



Institut für Konstruktionstechnik  
und Technisches Design  
Universität Stuttgart

Forschungs- und Lehrgebiet  
Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. T. Maier

Matti Schwalk

**Entwicklung und Untersuchung  
vibrotaktiler Muster im Kontext der  
Mensch-Maschine-Interaktion**

Bericht Nr. 694







# **Entwicklung und Untersuchung vibrotaktile Muster im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
Matti Schwalk  
geboren in Stuttgart

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier  
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dieter Spath

Tag der mündlichen Prüfung: 15.06.2020

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design  
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design  
Universität Stuttgart

2020

**D 93**

**ISBN-13: 978-3-946924-10-4**

**Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design**

**Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design**

Univ.-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](mailto:mail@iktd.uni-stuttgart.de)

*“Supposing is good, but finding out is better.”*

(Mark Twain)





## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während und nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, der Universität Stuttgart. Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier herzlich für das in mich gesetzte Vertrauen, den wissenschaftlichen Freiraum und die Möglichkeit zur Promotion. Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dieter Spath für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Herrn Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel danke ich für die freundliche Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei allen meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen möchte ich mich für die sehr angenehme und wertvolle Zusammenarbeit bedanken. Der Zusammenhalt im Team, die stetige gegenseitige Hilfsbereitschaft und die fachlichen Diskussionen sind nicht selbstverständlich und haben mich persönlich sowie diese Arbeit stets bereichert. Einen wesentlichen Beitrag leisteten zudem die Studierenden, die als wissenschaftliche Hilfskräfte oder in Form studentischer Arbeiten an meinem Forschungsthema mitwirkten. Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Niko Kalogerakis, Herrn Kai Salzman und Herrn Tobias Thiemt für die Unterstützung bei der technischen Realisierung des Prüfstandes (Hardware und Software). An dieser Stelle sei auch allen Probandinnen und Probanden für die Teilnahme an den experimentellen Versuchen gedankt, die es ermöglichten, umfangreiche empirische Daten zu erheben und daraus wertvolle Rückschlüsse zu ziehen. Herrn Dr.-Ing. Roland Mandel sowie meiner Mutter danke ich herzlich für die detaillierte Durchsicht des Manuskripts.

Ein entscheidender Schritt auf meinem Weg zur Promotion war für mich die Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft am IKTD (2008/2009), noch bevor ich das Hauptfach Technisches Design besuchte. Für den dabei entgegengebrachten Vertrauensvorschuss danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier und Herrn Dr.-Ing. Markus Schmid.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern Ingrid und Peter, die mich in allen Lebenslagen immer bedingungslos unterstützt und bestärkt haben und mir dadurch so viele Möglichkeiten eröffneten. Auch meiner Schwester Jannike danke ich für den stetigen familiären Rückhalt.

Ein ganz besonderer Dank gilt abschließend meiner Partnerin Farina, die diesen Weg mitgegangen ist und mich in allen Phasen mit viel Liebe und Verständnis konsequent unterstützt hat.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung .....	2
1.3 Struktur der Arbeit.....	4
<b>2 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>7</b>
2.1 Informationsaufnahme des Menschen .....	7
2.1.1 Haptische Wahrnehmung .....	7
2.1.2 Taktile Wahrnehmung.....	8
2.1.3 Haptische Wahrnehmungseffekte .....	10
2.1.4 Multimodalität.....	13
2.2 Informationsverarbeitung des Menschen .....	14
2.2.1 Gedächtnis und Wissen .....	14
2.2.2 Aufmerksamkeit .....	16
2.2.3 Situation Awareness .....	17
2.2.4 Mentale Modelle und X-Kompatibilitäten.....	18
2.3 Mensch-Maschine-Interaktion .....	19
2.3.1 Basisschema, Anzeiger und Stellteile .....	20
2.3.2 Informationsmodell.....	21
2.3.3 Fahrer-Fahrzeug-Interaktion .....	23
<b>3 Stand der Technik und Forschung .....</b>	<b>25</b>
3.1 Systematische Einteilung taktiler Anzeiger .....	25
3.1.1 Gliederung nach Technologie .....	25
3.1.2 Gliederung nach Körperregion .....	26
3.1.3 Gliederung nach Anwendungsbereich .....	28
3.2 Relevante Forschungsarbeiten zur taktilen Informationsdarbietung .....	28
3.2.1 Taktile Grenz- und Komfortbereiche .....	28
3.2.2 Taktile Muster und Tactons.....	29
3.2.3 Taktile Anzeiger im Fahrzeug .....	30
3.2.4 Taktile Anzeiger an Torso und Beinen .....	38
3.2.5 Einfluss von Kleidung.....	41
3.3 Forschungsbedarf im Bereich taktiler Anzeiger .....	42

<b>4 Methodenentwicklung .....</b>	<b>45</b>
4.1 Parametrisierung der taktilen Informationskodierung .....	45
4.2 Systematisches Vorgehensmodell .....	48
<b>5 Versuchsplanung und Vorstudien .....</b>	<b>53</b>
5.1 Forschungsfragen .....	53
5.2 Entwicklung der Taktilen Sitz-Matrix (TSM) .....	53
5.2.1 Anforderungen .....	54
5.2.2 Hardware und Motorenanordnung .....	55
5.2.3 Ansteuerung und Kalibrierung.....	58
5.2.4 Touchscreen und Software .....	60
5.2.5 Gesamtaufbau und Versuchsumgebung.....	62
5.3 Experimentelle Vorstudien .....	63
5.4 Fragebogenentwicklung .....	66
5.5 Versuchsdesign und -ablauf.....	67
<b>6 Versuchsreihe 1: Erkennbarkeit vibrotaktile Muster .....</b>	<b>73</b>
6.1 Versuchsvorbereitung und -durchführung .....	73
6.1.1 Ziele und Hypothesen .....	73
6.1.2 Generierung der Reizmuster .....	76
6.1.3 Versuchsaufbau und -bedingungen .....	88
6.1.4 Versuchsablauf .....	90
6.1.5 Probandenkollektiv .....	91
6.2 Versuchsergebnisse.....	92
6.2.1 Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung .....	92
6.2.2 Ergebnisse – Orientierung, kontinuierlich/gepulst .....	95
6.2.3 Ergebnisse – Orientierung, dynamisch .....	98
6.2.4 Ergebnisse – Richtungen .....	100
6.2.5 Ergebnisse – Punktuelle Reize .....	108
6.2.6 Ergebnisse – Radialer Verlauf.....	111
6.2.7 Auswertung Fragebogen.....	114
6.2.8 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....	115
<b>7 Versuchsreihe 2: Bedeutung vibrotaktile Muster .....</b>	<b>119</b>
7.1 Versuchsvorbereitung und -durchführung .....	119
7.1.1 Ziele und Hypothesen .....	119
7.1.2 Generierung und Auswahl der Informationen.....	120
7.1.3 Generierung und Auswahl der taktilen Reizmuster .....	125
7.1.4 Versuchsaufbau und -bedingungen .....	125
7.1.5 Versuchsablauf .....	130
7.1.6 Probandenkollektiv.....	131

---

7.2	V Versuchsergebnisse .....	132
7.2.1	Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung .....	132
7.2.2	Ergebnisse – Dringlichkeit .....	133
7.2.3	Ergebnisse – Zuordnung von Informationen .....	135
7.2.4	Ergebnisse – Zuordnung von Mustern .....	137
7.2.5	Ergebnisse – Muster-Informationen-Kombinationen .....	141
7.2.6	Auswertung Fragebogen.....	144
7.2.7	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....	145
<b>8</b>	<b>Versuchsreihe 3: Lernen und Abrufen vibrotaktile Muster .....</b>	<b>149</b>
8.1	Versuchsvorbereitung und -durchführung.....	149
8.1.1	Ziele und Hypothesen .....	149
8.1.2	Generierung der Reizmuster.....	150
8.1.3	Versuchsaufbau und -bedingungen .....	154
8.1.4	Versuchsablauf .....	155
8.1.5	Probandenkollektiv.....	157
8.2	V Versuchsergebnisse .....	157
8.2.1	Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung .....	158
8.2.2	Ergebnisse – Lernphase .....	158
8.2.3	Ergebnisse – Abfragephase.....	160
8.2.4	Auswertung Fragebogen.....	166
8.2.5	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....	168
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>171</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>173</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>175</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>189</b>
A1	Datenblatt – Vibrationsmotor .....	189
A2	Fragebogen .....	191
A3	Einzelschritte der dynamischen Muster .....	197
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>203</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
*	Kennzeichnung eines signifikanten Unterschieds ( $p < 0.05$ )
**	Kennzeichnung eines hoch signifikanten Unterschieds ( $p < 0.01$ )
***	Kennzeichnung eines höchst signifikanten Unterschieds ( $p < 0.001$ )
$\pm$	Symbol zur Angabe der Standardabweichung
$\mu\text{m}$	Mikrometer
$\infty$	Endlosschleife
A	Ampere
AG	Arbeitsgedächtnis
ANOVA	Varianzanalyse (= Analysis of Variance)
bit	Kleinste darzustellende Datenmenge (= binary digit)
BMI	Body-Mass-Index
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Chunk	Informationsfragment bzw. -einheit
cm	Zentimeter
D	Display / Eingabefeld (für Piktogramm-Bezeichnung)
dB SL	Dezibel oberhalb der Wahrnehmungsschwelle (SL)
<i>df</i>	Freiheitsgrade (= degrees of freedom)
<i>F</i>	F-Wert als Prüfmaß der ANOVA
G	Erdbeschleunigung als Maß für die normalisierte Vibrationsamplitude
GS	Gesamter Sitz (TSM-Bereich bei Motorenanordnung)
$H_{0x}$	Nullhypothese
hh:mm	Uhrzeit in Stunden und Minuten
$H_x$	Alternativhypothese
Hz	Hertz (Anzahl sich wiederholender Vorgänge pro Sekunde)

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
IC	Integrierter Schaltkreis
IKTD	Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
kg	Kilogramm
km	Kilometer
k $\Omega$	Kiloohm
LED	Leuchtdiode (= light-emitting diode)
LZG	Langzeitgedächtnis
M	Motor-Anordnung (für Piktogramm-Bezeichnung)
mA	Milliampere
min	Minute
mm	Millimeter
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MMS	Mensch-Maschine-System
ms	Millisekunde
$N, n$	Probandenanzahl
NASA-TLX	Fragebogen zur subjektiven Belastung (= NASA Task Load Index)
$\eta_p^2$	Partielles Eta-Quadrat als Maß der Effektgröße einer ANOVA
$\bar{X}$	Arithmetischer Mittelwert
$p$	Signifikanzwert
Pa	Pascal
PKW	Personenkraftwagen
PWM	Pulsweitenmodulation
$r$	Korrelationskoeffizient
R	Rang / Rangfolge
RL	Rückenlehne (TSM-Bereich bei Motorenanordnung)
RS	Rangsumme

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
s	Sekunde
SA	Dynamisches Situationsbewusstsein (= Situation Awareness)
S <sub>E</sub>	Eignungs-Score für die Auswahl von Informationen
SF	Sitzfläche (TSM-Bereich bei Motorenanordnung)
TSM	Taktile Sitz-Matrix (= Tactile Seat Matrix)
V	Volt
V1	Versuchsreihe 1
V2	Versuchsreihe 2
V3	Versuchsreihe 3
z	Statistischer Parameter beim Friedman-Test
ε	Korrekturfaktor Epsilon bei einer ANOVA

### **Hinweise für den Leser**

Die Quellenangaben in dieser Arbeit erfolgen innerhalb des fortlaufenden Textes in eckigen Klammern und verweisen auf einen ausführlichen Eintrag im Literaturverzeichnis. Quellenangaben am Ende eines Absatzes beziehen sich auf den gesamten Absatz.

Im Interesse einer besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit nicht ausdrücklich in geschlechtsspezifische Personenbezeichnungen differenziert. Es soll an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen werden, dass die gewählten sprachlichen Formen stets alle Geschlechter gleichberechtigt einschließen.



## Abstract

As a result of advancing technological progress and the associated digitalisation, the degree of automation and the complexity of technical systems are constantly increasing. This also applies to human-machine interaction, which on the one hand should be as simple as possible in terms of good usability and user experience. On the other hand, users must still have the most comprehensive situational awareness possible in order to be able to initiate the right measures, especially in the event of disruptions. The interface should therefore always support the user in filtering and prioritising information. Many operating situations are still strongly influenced by visual and auditory information approaching the user. A striking example of this is the driver-vehicle interaction in the passenger car cockpit. Numerous studies have shown that tactile displays can relieve the visual perception channel in particular and significantly increase the usability of human-machine systems [SCHLICK ET AL. 2010, p. 993], [LU & SARTER 2014, p. 1706]. The tactile information presentation can be used redundantly or in addition to other channels of perception or on its own. Better performance is usually reported in terms of shorter response times and higher recognition rates of the transmitted information among the users.

Due to the already extensively proven advantages of tactile information coding in human-machine interaction, intensive research has been carried out in this area for decades. Lu and Sarter emphasise how important it is to include the limits of perception as well as aspects of attention and information processing in order to design tactile indicators effectively and efficiently [LU & SARTER 2014, p. 1706]. Ferris et al. also confirm the usefulness of tactile indicators in data-intensive areas by relieving the visual and auditory perception channels. Nevertheless, in their view there is still a lack of a better understanding of the factors influencing tactile information processing in order to generate robust tactile interface solutions [FERRIS ET AL. 2010, p. 1316].

One of the main advantages of tactile information transmission can be seen in the fact that this channel of perception is still often hardly used. Ideally, there is constant contact between the user and the tactile display. Thus, tactile cues can be transmitted and perceived directly without the need to focus attention on a specific area or item first. In addition, information can be transmitted privately, without the (unwanted) involvement of other people [BROWN 2007, p. 31-33]. [SCHWALK ET AL. 2016]

Furthermore, the tactile modality (by the skin) offers a large, three-dimensional surface, whereby the hemisphere of the body can also be used as a reference. Tactile displays

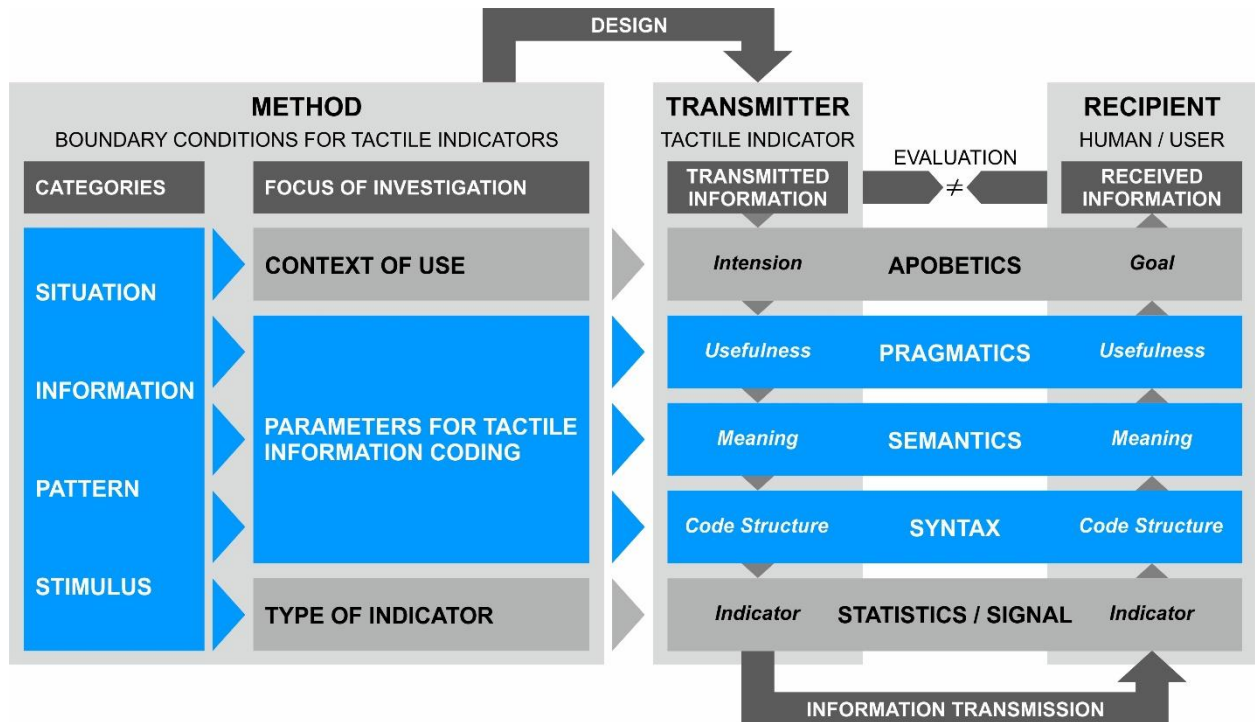
can therefore be used effectively at different body regions for spatial information (orientation, navigation). In addition, an active tactile indicator is available at all times without any need of exploration activities. In particular vibrotactile stimuli (= based on vibration [DIN EN ISO 9241-910 2011]) attract attention directly and intuitively, which can be very helpful, e. g. in potentially hazardous situations. [JONES 2014]

The biggest known limitations of tactile information transfer are the need for constant contact between the indicator and the user, the possible overlapping of tactile cues with other tactile or haptic pieces of information from the environment (masking) and the danger of fatigue if used too extensively. [BROWN 2007, S. 31-33]

The tactile presentation of information offers the potential to optimise human-machine interaction in various application areas. The specific design of a tactile display always depends on the context of use, which is characterised by the user groups, use environment and tasks [DIN EN ISO 9241-210 2011]. It is assumed that sensibly designed tactile displays can generate advantages for human-machine interaction as an alternative or in addition to visual or auditory information presentation. The use of vibration motors for presenting tactile cues is most strongly represented in the literature and generally regarded as appropriate (see Chapter 3). On this basis, the present work focuses on the basic possibilities and limits of vibrotactile information transmission. In the sense of the development of a tactile language, it is comprehensively examined which vibrotactile patterns can in principle be perceived, recognised and distinguished by humans and which patterns are intuitively linked to certain information contents. The driver-vehicle interaction in the car is chosen as an application example and the potential of tactile information transmission between vehicle and driver is demonstrated by three experimental test series. The overarching aim of this work is to increase safety, usability and comfort in demanding operating situations.

An innovative methodical approach is provided to explore the basis of tactile language development. It is based on a parameterisation of tactile information coding and the assignment to the five levels of the information transmission model according to Gitt [GITT 2002]. Each transmitted information passes these levels (shown in Figure 1) on the transmitter side (tactile indicator, "top down") and on the recipient side (user, "bottom up"). While the context of use (passenger car cockpit) and type of indicator (Tactile Seat Matrix = TSM) are defined on the basis of literature research, the present work focuses on the middle three levels, providing the basis for three consecutive test series:

- Test Series 1: Recognisability of vibrotactile patterns (syntax level)
- Test Series 2: Meaning of vibrotactile patterns (semantic level)
- Test Series 3: Learning and retrieving vibrotactile patterns (pragmatic level)

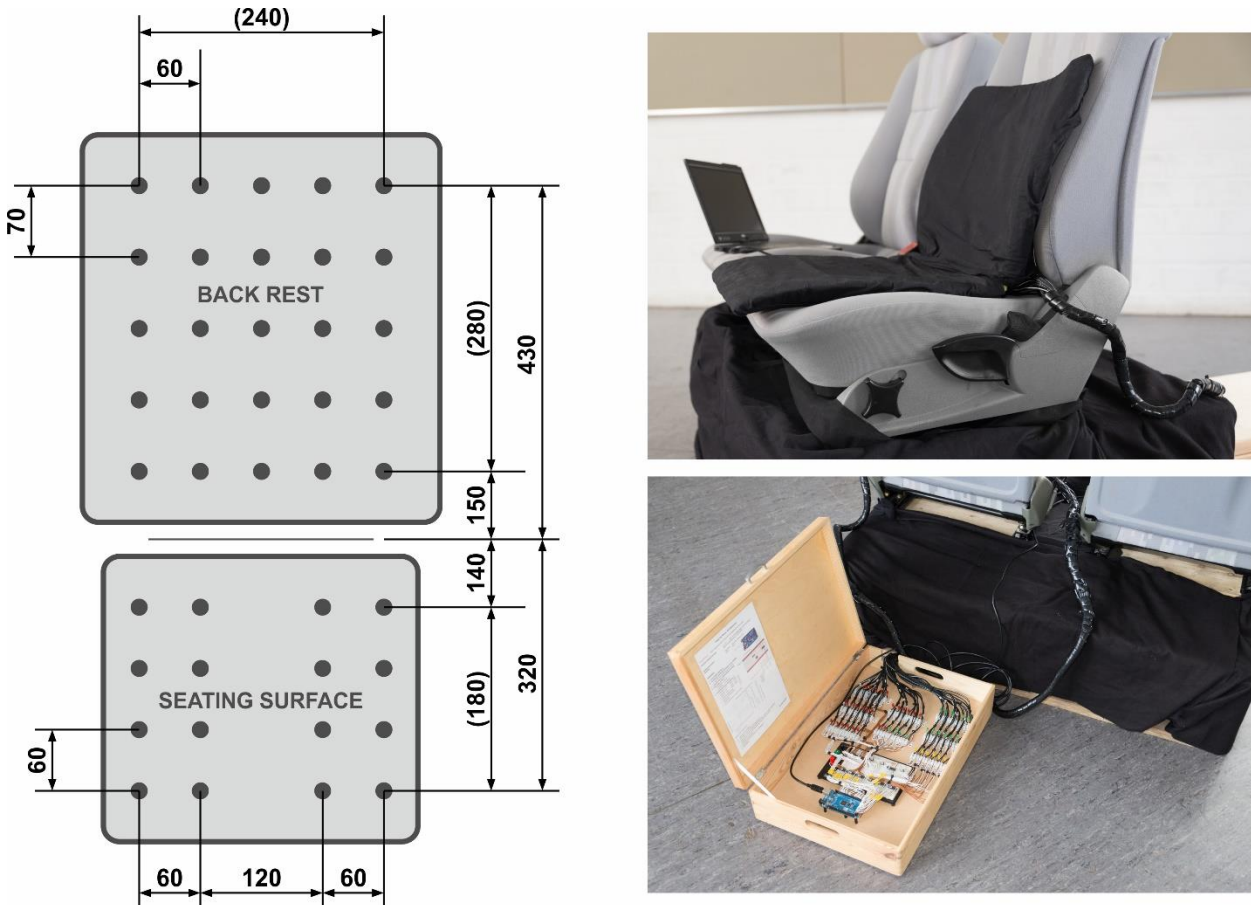


**Figure 1:** Tactile design parameters and levels of the information transmission model

The three test series, evaluating 21 hypotheses in total, are conducted with a defined group of representative participants without any preconditioning regarding the test bench. The TSM includes 25 vibration motors in the back rest and 16 vibration motors in the seating surface, operated at a vibration frequency of 140 Hz (see Figure 2).

In test series 1 ( $N = 24$ ), it is systematically investigated which tactile patterns and types of presentation can be recognised and distinguished by humans in general. The investigation of a total of 146 patterns with different types of presentation and motor arrangements provides fundamental information on the suitability of specific patterns and pattern types. On this basis, the stimulus patterns for test series 2 ( $N = 24$ ) are selected, which for the first time provides semantic connections between specific tactile patterns and explicit information on the basis of intuitive assignments of test participants. Regarding tactile pattern development, such a procedure has not yet been observed in the literature. The subjects evaluate 184 pattern-information combinations in "both directions". Thereby, for each specific tactile pattern they assign suitable pieces of information (from a defined selection) and vice versa, depending on what the participants intuitively determine as semantically suitable. By evaluating both directions, suitable pattern-information combinations can be identified, which in turn serve as the basis for test series 3 ( $N = 30$ ). This involves 24 defined pieces of information with associated patterns, which are learned by the test persons and then retrieved in nine sample pools of different sizes. On average, all stimulus patterns are presented 360 times and generally high recognition rates of up to 100 % are achieved. On the basis of the results, it is

assumed that a minimum number of 14 vibrotactile patterns can be learned in a short period of time (approx. 1 min per pattern) and reliably used within one context of use. More detailed conclusions can be taken from the single summaries of the three test series (Chapters 6.2.8, 7.2.7 and 8.2.5).



**Figure 2:** Schematic structure with dimensions [mm] of the TSM (Tactile Seat Matrix), motor positions and implementation on driver seat with electronics

In addition to the specific results for the developed patterns of driver-vehicle interaction, the present work provides the methodical procedure for the development of a tactile language, which can also be applied to other applications. The conducted studies also show that the participants can assess their own "performance" very well during the test without significantly over- or underestimating tactile cues.

In summary, it can be stated that the results reveal great potential for vibrotactile feedback in order to transmit more complex information than just directional cues. It should also be taken into account that this work examines purely tactile patterns. Since very high recognition rates are already achieved here, the combined presentation with visual and/or acoustic stimuli opens up further promising application possibilities.

# 1 Einleitung

Durch die fortschreitende technologische Entwicklung sowie die damit einhergehende Digitalisierung steigen der Automatisierungsgrad sowie die damit verbundene Komplexität technischer Systeme stetig an. Dies betrifft auch die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), die auf der einen Seite im Sinne guter Usability und User Experience möglichst einfach gestaltet sein sollte. Auf der anderen Seite muss der Mensch dennoch über ein möglichst umfassendes Situationsbewusstsein verfügen, um insbesondere im Falle von Störungen die richtigen Maßnahmen einleiten zu können. Das Interface sollte den Benutzer daher stets durch eine situativ optimierte Informationsdarbietung bei der Filterung und Priorisierung von Informationen unterstützen. Viele Bediensituationen sind noch immer stark geprägt von visuellen und auditiven Informationen, die auf den Menschen einströmen. Ein prägnantes Beispiel hierfür bildet die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im PKW-Cockpit. Zahlreiche Studien belegen mittlerweile, dass mithilfe taktiler Anzeiger insbesondere der visuelle Wahrnehmungskanal entlastet und die Usability von Mensch-Maschine-Systemen (MMS) dadurch signifikant gesteigert werden kann [SCHLICK ET AL. 2010, S. 993], [LU & SARTER 2014, S. 1706]. Die taktile Informationsdarbietung kann dabei redundant oder ergänzend zu anderen Modalitäten oder für sich alleine eingesetzt werden. Die Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit äußert sich dabei meist in Form von kürzeren Antwortzeiten und höheren Erkennungsraten der übermittelten Informationen bei den Benutzern.

## 1.1 Motivation

Aufgrund der bereits umfangreich nachgewiesenen Vorteile durch taktile Informationsdarbietung in MMS, wird in diesem Bereich seit Jahrzehnten intensive Forschung betrieben. Van Erp stellt gar die These auf, dass der Tastsinn auf Basis der größeren Anzahl an unterschiedlichen Rezeptoren im Vergleich zur visuellen Wahrnehmung auf physiologischer Ebene ggf. Vorteile aufweist, was die Möglichkeiten der haptischen bzw. taktilen Informationskodierung betrifft [VAN ERP 2006, S. 685].

Lu und Sarter betonen, wie wichtig es dabei ist, auch die Wahrnehmungsgrenzen sowie Aspekte der Aufmerksamkeit und Informationsverarbeitung einzubeziehen, um taktile Anzeiger effektiv und effizient zu gestalten [LU & SARTER 2014, S. 1706]. Aus ihrer Sicht ist die taktile Modalität besser zur Übermittlung wenig komplexer Hinweise geeignet [LU & SARTER 2014, S. 1707].

Auch Ferris et al. bestätigen den Nutzen taktiler Anzeiger in datenintensiven Bereichen durch Entlastung des visuellen und auditiven Wahrnehmungskanals, jedoch fehlt es aus ihrer Sicht noch immer an einem besseren Verständnis der Einflussfaktoren auf die taktilen Informationsverarbeitung, um robuste taktile Interfacelösungen generieren zu können [FERRIS ET AL. 2010, S. 1316].

Als ein Hauptvorteil der taktilen Informationsübertragung kann die Tatsache gesehen werden, dass dieser Wahrnehmungskanal häufig noch immer kaum belegt ist. Idealerweise besteht ein ständiger Kontakt zwischen Nutzer und taktilem Display, wodurch die Aufmerksamkeit nicht erst auf einen bestimmten Bereich bzw. auf einen situativ wichtigen Stimulus gerichtet werden muss. Dies gilt insbesondere beim Einsatz eines taktilen Anzeigers im Fahrzeugsitz. Darüber hinaus kann die Informationsübertragung diskret bzw. privat erfolgen, ohne (ungewollte) Einbeziehung anderer Personen [BROWN 2007, S. 31-33]. [SCHWALK ET AL. 2016]

Des Weiteren bietet die taktile Modalität mit der Haut eine große, dreidimensionale Fläche, wodurch auch die Hemisphäre des Körpers als Referenz genutzt werden kann. Die Anzeigemöglichkeiten sind dabei omnidirektional, d. h. es können bspw. auch nach hinten gerichtete Informationen dargeboten werden. Taktile Anzeiger können daher an verschiedenen Körperregionen effektiv für räumliche Informationen (Orientierung, Navigation) genutzt werden. Zudem ist ein aktiver taktiler Anzeiger (ohne vorausgesetztes Ertasten bzw. Explorieren) jederzeit verfügbar, ohne kontinuierlich aktiviert sein zu müssen. Insbesondere vibrotaktile dargebotene Stimuli (= auf Vibration beruhend [DIN EN ISO 9241-910 2011]) ziehen direkt und intuitiv Aufmerksamkeit auf sich, was bspw. in potenziellen Gefahrensituationen äußerst hilfreich sein kann, sofern der dargebotene Hinweisreiz richtig interpretiert wird. Generell werden kurze Lern- bzw. Trainingsphasen beobachtet, um taktile Muster mit abstrakten Inhalten zu verknüpfen. [BROWN 2007, S. 31-33], [JONES 2014]

Die größten bekannten Limitierungen taktiler Informationsübertragung sind der notwendige ständige Kontakt zwischen Anzeiger und Benutzer, die mögliche Überlagerung der taktilen Hinweisreize mit anderen taktilen bzw. haptischen Informationen aus der Umgebung sowie die Gefahr der Ermüdung bei zu umfangreicher Nutzung. [BROWN 2007, S. 31-33]

## **1.2 Zielsetzung und Abgrenzung**

Die taktile Informationsdarbietung bietet das Potenzial zur Optimierung der Mensch-Maschine-Interaktion in diversen Anwendungsbereichen. Die konkrete Auslegung eines taktilen Anzeigers ist dabei stets abhängig vom Nutzungskontext, der durch die Benut-

zergruppen, die Gebrauchsumgebung und die Aufgaben bzw. Interaktionsschritte geprägt wird [DIN EN ISO 9241-210 2011]. Es wird vorausgesetzt, dass sinnvoll gestaltete taktile Anzeiger alternativ oder ergänzend zur visuellen bzw. auditiven Modalität Vorteile bei der MMI erzeugen können. Dabei ist der Einsatz von Vibrationsmotoren für die Reizdarbietung in der Literatur am stärksten vertreten und wird allgemein als zweckmäßig erachtet (vgl. Kapitel 3).

Auf dieser Basis richtet sich der Fokus der vorliegenden Arbeit auf die grundlegenden Möglichkeiten und Grenzen der vibrotaktilen Informationsübertragung. Im Sinne der Entwicklung einer taktilen Sprache wird dabei umfassend untersucht, welche vibrotaktilen Muster vom Menschen prinzipiell wahrgenommen, erkannt und unterschieden werden können sowie welche Muster intuitiv mit bestimmten Informationsinhalten verknüpft werden.

Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten und Einflussfaktoren bei der Generierung von vibrotaktilen Mustern für die Interaktion zwischen Mensch und Maschine ist eine thematische Abgrenzung notwendig und sinnvoll. Als Anwendungsbeispiel wird die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im PKW gewählt und durch drei experimentelle Studien das Potenzial der vibrotaktilen Informationsübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrer aufgezeigt. Die Untersuchungen erfolgen unter statischen Bedingungen mithilfe eines präparierten Fahrzeugsitzes, unabhängig von einem Fahrzeuginnenraum und ohne eine simulierte Fahraufgabe, da im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst wichtige und umfassende Grundlagen erarbeitet werden sollen. Die Integration in einen dynamischen Fahrzeugprüfstand bzw. in ein Realfahrzeug wird auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse für weiterführende Studien empfohlen, um insbesondere mögliche Wechselwirkungen zwischen den vibrotaktilen Mustern und bestehenden Fahrzeugvibrationen zu adressieren. Die Generierung der verwendeten taktilen Reizmuster richtet sich jedoch nach konkreten Vorgaben aus der Literatur (vgl. Kapitel 3.2.1), um durch eine ausreichend hohe Intensität bzw. Schwingungsfrequenz der Vibrationsmotoren eine Differenzierung gegenüber typischen Fahrzeugvibrationen zu erreichen.

Des Weiteren erfolgt eine rein taktile Betrachtung der MMI, während visuelle und auditive Reize bei der Untersuchung systematisch minimiert bzw. ausgeschlossen werden. Zudem erfolgt eine Eingrenzung auf die aktive Informationsübertragung vom Fahrzeug an den Fahrer. Explorationsvorgänge durch den Fahrer sind dabei nicht notwendig und die Eingaben der Versuchsteilnehmer erfolgen mithilfe eines Touchscreens.

Neben dem methodischen Vorgehen zur Entwicklung und Evaluation taktiler Muster werden für den gewählten Anwendungsfall auf Basis der Versuchsergebnisse konkrete

vibrotaktile Muster vorgeschlagen. Diese können in der praktischen Anwendung bzw. in weiteren Untersuchungen mit visuellen und auditiven Reizen kombiniert werden.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit liegt in der Erhöhung von Sicherheit, Usability und Komfort in anspruchsvollen Bediensituationen.

### **1.3 Struktur der Arbeit**

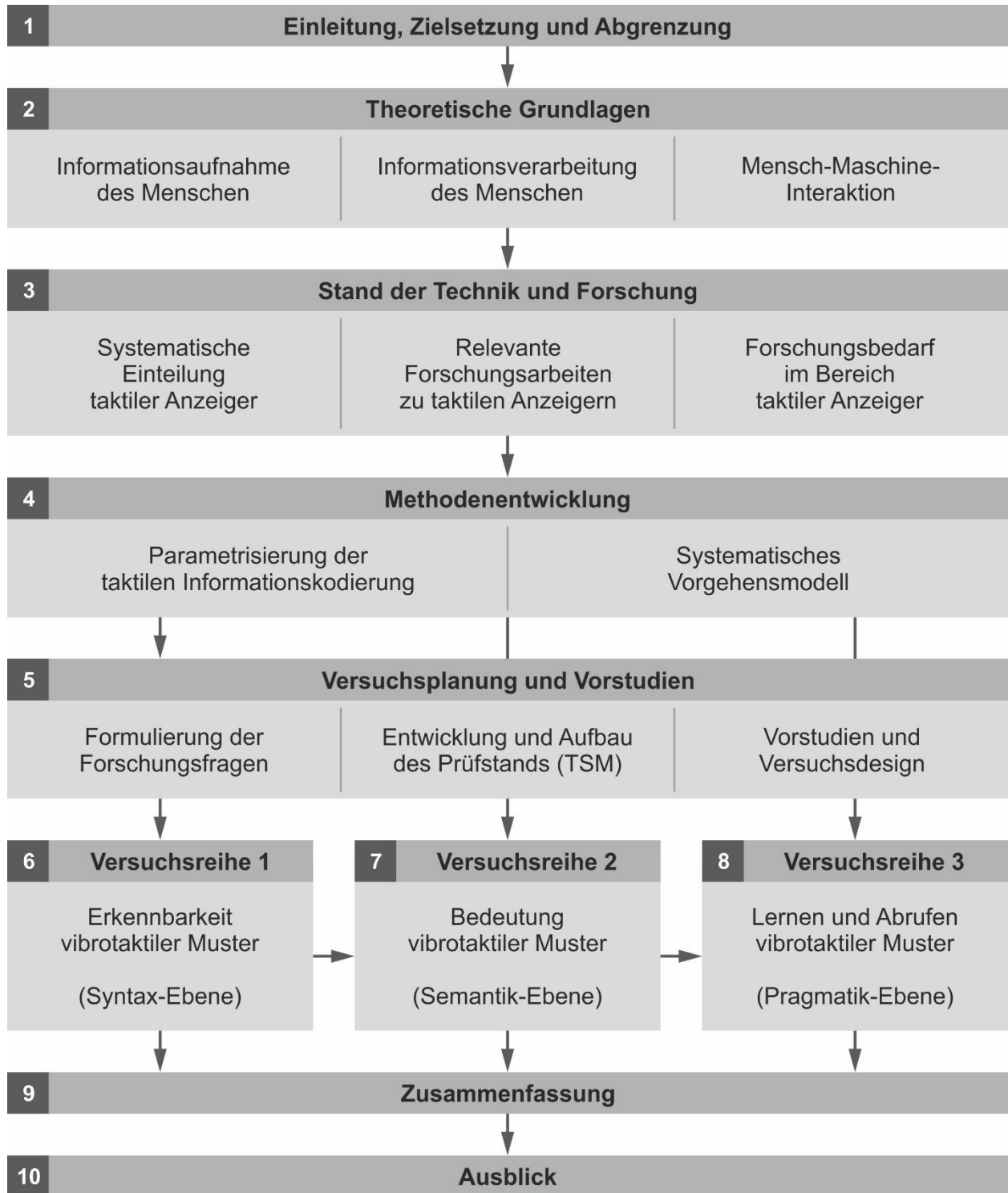
Die vorliegende Arbeit gliedert sich inhaltlich in zehn Kapitel, deren Struktur und Verknüpfungen in Abbildung 1.1 visualisiert werden.

Auf Basis der theoretischen Grundlagen in Kapitel 2 wird in Kapitel 3 der Stand der Technik und Forschung im Bereich der taktilen Anzeiger beschrieben sowie der daraus resultierende Forschungsbedarf herausgearbeitet. Es folgt die Entwicklung einer Methode zum allgemeinen Vorgehen bei der Entwicklung und Evaluation taktiler Muster sowie deren Anwendung auf den definierten Nutzungskontext (vgl. Kapitel 4). Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 5 die Versuchsplanung inkl. Formulierung der Forschungsfragen, Entwicklung der Taktilen Sitz-Matrix (TSM) als Prüfstand, Beschreibung von Vorstudien, Entwicklung des Fragebogens und Beschreibung des Versuchsdesigns. In den nachfolgenden Kapiteln werden die drei experimentellen Versuchsreihen inkl. Formulierung von Hypothesen, Reizmustergenerierung, Versuchsablauf, Probandenkollektiv, statistischer Auswertung sowie Diskussion der Ergebnisse beschrieben:

- Versuchsreihe 1 (V1): Erkennbarkeit vibrotaktile Muster (Kapitel 6)
- Versuchsreihe 2 (V2): Bedeutung vibrotaktile Muster (Kapitel 7)
- Versuchsreihe 3 (V3): Lernen und Abrufen vibrotaktile Muster (Kapitel 8)

Aufbauend auf der Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der einzelnen drei Versuchsreihen erfolgt eine Zusammenfassung aller Ergebnisse in Kapitel 9. Den Abschluss der Arbeit bildet der Ausblick in Kapitel 10, worin das Potenzial für anknüpfende Forschungsarbeiten diskutiert wird.





**Abbildung 1.1:** Struktur der vorliegenden Arbeit mit Kapitelnummern



## 2 Theoretische Grundlagen

Als Basis für die Beschreibung des Standes der Technik und Forschung (vgl. Kapitel 3) werden nachfolgend die dafür relevanten Grundlagen erarbeitet. Dabei erfolgt zunächst eine Unterteilung in die Informationsaufnahme sowie Informationsverarbeitung des Menschen. Aufgrund des inhaltlichen Schwerpunkts der vorliegenden Arbeit wird dabei jeweils der Fokus auf die Haptik gelegt. Das aktuelle Kapitel enthält zudem eine ganzheitliche Beschreibung der Mensch-Maschine-Interaktion sowie relevante Besonderheiten der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, welche den Versuchsreihen als Nutzungskontext bzw. Anwendungsbeispiel zugrunde liegt.

### 2.1 Informationsaufnahme des Menschen

Die Informationsaufnahme des Menschen erfolgt in aller Regel gleichzeitig über all seine Sinnesorgane. Somit herrscht in den meisten Fällen eine multimodale Wahrnehmung. Je nach Situation und Aufmerksamkeitsverteilung kommt den verschiedenen Wahrnehmungskanälen jedoch eine unterschiedliche Bedeutung zu. Im Rahmen der Mensch-Maschine-Interaktion sind die drei Modalitäten der visuellen (Sehen), auditiven (Hören) und haptischen Wahrnehmung (Fühlen) am relevantesten [BULLINGER 1994, S. 346]. Im Folgenden wird der Fokus auf die haptische bzw. taktile Wahrnehmung gelegt. Dies beinhaltet die Vibrationswahrnehmung, die Beschreibung haptischer Wahrnehmungseffekte sowie die Betrachtung des multimodalen Zusammenspiels der taktilen Wahrnehmung mit anderen Wahrnehmungskanälen.

