, D., Bernardos, A. M.: Enhancing Interaction with Augmented Reality through Mid-Air Haptic Feedback: Architecture Design and User Feedback. In: *Applied Sciences*, 9(23), 2019, S. 5123.
- VDI 1980 Verein Deutscher Ingenieure: *Handbuch der Arbeitsgestaltung und Arbeitsorganisation*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1980.
- VDI 2058-3 2014 Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten - Blatt 3. Verein Deutsche Ingenieure e. V., Berlin: Beuth Verlag, August 2014.
- VDI/VDE 3850-2 2017 Gebrauchstaugliche Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen - Interaktionsgeräte für Bildschirme - Blatt 2. Verein Deutsche Ingenieure e. V., Verband Deutscher Elektrotechniker, Berlin: Beuth Verlag, Januar 2017.
- VO UND BREWSTER 2015 Vo D.-B., Brewster S. A.: Touching the invisible: Localizing ultrasonic haptic cues. In: *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 2015, S. 368-373.
- WACHS ET AL. 2008 Wachs, J. P., Stern, H. I., Edan, Y., Gillam, M., Handler, J., Feied, C., Smith, M.: A gesture-based tool for sterile browsing of radiology images. In: *Journal of the American Medical Informatics Association: JAMIA*, 15(3), 2008, S. 321-323.
- WACHS ET AL. 2011 Wachs, J. P., Kölsch, M., Stern, H., Edan, Y.: Vision-based hand-gesture applications. In: *Communications of the ACM*, 54(2), 2011, S. 60-71.
- WEICHERT ET AL. 2013 Weichert, F., Bachmann, D., Rudak, B., Fisseler, D.: Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller. In: *Sensors (Basel, Switzerland)*, 13(5), 2013, S. 6380-6393.
- WICKENS & BAKER 1995 Wickens, C. D., Baker, P.: *Cognitive issues in virtual reality*. In: Barfield, W., Furness, T.A. [Hrsg.]: *Virtual environments and advanced interface design*. New York: oxford University Press, 1995. S. 514-541.
- WICKENS ET AL. 2004 Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y., Gordon Becker, S. E.: *An introduction to human factors engineering*. 2. Auflage, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.
- WIGDOR & WIXON 2011 Wigdor, D., Wixon, D.: *Brave NUI World: Designing Natural User Interfaces for Touch and Gesture*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2011.
- WILSON ET AL. 2014 Wilson, G., Carter, T., Subramanian, S., Brewster S. A.: Perception of ultrasonic haptic feedback on the hand: localisation and apparent motion. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*. Association for Computing Machinery, New York, 2014, S. 1133-1142.
- WINTERHOLLER 2019 Winterholler, J.: *Haptische Informationsübertragung von Drehmomentverläufen im Kontext einer Haupt- und Nebenaufgabe*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2019.
- WOOH & SHI 1999A Wooh, S.-C., Shi, Y.: Three-dimensional beam directivity of phase-steered ultrasound. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(6), 1999, S. 3275-3282.
- WOOH & SHI 1999B Wooh, S.-C., Shi, Y.: Optimum beam steering of linear phased arrays. In: *Wave Motion*, Volume 29, Issue 3, 1999, S. 245-265.
- YOSHINO ET AL. 2012 Yoshino, K., Hasegawa, K., Shinoda H.: Measuring Visio-Tactile threshold for Visio-Tactile Projector. In: *2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, 2012, S. 1996-2000.

- YOUNG ET AL. 2020 Young, G., Milne, H., Griffiths, D., Padfield, E., Blenkinsopp, R., Georgiou, O.: Designing Mid-Air Haptic Gesture Controlled User Interfaces for Cars. In: Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 4(EICS), 2020, S. 1-23.
- YUAN ET AL. 2019 Yuan, Y., Long, Z., Jiang, Z., Li, C.: Simulation for Multi-point Haptic Feedback Based on Ultrasound Phased Array. In: 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2019, S. 2445-2449.
- ZIMMERMANN ET AL. 1987 Zimmerman, T. G., Lanier, J., Blanchard, C., Bryson, S. & Harvill, Y.: A Hand Gesture Interface Device. In: J. M. Carroll & P. P. Tanner (Hrsg.), Proceedings of the SIGCHI/GI Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface - CHI '87, New York: ACM Press, 1987, S. 189-192.
- ZÜHLKE 2012 Zühlke, D.: Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen: Useware-Engineering für technische Systeme. 2. Auflage, Berlin: Springer, 2012.

### Zitierte studentische Arbeiten unter Anleitung des Verfassers

- ACKERMANN 2020 Ackermann, M.: Gestaltung einer elektrotaktilen Nutzerschnittstelle für Personen mit einer Sehbehinderung. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Masterarbeit, 2020.
- BADER 2020 Bader, M.: Entwicklung der Nutzerschnittstelle eines Insufflators unter Berücksichtigung des haptischen Feedbacks. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Masterarbeit, 2020.
- LACHENMAIER 2021 Lachenmaier, L.: Untersuchung zur ergonomischen Anordnung von Interfaceelementen berührungsloser Mensch-Maschine-Schnittstellen im OP. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Masterarbeit, 2021.
- SOLF 2020 Solf, L.: Experimentelle Untersuchung der Interaktion mit einer berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstelle auf Ultraschallbasis. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2020.
- ZHENG 2021 Zheng, Z.: Untersuchung der Bedienungskompatibilität eines virtuellen Sliders mit taktilen Feedback. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 2021.

## Anhang

### A.1 Vorstudie - Inferenzstatistische Daten Bedienung mit dominanter und nicht dominanter Hand

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p
V1	0,125	60	0,021	V9	0,168	60	< 0,001
V2	0,166	60	< 0,001	V10	0,140	60	0,005
V3	0,175	60	< 0,001	V11	0,181	60	< 0,001
V4	0,157	60	0,001	V12	0,137	60	0,007
V5	0,129	60	0,015	V13	0,123	60	0,024
V6	0,146	60	0,003	V14	0,197	60	< 0,001
V7	0,099	60	0,200	V15	0,238	60	< 0,001
V8	0,135	60	0,008	V16	0,156	60	0,001

**Tabelle A.1.1:** Überprüfung der Bedienzeit auf Normalverteilung

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p
V1	0,297	59	< 0,001	V9	0,245	59	< 0,001
V2	0,188	59	< 0,001	V10	0,136	59	0,008
V3	0,156	59	0,001	V11	0,211	59	< 0,001
V4	0,148	59	0,003	V12	0,247	59	< 0,001
V5	0,222	59	< 0,001	V13	0,252	59	< 0,001
V6	0,215	59	< 0,001	V14	0,176	59	< 0,001
V7	0,144	59	0,004	V15	0,223	59	< 0,001
V8	0,184	59	< 0,001	V16	0,237	59	< 0,001

**Tabelle A.1.2:** Überprüfung der Präzision auf Normalverteilung

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p
V1	0,378	59	<0,001	V9	0,337	59	< 0,001
V2	0,216	59	<0,001	V10	0,245	59	< 0,001
V3	0,260	59	<0,001	V11	0,262	59	< 0,001
V4	0,357	59	<0,001	V12	0,290	59	< 0,001
V5	0,320	59	<0,001	V13	0,349	59	< 0,001
V6	0,219	59	< 0,001	V14	0,218	59	< 0,001
V7	0,235	59	< 0,001	V15	0,208	59	< 0,001
V8	0,361	59	< 0,001	V16	0,323	59	< 0,001

**Tabelle A.1.3:** Überprüfung der Intensität auf Normalverteilung

## A.2 Vorstudie – Inferenzstatistische Daten Neigungswinkel

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p
V $\alpha$ 1	0,230	31	< 0,001	V $\alpha$ 5	0,155	31	0,057
V $\alpha$ 2	0,287	31	< 0,001	V $\alpha$ 6	0,150	31	0,074
V $\alpha$ 3	0,268	31	< 0,001	V $\alpha$ 7	0,202	31	0,002
V $\alpha$ 4	0,214	31	0,001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.2.1:**Neigungswinkel - Überprüfung der Fehleranzahl auf Normalverteilung

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Statistik z	df	Signifikanz p
V $\alpha$ 1	0,168	31	0,025	V $\alpha$ 5	0,241	31	< 0,000
V $\alpha$ 2	0,134	31	0,168	V $\alpha$ 6	0,226	31	< 0,001
V $\alpha$ 3	0,161	31	0,039	V $\alpha$ 7	0,273	31	< 0,001
V $\alpha$ 4	0,170	31	0,022	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.2.2:**Neigungswinkel - Überprüfung der Bedienzeit auf Normalverteilung

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p
V $\alpha$ 1	0,219	31	0,001	V $\alpha$ 5	0,163	31	0,035
V $\alpha$ 2	0,248	31	< 0,001	V $\alpha$ 6	0,179	31	0,013
V $\alpha$ 3	0,247	31	< 0,001	V $\alpha$ 7	0,158	31	0,046
V $\alpha$ 4	0,251	31	< 0,001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.2.3:**Neigungswinkel - Überprüfung der mentalen Beanspruchung auf Normalverteilung

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p
V $\alpha$ 1	0,228	31	<0,001	V $\alpha$ 5	0,208	31	0,002
V $\alpha$ 2	0,200	31	0,003	V $\alpha$ 6	0,178	31	0,014
V $\alpha$ 3	0,248	31	<0,001	V $\alpha$ 7	0,152	31	0,064
V $\alpha$ 4	0,200	31	0,003	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.2.4:**Neigungswinkel - Überprüfung der Präzision auf Normalverteilung

### A.3 Versuchsreihe VR01 - Inferenzstatistische Daten

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p
V1.1.1	0,119	31	0,200	V1.3.4	0,182	31	0,010
V1.1.2	0,223	31	< 0,001	V1.3.5	0,226	31	< 0,001
V1.1.3	0,143	31	0,108	V1.4.1	0,244	31	< 0,001
V1.1.4	0,169	31	0,025	V1.4.2	0,191	31	0,005
V1.1.5	0,251	31	< 0,001	V1.4.3	0,185	31	0,009
V1.2.1	0,249	31	< 0,001	V1.4.4	0,190	31	0,006
V1.2.2	0,178	31	0,014	V1.4.5	0,197	31	0,003
V1.2.3	0,250	31	< 0,001	V1.5.1	0,205	31	0,002
V1.2.4	0,189	31	0,006	V1.5.2	0,206	31	0,002
V1.2.5	0,250	31	< 0,001	V1.5.3	0,174	31	0,018
V1.3.1	0,273	31	< 0,001	V1.5.4	0,196	31	0,004
V1.3.2	0,172	31	0,020	V1.5.5	0,171	31	0,021
V1.3.3	0,140	31	0,125	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.1:**VR01 - Überprüfung der Fehleranzahl auf Normalverteilung

Kombination	Teststatistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Teststatistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r
V1.2.3-V1.1.1	7,403	0,022	1,33	V1.5.4-V1.2.1	7,371	0,024	1,32
V1.2.3-V1.2.1	7,339	0,026	1,32	V1.5.5-V1.1.1	7,419	0,022	1,33
V1.5.4-V1.1.1	7,435	0,021	1,34	V1.5.5-V1.2.1	7,355	0,025	1,32