#### 2.1.1 Haptische Wahrnehmung

Die haptische Wahrnehmung kann in die beiden Bereiche der kinästhetischen Wahrnehmung und der taktilen Wahrnehmung unterteilt werden. Über die kinästhetische Wahrnehmung (Propriozeption) werden Informationen zur Stellung, Lage und Bewegung sowie über den dabei auftretenden Widerstand bzw. die wirkenden Kräfte im Bewegungsapparat (Muskeln, Sehnen, Gelenke) registriert. Da die kinästhetische Wahrnehmung insbesondere beim aktiven Explorieren von Objekten zum Tragen kommt, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen. [ZÜHLKE 2012, S. 14-15]

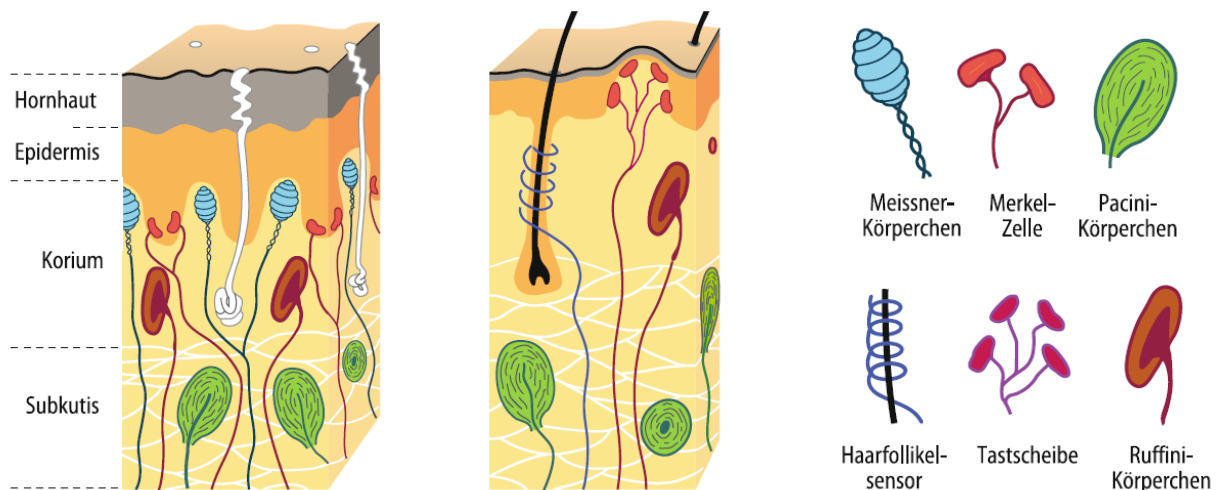
Ausschlaggebend für die Wahrnehmung und Erkennung von vibrotaktilen Mustern, die in statischer Körperhaltung über den Fahrzeugsitz dargeboten werden, sind dagegen die Mechanismen der taktilen Wahrnehmung (Exterozeption) [ZÜHLKE 2012, S. 14-15]. Bei dieser Anwendung werden Muskel-, Sehnen- und Gelenkbewegungen nicht be-

trachtet und der Fokus liegt auf den taktilen Hautsinnen, welche nachfolgend detaillierter beschrieben werden.

### 2.1.2 Taktile Wahrnehmung

Das exterozeptive System der taktilen Wahrnehmung besteht aus verschiedenen Rezeptoren mit unterschiedlichen Eigenschaften. Durch das Zusammenspiel dieser Rezeptoren in der menschlichen Haut ist es dem Menschen möglich, vielfältige Sinneseindrücke aus der Umgebung zu erfassen. Die Rezeptoren der Haut werden dabei in die Kategorien Mechanorezeption, Thermorezeption (Temperaturwahrnehmung) und Nozizeption (Schmerzwahrnehmung) unterteilt. Der Fokus wird im Folgenden auf die Mechanorezeptoren (auch Mechanosensoren [BEYER & WEISS 2001]) gelegt, welche für die Erfassung von Druck, Spannung, Berührung und Vibration zuständig sind und damit die Basis zur Erkennung vibrotaktile Muster bilden [GOLDSTEIN 2008, S. 335].

Die vier wichtigsten Mechanorezeptoren sind die Merkel-Zellen, Pacini-Körper, Meissner-Körper und Ruffini-Körper, welche durch ihre individuellen Eigenschaften (insbesondere das sog. Adaptionsverhalten) jeweils für die Wahrnehmung bestimmter Reize zuständig sind [GOLDSTEIN 2008, S. 335]. Eine schematische Visualisierung der Mechanorezeptoren sowie deren jeweilige Anordnung in der Haut sind in Abbildung 2.1 dargestellt.



**Abbildung 2.1:** Mechanorezeptoren der menschlichen Haut (unbehaarte und behaarte Haut) [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 325]

Die Merkel-Zellen messen als Drucksensoren die Stärke eines mechanischen Reizes, der senkrecht auf die Haut wirkt, wobei eine Empfindung von Berührung bzw. Druck bereits durch schwache Reize ausgelöst wird [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 325]. In Bereichen der unbehaarten Haut liegen Merkel-Zellen in Form von kleinen Gruppen in den untersten Schichten der Epidermis vor. [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 325]. Die

Merkel-Zellen adaptieren bei gleich bleibendem Druck nur langsam (Adaptionsverhalten „slowly adapting type I“), wodurch die Dauer eines Druckreizes erfasst werden kann [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 325-326]. Im Bereich der behaarten Haut treten die Merkel-Zellen in Form von hoch empfindlichen Merkel'schen Tastscheiben auf, welche punktförmig über die Hautoberfläche hinausragen [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 325] und beispielsweise bereits auf die Bewegung eines Haares reagieren [SCHANDRY 2006, S. 231]. [PETROV 2012, S. 17-18]

Pacini-Körper weisen im Gegensatz zu den Merkel-Zellen ein schnelles Adaptionsverhalten auf („rapidly adapting type II“) und werden durch die Beschleunigung von mechanischen Reizen erregt. Diese Mechanorezeptoren sind für die Wahrnehmung von Vibration im Bereich sinusförmiger Schwingungen zwischen 10 und 500 Hz zuständig [GOLDSTEIN 2008, S. 337], wobei die absolute Schwelle für eine bewusste Vibrationsempfindung den besten Wert bei einer Schwingfrequenz zwischen 150 und 300 Hz aufweist [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 327]. Nach [KERN 2009A, S. 53] liegt die höchste Empfindlichkeit bei 350 Hz. Die Pacini-Körper sind bis zu 4 mm lang und sitzen tief im Unterhautfett. Sie werden nicht durch anhaltenden Druck sondern über Deformierung und Entlastung erregt [SCHANDRY 2006, S. 232]. Auch in der Knochenhaut, auf Sehnen und in Gelenkkapseln sind Pacini-Körper zu finden [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 327]. [PETROV 2012, S. 18]

Die Meißner-Körper treten ausschließlich in der unbehaarten Haut (vermehrt an den Fingerspitzen) auf und besitzen ebenfalls ein schnelles Adaptionsverhalten („rapidly adapting type I“) [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 325]. Die Meißner-Körper erfassen leichte bzw. niederfrequente Vibration sowie bewegte Berührung, indem sie nicht auf Dauerdruck sondern auf Druckänderungen reagieren. Sie bilden damit die Geschwindigkeit eines Berührungs- oder Druckreizes ab, wodurch sie auch als Geschwindigkeitsdetektoren bezeichnet werden können [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 326]. Die Aufgaben der Meißner-Körper werden in den Bereichen der behaarten Haut durch die sog. Haarfollikelsensoren übernommen, welche auf die Bewegung der Haare reagieren [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 326]. [PETROV 2012, S. 19]

Bei den Ruffini-Körpern handelt es sich um langsam adaptierende Dehnungssensoren, die sowohl in der behaarten als auch der unbehaarten Haut sowie in Gelenkkapseln vorkommen. Sie können die Richtung und Stärke von Scherkräften bei Gelenkbewegungen in der Haut bzw. zwischen Haut und Unterhaut detektieren [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 326]. Ruffini-Körper vermitteln die Empfindung von Spannung, Berührung und Druck und besitzen ein Adaptionsverhalten vom Typ „slowly adapting type II“ [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 325]. [PETROV 2012, S. 19-20]

Im Kontext der vorliegenden Arbeit nimmt die Wahrnehmung von Vibration einen besonderen Status innerhalb der taktilen Wahrnehmung ein. Da hierfür, wie oben beschrieben, ein schnelles Adaptionsverhalten ausschlaggebend ist, erfolgt die Vibrationswahrnehmung primär mithilfe der Pacini-Körper [GOLDSTEIN 2008, S. 343]. Im beschriebenen Frequenzbereich von 100-300 Hz liegt die für eine bewusste Empfindung notwendige Vibrationsamplitude bei ca. 1  $\mu\text{m}$  [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 323]. Änderungen der Vibrationsfrequenz können dagegen oberhalb von 100 Hz nur bedingt wahrgenommen werden. Die Unterschiedsschwelle steigt dabei mit steigenden Frequenzen steil an [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 323].

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der die Auslegung eines taktilen Anzeigers beeinflusst, ist die räumliche Zweipunktdiskrimination (auch Zweipunktschwelle). Dabei handelt es sich um den geringsten Abstand zweier gleichzeitig (simultan) auf die Haut aufgesetzter Kontaktspitzen, bei dem die beiden Elemente gerade noch als zwei einzelne Punkte erkannt werden [GOLDSTEIN 2008, S. 341], [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 323]. Die Zweipunktdiskrimination variiert stark in Abhängigkeit der Rezeptoren-Verteilung je Körperregion. Während die Angaben zur Zweipunktdiskrimination aus der Literatur insbesondere in den Bereichen der Hände und Arme überwiegend einheitlich sind, können in den Bereichen von Rücken und Oberschenkeln leicht abweichende Angaben beobachtet werden. Die durchschnittliche Zweipunktdiskrimination wird von Goldstein am Rücken mit ca. 42 mm und am Oberschenkel mit ca. 44 mm angegeben [GOLDSTEIN 2008, S. 343]. Schandry gibt für den Rücken eine simultane Zweipunktdiskrimination von 50-70 mm an [SCHANDRY 2006, S. 234]. Nach Birnbaumer und Schmidt liegen die Werte für den Rücken sowie die Oberschenkel bei ca. 67 mm [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 323]. Mit steigendem Lebensalter sind generell höhere Werte zu erwarten [STEVENS & CHOO 1996]. Neben der simultanen existiert auch eine sukzessive Zweipunktdiskrimination. Diese beschreibt den geringsten, gerade noch differenzierbaren, Abstand zweier nacheinander auf die Haut aufgesetzter Kontaktspitzen. Die sukzessive Zweipunktdiskrimination ist ungefähr um den Faktor vier kleiner als die simultane [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 323].

### 2.1.3 Haptische Wahrnehmungseffekte

Im Folgenden werden relevante Wahrnehmungseffekte im Kontext der haptischen Wahrnehmung beschrieben, die bei der Generierung von Reizmustern für die TSM berücksichtigt werden müssen.

**Oblique-Effekt:** Bezogen auf ein Referenzsystem ist die Orientiertheit eine fundamentale physikalische Eigenschaft eines Stimulus bzw. Objektes und bildet damit eine grundlegende Dimension des Wahrnehmungsprozesses. Es wird beobachtet, dass un-

terschiedlich orientierte, ansonsten identische Stimuli, zu unterschiedlichen Ergebnissen in Bezug auf die Wahrnehmung führen können. Dies betrifft verschiedenste Wahrnehmungsaufgaben wie Identifizieren, Matchen, Erinnern, Entdecken, Kategorisieren, Segmentieren, Unterscheiden oder Entscheiden. Diese Schwankungen bzw. Verzerrungen äußern sich typischerweise in einer besseren Leistung bei horizontal und vertikal orientierten Stimuli, während die Leistung bei schrägen (obliquen) Orientierungen in Form von höherer Fehleranzahl oder längeren Antwortzeiten schwächer ausfällt. Dieser (zunächst visuell geprägte) Effekt wird als Oblique-Effekt bezeichnet und geht nach [KLOPP 1999] auf Appelle (1972) zurück. Klopp weist einen ähnlichen Effekt im Kontext der Haptik nach, wobei Versuchsteilnehmer die Orientierung eines Holzstabes blind ertasten sollten. Auch hierbei kommt es zu signifikant schlechteren Ergebnissen bei obliquen Orientierung. [KLOPP 1999]

**Masking:** Das sog. Masking bezieht sich nach [FITCH 2008, S. 16] auf die reduzierte Erkennbarkeit taktiler Reize durch das Vorhandensein eines oder mehrerer weiterer taktiler Reize, wobei Fitch den Begriff auf Boff, Kaufman und Thomas (1986) zurückführt. Es wird dabei zwischen den folgenden drei Arten des Masking unterschieden [FITCH 2008, S. 16-18]:

- Lateral Masking:  
Räumliche Überlappung benachbarter Reize bei gleichzeitiger Darbietung.
- Temporal Masking:  
Wechselwirkung zwischen zeitlich versetzten Reizen an derselben Stelle.
- Metacontrast Masking:  
Wechselwirkung zwischen Reizen, die weder räumlich noch zeitlich „überlappen“, jedoch in beiden Dimensionen nahe beieinander liegen.

**Haptische Illusionen:** Fitch beschreibt u. a. unter Berufung auf Boff und Lincoln (1988) weitere haptische Illusionen, die sich auf die räumliche Wahrnehmung beziehen. Dabei werden folgende Arten konkret benannt und beschrieben [FITCH 2008, S. 19-20]:

- Sensory Saltation:  
Es entsteht eine Illusion von Bewegung, wenn zwei vibrotaktile Reize an verschiedenen räumlichen Orten in schneller Folge präsentiert werden. Wenn die zeitliche Trennung der Reize erhöht wird, wird der empfundene „Sprung“ dabei als größere Entfernung wahrgenommen. Die Illusion wird beobachtet mit Reizen, die zwischen 2 und 35 cm voneinander entfernt sind. Die Anzahl der an einem Ort auftretenden Impulse kann die Wahrnehmung beeinflussen, wobei zwei Impulse als zu wenig bewertet werden, vier bis sechs Impulse als besser, und acht-

zehn Impulse als zu viele. Bei einer Reizdauer über 25 ms steigt das Inter-Stimulus-Intervall, das die größte Wirkung hervorruft, mit zunehmender Reizdauer. [FITCH 2008, S. 20]

- **Fused Sensation:**

Zwei vibrotaktile Reize können wie einer erscheinen, wenn das Intervall zwischen den Reizen weniger als 2 ms beträgt und die Reize eine ähnliche, wahrgenommene taktile Intensität besitzen. In diesen Fällen liegt der wahrgenommene Ort näher bei dem jeweils dominanteren Reiz. [FITCH 2008, S. 20]

- **Shifted Location:**

Wenn zwei Vibrationsreize nacheinander dargeboten werden, kann sich die scheinbare Position des ersten Reizes durch Manipulation des Inter-Stimulus-Intervalls verändern. Für Inter-Stimulus-Intervalle zwischen 20 und 25-300 ms verschiebt sich die scheinbare Position des ersten Reizes in Richtung des nachfolgenden Reizes. Je kürzer dabei das Inter-Stimulus-Intervall gewählt wird, desto größer ist die Verschiebung der scheinbaren Position. [FITCH 2008, S. 20]

**Apparent Movement:** Tactile apparent movement beschreibt Scheinbewegungen, die durch die „wellenförmige“, dynamische Anzeige von taktilen Mustern entstehen [JONES 2014]. Dabei werden nacheinander definierte Reize oder Reizkombinationen dargeboten, die in ihrer Gesamtwahrnehmung eine flüssige Bewegung repräsentieren [KIRMAN 1983]. Am Oberarm können durch Scheinbewegung bereits bei Verwendung von vier Aktuatoren (rund um den Arm) positive Effekte bzgl. der Erkennbarkeit erzielt werden, wenn die Intervalldauer der Anzeige sowie die Überlappung der Reize optimal abgestimmt sind [NIWA ET AL. 2009]. Bei richtungsbezogenen Warnungen vor gefährlichen Verkehrssituationen, die mithilfe von acht Vibrations-Motoren (bei 66 Hz) in der Sitzfläche angezeigt werden, können nach Murata et al. für die Richtungen „vorne“ und „hinten“ durch Scheinbewegung kürzere Reaktionszeiten und höhere Erkennungsraten im Vergleich zu statischen Warnungen erreicht werden [MURATA ET AL. 2013].

**Tactile Change Blindness:** Der Begriff der change blindness hat seinen Ursprung in der visuellen Wahrnehmung, während ein ähnliches Phänomen auch für den auditiven Wahrnehmungskanal beobachtet wird [GALLACE ET AL. 2006]. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass der Effekt auch bei der taktilen Mustererkennung auftritt [GALLACE ET AL. 2006], [LU & SARTER 2014]. Damit wird das Nicht-Erkennen eines Reizes bzw. einer Veränderung durch eine Überlagerung mit anderen Reizen derselben Modalität innerhalb einer Situation beschrieben, auch wenn eine Änderung erwartet wird [LU & SARTER 2014]. Lu und Sarter weisen einen solchen Effekt bei der Anzeige vibrotaktiler Muster über eine 3x3-Matrix aus Vibrationsmotoren am Rücken (in Form



einer Weste) nach [LU & SARTER 2014]. Der Effekt der tactile change blindness kann sowohl bei Veränderungen der Anzahl an Körperregionen auftreten, an denen eine Vibration dargeboten wird ([GALLACE ET AL. 2006]), als auch bei Variierung der vibrotaktilen Muster sowie der Vibrationsintensität [FERRIS ET AL. 2010]. Letzteres wird von Ferris et al. im Bereich des Unterarms für langsam bzw. sukzessiv veränderte Vibrationsintensität bestätigt, wohingegen abrupte Änderungen bzw. Sprünge der Intensität erkannt werden können [FERRIS ET AL. 2010]. Ähnliches gilt aus physiologischer Sicht für die Wahrnehmung und Erkennung von Unterschieden der Vibrationsfrequenz. Eine Veränderung der Frequenz um 20 % (z. B. von 100 auf 120 Hz) wird von einem durchschnittlichen Nutzer in 20 % der Fälle erkannt [GOLDSTEIN 2010, S. 1030].

#### **2.1.4 Multimodalität**

Der noch immer dominierende Wahrnehmungskanal bei der Mensch-Maschine-Interaktion ist der visuelle Kanal. Auditiv erfolgt zumeist einfaches und ergänzendes Feedback, während über den haptischen Kanal hauptsächlich Eingaben getätigt werden. Es gilt jedoch als erwiesen, dass es insbesondere dann zu deutlich niedrigeren Fehlerraten bei der Bedienung technischer Geräte kommt, wenn möglichst viele Sinneskanäle am Informationsaustausch beteiligt sind und damit Redundanzen geschaffen werden. Diese Kombination mehrerer Wahrnehmungskanäle wird als multimodale Interaktion bezeichnet. [ZÜHLKE 2012, S. 227]

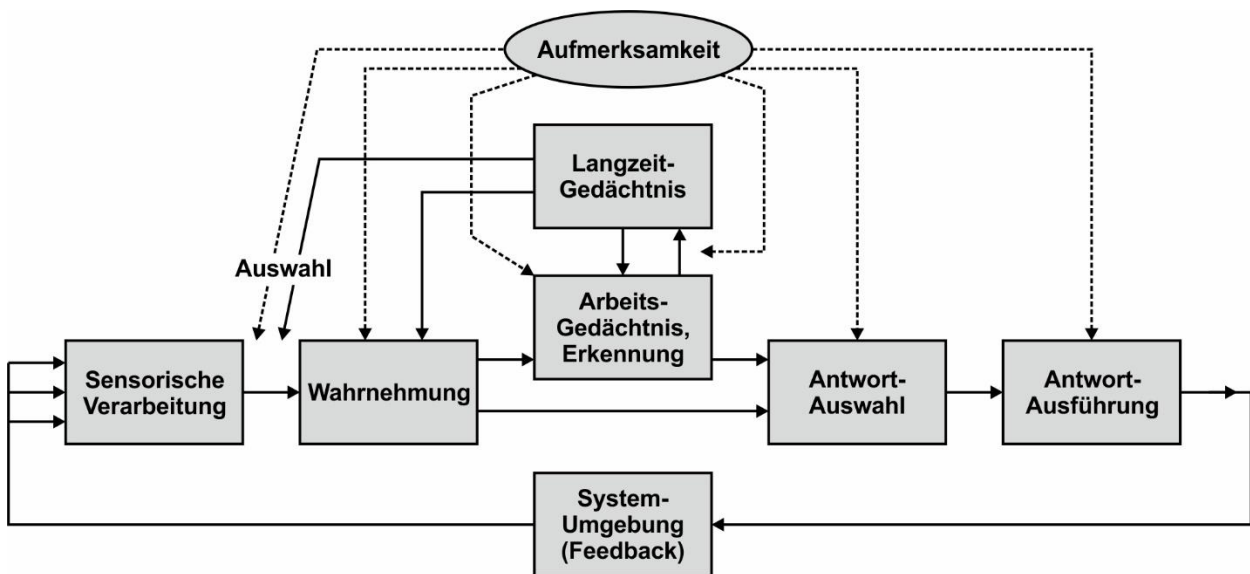
Neben einer auf diese Weise geschaffenen Redundanz kann multimodale Informationsdarbietung auch ergänzend erfolgen, wobei über die unterschiedlichen Modalitäten unterschiedliche Informationen übertragen werden, um in einer Bediensituation ein besseres Situationsbewusstsein beim Nutzer zu generieren (vgl. [SCHMID & MAIER 2018]). Entscheidend dabei ist die optimale Aufteilung der zu übermittelnden Informationen auf die unterschiedlichen Wahrnehmungskanäle, um die jeweiligen Vorteile bzw. Stärken bestmöglich zu nutzen. Durch sinnvoll und gezielt eingesetzte multimodale Interaktion kann den Leistungseinbußen entgegengewirkt werden, die auftreten, sobald eine Modalität mit zu vielen Informationen überfrachtet wird [KLUWE 2006, S. 51].

Im Bereich multimodaler Anzeiger, die auch eine taktile Komponente aufweisen, existieren diverse Arbeiten von Spence. Ein Überblick hierzu wird in [SPENCE & HO 2008] gegeben. Ein Hauptanwendungsgebiet der Ergänzung taktiler Informationsdarbietung wird dabei im Einsatz von Warnungen für den Fahrer gesehen. Dies betrifft das Aufwecken des Fahrers (beim automatisierten Fahren), das Lenken seiner Aufmerksamkeit sowie die Übermittlung komplexerer Informationen, um die weiteren Wahrnehmungskanäle zu entlasten und dadurch eine effektivere Interaktion mit reduzierter mentaler Belastung zu

erreichen. Ein Kernpunkt der künftigen Gestaltung taktiler Anzeiger ist die Entwicklung leicht verständlicher, intuitiver Signale bzw. Muster. [SPENCE & HO 2008]

## 2.2 Informationsverarbeitung des Menschen

Die menschliche Informationsverarbeitung beschreibt den Prozess des zentralen Nervensystems, bei dem von außen eintreffende, wahrgenommene Informationen verknüpft, logische Ableitungen durchgeführt und Entscheidungen getroffen werden [BUBB & STRÄTER 2006, S. 160]. Wickens und Hollands liefern ein Modell der Informationsverarbeitung, das alle Schritte von der sensorischen Verarbeitung und Wahrnehmung eines Reizes über die Interpretation bis hin zu einer Entscheidung und Ausführung einer Handlung umfasst (vgl. Abbildung 2.2). Eine wichtige Rolle für die zielgerichtete Informationsverarbeitung spielt dabei ein adäquates System-Feedback. Zudem haben die Aufmerksamkeit sowie die beteiligten Gedächtnisebenen einen entscheidenden Einfluss auf den Verarbeitungsprozess und somit das Ergebnis.



**Abbildung 2.2:** Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach [WICKENS & HOLLANDS 1999, S. 11]

### 2.2.1 Gedächtnis und Wissen

Im Langzeitgedächtnis (LZG) werden Informationen permanent gespeichert. Die Kapazität ist dabei mit  $10^{10}$  bis  $10^{14}$  bit theoretisch nahezu unbegrenzt, während der Zufluss mit einer Geschwindigkeit von lediglich 0,03 bis 0,1 bit/s erfolgt [SCHAAL ET AL. 2014, S. 208]. Das im LZG gespeicherte Wissen wird in vier Wissensformen untergliedert [KLUWE 2006, S. 41]:

- 1) Deklaratives Wissen:  
Mitteilbar, Kenntnis über Realität; Personen, Sachverhalte, Ereignisse, Prozesse und Handlungen, unterteilt in episodisches Wissen (Ereignisse, Objekte und Personen im raumzeitlichen Kontext) und semantisches Wissen (abstraktes, begriffliches Wissen über die Realität).
- 2) Prozedurales Wissen:  
Handlungsabläufe, gespeicherte Routinen, kaum verbalisierbar, basierend auf assoziativem Lernen.
- 3) Implizites Wissen:  
Unbewusste Nutzung zuvor wahrgenommener, nicht intentional behaltener Informationen.
- 4) Explizites Wissen:  
Bewusster Abruf zuvor eingprägter bzw. gelernter Informationen.

In Bezug auf die Mensch-Maschine-Interaktion wird weiterhin zwischen Systemwissen und Steuerungswissen unterschieden. Das Systemwissen (deklarativ bzw. mitteilbar) beinhaltet Wissen über das technische System inkl. Funktionen, Struktur, Verhalten und vorhandene Anzeiger [KLUWE 2006, S. 41]. Steuerungswissen (deklarativ und prozedural) enthält zudem gespeicherte Handlungsroutinen, Wissen über die Funktionsweise des Systems sowie über Ursache-Wirkungszusammenhänge. Somit kann eine interne Simulation von Systemeingriffen und deren Effekten erfolgen, was beispielsweise entscheidend bei der Störungsdiagnose ist [KLUWE 2006, S. 42]. Die Nutzung verschiedener Wissensbestände im MMS ist abhängig von den aktuellen Anforderungen in der jeweiligen Bediensituation. Lernen, Training und Expertise spielen dabei eine entscheidende Rolle. Inhalte aus dem LZG werden über das Arbeitsgedächtnis (AG) auf Basis von sog. Hinweisreizen abgerufen [KLUWE 2006, S. 44].

Im Arbeitsgedächtnis selbst befindet sich dabei immer nur ein kleiner Teil des gespeicherten Wissens, welcher situationsabhängig durch den jeweiligen Fokus der Aufmerksamkeit aktiviert wird. Die Kapazität des AG beträgt mit 100 bis 400 bit nur einen Bruchteil der Kapazität des LZG, wobei die Zuflussgeschwindigkeit mit 16 bit/s ca. um das 160-fache schneller stattfindet. Der Abfluss von Informationen erfolgt innerhalb von durchschnittlich 6-25 s [SCHAAL ET AL. 2014, S. 208]. Das Limit für Informationseinheiten, die zu einem Zeitpunkt im Fokus der Aufmerksamkeit und damit im AG gehalten werden können, wird unter Bezug auf [MILLER 1956] mit  $7 \pm 2$  Informationseinheiten (= Chunks) angegeben [KLUWE 2006, S. 47]. Für die Dauer der Verfügbarkeit von Informationseinheiten im AG gilt nach [KLUWE 2006, S. 48] unter Verweis auf Card et al. (1983) ein Richtwert von 7 s (bei drei Chunks), wobei abhängig von der Anzahl an Chunks eine

große Spanne von 5 bis 226 s besteht. In Zusammenhang mit dem AG wird auch vom Gegenwartsspeicher gesprochen, in dem sich Vergleiche, Verknüpfungen, Zuordnungen, Assoziationen, Umgruppierungen, Formulierungen geeigneter Codes zum Abruf von Gedächtnisinhalten, Aktivierung von Subroutinen und weitere verarbeitende Prozesse abspielen [DINGES 1982, S. 50]. Die empfundene Gegenwartsdauer beträgt nach [DINGES 1982, S. 50] maximal 10 s und lässt nicht weiter verarbeitete Informationen danach verblassen.

In Bezug auf die Haptik wird nachgewiesen, dass die zusätzliche haptische bzw. taktile Reizdarbietung, als Ergänzung zu rein visuell angezeigten Informationen, Gedächtnisleistungen steigern kann. Dies wird insbesondere für aktive Explorationsprozesse beobachtet, welche die kinästhetische und taktile Wahrnehmung vereinen. Vermutet wird hierbei, dass die haptische Wahrnehmung eigenständige Kognitionsprozesse beinhaltet. [WIPPICH 2001, S. 99]

### **2.2.2 Aufmerksamkeit**

Über die Aufmerksamkeit wird reguliert, dass Informationen innerhalb einer Situation priorisiert werden, um zielgerichtete Handlungen zu ermöglichen. Nicht relevante Informationen werden über die Aufmerksamkeitssteuerung weitgehend ausgeblendet. Von zentraler Bedeutung sind die Verteilung der Aufmerksamkeit sowie deren Aufrechterhaltung über die Zeit (Vigilanz). [KLUWE 2006, S. 48]

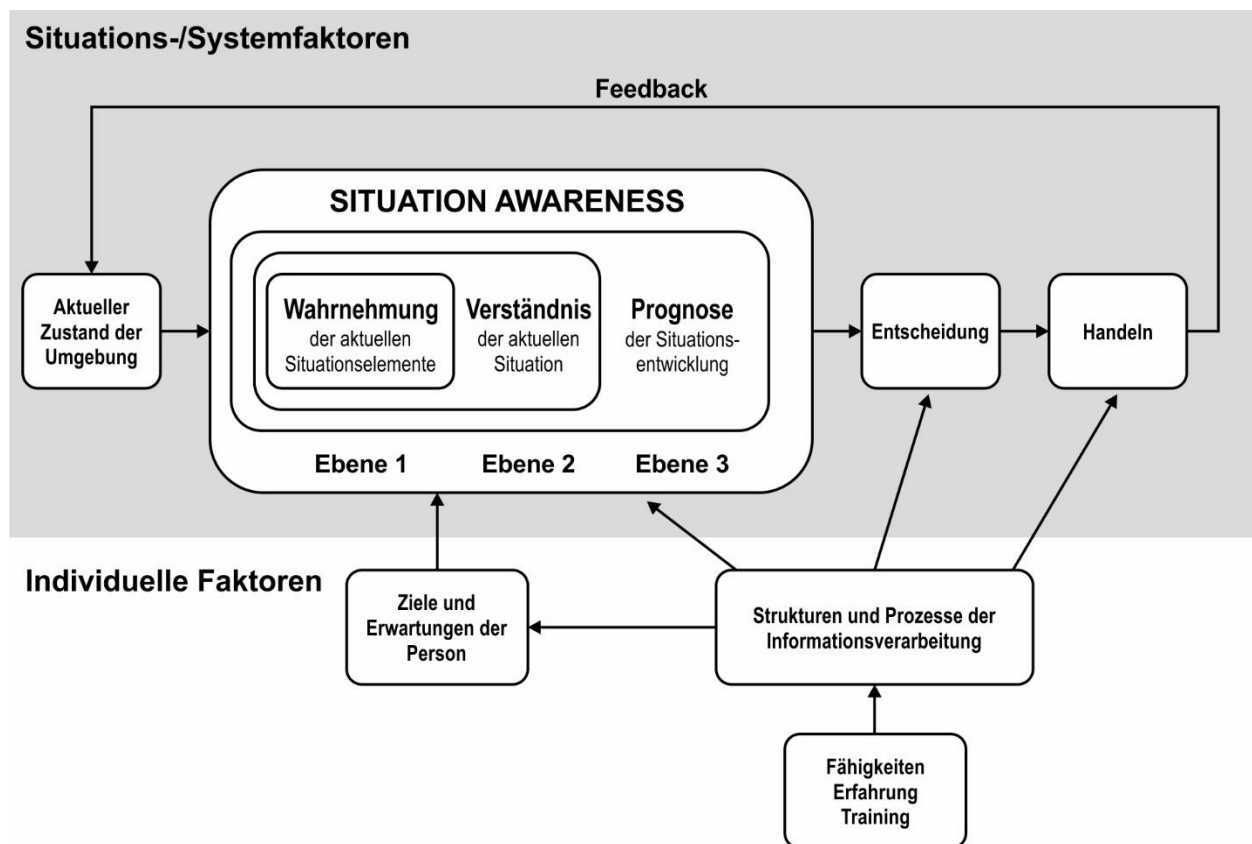
Bei der Steuerung der Aufmerksamkeit wird zwischen automatischer und kontrollierter Informationsverarbeitung unterschieden. Je automatisierter die Verarbeitung abläuft, umso weniger Ressourcen des informationsverarbeitenden Systems werden benötigt. Je kontrollierter dagegen die Verarbeitung abläuft, umso größer ist die Belastung des AG sowie die Notwendigkeit gerichteter Aufmerksamkeit. [KLUWE 2006, S. 51-52]

Um im MMS sicherzustellen, dass der Mensch die jeweils relevanten Informationen zum richtigen Zeitpunkt wahrnehmen und verarbeiten kann, muss das technische System die selektive Aufmerksamkeit durch situationsabhängige Hinweisreize entsprechend unterstützen. Sobald die Aufmerksamkeit des Menschen jedoch gleichzeitig auf mehrere Ziele gerichtet werden muss (geteilte Aufmerksamkeit), kommt es zu Leistungseinbußen, da Informationen parallel verarbeitet und integriert werden müssen. Solche „dual task“ bzw. „multiple task“ Situationen verlangen einen ständigen Wechsel der Aufmerksamkeit zwischen den gleichberechtigten Aufgaben. Die Aufteilung der angezeigten Informationen auf verschiedene Wahrnehmungskanäle kann die Leistungseinbußen minimieren, da hierdurch unterschiedliche Verarbeitungsmechanismen angesprochen werden. [KLUWE 2006, S. 49-51]

### 2.2.3 Situation Awareness

Das Prinzip der Situation Awareness (SA, deutsch: „Dynamisches Situationsbewusstsein“) beschreibt die Aufmerksamkeitsverteilung innerhalb einer Situation und beinhaltet im Kern die folgenden drei Phasen (vgl. Abbildung 2.3) [ENDSLEY 1995, S. 34-35]:

- 1) Wahrnehmung der einzelnen Elemente der Umgebung innerhalb einer bestimmten Zeit in einem bestimmten Raum.
- 2) Verständnis der Bedeutung der Elemente in der aktuellen Situation.
- 3) Prognose über den Zustand der Situation in naher Zukunft.



**Abbildung 2.3:** Situation Awareness – Rahmenmodell nach [KLUWE 2006, S. 36] auf Basis von [ENDSLEY 1995, S. 35]

Unter Einbeziehung der Dynamik einer Situation werden sowohl Wahrnehmungs- und Aufmerksamkeitsprozesse als auch Problemlösungs- und Entscheidungsprozesse integriert. Die Situation wird dabei ständig aktualisiert und das dynamische Verständnis der aktuellen Situation bestimmt das Handeln des Menschen. Durch SA wird die Konfigurierung des kognitiven Systems zu einem Zeitpunkt des Geschehens beschrieben. Dies beinhaltet die selektive Wahrnehmung von Hinweisreizen, eine spezifische Aufmerksamkeitsverteilung über das Reizspektrum, die Integration aufgenommener Informationen mit den jeweils aktuellen Zielen, die Nutzung von Informationen aus dem Langzeit-

gedächtnis (LZG), die Verarbeitung von Information im Arbeitsgedächtnis (AG) sowie die Kontrolle und Steuerung des kognitiven Geschehens. [KLUWE 2006, S. 35-37]

Eine Mensch-Maschine-Schnittstelle sollte stets so gestaltet sein, dass der Mensch durch die Aufrechterhaltung und Förderung des Situationsbewusstseins auf allen drei Ebenen (Wahrnehmung, Verstehen und Antizipation) unterstützt wird [OTHERSEN 2016, S. 53]. Dies führt zu folgenden Implikationen für das Interface-Design [KLUWE 2006, S. 62-63]:

- 1) Aggregierte und integrierte Informationsübertragung und -präsentation zur Minimierung des kognitiven Aufwands für den Operateur.
- 2) Zielgerichtete Präsentation von Informationen, die direkt mit dem jeweiligen Ziel des Operateurs verknüpft sind.
- 3) Eindeutig identifizierbare Hinweisreize zur Aktivierung adäquater mentaler Modelle.
- 4) Dominanz von Hinweisreizen (Zielreizen), die direkt mit dem Ziel des Operateurs verknüpft sind.
- 5) Sicherstellen des Überblicks über das gesamte Geschehen zu jedem Zeitpunkt.
- 6) Integration von Systemen für die Unterstützung von Prognosen der Systementwicklung zur Unterstützung von Gedächtnis- und Entscheidungsprozessen.

Insbesondere in Bezug auf effektive und effiziente Hinweisreize kann in Situationen, in denen viele Informationen (meist visuell und auditiv) auf den Nutzer einströmen, eine gezielte haptische bzw. taktile Informationsübertragung vorteilhaft sein. Dies ist unter anderem bei der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion gegeben, welche in der vorliegenden Arbeit als Nutzungskontext betrachtet wird und als Grundlage für die Versuche dient.

#### **2.2.4 Mentale Modelle und X-Kompatibilitäten**

Als mentale Modelle werden große Wissensseinheiten des Langzeitgedächtnisses im Zusammenhang mit der Struktur und Organisation von Wissen bezeichnet. Im Kontext der MMS beschreiben mentale Modelle Mechanismen, durch die der Nutzer Art und Zweck eines Systems beschreiben, dessen Funktionsweise und Zustände erklären sowie zukünftiges Systemverhalten vorhersagen kann. Mentale Modelle sind dabei nicht immer vollständige, korrekte Abbilder der Realität. Zudem unterliegen sie ständigen Veränderungen als Folge von Lernprozessen. Expertise sowie Lernen und Training können zur Vereinfachung von mentalen Modellen führen. Die Interface-Gestaltung sollte stets eine gezielte Ausbildung von adäquaten mentalen Modellen fördern. [KLUWE 2006, S. 43-44]

Die sog. X-Kompatibilitäten beschreiben Vorgaben, die dabei unterstützen, bei der Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen die grundlegenden mentalen Modelle und Vorstellungen des Nutzers anzusprechen. Der Begriff der Kompatibilität wird in diesem Kontext bei Bewegungs-Bewegungs-Zusammenhängen zwischen Anzeiger, Stellteil und Prozess sowie bei Bewegungs-Bedeutungs-Zusammenhängen zwischen Mensch und Anzeiger, Mensch und Stellteil sowie Mensch und Prozess verwendet. Die Kompatibilitätsanforderungen entstehen durch die Beziehungen zwischen Anzeiger, Stellteil und Wirkteil. [SCHMID & MAIER 2017, S. 174-180]

Folgende X-Kompatibilitäten werden dabei unterschieden:

1) Bedeutungskompatibilität:

Zuweisung einer Bedeutung zu einer Bewegungsrichtung von Anzeigern und Stellteilen (z. B. Drehung nach rechts bzw. Bewegung nach oben = Zunahme, Erhöhung).

2) Bewegungskompatibilität (Sinnfälligkeit):

Übereinstimmung der Bewegungsrichtung von Stellteil, Anzeiger und Wirkteil (z. B. Stellhebel und zugehöriger Anzeiger bewegen sich in der gleichen vertikalen Orientierung und Richtung).

3) Sekundäre Kompatibilität:

Vermeidung von Widersprüchen bei der Überlagerung von rotatorischer und translatorischer Bewegung bei Anzeigern und Stellteilen (z. B. Rotation nach rechts entspricht einer translatorischen Bewegung nach oben).

4) Räumliche Kompatibilität:

Anordnung der Anzeiger und Stellteile entsprechend der Lage der Wirkteile (z. B. nebeneinander angeordnete Herdplatten werden durch äquivalent nebeneinander angeordnete Stellteile repräsentiert).

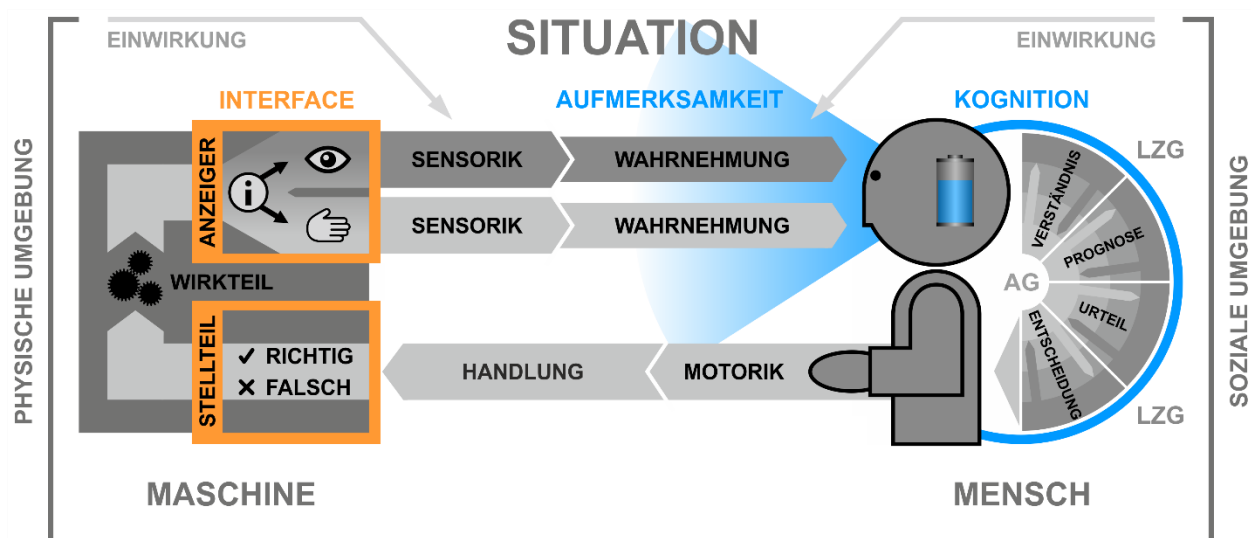
## 2.3 Mensch-Maschine-Interaktion

Die beschriebenen Grundlagen der menschlichen Informationsaufnahme und -verarbeitung müssen bei der Gestaltung technischer Systeme und insbesondere ihrer Benutzerschnittstellen (User Interfaces) berücksichtigt werden, um eine ergonomische und gebrauchstaugliche Interaktion zu ermöglichen. Im Folgenden werden die Bestandteile der Mensch-Maschine-Interaktion beschrieben, relevante Begriffe geklärt sowie eine Übersicht bzgl. Aufgaben- und Informationsarten im Rahmen der MMI gegeben. Zudem erfolgt eine Betrachtung des Sonderfalls der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion.

### 2.3.1 Basisschema, Anzeiger und Stellteile

Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Mensch und Maschine können anschaulich mithilfe des sog. Basisschemas der Mensch-Maschine-Interaktion beschrieben werden. Darin wird der Mensch von der Wahrnehmung über die Kognition bis zur ausgeführten Handlung ganzheitlich betrachtet, um das technische System auf dessen Bedürfnisse optimieren zu können. Das Basisschema basiert auf [SEEGER 2005, S. 134-135] sowie [MAIER & SCHMID 2017] und wird um weitere Inhalte der kognitiven Ergonomie erweitert. Dabei werden die folgenden anerkannten theoretischen Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung integriert: Das Informationsverarbeitungsmodell nach [WICKENS & HOLLANDS 1999, S. 11], das Situationsbewusstsein (Situation Awareness) nach [ENDSLEY 1995, S. 35], allgemeine Aspekte der kognitiven Psychologie nach [WENTURA & FRINGS 2013] sowie die Definition der Usability nach [DIN EN ISO 9241-11 2018]. Die Norm definiert Usability (Gebrauchstauglichkeit) dabei als „Das Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ [DIN EN ISO 9241-11 2018]. Die genannten Modelle werden kombiniert und das erweiterte Basisschema exemplarisch für die visuell-taktile Wahrnehmung dargestellt (siehe Abbildung 2.4), da diese Kombination einen realistischen Einsatz der taktilen Informationsübertragung darstellt. [SCHWALK ET AL. 2015A], [SCHWALK & MAIER 2016]

Entscheidend für gute Usability ist die optimale Gestaltung der Benutzerschnittstelle (User Interface). Das Interface besteht aus Anzeiger (Informationsausgabe) und Stellteil (Informationseingabe) [SCHMID & MAIER 2017, S. 57].