**Tabelle A.3.2:**VR01 – Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Fehleranzahl

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p
V1.1.1	0,168	31	0,025	V1.3.4	0,241	31	< 0,001
V1.1.2	0,134	31	0,168	V1.3.5	0,226	31	< 0,001
V1.1.3	0,161	31	0,039	V1.4.1	0,273	31	< 0,001
V1.1.4	0,170	31	0,022	V1.4.2	0,244	31	< 0,001
V1.1.5	0,200	31	0,003	V1.4.3	0,236	31	< 0,001
V1.2.1	0,188	31	0,007	V1.4.4	0,176	31	0,016
V1.2.2	0,260	31	< 0,001	V1.4.5	0,292	31	< 0,001
V1.2.3	0,165	31	0,032	V1.5.1	0,225	31	< 0,001
V1.2.4	0,320	31	< 0,001	V1.5.2	0,265	31	< 0,001
V1.2.5	0,259	31	< 0,001	V1.5.3	0,326	31	< 0,001
V1.3.1	0,225	31	< 0,001	V1.5.4	0,233	31	< 0,001
V1.3.2	0,342	31	< 0,001	V1.5.5	0,215	31	0,001
V1.3.3	0,273	31	< 0,001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.3:**VR01 - Überprüfung der Stelldifferenz auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r
V1.1.4-V1.1.1	8,387	0,002	1,51	V1.4.4-V1.1.2	12,758	< 0,001	2,29
V1.1.5-V1.1.1	12,210	< 0,001	2,19	V1.4.4-V1.1.3	9,952	< 0,001	1,79
V1.1.5-V1.1.2	9,323	< 0,001	1,67	V1.4.4-V1.1.4	7,258	< 0,031	1,30
V1.1.5-V1.2.1	-8,919	0,001	1,60	V1.4.4-V1.2.1	12,355	< 0,001	2,22
V1.2.4-V1.1.1	11,339	< 0,001	2,04	V1.4.4-V1.2.2	8,984	< 0,001	1,61
V1.2.4-V1.1.2	8,452	0,002	1,52	V1.4.4-V1.2.3	8,032	0,005	1,44
V1.2.4-V1.2.1	8,048	0,005	1,45	V1.4.4-V1.3.1	8,306	0,003	1,49
V1.2.5-V1.1.1	13,371	< 0,001	2,40	V1.4.4-V1.4.1	10,194	< 0,001	1,83
V1.2.5-V1.1.2	10,484	< 0,001	1,88	V1.4.4-V1.5.1	-9,726	< 0,001	1,75
V1.2.5-V1.1.3	7,677	0,012	1,38	V1.4.5-V1.1.1	15,081	< 0,001	2,71
V1.2.5-V1.2.1	10,081	< 0,001	1,81	V1.4.5-V1.1.2	12,194	< 0,001	2,19
V1.2.5-V1.4.1	-7,919	0,007	1,42	V1.4.5-V1.1.3	9,387	< 0,001	1,69
V1.2.5-V1.5.1	-7,452	0,020	1,34	V1.4.5-V1.2.1	11,790	< 0,001	2,12
V1.3.1-V1.1.1	7,339	0,026	1,32	V1.4.5-V1.2.2	8,419	0,002	1,51
V1.3.2-V1.1.1	8,774	0,001	1,58	V1.4.5-V1.2.3	7,468	0,019	1,34
V1.3.3-V1.1.1	10,387	< 0,001	1,87	V1.4.5-V1.3.1	7,742	0,010	1,39
V1.3.3-V1.1.2	7,500	0,018	1,35	V1.4.5-V1.4.1	9,629	< 0,001	1,73
V1.3.3-V1.2.1	7,097	0,044	1,27	V1.4.5-V1.5.1	-9,161	< 0,001	1,65
V1.3.4-V1.1.1	11,194	< 0,001	2,01	V1.5.2-V1.1.1	8,903	0,001	1,60
V1.3.4-V1.1.2	8,306	0,003	1,49	V1.5.3-V1.1.1	11,097	< 0,001	1,99
V1.3.4-V1.2.1	7,903	0,007	1,42	V1.5.3-V1.1.2	8,210	0,003	1,47
V1.3.5-V1.1.1	16,452	< 0,001	2,95	V1.5.3-V1.2.1	7,806	0,009	1,40
V1.3.5-V1.1.2	13,565	< 0,001	2,44	V1.5.4-V1.1.1	15,177	< 0,001	2,73
V1.3.5-V1.1.3	10,758	< 0,001	1,93	V1.5.4-V1.1.2	12,290	< 0,001	2,21
V1.3.5-V1.1.4	8,065	0,005	1,45	V1.5.4-V1.1.3	9,484	< 0,001	1,70
V1.3.5-V1.2.1	13,161	< 0,001	2,36	V1.5.4-V1.2.1	11,887	< 0,001	2,13
V1.3.5-V1.2.2	9,790	< 0,001	1,76	V1.5.4-V1.2.2	8,516	0,002	1,53
V1.3.5-V1.2.3	8,839	0,001	1,59	V1.5.4-V1.2.3	7,565	0,016	1,36
V1.3.5-V1.3.1	9,113	< 0,001	1,64	V1.5.4-V1.3.1	7,839	0,008	1,41
V1.3.5-V1.3.2	7,677	0,012	1,38	V1.5.4-V1.4.1	9,726	< 0,001	1,75
V1.3.5-V1.4.1	-11,000	< 0,001	1,98	V1.5.4-V1.5.1	9,258	< 0,001	1,66
V1.3.5-V1.4.2	-7,532	0,017	1,35	V1.5.5-V1.1.1	14,177	< 0,001	2,55
V1.3.5-V1.5.1	-10,532	< 0,001	1,89	V1.5.5-V1.1.2	11,290	< 0,001	2,03
V1.3.5-V1.5.2	-7,548	0,016	1,36	V1.5.5-V1.1.3	8,484	0,002	1,52
V1.4.2-V1.1.1	8,919	0,001	1,60	V1.5.5-V1.2.1	10,887	< 0,001	1,96
V1.4.3-V1.1.1	11,935	< 0,001	2,14	V1.5.5-V1.2.2	7,516	0,017	1,35
V1.4.3-V1.1.2	9,048	< 0,001	1,63	V1.5.5-V1.4.1	8,726	0,001	1,57
V1.4.3-V1.2.1	8,645	0,001	1,55	V1.5.5-V1.5.1	8,258	0,003	1,48
V1.4.4-V1.1.1	15,645	< 0,001	2,81	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.4:** VR1 – Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Stelldifferenz

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V1.1.1	0,257	17	0,004	V1.3.4	0,212	17	0,041
V1.1.2	0,207	17	0,051	V1.3.5	0,285	17	0,001
V1.1.3	0,349	17	< 0,001	V1.4.1	0,208	17	0,050
V1.1.4	0,247	17	0,007	V1.4.2	0,195	17	0,085
V1.1.5	0,171	17	,200*	V1.4.3	0,244	17	0,008
V1.2.1	0,171	17	0,199	V1.4.4	0,214	17	0,037
V1.2.2	0,362	17	< 0,001	V1.4.5	0,213	17	0,039
V1.2.3	0,176	17	0,171	V1.5.1	0,321	17	< 0,001
V1.2.4	0,291	17	< 0,001	V1.5.2	0,388	17	< 0,001
V1.2.5	0,230	17	0,017	V1.5.3	0,215	17	0,036
V1.3.1	0,161	17	,200*	V1.5.4	0,113	17	0,200
V1.3.2	0,282	17	0,001	V1.5.5	0,113	17	0,200
V1.3.3	0,246	17	0,007	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.5:**VR01 - Überprüfung der Bedienzeit auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r
V1.3.1-V1.1.1	9,647	0,040	1,73	V1.5.2-V1.1.4	10,265	0,014	1,84
V1.3.3-V1.1.1	11,765	0,001	2,11	V1.5.2-V1.2.4	9,941	0,025	1,79
V1.3.3-V1.1.2	10,912	0,005	1,96	V1.5.2-V1.2.5	10,000	0,022	1,80
V1.3.3-V1.1.4	10,912	0,005	1,96	V1.5.3-V1.2.4	9,765	0,033	1,75
V1.3.3-V1.2.4	10,588	0,008	1,90	V1.5.3-V1.2.5	9,824	0,030	1,76
V1.3.3-V1.2.5	10,647	0,007	1,91	V1.5.3-V1.1.1	10,941	0,004	1,97
V1.5.2-V1.1.1	11,118	0,003	2,00	V1.5.3-V1.1.2	10,088	0,019	1,81
V1.5.2-V1.1.2	10,265	0,014	1,84	V1.5.3-V1.1.4	10,088	0,019	1,81

**Tabelle A.3.6:**VR01 – Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Bedienzeit

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V1.1.1	0,378	31	< 0,001	V1.3.2	0,289	31	< 0,001
V1.1.2	0,290	31	< 0,001	V1.3.3	0,252	31	< 0,001
V1.1.3	0,338	31	< 0,001	V1.3.4	0,429	31	< 0,001
V1.1.4	0,339	31	< 0,001	V1.3.5	0,309	31	< 0,001
V1.1.5	0,291	31	< 0,001	V1.4.1	0,317	31	< 0,001
V1.2.1	0,219	31	0,001	V1.4.2	0,329	31	< 0,001
V1.2.2	0,237	31	< 0,001	V1.4.3	0,320	31	< 0,001
V1.2.3	0,244	31	< 0,001	V1.4.4	0,358	31	< 0,001
V1.2.4	0,288	31	< 0,001	V1.4.5	0,435	31	< 0,001
V1.2.5	0,256	31	< 0,001	V1.5.1	0,336	31	< 0,001
V1.3.1	0,218	31	0,001	V1.5.2	0,339	31	< 0,001

**Tabelle A.3.7:**VR01 - Überprüfung der Intensität auf Normalverteilung (Teil 1/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p
V1.5.3	0,333	31	< 0,001	V1.5.5	0,389	31	< 0,001
V1.5.4	0,435	31	< 0,001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.7:** VR01 - Überprüfung der Intensität auf Normalverteilung (Teil 2/2)

Kombination	Teststatistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Teststatistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r
V1.1.1-V1.3.1	-9,129	< 0,001	1,64	V1.1.3-V1.4.3	-13,565	< 0,001	2,44
V1.1.1-V1.3.2	-10,548	< 0,001	1,89	V1.1.3-V1.4.4	-13,726	< 0,001	2,47
V1.1.1-V1.3.3	-11,774	< 0,001	2,11	V1.1.3-V1.4.5	-15,113	< 0,001	2,71
V1.1.1-V1.3.4	-10,742	< 0,001	1,93	V1.1.3-V1.5.1	-13,919	< 0,001	2,50
V1.1.1-V1.3.5	-11,597	< 0,001	2,08	V1.1.3-V1.5.2	-14,387	< 0,001	2,58
V1.1.1-V1.4.1	-14,097	< 0,001	2,53	V1.1.3-V1.5.3	-14,629	< 0,001	2,63
V1.1.1-V1.4.2	-14,387	< 0,001	2,58	V1.1.3-V1.5.4	-15,226	< 0,001	2,73
V1.1.1-V1.4.3	-14,129	< 0,001	2,54	V1.1.3-V1.5.5	-15,548	< 0,001	2,79
V1.1.1-V1.4.4	-14,290	< 0,001	2,57	V1.1.4-V1.3.1	-8,145	0,004	1,46
V1.1.1-V1.4.5	-15,677	< 0,001	2,82	V1.1.4-V1.3.2	-9,565	< 0,001	1,72
V1.1.1-V1.5.1	-14,484	< 0,001	2,60	V1.1.4-V1.3.3	-10,790	< 0,001	1,94
V1.1.1-V1.5.2	-14,952	< 0,001	2,69	V1.1.4-V1.3.4	-9,758	< 0,001	1,75
V1.1.1-V1.5.3	-15,194	< 0,001	2,73	V1.1.4-V1.3.5	-10,613	< 0,001	1,91
V1.1.1-V1.5.4	-15,790	< 0,001	2,84	V1.1.4-V1.4.1	-13,113	< 0,001	2,36
V1.1.1-V1.5.5	-16,113	< 0,001	2,89	V1.1.4-V1.4.2	-13,403	< 0,001	2,41
V1.1.2-V1.3.1	-8,629	0,001	1,55	V1.1.4-V1.4.3	-13,145	< 0,001	2,36
V1.1.2-V1.3.2	-10,048	< 0,001	1,80	V1.1.4-V1.4.4	-13,306	< 0,001	2,39
V1.1.2-V1.3.3	-11,274	< 0,001	2,02	V1.1.4-V1.4.5	-14,694	< 0,001	2,64
V1.1.2-V1.3.4	-10,242	< 0,001	1,84	V1.1.4-V1.5.1	-13,500	< 0,001	2,42
V1.1.2-V1.3.5	-11,097	< 0,001	1,99	V1.1.4-V1.5.2	-13,968	< 0,001	2,51
V1.1.2-V1.4.1	-13,597	< 0,001	2,44	V1.1.4-V1.5.3	-14,210	< 0,001	2,55
V1.1.2-V1.4.2	-13,887	< 0,001	2,49	V1.1.4-V1.5.4	-14,806	< 0,001	2,66
V1.1.2-V1.4.3	-13,629	< 0,001	2,45	V1.1.4-V1.5.5	-15,129	< 0,001	2,72
V1.1.2-V1.4.4	-13,790	< 0,001	2,48	V1.1.5-V1.3.1	-7,726	0,011	1,39
V1.1.2-V1.4.5	-15,177	< 0,001	2,73	V1.1.5-V1.3.2	-9,145	< 0,001	1,64
V1.1.2-V1.5.1	-13,984	< 0,000	2,51	V1.1.5-V1.3.3	-10,371	< 0,001	1,86
V1.1.2-V1.5.2	-14,452	< 0,001	2,60	V1.1.5-V1.3.4	-9,339	< 0,001	1,68
V1.1.2-V1.5.3	-14,694	< 0,001	2,64	V1.1.5-V1.3.5	-10,194	< 0,001	1,83
V1.1.2-V1.5.4	-15,290	< 0,001	2,75	V1.1.5-V1.4.1	-12,694	< 0,001	2,28
V1.1.2-V1.5.5	-15,613	< 0,001	2,80	V1.1.5-V1.4.2	-12,984	< 0,001	2,33
V1.1.3-V1.3.1	-8,565	0,001	1,54	V1.1.5-V1.4.3	-12,726	< 0,001	2,29
V1.1.3-V1.3.2	-9,984	< 0,001	1,79	V1.1.5-V1.4.4	-12,887	< 0,001	2,31
V1.1.3-V1.3.3	-11,210	< 0,001	2,01	V1.1.5-V1.4.5	-14,274	< 0,001	2,56
V1.1.3-V1.3.4	-10,177	< 0,001	1,83	V1.1.5-V1.5.1	-13,081	< 0,001	2,35
V1.1.3-V1.3.5	-11,032	< 0,001	1,98	V1.1.5-V1.5.2	-13,548	< 0,001	2,43
V1.1.3-V1.4.1	-13,532	< 0,001	2,43	V1.1.5-V1.5.3	-13,790	< 0,001	2,48
V1.1.3-V1.4.2	-13,823	< 0,001	2,48	V1.1.5-V1.5.4	-14,387	< 0,001	2,58