**Abbildung 2.4:** Erweitertes Basisschema der Mensch-Maschine-Interaktion für visuell-taktile Anzeigesysteme. [SCHWALK ET AL. 2015A]



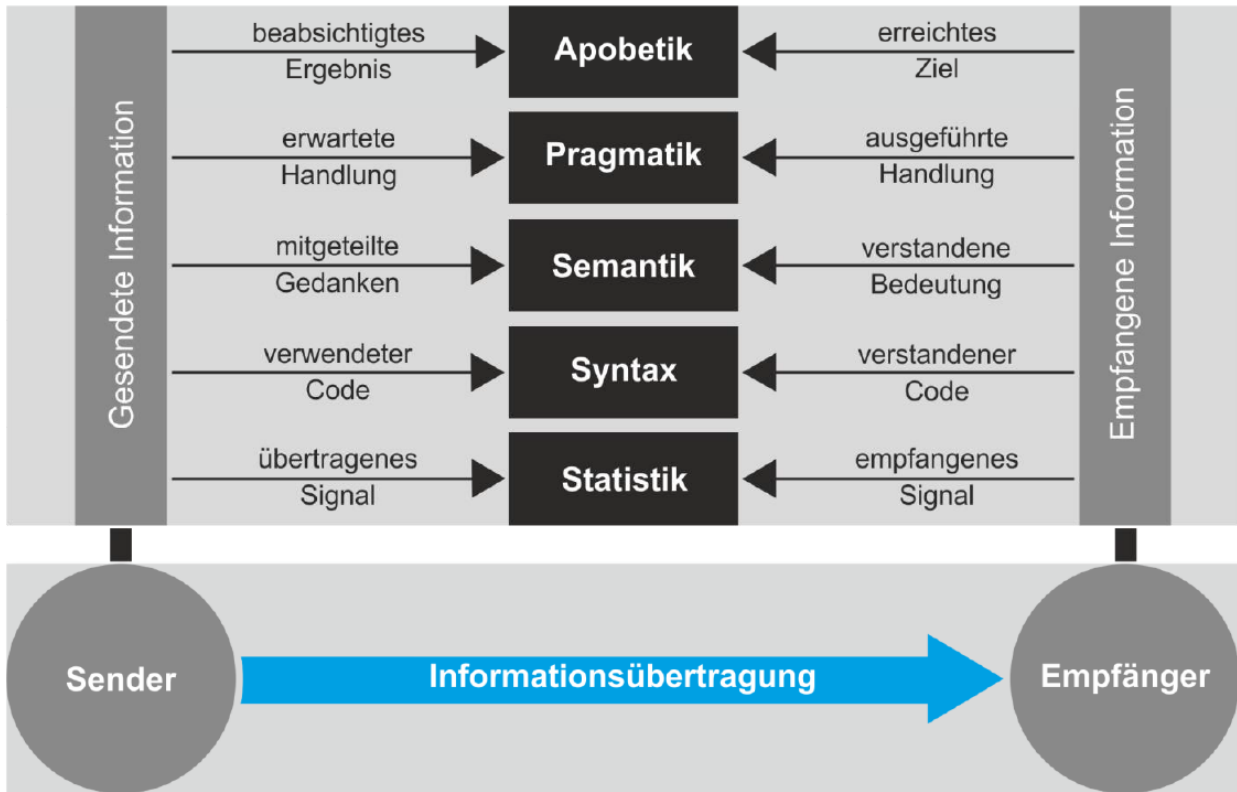
Jede Situation der Mensch-Maschine-Interaktion wird durch die aktuelle Aufgabe innerhalb der physischen und sozialen Umgebung bestimmt. Innerhalb dieser Situation ist die Aufmerksamkeit des Menschen auf bestimmte Elemente und Aktionen gerichtet. Das menschliche Wahrnehmungs- und Verarbeitungssystem filtert die enorme Menge an Informationen, die von den Rezeptoren aufgenommen wird. Das Interface sollte dabei die Aufmerksamkeit zur richtigen Zeit auf die relevanten Elemente richten und die zielgerichtete Informationsfilterung unterstützen. Der Nutzer muss die aktuelle Situation wahrnehmen und verstehen, bevor er eine Projektion der nahen Zukunft des Systems erstellen kann (Situationsbewusstsein). Durch einen Abgleich zwischen AG und LZG wird ein Urteil gebildet und eine Entscheidung gefällt. Je einfacher dieser Abgleich ausfällt (bspw. durch bereits bekannte Handlungsstrategien), umso schneller kann der kognitive Prozess ablaufen und durch Aktivierung des motorischen Systems eine adäquate Handlung ausgeführt werden. Gerade in Situationen einer Überlastung durch visuelle Informationen oder einer Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung können taktile Anzeiger bzw. visuell-taktile Anzeigesysteme die Gebrauchstauglichkeit und damit die Sicherheit erhöhen. [SCHWALK & MAIER 2016]

Das ideale Interface wird häufig als intuitiv bzgl. der Informationseingabe und -ausgabe beschrieben, wobei der Begriff „Intuition“ in diesem Kontext schwer zu greifen ist. Basierend auf [GIGERENZER 2008] formulieren Schmid und Maier Intuition als eine Kombination aus evolvierten und erlernten Fähigkeiten, die den Menschen teilweise unbewusst bzw. nach seinem „Bauchgefühl“ entscheiden lassen. Evolvierte Fähigkeiten wurden von unseren Vorfahren durch überlebensnotwendige Erkenntnisse entwickelt und weitervererbt, während erlernte Fähigkeiten auf persönlichen Erfahrungen basieren [SCHMID & MAIER 2017, S. 69-70].

### **2.3.2 Informationsmodell**

Der zentrale Aspekt des oben beschriebenen Basisschemas ist der Informationsaustausch zwischen Mensch und Maschine. Im Zuge der Interaktion finden mehrere Schleifen der Informationsübertragung statt. Über den Anzeiger werden Informationen an den Menschen übermittelt, durch die Eingabe findet eine Informationsübertragung vom Menschen zur Maschine (über das Stellteil) statt. Dies löst wiederum ein Feedback aus, welches dem Menschen angezeigt wird. Um den Anzeiger möglichst optimal und intuitiv gestalten zu können, wird insbesondere die Übertragung von der Maschine als Sender zum Menschen als Empfänger näher beleuchtet. Die Information wird nach [DIN 44300-1 1995] definiert als „Kenntnis, die die Ungewissheit über das Eintreten eines bestimmten Ereignisses aus einer Menge von möglichen Ereignissen verringert oder beseitigt.“ Ein systematisches und im Kontext der MMI geeignetes Modell der In-

Informationsübertragung liefert Gitt (2002) [SCHMID & MAIER 2017, S. 50]. Das Modell ist in die fünf Ebenen Statistik, Syntax, Semantik, Pragmatik und Apobetik aufgeteilt [GITT 2002, S.87-122], welche auf Sender-Seite von oben nach unten („top-down“) und auf Empfänger-Seite umgekehrt („bottom-up“) durchlaufen werden (vgl. Abbildung 2.5).



**Abbildung 2.5:** Informationsübertragungsmodell nach Gitt [SCHMID & MAIER 2017, S. 50]

Einen Einfluss auf die Informationsübertragung haben die je nach Situation und Kontext vorkommenden Aufgaben- und Informationsarten, die in Bezug auf ihre Komplexität und das beabsichtigte Ergebnis unterschiedliche Ausprägungen aufweisen können.

Im Kontext der Informationsarten bei taktile Übermittlung spricht Jones (2004) von „temporal cues“, „task cues“ und „spatial cues“, also von Hinweisreizen, die einen zeitlichen, aufgabenspezifischen oder räumlichen Charakter besitzen [JONES 2014]. Auf Basis von [DIN EN ISO 14915-3 2003] erfolgt eine allgemeine Klassifizierung in [SCHWALK & MAIER 2014], wonach die Informationsarten in die vier Kategorien vernetzte, räumliche, System- und Objekt-Informationen unterteilt werden. Eine weitere Unterscheidung kann dahingehend getroffen werden, ob die zu übermittelnde Information einen rein informativen Charakter besitzt (vgl. Überwachungsaufgaben) oder das Ziel einer Handlungsaufforderung verfolgt (Steuerungsaufgaben) [BUBB & BUBB 2013, Kapitel A-13.1.3, S. 1-8].

### 2.3.3 Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

Die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug stellt einen spezifischen Fall der MMI dar und wird in der vorliegenden Arbeit als Anwendungsbeispiel für die praktischen Versuche verwendet. Die Anzahl der Funktionen im PKW steigt immer weiter an und auch im Kontext des teil- und hochautomatisierten Fahrens steigt damit gleichzeitig die Anzahl an Informationen, die der Fahrer sicher und schnell erkennen und verarbeiten muss.

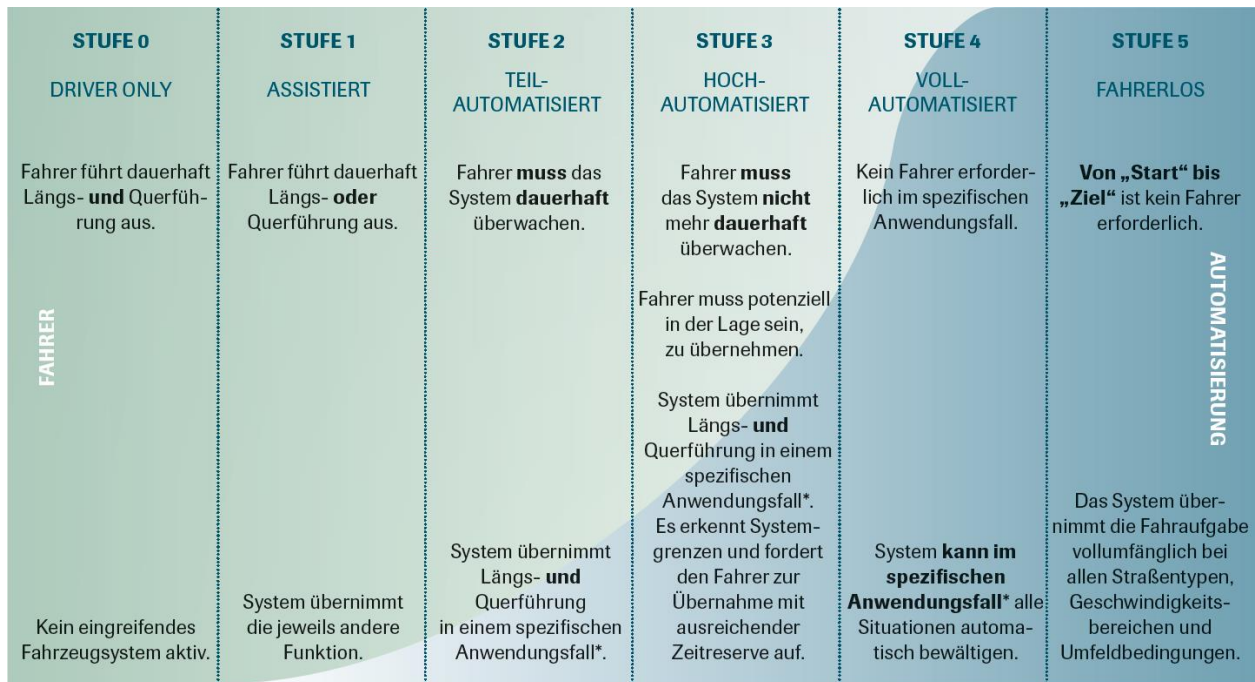
Trotzdem muss er jederzeit ein adäquates Situationsbewusstsein besitzen, um das Fahrzeug sicher im Straßenverkehr bewegen zu können. Dabei kann eine Aufteilung in die primäre, sekundäre und tertiäre Fahraufgabe vorgenommen werden. Die primäre Fahraufgabe beinhaltet die Planung (Routenauswahl), das Manövrieren und die Stabilisierung (Einhalten von Spur, Abstand und Geschwindigkeit); die sekundäre Fahraufgabe ist abhängig von Umwelteinflüssen sowie der Verkehrssituation und dient der Unterstützung des eigentlichen Fahrprozesses (Betätigung von Blinker, Lichtschalter, Scheibenwischer, Tempomat etc.); die tertiäre Fahraufgabe ist unabhängig vom eigentlichen Fahrprozess und betrifft die Befriedigung von Informations-, Komfort-, und Unterhaltungsbedürfnissen (Navigation, Klimaanlage, Musikanlage etc.). [BUBB 2001]

Für eine sichere manuelle Fahrt darf der Fahrer nicht von der primären Fahraufgabe abgelenkt werden. Eine Studie der Allianz zeigt, dass mindestens 10 % der Unfälle im Straßenverkehr auf Ablenkung durch Multitasking zurückzuführen sind, wobei von einer weitaus höheren Dunkelziffer ausgegangen wird. [OLMA 2012]

Die Ablenkung des Fahrers kann potenziell über vier Dimensionen erfolgen: Visuelle Ablenkung (Verkehrsgeschehen, Blickabwendung), auditive Ablenkung (Töne, Signale, Musik, Kommunikation), biomechanische Ablenkung (Ausführung von Nebenaufgaben) und kognitive Ablenkung (Denkvorgänge). [ITU 2010, S. 3]

In Bezug auf das automatisierte Fahren (vgl. Abbildung 2.6) müssen insbesondere die Übergabe und Übernahme der Kontrolle zwischen Fahrer und Fahrzeug klar geregelt und eindeutig über das Interface kommuniziert werden. Gerade die Übernahmeaufforderung an den Fahrer in Situationen, in denen er unerwartet das Steuer vom automatisiert fahrenden Fahrzeug übernehmen muss, stellt eine Herausforderung dar. Im Bereich dieser „Take-Over-Requests“ setzen einige experimentelle Studien mit multimodalen Anzeigern an (vgl. Kapitel 3.2.3). In höheren Automatisierungsstufen (Stufen 3 und 4) ist es denkbar, dass der Fahrer (inkl. Fahrersitz) zeitweise nicht mehr in Fahrtrichtung ausgerichtet ist oder sogar schläft. Auch in diesem Kontext erscheint eine taktile Anzeige über den Sitz äußerst sinnvoll. In niedrigeren Stufen des automatisierten Fahrens kommen dem Menschen insbesondere Überwachungsaufgaben zu. Potenzielle Probleme im Rahmen der Automation können in den Bereichen Vigilanz (Minderung

nach 5-15 min Automation), Vertrauen (Misstrauen oder Übervertrauen), „Loss of Awareness“ (mangelnde Überwachung, Überraschungen durch veränderte Art der Interaktion) oder „Deskilling“ (Verlust manueller Fähigkeiten) auftreten [OTHERSEN 2016, S. 59].



**Abbildung 2.6:** Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens (\*: Abh. von Straßentyp, Geschwindigkeit, Umfeld) [VDA 2015, S. 15]

### 3 Stand der Technik und Forschung

In der vorliegenden Arbeit wird entsprechend [GRUNWALD 2001, S. 12] zwischen aktiver und passiver Reizaufnahme unterschieden. Die aktive Reizaufnahme beinhaltet Explorationsvorgänge wie bspw. das Ertasten und verknüpft dadurch kinästhetische und taktile Elemente. Den Kern der vorliegenden Arbeit bildet dagegen die passive Reizaufnahme, da taktile Stimuli an den Menschen übertragen werden, ohne dass dieser eine Aktion ausführt. Somit wird in diesem Kontext von aktiven taktilen Anzeigern gesprochen. Taktile Anzeiger kommen in unterschiedlichen Bereichen bereits zum Einsatz. Zumeist weisen die verwendeten taktilen Muster dabei eine geringe Komplexität auf. Im Folgenden wird zunächst eine Kategorisierung vorgenommen, um das Feld der taktilen Anzeiger systematisch zu erschließen. Es folgt eine Zusammenfassung der relevanten Forschungsarbeiten zur taktilen Informationsdarbietung. Dabei werden vorhandene Grenz- und Komfortbereiche aufgeführt, welche der vorliegenden Arbeit bei der Generierung der Reizmuster zugrunde liegen sowie ein umfassender Überblick zu bestehenden taktilen Anzeigern und Forschungsarbeiten gegeben. Abschließend wird als Fazit dieses Kapitels der Forschungsbedarf im Bereich taktiler Anzeiger herausgearbeitet.

#### 3.1 Systematische Einteilung taktiler Anzeiger

Die Einteilung bzw. Kategorisierung taktiler Anzeiger kann aus unterschiedlichen Perspektiven erfolgen. Es wird zunächst eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Technologien gegeben sowie anschließend eine Einteilung nach Körperregion vorgenommen. Des Weiteren werden relevante Anwendungsbereiche beleuchtet.

##### 3.1.1 Gliederung nach Technologie

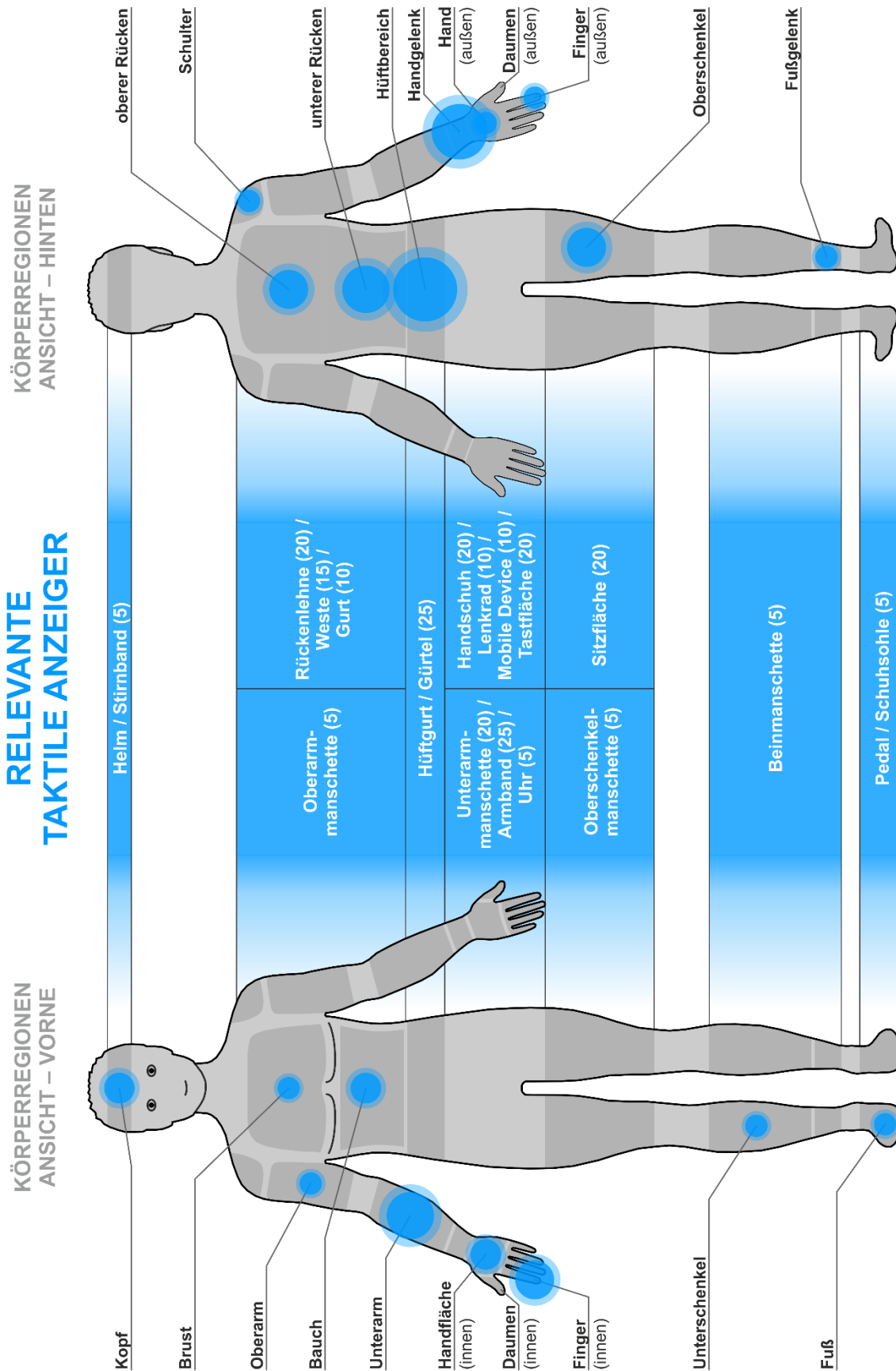
Zur Übermittlung von haptischen bzw. taktilen Reizen an den Menschen steht eine Reihe an Technologien zur Verfügung. Nachfolgend werden relevante und sinnvolle Möglichkeiten beschrieben. Zunächst können die folgenden, häufig genutzten, Aktor- bzw. Wirkprinzipien genannt werden, mit denen die dem Anzeiger zugeführte Energie in mechanische Energie umgewandelt werden kann [KERN ET AL. 2009, S. 200]: Elektrodynamisches, elektromagnetisches, piezoelektrisches, kapazitives, magnetorheologisches, elektrochemisches und thermisches Prinzip sowie Formgedächtnis-Legierungen. Daraus ergibt sich in der technischen Umsetzung eine Vielzahl an Aktuatoren wie Piezomotoren, Hubmagnete, Pneumatik- und Hydraulikantriebe sowie verschiedene Varianten von elektromechanischen Antrieben. Für die Realisierung von Vibration eignen sich vor allem Vibrationsmotoren bzw. „Taktoren“, wie sie im Mobiltelefon oder in Controllern

von Spielekonsolen zum Einsatz kommen [KERN 2009B, S. 124]. Hierbei werden meist Unwuchtmotoren verwendet, die bereits in sehr kleinen Baugrößen realisiert werden können. Diese Technologie ist vergleichsweise „einfach“ und dadurch sowohl günstig als auch robust. Die Herausforderung liegt dabei in der adäquaten Kodierung der zu übermittelnden Informationen, u. a. durch Variation von Intensität und Dauer der Reize sowie in einer geschickten mechanischen Kopplung an den Nutzer [KERN 2009B, S. 124].

### **3.1.2 Gliederung nach Körperregion**

Taktile Anzeiger werden für verschiedenste Körperregionen entwickelt und evaluiert (vgl. Abbildung 3.1). Auf Basis einer umfassenden Literatur-Recherche sowie einer Übersicht von [JONES 2014] werden folgende Bereiche unterschieden: Torso (Rücken, Hüfte, Taille, Bauch), Arm (Oberarm, Unterarm, Handgelenk), Hand (Handfläche, Handrücken, Finger), Beine (Oberschenkel, Unterschenkel, Füße), Kopf (Stirn, Hinterkopf).

Je nach Anwendungsfall sind unterschiedliche Körperregionen als geeignet zu betrachten. Um einen Überblick zur Verteilung bestehender Forschungsarbeiten zu geben, wird auf Basis der durchgeführten Recherche quasi-quantitativ wiedergegeben, in welchem Umfang die unterschiedlichen Körperregionen in der Literatur mit taktilen Anzeigern adressiert werden (siehe Abbildung 3.1). Diese Übersicht soll die Schwerpunkte des aktuellen Forschungsstandes in Bezug auf taktile Anzeiger vermitteln und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für die Bereiche Unterarm und Handgelenk sowie Hüfte und Oberkörper liegen insgesamt die meisten wissenschaftlichen Arbeiten vor. Die wichtigsten bzw. relevantesten Literaturquellen der Übersicht in Abbildung 3.1 werden in Kapitel 3.2 ausführlich beschrieben.



**Abbildung 3.1:** Übersicht zum Einsatz taktiler Anzeiger in Bezug auf verschiedene Körperregionen mit Angabe der jeweiligen Quellenanzahl in Klammern

### 3.1.3 Gliederung nach Anwendungsbereich

Taktile Anzeiger kommen in diversen Anwendungsbereichen zum Einsatz. Die vier relevantesten Kategorien in Bezug auf die MMI sind Sicherheit (Reduzierung der visuellen Belastung, natürliche und intuitive Informationsdarbietung), Unterstützung/Assistenz (geringere Arbeitsbelastung und schnellere Reaktionen), Spaß (stille und private Kommunikation mit der Maschine) und Effizienz (z. B. Optimierung des Kraftstoffverbrauchs im Fahrzeugkontext) [VAN ERP & VAN VEEN 2001].

Auf Basis der recherchierten Literatur sowie [JONES 2014] können die folgenden Bereiche als Hauptforschungsgebiete für den Einsatz taktiler Anzeiger genannt werden:

- Fahrzeug (Spurhalteassistent, teilautomatisiertes Fahren),
- Flugverkehr (Navigation für Piloten und Fluglotsen),
- Medizintechnik (vibrierende Operationswerkzeuge zur Navigation, Armmanschetten zur Anzeige von Vitalparametern),
- Augmented und Virtual Reality (Montage u. a.),
- Teleoperation (Raumfahrt, Mensch-Roboter-Interaktion),
- Consumer-Produkte (Wearables, Gaming),
- Touchscreen-Feedback (Oberflächensimulation, Stylus Pen),
- Barrierefreies Design (Blindennavigation, Ausgleich von Einschränkungen in den Bereichen Hören und Gleichgewichtssinn).

## 3.2 Relevante Forschungsarbeiten zur taktilen Informationsdarbietung

Nach der Darstellung der zur Verfügung stehenden und sinnvollen Technologien für taktile Anzeiger sowie der unterschiedlichen Körperregionen und Einsatzgebiete, werden in diesem Kapitel die wichtigsten Erkenntnisse relevanter Forschungsarbeiten beschrieben. Dabei wird zunächst auf zu berücksichtigende taktile Grenz- und Komfortbereiche eingegangen. Im Anschluss erfolgen eine allgemeine Betrachtung taktiler Muster sowie die Beschreibung konkreter Forschungsergebnisse in Bezug auf taktile Anzeiger im Fahrzeug sowie an Torso und Beinen.

### 3.2.1 Taktile Grenz- und Komfortbereiche

Bei der Wahrnehmung von Vibration sind die Parameter Frequenz, Intensität, Dauer, Schwingungsform und Lage von Bedeutung. Im Sinne einer „taktilen Sprache“ spricht [JONES 2014] dabei von „taktilen Vokabeln“. Die beiden wichtigsten Parameter in Bezug auf eine sichere aber komfortable Wahrnehmung sind dabei die Frequenz und die Intensität des taktilen Anzeigers, die beide in einem Bereich liegen sollten, in dem die Vib-



ration eindeutig und sicher wahrgenommen werden kann, jedoch keine Irritation bzw. kein Diskomfort entsteht. Dieser Frequenz-Bereich wird von [JONES 2014] mit 100-200 Hz angegeben, wobei eine Abhängigkeit von der jeweiligen Körperregion berücksichtigt werden sollte. Van Erp gibt einen Bereich von 50-250 Hz vor [VAN ERP 2006]. Für den Einsatz von vibrotaktilen Feedback im Fahrersitz zeigen Untersuchungen von Fitch, dass Frequenzen bis 140 Hz als nicht störend empfunden werden [FITCH 2008, S. 30]. Neben der Vermeidung von Diskomfort hat die Begrenzung der Frequenz den Vorteil, dass die Vibration nicht zu deutlich als Ton hörbar wird, um eine stille und private Informationsübermittlung zu unterstützen. Auf der anderen Seite sollte die Frequenz über 50 Hz liegen, um nicht durch Masking von anderen Vibrationen im Fahrzeug, wie Straßenunebenheiten, überlagert zu werden [ROSENGREN & WENNERHOLM 2008, S. 19]. Die Unterschiedsschwellen bzgl. einer Änderung der Frequenz liegen bei 18-50 %. Die Intensität kann über die Amplitude der Schwingung definiert werden, wobei die untere Grenze (für eine Frequenz von 200 Hz) bei 0,07-14  $\mu\text{m}$  liegt [JONES & SARTER 2008, S. 91]. Unterschiede liegen hierbei im Bereich von 5-30 %. Die Dauer der vibrotaktilen Reize liegt typischerweise im Bereich 80-500 ms bei einer üblichen Anzahl von 1-5 Impulsen. Nach [VAN ERP 2006] ist der Mensch in der Lage, bereits eine Dauer sowie ein Intervall von jeweils 10 ms zu erfassen. [JONES 2014], [JONES & SARTER 2008]

### 3.2.2 Taktile Muster und Tactons

Von den oben genannten Parametern sind Dauer (Anzeige- und Intervalldauer), Schwingungsform sowie die Lage (bzw. der Ort) der aufgebrachten Vibration entscheidend für die Generierung von taktilen bzw. vibrotaktilen Mustern, die auch als sog. Tactons bezeichnet werden [JONES & SARTER 2008, S. 94]. Die Bezeichnung „Tacton“ („tactile icon“) ist abgeleitet aus der visuellen Wahrnehmung und als Entsprechung zu „Icon“ zu verstehen. Beide repräsentieren durch gezielte Abstraktion eine bestimmte Bedeutung innerhalb eines definierten Nutzungskontextes [JONES 2014].

Nach [BARBER ET AL. 2015, S. 473] werden drei Arten von Tactons unterschieden: statisch, richtungsbezogen und dynamisch. Während statische Muster räumlich fix sind und damit ausschließlich über die Aktivierungsdauer bzw. Zwischenintervalle definiert sind, weisen richtungsbezogene und dynamische Muster eine Sequenz von nacheinander aktivierten Taktoren an unterschiedlichen Orten auf und besitzen damit eine raumzeitliche Dimension.

Eine weitere Kategorisierung taktiler Anzeiger im Rahmen von Matrix-Anordnungen der Aktuatoren wird von [LOOMIS & LEDERMAN 1986, S. 13] vorgenommen, welche die folgenden Anzeige- bzw. Darbietungsarten definiert:

- **Static display:**  
Fixe Position eines Musters während der gesamten Reizdarbietung.
- **Scan display:**  
Gleichmäßige Bewegung („Durchlaufen“) des gesamten Musters relativ zur Haut.
- **Slit-scan display:**  
Unterteilung des Musters in mehrere Bereiche, die einzeln sequenziell von einer Seite zur anderen angezeigt werden.
- **Segment display:**  
Anzeige des Musters durch sequenzielle Abfolge einzelner, überlappender Segmente, die im Gesamteindruck das Muster abbilden.
- **Apparent movement display:**  
Scheinbewegung durch Anzeige der Anfangs- und Endpunkte („Nachzeichnen“) einzelner Segmente mit oder ohne zeitliche Überlappung.
- **Trace display:**  
Sequenzielle Anzeige aller einzelnen Punkte eines Musters.

Vibrotaktile Stimuli bzw. Muster besitzen nach [PETERMEIJER ET AL 2017A] unter Verweis auf Geldard (1960) und Van Erp (2002) die folgenden vier Dimensionen:

- Position (location),
- Amplitude (amplitude),
- Aktivierungs- und Intervalldauer (timing, on/off pattern),
- Frequenz (frequency).

Jede der vier Dimensionen kann statisch oder dynamisch (mit oder ohne Änderung der Position über die Zeit) ausgeprägt sein und jeweils durch Variation für die Generierung unterschiedlicher Muster genutzt werden. Position und zeitliche Ausprägung der Aktivierungs- und Intervalldauer werden dabei am geeignetsten für die Kodierung von Informationen angesehen. Die Kombination aus Frequenz und Amplitude wird von den Autoren als Intensität bezeichnet. [PETERMEIJER ET AL 2017A]

### **3.2.3 Taktile Anzeiger im Fahrzeug**

Zum Einsatz taktiler Anzeiger im Fahrzeug existieren diverse Forschungsarbeiten, die generell kürzere Reaktionszeiten und geringere Fehlerraten bei verschiedenen Aufgaben nachweisen, vgl. hierzu u. a. [VAN ERP & VAN VEEN 2001], [VAN ERP ET AL. 2003], [STANLEY 2006], [FITCH ET AL. 2011], [CHANG ET AL. 2011]. In [PETERMEIJER ET AL. 2015] wird ein umfassender Überblick haptischer Unterstützungssysteme im Fahrzeug gegeben, die im Lenkrad, Gaspedal, Sicherheitsgurt oder Fahrersitz implementiert sind. [SCHWALK ET AL. 2016]

Ein sinnvoller Einsatz taktiler Anzeiger ist dabei unter anderem die Unterstützung von Warnhinweisen im Falle eines Verlassens der Fahrspur [NORMAN 2013, S. 95]. Zusätzlich oder alternativ zu visuellen und akustischen Signalen kommen hierbei erste taktile Signale zum Einsatz, die bisher meist sehr einfach gestaltet sind. Als Beispiele einer praktischen Umsetzung im PKW-Segment können Sitzvibration (z. B. AFIL von Citroën) oder Lenkradvibration (z. B. Audi Lane Assist, Spurverlassenswarner von BMW, Nissan Lane Deviation Avoidance) genannt werden. [PETERMANN-STOCK 2015, S. 14]

Ein weiterer, immer wichtiger werdender Bereich, in dem taktile Anzeiger Vorteile in Bezug auf Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit liefern können, ist das automatisierte Fahren. Eine Übersicht relevanter Forschungsarbeiten in diesem Bereich findet sich in [PETERMEIJER ET AL. 2016]. Einen Fokus nehmen dabei die sog. Take-Over-Requests ein, die den Fahrer darauf hinweisen, dass er zum Ende eines automatisiert gefahrenen Streckenabschnitts die Kontrolle vom Fahrzeug wieder übernehmen muss.

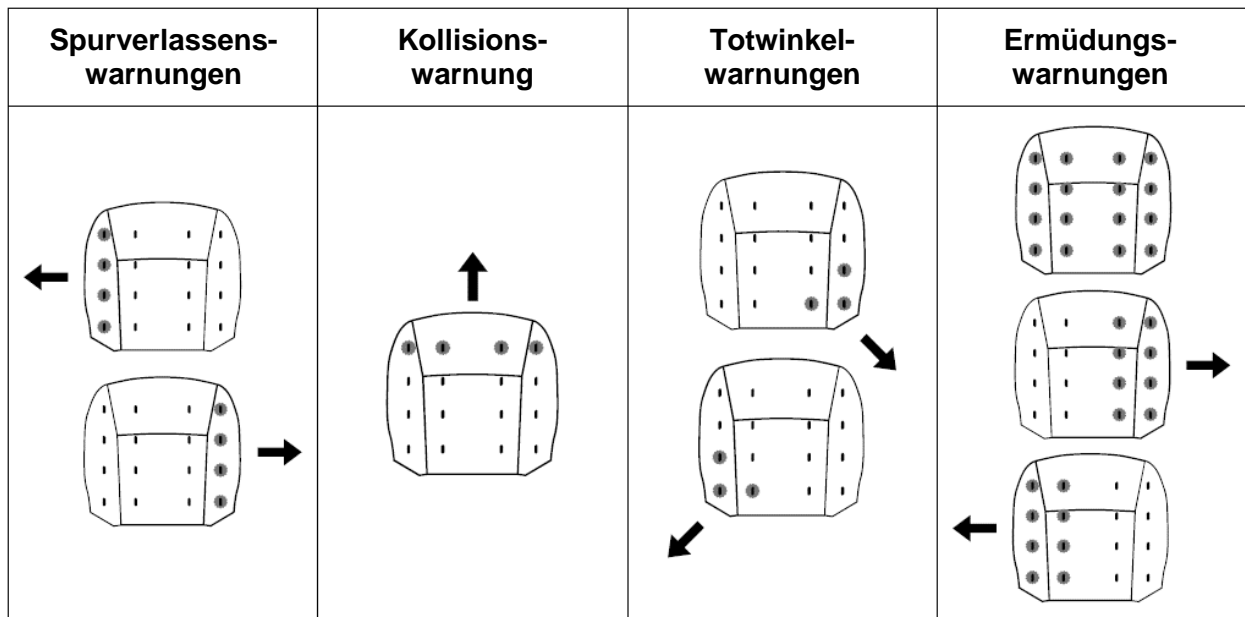
Im Rahmen der Anzeige vibrotaktile Muster über den Fahrzeugsitz können darüber hinaus folgende Arbeiten genannt werden. Vibrotaktile Anzeiger in einer Kombination von Sitzfläche und Rückenlehne werden beispielsweise von [FITCH 2008], [CHANG ET AL. 2010], [NAVARRO ET AL. 2010], [CHANG ET AL. 2011], [FITCH ET AL. 2011], [JI ET AL. 2011], [THOMAS 2013] und [SCHWALK ET AL. 2015B] behandelt. Untersuchungen zu Vibrationsmotoren und -mustern in der Sitzfläche werden u. a. beschrieben in [VAN ERP & VAN VEEN 2001], [VAN ERP ET AL. 2003], [LEE ET AL. 2004], [VAN ERP & VAN VEEN 2004], [STANLEY 2006], [FITCH ET AL. 2007], [ROSENGREN & WENNERHOLM 2008], [HOGEMA ET AL. 2009], [DE VRIES ET AL. 2009], [MORRELL & WASILEWSKI 2010], [DE GROOT ET AL. 2011], [GENERAL MOTORS 2013], [EISERT ET AL. 2013], [EISERT & BALDWIN 2014], [NUKARINEN ET AL. 2014] und [NUKARINEN ET AL. 2015]. Vibrationsmotoren in der Rückenlehne werden z. B. von [TAN ET AL. 2003] und [TELPAZ ET AL. 2015] untersucht. [SCHWALK ET AL. 2016]

Nachfolgend werden die relevantesten Erkenntnisse der recherchierten Forschungsarbeiten im Kontext der vorliegenden Arbeit genauer beschrieben. Die Auswahl fokussiert sich auf konkrete Beschreibungen und Erkenntnisse in Bezug auf die Entwicklung und Evaluation von taktilen Mustern.