**Tabelle A.3.8:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden Intensität (Teil 1/2)



Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r
V1.1.5-V1.5.5	-14,710	< 0,001	2,64	V1.2.3-V1.4.4	-9,387	< 0,001	1,69
V1.2.1-V1.4.1	-9,355	< 0,001	1,68	V1.2.3-V1.4.5	-10,774	< 0,001	1,94
V1.2.1-V1.4.2	-9,645	< 0,001	1,73	V1.2.3-V1.5.1	-9,581	< 0,001	1,72
V1.2.1-V1.4.3	-9,387	< 0,001	1,69	V1.2.3-V1.5.2	-10,048	< 0,001	1,80
V1.2.1-V1.4.4	-9,548	< 0,001	1,71	V1.2.3-V1.5.3	-10,290	< 0,001	1,85
V1.2.1-V1.4.5	-10,935	< 0,001	1,96	V1.2.3-V1.5.4	-10,887	< 0,001	1,96
V1.2.1-V1.5.1	-9,742	< 0,001	1,75	V1.2.3-V1.5.5	-11,210	0,001	2,01
V1.2.1-V1.5.2	-10,210	< 0,001	1,83	V1.2.4-V1.4.1	-7,097	0,044	1,27
V1.2.1-V1.5.3	-10,452	< 0,001	1,88	V1.2.4-V1.4.2	-7,387	0,023	1,33
V1.2.1-V1.5.4	-11,048	< 0,001	1,98	V1.2.4-V1.4.3	-7,129	0,041	1,28
V1.2.1-V1.5.5	-11,371	< 0,001	2,04	V1.2.4-V1.4.4	-7,290	0,029	1,31
V1.2.2-V1.3.2	-7,500	0,018	1,35	V1.2.4-V1.4.5	-8,677	0,001	1,56
V1.2.2-V1.3.3	-8,726	0,001	1,57	V1.2.4-V1.5.1	-7,484	0,019	1,34
V1.2.2-V1.3.4	-7,694	0,012	1,38	V1.2.4-V1.5.2	-7,952	0,006	1,43
V1.2.2-V1.3.5	-8,548	0,001	1,54	V1.2.4-V1.5.3	-8,194	0,004	1,47
V1.2.2-V1.4.1	-11,048	< 0,001	1,98	V1.2.4-V1.5.4	-8,790	0,001	1,58
V1.2.2-V1.4.2	-11,339	< 0,001	2,04	V1.2.4-V1.5.5	-9,113	< 0,001	1,64
V1.2.2-V1.4.3	-11,081	< 0,001	1,99	V1.2.5-V1.3.3	-7,177	0,037	1,29
V1.2.2-V1.4.4	-11,242	< 0,001	2,02	V1.2.5-V1.4.1	-9,500	< 0,001	1,71
V1.2.2-V1.4.5	-12,629	< 0,001	2,27	V1.2.5-V1.4.2	-9,790	< 0,001	1,76
V1.2.2-V1.5.1	-11,435	< 0,001	2,05	V1.2.5-V1.4.3	-9,532	< 0,001	1,71
V1.2.2-V1.5.2	-11,903	< 0,001	2,14	V1.2.5-V1.4.4	-9,694	< 0,001	1,74
V1.2.2-V1.5.3	-12,145	< 0,001	2,18	V1.2.5-V1.4.5	-11,081	< 0,001	1,99
V1.2.2-V1.5.4	-12,742	< 0,001	2,29	V1.2.5-V1.5.1	-9,887	< 0,001	1,78
V1.2.2-V1.5.5	-13,065	< 0,001	2,35	V1.2.5-V1.5.2	-10,355	< 0,001	1,86
V1.2.3-V1.4.1	-9,194	< 0,001	1,65	V1.2.5-V1.5.3	-10,597	< 0,001	1,90
V1.2.3-V1.4.2	-9,484	< 0,001	1,70	V1.2.5-V1.5.4	-11,194	< 0,001	2,01
V1.2.3-V1.4.3	-9,226	< 0,001	1,66	V1.2.5-V1.5.5	-11,516	< 0,001	2,07

Tabelle A.3.8: VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden Intensität (Teil 2/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V1.1.1	0,211	31	0,001	V1.3.2	0,233	31	< 0,001
V1.1.2	0,222	31	< 0,001	V1.3.3	0,248	31	< 0,001
V1.1.3	0,153	31	0,062	V1.3.4	0,412	31	< 0,001
V1.1.4	0,221	31	< 0,001	V1.3.5	0,288	31	< 0,001
V1.1.5	0,237	31	< 0,001	V1.4.1	0,203	31	0,002
V1.2.1	0,216	31	0,001	V1.4.2	0,315	31	< 0,001
V1.2.2	0,231	31	< 0,001	V1.4.3	0,320	31	< 0,001
V1.2.3	0,274	31	< 0,001	V1.4.4	0,378	31	< 0,001
V1.2.4	0,297	31	< 0,001	V1.4.5	0,391	31	< 0,001
V1.2.5	0,264	31	< 0,001	V1.5.1	0,187	31	0,007
V1.3.1	0,220	31	0,001	V1.5.2	0,223	31	< 0,001

Tabelle A.3.9: VR01 - Überprüfung des Skalenabstands auf Normalverteilung (Teil 1/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p
V1.5.3	0,247	31	< 0,001	V1.5.5	0,383	31	< 0,001
V1.5.4	0,403	31	< 0,001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.9:** VR01 - Überprüfung des Skalenabstands auf Normalverteilung (Teil 2/2)

Kombination	Teststatistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Teststatistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r
V1.1.1-V1.1.4	-8,387	0,002	1,51	V1.2.2-V1.3.5	-8,694	0,001	1,56
V1.1.1-V1.1.5	-9,516	< 0,001	1,71	V1.2.2-V1.4.4	-8,226	0,003	1,48
V1.1.1-V1.2.4	-10,290	< 0,001	1,85	V1.2.2-V1.4.5	-9,952	< 0,001	1,79
V1.1.1-V1.2.5	-11,161	< 0,001	2,00	V1.2.2-V1.5.4	-9,000	< 0,001	1,62
V1.1.1-V1.3.3	-7,887	0,007	1,42	V1.2.2-V1.5.5	-9,968	< 0,001	1,79
V1.1.1-V1.3.4	-9,177	< 0,001	1,65	V1.2.3-V1.3.5	-7,065	0,047	1,27
V1.1.1-V1.3.5	-11,758	< 0,001	2,11	V1.2.3-V1.4.5	-8,323	0,003	1,49
V1.1.1-V1.4.3	-7,758	0,010	1,39	V1.2.3-V1.5.4	-7,371	0,024	1,32
V1.1.1-V1.4.4	-11,290	< 0,001	2,03	V1.2.3-V1.5.5	-8,339	0,002	1,50
V1.1.1-V1.4.5	-13,016	< 0,001	2,34	V1.3.1-V1.1.4	8,387	0,002	1,51
V1.1.1-V1.5.4	-12,065	< 0,001	2,17	V1.3.1-V1.1.5	9,516	< 0,001	1,71
V1.1.1-V1.5.5	-13,032	< 0,001	2,34	V1.3.1-V1.2.4	10,290	< 0,001	1,85
V1.1.2-V1.2.5	-7,339	0,026	1,32	V1.3.1-V1.2.5	11,161	< 0,001	2,00
V1.1.2-V1.3.5	-7,935	0,007	1,43	V1.3.1-V1.3.3	-7,887	0,007	1,42
V1.1.2-V1.4.4	-7,468	0,019	1,34	V1.3.1-V1.3.4	-9,177	< 0,001	1,65
V1.1.2-V1.4.5	-9,194	< 0,001	1,65	V1.3.1-V1.3.5	-11,758	< 0,001	2,11
V1.1.2-V1.5.4	-8,242	0,003	1,48	V1.3.1-V1.4.3	-7,758	0,010	1,39
V1.1.2-V1.5.5	-9,210	< 0,001	1,65	V1.3.1-V1.4.4	-11,290	< 0,001	2,03
V1.1.3-V1.3.5	-7,226	0,0330	1,30	V1.3.1-V1.4.5	-13,016	< 0,001	2,34
V1.1.3-V1.4.5	-8,484	0,002	1,52	V1.3.1-V1.5.4	-12,065	< 0,001	2,17
V1.1.3-V1.5.4	-7,532	0,017	1,35	V1.3.1-V1.5.5	-13,032	< 0,001	2,34
V1.1.3-V1.5.5	-8,500	0,002	1,53	V1.3.2-V1.2.5	7,532	0,017	1,35
V1.2.1-V1.1.4	8,210	0,003	1,47	V1.3.2-V1.3.5	-8,129	0,004	1,46
V1.2.1-V1.1.5	9,339	< 0,001	1,68	V1.3.2-V1.4.4	-7,661	0,012	1,38
V1.2.1-V1.2.4	-10,113	< 0,001	1,82	V1.3.2-V1.4.5	-9,387	< 0,001	1,69
V1.2.1-V1.2.5	-10,984	< 0,001	1,97	V1.3.2-V1.5.4	-8,435	0,002	1,52
V1.2.1-V1.3.3	-7,710	0,011	1,38	V1.3.2-V1.5.5	-9,403	< 0,001	1,69
V1.2.1-V1.3.4	-9,000	< 0,001	1,62	V1.4.1-V1.1.4	7,355	0,025	1,32
V1.2.1-V1.3.5	-11,581	< 0,001	2,08	V1.4.1-V1.1.5	8,484	0,002	1,52
V1.2.1-V1.4.3	-7,581	0,015	1,36	V1.4.1-V1.2.4	9,258	< 0,001	1,66
V1.2.1-V1.4.4	-11,113	< 0,001	2,00	V1.4.1-V1.2.5	10,129	< 0,001	1,82
V1.2.1-V1.4.5	-12,839	< 0,001	2,31	V1.4.1-V1.3.4	8,145	0,004	1,46
V1.2.1-V1.5.4	-11,887	< 0,001	2,13	V1.4.1-V1.3.5	10,726	< 0,001	1,93
V1.2.1-V1.5.5	-12,855	< 0,001	2,31	V1.4.1-V1.4.4	-10,258	< 0,001	1,84
V1.2.2-V1.2.4	-7,226	0,033	1,30	V1.4.1-V1.4.5	-11,984	< 0,001	2,15
V1.2.2-V1.2.5	-8,097	0,004	1,45	V1.4.1-V1.5.4	-11,032	< 0,001	1,98

**Tabelle A.3.10:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden bezüglich des Skalenabstands (Teil 1/2)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V1.4.2-V1.2.5	7,790	0,009	1,40	V1.5.1-V1.3.5	10,145	< 0,001	1,82
V1.4.2-V1.3.5	8,387	0,002	1,73	V1.5.1-V1.4.4	9,677	< 0,001	1,74
V1.4.2-V1.4.4	-7,919	0,007	1,56	V1.5.1-V1.4.5	11,403	< 0,001	2,05
V1.4.2-V1.4.5	-9,645	< 0,001	1,74	V1.5.1-V1.5.4	-10,452	< 0,001	1,88
V1.4.2-V1.5.4	-8,694	0,001	1,42	V1.5.1-V1.5.5	-11,419	< 0,001	2,05
V1.4.2-V1.5.5	-9,661	< 0,001	1,56	V1.5.2-V1.2.5	7,274	0,030	1,31
V1.5.1-V1.1.5	7,903	0,007	1,71	V1.5.2-V1.3.5	7,871	0,008	1,41
V1.5.1-V1.2.4	8,677	0,001	1,36	V1.5.2-V1.4.4	7,403	0,022	1,33
V1.5.1-V1.2.5	9,548	< 0,001	1,82	V1.5.2-V1.4.5	9,129	< 0,001	1,64
V1.5.1-V1.3.4	7,565	0,016	1,74	V1.5.2-V1.5.4	-8,177	0,004	1,47
V1.4.1-V1.5.5	-12,000	< 0,001	2,16	V1.5.2-V1.5.5	-9,145	< 0,001	1,64