Van Erp und Van Veen nutzen in einer Untersuchung eine vibrotaktile Matrix im Sitz mit acht Vibrationsmotoren, die in zwei geraden Linien auf der Sitzfläche angeordnet sind, um Navigationshinweise mit Entfernungsinformationen zu übermitteln [VAN ERP & VAN VEEN 2001]. Jeweils vier Motoren sind bei diesem Aufbau mit einem Mittelpunkts-Abstand von je 40 mm unter jedem Oberschenkel angebracht. Die Vibrationsmotoren werden mit einer konstanten Frequenz von 250 Hz betrieben. Bei Annäherung an den nächsten Wegpunkt wird die Vibrationsintensität erhöht (in unbestimmtem Maße) und

die Intervalle zwischen den Pulsen verkürzt (von 264 ms auf 212, 160, 108, 52, 40, 32 und 20 ms). Die Ergebnisse der Studie zeigen Vorteile dieser taktilen Informationsdarbietung gegenüber einer visuellen Vergleichs-Anzeige, was sich in kürzeren Reaktionszeiten sowie geringerer mentaler Anstrengung und Belastung niederschlägt. Die Erkenntnisse werden von den Autoren als Indizien dafür gesehen, dass der taktile Wahrnehmungskanal im Fahrzeug das Potenzial besitzt, die Qualität und die Sicherheit der MMI zu verbessern. [VAN ERP & VAN VEEN 2001], [SCHWALK ET AL. 2015B]

In einer Studie von Rosengren und Wannerholm werden die Nützlichkeit und Effizienz einer taktilen Matrix in der Sitzfläche im Kontext von Kollisions- und Totwinkelwarnungen untersucht [ROSENGREN & WENNERHOLM 2008]. Die taktilen Muster für diese Informationen sowie Vorschläge für die Anzeige einer Ermüdungs- und Spurverlassenswarnung, welche in der Studie nicht weiter behandelt werden, sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Die verwendete Matrix besteht aus insgesamt 16 Aktuatoren, die mit einer Frequenz von 125 Hz (nach einem Vorversuch mit Werten zwischen 100 und 183 Hz) angesteuert werden. Die Resultate der taktilen Anzeige (im Sinne schnellerer Reaktionen) sind bei der Kollisionswarnung vergleichbar mit denen einer visuellen Anzeige über ein Head-up-Display. Beide Bedingungen liefern signifikant bessere Ergebnisse als ein Vergleichsaufbau ohne Vorwarnung. Die Totwinkelwarnungen werden als effektiv und intuitiv bei kurzen Reaktionszeiten beschrieben, ohne dass hierfür konkrete, quantitative Daten angegeben werden. Generell wird die haptische Modalität für Warnungen und Alarme empfohlen, nicht zuletzt da über die Sitzfläche ein kontinuierlicher Kontakt zwischen Fahrer und Anzeiger gewährleistet ist. In Situationen, in denen der Fahrer abgelenkt ist, werden Frequenzen oberhalb von 125 Hz empfohlen. Bei dieser Art der Muster-Anzeige bevorzugten 70 % der Teilnehmer kurze Pulse, wobei diese nicht genauer spezifiziert werden. [ROSENGREN & WENNERHOLM 2008]



**Abbildung 3.2:** Statische Muster für verschiedene Warnungen in gepulster Anzeige nach [ROSENGREN & WENNERHOLM 2008, S. 37]

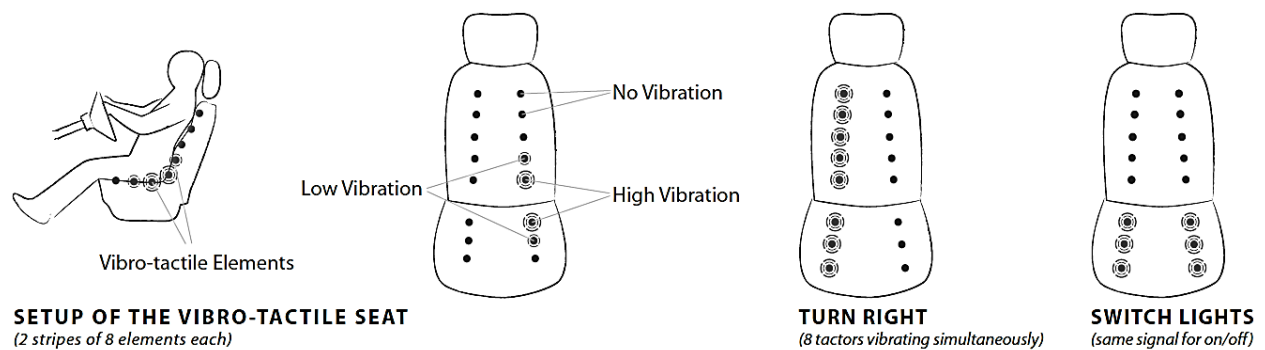
Fitch setzt einen vibrotaktilen Fahrersitz im Realfahrzeug ein, wobei vier Vibrationsmotoren in der Sitzfläche sowie zwei in der Rückenlehne implementiert werden [FITCH 2008]. Es werden taktile Warnhinweise innerhalb diverser Fahr Szenarien untersucht: Kollision, Kreuzung, Spurwechsel, Spurverlassen und Kurvengeschwindigkeit. Insgesamt werden sieben verschiedene taktile Alarmer als Kombination von drei vibrotaktilen Mustern und unterschiedlichen Orten auf dem Sitz generiert. Die drei verwendeten Basismuster werden als „pulse“, „dash“ und „double pulse“ bezeichnet. Die genaue Beschreibung der Muster mit Aktivierungs- und Intervalldauer kann Tabelle 3.1 entnommen werden. Die Aktivierungsdauer (ohne Intervalle) beträgt dabei für jedes Muster 1000 ms. Es werden insgesamt drei Ansätze im Kontext von Antwortzeiten und Erkennungsraten untersucht und verglichen, wobei jeweils eine einzelne Warnung, drei Warnungen bzw. alle sieben Warnungen verwendet werden. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass ein taktiles Warnsystem mit drei verwendeten Warnungen bzw. Mustern am effizientesten und effektivsten ist, da hierbei sowohl kurze Antwortzeiten als auch hohe Erkennungsraten erreicht werden. Dies zeigt sich in einem schnellen und korrekten Ausführen der jeweils richtigen Fahrmanöver, was auf ein komplettes Verständnis der Bedeutungen der drei Alarmer hindeutet. Die Seite (links oder rechts am Sitz) der Vibrationsdarbietung hat keinen Einfluss auf die richtige Erkennung der Muster. Darüber hinaus sind die Antwortzeiten bei der Anzeige über die Rückenlehne generell kürzer als auf der Sitzfläche. Es wird empfohlen, dass Vibrationsfrequenzen zwischen 100 und 290 Hz für taktile Warnungen am Sitz verwendet werden, während der Bereich zwischen 100 und 140 Hz am komfortabelsten, bzw. als nicht störend, empfunden

den wird. Außerdem sollten nicht mehr als drei unterschiedliche Frequenzen innerhalb eines Anwendungskontextes verwendet werden. Die sequenzielle Aktivierung der Motoren reduziert generell die mentale Belastung. [FITCH 2008], [SCHWALK ET AL. 2015B]

Alert	Haptic Pattern Description	Type
Forward Collision Warning	Front-left and front-right tactors simultaneously activate five times (200 ms on, 50 ms off)	Pulse
Curve Speed Warning	Front-left and front-right tactors simultaneously activate for one second	Dash
Intersection Violation Warning	Front-left and front-right tactors simultaneously activate four times each (200 ms on, 50 ms off, 300 ms on, 200 ms off, 200 ms on, 50 ms off, 300 ms on, 50 ms off)	Double Pulse
Left Lane Change Warning	Back-left tactor activates five times (200 ms on, 50 ms off)	Pulse
Right Lane Change Warning	Back-right tactor activates five times (200 ms on, 50 ms off)	Pulse
Left Lane Departure Warning	Back-left tactor activates for one second	Dash
Right Lane Departure Warning	Back-right tactor activates for one second	Dash









**Tabelle 3.1:** Taktile Muster für verschiedene Warnungen nach [FITCH 2008, S. 37]

Riener und Ferscha verwenden in ihrem Experiment einen Sitz mit zwei Reihen (links und rechts) aus jeweils fünf Vibrationsmotoren an der Rückenlehne sowie zwei Reihen mit jeweils drei Motoren auf der Sitzfläche (vgl. Abbildung 3.3) [RIENER & FERSCHA 2008]. Die vibrotaktilen Muster, von den Autoren „tactograms“ genannt, werden in Bezug auf die Antwortzeiten der Probanden mit der Anzeige visueller und auditiver Reize im Kontext einer simulierten Fahrt verglichen. Über die unterschiedlichen Modalitäten werden jeweils die Informationen „links abbiegen“, „rechts abbiegen“, „Licht einschalten“ und „Licht ausschalten“ angezeigt. Die verwendete Frequenz sowie Aktivierungs- und Intervalldauer werden nicht näher beschrieben. Generell sind die Antwortzeiten in der beschriebenen Studie bei taktilem Anzeigepuls kürzer als bei visueller oder auditiver Anzeige. Gerade in der multimodalen Kombination wird jedoch der entscheidende Vorteil der taktilen Darbietung gesehen, um die Ablenkung des Fahrers zu minimieren, den Fahrkomfort zu erhöhen und die mentale Belastung zu senken. Dabei ist die Altersabhängigkeit bzgl. der Wahrnehmung und Erkennung von taktilen Reizen zu berücksichtigen und die taktile Informationsdarbietung ggf. auf die physiologisch entstehenden Einschränkungen anzupassen. [RIENER & FERSCHA 2008]



**Abbildung 3.3:** Setup des vibrotaktilen Sitzes mit verwendeten Mustern [RIENER & FERSCHA 2008]

Chang et al. nutzen einen Fahrersitz mit acht Vibrationsmotoren in der Sitzfläche (sechs zentral, zwei seitlich) sowie vier Motoren in der Rückenlehne, die mit einer (theoretischen) Frequenz von 30,14 Hz und einer Amplitude von 2,65 G (Sitzfläche) bzw. 34,21 Hz und 3,38 G (Rückenlehne) angesteuert werden [CHANG ET AL. 2011]. Die Fahrbefehle "geradeaus", "links abbiegen", "rechts abbiegen" sowie die Warnung "Geschwindigkeitsbegrenzung" werden in verschiedenen Modalitäten dargeboten und verglichen. Die verwendeten taktilen Muster sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Für den Fahrbefehl "geradeaus" erfolgt eine sequenzielle Aktivierung der drei zentralen Reihen auf der Sitzfläche von hinten nach vorne mit einer Aktivierungsdauer von jeweils 120 ms sowie einer Intervalldauer von 510 ms (ohne Intervall zwischen den drei Reihen). Für "links abbiegen" und "rechts abbiegen" beträgt die Aktivierungsdauer 158 ms bei einer Intervalldauer von 46 ms. Die Warnung "Geschwindigkeitsbegrenzung" wird durch zwei Impulse mit Aktivierungsdauer 726 ms und Intervalldauer 78 ms an der Rückenlehne angezeigt. In einem ersten Experiment wird gezeigt, dass die Antwortzeiten für die haptische Anzeige im Vergleich zur visuellen und auditiven Anzeige kürzer ausfallen. In einem zweiten Experiment werden die haptische, auditive und multimodale (haptische + auditive) Darbietung verglichen. In diesem Aufbau zeigt das multimodale Display kürzere Antwortzeiten als eine einzelne haptische oder auditive Darbietung, während eine rein haptische Anzeige zu kürzeren Antwortzeiten führt als eine rein auditive Anzeige. Zusätzlich wird vorgeschlagen, dass Sitzfläche und Rückenlehne getrennt voneinander zur Übertragung verschiedener Informationen verwendet werden. Dabei eignet sich die Rückenlehne besonders gut für die Darstellung von Warnungen. [CHANG ET AL. 2011], [SCHWALK ET AL. 2015B]

Modality	Signal			
	Go straight	Turn left	Turn right	Warning speed limit
Haptic				
Visual				
Auditory	"Go straight"	"Turn left"	"Turn right"	"The speed limit is 80km/h"

**Abbildung 3.4:** Verwendete vibrotaktile Muster im Sitz [CHANG ET AL. 2011]

Ein „höher auflösender“ Ansatz wird ähnlich wie in [SCHWALK ET AL. 2015B] von Petermeijer et al. mit einer Sitzmatte verfolgt, die über jeweils 6x4 Vibrationsmotoren in Sitzfläche und Rückenlehne verfügt, welche einzeln angesteuert werden können. Die Motoren sind als Matrix mit einem Mittelpunktsabstand von jeweils 40 mm angebracht und werden mit einer Frequenz von ca. 100 Hz sowie einer Amplitude von 1,3 G betrieben. [PETERMEIJER ET AL 2017A]

Im Rahmen von Kontroll-Übernahmeaufforderungen („Take-Over Requests“) beim simulierten automatisierten Fahren werden folgende Fragestellungen untersucht: [PETERMEIJER ET AL 2017A]

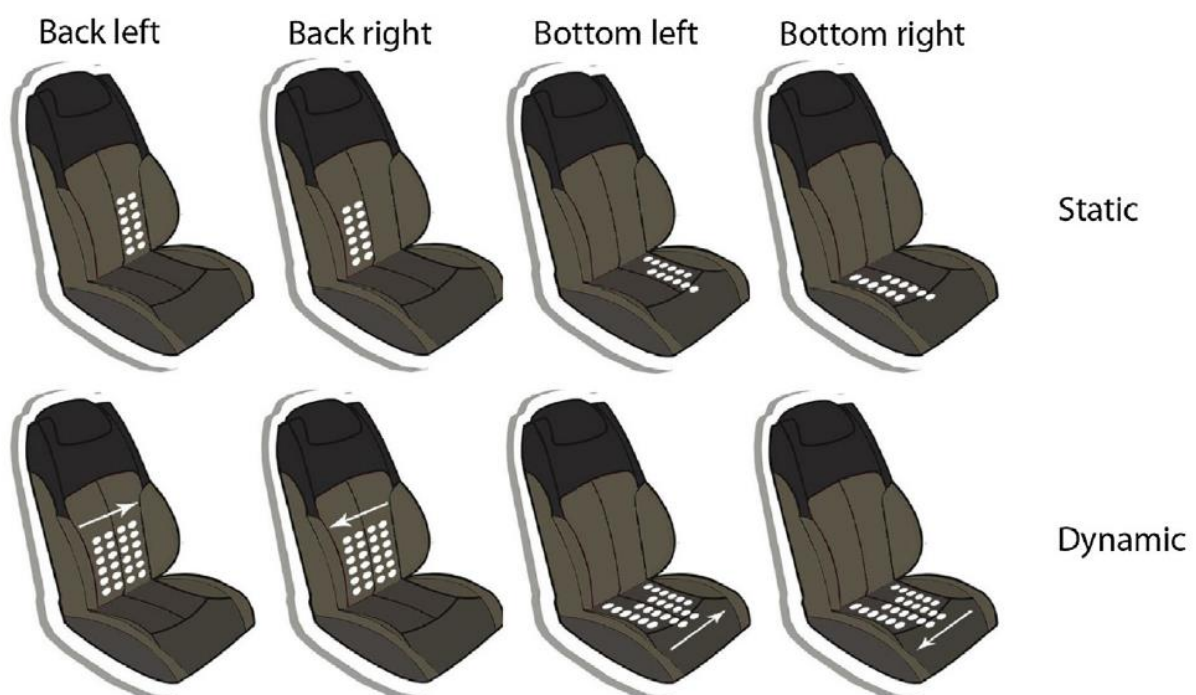
- 1) Bei welcher Vibrationsintensität empfinden die Teilnehmer einen Vibrationsreiz als störend und ändert sich dieser Schwellenwert im Laufe der Zeit?
- 2) Wie gut sind die Teilnehmer in der Lage, Vibrationsreize als Funktion der räumlichen Trennung bzw. Anordnung zu unterscheiden?
- 3) Welches der sechs verglichenen dynamischen Vibrationsmuster wird als am meisten zufriedenstellend angesehen?

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwelle, ab der vibrotaktile Reize als störend empfunden werden, bei wiederholter Reizdarbietung sinkt. Bei zu häufiger taktiler Anzeige besteht also die Gefahr, den Nutzer zu verärgern. Der Einsatz einer taktilen Anzeige sollte daher sinnvoll und gezielt gewählt bzw. gestaltet werden. Des Weiteren steigt die Erkennungsrate beim Zweipunkt-Diskriminationstest mit zunehmender räumlicher Distanz zwischen den Stimuli (im Vergleich zwischen 40 und 200 mm) signifikant an. Eine höhere Zufriedenheit wird bei den Teilnehmern hervorgerufen, wenn mehr Motoren gleichzeitig aktiviert werden bzw. eine größere räumliche „Überlappung“ vorliegt. Insgesamt



samt bestätigen die Ergebnisse, dass die Teilnehmer in der Lage sind, vibrotaktile Muster auf dem Fahrersitz wahrzunehmen. [PETERMEIJER ET AL 2017A]

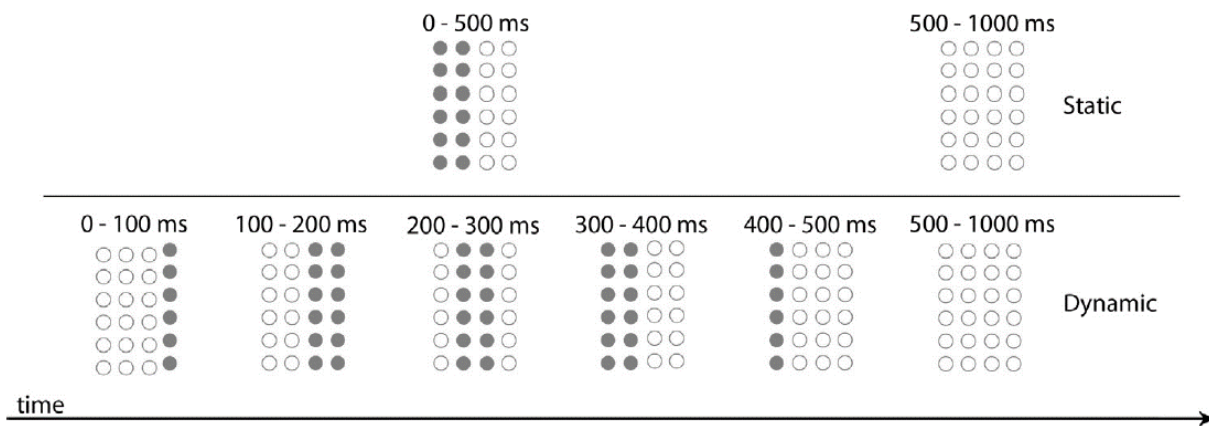
In einer weiteren Studie von Petermeijer et al. werden im Fahrsimulator mithilfe der beschriebenen Sitzmatte statische und dynamische vibrotaktile Muster (bei einer Frequenz von 60 Hz) im Rahmen von richtungsbezogenen Übernahmeaufforderungen verglichen [PETERMEIJER ET AL. 2017B]. Dabei durchlaufen die Teilnehmer drei Situationen (nicht fahrend, hochautomatisiertes Fahren ohne Nebenaufgabe und hochautomatisiertes Fahren mit mental beanspruchender Nebenaufgabe), in denen jeweils unterschiedliche statische und dynamische Übernahmeaufforderungen über die vibrotaktile Matrix dargeboten werden. Die statischen Muster werden im jeweiligen Sitzbereich durch drei Impulse von je 500 ms und Intervallen von ebenfalls 500 ms angezeigt. Die dynamischen Muster werden durch nacheinander erfolgende (sequenzielle) Aktivierung und Überlappung von einzelnen „Spalten“ der Motoren erzeugt, die jeweils für 200 ms aktiv sind. Eine Übersicht der verwendeten Sitzbereiche findet sich in Abbildung 3.5. [PETERMEIJER ET AL. 2017B]



**Abbildung 3.5:** Übersicht der verwendeten Sitzbereiche [PETERMEIJER ET AL. 2017B, S. 221]

Eine detailliertere schematische Visualisierung der statischen und dynamischen Muster ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Im Versuch müssen die Teilnehmer möglichst schnell und korrekt auf den jeweiligen Stimulus antworten und entweder die erkannte Richtung äußern (erste Situation) oder einen Spurwechsel in die entsprechende Richtung ausfüh-

ren (zweite und dritte Situation). Die Ergebnisse zeigen höhere Erkennungsraten sowie kürzere Antwortzeiten bei den statischen Mustern. Auch Kopf- und Augenbewegungen in die jeweils angezeigte Richtung erfolgen dabei schneller. Die Autoren fassen zusammen, dass vibrotaktile Stimuli im Fahrersitz generell effektive Warnungen darstellen können, deren Einsatz als richtungsanzeigende Übernahmeaufforderungen jedoch möglicherweise begrenzt sinnvoll ist. [PETERMEIJER ET AL. 2017B]



**Abbildung 3.6:** Schematische Darstellung statischer und dynamischer Muster für die Richtung „links“ (ausgefüllte Kreise = aktivierte Motoren) [PETERMEIJER ET AL. 2017B, S. 221]

### 3.2.4 Taktile Anzeiger an Torso und Beinen

Neben dem konkreten Einsatz von vibrotaktilem Feedback im Fahrzeugsitz existieren diverse weitere Studien mit Prüfständen aus anderen Anwendungsbereichen (vgl. Kapitel 3.1), die ebenso einen Bezug zur Wahrnehmung und Erkennung von taktilen Stimuli an Torso und Beinen haben.

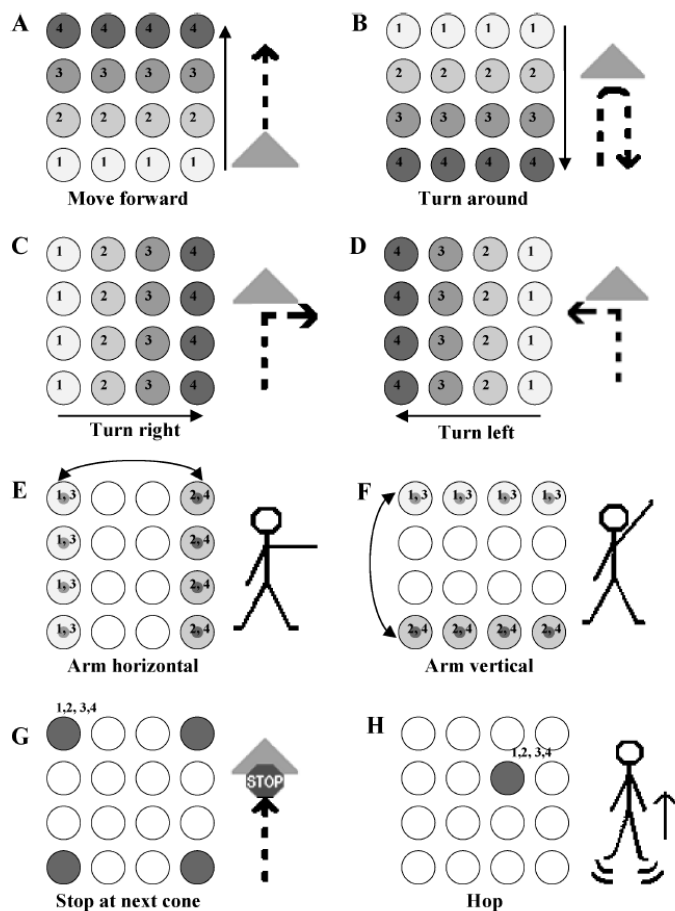
Einen Forschungsschwerpunkt bilden dabei taktile Hüftgurte, die häufig zur Navigation eingesetzt werden. Auch die Anzeige von Richtungen zwischen zwei Aktuatoren kann dabei durch Interpolation der beiden verwendeten Frequenzen realisiert werden, wobei diese Art der Informationsdarbietung schwieriger zu verarbeiten ist als die direkte Richtungsanzeige [PIELOT ET AL. 2008], [HEUTEN ET AL. 2008]. Weitere Arbeiten weisen nach, dass durch einen taktilen Hüftgurt Menschen dabei unterstützt werden können, ihre Balance zu halten, sei es bei professionellen Piloten oder im medizinischen Einsatz bei Menschen mit eingeschränktem Gleichgewichtssinn [MCGRATH & RUPERT 2014]. [SCHWALK & MAIER 2016, S. 347]

Für Piloten existieren zudem Ansätze mit vibrotaktilem Westen (vgl. [ERIKSSON ET AL. 2006]) sowie taktilen Gurten am Oberschenkel, vor allem im militärischen Kontext. Meist zielen diese Studien ebenfalls auf eine Unterstützung bei Navigationsaufgaben ab und

weisen durch zusätzliche taktile Reize Vorteile in Form von höheren Erkennungsraten und kürzeren Antwortzeiten gegenüber rein visueller oder auditiver Darbietung [SALZER ET AL. 2011] oder durch Reduzierung mentaler Belastung auf [SALZER & ORON-GILAD 2012]. Im zivilen Bereich taktile Anzeiger am Oberschenkel existieren u. a. Arbeiten von Cholewiak, die ähnliche Ergebnisse liefern (vgl. [CHOLEWIAK 1979]).

Relevante Arbeiten mit vibrotaktilen Matrizen am (unteren) Rücken existieren u. a. von Jones und Kollegen. Dabei kommen bspw. Matrixanordnungen mit 3x3 [JONES ET AL. 2004] oder 4x4 [JONES ET AL. 2006] Vibrationsmotoren zum Einsatz, um damit unterschiedliche semantische Inhalte durch entsprechende Muster zu übermitteln. Die Erkennung von Richtungen bzw. Orientierungen ist dabei generell sehr präzise, wobei diagonale Orientierungen etwas schlechter abschneiden, was den in 2.1.3 beschriebenen Oblique-Effekt bestätigt [JONES ET AL. 2004].

Mithilfe der 4x4 Matrix werden acht vibrotaktile Muster (A bis H) verglichen, welche die Hinweise „vorwärts“, „umdrehen“, „nach rechts“, „nach links“, „Arm horizontal strecken“, „Arm vertikal strecken“, „an nächster Pylone halten“ und „Springen“ repräsentieren (vgl. Abbildung 3.7) [JONES ET AL. 2006, S. 1370].

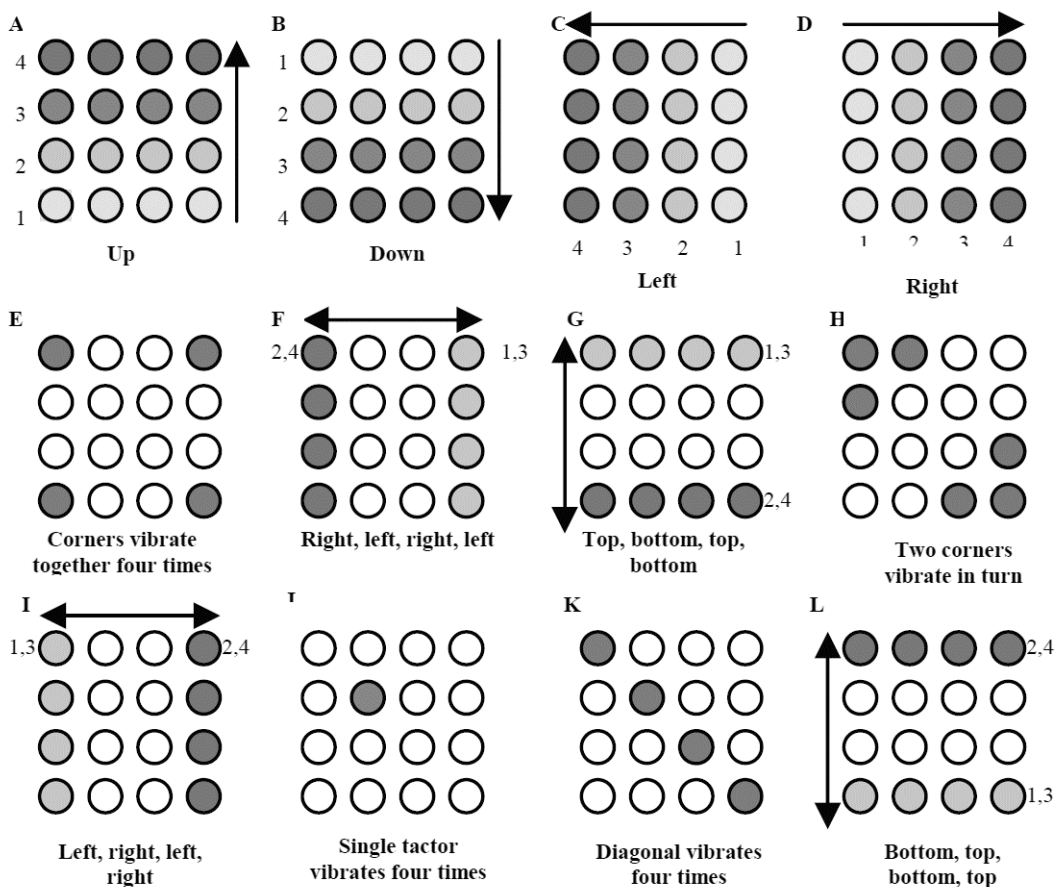


**Abbildung 3.7:** Vibrotaktile Muster mit zeitlicher (Nr.) und räumlicher (Pfeile) Aktivierung [JONES ET AL. 2006, S. 1370]

Alle verwendeten Muster können von den Teilnehmern fast zu 100 % erkannt werden. Ein Unterschied zwischen den zwei unterschiedlichen Motortypen zylindrischer Motor (mit 100 Hz und senkrechter Schwingungsebene zur Haut) und flacher „Pancake“-Motor (mit 80 Hz und paralleler Schwingungsebene zur Haut) wird dabei nicht festgestellt. Die Erkennung am Rücken wird als überlegen im Vergleich zu einer taktilen Anzeige am Unterarm beschrieben. Die verwendeten Muster repräsentieren Richtungs- und Instruktionshinweise, die beide zu sehr hohen Erkennungsraten führen. [JONES ET AL. 2006]

Bei einem ähnlichen Versuchsdesign wird gezeigt, dass die Erkennungsraten zurückgehen, wenn den Teilnehmern als Auswahlmöglichkeit für ihre Eingabe nicht die konkreten schematischen Muster in Matrix-Form angezeigt werden, sondern lediglich Zeichnungen aller verwendeten Handgesten, aus denen die korrekte Geste erkannt werden soll. Die Erkennungsraten reduzieren sich dabei von durchschnittlich 98 % auf 75 %. [JONES ET AL. 2009]

In einer weiteren Studie wird die Anzahl der präsentierten Muster, die in einer kurzen, vorgeschalteten visuellen Lernphase gelernt werden, auf zwölf erhöht (vgl. Abbildung 3.8) [JONES & RAY 2008].



**Abbildung 3.8:** Vibrotaktile Muster mit visualisierten Verläufen bzw. Aktivierungsabfolgen [JONES & RAY 2008, S. 37]

Die Gesamterkennungsrate aller verwendeten Muster liegt bei 95 %, wobei diese zwischen 88 % (Muster G und K) und 100 % variiert. Hervorgehoben wird von den Autorinnen die Effektivität der vibrotaktilen Anzeige am Rücken, die bereits durch eine kurze Lernphase erreicht werden kann [JONES & RAY 2008]. Bei einem grundlegenden Aufbau innerhalb der beschriebenen Studie wird die Lokalisierbarkeit bzw. Erkennungsrate der einzelnen Motoren der 4x4 Matrix untersucht. Die Teilnehmer tragen dabei einen Gehörschutz und jeder einzelne Motor wird im Verlauf des Experiments in randomisierter Reihenfolge jeweils fünfmal aktiviert. Die Erkennungsrate liegt dabei für die 16 einzelnen Motoren zwischen 40 % und 82 % (insgesamt 59 %). Die beiden äußeren Motoren der obersten Reihe werden dabei am besten erkannt. Die korrekte Spalte (87 %) an Motoren wird zuverlässiger erkannt als die korrekte Reihe (68 %), was auf den unterschiedlichen Abstand der Motoren zurückgeführt wird (40 mm vertikal, 60 mm horizontal). Generell wird die räumliche Erkennung schwieriger, wenn die Anzahl an Taktoren steigt und deren Abstände sich verringern. [JONES & RAY 2008]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die an Torso und Beinen verwendeten taktilen Anzeiger meist für die Orientierung und Navigation eingesetzt und dabei vergleichsweise einfache Muster verwendet werden. Jones und Kollegen liefern Ansätze zur Darbietung komplexerer Muster, die im Kontext noch höher auflösender Matrizen aus Vibrationsmotoren erweitert werden können.

### 3.2.5 Einfluss von Kleidung

Da sich bei taktilen Anzeigern im Bereich des Rückens und der Beine stets Kleidung zwischen der menschlichen Haut und dem Taktor befindet, soll an dieser Stelle auf den Einfluss der Kleidung auf die Wahrnehmung der Vibration eingegangen werden. In einer Studie von [DUTHOIT ET AL. 2016] erfolgt die systematische Untersuchung des Einflusses von unterschiedlich vielen bzw. unterschiedlich dicken Baumwoll-Stoffschichten auf die subjektiv wahrgenommene Intensität der Vibration. Diese wird von den Teilnehmern ( $N = 31$ ) auf einer Skala von 0 bis 10 bewertet. Verwendet wird ein einzelner Vibrationsmotor am Rücken, der mit sinusförmigen Schwingungen bei Frequenzen von 100, 150 und 200 Hz betrieben wird. Die Ergebnisse zeigen, dass die wahrgenommene Intensität vergleichbar ist für „zwei dickere Baumwollschichten“, „acht dünne Baumwollschichten“ und „vier dünne Baumwollschichten“. Die beiden Konfigurationen mit dünnen Schichten sind auch nicht signifikant unterschiedlich im Vergleich zum Aufbau ohne Baumwollschicht. Lediglich ein Setup mit dickem Wintermantel führte zu schlechteren Bewertungen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass alltägliche Kleidung keinen signifikanten Einfluss auf die empfundene Intensität der Vibration hat. Einen größeren Einfluss als die Kleidung scheint dagegen der Body-Mass-Index (BMI) zu haben. Je

höher der BMI liegt, umso geringer fällt die empfundene Intensität der Vibration aus. Des Weiteren wird von den Autoren eine kurze Eingewöhnung der Nutzer mit dem taktilen Anzeiger empfohlen. [DUTHOIT ET AL. 2016]

### 3.3 Forschungsbedarf im Bereich taktiler Anzeiger

Die vorherigen Kapitel zeigen, dass bereits seit einigen Jahren diverse Ansätze und Forschungsarbeiten bestehen, die sich mit dem Potenzial taktiler Anzeiger im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion befassen. Meist wird dabei die Performanz in Form von Reaktions- bzw. Antwortzeiten im Vergleich zu anderen Modalitäten (visuell und auditiv) bzw. verschiedenen Modalitäts-Kombinationen untersucht und dabei häufig Vorteile bei redundant angezeigten taktilen Stimuli (zu visuellen und/oder auditiven Reizen) nachgewiesen. Auch Untersuchungen zu Erkennungsraten taktiler Muster werden für unterschiedliche Körperregionen beschrieben. Der Einsatz taktiler Anzeiger in Serienprodukten beschränkt sich indes bisher auf äußerst einfache Muster wie Lenkrad- oder Sitzvibration (links/rechts) als Spurverlassenswarnung. Generell lässt sich festhalten, dass gerade der Fahrzeugsitz, auch im Zuge des automatisierten Fahrens, in einigen Forschungsarbeiten zu taktilen Anzeigern aufgegriffen und dabei eine messbare Optimierung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion nachgewiesen wird.

Die generelle Notwendigkeit, die taktile Modalität in die MMI einzubeziehen, wird unter anderem von van Erp [VAN ERP 2006] betont. Er nennt den Einsatz von Vibrations-Feedback in Mobiltelefonen und Force-Feedback-Joysticks als bekannte Beispiele. Das Feld der haptischen und taktilen Interaktion beschreibt er 2006 als vergleichsweise junge Disziplin und merkt das Fehlen von Design Guidelines an. Gerade der Mangel an allgemeingültigen taktilen „Symbolen“, im Vergleich zur visuellen und auditiven Informationsdarbietung, zeigt den Bedarf für weitere Forschungstätigkeiten auf. [VAN ERP 2006]

Auch die Einschätzungen von Jones und Sarter [JONES & SARTER 2008] gehen in diese Richtung. In einem umfassenden Überblick zu taktilen Anzeigern wird der künftige Forschungsbedarf zu taktilen Feedback an sich sowie zur Kombination mit anderen Modalitäten in vier Kategorien herausgearbeitet, welche nachfolgend zusammenfassend wiedergegeben werden.

Die erste Kategorie betrifft die Auslegung taktiler Anzeiger in Bezug auf räumliche Dimensionen und die Anordnung der Taktoren in Abhängigkeit von der Körperregion sowie vom Informationsinhalt, der übertragen werden soll. Alleine die Größe der verwendeten Anordnungen bzw. Matrizen variiert zwischen den einzelnen Publikationen so offensichtlich, dass deren Auslegung häufig zufällig erscheint oder auf technische Limitierungen der verwendeten Hardware zurückzuführen ist. Hochauflösende Anzeiger

werden häufig im Bereich der Hände und Finger eingesetzt, wobei ein aktives Ertasten vorausgesetzt wird (vgl. Braille-Schrift). Aber auch im Torso-Bereich variiert die Anzahl der verwendeten Taktoren zwischen 8 und 128. Studien zeigen, dass nicht unbedingt die erhöhte Anzahl der Taktoren sondern vielmehr die Verwendung anatomischer Referenzpunkte zu einer verbesserten Lokalisierung der Reize führt. [JONES & SARTER 2008, S. 107]

Eine zweite Herausforderung betrifft die sinnvolle Auswahl der geeigneten Körperregion zur Anzeige der taktilen Reize innerhalb eines Nutzungskontextes. Die taktil sensiblen Regionen stehen dabei meist nicht zur Verfügung, da sie vom Nutzer entweder nicht akzeptiert werden (z. B. Lippen, Zunge) oder mit anderen Aufgaben interferieren (z. B. Finger). Es muss daher bei der Auslegung und Positionierung eines taktilen Anzeigers immer eine grundlegende Entscheidung zwischen Erkennbarkeit und Akzeptanz getroffen werden. Taktile Muster, die über große Bereiche wie den Rücken angezeigt werden, sind prinzipiell einfacher zu erkennen als ähnliche Muster, die auf einer kleineren Fläche wie dem Unterarm dargeboten werden. Für diese beiden Regionen können jedoch hohe Erkennungsraten erzielt werden, wenn die taktilen Muster sinnvoll gestaltet sind. [JONES & SARTER 2008, S. 108]

Die dritte Kategorie des von Jones und Sarter aufgedeckten Forschungsbedarfs betrifft die Entwicklung von taktilen Mustern bzw. Tactons für Navigation und Kommunikation in gefahrungsbezogenen Situationen. Hierbei gilt es herauszufinden, wie die grundlegenden Parameter der taktilen Informationsübertragung zu einzigartigen bzw. eindeutigen Mustern kombiniert werden können. Parameter wie z. B. die Schwingungsform scheinen in handgehaltenen Geräten sinnvoll variiert werden zu können. Bei Anzeigern, die an anderen Körperregionen eingesetzt werden, scheint die Anzahl der Muster, die an jeder Stelle zuverlässig erkannt werden können, vom Grad der Ähnlichkeit zwischen den verwendeten Mustern abzuhängen. [JONES & SARTER 2008, S. 108]

Die vierte Forschungsrichtung, die adressiert werden sollte, ist der Einfluss des Alters auf die taktile Wahrnehmung und dessen Auswirkungen auf die Gestaltung taktiler Anzeiger. Ein vermindertes räumliches Auflösungsvermögen bei älteren Personen ist für die meisten Körperregionen bereits nachgewiesen. Insbesondere unter Bedingungen mit vielen visuellen Informationen verpassen ältere Fahrer taktile Hinweisreize signifikant häufiger als jüngere. [JONES & SARTER 2008, S. 108]

Nach Einschätzung des Verfassers dieser Arbeit auf Basis der recherchierten Literatur hat sich der Forschungsbedarf im Bereich der Musterentwicklung für taktile Anzeiger in den letzten zehn Jahren nicht grundlegend verändert, was auch durch einige aktuelle Publikationen bestätigt wird. Unter anderem berichtet Othersen, dass die haptische Mo-

dalität im Kontext von Übernahmeaufforderungen, die taktil über den Fahrersitz angezeigt werden, durchaus noch umstritten ist. Eine Studie zeigt bspw., dass dadurch zwar schnelle Erstreaktionen des Fahrers ausgelöst werden. Jedoch ist dabei die Bedeutung der jeweiligen Muster nicht immer eindeutig, wodurch mitunter ausbleibende Reaktionen entstehen [PETERMANN-STOCK ET AL. 2015]. Ein Hauptvorteil der taktilen Informationsdarbietung wird auch hier insbesondere in der Kombination mit anderen Modalitäten gesehen, z. B. durch gezieltes Lenken der Aufmerksamkeit. [OTHERSEN 2016, S. 52]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Stand der Technik und Forschung sich stark auf den Nachweis von Vorteilen konzentriert, die in Form von kürzeren Antwortzeiten und besseren Erkennungsraten durch die Einbeziehung der taktilen Modalität bei der MMI erreicht werden können. Dabei sind die verwendeten taktilen Muster meist nicht Bestandteil einer empirischen Herleitung inkl. Nutzerevaluation, sondern werden anhand logischer Überlegungen (z. B. unter Einbeziehung der X-Kompatibilitäten) von den Autoren definiert und selten genauer begründet. Für die vorliegende Arbeit ergeben sich daraus zwei zentrale Aspekte, die bisher im Stand der Technik und Forschung nicht ausreichend adressiert werden. Zum einen ist es erforderlich, auf einer abstrakteren Ebene zu untersuchen, welche taktilen Muster vom Menschen generell wahrgenommen, erkannt und unterschieden werden können. Diese Betrachtung soll im Sinne einer taktilen Sprache die Basis an zur Verfügung stehenden Bausteinen liefern, die mit dem Wortschatz bzw. der Syntax in der verbalen Sprache verglichen werden kann. Der zweite Aspekt, der mit der vorliegenden Arbeit behandelt werden soll, ist die Verknüpfung dieser vibrotaktilen Muster mit konkreten Informationsinhalten. Durch die Verwendung zuverlässig erkennbarer Muster sowie einer Zusammenstellung relevanter Informationen innerhalb des Nutzungskontextes PKW-Cockpit soll empirisch untersucht werden, welche Verknüpfungen bzw. Muster-Informations-Kombinationen von den Teilnehmern der Studie als intuitiv bewertet werden. Auf diese Weise kann in Entsprechung zur verbalen Sprache die taktile Semantik behandelt werden.



## 4 Methodenentwicklung

Um den im vorherigen Kapitel herausgearbeiteten Forschungsbedarf zu adressieren, wird ein Vorgehensmodell entwickelt, das die methodische Basis für die Generierung einer taktilen Sprache im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion bildet. Dabei erfolgt zunächst eine Parametrisierung der taktilen Informationskodierung, im Anschluss wird darauf aufbauend ein systematisches Vorgehensmodell erarbeitet, welches die Basis für die nachfolgend durchgeführten experimentellen Versuchsreihen bildet, um dabei die Grenzen bzgl. Komplexität und Umfang bei der Wahrnehmung und Erkennung taktiler Muster zu identifizieren. Abschließend wird die eingesetzte Analyse- und Erfassungsmethodik beschrieben.

Als Orientierung für die Methodenentwicklung wird die „Tactile Language Design Methodology“ von Riddle und Chapman [RIDDLE & CHAPMAN 2012] herangezogen. Diese bezeichnen die Entwicklung einer taktilen Sprache (für sensorisch nicht eingeschränkte Personen) als noch immer vergleichsweise neues Forschungsfeld mit wenigen verfügbaren Gestaltungsempfehlungen. Sie verknüpfen in ihrer Methode den Prozess der taktilen Sprachentwicklung mit dem Produktentwicklungsprozess und definieren die vier Phasen Anforderungsanalyse (Informationsinhalte und Hardware Parameter), Gestaltungsvorgaben (auf Basis von Richtlinien und des Standes der Forschung), Umsetzung im definierten Anwendungsfall (Generierung intuitiver, taktiler Muster) und Evaluation mit Nutzern (hinsichtlich Erkennbarkeit und Erlernbarkeit). [RIDDLE & CHAPMAN 2012, S. 478]

### 4.1 Parametrisierung der taktilen Informationskodierung

Die Parametrisierung baut auf dem Basisschema der Mensch-Maschine-Interaktion (vgl. Kapitel 2.3.1) auf. Um alle relevanten Parameter für die taktile Informationskodierung zu beschreiben, werden zunächst die vier hierarchisch gegliederten Parameterkategorien Situation, Information, Muster und Stimulus definiert.

Die Situation ist dabei maßgeblich geprägt vom jeweiligen Nutzungskontext, welcher aus den Komponenten Benutzer, Ziele, Aufgaben, Umgebung und Ressourcen besteht [DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 22]. Dabei kann ferner zwischen verschiedenen Aufgabentypen (Überwachungs-, Entdeckungs- und Steuerungsaufgabe) sowie unterschiedlichen Ziel-Handlungen des Benutzers (Bewertung, Auswahl, Eingabe) differenziert werden [BUBB & BUBB 2013, Kapitel A-13.1.3, S. 1-8].

Innerhalb einer definierten Situation erfolgt der Informationsaustausch zwischen Mensch und Maschine. Eine Information kann „diskret“ (privat, nur vom Hauptnutzer wahrnehmbar) oder „öffentlich“ (auch für andere Personen wahrnehmbar) und mit variablem Informationsgehalt bzw. unterschiedlicher Komplexität übertragen werden. Die Intention, die der jeweiligen Information zugrunde liegt, kann informativen (Hinweis) oder auffordernden Charakter (Warnung) haben. Die taktile Darbietung einer Information kann redundant, ergänzend oder substitutiv (ersetzend) in Bezug auf die weiteren Wahrnehmungsmodalitäten (visuell, auditiv) eingesetzt werden [PETROV ET AL. 2011]. Davon unabhängig erfolgt in der vorliegenden Arbeit eine rein taktile Betrachtung. Die Kombination mit den weiteren Modalitäten wird auf Basis der Versuchsergebnisse im Ausblick thematisiert.

Die Informationsübertragung erfolgt im vorliegenden Fall durch taktile Muster. Diese können eine räumliche (Anzahl und Anordnung der Reize), zeitliche (Aktivierungsdauer, Intervall) und raumzeitliche (Kombination von Anordnung und Aktivierungsdauer) Ausprägung besitzen (vgl. Kapitel 3.2.2). Taktile Muster sollten der Erwartung der Nutzer entsprechen und bestehende Mentale Modelle sowie bekannte Metaphern aufgreifen, um möglichst intuitiv bzw. leicht erlernbar zu sein. Die taktilen Muster bestehen aus einzelnen taktilen Reizen bzw. Stimuli, die mithilfe von Aktuatoren an den Nutzer übermittelt werden. Dabei gilt es, die menschliche Physiologie in Bezug auf Wahrnehmungsschwellen und Komfortbereiche sowie spezifische haptische Wahrnehmungseffekte zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 2.1).

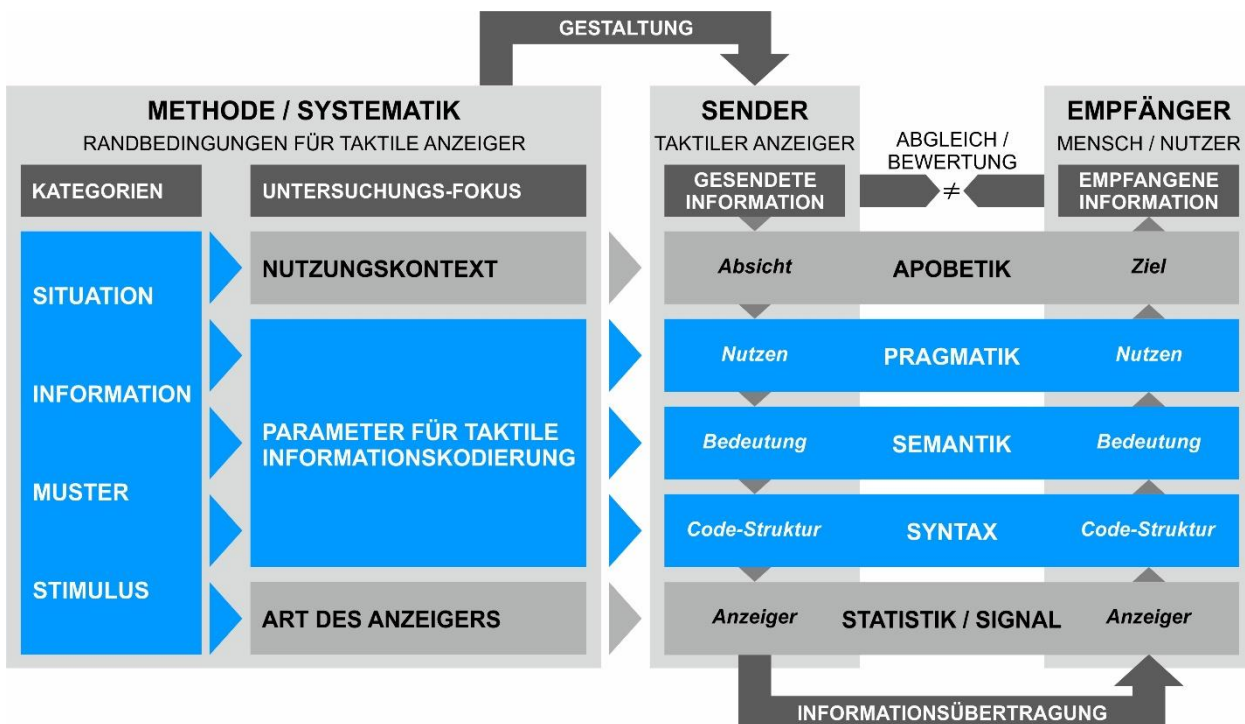
Der Zusammenhang der vier beschriebenen Parameter-Kategorien kann wie folgt zusammengefasst werden. Die Situation ist maßgeblich geprägt vom Nutzungskontext. Zwischen Mensch und Maschine werden Informationen ausgetauscht, was im Rahmen der vorliegenden Arbeit mithilfe von taktilen Mustern geschieht, die wiederum aus einzelnen Stimuli zusammengesetzt sind. Den Parameter-Kategorien werden jeweils konkrete taktile Parameter zugeordnet, durch deren Manipulation die Informationskodierung gestaltet und evaluiert werden kann (siehe Tabelle 4.1). Die Tabelle enthält zudem eine Zuordnung der identifizierten taktilen Gestaltungsparameter zu den fünf Ebenen des Informationsübertragungsmodells von Gitt (vgl. Kapitel 2.3.2) [GITT 2002]. Dabei werden alle Parameter, die den physischen Kontakt zwischen Prüfstand und Nutzer betreffen, der Statistik- bzw. Signal-Ebene zugeordnet. Hierbei erfolgt die physikalische Übermittlung von Reizen an den Menschen, der diese mithilfe seiner Rezeptoren aufnimmt. Die Kategorie Stimulus wird untergliedert in die Unter-Kategorien Prüfstand (am Beispiel Taktile Sitz-Matrix – TSM), Vibration (Frequenz, Amplitude) und Körperregion (am Beispiel TSM).



Die Syntax- und Semantikebene im Informationsübertragungsmodell werden durch die Kategorien Muster und Information adressiert. Auf der Muster-Ebene werden dabei einzelne Stimuli kombiniert, wobei die Unter-Kategorien Aufbau, Darbietungsart und -dauer, Orientierung/Richtung und Stimulus-Anzahl definiert werden. Innerhalb der Kategorie Information erfolgt eine Aufteilung in Informationsart und jeweils zu übertragende Information. Die Kategorie Situation betrifft sowohl die Pragmatik- als auch die Aporbetikebene im Informationsübertragungsmodell und teilt sich auf in die Unter-Kategorien Umgebung, Aufgabenart, Aufgabe, Handlung und Nutzen. Die jeweils zugeordneten einzelnen Gestaltungsparameter können ebenfalls Tabelle 4.1 entnommen werden.

### 4.2 Systematisches Vorgehensmodell

Auf Basis der vorangegangenen Parametrisierung der taktilen Informationskodierung und der in Tabelle 4.1 dargestellten Zuordnung der Gestaltungsparameter zu den fünf Ebenen des Informationsübertragungsmodells nach Gitt [GITT 2002] erfolgt die systematische Entwicklung eines Vorgehensmodells für die Versuchsplanung und -durchführung. Den Kern des Vorgehensmodells bildet die Übertragung von Informationen vom taktilen Anzeiger (Sender) zum Menschen bzw. Nutzer (Empfänger). In Anlehnung an Gitt [GITT 2002] durchläuft die Informationsübertragung dabei sowohl auf der Seite des Senders („top down“) als auch auf Empfängerseite („bottom up“) jeweils die in Abbildung 4.1 dargestellten fünf Schritte bzw. Ebenen.



**Abbildung 4.1:** Einfluss der taktilen Gestaltungsparameter auf die Ebenen des Informationsübertragungsmodells

Die Apobetik (Absicht des Senders / Ziel des Empfängers), die der Informationsübertragung als höchste Ebene zugrunde liegt, ergibt sich aus dem jeweiligen Nutzungskontext bzw. der durchzuführenden Aufgabe, um ein bestimmtes Ergebnis zu erreichen. Die Statistik-Ebene (auch Signal-Ebene) wird als unterste der fünf Ebenen durch die Wahl des Übertragungsmediums bzw. des taktilen Anzeigers definiert und betrifft die physikalische Übertragung eines Signals an den Menschen. In den mittleren drei Ebenen (Syntax-, Semantik- und Pragmatik-Ebene) erfolgt auf dieser Basis die Transformation von Informationsinhalten in einen zu verarbeitenden Code bzw. eine (taktile) Sprache, um dadurch Handlungen auszulösen, die zur Zielerreichung führen. Die empfangene Information des Menschen bzw. Nutzers kann mit der gesendeten Information des Anzeigers abgeglichen werden, um die Effektivität und Effizienz der Zielerreichung zu bewerten.

In der vorliegenden Arbeit wird als Nutzungskontext die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im PKW definiert sowie die TSM als Übertragungsmedium bzw. Prüfstand ausgewählt. Somit ergeben sich jeweils klare Randbedingungen für die Apobetik- und Signal-Ebene. Der Forschungsschwerpunkt wird auf die mittleren drei Ebenen gelegt, welche maßgeblich von den in Kapitel 4.1 beschriebenen taktilen Gestaltungsparametern der Kategorien Situation, Information und Muster geprägt werden (vgl. Abbildung 4.1). Das Ziel dabei ist es, eine taktile Sprache zu entwickeln, die durch zuverlässig erkennbare und unterscheidbare taktile Muster (Syntax-Ebene) für den Fahrer relevante Informationen (Semantik-Ebene) übermittelt, die effektiv und effizient zu den gewünschten Handlungen des Fahrers führen (Pragmatik-Ebene).

Die beschriebene Systematik zeigt die Notwendigkeit auf, die drei Ebenen Syntax, Semantik und Pragmatik genauer zu betrachten und die Einflüsse der dabei relevanten, taktilen Gestaltungsparameter zu untersuchen, um eine valide taktile Sprache zu entwickeln. Für jede der drei Ebenen wird daher eine Versuchsreihe entworfen. Die drei Versuchsreihen bauen aufeinander auf und besitzen die in Abbildung 4.2 beschriebenen Kernelemente. Es ist anzumerken, dass die Unterteilung der Versuchsreihen nach Syntax, Semantik und Pragmatik sich nach dem Schwerpunkt der jeweiligen Versuchsreihe richtet, während es teilweise inhaltliche Überschneidungen geben kann. Beispielsweise kann die Darbietungsart eines taktilen Reizes (statisch oder dynamisch) sowohl der Syntax (bessere Erkennung) als auch der Semantik (unterschiedliche Bedeutung) zugeordnet werden.

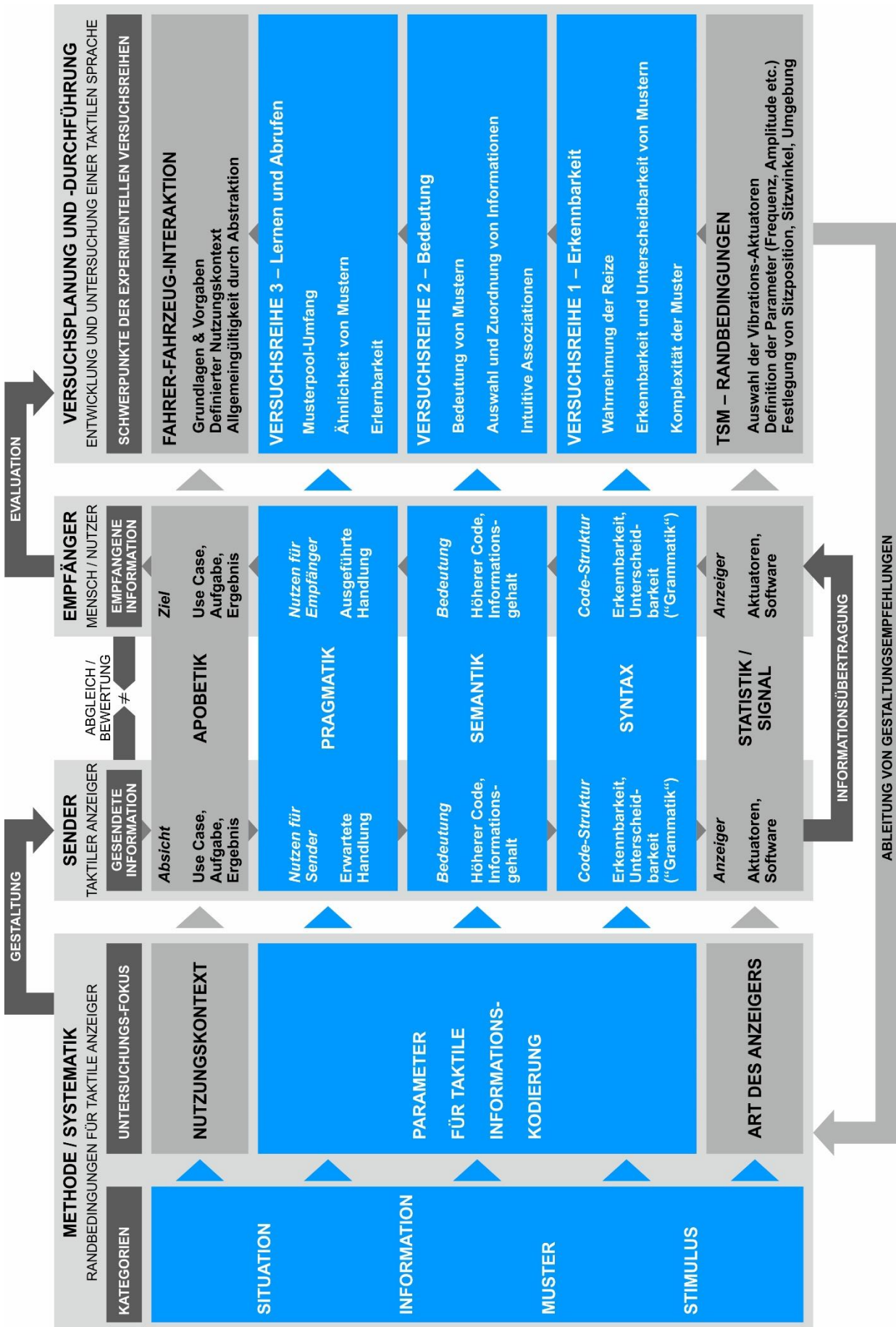


Abbildung 4.2: Systematisches Vorgehensmodell

Durch die Evaluation innerhalb der experimentellen Versuchsreihen wird die Gebrauchstauglichkeit und damit die Eignung der generierten vibrotaktilen Muster untersucht und bewertet. Dabei erfolgt die Operationalisierung der Gebrauchstauglichkeit (nach [PFEFFER 2016, S. 81]) zum einen über die Erfassung der Erkennungsrate (Anzahl richtiger Antworten im Verhältnis zu allen Antworten), wodurch die Effektivität bewertet werden kann. Zum anderen können über die ohne das Wissen des Probanden erfasste Antwortzeit bei der Eingabe Aussagen zur Effizienz der Muster abgeleitet werden. Durch eine ergänzende Befragung der Teilnehmer zum subjektiven Empfinden in Bezug auf Komfort und Leistungseinschätzung wird darüber hinaus mit der Zufriedenheit bei der Benutzung auch die dritte Dimension der Gebrauchstauglichkeit adressiert. Über die in den Versuchsreihen schrittweise generierte taktile Sprache können die Erkenntnisse in Form von Gestaltungsempfehlungen in die Entwicklung des taktilen Anzeigers rückgespiegelt werden. Das entwickelte Vorgehensmodell liegt der nachfolgenden Formulierung von Forschungsfragen (vgl. Kapitel 5.1) sowie der späteren Generierung der taktilen Reizmuster zugrunde (vgl. Kapitel 6.1.2).





## 5 Versuchsplanung und Vorstudien

Die Versuchsplanung umfasst die Formulierung von Forschungsfragen sowie die Beschreibung der Prüfstands-Entwicklung. Zudem wird ein Überblick über die auf dieser Basis durchgeführten Vorstudien gegeben. Des Weiteren werden die Entwicklung des Fragebogens sowie das generelle Versuchsdesign erläutert.

### 5.1 Forschungsfragen

Basierend auf dem in Kapitel 3.3 formulierten Forschungsbedarf sowie der in Kapitel 4 entwickelten Methode, werden die folgenden Forschungsfragen abgeleitet, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit geklärt werden sollen:

- Welche Komplexität dürfen vibrotaktile Muster aufweisen, um noch zuverlässig erkannt zu werden?
- Welchen Einfluss haben die identifizierten Parameter der taktilen Informationskodierung auf die Erkennungsrate der vibrotaktilen Muster?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Erkennung von vibrotaktilen Mustern und der dabei benötigten Antwortzeit?
- Existieren Bedeutungen bzw. Informationsinhalte, die intuitiv mit bestimmten vibrotaktilen Mustern verknüpft werden?
- Wie viele vibrotaktile Muster können innerhalb kurzer Zeit gelernt und erfolgreich wiedergegeben werden?
- Wie groß darf der Pool an zur Auswahl stehenden vibrotaktilen Mustern sein, um eine zuverlässige Erkennbarkeit zu erreichen?
- Welchen Einfluss hat die Ähnlichkeit vibrotaktiler Muster bei der Erkennung?

Die Formulierung und Überprüfung konkreter Hypothesen, die aus diesen Forschungsfragen abgeleitet werden, erfolgt jeweils innerhalb der drei Versuchsreihen in den Kapiteln 6, 7 und 8.

### 5.2 Entwicklung der Taktilen Sitz-Matrix (TSM)

Für die durchzuführenden Versuche wird ein variabler Prüfstand zur Anzeige von vibrotaktilen Mustern sowie zur Erfassung der Probandeneingaben entwickelt. Dieser Prüfstand wird als Taktile Sitz-Matrix (TSM) bezeichnet [SCHWALK ET AL. 2016]. Im Kontext der in Kapitel 4 beschriebenen Methode betrifft die Signalübertragung durch die TSM an den Probanden die taktile „Statistik“-Ebene in Anlehnung an das Informationsübertragungsmodell nach Gitt [GITT 2002, S.87-122]. Im Folgenden werden die Anforde-

rungen an die TSM sowie die technische Umsetzung der Hardware und Software beschrieben.

### 5.2.1 Anforderungen

Die allgemeinen Anforderungen an ein variables taktiles Anzeigesystem im Fahrzeug werden in einer vom Verfasser betreuten Studienarbeit ausführlich beschrieben [MINCH 2013]. In diesem Zuge wird durch eine systematische Konzeptgenerierung und -bewertung der Sitz als sinnvollste Realisierung eines taktilen Anzeigers im Fahrzeug identifiziert. In einer darauf aufbauenden, ebenfalls vom Verfasser der vorliegenden Arbeit betreuten Masterarbeit erfolgt eine Spezifizierung und Verfeinerung der Anforderungen für die Umsetzung als Taktile Sitz-Matrix [KALOGERAKIS 2014]. Nachfolgend werden die wichtigsten Anforderungen zusammengefasst, die der Entwicklung der TSM zugrunde liegen. Das Kernstück des Prüfstands bildet eine Sitzauflage mit integrierten Vibrationsmotoren, welche die folgenden Vorgaben erfüllen muss:

- Der Sitzkomfort darf nicht maßgeblich beeinträchtigt werden.
- Die übliche Sitzposition im Fahrzeug darf nicht eingeschränkt werden.
- Alle relevanten Nutzergruppen (5-Perzentil-Frau bis 95-Perzentil-Mann) müssen ständigen Kontakt zu allen Motoren haben unter Berücksichtigung der Körperhöhe, Schulterhöhe und -breite im Sitzen sowie der von den Oberschenkeln bestimmten Sitzfläche.
- Möglichst große Fläche und hohe räumliche Auflösung der Motoren.
- Diskrete, private Informationsdarbietung (möglichst leise).
- Robuste Vibrationsmotoren mit geringem Bauraum als Aktuatoren.
- Ausreichende Vibrationsamplitude und variable Vibrationsfrequenz.
- Individuell anpassbare Fußaufstellfläche für unterschiedlich große Probanden.
- Einsetzbarkeit bzw. Integrationsmöglichkeit in verschiedenen Fahrzeugklassen bzw. -sitzen.

Für die Interaktion des Probanden mit dem Prüfstand bzw. für die Prüfstands-Software werden folgende Anforderungen definiert:

- Anzeige von Anweisungen und Piktogrammen im Sichtbereich des Probanden.
- Eingabe- bzw. Auswahlmöglichkeit von vorgeschlagenen Antworten im Greifbereich des Probanden ohne Schulterablösung vom Sitz.
- Keine Spiegelungen oder Reflexionen auf der visuellen Anzeige.
- Variables Software-Programm mit Anpassbarkeit an die jeweilige Versuchsreihe.
- Aufzeichnung der Probandeneingabe mit Erfassung der Eingabefehler (Abgleich der IST- und SOLL-Eingabe) und Antwortzeit.

- Robuste Programmierung inkl. notwendiger Randomisierungen und Variationsmöglichkeit der Reihenfolge von Teilversuchen.

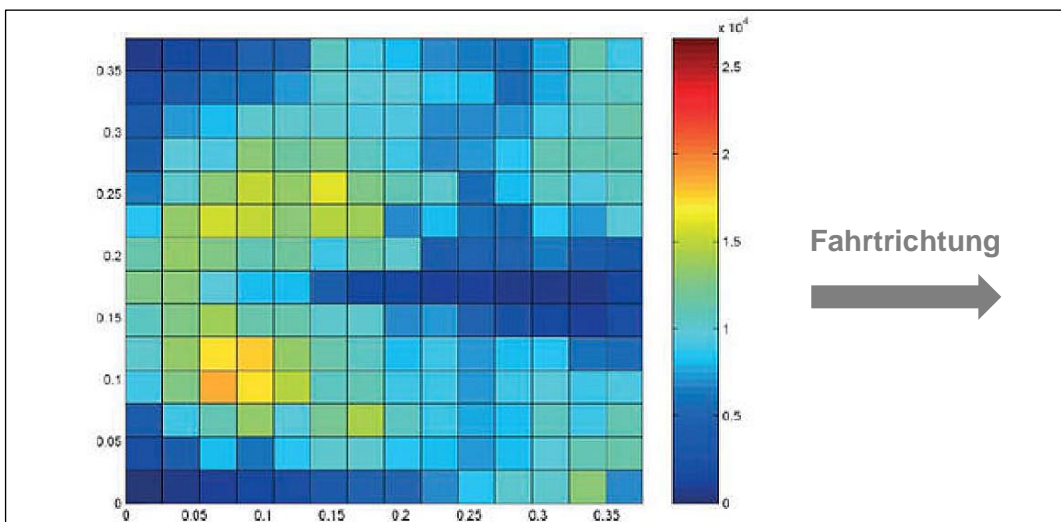
### 5.2.2 Hardware und Motorenanordnung

Die Auslegung sowie der Aufbau der Prüfstands-Hardware erfolgt maßgeblich im Rahmen der vom Verfasser der vorliegenden Arbeit betreuten Masterarbeit von Kalogerakis. Dabei erfolgt unter Berücksichtigung der beschriebenen Anforderungen die Auswahl und Integration der Motoren in eine Sitzauflage sowie die Auslegung und Realisierung der Schaltung, um die Motoren einzeln ansteuern zu können. Eine ausführliche Beschreibung kann [KALOGERAKIS 2014] entnommen werden. Im Ergebnis besitzt die TSM nach weiteren iterativen Anpassungen auf Basis von Vorversuchen folgende Eigenschaften:

- Realisierung als zweiteilige Schaumstoff-Sitzauflage (Rückenlehne und Sitzfläche) zur Aufnahme der Motoren sowie Gewährleistung des Sitzkomforts mit dauerhaftem Schaumstoff (Stärke: 30 mm, Raumgewicht: 50 kg/km).
- Stoffbezug zum Schutz der Motoren (Reduzierung der Reibung beim Sitzen) und für die ästhetische Anmutung des Prüfstands.
- Anbringung der TSM auf verschiedenen Fahrzeugsitzen möglich.
- Für die durchzuführenden Versuche wird eine Implementierung auf einem separat stehenden Fahrzeugsitz gewählt.
- Umsetzung einer leicht ausgeprägten Lordosenstütze durch doppelte Schaumstoffschicht im Bereich des unteren Rückens zur Sicherstellung des ständigen Kontakts des Probanden mit der TSM sowie für komfortables Sitzen.
- Radial schwingende Vibrations-Motoren vom Typ PicoVibe 310-113 (Ø10 mm / Höhe 3,4 mm) der Firma Precision Microdrives, vgl. [PRECISION MICRODRIVES 2014] sowie Anhang A1.
- Ansteuerung der Vibrationsaktuatoren mit einer Vibrationsfrequenz von 140 Hz bei einer Amplitude von 0,8 G (durch das Anlegen einer Spannung von 1,6 V).
- Sitzfläche: 16 Motoren (4x4-Matrix).
- Rückenlehne: 25 Motoren (5x5-Matrix).
- Nutzergruppen: 5%-Frau bis 95%-Mann nach [DIN 33402-2 2005].
- Mindestabstand zwischen den Motoren: 60 mm (vgl. Zweipunktdiskrimination in Kapitel 2.1.2) bei maximaler Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Fläche.
- Definierte Position der TSM auf dem Fahrzeugsitz (Höhe und Tiefe).
- Einstellbare Fußauflage für komfortables Sitzen aller Probanden durch Holz-Unterlagen mit Dicke 24 mm.

- Definierter Winkel von 25° für die Rückenlehne nach [BUBB & GRÜNEN 2015, S. 375]

Neben der Zweipunktdiskrimination spielt bei der Positionierung der Vibrationsmotoren zudem die Sitzposition des Fahrers eine Rolle. Diese kann sich während der Fahrt in gewissem Maße verändern, indem es zur zeitweisen Schulterablösung beim Tätigen von Eingaben oder zum Anheben der Beine bei der Geschwindigkeitsregelung über die Pedale kommt. Dies wird u. a. bestätigt durch die in Abbildung 5.1 dargestellte Druckverteilung eines Mannes auf der Sitzfläche [ROSENGREN & WENNERHOLM 2008]. Durch eine möglichst hohe Anzahl an Motoren sowie die Anordnung in den richtigen Bereichen wird dem entgegengewirkt. Ein beständiger und dauerhafter Kontakt zwischen Fahrer und Sitz wird auf dieser Basis v. a. in den Bereichen des unteren Rückens sowie der hinteren Sitzfläche erwartet. Auch [FITCH 2008] bestätigt, dass generell weniger Erkennungsfehler auftreten, wenn Aktuatoren im hinteren Bereich der Sitzfläche positioniert werden.



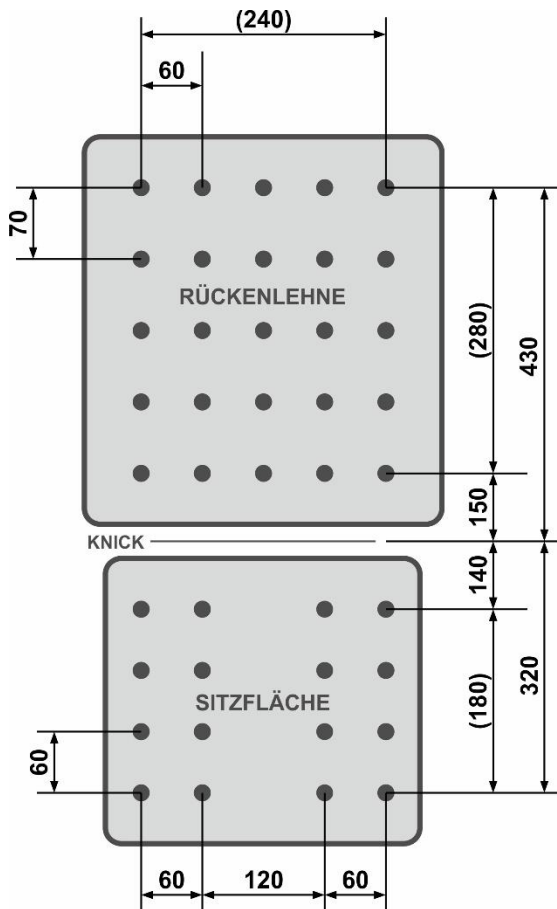
**Abbildung 5.1:** Druckverteilung [Pa] eines Mannes auf der Sitzfläche  
[ROSENGREN & WENNERHOLM 2008, S. 20]

In Bezug auf die anthropometrischen Randbedingungen gelten auf Basis von [DIN 33402-2 2005] folgende Grenzen für die Auslegung der TSM, welche auf der 5-Perzentil-Frau als „kleinster FahrerIn“ beruhen:

- Rückenlehne: Maximale Breite 345 mm (Schulterbreite, biakrominal),
- Rückenlehne: Maximale Höhe 540 mm (Schulterhöhe, sitzend),
- Sitzfläche: maximale Sitztiefe 435 mm (Gesäß-Kniekehlen-Länge, sitzend).

Da für die Wahrnehmbarkeit der Vibrationsmotoren die Kontaktfläche zwischen Fahrer und Sitz ausschlaggebend ist und sowohl im Bereich der Schultern als auch seitlich am Rücken bereits anatomisch bedingte „Ablösungen“ festzustellen sind, werden die be-

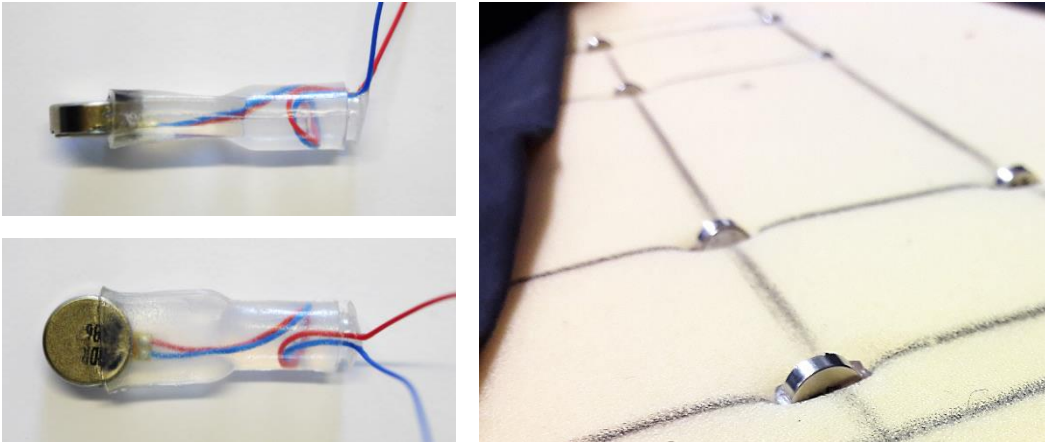
schriebenen Grenzen bei der Auslegung der TSM nicht komplett ausgereizt. Stattdessen wird ein Sicherheitsbereich eingeführt, wodurch die maximalen Abmessungen der TSM bzw. maximalen Motorabstände auf ca. 80 % der oben beschriebenen Maße festgelegt werden. Zudem wird der mittlere Bereich der Sitzfläche auf Basis der beschriebenen, anatomisch bedingten Druckverteilung nicht direkt mit Motoren bestückt. In Kombination mit dem auf Basis der statischen Zweipunktdiskrimination definierten Mindestabstand von 60 mm zwischen den einzelnen Motoren ergibt sich das in Abbildung 5.2 dargestellte Raster.



**Abbildung 5.2:** Schematischer Aufbau der TSM (Maße in mm) und Realisierung (Sitzauflage / Elektronik)

Um die Motoren für die Durchführung der Versuche möglichst robust zu gestalten, werden diese mithilfe eines Schmelzklebstoffs in flexible Kunststoffhülsen eingeklebt. Dies schützt und isoliert zum einen die filigranen Kontakte am Motor. Gleichzeitig erfolgt dadurch ein Schutz der Kabel vor Biegung bzw. Knickung, da die Kabel im 90°-Winkel aus der Hülse geführt werden und somit auf der Rückseite des Schaumstoffs direkt parallel zur Sitzfläche bzw. Rückenlehne verlaufen und nicht abgelenkt werden können. Zudem wird durch ein Fixieren (Verkleben) der Motorhülsen im Schaumstoff der Sitzauflage sichergestellt, dass alle Motoren im unbelasteten Zustand die gleiche Einbautiefe

aufweisen. Diese wird auf Basis von Vorversuchen so ermittelt, dass die Motoren jeweils zur Hälfte (halber Durchmesser) aus dem Schaumstoff herausragen. Abbildung 5.3 zeigt die Isolierung und den Schutz der Motoren sowie die Einbauposition in der Sitzauflage.

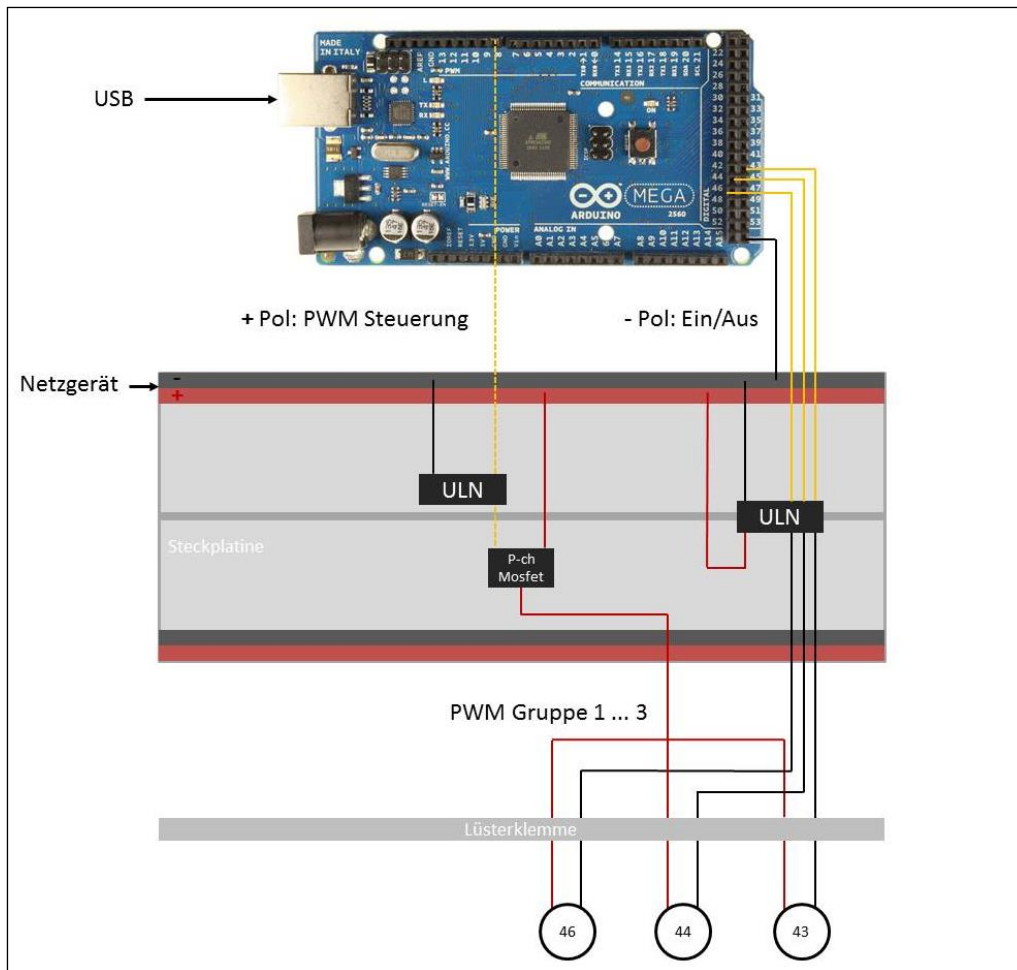


**Abbildung 5.3:** Isolierung und Schutz der Vibrationsmotoren (links) sowie Einbauposition im Schaumstoff (rechts)

Diese Position ist der bestmögliche Kompromiss aus Komfort und Wahrnehmbarkeit. Während eine Person auf der TSM sitzt, werden die Motoren im nicht aktivierten Zustand so kaum wahrgenommen, da sie sich je nach Probandengewicht und Druckverteilung entsprechend in den Schaumstoff eindrücken. Gleichzeitig wird die Wahrnehmbarkeit bei Aktivierung sichergestellt, da durch den flexiblen Schaumstoff jeder Motor bereits direkten Kontakt zu der Person hat.

### 5.2.3 Ansteuerung und Kalibrierung

Die TSM wird über ein Mikrocontroller-Board vom Typ Arduino Mega 2560 angesteuert, von dessen 54 Outputs 15 als PWM Outputs (= Pulsweitenmodulation) verwendet werden können. Über dieses PWM-Signal kann die gewünschte Frequenz der Vibrationsmotoren direkt über den Mikrocontroller eingestellt werden [ARDUINO 2014]. Das Board liefert einen maximalen Ausgabestrom von 0,5 A. Da die von den verwendeten 41 Vibrationsmotoren benötigte Gesamtstromstärke bei 2,26 A (optimaler Betriebspunkt) bzw. 2,99 A („Overdrive“ Betrieb) liegt, wird eine zusätzliche Versorgungsschaltung mit einem externen Netzgerät benötigt (vgl. Abbildung 5.4) [ARDUINO 2014]. [KALOGERAKIS 2014]



**Abbildung 5.4:** Bauschema der TSM-Schaltung [KALOGERAKIS 2014, S. 79]

Das Ein- und Ausschalten der Motoren erfolgt grundsätzlich über den negativen Pol (sog. „Low-Side“-Schaltung). Für die Ansteuerung der Vibrationsmatrix werden Integrierte Schaltkreise (ICs) vom Typ ULN2803A verwendet, welche jeweils acht sog. Darlington Arrays enthalten. Dabei schützt die spezielle Anordnung aus einer Freilaufdiode und Widerständen (2,7 k $\Omega$  Eingangs-Widerstand bei 5 V Eingangsspannung) den Mikrocontroller. Da die ICs bei 30 V Eingangsspannung insgesamt eine maximale Stromstärke von 500 mA ausgeben, können maximal sechs Motoren an einen IC angeschlossen werden, um jeweils 83 mA pro Verbraucher zu gewährleisten und damit das volle Leistungsspektrum der Motoren ausnutzen zu können [CONRAD 2014]. Die Regelung der Ausgangsspannung (positiver Pol) wird in getrennt steuerbare PWM-Gruppen für Rückenlehne und Sitzfläche aufgeteilt. Dabei werden die positiven Pole der Motoren entsprechend gruppenweise zusammengefasst. Die dritte Gruppe (Seitenwangen) wird hier außen vor gelassen, da diese Motoren im Versuch nicht zum Einsatz kommen. Für jede PWM-Gruppe kann somit durch Pulsweitenmodulation die jeweilige Schwingungsfrequenz festgelegt werden, was zu einer Variabilität des Prüfstands für unterschiedliche Studien führt. [KALOGERAKIS 2014, S. 80]

Bei der Verkabelung wird an jedem Pin, zusätzlich zu den Motoren, eine 5 mm LED zur Fehlerindikation installiert. Um Verluste durch die unterschiedlichen Komponenten auszugleichen, wird insgesamt eine höhere Stromstärke als die oben beschriebene benötigt. Hierfür wird ein Labornetzgerät der Firma BASETech mit einem Spannungsbereich von 0-30 V und einer maximalen Stromstärke von 5 A eingesetzt. Die empfohlene Eingangsspannung für die TSM liegt bei dieser Konfiguration zwischen 5 und 5,5 V. Eine detailliertere Beschreibung der TSM-Schaltung kann der vom Verfasser betreuten und zitierten Masterarbeit entnommen werden. [KALOGERAKIS 2014, S. 78-81]

Um die für den Versuch definierte Frequenz von 140 Hz (vgl. Kapitel 3.2.1) für jeden einzelnen Motor innerhalb jedes Musters sicherzustellen, auch wenn mehrere Motoren gleichzeitig aktiv sind, erfolgt eine Kalibrierung der TSM mithilfe eines Schwingungsmessgerätes. Für die Kalibrierung wird ein Motor der Sitzfläche in seiner Einbauposition mit dem Sensor des Schwingungsmessgerätes fix verbunden und eine Person auf dem Prüfstand platziert, um die reale Situation während des Versuchs zu simulieren. Der Motor wird aktiviert und über die Spannung (bzw. das PWM-Signal) die benötigten 140 Hz eingestellt. Im Anschluss wird jeweils ein weiterer Motor dazu geschaltet und das PWM-Signal im Software-Programm (LabVIEW) jeweils mit einem Korrekturfaktor so angepasst, dass die Frequenz für jede Anzahl an Motoren immer bei 140 Hz liegt. Der Vorgang wird für alle 16 Motoren der kompletten Sitzfläche fortgesetzt und die Korrekturfaktoren im Programm hinterlegt (bei mehr Motoren erfolgt eine Interpolation). Durch diese Kalibrierung und das im Programm hinterlegte angepasste PWM-Signal kann die tatsächliche Frequenz von 140 Hz der verwendeten Motoren mit einer geringen Toleranz von  $\pm 5$  Hz sichergestellt werden. Diese minimalen Abweichungen sind vom Nutzer nicht wahrnehmbar (bestätigt durch Vorversuche) und haben somit keinen Einfluss auf den Versuch. Die Messungen ergeben zudem, dass die Motoren im gewählten Setup die definierten 140 Hz innerhalb von 50 ms nach Aktivierung erreichen und auch innerhalb einer vergleichbaren Zeitspanne nach Deaktivierung wieder zum Stehen kommen. Dies ist bei der Reizmustererzeugung zu berücksichtigen, indem ausschließlich Aktivierungs- und Intervalldauern oberhalb von 50 ms verwendet werden.

#### **5.2.4 Touchscreen und Software**

Sowohl die Anzeige von Informationen für den Probanden, als auch dessen Eingaben während des Versuchs müssen im zentralen Sicht- bzw. Greifbereich liegen, um eine Interaktion ohne Veränderung der Sitzposition zu ermöglichen. Aus diesem Grund wird ein Touchscreen gewählt, der beide Funktionen in sich vereint.

Für die Programmierung der Prüfstands-Software wird LabVIEW gewählt. Das Programm steuert die Motoren über den Arduino Mikrocontroller an, führt durch den Ver-



such, beinhaltet alle notwendigen Hinweise für den Probanden und erfasst dessen Eingaben. Dabei greift das Programm für die Wiedergabe der vibrotaktilen Muster auf hinterlegte CSV-Dateien in einem definierten Ordner zu, die automatisch eingelesen werden. In diesen CSV-Dateien können in Form von Matrizen mit den Ziffern 1 (Motor aktiv) und 0 (Motor inaktiv) beliebige Muster hinterlegt werden, die mithilfe eines separaten Mustergenerierungs-Programms erzeugt werden. Die CSV-Dateien enthalten zudem die exakte Muster-Bezeichnung und die korrekte SOLL-Eingabe. Unterschieden wird bzgl. der Musterart zwischen kontinuierlichen, gepulsten und dynamischen Mustern (vgl. Kapitel 6.1.2). Bei kontinuierlichen Mustern wird zudem die Anzeigedauer (in ms) hinterlegt, bei gepulsten Mustern werden Anzeige- und Intervalldauer sowie Anzahl der Pulse definiert. Die CSV-Dateien dynamischer Muster enthalten Angaben zu allen Schritten, die nacheinander bzw. überlappend aktiviert werden sowie zu deren jeweiliger Aktivierungsdauer und Anzahl an Durchläufen des gesamten Musters. Das Programm wird für jede der drei Versuchsreihen entsprechend angepasst. Die Probandeneingaben (IST-Eingaben) über den Touchscreen werden erfasst und mit den hinterlegten SOLL-Eingaben verglichen, um Eingabefehler zu ermitteln. Zudem wird die Antwortzeit von Beginn der Musterdarbietung bis zur Eingabe gemessen und gespeichert. Die erfassten Werte werden für jeden Probanden in einer CSV-Datei ausgegeben, die im Anschluss für die statistische Auswertung herangezogen werden kann.