**Tabelle A.3.10:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden bezüglich des Skalenabstands (Teil 2/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik	df	Signifikanz p
V1.1.1	0,242	31	< 0,001	V1.3.4	0,181	31	0,011
V1.1.2	0,254	31	< 0,001	V1.3.5	0,224	31	< 0,001
V1.1.3	0,200	31	0,003	V1.4.1	0,205	31	0,002
V1.1.4	0,205	31	0,002	V1.4.2	0,180	31	0,012
V1.1.5	0,238	31	< 0,001	V1.4.3	0,221	31	< 0,001
V1.2.1	0,240	31	< 0,001	V1.4.4	0,207	31	0,002
V1.2.2	0,200	31	0,003	V1.4.5	0,258	31	< 0,001
V1.2.3	0,243	31	< 0,001	V1.5.1	0,143	31	0,105
V1.2.4	0,187	31	0,007	V1.5.2	0,177	31	0,014
V1.2.5	0,196	31	0,004	V1.5.3	0,250	31	< 0,001
V1.3.1	0,196	31	0,004	V1.5.4	0,270	31	< 0,001
V1.3.2	0,190	31	0,006	V1.5.5	0,320	31	< 0,001
V1.3.3	0,186	31	0,008	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.11:** VR01 - Überprüfung der Präzision auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V1.1.1-V1.2.4	-8,387	0,002	1,51	V1.1.1-V1.4.5	-16,516	< 0,001	2,97
V1.1.1-V1.2.5	-7,435	0,021	1,34	V1.1.1-V1.5.1	-8,323	0,003	1,49
V1.1.1-V1.3.2	-8,194	0,004	1,47	V1.1.1-V1.5.2	-10,823	< 0,001	1,94
V1.1.1-V1.3.3	-11,016	< 0,001	1,98	V1.1.1-V1.5.3	-12,371	< 0,001	2,22
V1.1.1-V1.3.4	-11,500	< 0,001	2,07	V1.1.1-V1.5.4	-17,871	< 0,001	3,21
V1.1.1-V1.3.5	-13,145	< 0,001	2,36	V1.1.1-V1.5.5	-17,468	< 0,001	3,14
V1.1.1-V1.4.2	-8,629	0,001	1,55	V1.1.2-V1.2.4	-8,339	0,002	1,50
V1.1.1-V1.4.3	-13,242	< 0,001	2,38	V1.1.2-V1.2.5	-7,387	0,023	1,33
V1.1.1-V1.4.4	-15,339	< 0,001	2,75	V1.1.2-V1.3.2	-8,145	0,004	1,46

**Tabelle A.3.12:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden Präzision (Teil 1/3)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V1.1.2-V1.3.3	-10,968	< 0,001	1,97	V1.2.1-V1.3.5	-11,387	< 0,001	2,05
V1.1.2-V1.3.4	-11,452	< 0,001	2,06	V1.2.1-V1.4.3	-11,484	< 0,001	2,06
V1.1.2-V1.3.5	-13,097	< 0,001	2,35	V1.2.1-V1.4.4	-13,581	< 0,001	2,44
V1.1.2-V1.4.2	-8,581	0,001	1,54	V1.2.1-V1.4.5	-14,758	< 0,001	2,65
V1.1.2-V1.4.3	-13,194	< 0,001	2,37	V1.2.1-V1.5.2	-9,065	< 0,001	1,63
V1.1.2-V1.4.4	-15,290	< 0,001	2,75	V1.2.1-V1.5.3	-10,613	< 0,001	1,91
V1.1.2-V1.4.5	-16,468	< 0,001	2,96	V1.2.1-V1.5.4	-16,113	< 0,001	2,89
V1.1.2-V1.5.1	-8,274	0,003	1,49	V1.2.1-V1.5.5	-15,710	< 0,001	2,82
V1.1.2-V1.5.2	-10,774	< 0,001	1,94	V1.2.2-V1.3.3	-8,452	0,002	1,52
V1.1.2-V1.5.3	-12,323	< 0,001	2,21	V1.2.2-V1.3.4	-8,935	0,001	1,60
V1.1.2-V1.5.4	-17,823	< 0,001	3,20	V1.2.2-V1.3.5	-10,581	< 0,001	1,90
V1.1.2-V1.5.5	-17,419	< 0,001	3,13	V1.2.2-V1.4.3	-10,677	< 0,001	1,92
V1.1.3-V1.3.3	-9,629	< 0,001	1,73	V1.2.2-V1.4.4	-12,774	< 0,001	2,29
V1.1.3-V1.3.4	-10,113	< 0,001	1,82	V1.2.2-V1.4.5	-13,952	< 0,001	2,51
V1.1.3-V1.3.5	-11,758	< 0,001	2,11	V1.2.2-V1.5.2	-8,258	0,003	1,48
V1.1.3-V1.4.2	-7,242	0,032	1,30	V1.2.2-V1.5.3	-9,806	< 0,001	1,76
V1.1.3-V1.4.3	-11,855	< 0,001	2,13	V1.2.2-V1.5.4	-15,306	< 0,001	2,75
V1.1.3-V1.4.4	-13,952	< 0,001	2,51	V1.2.2-V1.5.5	-14,903	< 0,001	2,68
V1.1.3-V1.4.5	-15,129	< 0,001	2,72	V1.2.3-V1.3.5	-8,387	0,002	1,51
V1.1.3-V1.5.2	-9,435	< 0,001	1,69	V1.2.3-V1.4.3	-8,484	0,002	1,52
V1.1.3-V1.5.3	-10,984	< 0,001	1,97	V1.2.3-V1.4.4	-10,581	< 0,001	1,90
V1.1.3-V1.5.4	-16,484	< 0,001	2,96	V1.2.3-V1.4.5	-11,758	< 0,001	2,11
V1.1.3-V1.5.5	-16,081	< 0,001	2,89	V1.2.3-V1.5.3	-7,613	0,014	1,37
V1.1.4-V1.3.3	-8,758	0,001	1,57	V1.2.3-V1.5.4	-13,113	< 0,001	2,36
V1.1.4-V1.3.4	-9,242	< 0,001	1,66	V1.2.3-V1.5.5	-12,710	< 0,001	2,28
V1.1.4-V1.3.5	-10,887	< 0,001	1,96	V1.2.5-V1.4.4	-7,903	0,007	1,42
V1.1.4-V1.4.3	-10,984	< 0,001	1,97	V1.2.5-V1.4.5	-9,081	< 0,001	1,63
V1.1.4-V1.4.4	-13,081	< 0,001	2,35	V1.2.5-V1.5.4	-10,435	< 0,001	1,87
V1.1.4-V1.4.5	-14,258	< 0,001	2,56	V1.2.5-V1.5.5	-10,032	< 0,001	1,80
V1.1.4-V1.5.2	-8,565	0,001	1,54	V1.3.1-V1.3.5	-7,177	0,037	1,29
V1.1.4-V1.5.3	-10,113	< 0,001	1,82	V1.3.1-V1.4.3	-7,274	0,030	1,31
V1.1.4-V1.5.4	-15,613	< 0,001	2,80	V1.3.1-V1.4.4	-9,371	< 0,001	1,68
V1.1.4-V1.5.5	-15,210	< 0,001	2,73	V1.3.1-V1.4.5	-10,548	< 0,001	1,89
V1.1.5-V1.3.3	-7,452	0,020	1,34	V1.3.1-V1.5.4	-11,903	< 0,001	2,14
V1.1.5-V1.3.4	-7,935	0,007	1,43	V1.3.1-V1.5.5	-11,500	< 0,001	2,07
V1.1.5-V1.3.5	-9,581	< 0,001	1,72	V1.3.2-V1.4.4	-7,145	0,040	1,28
V1.1.5-V1.4.3	-9,677	< 0,001	1,74	V1.3.2-V1.4.5	-8,323	0,003	1,49
V1.1.5-V1.4.4	-11,774	< 0,001	2,11	V1.3.2-V1.5.4	-9,677	< 0,001	1,74
V1.1.5-V1.4.5	-12,952	< 0,001	2,33	V1.3.2-V1.5.5	-9,274	< 0,001	1,67
V1.1.5-V1.5.2	-7,258	0,031	1,30	V1.4.1-V1.4.4	-9,032	< 0,001	1,62
V1.1.5-V1.5.3	-8,806	0,001	1,58	V1.4.1-V1.4.5	-10,210	< 0,001	1,83
V1.1.5-V1.5.4	-14,306	< 0,001	2,57	V1.4.1-V1.5.4	-11,565	< 0,001	2,08
V1.1.5-V1.5.5	-13,903	< 0,001	2,50	V1.4.1-V1.5.5	-11,161	< 0,001	2,00
V1.2.1-V1.3.3	-9,258	< 0,001	1,66	V1.4.2-V1.4.5	-7,887	0,007	1,42
V1.2.1-V1.3.4	-9,742	< 0,001	1,75	V1.4.2-V1.5.4	-9,242	< 0,001	1,66

**Tabelle A.3.12:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden Präzision (Teil 2/3)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V1.4.2-V1.5.5	-8,839	0,001	1,59	V1.5.1-V1.5.5	-9,145	< 0,001	1,64
V1.5.1-V1.4.5	8,194	0,004	1,47	V1.5.2-V1.5.4	-7,048	0,049	1,27
V1.5.1-V1.5.4	-9,548	< 0,001	1,71	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.12:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden Präzision (Teil 3/3)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik	df	Signifikanz p
V1.1.1	0,215	31	0,001	V1.3.4	0,214	31	0,001
V1.1.2	0,258	31	< 0,001	V1.3.5	0,241	31	< 0,001
V1.1.3	0,155	31	0,057	V1.4.1	0,232	31	< 0,001
V1.1.4	0,165	31	0,031	V1.4.2	0,176	31	0,015
V1.1.5	0,179	31	0,012	V1.4.3	0,243	31	< 0,001
V1.2.1	0,165	31	0,032	V1.4.4	0,260	31	< 0,001
V1.2.2	0,225	31	< 0,001	V1.4.5	0,265	31	< 0,001
V1.2.3	0,195	31	0,004	V1.5.1	0,134	31	0,167
V1.2.4	0,246	31	< 0,001	V1.5.2	0,229	31	< 0,001
V1.2.5	0,175	31	0,016	V1.5.3	0,304	31	< 0,001
V1.3.1	0,171	31	0,022	V1.5.4	0,273	31	< 0,001
V1.3.2	0,184	31	0,009	V1.5.5	0,304	31	< 0,001
V1.3.3	0,216	31	0,001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.13:** VR01 - Überprüfung der Benutzungsgeschwindigkeit auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V1.1.1-V1.2.4	-8,629	0,001	1,55	V1.1.2-V1.3.3	-11,774	< 0,001	2,11
V1.1.1-V1.3.2	-8,242	0,003	1,48	V1.1.2-V1.3.4	-11,097	< 0,001	1,99
V1.1.1-V1.3.3	-11,758	< 0,001	2,11	V1.1.2-V1.3.5	-10,887	< 0,001	1,96
V1.1.1-V1.3.4	-11,081	< 0,001	1,99	V1.1.2-V1.4.2	-9,016	< 0,001	1,62
V1.1.1-V1.3.5	-10,871	< 0,001	1,95	V1.1.2-V1.4.3	-12,274	< 0,001	2,20
V1.1.1-V1.4.2	-9,000	< 0,001	1,62	V1.1.2-V1.4.4	-14,097	< 0,001	2,53
V1.1.1-V1.4.3	-12,258	< 0,001	2,20	V1.1.2-V1.4.5	-15,081	< 0,001	2,71
V1.1.1-V1.4.4	-14,081	< 0,001	2,53	V1.1.2-V1.5.1	-8,290	0,003	1,49
V1.1.1-V1.4.5	-15,065	< 0,001	2,71	V1.1.2-V1.5.2	-9,742	< 0,001	1,75
V1.1.1-V1.5.1	-8,274	0,003	1,49	V1.1.2-V1.5.3	-12,016	< 0,001	2,16
V1.1.1-V1.5.2	-9,726	< 0,001	1,75	V1.1.2-V1.5.4	-15,935	< 0,001	2,86
V1.1.1-V1.5.3	-12,000	< 0,001	2,16	V1.1.2-V1.5.5	-14,839	< 0,001	2,67
V1.1.1-V1.5.4	-15,919	< 0,001	2,86	V1.1.3-V1.3.3	-10,065	< 0,001	1,81
V1.1.1-V1.5.5	-14,823	< 0,001	2,66	V1.1.3-V1.3.4	-9,387	< 0,001	1,69
V1.1.2-V1.2.4	-8,645	0,001	1,55	V1.1.3-V1.3.5	-9,177	< 0,001	1,65
V1.1.2-V1.3.2	-8,258	0,003	1,48	V1.1.3-V1.4.2	-7,306	0,028	1,31

**Tabelle A.3.14:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Benutzungsgeschwindigkeit (Teil 1/2)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V1.1.3-V1.4.3	-10,565	< 0,001	1,90	V1.2.2-V1.3.3	-10,097	< 0,001	1,81
V1.1.3-V1.4.4	-12,387	< 0,001	2,22	V1.2.2-V1.3.4	-9,419	< 0,001	1,69
V1.1.3-V1.4.5	-13,371	< 0,001	2,40	V1.2.2-V1.3.5	-9,210	< 0,001	1,65
V1.1.3-V1.5.2	-8,032	0,005	1,44	V1.2.2-V1.4.2	-7,339	0,026	1,32
V1.1.3-V1.5.3	-10,306	< 0,001	1,85	V1.2.2-V1.4.3	-10,597	< 0,001	1,90
V1.1.3-V1.5.4	-14,226	< 0,001	2,56	V1.2.2-V1.4.4	-12,419	< 0,001	2,23
V1.1.3-V1.5.5	-13,129	< 0,001	2,36	V1.2.2-V1.4.5	-13,403	< 0,001	2,41
V1.1.4-V1.3.3	-9,242	< 0,001	1,66	V1.2.2-V1.5.2	-8,065	0,005	1,45
V1.1.4-V1.3.4	-8,565	0,001	1,54	V1.2.2-V1.5.3	-10,339	< 0,001	1,86
V1.1.4-V1.3.5	-8,355	0,002	1,50	V1.2.2-V1.5.4	-14,258	< 0,001	2,56
V1.1.4-V1.4.3	-9,742	< 0,001	1,75	V1.2.2-V1.5.5	-13,161	< 0,001	2,36
V1.1.4-V1.4.4	-11,565	< 0,001	2,08	V1.2.3-V1.3.3	-7,161	0,038	1,29
V1.1.4-V1.4.5	-12,548	< 0,001	2,25	V1.2.3-V1.4.3	-7,661	0,012	1,38
V1.1.4-V1.5.2	-7,210	0,034	1,29	V1.2.3-V1.4.4	-9,484	< 0,001	1,70
V1.1.4-V1.5.3	-9,484	< 0,001	1,70	V1.2.3-V1.4.5	-10,468	< 0,001	1,88
V1.1.4-V1.5.4	-13,403	< 0,001	2,41	V1.2.3-V1.5.3	-7,403	0,022	1,33
V1.1.4-V1.5.5	-12,306	< 0,001	2,21	V1.2.3-V1.5.4	-11,323	< 0,001	2,03
V1.1.5-V1.3.3	-9,355	< 0,001	1,68	V1.2.3-V1.5.5	-10,226	< 0,001	1,84
V1.1.5-V1.3.4	-8,677	0,001	1,56	V1.2.4-V1.5.4	-7,290	0,029	1,31
V1.1.5-V1.3.5	-8,468	0,002	1,52	V1.2.5-V1.3.3	-7,048	0,049	1,27
V1.1.5-V1.4.3	-9,855	< 0,001	1,77	V1.2.5-V1.4.3	-7,548	0,016	1,36
V1.1.5-V1.4.4	-11,677	< 0,001	2,10	V1.2.5-V1.4.4	-9,371	< 0,001	1,68
V1.1.5-V1.4.5	-12,661	< 0,001	2,27	V1.2.5-V1.4.5	-10,355	< 0,001	1,86
V1.1.5-V1.5.2	-7,323	0,027	1,32	V1.2.5-V1.5.3	-7,290	0,029	1,31
V1.1.5-V1.5.3	-9,597	< 0,001	1,72	V1.2.5-V1.5.4	-11,210	< 0,001	2,01
V1.1.5-V1.5.4	-13,516	< 0,001	2,43	V1.2.5-V1.5.5	-10,113	< 0,001	1,82
V1.1.5-V1.5.5	-12,419	< 0,001	2,23	V1.3.1-V1.4.4	-8,032	0,005	1,44
V1.2.1-V1.3.3	-9,226	< 0,001	1,66	V1.3.1-V1.4.5	-9,016	< 0,001	1,62
V1.2.1-V1.3.4	-8,548	0,001	1,54	V1.3.1-V1.5.4	-9,871	< 0,001	1,77
V1.2.1-V1.3.5	-8,339	0,002	1,50	V1.3.1-V1.5.5	-8,774	0,001	1,58
V1.2.1-V1.4.3	-9,726	< 0,001	1,75	V1.3.2-V1.5.4	-7,677	0,012	1,38
V1.2.1-V1.4.4	-11,548	< 0,001	2,07	V1.4.1-V1.4.4	-7,597	0,014	1,36
V1.2.1-V1.4.5	-12,532	< 0,001	2,25	V1.4.1-V1.4.5	-8,581	0,001	1,54
V1.2.1-V1.5.2	-7,194	0,036	1,29	V1.4.1-V1.5.4	-9,435	< 0,001	1,69
V1.2.1-V1.5.3	-9,468	< 0,001	1,70	V1.4.1-V1.5.5	-8,339	0,002	1,50
V1.2.1-V1.5.4	-13,387	< 0,001	2,40	V1.5.1-V1.5.4	-7,645	0,013	1,37
V1.2.1-V1.5.5	-12,290	< 0,001	2,21	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.14:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Benutzungsgeschwindigkeit (Teil 2/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p
V1.1.1	0,188	31	0,007	V1.1.3	0,161	31	0,040
V1.1.2	0,163	31	0,035	V1.1.4	0,245	31	< 0,001

**Tabelle A.3.15:** VR01 - Überprüfung der Erlernbarkeit auf Normalverteilung (Teil1/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Teststatistik z	df	Signifikanz p
V1.1.5	0,248	31	< 0,001	V1.4.1	0,191	31	0,006
V1.2.1	0,175	31	0,017	V1.4.2	0,163	31	0,035
V1.2.2	0,204	31	0,002	V1.4.3	0,165	31	0,031
V1.2.3	0,188	31	0,007	V1.4.4	0,202	31	0,002
V1.2.4	0,197	31	0,004	V1.4.5	0,245	31	< 0,001
V1.2.5	0,159	31	0,046	V1.5.1	0,146	31	0,089
V1.3.1	0,160	31	0,041	V1.5.2	0,202	31	0,002
V1.3.2	0,186	31	0,008	V1.5.3	0,276	31	< 0,001
V1.3.3	0,262	31	< 0,001	V1.5.4	0,289	31	< 0,001
V1.3.4	0,181	31	0,011	V1.5.5	0,265	31	< 0,001
V1.3.5	0,268	31	< 0,001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.15:** VR01 - Überprüfung der Erlernbarkeit auf Normalverteilung (Teil 2/2)

Kombination	Teststatistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Teststatistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V1.1.1-V1.2.4	-8,484	0,002	1,52	V1.1.2-V1.5.4	-15,016	< 0,001	2,70
V1.1.1-V1.3.2	-8,032	0,005	1,44	V1.1.2-V1.5.5	-15,403	< 0,001	2,77
V1.1.1-V1.3.3	-11,355	< 0,001	2,04	V1.1.3-V1.3.3	-9,855	< 0,001	1,77
V1.1.1-V1.3.4	-11,774	< 0,001	2,11	V1.1.3-V1.3.4	-10,274	< 0,001	1,85
V1.1.1-V1.3.5	-12,000	< 0,001	2,16	V1.1.3-V1.3.5	-10,500	< 0,001	1,89
V1.1.1-V1.4.1	-7,081	0,046	1,27	V1.1.3-V1.4.2	-7,516	0,017	1,35
V1.1.1-V1.4.2	-9,016	< 0,001	1,62	V1.1.3-V1.4.3	-10,952	< 0,001	1,97
V1.1.1-V1.4.3	-12,452	< 0,001	2,24	V1.1.3-V1.4.4	-12,194	< 0,001	2,19
V1.1.1-V1.4.4	-13,694	< 0,001	2,46	V1.1.3-V1.4.5	-14,548	< 0,001	2,61
V1.1.1-V1.4.5	-16,048	< 0,001	2,88	V1.1.3-V1.5.2	-8,355	0,002	1,50
V1.1.1-V1.5.1	-8,435	0,002	1,52	V1.1.3-V1.5.3	-10,403	< 0,001	1,87
V1.1.1-V1.5.2	-9,855	< 0,001	1,77	V1.1.3-V1.5.4	-14,065	< 0,001	2,53
V1.1.1-V1.5.3	-11,903	< 0,001	2,14	V1.1.3-V1.5.5	-14,452	< 0,001	2,60
V1.1.1-V1.5.4	-15,565	0,000	2,80	V1.1.4-V1.3.3	-9,177	< 0,001	1,65
V1.1.1-V1.5.5	-15,952	< 0,001	2,86	V1.1.4-V1.3.4	-9,597	< 0,001	1,72
V1.1.2-V1.2.4	-7,935	0,007	1,43	V1.1.4-V1.3.5	-9,823	< 0,001	1,76
V1.1.2-V1.3.2	-7,484	0,019	1,34	V1.1.4-V1.4.3	-10,274	< 0,001	1,85
V1.1.2-V1.3.3	-10,806	< 0,001	1,94	V1.1.4-V1.4.4	-11,516	< 0,001	2,07
V1.1.2-V1.3.4	-11,226	< 0,001	2,02	V1.1.4-V1.4.5	-13,871	< 0,001	2,49
V1.1.2-V1.3.5	-11,452	< 0,001	2,06	V1.1.4-V1.5.2	-7,677	0,012	1,38
V1.1.2-V1.4.2	-8,468	0,002	1,52	V1.1.4-V1.5.3	-9,726	< 0,001	1,75
V1.1.2-V1.4.3	-11,903	< 0,001	2,14	V1.1.4-V1.5.4	-13,387	< 0,001	2,40
V1.1.2-V1.4.4	-13,145	< 0,001	2,36	V1.1.4-V1.5.5	-13,774	< 0,001	2,47
V1.1.2-V1.4.5	-15,500	< 0,001	2,78	V1.1.5-V1.3.3	-7,774	0,010	1,40
V1.1.2-V1.5.1	-7,887	0,007	1,42	V1.1.5-V1.3.4	-8,194	0,004	1,47
V1.1.2-V1.5.2	-9,306	< 0,001	1,67	V1.1.5-V1.3.5	-8,419	0,002	1,51
V1.1.2-V1.5.3	-11,355	< 0,001	2,04	V1.1.5-V1.4.3	-8,871	0,001	1,59

**Tabelle A.3.16:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Erlernbarkeit (Teil 1/2)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V1.1.5-V1.4.4	-10,113	< 0,001	1,82	V1.2.3-V1.4.3	-8,532	0,002	1,53
V1.1.5-V1.4.5	-12,468	< 0,001	2,24	V1.2.3-V1.4.4	-9,774	< 0,001	1,76
V1.1.5-V1.5.3	-8,323	0,003	1,49	V1.2.3-V1.4.5	-12,129	< 0,001	2,18
V1.1.5-V1.5.4	-11,984	< 0,001	2,15	V1.2.3-V1.5.3	-7,984	0,006	1,43
V1.1.5-V1.5.5	-12,371	< 0,001	2,22	V1.2.3-V1.5.4	-11,645	< 0,001	2,09
V1.2.1-V1.3.3	-9,242	< 0,001	1,66	V1.2.3-V1.5.5	-12,032	< 0,001	2,16
V1.2.1-V1.3.4	-9,661	< 0,001	1,74	V1.2.4-V1.4.5	-7,565	0,016	1,36
V1.2.1-V1.3.5	-9,887	< 0,001	1,78	V1.2.4-V1.5.4	-7,081	0,046	1,27
V1.2.1-V1.4.3	-10,339	< 0,001	1,86	V1.2.4-V1.5.5	-7,468	0,019	1,34
V1.2.1-V1.4.4	-11,581	< 0,001	2,08	V1.2.5-V1.4.4	-7,823	0,009	1,40
V1.2.1-V1.4.5	-13,935	< 0,001	2,50	V1.2.5-V1.4.5	-10,177	< 0,001	1,83
V1.2.1-V1.5.2	-7,742	0,010	1,39	V1.2.5-V1.5.4	-9,694	< 0,001	1,74
V1.2.1-V1.5.3	-9,790	< 0,001	1,76	V1.2.5-V1.5.5	-10,081	< 0,001	1,81
V1.2.1-V1.5.4	-13,452	< 0,001	2,42	V1.3.1-V1.4.3	-7,242	0,032	1,30
V1.2.1-V1.5.5	-13,839	< 0,001	2,49	V1.3.1-V1.4.4	-8,484	0,002	1,52
V1.2.2-V1.3.3	-8,323	0,003	1,49	V1.3.1-V1.4.5	-10,839	< 0,001	1,95
V1.2.2-V1.3.4	-8,742	0,001	1,57	V1.3.1-V1.5.4	-10,355	< 0,001	1,86
V1.2.2-V1.3.5	-8,968	< 0,001	1,61	V1.3.1-V1.5.5	-10,742	< 0,001	1,93
V1.2.2-V1.4.3	-9,419	< 0,001	1,69	V1.3.2-V1.4.5	-8,016	0,005	1,44
V1.2.2-V1.4.4	-10,661	< 0,001	1,91	V1.3.2-V1.5.4	-7,532	0,017	1,35
V1.2.2-V1.4.5	-13,016	< 0,001	2,34	V1.3.2-V1.5.5	-7,919	0,007	1,42
V1.2.2-V1.5.3	-8,871	0,001	1,59	V1.4.1-V1.4.5	-8,968	< 0,001	1,61
V1.2.2-V1.5.4	-12,532	< 0,001	2,25	V1.4.1-V1.5.4	-8,484	0,002	1,52
V1.2.2-V1.5.5	-12,919	< 0,001	2,32	V1.4.1-V1.5.5	-8,871	0,001	1,59
V1.2.3-V1.3.3	-7,435	0,021	1,34	V1.5.1-V1.4.5	7,613	0,014	1,37
V1.2.3-V1.3.4	-7,855	0,008	1,41	V1.5.1-V1.5.4	-7,129	0,041	1,28
V1.2.3-V1.3.5	-8,081	0,005	1,45	V1.5.1-V1.5.5	-7,516	0,017	1,35