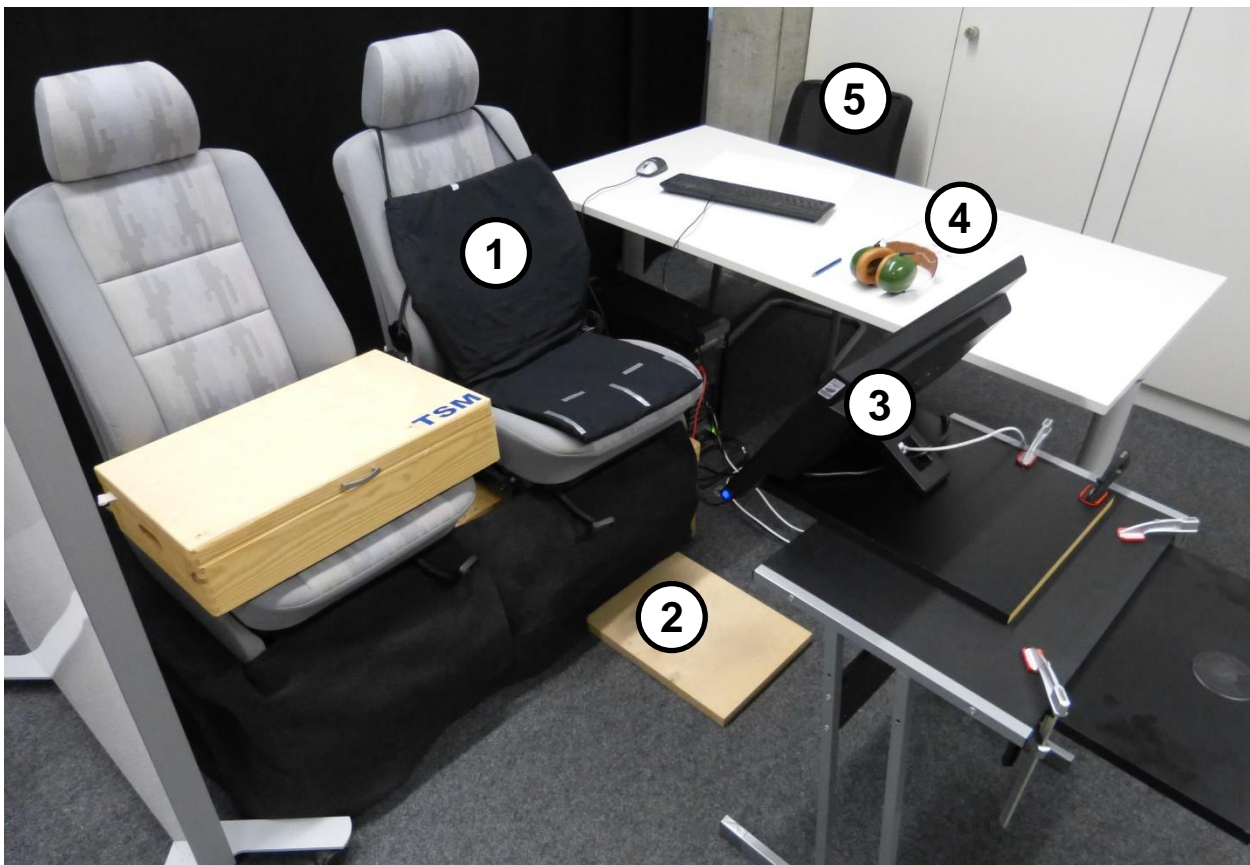
Um die Programmierung und insbesondere die implementierte Randomisierung bei jeder Versuchsreihe zu überprüfen, wird das finale Programm jeweils zunächst ohne Zufallsgenerator komplett durchgespielt und alle Musteranzeigen sowie Eingaben manuell dokumentiert und mit dem generierten CSV-Protokoll abgeglichen. Anschließend erfolgt die Überprüfung mit aktiviertem Zufallsgenerator, um somit eine korrekte Funktionsweise des Programms zu garantieren.

Für die Versuchsdurchführung wird aus der LabVIEW-Datei jeweils eine ausführbare .exe-Datei erzeugt, die unabhängig von LabVIEW und einem Netzwerkzugang (für die Lizenz) stabil auf dem Versuchsrechner läuft.

Das Probanden-Interface wird bewusst reduziert gehalten, um keine unnötige Ablenkung während des Versuchs zu erzeugen. Aus diesem Grund wird ein schwarzer Hintergrund gewählt und die Eingabe ausschließlich über Piktogramm-Buttons durchgeführt, die einen hohen Kontrast zum dunklen Hintergrund aufweisen. Zu Beginn jedes Teilversuchs erfolgt zusätzlich zur verbalen Erklärung des Versuchsleiters jeweils eine kurze textuelle Beschreibung der vorkommenden Musterarten und Eingabemöglichkeiten. Eine detaillierte Beschreibung der Probanden-Eingabefelder findet sich in den Kapiteln der jeweiligen Versuchsreihen.

### 5.2.5 Gesamtaufbau und Versuchsumgebung

Nach der Beschreibung der einzelnen Prüfstands-Komponenten wird nachfolgend der Aufbau des ganzheitlichen Prüfstands inkl. Versuchsumgebung beschrieben. Der verwendete Fahrzeugsitz kann aufgrund seiner Maße und Proportionen als Standard-Sitz angesehen werden. Die TSM wird mithilfe von leicht elastischen Bändern auf dem Fahrersitz fixiert und in Position gehalten. Auf dem Sitz neben dem Fahrer- bzw. Probandensitz wird die Elektronik der TSM positioniert. Der Touchscreen zur Wiedergabe wichtiger Informationen während des Versuchs sowie für die Probandeneingabe wird auf einem Rahmen installiert, der für jeden Probanden individuell in Position und Neigungswinkel eingestellt werden kann. Zudem erfolgt die Anpassung der Fußaufstellfläche je nach Größe bzw. Beinlänge der Probanden, um für jeden Teilnehmer eine angenehme Sitzposition sowie eine vergleichbare Druckverteilung auf der TSM zu erreichen. Hinter dem Probanden wird ein schwarzer Vorhang aufgehängt, um jegliche Reflexionen auf dem Touchscreen zu vermeiden. Der Versuchsleiter sitzt um 90° versetzt zum Probanden, um sowohl direkt mit dem Probanden kommunizieren, als auch den Touchscreen einsehen zu können. Abbildung 5.5 zeigt den Versuchsaufbau mit TSM (1), Fußaufstellfläche (2), Touchscreen (3), Gehörschutz (4) und Versuchsleiterarbeitsplatz (5).



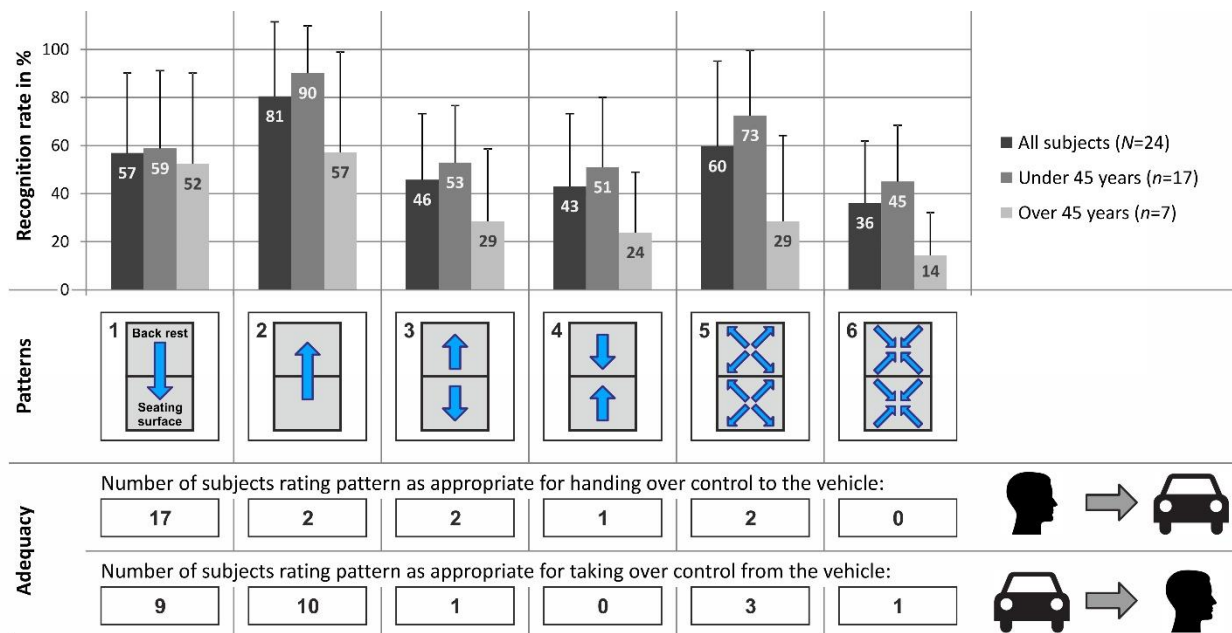
**Abbildung 5.5:** Versuchsaufbau mit TSM und Zubehör

Zusätzlich zum beschriebenen Aufbau werden Stationen für die Erfassung von Zweipunktdiskrimination und Vibrationsempfinden, das Vermessen von Körpermaßen sowie für den Befragungsteil aufgebaut.

### 5.3 Experimentelle Vorstudien

Um die nahezu unbegrenzten Möglichkeiten bei der Generierung von vibrotaktilen Mustern für die durchzuführenden Versuchsreihen systematisch und sinnvoll einzugrenzen, wurden neben dem beschriebenen Stand der Technik und Forschung diverse Vorstudien im Rahmen der mehrjährigen Forschungsarbeit des Verfassers der vorliegenden Arbeit durchgeführt. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick der relevanten Ergebnisse dieser Vorstudien mit der TSM gegeben.

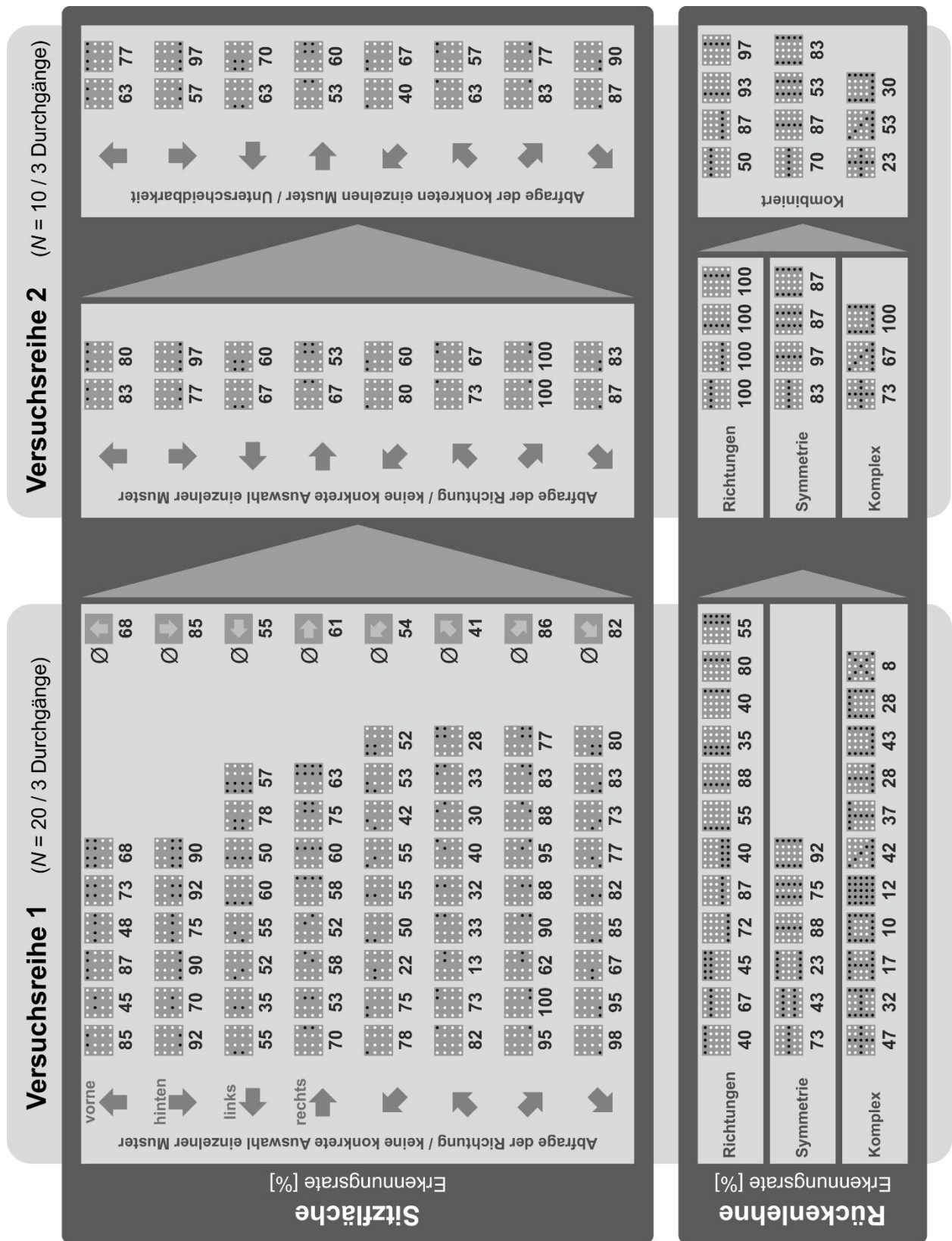
In [SCHWALK ET AL. 2015B] werden Untersuchungen zur Erkennbarkeit und Eignung sowie zur mentalen Belastung vibrotaktile Muster im Kontext von Kontrollübergabe- und Kontrollübernahmesituationen beim automatisierten Fahren durchgeführt. Dabei werden im ersten Schritt Basismuster erarbeitet und unterschiedliche Darbietungsarten bzw. Verlaufsrichtungen verglichen. Im zweiten Schritt erfolgt ein Vergleich von sechs Mustern innerhalb einer simulierten hochautomatisierten Fahrt in kumulativer Anzeige (9 Schritte mit je 250 ms bei 140 Hz, die nacheinander zugeschaltet werden) in Bezug auf die Erkennungsrate und Eignung zur Anzeige einer Übernahmeaufforderung bzw. eines Kontrollübergabeangebots (vgl. Abbildung 5.6). Die Studie bestätigt außerdem eine geringe mentale Belastung (NASA-TLX Workload) der Probanden während des Versuchs von ca. 20 %. [SCHWALK ET AL. 2015B]



**Abbildung 5.6:** Erkennungsrate und Eignung verschiedener vibrotaktile Muster [SCHWALK ET AL. 2015B]

Eine weitere Studie in [SCHWALK ET AL. 2016] zielt darauf ab, die grundlegende Eignung möglichst vieler Muster zu überprüfen, um eine Basis für die weitere Auswahl zu schaffen. Die Aktivierung der Muster erfolgt dabei jeweils mit einer Frequenz von 140 Hz über drei Impulse mit je 500 ms Aktivierungsdauer sowie Zwischenintervallen von 250 ms. Dabei können diverse Tendenzen identifiziert werden. Generell scheinen Muster im hinteren Bereich der Sitzfläche besser erkennbar zu sein, als im vorderen Bereich, was sich mit der Druckverteilung auf dem Sitz nach [FITCH ET AL. 2007] und [ROSENGREN & WENNERHOLM 2008, S. 20] deckt. An der Rückenlehne werden höhere Erkennungsraten im unteren Bereich beobachtet, was ebenfalls mit der Druckverteilung übereinstimmt. Des Weiteren weisen vertikal orientierte Muster höhere Erkennungsraten auf, als horizontal orientierte. Vorteile entstehen generell bei weniger gleichzeitig aktivierten Motoren. Je weiter diese voneinander entfernt sind, umso höher steigen die Erkennungsraten. Die Erkennbarkeit und Unterscheidbarkeit der Muster hängt außerdem vom jeweiligen Muster-Pool ab. Eine Übersicht der Ergebnisse der beschriebenen Studie findet sich in Abbildung 5.7. Die hellgrau hinterlegten Flächen symbolisieren dabei jeweils einen Musterpool. [SCHWALK ET AL. 2016]

Innerhalb einer in [SCHWALK ET AL. 2017] beschriebenen Studie werden ferner Erkennungsraten und Antwortzeiten statischer (Aktivierungsdauer 3 s) und dynamischer (reihenweise Aktivierung, stets 1-3 gleichzeitig aktivierte Reihen) vibrotaktile Muster (bei 170 Hz) in Sitzfläche und Rückenlehne untersucht. Über diese Muster werden Geschwindigkeitsinformationen im Cockpit eines stehenden Motorseglers (Piloten-Gruppe) bzw. auf einem separaten Sitz im Labor (Nicht-Piloten-Gruppe) übermittelt, welche vom Probanden jeweils der Handlung „Geschwindigkeit erhöhen“ oder „Geschwindigkeit reduzieren“ zugeordnet werden sollen. Obwohl es sich dabei nicht um den Einsatz in einem Fahrzeug-Cockpit handelt, können einige allgemeine Tendenzen übertragen werden. Muster mit dynamischem Verlauf schneiden demnach bei der Übermittlung von Geschwindigkeitsinformationen generell besser ab als statische Muster, was aus Sicht der Bedeutungskompatibilität einleuchtet. Zudem werden schneller durchlaufende dynamische Muster (100 ms pro aktivierter Reihe) zuverlässiger und schneller erkannt, als langsamer durchlaufende (250 ms pro aktivierter Reihe). Die Sitzfläche scheint sich im Vergleich zur Rückenlehne generell besser für die Anzeige von Geschwindigkeitsinformationen zu eignen. Die Rückenlehne, die zudem über eine höhere räumliche Auflösung an Motoren verfügt, kann somit beispielsweise für Warninformationen und komplexere semantische Inhalte verwendet werden, wie u. a. auch von [FITCH 2008] empfohlen. [SCHWALK ET AL. 2017]



**Abbildung 5.7:** Übersicht aller Muster und Erkennungsdaten aus [SCHWALK ET AL. 2016]

Die Erkenntnisse der Vorstudien fließen direkt in die Entwicklung der Reizmuster für Versuchssreihe 1 ein (vgl. Kapitel 6.1.2).

## 5.4 Fragebogenentwicklung

Für die Dokumentation der demografischen Daten und taktilen Wahrnehmungsleistung sowie zur Abfrage von PKW-Fahr-Erfahrung, Komfortempfinden, Leistungseinschätzung und zum Aufbau der TSM, wird ein Fragebogen entwickelt, welcher in Interviewform vom Versuchsleiter gemeinsam mit dem Probanden ausgefüllt wird. Der Proband wird bei Fragen zum Ankreuzen darauf hingewiesen, dass dabei von äquidistanten Abständen zwischen den Antwortkästchen auszugehen ist, um die Vergleichbarkeit bei der statistischen Auswertung sicherzustellen. Es wird eine siebenstufige Skala verwendet.

Der Fragebogen ist in folgende sechs Abschnitte aufgeteilt und kann in vollständiger Form Anhang A2 entnommen werden. Für die drei Versuchsreihen werden jeweils angepasste Versionen des Fragebogenabschnitts 4 verwendet, was in der folgenden Auflistung sowie im angehängten Fragebogen entsprechend gekennzeichnet ist:

### 1) Demografische Daten:

- Geschlecht, Händigkeit, Alter, Körpergewicht,
- Körperhöhe (mit und ohne Schuhe), Schulterhöhe (stehend, sitzend), Höhe der Rückenkontaktfläche,
- Höhe der Fußaufstellfläche,
- Kleidung (Hose, Oberteil) beim Versuch.

### 2) Taktile Wahrnehmungsleistung:

- Zweipunktdiskrimination (am rechten Unterarm),
- Vibrationsempfinden (am rechten Ellbogengelenk).

### 3) Erfahrung beim Führen eines PKW:

- Fahrerfahrung in Jahren,
- Kilometerfahrleistung innerhalb der letzten zwölf Monate,
- Anteil akustischer Reize (Musik, Unterhaltungen, Telefonate) beim Fahren (in Prozent).

### 4) Komfortempfinden und Leistungseinschätzung:

- Irritierender oder unterstützender Charakter der Vibrationsmuster,
- Einschätzung der Vibrations-Intensität bzgl. Komfortempfinden,
- Vergleich der Sitzbereiche (Rückenlehne und Sitzfläche) in Bezug auf Komfort und subjektiv bewertete Erkennbarkeit der Muster,
- Einschätzung, wie viele verschiedene vibrotaktile Muster maximal verwendet werden können, ohne dass es zu Verwechslungen kommt,
- V1: Einschätzung der eigenen Erkennungsrate beim gesamten Versuch,

- V1: Einschätzung, bei welcher Darbietungsart die Muster am besten zu erkennen sind (kontinuierlich, gepulst, dynamisch),
- V2: Einschätzung, bei welcher Darbietungsart die Muster besser zu erkennen sind (gepulst, dynamisch, beides gleich),
- V2: Einschätzung, welcher Faktor ausschlaggebender für die empfundene Dringlichkeit einer Information ist (Motoranzahl, Anzeige-/Intervalldauer, beides gleich) und Beurteilung der Merkbarekeit dreier sequenziell angezeigter Muster,
- V3: Einschätzung der eigenen Fehleranzahl für den gesamten Versuch,
- V3: Frage nach Mustern, die besonders gut oder besonders schlecht zu erkennen sind.

5) Technische Gestaltung der TSM:

- Beurteilung der TSM-Position an der Rückenlehne und auf der Sitzfläche,
- Bewertung der generellen Sinnhaftigkeit eines Einsatzes von vibrotaktilen Feedback im Fahrersitz.

6) Allgemeine Bemerkungen zur TSM und zum Versuch

Die ersten drei der beschriebenen Abschnitte dienen der Probanden-Charakterisierung und werden mit dem Versuchsteilnehmer vor dem praktischen Versuchsteil auf der TSM ausgefüllt (vgl. Beschreibung des jeweiligen Probandenkollektivs der drei Versuchsreihen). Dabei ist zu erwähnen, dass die Erfassung der Kleidung lediglich dazu dient, bei potenziellen Ausreißern im Nachgang überprüfen zu können, ob diese ggf. auf die Kleidung zurückzuführen sind. Dieser Fall tritt jedoch im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht auf.

Die Abschnitte vier bis sechs folgen im Anschluss an den Versuchsteil auf der TSM, da diese sich direkt auf die Erfahrungen während des praktischen Versuchs beziehen. Insbesondere mit dem vierten Fragebogen-Abschnitt soll ein Vergleich zwischen den Versuchsreihen 1, 2 und 3 ermöglicht und eine potenzielle Entwicklung in Bezug auf die Einschätzung der Performanz bzw. Gebrauchstauglichkeit und damit die Sinnhaftigkeit vibrotaktile Muster im Fahrzeug-Kontext untersucht werden. Es wird damit überprüft, ob von V1 bis V3, durch die systematische Entwicklung und Auswahl geeigneter Muster, positive Tendenzen festzustellen sind (vgl. Kapitel 8.2.4).

## 5.5 Versuchsdesign und -ablauf

Für eine zielführende Durchführung der Versuche ist die Eingrenzung auf einen definierten Anwendungskontext notwendig. Dies kommt insbesondere in den Versuchsreihen zwei und drei zum Tragen, da für die Untersuchung der Intuitivität taktile Muster

konkrete Informationen notwendig sind. Aus mehreren Gründen ist es sinnvoll, als Anwendungskontext die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug im PKW zu wählen. Zum einen stellt der PKW-Bereich ein äußerst vielversprechendes Anwendungsgebiet für taktile Informationsübermittlung dar, da in dieser Branche der Funktionsumfang der Fahrzeuge stetig ansteigt und bereits viele visuelle und akustische Reize auf den Fahrer einströmen. Die Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation wird somit immer komplexer und beinhaltet auch viele sicherheitskritische Aspekte. Zum anderen ist den Versuchsteilnehmern durch die Voraussetzung des Besitzes einer Fahrerlaubnis der Nutzungskontext vertraut. In anderen geeigneten Anwendungsgebieten wären entsprechende Experten-Nutzer (z. B. Piloten, Fahrer mobiler Arbeitsmaschinen etc.) notwendig. Des Weiteren muss die Informationsdarbietung für den privaten Fahrer so intuitiv wie möglich gestaltet sein, da hier im Vergleich zu Experten-Nutzern wie Piloten keine vorgeschriebenen, regelmäßigen Weiterbildungen und Lernphasen bzgl. der Interaktion vorausgesetzt werden können. Die drei Versuchsreihen besitzen die Schwerpunkte Syntax (V1), Semantik (V2) und Pragmatik (V3) und bauen aufeinander auf (vgl. Vorgehensmodell in Kapitel 4.2).

Der Versuchsablauf unterteilt sich bei allen drei Versuchsreihen in folgende Schritte:

- 1) Einführung und Vorstellung des Versuchsablaufs / Einwilligungserklärung,
- 2) Erfassung demografischer Daten,
- 3) Vermessung der Körpermaße (stehend, sitzend),
- 4) Ermittlung der taktilen Wahrnehmungsleistung,
- 5) Sitzposition einstellen (Entfernung des Touchscreens / Fußaufstellfläche),
- 6) Hauptversuch auf der TSM (Einführung / Durchführung),
- 7) Befragung mit Fragebogen (Komfort, Leistungseinschätzung),
- 8) Aushändigen und bestätigen der Aufwandsentschädigung (10 Euro/Proband).

Für die Durchführung der Versuche werden einige Randbedingungen definiert, welche bei allen drei Versuchsreihen konstant gehalten und nachfolgend beschrieben werden.

Nach der Einführung zum Versuchsablauf und der Erfassung demografischer Daten inkl. der Vermessung relevanter Körpermaße, wird die taktile Wahrnehmungsleistung (Zweipunktdiskrimination und Vibrationsempfinden, vgl. Abbildung 5.8) gemessen. Diese Messungen erfolgen am Unterarm der Versuchsteilnehmer, da eine direkte Messung an den betreffenden Bereichen Rücken und Oberschenkel nicht realisierbar ist. Weil die Zweipunktdiskrimination an den Fingern stark abhängig vom individuellen Einsatz der Hände (z. B. beim Sport, handwerklichen Tätigkeiten etc.) ist, wird der Unterarm als repräsentative und leicht zugängliche Stelle für die allgemeine taktile Wahrnehmung



gewählt. Zudem liegen für diesen Bereich in der Literatur anerkannte Durchschnittsangaben vor, was die Einordnung der Wahrnehmungsleistung der Probanden erleichtert.



**Abbildung 5.8:** Messung der Zweipunktschwelle (links) und des Vibrationsempfindens (rechts)

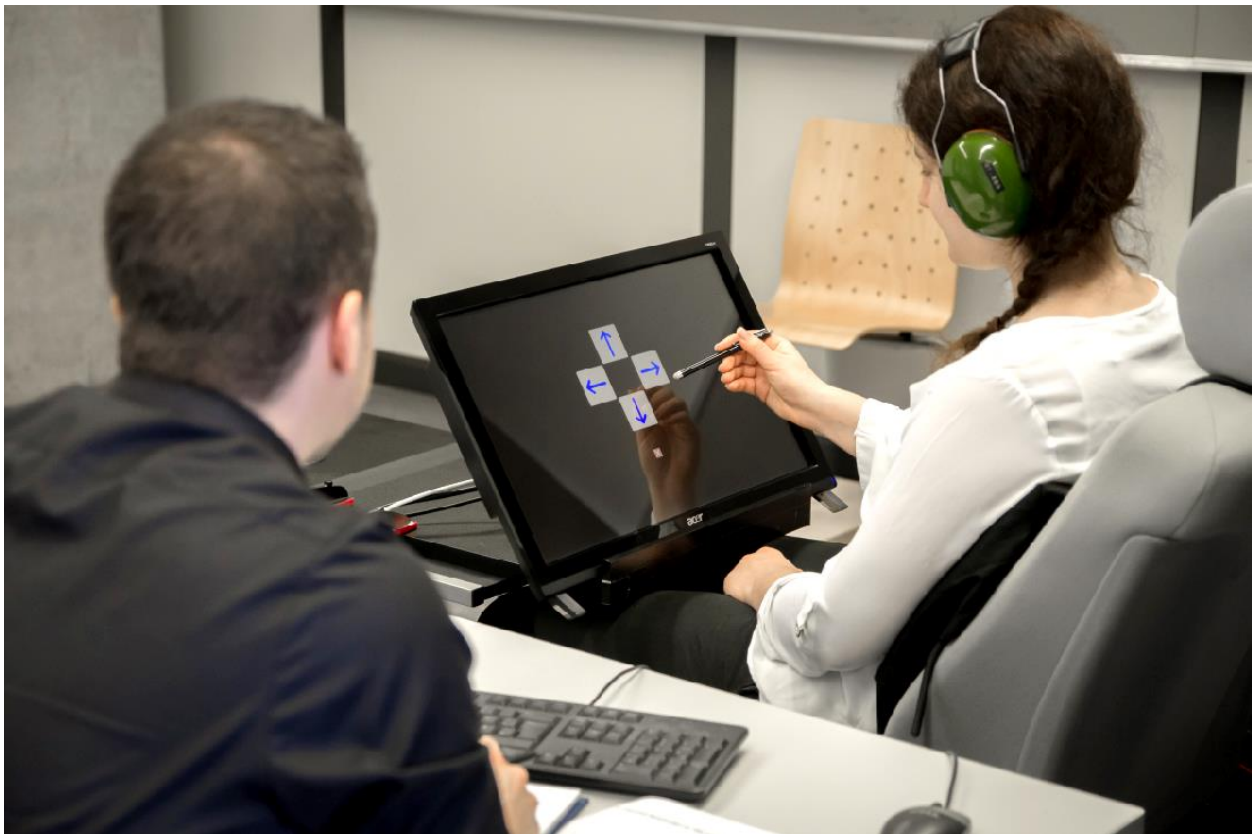
Die Ermittlung der Zweipunktdiskrimination erfolgt mit Sichtschutz und durch in zufälliger Reihenfolge aufgesetzte Diskriminatoren (vgl. [MOBILIS ROLYAN 2017]). Dabei handelt es sich um parallel ausgerichtete Drahtelemente in den Abständen 10, 30, 35, 40, 45 und 50 mm. Diese Werte werden auf Basis der Literatur gewählt. In verschiedenen Quellen wird die Zweipunktdiskrimination am Unterarm einheitlich mit ca. 40 mm angegeben (vgl. u. a. [GOLDSTEIN 2008, S. 343]). Dieser Ausgangswert wird in beide Richtungen um zwei Schritte erweitert und um den Abstand 10 mm ergänzt, welcher theoretisch nur als einzelner Punkt wahrgenommen werden kann und der Einschätzung dient, ob der Proband den Versuch korrekt absolviert oder bspw. stets zwei Kontakte angibt, da er den Versuchsaufbau kennt. Alle Teilnehmer absolvieren die Messung jedoch gewissenhaft und es wird keine Verfälschung beobachtet. Die Diskriminatoren werden jeweils für ca. drei Sekunden mit leicht dekapillarischer Druckaufbringung (vgl. [MOBILIS ROLYAN 2017]) am Unterarm im Bereich des Ellbogens aufgesetzt. Beim Aufsetzen der Diskriminatoren müssen für ein erfolgreiches Differenzieren zwei aus drei Durchgängen eines Abstandes als zwei einzelne Punkte identifiziert werden. Es ist anzumerken, dass bei der Zweipunktschwellenmessung der Wert 55 mm angenommen wird, falls der Proband die beiden einzelnen Punkte bis zu einem Abstand von 50 mm nicht differenzieren kann, was bei einzelnen Probanden der Fall ist. Eine Auswirkung auf die Ergebnisse wird dabei nicht beobachtet.

Eine größere Relevanz für den Versuch besitzt die Erfassung des Vibrationsempfindens der Probanden. Diese erfolgt mithilfe einer Rydel-Seiffer Vibrationsgabel am Ellbogenknochen. Das Instrument dient in erster Linie zur Erkennung von Nervenkrankheiten im geriatrischen Bereich [RUCK 2015]. Es eignet sich jedoch auch dafür, ein normal ausge-

prägtes Vibrationsempfinden der Versuchsteilnehmer nachzuweisen, was eine entscheidende Grundvoraussetzung für das Erkennen von vibrotaktilen Mustern ist. Zur Erfassung des Vibrationsempfindens wird die Vibrationsgabel angeschlagen, wodurch diese mit einer definierten Frequenz von kalibrierten 64 Hz schwingt. Die schwingende Gabel wird an den Ellbogenknochen aufgesetzt und der Proband gibt an, ab wann er die Vibration nicht mehr wahrnimmt [RUCK 2015]. Durch eine mitschwingende Skala kann dieser Wert abgelesen und anhand seiner Höhe eine Kategorie des Vibrationsempfindens ermittelt werden. Alle Teilnehmer weisen dabei ein normal ausgeprägtes Vibrationsempfinden auf.

Als Versuchsumgebung wird ein neutraler Raum mit Blickrichtung des Probanden in Richtung einer einfarbigen Wand gewählt. Dadurch wird die visuelle Ablenkung während des Versuchs minimiert. Als Träger für die TSM wird ein Aufbau von zwei Fahrzeugsitzen verwendet, die fix auf zwei Europaletten montiert sind. Auf einem der Sitze wird die TSM platziert, während die Elektronik-Einheit auf dem zweiten Sitz Platz findet. Der Touchscreen für die Informationswiedergabe und Probandeneingabe wird auf einem beweglichen Rahmen platziert und die Entfernung sowie der Kippwinkel für jeden Proband optimal eingestellt, um eine komfortable Interaktion zu ermöglichen. Hinter den Sitzen wird ein schwarzer Vorhang angebracht, um Spiegelungen und Reflexionen auf dem Touchscreen zu minimieren. Die Probandeneingaben erfolgen via Touchpen auf dem drucksensitiven Touchscreen. Um einen Einfluss der Rückenlehnen-Neigung auszuschließen, wird der Winkel auf  $25^\circ$  zur Senkrechten festgelegt, was nach [BUBB & GRÜNEN 2015, S. 375] statistisch gesehen die bevorzugte Neigung darstellt, wenn der Fahrer sich diese frei einstellen darf (wenngleich individuell starke Schwankungen bestehen). Bei allen drei Versuchsreihen beträgt die gesamte Versuchsdauer inkl. Einführung zu Beginn und abschließender Befragung ca. 90 min. Davon verbringt der Proband 50-60 min auf der TSM für den eigentlichen Versuch. Durch Voruntersuchungen wird gezeigt, dass diese Versuchsdauer von den Probanden akzeptiert wird. Dies bestätigt sich auch bei der Versuchsdurchführung. Während des Versuchs trägt der Proband bis auf kurze Anweisungen zwischendurch stets einen Gehörschutz, um keine akustischen Reize von den Vibrationsmotoren oder andere störende Einflüsse aus der Umgebung wahrnehmen zu können. Obwohl der Einfluss von Kleidung, wie in Kapitel 3.2.5 beschrieben, vernachlässigbar ist, wird beim Versuch darauf geachtet, dass die Probanden keine zu dicke Kleidungsschicht tragen und ihre Kleidung während des Versuchs nicht verändern. Zudem sind keine Gürtel zugelassen, um die Möglichkeit auszuschließen, dass dieser einzelne Motoren dämpfen und somit die Ergebnisse verfälschen könnte. Dasselbe gilt für Hosentaschen, die vor dem Versuch geleert werden müssen.

Zu Beginn des Versuchsteils auf der TSM nimmt der Proband mit parallel nach vorne ausgerichteten Beinen auf dem Prüfstand Platz und es wird mithilfe von Holz-Unterlagen (mit je 24 mm Dicke) die Fußaufstellfläche individuell angepasst, um eine komfortable Sitzposition und optimale Beinauflage auf der Sitzfläche sicherzustellen. Anschließend wird der Touchscreen, wie oben beschrieben, in die richtige Position gebracht. Kleidung, Sitzposition und Höhe der Fußaufstellfläche werden dokumentiert. Nach dem Einstellen der Sitzposition erfolgt eine Kalibrierung, indem nacheinander alle Motoren einzeln kurz aktiviert werden. Dies dient einerseits der Feinjustierung der Position des Probanden (Kontakt zu allen Motoren und mittige Ausrichtung des Rückens an der Rückenlehne) sowie der ersten Gewöhnung an die Vibrationsreize. Auch die Wahrnehmbarkeit der Vibrationen wird dadurch zusätzlich zur erfassten taktilen Wahrnehmungsleistung noch einmal geprüft. Andererseits erfolgt dadurch direkt vor Versuchsbeginn ein Motortest. Der Motortest wird zudem nach jedem Versuch vom Versuchsleiter durchgeführt. Somit wird deren Funktionalität während des Versuchs nachgewiesen. Abbildung 5.9 zeigt den Versuchsaufbau mit einer Probandin während der Eingabe über den Touchscreen.



**Abbildung 5.9:** Probandin bei der Eingabe und Beobachtung durch den Versuchsleiter

Beim Probandenkollektiv wird eine Homogenität im Hinblick auf das Alter sowie eine möglichst gleiche Verteilung bzgl. des Geschlechts angestrebt. Die Integration verschiedener Altersgruppen würde den Umfang der vorliegenden Arbeit sprengen und wird im Ausblick diskutiert. Für eine Teilnahme am Versuch müssen die Probanden folgende Bedingungen erfüllen:

- Besitz eines Führerscheins der Klasse B
- Erstkontakt mit der TSM, keine vorherigen Versuchsteilnahmen
- Alter: 18 – 35 Jahre
- Kein Gürtel während des Versuchs
- Kleidung: Mindestens eine Stoffschicht an allen Kontaktstellen mit der TSM

## 6 Versuchsreihe 1: Erkennbarkeit vibrotaktiler Muster

Mit der ersten Versuchsreihe (V1) wird die Erkennbarkeit bzw. Unterscheidbarkeit vibrotaktiler Muster adressiert. Basierend auf der in Kapitel 4 dargestellten Methode wird dies als taktile Syntax-Ebene bezeichnet. In Analogie zur Sprachforschung geht es darum, welche „Bausteine“ für eine effektive taktile Informationsübermittlung zur Verfügung stehen. Da diese Grundlagen in der Literatur nur unzureichend behandelt werden (vgl. Kapitel 3.3), wird in Versuchsreihe 1 zunächst grundlegend ermittelt, welche taktilen Muster (bzw. welches Spektrum und welche Arten von Mustern) zuverlässig erkannt und unterschieden werden können. Semantische Inhalte, die über die Anzeige von Richtungen hinausgehen sowie Lerneffekte werden dabei bewusst noch nicht betrachtet und folgen in den Versuchsreihen 2 bzw. 3.

### 6.1 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Im Folgenden werden die Ziele und Hypothesen von Versuchsreihe 1 hergeleitet sowie der Versuchsaufbau und die Versuchsbedingungen erläutert. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung des Versuchsablaufs sowie des Probandenkollektivs.

#### 6.1.1 Ziele und Hypothesen

Wie bereits erwähnt, dient V1 der grundlegenden Ermittlung geeigneter vibrotaktiler Muster. Basierend auf der in Kapitel 4 entwickelten Methode werden dabei verschiedene Parameter der taktilen Informationskodierung gezielt untersucht. Diese bilden die unabhängigen Variablen bzw. Faktoren, die in mehreren Teilversuchen systematisch variiert werden. In V1 werden auf dieser Basis die nachfolgend aufgeführten Hypothesen überprüft, welche in Form von Alternativhypothesen  $H_x$  entsprechend der korrespondierenden Nullhypothesen  $H_{0x}$  (= kein Effekt/Zusammenhang) formuliert werden:

Die **Erkennungsrate** der vibrotaktilen Muster wird beeinflusst durch

- **H<sub>1</sub>**: die Darbietungsart der Muster,
- **H<sub>2</sub>**: den TSM-Bereich,
- **H<sub>3</sub>**: die Orientierung der Muster,
- **H<sub>4</sub>**: die angezeigte Richtung,
- **H<sub>5</sub>**: die Anzahl der Auswahlmöglichkeiten,
- **H<sub>6</sub>**: eine angezeigte Referenz (zentraler Motor) vor dem eigentlichen Muster,
- **H<sub>7</sub>**: die Ausprägung / Variante eines Musters,
- **H<sub>8</sub>**: die Anordnung der Motoren.

In einer weiteren Hypothese wird ein messbarer Zusammenhang zwischen den beiden abhängigen Variablen **Erkennungsrate** und **Antwortzeit** angenommen:

- **H<sub>9</sub>**: Muster mit hoher Erkennungsrate weisen kürzere Antwortzeiten auf als Muster mit geringer Erkennungsrate.

In Tabelle 6.1 wird beschrieben, durch welche Faktoren und Faktorstufen die Hypothesen im Versuch überprüft werden. Zudem erfolgt jeweils ein Verweis auf die relevanten Teilversuche. Die Zusammenstellung der beschriebenen Teilversuche basiert auf dem entwickelten Vorgehensmodell (vgl. Kapitel 4.2) sowie den Vorstudien (vgl. Kapitel 5.3). Zusätzlich wird auf einen möglichst effektiven und effizienten Versuchsablauf geachtet. Mit dem Faktor Darbietungsart wird untersucht, ob ein Unterschied zwischen kontinuierlicher und gepulster Anzeige besteht bzw. bei welchen Arten von Mustern dieser auftritt. Die dynamische Anzeige von Mustern wird auf Basis von Vorstudien generell als vorteilhaft angesehen (vgl. Kapitel 5.3) und somit im aktuellen Versuch nicht direkt mit den beiden anderen Darbietungsarten verglichen.

Die Beziehung zwischen Erkennungsrate und Antwortzeit (vgl. H<sub>9</sub>) wird durch die zusätzliche Erfassung der Antwortzeit innerhalb aller Teilversuche untersucht.