**Tabelle A.3.16:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Erlernbarkeit (Teil 2/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V1.1.1	0,197	31	0,004	V1.3.1	0,173	31	0,019
V1.1.2	0,216	31	0,001	V1.3.2	0,205	31	0,002
V1.1.3	0,217	31	0,001	V1.3.3	0,187	31	0,007
V1.1.4	0,230	31	< 0,001	V1.3.4	0,227	31	< 0,001
V1.1.5	0,254	31	< 0,001	V1.3.5	0,251	31	< 0,001
V1.2.1	0,161	31	0,040	V1.4.1	0,224	31	< 0,001
V1.2.2	0,254	31	< 0,001	V1.4.2	0,240	31	< 0,001
V1.2.3	0,286	31	< 0,001	V1.4.3	0,238	31	< 0,001
V1.2.4	0,240	31	< 0,001	V1.4.4	0,223	31	< 0,001
V1.2.5	0,230	31	< 0,001	V1.4.5	0,252	31	< 0,001

**Tabelle A.3.17:** VR01 - Überprüfung der mentalen Beanspruchung auf Normalverteilung (Teil 1/2)



Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V1.5.1	0,168	31	0,025	V1.5.4	0,220	31	0,001
V1.5.2	0,205	31	0,002	V1.5.5	0,250	31	< 0,001
V1.5.3	0,206	31	0,002	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.3.17:** VR01 - Überprüfung der mentalen Beanspruchung auf Normalverteilung (Teil 2/2)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r
V1.3.2-V1.1.3	7,339	0,026	1,32	V1.4.5-V1.2.1	10,032	< 0,001	1,80
V1.3.3-V1.1.1	7,097	0,044	1,27	V1.4.5-V1.2.2	10,532	< 0,001	1,89
V1.3.3-V1.1.2	7,661	0,012	1,38	V1.4.5-V1.2.3	8,597	0,001	1,54
V1.3.3-V1.1.3	8,113	0,004	1,46	V1.4.5-V1.2.4	7,677	0,012	1,38
V1.3.4-V1.1.1	8,435	0,002	1,52	V1.4.5-V1.2.5	7,226	0,033	1,30
V1.3.4-V1.1.2	9,000	< 0,001	1,62	V1.4.5-V1.3.1	9,500	< 0,001	1,71
V1.3.4-V1.1.3	9,452	< 0,001	1,70	V1.4.5-V1.4.1	8,452	0,002	1,52
V1.3.4-V1.1.4	8,048	0,005	1,45	V1.4.5-V1.4.2	7,355	0,025	1,32
V1.3.4-V1.1.5	7,839	0,008	1,41	V1.5.2-V1.1.3	7,258	0,031	1,30
V1.3.4-V1.2.2	7,242	0,032	1,30	V1.5.3-V1.1.1	8,758	0,001	1,57
V1.3.5-V1.1.1	7,081	0,046	1,27	V1.5.3-V1.1.2	9,323	< 0,001	1,67
V1.3.5-V1.1.2	7,645	0,013	1,37	V1.5.3-V1.1.3	9,774	< 0,001	1,76
V1.3.5-V1.1.3	8,097	0,004	1,45	V1.5.3-V1.1.4	8,371	0,002	1,50
V1.4.3-V1.1.1	8,661	0,001	1,56	V1.5.3-V1.1.5	8,161	0,004	1,47
V1.4.3-V1.1.2	9,226	< 0,001	1,66	V1.5.3-V1.2.1	7,065	0,047	1,27
V1.4.3-V1.1.3	9,677	< 0,001	1,74	V1.5.3-V1.2.2	7,565	0,016	1,36
V1.4.3-V1.1.4	8,274	0,003	1,49	V1.5.4-V1.1.1	12,145	< 0,001	2,18
V1.4.3-V1.1.5	8,065	0,005	1,45	V1.5.4-V1.1.2	12,710	< 0,001	2,28
V1.4.3-V1.2.2	7,468	0,019	1,34	V1.5.4-V1.1.3	13,161	< 0,001	2,36
V1.4.4-V1.1.1	10,387	< 0,001	1,87	V1.5.4-V1.1.4	11,758	< 0,001	2,11
V1.4.4-V1.1.2	10,952	< 0,001	1,97	V1.5.4-V1.1.5	11,548	< 0,001	2,07
V1.4.4-V1.1.3	11,403	< 0,001	2,05	V1.5.4-V1.2.1	10,452	< 0,001	1,88
V1.4.4-V1.1.4	10,000	< 0,001	1,80	V1.5.4-V1.2.2	10,952	< 0,001	1,97
V1.4.4-V1.1.5	9,790	< 0,001	1,76	V1.5.4-V1.2.3	9,016	< 0,001	1,62
V1.4.4-V1.2.1	8,694	0,001	1,56	V1.5.4-V1.2.4	8,097	0,004	1,45
V1.4.4-V1.2.2	9,194	< 0,001	1,65	V1.5.4-V1.2.5	7,645	0,013	1,37
V1.4.4-V1.2.3	7,258	0,031	1,30	V1.5.4-V1.3.1	9,919	< 0,001	1,78
V1.4.4-V1.3.1	8,161	0,004	1,47	V1.5.4-V1.4.1	8,871	0,001	1,59
V1.4.4-V1.4.1	7,113	0,043	1,28	V1.5.4-V1.4.2	7,774	0,010	1,40
V1.4.5-V1.1.1	11,726	< 0,001	2,11	V1.5.5-V1.1.1	12,452	< 0,001	2,24
V1.4.5-V1.1.2	12,290	< 0,001	2,21	V1.5.5-V1.1.2	13,016	< 0,001	2,34
V1.4.5-V1.1.3	12,742	< 0,001	2,29	V1.5.5-V1.1.3	13,468	< 0,001	2,42
V1.4.5-V1.1.4	11,339	< 0,001	2,04	V1.5.5-V1.1.4	12,065	< 0,001	2,17
V1.4.5-V1.1.5	11,129	< 0,001	2,00	V1.5.5-V1.1.5	11,855	< 0,001	2,13

**Tabelle A.3.18:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der mentalen Beanspruchung (Teil 1/2)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V1.5.5-V1.2.1	10,758	< 0,001	1,93	V1.5.5-V1.2.5	7,952	0,006	1,43
V1.5.5-V1.2.2	11,258	< 0,001	2,02	V1.5.5-V1.3.1	10,226	< 0,001	1,84
V1.5.5-V1.2.3	9,323	< 0,001	1,67	V1.5.5-V1.4.1	9,177	< 0,001	1,65
V1.5.5-V1.2.4	8,403	0,002	1,51	V1.5.5-V1.4.2	8,081	0,005	1,45

**Tabelle A.3.18:** VR01 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der mentalen Beanspruchung (Teil 2/2)

#### A.4 Versuchsreihe VR02 – Inferenzstatistische Daten

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V2.1.1	0,161	30	0,047	V2.1.11	0,182	30	0,012
V2.1.2	0,221	30	0,001	V2.1.12	0,192	30	0,006
V2.1.3	0,227	30	< 0,001	V2.1.13	0,197	30	0,004
V2.1.4	0,166	30	0,033	V2.1.14	0,255	30	< 0,001
V2.1.5	0,140	30	0,135	V2.1.15	0,189	30	0,008
V2.1.6	0,212	30	0,001	V2.1.16	0,205	30	0,002
V2.1.7	0,204	30	0,003	V2.1.17	0,261	30	< 0,001
V2.1.8	0,175	30	0,019	V2.1.18	0,152	30	0,076
V2.1.9	0,144	30	0,114	V2.1.19	0,143	30	0,120
V2.1.10	0,132	30	0,190	V2.1.20	0,116	30	0,200

**Tabelle A.4.1:** VR02: Überprüfung der Fehleranzahl auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r
V2.1.12-V2.1.17	-5,767	0,030	1,05	V2.1.20-V2.1.17	6,333	0,006	1,16
V2.1.20-V2.1.1	5,983	0,017	1,09	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.4.2:** VR02 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Fehleranzahl

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V2.1.1	0,103	30	0,200	V2.1.11	0,272	30	< 0,001
V2.1.2	0,142	30	0,127	V2.1.12	0,269	30	< 0,001
V2.1.3	0,207	30	0,002	V2.1.13	0,233	30	< 0,001
V2.1.4	0,223	30	0,001	V2.1.14	0,200	30	0,003
V2.1.5	0,168	30	0,030	V2.1.15	0,201	30	0,003
V2.1.6	0,270	30	< 0,001	V2.1.16	0,531	30	< 0,001
V2.1.7	0,165	30	0,035	V2.1.17	0,207	30	0,002
V2.1.8	0,229	30	< 0,001	V2.1.18	0,213	30	0,001
V2.1.9	0,135	30	0,174	V2.1.19	0,236	30	< 0,001
V2.1.10	0,221	30	0,001	V2.1.20	0,169	30	0,029

**Tabelle A.4.3:** VR02: Überprüfung der Stelldifferenz auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V2.1.8-V2.1.1	5,600	0,047	1,02	V2.1.16-V2.1.10	10,300	< 0,001	1,88
V2.1.8-V2.1.5	5,750	0,032	1,05	V2.1.16-V2.1.11	9,950	< 0,001	1,82
V2.1.12-V2.1.1	7,067	0,001	1,29	V2.1.16-V2.1.12	6,500	0,004	1,19
V2.1.12-V2.1.5	7,217	< 0,001	1,32	V2.1.16-V2.1.13	11,317	< 0,001	2,07
V2.1.12-V2.1.9	5,950	0,019	1,09	V2.1.16-V2.1.14	8,417	< 0,001	1,54
V2.1.15-V2.1.1	7,717	< 0,001	1,41	V2.1.16-V2.1.15	5,850	0,024	1,07
V2.1.15-V2.1.2	5,733	0,033	1,05	V2.1.16-V2.1.17	-9,750	< 0,001	1,78
V2.1.15-V2.1.5	7,867	< 0,001	1,44	V2.1.16-V2.1.18	-7,900	< 0,001	1,44
V2.1.15-V2.1.7	5,650	0,041	1,03	V2.1.16-V2.1.19	-7,083	0,001	1,29
V2.1.15-V2.1.9	6,600	0,003	1,20	V2.1.16-V2.1.20	-5,917	0,020	1,08
V2.1.16-V2.1.1	13,567	< 0,001	2,48	V2.1.18-V2.1.1	5,667	0,039	1,03
V2.1.16-V2.1.2	11,583	< 0,001	2,11	V2.1.18-V2.1.5	5,817	0,027	1,06
V2.1.16-V2.1.3	8,933	< 0,001	1,63	V2.1.19-V2.1.1	6,483	0,004	1,18
V2.1.16-V2.1.4	9,700	< 0,001	1,77	V2.1.19-V2.1.5	6,633	0,003	1,21
V2.1.16-V2.1.5	13,717	< 0,001	2,50	V2.1.20-V2.1.1	7,650	< 0,001	1,40
V2.1.16-V2.1.6	8,600	< 0,001	1,57	V2.1.20-V2.1.2	5,667	0,039	1,03
V2.1.16-V2.1.7	11,500	< 0,001	2,10	V2.1.20-V2.1.5	7,800	< 0,001	1,42
V2.1.16-V2.1.8	7,967	< 0,001	1,45	V2.1.20-V2.1.7	5,583	0,049	1,02
V2.1.16-V2.1.9	12,450	< 0,001	2,27	V2.1.20-V2.1.9	6,533	0,004	1,19