H <sub>x</sub>	Faktor	Faktorstufen	Teilversuch(e)	Beschreibung
H <sub>1</sub>	Darbietungsart	kontinuierlich (1), gepulst (2)	V1.1	Rückenlehne, verschiedene Orientierungen
			V1.3.1 ↔ V1.4.1	Rückenlehne, 8 Richtungen
			V1.3.2 ↔ V1.4.2	Sitzfläche, 8 Richtungen
			V1.5.1	Rückenlehne, 4 Richtungen
			V1.5.2	Sitzfläche, 4 Richtungen
H <sub>2</sub>	Bereich	Rückenlehne (1), Sitzfläche (2)	V1.3.1 ↔ V1.3.2	kontinuierlich, 8 Richtungen
			V1.4.1 ↔ V1.4.2	gepulst, 8 Richtungen
			V1.5.1 ↔ V1.5.2	kontinuierlich / gepulst, 4 Richtungen
H <sub>3</sub>	Orientierung	horizontal (1), vertikal (2), diagonal (3)	V1.1	Rückenlehne, kontinuierlich / gepulst
		horizontal (1), vertikal (2), drehend (3), schwenkend (4)	V1.2	Rückenlehne, dynamisch

**Tabelle 6.1:** Übersicht der Faktoren und Faktorstufen mit Zuweisung zu einzelnen Teilversuchen (Teil 1/2)

H <sub>x</sub>	Faktor	Faktorstufen	Teilversuch(e)	Beschreibung
H <sub>4</sub>	Richtung	oben (1), unten (2), rechts (3), links (4), oben rechts (5), oben links (6), unten rechts (7), unten links (8)	V1.3.1 + V1.4.1	Rückenlehne, kontinuierlich / gepulst
		hinten (1), vorne (2), rechts (3), links (4), hinten rechts (5), hinten links (6), vorne rechts (7), vorne links (8)	V1.3.2 + V1.4.2	Sitzfläche, kontinuierlich / gepulst
		oben (1), unten (2), rechts (3), links (4)	V1.5.1	Rückenlehne, kontinuierlich / gepulst
		hinten (1), vorne (2), rechts (3), links (4)	V1.5.2	Sitzfläche, kontinuierlich / gepulst
		oben (1), unten (2), rechts (3), links (4), oben rechts (5), oben links (6), unten rechts (7), unten links (8)	V1.6 + V1.7	Rückenlehne, kontinuierlich
		raus (1), rein (2)	V1.8	Rückenlehne, 7 Anordnungen
		raus (1), rein (2)	V1.9	Rückenlehne, 4 Anordnungen
H <sub>5</sub>	Auswahl	8 Richtungen (1), 4 Richtungen (2)	V1.3.1/V1.4.1 ↔ V1.5.1	Rückenlehne, kontinuierlich / gepulst
		8 Richtungen (1), 4 Richtungen (2)	V1.3.2/V1.4.2 ↔ V1.5.2	Sitzfläche, kontinuierlich / gepulst
H <sub>6</sub>	Referenz	mit (1), ohne (2)	V1.6 ↔ V1.7	Rückenlehne, 16 einzelne Motoren
H <sub>7</sub>	Ausprägung	einzel (1), doppelt (2)	V1.1	Rückenlehne, Orientierungen (nur horizontal und vertikal)
		Variante 1 (1), Variante 2 (2), Variante 3 (3)	V1.2	Rückenlehne, dynamisch (einzelne Betrachtung)
		schmal (1), breit (2)	V1.5.1	Rückenlehne, kontinuierlich / gepulst (außer diagonal)
		innen (1), außen (2)	V1.6 + V1.7	Rückenlehne, 16 einzelne Motoren (nur 8 verwendet)
H <sub>8</sub>	Anordnung	vertikal-schmal (1), vertikal-breit (2), horizontal-schmal (3), horizontal-breit (4), Plus-Form (5), X-Form (6), Kombi-Form (Plus und X) (7)	V1.8	Rückenlehne, rein/raus
		T-aufrecht (1), T-umgekehrt (2), U-aufrecht (3), U-umgekehrt (4)	V1.9	Rückenlehne, rein/raus

**Tabelle 6.1:** Übersicht der Faktoren und Faktorstufen mit Zuweisung zu einzelnen Teilversuchen (Teil 2/2)

Zusätzlich zu den über die Hypothesen formulierten Vergleichen werden die Erkennungsraten und Antwortzeiten für alle Muster einzeln ausgewertet und deskriptiv wiedergegeben, um deren jeweilige Eignung auch absolut zu erfassen. Denn für den zuverlässigen, praktischen Einsatz ist eine nachgewiesene hohe Erkennungsrate zwingend erforderlich, unabhängig davon, welche Muster besser oder schlechter geeignet sind. Dabei werden gezielt auch Grenzbereiche der taktilen Wahrnehmung ausgetestet, wie bspw. die Erkennbarkeit einzelner, punktueller Reize, um das Spektrum für eine taktile Syntax möglichst umfassend aufzeigen zu können. Das Ziel von V1 ist es, möglichst viele Muster und Musterarten zu identifizieren, die zuverlässig erkannt und unterschieden werden können, um damit eine breite Basis für eine semantische Belegung der vibrotaktilen Muster zu schaffen (vgl. Versuchsreihe 2). Auch der Ausschluss von bestimmten Mustern und Musterarten, die generell eine geringe Erkennungsrate aufweisen, stellt hierfür eine wichtige Erkenntnis dar.

In V1 wird die abhängige Variable Erkennungsrate erfasst, welche sich aus der Fehleranzahl bei der Eingabe berechnet. Die Erkennungsrate ist das Verhältnis der richtigen Eingaben zu allen getätigten Eingaben. Die Antwortzeit bei der Eingabe wird als weitere abhängige Variable erfasst. Eine Beeinflussung der beiden abhängigen Variablen wird ausgeschlossen, da die Probanden keine Kenntnis darüber haben, dass die Zeit erfasst wird. Die Antwortzeit soll einen zusätzlichen Aufschluss über die Eignung der Muster ermöglichen, wobei die Erkennungsrate den Fokus der Untersuchung bildet und eine hohe Erkennungsrate als notwendige Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz vibrotaktiler Muster in der Mensch-Maschine-Interaktion gesehen wird. Die Erfassung der Antwortzeit beginnt jeweils mit dem Beginn jeder Musteranzeige und endet mit der Probandeneingabe. Durch unterschiedlich lange Musteranzeigen sowie die Tatsache, dass die Probanden nicht instruiert werden, möglichst schnelle Eingaben zu tätigen, ist die Antwortzeit als Tendenz zu verstehen, die jedoch einen Anhaltspunkt zu der Zeitspanne liefert, die der Proband dafür benötigt, um das angezeigte taktile Muster wahrzunehmen und zu interpretieren.

Ergänzend zur Erfassung von Erkennungsrate und Antwortzeit wird mit jedem Probanden nach dem Versuch eine subjektive Befragung zu den Themen Akzeptanz, Komfort und eigene Leistungseinschätzung mithilfe des entwickelten Fragebogens (vgl. Kapitel 5.4) durchgeführt.

### **6.1.2 Generierung der Reizmuster**

Um die beschriebenen Hypothesen zu adressieren, erfolgt die Entwicklung der Reizmuster im Rahmen der in Kapitel 4 hergeleiteten Parameter für vibrotaktile Anzeiger



sowie der technischen Eigenschaften der TSM. Das Spektrum an möglichen Mustern ist prinzipiell groß und erfordert eine systematische Herangehensweise.

Zunächst erfolgt eine Aufteilung der TSM in die Bereiche Rückenlehne (mit 25 Motoren) und Sitzfläche (mit 16 Motoren). Zudem wird die TSM in einen linken und rechten Sektor (jeweils die äußeren beiden „Spalten“ von Motoren) sowie einen mittleren Bereich an der Rückenlehne (mittlere Spalte) unterteilt.

Zur Generierung von Reizmustern für die erste Versuchsreihe werden auf Basis der Hypothesen folgende Muster-Kategorien definiert:

- Orientierungen (statisch und dynamisch),
- Richtungen (8 bzw. 4),
- Punktuelle Einzelreize (mit und ohne Referenz in der Mitte),
- Radiale Verläufe (nach außen / zentrifugal und nach innen / zentripetal).

Der Mustererstellung liegen zudem die Ergebnisse der vorab durchgeführten Studien zugrunde (vgl. Kapitel 5.3), aus denen unter anderem geeignete Muster für die Richtungsanzeige hervorgehen.

Auf Basis der in Kapitel 4 beschriebenen Methode sowie der in Kapitel 3.2.2 vorgeschlagenen Unterteilungen werden Muster in den folgenden drei Darbietungsarten generiert:

- Kontinuierlich (räumlich fixiert, durchgehende einmalige Aktivierung),
- Gepulst (räumlich fixiert, mehrfache Aktivierung in Pulsen mit Intervallen),
- Dynamisch (räumlich bewegt, überlappende Aktivierung, mehrere Durchläufe).







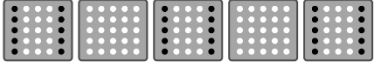




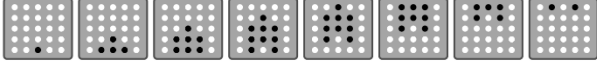
Kontinuierliche (räumliche) Muster werden definiert über die Anordnung und Anzahl der Motoren sowie deren Aktivierungsdauer. Gepulste (raum-zeitliche) Muster werden neben Anordnung und Motoren-Anzahl über Aktivierungs- und Intervalldauer sowie die Anzahl an Pulsen definiert. Dynamische (raum-zeitliche) Muster bestehen aus einer überlappenden Abfolge von Schritten, jeweils bestehend aus räumlich definierter Anordnung und Anzahl an Motoren. Zusätzlich enthalten sie Informationen zur Aktivierungsdauer, Intervalldauer und Überlappung der einzelnen Schritte sowie zur Anzahl der Durchläufe.

Der Mustergenerierung liegen des Weiteren folgende Überlegungen zugrunde:

- Neben Mustern mit bewusster Richtungs-Assoziation (z. B. „links“) sollen alle weiteren Muster symmetrisch sein, d. h. es werden bspw. keine L-Form oder ähnliche Anordnungen verwendet, die eine ungewollte Richtungsanzeige beinhalten könnten.

- Bei der Generierung der kontinuierlichen, gepulsten und dynamischen Muster wird darauf geachtet, dass die Gesamtdarbietungsdauer jeweils in einem ähnlichen Bereich liegt. Dies gilt insbesondere innerhalb der einzelnen Teilversuche, um dabei eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.
- Auf Basis der Vorstudien erweist sich bei dynamischen Mustern eine „Überlappung“ der nacheinander aktivierten Motor-Anordnungen von jeweils drei Einzelschritten als zweckmäßig, um ein möglichst homogenes „Flow“-Gefühl (flüssige Bewegung) zu generieren.
- Die Festlegung der Anzeigedauer der Einzelschritte bei dynamischen Mustern basiert ebenfalls auf den Vorstudien. Bei komplexer werdenden Mustern wird eine „langsamere“ Anzeige mit länger angezeigten Einzelschritten verwendet.
- Einzelreize werden nur auf der Rückenlehne angezeigt, da hier im Vergleich zu den Oberschenkeln anatomisch bedingt eine größere, zusammenhängende Körperfläche zur Verfügung steht.

Um die vibrotaktile Muster für die Versuchsbeschreibung und -auswertung zu visualisieren und im nächsten Schritt auch eine möglichst intuitive Probandeneingabe zu ermöglichen, werden parallel zu den Mustern jeweils zugehörige Piktogramme entwickelt. Diese zeigen entsprechend der Probandenaufgabe (bzw. SOLL-Eingabe) entweder konkrete Muster oder eine abstrakte Information, wie z. B. Richtungen (siehe exemplarische Darstellung und Erklärung in Tabelle 6.2). Bei der visuellen Darstellung der Muster werden verschiedenfarbige Kreise verwendet, um aktivierte und deaktiviere Motoren zu kennzeichnen. Aktivierte Motoren werden dabei schwarz dargestellt. Die runde Gestaltung wird aufgrund der besseren Erkennbarkeit, insbesondere für die Probanden, gewählt, obwohl die Motoren radial schwingen und senkrecht zur Sitzaufgabe montiert sind, d. h. in der Draufsicht der TSM theoretisch die rechteckige Seitenansicht der Motoren zu sehen ist. Da die Motoren jedoch ohnehin von einem Stoffüberzug verdeckt und kaum sichtbar sind, wird hier der Fokus auf eine schnelle und eindeutige Erkennung der visuellen Darstellung durch den Probanden gelegt. Bei dynamischen Mustern, die mithilfe von mehreren sequenziellen Einzelschritten angezeigt werden, wird ein Farbverlauf von grau zu blau integriert, um die Verlaufsrichtung anzuzeigen. Darüber hinaus werden in Tabelle 6.2 auch Kürzel für den jeweils verwendeten TSM-Bereich eingeführt, die in den nachfolgenden Darstellungen verwendet werden.

Motorenanordnung / Piktogramme	Eingabefelder	Erklärungen und Besonderheiten (exemplarisch)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSM-Bereich: Gesamter Sitz (GS),</li> <li>• Abfrage der Richtung (nicht des konkreten Musters),</li> <li>• Darbietung räumlich fixiert,</li> <li>• kontinuierliche Aktivierung,</li> <li>• linke Seite im Piktogramm (Draufsicht) entspricht rechter Seite des Probanden (vgl. Eingabefeld).</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSM-Bereich: Rückenlehne (RL),</li> <li>• Abfrage des punktuellen Reizes (einzelner Motor),</li> <li>• Darbietung räumlich fixiert,</li> <li>• kontinuierliche Aktivierung,</li> <li>• Motor oben rechts im Piktogramm (Draufsicht) entspricht dem Reiz „oben links“ für den Probanden (vgl. Eingabefeld).</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSM-Bereich: Rückenlehne (RL),</li> <li>• Abfrage des konkreten Musters,</li> <li>• Darbietung räumlich fixiert,</li> <li>• gepulste Aktivierung mit Intervallen:</li> </ul> 
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSM-Bereich: Sitzfläche (SF),</li> <li>• Abfrage der Richtung (nicht des konkreten Musters),</li> <li>• Darbietung räumlich fixiert,</li> <li>• kontinuierliche Aktivierung,</li> <li>• obere Reihe im Piktogramm (Draufsicht) entspricht Richtung „hinten“ für den Probanden (vgl. Eingabefeld).</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSM-Bereich: Rückenlehne (RL),</li> <li>• Abfrage der Richtung (nicht des konkreten Musters),</li> <li>• Darbietung räumlich bewegt (Farbverlauf zeigt Richtung),</li> <li>• dynamische Aktivierung mit folgenden Einzelschritten:</li> </ul> 

**Tabelle 6.2:** Exemplarische Beschreibung der Piktogramme für Motorenanordnung und Eingabefelder

Die generierten Reizmuster für alle Teilversuche der Versuchsreihe werden in Tabelle 6.3 bis Tabelle 6.12 dargestellt, wobei Tabelle 6.3 die Beschreibung der Beispielmuster zur Eingewöhnung zeigt. Die Tabellen enthalten neben der eindeutigen Benennung für alle Muster Angaben zu Teilversuch, Anordnung verwendeter Motoren (bei dynamischen Mustern durch möglichst aussagekräftige Kennzeichnung dargestellt, die nicht immer der tatsächlichen Anordnung eines Einzelschrittes entspricht), Darbietungsart und Sitzbereich sowie zeitliche Parameter und eine Kurzbeschreibung der SOLL-Eingabe (für die Programmierung). Zudem ist die Darstellung des jeweils zugeordneten Eingabefeldes für den Probanden enthalten. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Darstellung der verwendeten Motoren (Anordnung) jeweils der Draufsicht auf die TSM entspricht, während die Probandeneingabefelder gespiegelt, d. h. aus Sicht des sitzenden Probanden, gestaltet sind, um diesem eine intuitive und kompatible Eingabe zu ermöglichen (vgl. Tabelle 6.2). Die Beschreibung aller einzelnen Schritte der dynamischen Muster kann Anhang A3 entnommen werden.

Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung
V1.0	Beispielmuster	0-1			rechts	kontinuierlich	GS	2000	2000	-	-	-	V1_0-1_01_kontinuierlich_rechts
		0-2			links	kontinuierlich	GS	2000	2000	-	-	-	V1_0-2_01_kontinuierlich_links
		0-3			Rahmen	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	V1_0-3_01_gepulst_Rahmen
		0-4			horizontal 2	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	V1_0-4_01_gepulst_horizontal 2
		0-5			nach unten	dynamisch	RL	4050	150	-	3	9	V1_0-5_01_dynamisch_nach unten
		0-6			nach vorne	dynamisch	SF	3150	150	-	3	7	V1_0-6_01_dynamisch_nach vorne

Tabelle 6.3: Reizmusterübersicht V1.0 – Beispielmuster

Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung		
V1.1	Orientierungen kontinuierlich und gepulst	1-1			vertikal 1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	V1_1-1_01_kontinuierlich_vertikal 1		
					horizontal 1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	V1_1-1_02_kontinuierlich_horizontal 1	
					diagonal rechts oben	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	V1_1-1_03_kontinuierlich_diagonal rechts oben	
					diagonal links oben	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_1-1_04_kontinuierlich_diagonal links oben
					vertikal 2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_1-1_05_kontinuierlich_vertikal 2
					horizontal 2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_1-1_06_kontinuierlich_horizontal 2
					vertikal 1	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	V1_1-1_07_gepulst_vertikal 1
					horizontal 1	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	V1_1-1_08_gepulst_horizontal 1
					diagonal rechts oben	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	V1_1-1_09_gepulst_diagonal rechts oben
					diagonal links oben	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	V1_1-1_10_gepulst_diagonal links oben
					vertikal 2	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	V1_1-1_11_gepulst_vertikal 2
					horizontal 2	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	V1_1-1_12_gepulst_horizontal 2

Tabelle 6.4: Reizmusterübersicht V1.1 – Orientierungen, kontinuierlich/gepulst

Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung
V1.2	Orientierungen dynamisch (Bewegungsarten)	2-1			hoch	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_01_dynamisch_hoch
					hoch	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_02_dynamisch_hoch
					hoch	dynamisch	RL	3600	150	-	3	8	V1_2-1_03_dynamisch_hoch
					runter	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_04_dynamisch_runter
					runter	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_05_dynamisch_runter
					runter	dynamisch	RL	3600	150	-	3	8	V1_2-1_06_dynamisch_runter
					rechts	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_07_dynamisch_rechts
					rechts	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_08_dynamisch_rechts
					rechts	dynamisch	RL	3600	150	-	3	8	V1_2-1_09_dynamisch_rechts
					links	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_10_dynamisch_links
					links	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_11_dynamisch_links
					links	dynamisch	RL	3600	150	-	3	8	V1_2-1_12_dynamisch_links
					rechts drehen	dynamisch	RL	4950	150	-	3	11	V1_2-1_13_dynamisch_rechts drehen
					rechts drehen	dynamisch	RL	6750	150	-	3	15	V1_2-1_14_dynamisch_rechts drehen
					rechts drehen	dynamisch	RL	4950	150	-	3	11	V1_2-1_15_dynamisch_rechts drehen
					links drehen	dynamisch	RL	4950	150	-	3	11	V1_2-1_16_dynamisch_links drehen
					links drehen	dynamisch	RL	6750	150	-	3	15	V1_2-1_17_dynamisch_links drehen
					links drehen	dynamisch	RL	4950	150	-	3	11	V1_2-1_18_dynamisch_links drehen
					rechts schwenken	dynamisch	RL	2250	150	-	3	5	V1_2-1_19_dynamisch_rechts schwenken
					rechts schwenken	dynamisch	RL	2700	150	-	3	6	V1_2-1_20_dynamisch_rechts schwenken
					rechts schwenken	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_21_dynamisch_rechts schwenken
					links schwenken	dynamisch	RL	2250	150	-	3	5	V1_2-1_22_dynamisch_links schwenken
					links schwenken	dynamisch	RL	2700	150	-	3	6	V1_2-1_23_dynamisch_links schwenken
					links schwenken	dynamisch	RL	3150	150	-	3	7	V1_2-1_24_dynamisch_links schwenken

Tabelle 6.5: Reizmusterübersicht V1.2 – Orientierungen, dynamisch

Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung		
V1.3	8 Richtungen kontinuierlich	3-1			oben	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	V1_3-1_01_kontinuierlich_oben		
					unten	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	V1_3-1_02_kontinuierlich_unten	
					rechts	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-1_03_kontinuierlich_rechts
					oben rechts	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-1_05_kontinuierlich_oben_rechts
					oben links	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-1_06_kontinuierlich_oben_links
					unten rechts	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-1_07_kontinuierlich_unten_rechts
					unten links	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-1_08_kontinuierlich_unten_links
			3-2			hinten	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-
					vorne	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-2_02_kontinuierlich_vorne
					rechts	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-2_03_kontinuierlich_rechts
					links	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-2_04_kontinuierlich_links
					hinten rechts	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-2_05_kontinuierlich_hinten_rechts
					hinten links	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-2_06_kontinuierlich_hinten_links
					vorne rechts	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-2_07_kontinuierlich_vorne_rechts
					vorne links	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_3-2_08_kontinuierlich_vorne_links

Tabelle 6.6: Reizmusterübersicht V1.3 – 8 Richtungen, kontinuierlich

Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung
V1.4	8 Richtungen gepulst	4-1			oben	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	V1_4-1_01_gepulst_oben
					unten	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	V1_4-1_02_gepulst_unten
					rechts	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	V1_4-1_03_gepulst_rechts
					links	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	V1_4-1_04_gepulst_links
					oben rechts	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	V1_4-1_05_gepulst_oben_rechts
					oben links	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	V1_4-1_06_gepulst_oben_links
					unten rechts	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	V1_4-1_07_gepulst_unten_rechts
					unten links	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	V1_4-1_08_gepulst_unten_links
		4-2			hinten	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	V1_4-2_01_gepulst_hinten
					vorne	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	V1_4-2_02_gepulst_vorne
					rechts	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	V1_4-2_03_gepulst_rechts
					links	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	V1_4-2_04_gepulst_links
					hinten rechts	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	V1_4-2_05_gepulst_hinten_rechts
					hinten links	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	V1_4-2_06_gepulst_hinten_links
					vorne rechts	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	V1_4-2_07_gepulst_vorne_rechts
					vorne links	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	V1_4-2_08_gepulst_vorne_links

Tabelle 6.7: Reizmusterübersicht V1.4 – 8 Richtungen, gepulst

Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung			
V1.5	4 Richtungen kontinuierlich und gepulst	5-1			oben	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	V1_5-1_01_kontinuierlich_oben			
					oben	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	V1_5-1_02_kontinuierlich_oben		
					unten	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_5-1_03_kontinuierlich_unten	
					unten	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_5-1_04_kontinuierlich_unten	
					rechts	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_5-1_05_kontinuierlich_rechts	
					rechts	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_5-1_06_kontinuierlich_rechts	
					links	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_5-1_07_kontinuierlich_links
					links	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_5-1_08_kontinuierlich_links
					oben	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-1_09_gepulst_oben
					oben	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-1_10_gepulst_oben
					unten	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-1_11_gepulst_unten
					unten	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-1_12_gepulst_unten
					rechts	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-1_13_gepulst_rechts
					rechts	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-1_14_gepulst_rechts
					links	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-1_15_gepulst_links
					links	gepulst	RL	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-1_16_gepulst_links
		5-2			hinten	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_5-2_01_kontinuierlich_hinten	
					vorne	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_5-2_02_kontinuierlich_vorne	
					rechts	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_5-2_03_kontinuierlich_rechts	
					links	kontinuierlich	SF	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_5-2_04_kontinuierlich_links
					hinten	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-2_05_gepulst_hinten
					vorne	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-2_06_gepulst_vorne
					rechts	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-2_07_gepulst_rechts
					links	gepulst	SF	2000	500	250	3	-	-	-	-	V1_5-2_08_gepulst_links

Tabelle 6.8: Reizmusterübersicht V1.5 – 4 Richtungen, kontinuierlich und gepulst



Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung
V1.6	Punktueller Reize mit Referenz	6-1			O1-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_01_kontinuierlich_O1-Referenz
					O2-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_02_kontinuierlich_O2-Referenz
					U1-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_03_kontinuierlich_U1-Referenz
					U2-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_04_kontinuierlich_U2-Referenz
					R1-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_05_kontinuierlich_R1-Referenz
					R2-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_06_kontinuierlich_R2-Referenz
					L1-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_07_kontinuierlich_L1-Referenz
					L2-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_08_kontinuierlich_L2-Referenz
					OR1-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_09_kontinuierlich_OR1-Referenz
					OR2-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_10_kontinuierlich_OR2-Referenz
					OL1-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_11_kontinuierlich_OL1-Referenz
					OL2-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_12_kontinuierlich_OL2-Referenz
					UR1-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_13_kontinuierlich_UR1-Referenz
					UR2-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_14_kontinuierlich_UR2-Referenz
					UL1-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_15_kontinuierlich_UL1-Referenz
					UL2-Referenz	kontinuierlich	RL	4000	2000	-	-	-	V1_6-1_16_kontinuierlich_UL2-Referenz

Tabelle 6.9: Reizmusterübersicht V1.6 – Punktueller Reize mit Referenz

Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung			
V1.7	Punktueller Reize ohne Referenz	7-1			O1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	V1_7-1_01_kontinuierlich_O1			
					O2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	V1_7-1_02_kontinuierlich_O2		
					U1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	V1_7-1_03_kontinuierlich_U1	
					U2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_04_kontinuierlich_U2
					R1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_05_kontinuierlich_R1
					R2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_06_kontinuierlich_R2
					L1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_07_kontinuierlich_L1
					L2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_08_kontinuierlich_L2
					OR1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_09_kontinuierlich_OR1
					OR2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_10_kontinuierlich_OR2
					OL1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_11_kontinuierlich_OL1
					OL2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_12_kontinuierlich_OL2
					UR1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_13_kontinuierlich_UR1
					UR2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_14_kontinuierlich_UR2
					UL1	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_15_kontinuierlich_UL1
					UL2	kontinuierlich	RL	2000	2000	-	-	-	-	-	-	V1_7-1_16_kontinuierlich_UL2

Tabelle 6.10: Reizmusterübersicht V1.7 – Punktueller Reize ohne Referenz

Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung
V1.8	Radialer Verlauf, 1 Bewegungsrichtung	8-1			raus	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_01_dynamisch_raus
					raus	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_02_dynamisch_raus
					rein	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_03_dynamisch_rein
					rein	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_04_dynamisch_rein
					raus	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_05_dynamisch_raus
					raus	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_06_dynamisch_raus
					rein	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_07_dynamisch_rein
					rein	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_08_dynamisch_rein
					raus	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_09_dynamisch_raus
					rein	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_10_dynamisch_rein
					raus	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_11_dynamisch_raus
					rein	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_12_dynamisch_rein
					raus	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_13_dynamisch_raus
					rein	dynamisch	RL	3000	200	-	3	5	V1_8-1_14_dynamisch_rein

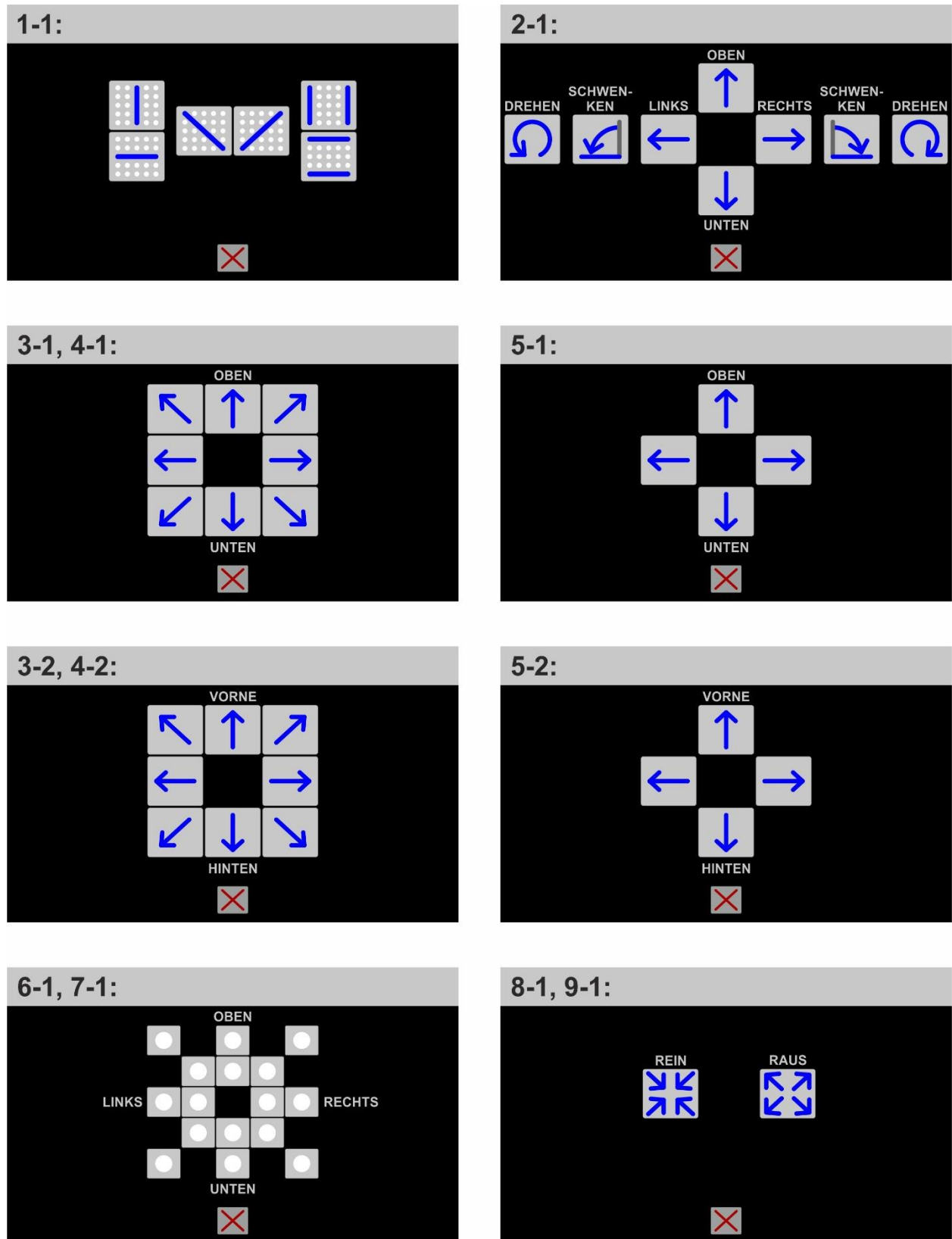
Tabelle 6.11: Reizmusterübersicht V1.8 – Radialer Verlauf, 1 Bewegungsrichtung

Teilversuch	Inhalt	Musterpool	Anordnung	Eingabefeld	Beschreibung (SOLL)	Darbietungsart	TSM-Bereich	Gesamtdauer [ms]	Aktivierungsdauer [ms]	Intervalldauer [ms]	Durchläufe	Schritte	Benennung
V1.9	Radialer Verlauf, 2 Bewegungsrichtungen	9-1			raus	dynamisch	RL	4050	150	-	3	9	V1_9-1_01_dynamisch_raus
					rein	dynamisch	RL	4050	150	-	3	9	V1_9-1_02_dynamisch_rein
					raus	dynamisch	RL	4050	150	-	3	9	V1_9-1_03_dynamisch_raus
					rein	dynamisch	RL	4050	150	-	3	9	V1_9-1_04_dynamisch_rein
					raus	dynamisch	RL	4050	150	-	3	9	V1_9-1_05_dynamisch_raus
					rein	dynamisch	RL	4050	150	-	3	9	V1_9-1_06_dynamisch_rein
					raus	dynamisch	RL	4050	150	-	3	9	V1_9-1_07_dynamisch_raus
					rein	dynamisch	RL	4050	150	-	3	9	V1_9-1_08_dynamisch_rein

**Tabelle 6.12:** Reizmusterübersicht V1.9 – Radialer Verlauf, 2 Bewegungsrichtungen

### 6.1.3 Versuchsaufbau und -bedingungen

Der grundlegende Versuchsablauf sowie die Versuchsumgebung werden in Kapitel 5.5 beschrieben. Im Folgenden wird auf den Hauptversuchsteil von V1 eingegangen, bei dem der Proband die Teilversuche auf der TSM absolviert. In Versuchsreihe 1 werden die im vorherigen Kapitel beschriebenen Reizmuster verwendet. Aufgeteilt in neun Teilversuche werden insgesamt 146 Muster abgefragt, die jedem Probanden pro Musterpool in randomisierter Reihenfolge jeweils zweimal präsentiert werden. Somit erfolgen insgesamt 292 Abfragen pro Teilnehmer. Eine Übersicht der Probanden-Interfaces für die neun Teilversuche bzw. zwölf Musterpools ist in Abbildung 6.1 dargestellt.



**Abbildung 6.1:** Probanden-Interfaces für die einzelnen Musterpools innerhalb der neun Teilversuche

Zu Beginn der Teilversuche auf der TSM werden dem Probanden Beispielmuster präsentiert, welche später nicht Teil des Versuchs sind, um den Versuchsablauf nochmals

zu verdeutlichen. Die Komplexität der Muster bzw. die Erkennungsaufgabe des Probanden wird bewusst über die Teilversuche hinweg gesteigert. Zum Ende des Versuchs (nach ca. 40 min) erfolgt wieder eine Abnahme der Komplexität, um der nachlassenden Aufmerksamkeit gerecht zu werden. Beim Versuch werden zwei Reihenfolgen (je Geschlecht immer abwechselnd) verwendet, um den Einfluss der Reihenfolge bei bestimmten Teilversuchen auszugleichen. Dazu gehören die Teilversuche drei (V1.3) und vier (V1.4), um einmal mit der kontinuierlichen und einmal mit der gepulsten Darbietung zu beginnen. Zudem werden die Teilversuche sechs (V1.6, mit Referenz) und sieben (V1.7, ohne Referenz) sowie die Teilversuche acht (V1.8, eine Bewegungsrichtung) und neun (V1.9, zwei Bewegungsrichtungen) bei der alternativen Reihenfolge getauscht.

Für die zusätzliche Motivation der Probanden, die angezeigten Muster möglichst richtig zu erkennen, wird ein Preis für die höchste Gesamterkennungsrate ausgeschrieben. Um keinen unnötigen Druck für die Probanden zu erzeugen, der die Ergebnisse ggf. verfälschen könnte, wird gegenüber den Teilnehmern betont, dass es nicht um die Eingabegeschwindigkeit geht und auch nicht erwähnt, was der Preis für die höchste Erkennungsrate ist (weitere 10 Euro neben der obligatorischen Aufwandsentschädigung von 10 Euro/Proband, Müsli-Box und Kugelschreiber). Ein Hinweis an die Teilnehmer, sich generell nicht unnötig viel Zeit bei der Eingabe zu lassen, um die Erfassung der Antwortzeit nicht zu verfälschen, ist auf Basis von Voruntersuchungen nicht notwendig, da tendenziell stets versucht wird, den Versuch möglichst schnell zu absolvieren.

#### **6.1.4 Versuchsablauf**

Um den Ablauf sowie die Anzeige- und Eingabebedingungen während des Versuchs einheitlich und eindeutig zu gestalten, werden allen Teilnehmern vor Beginn von Versuchsreihe 1 die folgenden Hinweise gegeben:

- Es werden die taktilen Muster getestet, nicht der Proband.
- Es werden drei verschiedene Darbietungsarten verwendet: kontinuierlich, gepulst (drei Pulse) und dynamisch (drei Durchläufe).
- Jedes taktil angezeigte Muster kann einem Eingabefeld auf dem Touchscreen zugeordnet werden.
- Nicht jedes Muster muss vorkommen.
- Unterschiedliche Muster können dieselbe Eingabe bedeuten.
- Muster können mehrmals vorkommen.
- Proband klickt selbst auf „weiter“ (bzw. „play“), sobald er bereit ist (das nächste Muster wird dann nach zwei Sekunden angezeigt).

- Bitte stets eine Zuordnung versuchen, aber nicht raten; wenn keine Zuordnung möglich ist, auf „X“ für „passen“ klicken.
- Wichtig: Es kommt auf die Richtigkeit der Eingaben an, nicht auf Schnelligkeit.
- Bitte keine unnötigen Verzögerungen zwischen Musteranzeige und Eingabe (falls Pause benötigt: bitte nach der Eingabe, bevor „weiter“ geklickt wird).
- Für die höchste Gesamt-Erkennungsrate unter allen Probanden wird ein Preis vergeben.

Es folgen Beispielmuster und die Erklärung der Eingabefelder (zunächst allgemein, später vor Beginn jedes Teilversuchs detaillierter). Anschließend werden letzte Rückfragen des Probanden beantwortet und der Gehörschutz angelegt. Zwischendurch bekommt der Proband immer mithilfe eines Piktogramms angezeigt, wann er den Gehörschutz abnehmen soll, um ein kurzes Briefing (Inhalt und Eingabemaske) zum neuen Teilversuch zu erhalten. Dieses beinhaltet Angaben zur räumlichen Kompatibilität der Eingabemaske mit der TSM, um Fehleingaben aufgrund von Verwechslungen zu verhindern. Zudem wird dem Probanden jeweils angekündigt, welche TSM-Bereiche und Darbietungsarten im nachfolgenden Teilversuch zum Einsatz kommen, um Effekte durch Überraschung oder Erschrecken zu vermeiden.

### 6.1.5 Probandenkollektiv

An der ersten Versuchsreihe nehmen 24 Personen ( $N = 24$ ) bei einer ausgeglichenen Geschlechter-Verteilung (12m, 12w) teil. Pro Geschlechtergruppe absolvieren je sechs Teilnehmer den Versuch in Reihenfolge 1 bzw. Reihenfolge 2 (vgl. Kapitel 6.1.3). Ein Einfluss von Geschlecht und Reihenfolge (bei vergleichenden Teilversuchen) auf die Versuchsergebnisse wird somit ausgeschlossen. Die Tabelle 6.13 zeigt eine Übersicht der demografischen Daten, taktilen Wahrnehmungsleistung und Fahrerfahrung des Probandenkollektivs. Dies entspricht den ersten drei Abschnitten des Fragebogens (vgl. Kapitel 5.4). Ergänzt werden die über den Fragebogen erfassten Daten um die Uhrzeit des Versuchsbeginns (Versuchsteil auf der TSM) sowie die prozentuale Angabe der Höhe der Rückenkontaktfläche im Verhältnis zur Schulterhöhe im Sitzen, da dieser Wert in der Literatur bisher kaum zu finden ist und dadurch über die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche hinaus eine Relevanz besitzt.

Probandenkollektiv der Versuchsreihe V1: N = 24   12 männlich, 12 weiblich   23 Rechtshänder, 1 Linkshänder						
Kategorie	Einheit	Mittelwert	Standardabw.	Minimum	Maximum	
Demografische Daten	Uhrzeit des Versuchsbeginns	[hh:mm]	13:32	± 2:45	8:55	19:10
	Alter	[Jahre]	25,8	± 3,2	21	31
	Körpergewicht	[kg]	69,5	± 14,8	47	106
	Körperhöhe (ohne Schuhe)	[cm]	174,4	± 9,3	157,0	189,5
	Schulterhöhe stehend (ohne Schuhe)	[cm]	145,0	± 8,2	130,0	160,0
	Schulterhöhe sitzend	[cm]	63,6	± 3,7	58,0	70,0
	Höhe Rückenkontaktfläche sitzend	[cm]	57,4	± 3,6	49,0	64,5
	Verhältnis Rückenkontaktfläche zu Schulterhöhe	[%]	90,2	± 2,4	83,1	95,0
Höhe der Fußaufstellfläche	[cm]	4,7	± 3,5	0,0	9,6	
Takttil	Zweipunktschwelle	[mm]	35,0	± 7,7	30,0	55,0
	Vibrationsempfinden	[Stufe 1-8]	7,7	± 0,4	7,0	8,0
Erfahrung	Fahrerfahrung im PKW (zeitlich)	[Jahre]	8,1	± 2,9	4,0	13,0
	Fahrerfahrung im PKW (Strecke im letzten Jahr)	[km]	8.625	± 8.086	100	30.000
	Anteil der Ablenkung durch akustische Reize	[%]	89,3	± 20,2	10,0	100,0

**Tabelle 6.13:** Probandenkollektiv der Versuchsreihe V1 (N = 24)

## 6.2 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden zunächst die ausgewählten statistischen Verfahren sowie die allgemeine Ergebnisdarstellung beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der einzelnen Teilversuche sowie Teilversuch-übergreifende Erkenntnisse wiedergegeben. Nach einer Auswertung des Fragebogens erfolgt abschließend eine Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse mit Bezug zu den aufgestellten Hypothesen.

### 6.2.1 Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung

Im Versuch werden die beschriebenen Faktoren gezielt variiert und dabei die abhängigen Variablen Erkennungsrate und Antwortzeit erfasst. Die beiden Variablen können als unabhängig voneinander betrachtet werden, da den Probanden mitgeteilt wird, dass es auf möglichst richtige Eingaben, jedoch nicht auf die dafür benötigte Zeit ankommt. Die Erkennungsrate ist somit für die grundsätzliche Auswahl geeigneter Muster ausschlaggebend. Die Antwortzeiten sind dagegen, wie bereits erwähnt, als Tendenzen und Indiz für die Effizienz der Muster zu interpretieren, da die Probanden nicht die Vorgabe erhalten, ihre Eingabe möglichst schnell zu tätigen und die Antwortzeit zudem von der unterschiedlichen Anzeigedauer der Muster beeinflusst wird.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 werden zunächst deskriptiv (beschreibend) wiedergegeben. Dabei erfolgt für jedes angezeigte taktile Muster die Angabe der Mittelwerte der Erkennungsrate (Anzahl richtiger Antworten im Verhältnis zu allen gegebenen Antworten) sowie der jeweils benötigten Antwortzeit vom Beginn der Muster-Darbietung



bis zur erfolgten Eingabe. Durch die Anzahl an Abfragen (24 Probanden x 2 Abfragen = 48 Abfragen pro Muster) besitzen diese Werte bereits eine entsprechende Aussagekraft bzgl. der generellen Eignung der vibrotaktilen Muster für die Informationsübermittlung. Zusätzlich zu den Mittelwerten wird die Standardabweichung über Fehlerbalken im Diagramm bzw. mithilfe des Symbols „ $\pm$ “ angegeben, um das Maß der Streuung abzubilden. Die Ergebnisse werden zunächst für jeden Probanden über die beiden erfolgten Anzeigen jedes Musters gemittelt. Die Erkennungsrate kann somit pro Muster und Proband 0 %, 50 % oder 100 % betragen, je nachdem ob das Muster bei den jeweils zwei Anzeigen gar nicht, einmal oder beide Male richtig erkannt wird. Auch die Werte der Antwortzeit werden aus den beiden Durchgängen pro Proband gemittelt. Die Abbildungen der nachfolgenden Kapitel geben die probandenübergreifenden Mittelwerte mit Standardabweichung der Erkennungsrate und Antwortzeit für jedes einzelne Muster wieder. Es erfolgt dabei eine Unterteilung in die definierten Teilversuche. Im Zuge einer inferentiellen (beurteilenden) statistischen Auswertung kommen in Versuchsreihe 1 drei Verfahren zum Einsatz, welche im Folgenden beschrieben werden.