Tabelle A.4.4:VR02 – Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Stelldifferenz

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V2.1.1	0,189	22	0,041	V2.1.11	0,223	22	0,006
V2.1.2	0,252	22	0,001	V2.1.12	0,203	22	0,019
V2.1.3	0,185	22	0,048	V2.1.13	0,139	22	0,200
V2.1.4	0,197	22	0,027	V2.1.14	0,163	22	0,134
V2.1.5	0,177	22	0,071	V2.1.15	0,200	22	0,022
V2.1.6	0,170	22	0,096	V2.1.16	0,167	22	0,111
V2.1.7	0,121	22	0,200	V2.1.17	0,120	22	0,200
V2.1.8	0,137	22	0,200	V2.1.18	0,213	22	0,011
V2.1.9	0,130	22	0,200	V2.1.19	0,234	22	0,003
V2.1.10	0,161	22	0,141	V2.1.20	0,177	22	0,072

Tabelle A.4.5:VR02 – Überprüfung der Bedienzeit auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V2.1.15-V2.1.1	8,091	0,001	1,48	V2.1.20-V2.1.1	7,682	0,003	1,40
V2.1.15-V2.1.5	7,455	0,006	1,36	V2.1.20-V2.1.5	7,045	0,015	1,29
V2.1.15-V2.1.9	7,182	0,011	1,31	V2.1.20-V2.1.9	6,773	0,028	1,24
V2.1.15-V2.1.10	7,273	0,009	1,33	V2.1.20-V2.1.10	6,864	0,023	1,25

Tabelle A.4.6:VR02 – Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Bedienzeit

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V2.1.1	0,286	30	< 0,001	V2.1.11	0,312	30	< 0,001
V2.1.2	0,228	30	< 0,001	V2.1.12	0,257	30	< 0,001
V2.1.3	0,252	30	< 0,001	V2.1.13	0,233	30	< 0,001
V2.1.4	0,215	30	0,001	V2.1.14	0,262	30	< 0,001
V2.1.5	0,281	30	< 0,001	V2.1.15	0,441	30	< 0,001
V2.1.6	0,182	30	0,013	V2.1.16	0,416	30	< 0,001
V2.1.7	0,246	30	< 0,001	V2.1.17	0,171	30	0,025
V2.1.8	0,220	30	0,001	V2.1.18	0,235	30	< 0,001
V2.1.9	0,203	30	0,003	V2.1.19	0,357	30	< 0,001
V2.1.10	0,209	30	0,002	V2.1.20	0,390	30	< 0,001

**Tabelle A.4.7:** VR02 - Überprüfung der Ausprägung auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V2.1.1-V2.1.12	-6,667	0,002	1,22	V2.1.6-V2.1.19	-6,533	0,004	1,19
V2.1.1-V2.1.14	-7,083	0,001	1,29	V2.1.6-V2.1.20	-7,933	< 0,001	1,45
V2.1.1-V2.1.15	-10,000	< 0,001	1,83	V2.1.7-V2.1.12	-5,767	0,030	1,05
V2.1.1-V2.1.16	-10,000	< 0,001	1,83	V2.1.7-V2.1.14	-6,183	0,010	1,13
V2.1.1-V2.1.18	-5,900	0,021	1,08	V2.1.7-V2.1.15	-9,100	< 0,001	1,66
V2.1.1-V2.1.19	-8,350	< 0,001	1,52	V2.1.7-V2.1.16	-9,100	< 0,001	1,66
V2.1.1-V2.1.20	-9,750	< 0,001	1,78	V2.1.7-V2.1.19	-7,450	< 0,001	1,36
V2.1.2-V2.1.15	-7,283	< 0,001	1,33	V2.1.7-V2.1.20	-8,850	< 0,001	1,62
V2.1.2-V2.1.16	-7,283	< 0,001	1,33	V2.1.9-V2.1.12	-5,650	0,041	1,03
V2.1.2-V2.1.19	-5,633	0,043	1,03	V2.1.9-V2.1.14	-6,067	0,014	1,11
V2.1.2-V2.1.20	-7,033	0,001	1,28	V2.1.9-V2.1.15	-8,983	< 0,001	1,64
V2.1.3-V2.1.15	-6,533	0,004	1,19	V2.1.9-V2.1.16	-8,983	< 0,001	1,64
V2.1.3-V2.1.16	-6,533	0,004	1,19	V2.1.9-V2.1.19	-7,333	< 0,001	1,34
V2.1.3-V2.1.20	-6,283	0,007	1,15	V2.1.9-V2.1.20	-8,733	< 0,001	1,59
V2.1.5-V2.1.4	5,633	0,043	1,03	V2.1.10-V2.1.15	-8,333	< 0,001	1,52
V2.1.5-V2.1.8	-6,417	0,005	1,17	V2.1.10-V2.1.16	-8,333	< 0,001	1,52
V2.1.5-V2.1.12	-7,800	< 0,001	1,42	V2.1.10-V2.1.19	-6,683	0,002	1,22
V2.1.5-V2.1.13	-5,850	0,024	1,07	V2.1.10-V2.1.20	-8,083	< 0,001	1,48
V2.1.5-V2.1.14	-8,217	< 0,001	1,50	V2.1.11-V2.1.15	-7,383	< 0,001	1,35
V2.1.5-V2.1.15	-11,133	< 0,001	2,03	V2.1.11-V2.1.16	-7,383	< 0,001	1,35
V2.1.5-V2.1.16	-11,133	< 0,001	2,03	V2.1.11-V2.1.19	-5,733	0,033	1,05
V2.1.5-V2.1.18	-7,033	0,001	1,28	V2.1.11-V2.1.20	-7,133	0,001	1,30
V2.1.5-V2.1.19	-9,483	< 0,001	1,73	V2.1.17-V2.1.15	6,983	0,001	1,27
V2.1.5-V2.1.20	-10,883	< 0,001	1,99	V2.1.17-V2.1.16	6,983	0,001	1,27
V2.1.6-V2.1.15	-8,183	< 0,001	1,49	V2.1.17-V2.1.20	-6,733	0,002	1,23
V2.1.6-V2.1.16	-8,183	< 0,001	1,49	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.4.8:** VR02 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Ausprägung

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V2.1.1	0,217	30	0,001	V2.1.11	0,202	30	0,003
V2.1.2	0,192	30	0,006	V2.1.12	0,178	30	0,017
V2.1.3	0,164	30	0,038	V2.1.13	0,161	30	0,045
V2.1.4	0,133	30	0,183	V2.1.14	0,165	30	0,036
V2.1.5	0,164	30	0,038	V2.1.15	0,266	30	< 0,001
V2.1.6	0,139	30	0,142	V2.1.16	0,258	30	< 0,001
V2.1.7	0,226	30	< 0,001	V2.1.17	0,162	30	0,043
V2.1.8	0,197	30	0,005	V2.1.18	0,159	30	0,052
V2.1.9	0,157	30	0,057	V2.1.19	0,207	30	0,002
V2.1.10	0,191	30	0,007	V2.1.20	0,257	30	< 0,001

Tabelle A.4.9: VR02 - Überprüfung der Präzision auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r
V2.1.1-V2.1.4	-5,767	0,030	1,05	V2.1.7-V2.1.16	-11,033	< 0,001	2,01
V2.1.1-V2.1.8	-6,917	0,001	1,26	V2.1.7-V2.1.19	-8,417	< 0,001	1,54
V2.1.1-V2.1.12	-7,933	< 0,001	1,45	V2.1.7-V2.1.20	-10,100	< 0,001	1,84
V2.1.1-V2.1.14	-6,050	0,014	1,10	V2.1.8-V2.1.16	-6,367	0,006	1,16
V2.1.1-V2.1.15	-11,400	< 0,001	2,08	V2.1.9-V2.1.12	-5,733	0,033	1,05
V2.1.1-V2.1.16	-13,283	< 0,001	2,43	V2.1.9-V2.1.15	-9,200	< 0,001	1,68
V2.1.1-V2.1.19	-10,667	< 0,001	1,95	V2.1.9-V2.1.16	-11,083	< 0,001	2,02
V2.1.1-V2.1.20	-12,350	< 0,001	2,25	V2.1.9-V2.1.19	-8,467	< 0,001	1,55
V2.1.2-V2.1.12	-5,867	0,023	1,07	V2.1.9-V2.1.20	-10,150	< 0,001	1,85
V2.1.2-V2.1.15	-9,333	< 0,001	1,70	V2.1.10-V2.1.12	-6,317	0,007	1,15
V2.1.2-V2.1.16	-11,217	< 0,001	2,05	V2.1.10-V2.1.15	-9,783	< 0,001	1,79
V2.1.2-V2.1.19	-8,600	< 0,001	1,57	V2.1.10-V2.1.16	-11,667	< 0,001	2,13
V2.1.2-V2.1.20	-10,283	< 0,001	1,88	V2.1.10-V2.1.19	-9,050	< 0,001	1,65
V2.1.3-V2.1.15	-6,717	0,002	1,23	V2.1.10-V2.1.20	-10,733	< 0,001	1,96
V2.1.3-V2.1.16	-8,600	< 0,001	1,57	V2.1.11-V2.1.15	-7,317	< 0,001	1,34
V2.1.3-V2.1.19	-5,983	0,017	1,09	V2.1.11-V2.1.16	-9,200	< 0,001	1,68
V2.1.3-V2.1.20	-7,667	< 0,001	1,40	V2.1.11-V2.1.19	-6,583	0,003	1,20
V2.1.4-V2.1.15	-5,633	0,043	1,03	V2.1.11-V2.1.20	-8,267	< 0,001	1,51
V2.1.4-V2.1.16	-7,517	< 0,001	1,37	V2.1.13-V2.1.15	-7,900	< 0,001	1,44
V2.1.4-V2.1.20	-6,583	0,003	1,20	V2.1.13-V2.1.16	-9,783	< 0,001	1,79
V2.1.5-V2.1.12	-7,067	0,008	1,29	V2.1.13-V2.1.19	-7,167	0,001	1,31
V2.1.5-V2.1.15	-10,533	< 0,001	1,92	V2.1.13-V2.1.20	-8,850	< 0,001	1,62
V2.1.5-V2.1.16	-12,417	< 0,001	2,27	V2.1.14-V2.1.16	-7,233	0,004	1,32
V2.1.5-V2.1.19	-9,800	< 0,001	1,79	V2.1.14-V2.1.20	-6,300	0,007	1,15
V2.1.5-V2.1.20	-11,483	< 0,001	2,10	V2.1.6-V2.1.19	-7,017	0,001	1,28
V2.1.5-V2.1.8	-6,050	0,014	1,10	V2.1.6-V2.1.20	-8,700	< 0,001	1,59
V2.1.6-V2.1.15	-7,750	< 0,001	1,41	V2.1.7-V2.1.12	-5,683	0,038	1,04
V2.1.6-V2.1.16	-9,633	< 0,001	1,76	V2.1.7-V2.1.15	-9,150	< 0,001	1,67

Tabelle A.4.10: VR02 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden Präzision (Teil 1/2)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V2.1.17-V2.1.15	8,267	< 0,001	1,51	V2.1.18-V2.1.15	6,150	0,011	1,12
V2.1.17-V2.1.16	10,150	< 0,001	1,85	V2.1.18-V2.1.16	8,033	< 0,001	1,47
V2.1.17-V2.1.19	-7,533	< 0,001	1,38	V2.1.18-V2.1.20	-7,100	0,001	1,30
V2.1.17-V2.1.20	-9,217	< 0,001	1,68	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.4.10:** VR02 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden Präzision (Teil 2/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V2.1.1	0,214	30	0,001	V2.1.11	0,221	30	0,001
V2.1.2	0,207	30	0,002	V2.1.12	0,137	30	0,156
V2.1.3	0,155	30	0,062	V2.1.13	0,143	30	0,122
V2.1.4	0,161	30	0,046	V2.1.14	0,203	30	0,003
V2.1.5	0,200	30	0,004	V2.1.15	0,303	30	< 0,001
V2.1.6	0,194	30	0,005	V2.1.16	0,335	30	< 0,001
V2.1.7	0,205	30	0,002	V2.1.17	0,229	30	< 0,001
V2.1.8	0,198	30	0,004	V2.1.18	0,167	30	0,033
V2.1.9	0,190	30	0,007	V2.1.19	0,266	30	< 0,001
V2.1.10	0,161	30	0,046	V2.1.20	0,227	30	< 0,001

**Tabelle A.4.11:** VR02 - Überprüfung der Benutzungsgeschwindigkeit auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V2.1.1-V2.1.8	-8,517	< 0,001	1,55	V2.1.5-V2.1.8	-7,283	< 0,001	1,33
V2.1.1-V2.1.12	-8,067	< 0,001	1,47	V2.1.5-V2.1.12	-6,833	0,002	1,25
V2.1.1-V2.1.14	-6,400	0,005	1,17	V2.1.5-V2.1.15	-10,233	< 0,001	1,87
V2.1.1-V2.1.15	-11,467	< 0,001	2,09	V2.1.5-V2.1.16	-11,517	< 0,001	2,10
V2.1.1-V2.1.16	-12,750	< 0,001	2,33	V2.1.5-V2.1.19	-9,500	< 0,001	1,73
V2.1.1-V2.1.19	-10,733	< 0,001	1,96	V2.1.5-V2.1.20	-10,117	< 0,001	1,85
V2.1.1-V2.1.20	-11,350	< 0,001	2,07	V2.1.6-V2.1.15	-8,000	< 0,001	1,46
V2.1.2-V2.1.15	-8,300	< 0,001	1,52	V2.1.6-V2.1.16	-9,283	< 0,001	1,69
V2.1.2-V2.1.16	-9,583	< 0,001	1,75	V2.1.6-V2.1.19	-7,267	< 0,001	1,33
V2.1.2-V2.1.19	-7,567	< 0,001	1,38	V2.1.6-V2.1.20	-7,883	< 0,001	1,44
V2.1.2-V2.1.20	-8,183	< 0,001	1,49	V2.1.7-V2.1.8	-5,883	0,022	1,07
V2.1.3-V2.1.15	-7,467	< 0,001	1,36	V2.1.7-V2.1.15	-8,833	< 0,001	1,61
V2.1.3-V2.1.16	-8,750	< 0,001	1,60	V2.1.7-V2.1.16	-10,117	< 0,001	1,85
V2.1.3-V2.1.19	-6,733	0,002	1,23	V2.1.7-V2.1.19	-8,100	< 0,001	1,48
V2.1.3-V2.1.20	-7,350	< 0,001	1,34	V2.1.7-V2.1.20	-8,717	< 0,001	1,59
V2.1.4-V2.1.15	-7,150	0,001	1,31	V2.1.9-V2.1.15	-8,200	< 0,001	1,50
V2.1.4-V2.1.16	-8,433	< 0,001	1,54	V2.1.9-V2.1.16	-9,483	< 0,001	1,73
V2.1.4-V2.1.19	-6,417	0,005	1,17	V2.1.9-V2.1.19	-7,467	< 0,001	1,36
V2.1.4-V2.1.20	-7,033	0,001	1,28	V2.1.9-V2.1.20	-8,083	< 0,001	1,48

**Tabelle A.4.12:** VR02 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Benutzungsgeschwindigkeit (Teil 1/2)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V2.1.10-V2.1.15	-8,300	< 0,001	1,52	V2.1.14-V2.1.16	-6,350	0,006	1,16
V2.1.10-V2.1.16	-9,583	< 0,001	1,75	V2.1.17-V2.1.8	6,083	0,013	1,11
V2.1.10-V2.1.19	-7,567	< 0,001	1,38	V2.1.17-V2.1.12	5,633	0,043	1,03
V2.1.10-V2.1.20	-8,183	< 0,001	1,49	V2.1.17-V2.1.15	9,033	< 0,001	1,65
V2.1.11-V2.1.15	-6,850	0,001	1,25	V2.1.17-V2.1.16	10,317	< 0,001	1,88
V2.1.11-V2.1.16	-8,133	< 0,001	1,48	V2.1.17-V2.1.19	-8,300	< 0,001	1,52
V2.1.11-V2.1.19	-6,117	0,012	1,12	V2.1.17-V2.1.20	-8,917	< 0,001	1,63
V2.1.11-V2.1.20	-6,733	0,002	1,23	V2.1.18-V2.1.15	6,833	0,002	1,25
V2.1.13-V2.1.15	-7,683	< 0,001	1,40	V2.1.18-V2.1.16	8,117	< 0,001	1,48
V2.1.13-V2.1.16	-8,967	< 0,001	1,64	V2.1.18-V2.1.19	-6,100	0,012	1,11
V2.1.13-V2.1.19	-6,950	0,001	1,27	V2.1.18-V2.1.20	-6,717	0,002	1,23
V2.1.13-V2.1.20	-7,567	< 0,001	1,38	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

**Tabelle A.4.12:** VR02 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Benutzungsgeschwindigkeit (Teil 2/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V2.1.1	0,177	30	0,017	V2.1.11	0,298	30	< 0,000
V2.1.2	0,134	30	0,178	V2.1.12	0,239	30	< 0,000
V2.1.3	0,191	30	0,007	V2.1.13	0,155	30	0,064
V2.1.4	0,165	30	0,036	V2.1.14	0,196	30	0,005
V2.1.5	0,131	30	0,200	V2.1.15	0,265	30	< 0,000
V2.1.6	0,179	30	0,015	V2.1.16	0,228	30	< 0,000
V2.1.7	0,146	30	0,101	V2.1.17	0,158	30	0,054
V2.1.8	0,163	30	0,042	V2.1.18	0,152	30	0,074
V2.1.9	0,209	30	0,002	V2.1.19	0,194	30	0,005
V2.1.10	0,189	30	0,008	V2.1.20	0,199	30	0,004

**Tabelle A.4.13:** VR02 - Überprüfung der Erlernbarkeit auf Normalverteilung

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V2.1.1-V2.1.8	-6,700	0,002	1,22	V2.1.3-V2.1.15	-7,850	< 0,001	1,43
V2.1.1-V2.1.12	-8,317	< 0,001	1,52	V2.1.3-V2.1.16	-8,583	< 0,001	1,57
V2.1.1-V2.1.14	-6,433	0,005	1,17	V2.1.3-V2.1.19	-6,500	0,004	1,19
V2.1.1-V2.1.15	-11,433	< 0,001	2,09	V2.1.3-V2.1.20	-7,183	0,001	1,31
V2.1.1-V2.1.16	-12,167	< 0,001	2,22	V2.1.4-V2.1.15	-5,867	0,023	1,07
V2.1.1-V2.1.19	-10,083	< 0,001	1,84	V2.1.4-V2.1.16	-6,600	0,003	1,20
V2.1.1-V2.1.20	-10,767	< 0,001	1,97	V2.1.5-V2.1.8	-5,650	0,041	1,03
V2.1.2-V2.1.15	-8,517	< 0,001	1,55	V2.1.5-V2.1.12	-7,267	< 0,001	1,33
V2.1.2-V2.1.16	-9,250	< 0,001	1,69	V2.1.5-V2.1.15	-10,383	< 0,001	1,90
V2.1.2-V2.1.19	-7,167	< 0,001	1,31	V2.1.5-V2.1.16	-11,117	< 0,001	2,03
V2.1.2-V2.1.20	-7,850	< 0,001	1,43	V2.1.5-V2.1.19	-9,033	< 0,001	1,65

**Tabelle A.4.14:** VR02 – Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Erlernbarkeit (Teil 1/2)

Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V2.1.5-V2.1.20	-9,717	< 0,001	1,77	V2.1.10-V2.1.19	-8,050	< 0,001	1,47
V2.1.6-V2.1.15	-8,017	< 0,001	1,46	V2.1.10-V2.1.20	-8,733	< 0,001	1,59
V2.1.6-V2.1.16	-8,750	< 0,001	1,60	V2.1.11-V2.1.15	-6,683	0,002	1,22
V2.1.6-V2.1.19	-6,667	0,002	1,22	V2.1.11-V2.1.16	-7,417	< 0,001	1,35
V2.1.6-V2.1.20	-7,350	< 0,001	1,34	V2.1.11-V2.1.20	-6,017	0,016	1,10
V2.1.7-V2.1.12	-5,967	0,018	1,09	V2.1.13-V2.1.15	-8,017	< 0,001	1,46
V2.1.7-V2.1.15	-9,083	< 0,001	1,66	V2.1.13-V2.1.16	-8,750	< 0,001	1,60
V2.1.7-V2.1.16	-9,817	< 0,001	1,79	V2.1.13-V2.1.19	-6,667	0,002	1,22
V2.1.7-V2.1.19	-7,733	< 0,001	1,41	V2.1.13-V2.1.20	-7,350	< 0,001	1,34
V2.1.7-V2.1.20	-8,417	< 0,001	1,54	V2.1.14-V2.1.16	-5,733	0,033	1,05
V2.1.9-V2.1.12	-5,833	0,026	1,07	V2.1.17-V2.1.12	5,833	0,026	1,07
V2.1.9-V2.1.15	-8,950	< 0,001	1,63	V2.1.17-V2.1.15	8,950	< 0,001	1,63
V2.1.9-V2.1.16	-9,683	< 0,001	1,77	V2.1.17-V2.1.16	9,683	< 0,001	1,77
V2.1.9-V2.1.19	-7,600	< 0,001	1,39	V2.1.17-V2.1.19	-7,600	< 0,001	1,39
V2.1.9-V2.1.20	-8,283	< 0,001	1,51	V2.1.17-V2.1.20	-8,283	< 0,001	1,51
V2.1.10-V2.1.12	-6,283	0,007	1,15	V2.1.18-V2.1.15	6,717	0,002	1,23
V2.1.10-V2.1.15	-9,400	< 0,001	1,72	V2.1.18-V2.1.16	7,450	< 0,001	1,36
V2.1.10-V2.1.16	-10,133	< 0,001	1,85	V2.1.18-V2.1.20	-6,050	0,014	1,10

**Tabelle A.4.14:** VR02 – Paarungen mit signifikanten Unterschieden der Erlernbarkeit (Teil 2/2)

Kolmogorov-Smirnov-Test				Kolmogorov-Smirnov-Test			
Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p	Versuchsmerkmal	Test-statistik z	df	Signifikanz p
V2.1.1	0,198	30	0,004	V2.1.11	0,155	30	0,062
V2.1.2	0,164	30	0,040	V2.1.12	0,134	30	0,179
V2.1.3	0,141	30	0,131	V2.1.13	0,177	30	0,018
V2.1.4	0,185	30	0,010	V2.1.14	0,161	30	0,045
V2.1.5	0,189	30	0,008	V2.1.15	0,178	30	0,016
V2.1.6	0,272	30	< 0,001	V2.1.16	0,216	30	0,001
V2.1.7	0,169	30	0,029	V2.1.17	0,120	30	0,200
V2.1.8	0,220	30	0,001	V2.1.18	0,119	30	0,200
V2.1.9	0,193	30	0,006	V2.1.19	0,251	30	< 0,001
V2.1.10	0,154	30	0,067	V2.1.20	0,222	30	0,001

**Tabelle A.4.15:** VR02 - Überprüfung der mentalen Beanspruchung auf Normalverteilung



Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig. p	Effektstärke r	Kombination	Test-statistik z	Anp. Sig.	Effektstärke r
V2.1.15-V2.1.1	7,167	0,001	1,31	V2.1.16-V2.1.9	7,500	< 0,001	1,37
V2.1.15-V2.1.9	6,300	0,007	1,15	V2.1.16-V2.1.10	5,767	0,030	1,05
V2.1.15-V2.1.17	-6,083	0,013	1,11	V2.1.16-V2.1.11	5,600	0,0468	1,02
V2.1.16-V2.1.1	8,367	< 0,001	1,53	V2.1.16-V2.1.17	-7,283	< 0,001	1,33
V2.1.16-V2.1.3	5,617	0,045	1,03	V2.1.19-V2.1.1	6,267	0,008	1,14
V2.1.16-V2.1.5	6,133	0,011	1,12	V2.1.20-V2.1.1	6,650	0,003	1,21
V2.1.16-V2.1.7	6,750	0,002	1,23	V2.1.20-V2.1.9	5,783	0,029	1,06

**Tabelle A.4.16:** VR02 - Paarungen mit signifikanten Unterschieden der mentalen Beanspruchung



# Lebenslauf

## Persönliche Angaben:

Name: Peter Schmid  
Geburtsdatum, -ort: 24.03.1991, Hechingen  
Staatsangehörigkeit: Deutsch

## Ausbildung:

09/2001 – 07/2010 Albeck-Gymnasium Sulz a.N.  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife  
10/2010 – 10/2013 Studium Medizintechnik (B.Sc.) an der Universität Tübingen  
und Universität Stuttgart  
Schwerpunkte: Optik und Minimalinvasive Techniken in der  
Chirurgie  
10/2013 – 10/2016 Studium Medizintechnik (M.Sc.) an der Universität Stuttgart  
Schwerpunkte: Medizingerätekonstruktion und Mikrosystem-  
technik

## Beruflicher Werdegang:

11/2016 – 12/2022 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktions-  
technik und Technisches Design (IKTD), Forschungs- und  
Lehrgebiet Technisches Design der Universität Stuttgart  
Seit 01/2023 Gruppenleiter Technisches Interface Design am Institut für  
Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD),  
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design der  
Universität Stuttgart









ISBN-13: 978-3-946924-22-7