Um die ermittelten Unterschiede der Erkennungsraten für die einzelnen Faktoren bzw. Faktorstufen auf Signifikanz zu untersuchen, werden jeweils mehrfaktorielle Varianzanalysen (= ANOVA – Analysis of Variance) durchgeführt. Da die Probanden keine Kenntnis von der Erfassung der Antwortzeit haben, können die beiden abhängigen Variablen Erkennungsrate und Antwortzeit als voneinander unabhängig betrachtet werden. Eine multivariate Betrachtung (MANOVA) ist somit nicht zweckmäßig oder notwendig. Für die Durchführung einer ANOVA (parametrisches Verfahren) werden die Daten auf Erfüllung der Hauptvoraussetzungen Messwiederholungsdesign, Intervallskalierung, Normalverteilung und Sphärizität überprüft (vgl. [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018A]). Das Messwiederholungsdesign (= verbundene Stichproben, „within subject design“) ist bedingt durch den Versuchsaufbau, da jedem Probanden alle Reizmuster präsentiert werden und keine Vergleiche zwischen unterschiedlichen Gruppen erfolgen. Die Intervallskalierung wird ebenfalls vorausgesetzt, da jedes Reizmuster jedem Probanden zweimal angezeigt wird und somit für jeden Probanden eine Erkennungsrate von 0 % (2 Fehler), 50 % (1 Fehler) oder 100 % (0 Fehler) möglich ist. Bzgl. der Normalverteilung bestehen in der Literatur unterschiedliche Auffassungen. Häufig wird davon gesprochen, dass die Daten „möglichst“ normalverteilt sein sollten, d. h. diese Voraussetzung nicht zwingend ist. In [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018A] wird davon ausgegangen, dass ab mehr als 25 Probanden eine Verletzung der Normalverteilungsvorgabe unproblematisch ist, was in der vorliegenden Versuchsreihe mit 24 Probanden bei jeweils zwei Abfragen als quasi erfüllt gelten kann. In aktuellen Statistikbüchern findet sich sogar häufiger der Hinweis, dass eine Normalverteilung für eine ANOVA gar

nicht notwendig ist, da der Test robust genug ist, auch mit nicht normalverteilten Daten umzugehen [ALBERT & MARX 2010, S. 140]. Diese Auffassung wird auch in [LINDMAN 1974, S. 31-33] vertreten, worin die Auswirkungen nicht normalverteilter Daten untersucht und diskutiert werden und zusammenfassend eine ausreichende Robustheit der ANOVA gegen nicht normalverteilte Daten bestätigt wird. Auf Basis dieser Erkenntnisse aus der Literatur wird auf die nicht durchgängig positiv ausfallenden Tests der Normalverteilung (visuell über Histogramme und statistisch über Kolmogorov-Smirnov-Tests) für die durchgeführten ANOVAs nicht weiter eingegangen. Stattdessen erfolgt die zusätzliche Durchführung nichtparametrischer Friedman-Tests, um die Erkenntnisse abzusichern (vgl. [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018A]). Eine weitere Voraussetzung für die Durchführung einer ANOVA ist die Varianzhomogenität in Form der sog. Sphärizität. Diese wird in der verwendeten Statistik-Software (IBM SPSS Statistics – Version 25) für jede ANOVA mit Messwiederholungsdesign automatisch mithilfe des Mauchly-Tests überprüft. Bei nicht erfüllter Sphärizität erfolgt eine Anpassung der Freiheitsgrade, indem diese mit dem Korrekturfaktor Epsilon ( $\epsilon$ ) multipliziert werden. Ist Epsilon nach Greenhouse-Geisser  $< 0.75$ , so wird diese vergleichsweise restriktive Korrektur verwendet [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018A]. Für alle durchgeführten ANOVAs werden auch die Effektgrößen in Form des  $\eta_p^2$ -Wertes (partielles Eta-Quadrat) mit ausgegeben, um die Aussagekraft des jeweiligen Vergleichs bzw. Unterschiedes zu bewerten. Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 140, S. 161] wird ab einem Eta-Quadrat-Wert von 0.01 von einem geringen, ab 0.06 von einem mittleren und ab 0.14 von einem erheblichen Effekt gesprochen. Einzelne Mittelwerts-Vergleiche im Rahmen der durchgeführten ANOVAs werden jeweils in Form einer (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt.

Wie bereits erwähnt, werden zusätzlich zu den beschriebenen Varianzanalysen auch nichtparametrische Friedman-Tests mit paarweisen (post-hoc) Vergleichen nach Dunn-Bonferroni für einzelne Faktoren durchgeführt, um die Ergebnisse auf mögliche signifikante Unterschiede zwischen den Faktorstufen zu überprüfen. Dies ermöglicht zusätzlich auch einen Teilversuch-übergreifenden Vergleich. Hierbei werden teilweise einzelne Ergebnisse in Form von Mittelwerten zusammengeführt, um übergeordnete Vergleiche ziehen zu können, welche die Auswahl geeigneter Muster für die Folgeversuche unterstützen. Die Ergebnisdarstellung der Friedman-Tests beinhaltet jeweils die Angabe zur Effektstärke in Form des Korrelationskoeffizienten  $r$ . Die Beurteilung der Effektstärke erfolgt nach Cohen (1992), wobei ein  $r$ -Wert von 0.1 einem schwachen, ein Wert von 0.3 einem mittleren und ein Wert von 0.5 einem starken Effekt entspricht [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018B]. In den Ergebnisdiagrammen werden signifikante Unterschiede, die mithilfe einer ANOVA oder eines Friedman-Tests ermittelt werden, zusätzlich zur

jeweils detaillierten Beschreibung im Text mithilfe von Klammern und Stern-Symbolen dargestellt. Ein Stern (\*) steht dabei für einen „signifikanten“ Unterschied ( $p < 0.05$ ), zwei Sterne (\*\*) stehen für einen „hoch signifikanten“ Unterschied ( $p < 0.01$ ) und drei Sterne (\*\*\*) beschreiben einen „höchst signifikanten“ Unterschied ( $p < 0.001$ ).

Zur Überprüfung von Zusammenhängen (insbesondere zwischen Erkennungsrate und Antwortzeit) werden außerdem Korrelationsanalysen nach Pearson für intervallskalierte Daten durchgeführt. Auf Basis der Freiheitsgrade ( $df = n - 2 = 22$ ), die sich aus der Probandenanzahl ( $n = 24$ ) ergibt, und des berechneten Korrelationskoeffizienten  $r$  wird mithilfe einer Signifikanztabelle (vgl. [SIEGLE 2015]) der jeweilige Signifikanzwert abgelesen und angegeben. Die Interpretation der signifikanten Korrelationen erfolgt über die in Tabelle 6.14 angegebenen Beschreibungen nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129].

<i>r</i> -Wert	Interpretation
0,90-1,00	sehr hohe Korrelation, sehr starke Beziehung
0,70-0,89	hohe Korrelation, ausgeprägte Beziehung
0,40-0,69	mäßige Korrelation, substantielle Beziehung
0,20-0,39	schwache Korrelation, definitive, aber geringe Beziehung
0,00-0,19	keine oder leichte Korrelation, Beziehung zu vernachlässigen

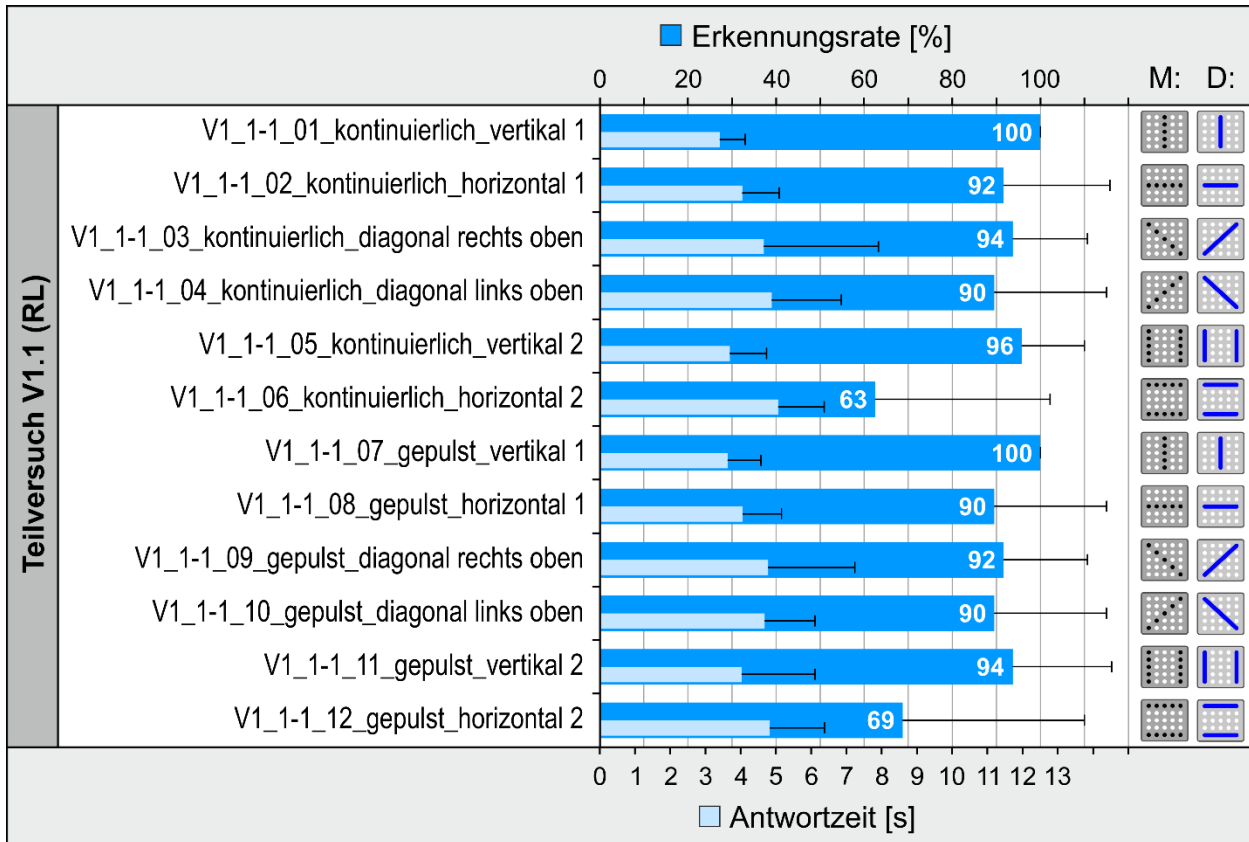
**Tabelle 6.14:** Interpretation von Korrelationen nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129]

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Abbildungen geben die Ergebnisse von Versuchsreihe 1 für alle Teilversuche wieder. Die Darstellungen enthalten für jedes Muster neben den Angaben der Mittelwerte (mit Standardabweichung) für Erkennungsrate und Antwortzeit in Form von blauen Balkendiagrammen auch Piktogramme für die Anordnung der Vibrationsmotoren sowie das jeweilige Eingabefeld der Probanden. Diese Piktogramme befinden sich jeweils rechts der Ergebnis-Balken und sind mit den Bezeichnungen M und D beschriftet (M: Motor-Anordnung, D: Display/Eingabefeld). Die Piktogramme sind dabei immer in derselben Richtung zu lesen wie die Werte der Erkennungsrate sowie die Kürzel M und D. Ferner werden die Ergebnisse der Unterschiedsprüfungen bzw. Teilversuch-übergreifenden Vergleiche nach Faktoren mithilfe von Abbildungen wiedergegeben, die orangene Balkendiagramme enthalten.

### 6.2.2 Ergebnisse – Orientierung, kontinuierlich/gepulst

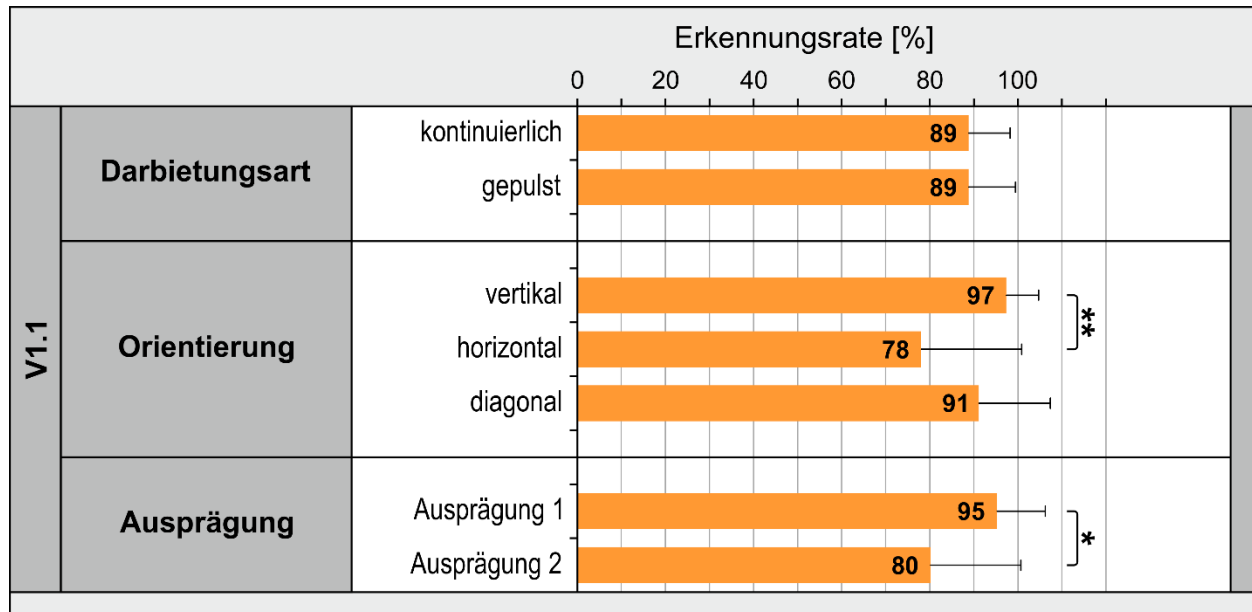
In Teilversuch V1.1 werden verschiedene Orientierungen von Mustern untersucht und verglichen. Zusätzlich werden Darbietungsart und Ausprägung variiert, wodurch jedem Probanden insgesamt 12 Reizmuster (jeweils zweimal) präsentiert werden. In Abbildung 6.2 werden die Mittelwerte der Erkennungsraten sowie der Antwortzeiten der dargebotenen Muster jeweils mit Standardabweichung visualisiert. Die durchschnittliche Erkennungsrate aller Muster in diesem Teilversuch liegt bei 88,9 % ( $\pm 11,5$  %), wobei die

Werte der einzelnen Muster zwischen 62,5 % und 100 % variieren. Eine Auswertung nach Faktoren wird in Abbildung 6.3 dargestellt.



**Abbildung 6.2:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) in V1.1 für einzelne Muster

Zur Untersuchung der Faktoren (unabhängigen Variablen) Darbietungsart (2 Stufen), Orientierung (3 Stufen) und Ausprägung (2 Stufen) wird eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 2x3x2-Design durchgeführt, welche ergibt, dass ein Effekt in Bezug auf die Orientierung besteht,  $F(1.33, 30.47) = 8.04$ ,  $p < 0.01$ ,  $\eta_p^2 = 0.259$  (Greenhouse-Geisser korrigiert). Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur kann der Schluss gezogen werden, dass die vertikale Orientierung von Mustern zu einer hoch signifikant höheren Erkennungsrate führt, als die horizontale Darbietung ( $p < 0.01$ ). In Bezug auf die Darbietungsart (kontinuierlich, gepulst) kann kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden, hierbei liegen sogar identische Mittelwerte für die Erkennungsraten vor (siehe nächster Abschnitt). Die Ausprägung wird als Faktor in die ANOVA integriert, jedoch wird hierfür keine Auswertung der Vergleichsprüfung vorgenommen, da sich die Art der Ausprägung zwischen den vertikalen und horizontalen Mustern (breit, schmal) und den diagonalen Mustern (nach rechts geneigt, nach links geneigt) unterscheidet.



**Abbildung 6.3:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten in V1.1 nach Faktoren mit Kennzeichnung signifikanter Unterschiede

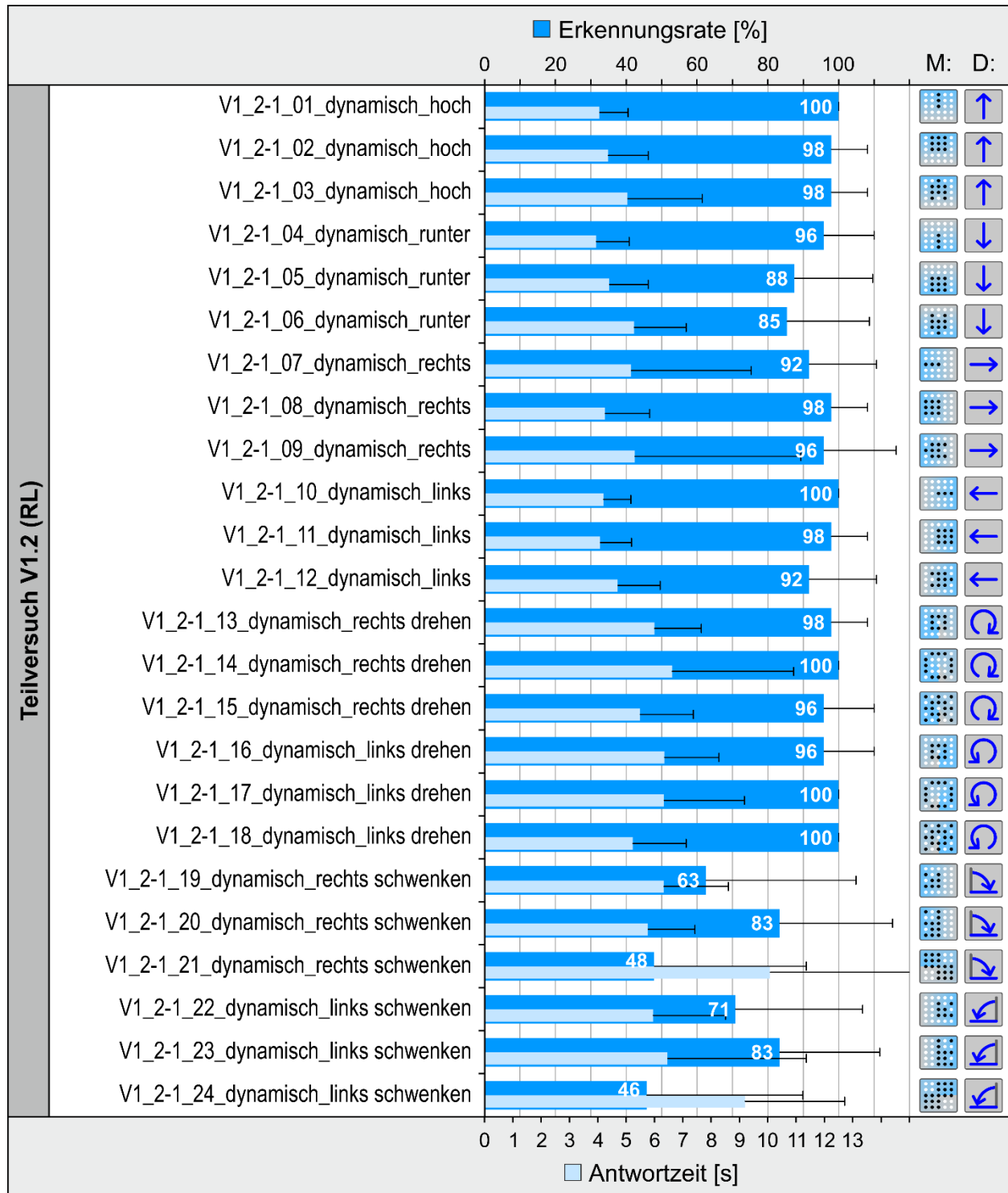
Zusätzlich zur durchgeführten ANOVA werden nichtparametrische Friedman-Tests (mit paarweisen Dunn-Bonferroni Vergleichen) durchgeführt. Hierzu werden die Datenreihen für jeweils einen der drei Faktoren in Form von Mittelwerten zusammengeführt. Bei der Darbietungsart ergeben sich dabei identische Mittelwerte der Erkennungsraten für die kontinuierliche Anzeige ( $88,9 \pm 9,4 \%$ ) und die gepulste Anzeige ( $88,9 \pm 10,6 \%$ ). Bei der Orientierung ergeben sich Mittelwerte von  $97,4 \pm 7,4 \%$  (vertikale Anzeige),  $78,1 \pm 22,8 \%$  (horizontale Anzeige) und  $91,1 \pm 16,3 \%$  (diagonale Anzeige). Der Friedman-Test zeigt hierbei einen höchst signifikanten Unterschied mit starkem Effekt ( $z=2.771$ ,  $p<0.001$ ,  $r=0.566$ ) zwischen vertikaler und horizontaler Darbietung. Im Kontext der Ausprägung werden die schmalen Varianten der horizontalen und vertikalen Muster mit den breiten Varianten verglichen. Die diagonalen Muster werden dabei nicht betrachtet. Es ergibt sich somit bei der Ausprägung eine durchschnittliche Erkennungsrate von  $95,3 \pm 10,9 \%$  für die schmale Anzeige (eine zentrale Motorenreihe bzw. -spalte) sowie eine Erkennungsrate von  $80,2 \pm 20,5 \%$  für die breite Anzeige (zwei äußere Motorenreihen bzw. -spalten). Dies stellt einen signifikanten Unterschied mit mittlerem Effekt dar ( $z=2.083$ ,  $p<0.05$ ,  $r=0.425$ ).

Um einen Zusammenhang zwischen der erfassten Erkennungsrate und der Antwortzeit zu prüfen, wird eine Korrelationsanalyse nach Pearson für intervallskalierte Daten durchgeführt. Demnach korreliert die Antwortzeit beim Teilversuch V1.1 hoch signifikant negativ mit der Erkennungsrate ( $r=-0.71$ ,  $df=22$ ,  $p<0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine hohe Korrelation bzw. eine ausgeprägte Beziehung vor. Muster, die generell besser erkannt werden, weisen demnach auch kürzere Antwortzeiten auf.

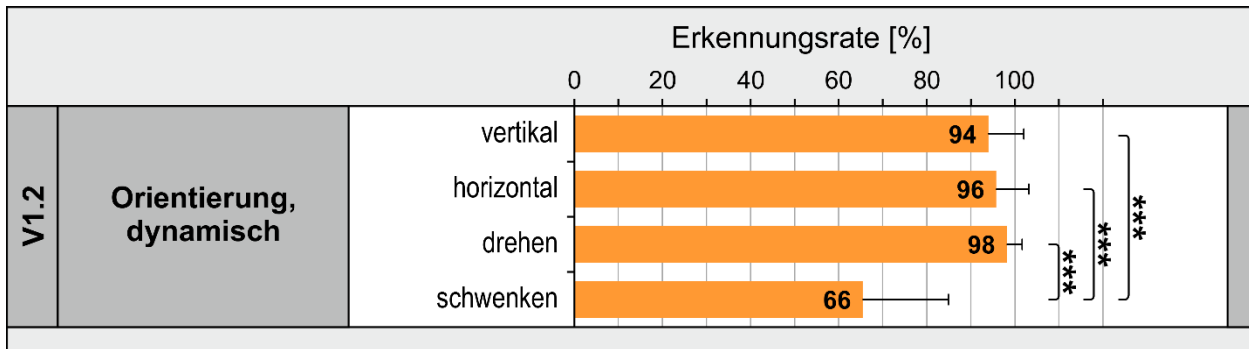
### 6.2.3 Ergebnisse – Orientierung, dynamisch

In Teilversuch V1.2 werden Muster untersucht und verglichen, die auf verschiedenen Bewegungsarten basieren und dadurch unterschiedliche dynamische Orientierungen aufweisen (horizontal, vertikal, drehend, schwenkend). Zusätzlich werden jeweils die Richtung sowie die Ausprägung variiert, wodurch jedem Probanden insgesamt 24 Reizmuster (jeweils zweimal) präsentiert werden. In Abbildung 6.4 werden die Mittelwerte der Erkennungsraten sowie der Antwortzeiten der dargebotenen Muster jeweils mit Standardabweichung visualisiert. Die durchschnittliche Erkennungsrate aller Muster in diesem Teilversuch liegt bei 88,5 % ( $\pm 16,0$  %), wobei die Werte der einzelnen Muster zwischen 45,8 % und 100 % variieren. Eine Auswertung nach Faktoren wird in Abbildung 6.5 dargestellt.

Zur Untersuchung der Faktoren Orientierung (4 Stufen), Richtung (2 Stufen) und Ausprägung (3 Stufen bzw. Varianten) wird eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 4x2x3-Design durchgeführt, welche ergibt, dass ein Effekt in Bezug auf die Orientierung besteht,  $F(1.53, 35.22) = 46.02$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.667$  (Greenhouse-Geisser korrigiert). Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur kann der Schluss gezogen werden, dass die Erkennungsrate von Mustern mit der dynamischen Orientierung „schwenken“ höchst signifikant niedriger ist, als die Erkennungsrate von horizontal ( $p < 0.001$ ), vertikal ( $p < 0.001$ ) oder drehend ( $p < 0.001$ ) orientierten Mustern. Die Faktoren Richtung und Ausprägung werden in die ANOVA integriert, jedoch wird hierfür jeweils keine übergreifende Auswertung der Vergleichsprüfung vorgenommen, da sich die Art der Variation von Richtung und Ausprägung zwischen den unterschiedlichen dynamischen Orientierungen jeweils unterscheidet. Die Ergebnisse der einzelnen Muster zeigen, dass für die sechs verschiedenen dynamischen Orientierungen jeweils keine der verwendeten drei Varianten dominiert, sodass hier weiterhin Gestaltungsfreiraum besteht. Eine Ausnahme bilden die Schwenk-Muster (Nr. 19 bis 24), von denen die mittlere Variante (Nr. 20 bzw. 23) zuverlässiger erkannt wird. Jedoch schneidet diese Orientierung generell höchst signifikant schlechter ab (s. o.) und wird daher für die weiteren Versuchsreihen nicht empfohlen.



**Abbildung 6.4:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) in V1.2 für einzelne Muster



**Abbildung 6.5:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten in V1.2 für den Faktor Orientierung mit Kennzeichnung signifikanter Unterschiede

Zusätzlich zur durchgeführten ANOVA wird für den Faktor Orientierung ein nichtparametrischer Friedman-Test (mit paarweisen Dunn-Bonferroni Vergleichen) durchgeführt. Hierzu werden die Datenreihen für den Faktor Orientierung in Form von Mittelwerten zusammengeführt. Es ergeben sich dabei gemittelte Erkennungsraten für vertikale ( $94,1 \pm 8,0 \%$ ), horizontale ( $95,8 \pm 7,4 \%$ ), drehende ( $98,3 \pm 3,5 \%$ ) und schwenkende ( $65,6 \pm 19,4 \%$ ) dynamische Orientierung. Der Friedman-Test zeigt dabei jeweils einen höchst signifikanten Unterschied mit mittlerem Effekt zwischen der schwenkenden Orientierung und den drei übrigen Orientierungen vertikal ( $z=1.812$ ,  $p<0.001$ ,  $r=0.340$ ), horizontal ( $z=1.667$ ,  $p<0.001$ ,  $r=0.370$ ) und drehend ( $z=2.104$ ,  $p<0.001$ ,  $r=0.429$ ).

Um einen Zusammenhang zwischen der erfassten Erkennungsrate und der Antwortzeit zu prüfen, wird eine Korrelationsanalyse nach Pearson für intervallskalierte Daten durchgeführt. Demnach korreliert die Antwortzeit beim Teilversuch V1.2 hoch signifikant negativ mit der Erkennungsrate ( $r=-0.78$ ,  $df=22$ ,  $p<0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine hohe Korrelation bzw. eine ausgeprägte Beziehung vor. Muster, die generell besser erkannt werden, weisen demnach auch kürzere Antwortzeiten auf.

#### 6.2.4 Ergebnisse – Richtungen

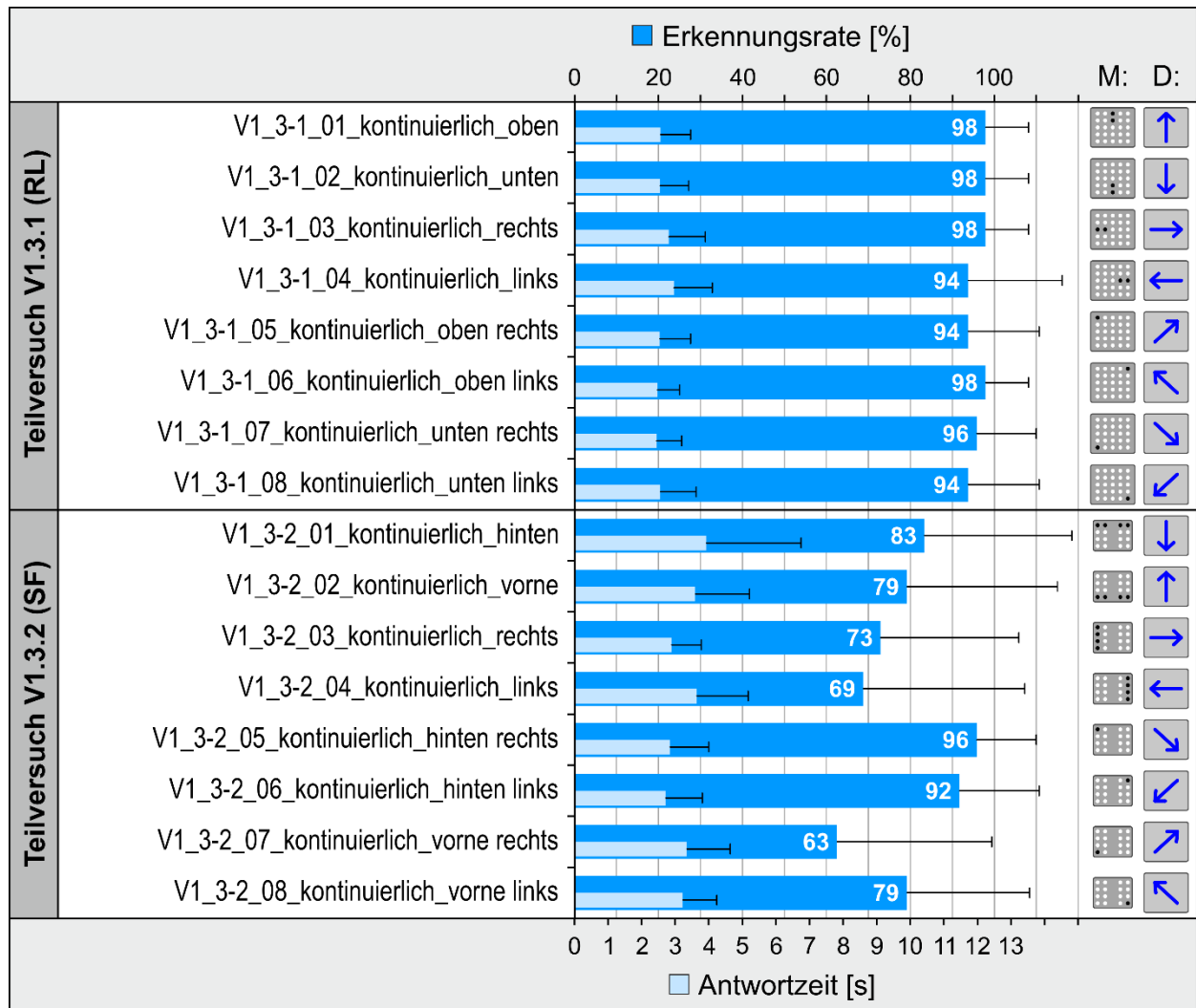
Der Faktor Richtung wird mithilfe der Teilversuche V1.3.1, V1.3.2, V1.4.1, V1.4.2, V1.5.1 und V1.5.2 untersucht. Es folgen Visualisierungen und Auswertungen, die sich teilweise auf einzelne Teilversuche beziehen sowie teilweise übergeordnete Zusammenhänge betreffen.

In den Teilversuchen V1.3.1, V1.3.2, V1.4.1 und V1.4.2 werden verschiedene Richtungs-Muster untersucht und verglichen, wobei stets aus 8 Richtungen gewählt werden muss. Zusätzlich werden Darbietungsart und TSM-Bereich variiert, wodurch jedem Probanden insgesamt 32 Reizmuster (jeweils zweimal) präsentiert werden. Es erfolgt dabei eine gleichmäßige Unterteilung in die vier Teilversuche mit jeweils 8 Mustern. Die Teil-



versuche V1.3.1 und V1.4.1 betreffen den TSM-Bereich Rückenlehne, während die Muster in V1.3.2 und V1.4.2 über die Sitzfläche angezeigt werden. In Abbildung 6.6 (V1.3) und Abbildung 6.7 (V1.4) werden die Mittelwerte der Erkennungsraten sowie der Antwortzeiten der dargebotenen Muster jeweils mit Standardabweichung visualisiert.

Die Auswertung erfolgt zunächst jeweils separat für die beiden TSM-Bereiche Rückenlehne und Sitzfläche. Im Anschluss werden die zusammengeführten Mittelwerte der beiden Bereiche miteinander verglichen (siehe Abbildung 6.8).



**Abbildung 6.6:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) in V1.3 für einzelne Muster

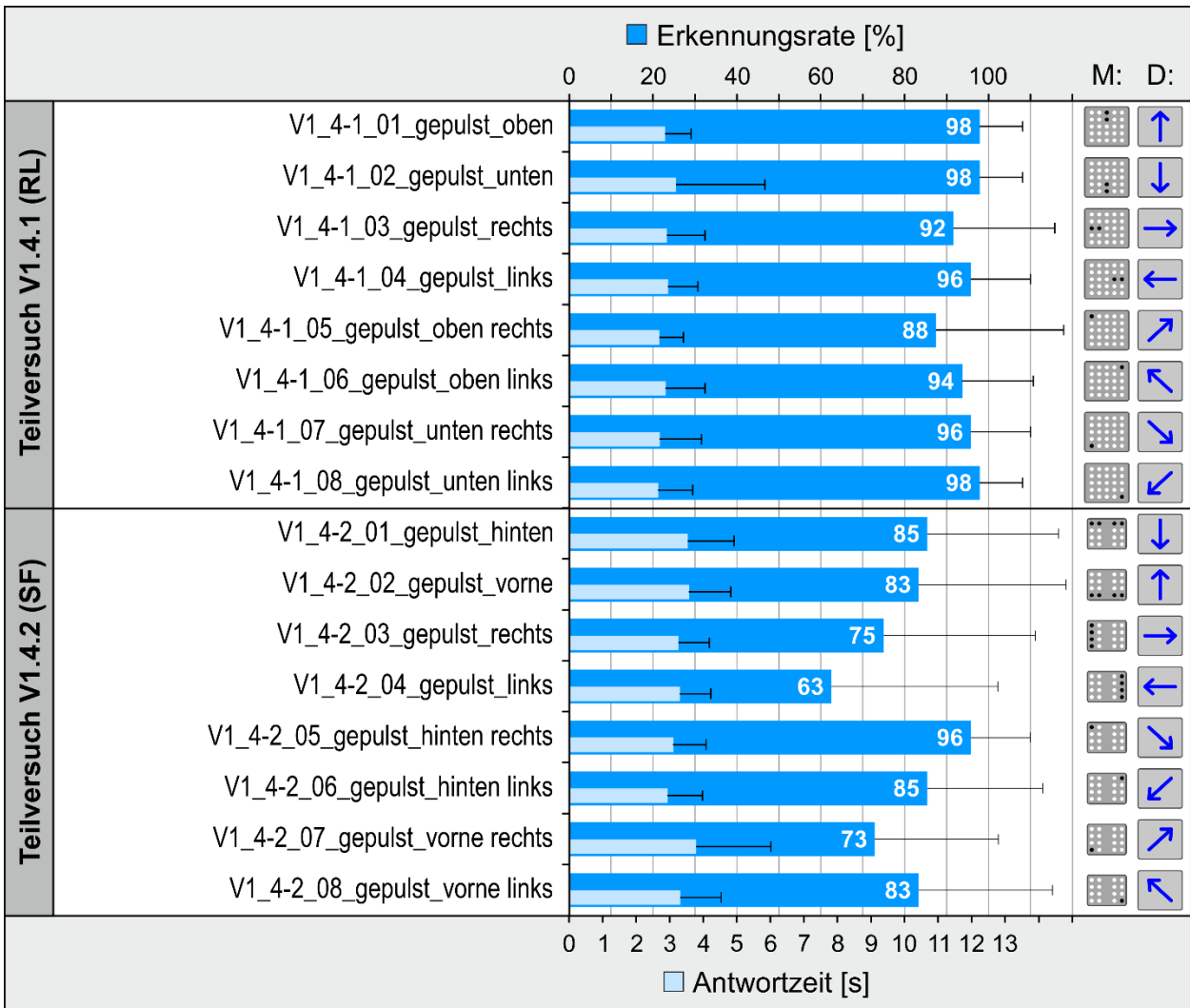


Abbildung 6.7: Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) in V1.4 für einzelne Muster

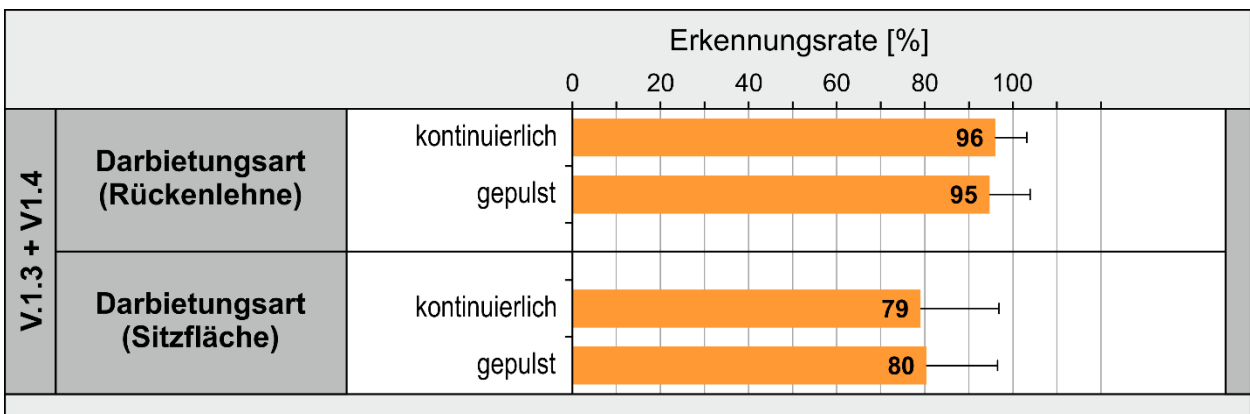
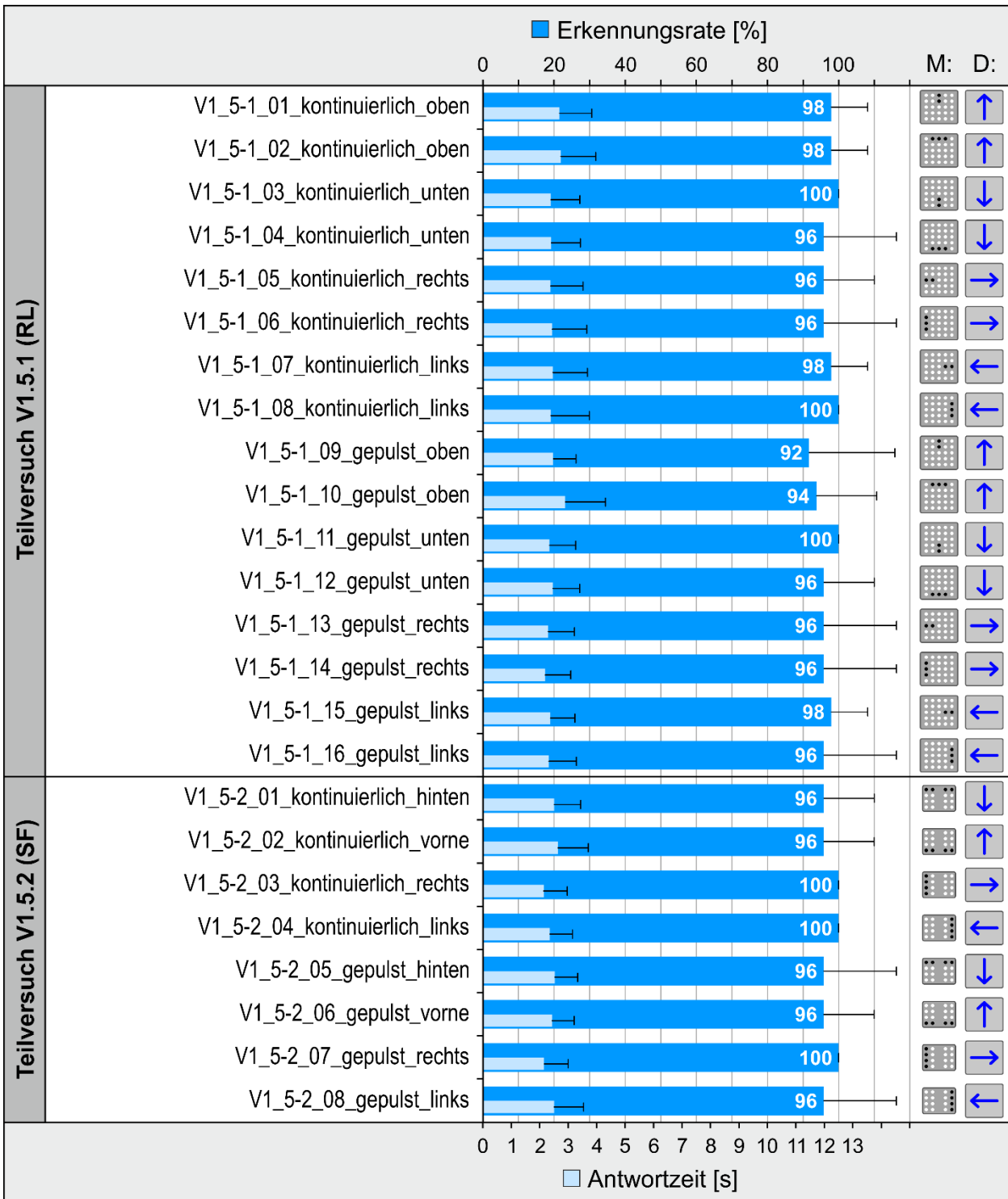


Abbildung 6.8: Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten in V1.3 und V1.4 für den Faktor Darbietungsart

Zur Untersuchung der Faktoren Darbietungsart (2 Stufen) und Richtung (8 Stufen) für den TSM-Bereich Rückenlehne wird eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 2x8-Design durchgeführt, welche die Ergebnisse der relevanten Teilversuche V1.3.1 und V1.4.1 einbezieht. Dabei kann weder für den Faktor Darbietungsart ( $F(1.00, 23.00) = 0.63, p=0.435$ ) noch für den Faktor Richtung ( $F(3.25, 74.79) = 0.95, p=0.427$ , Greenhouse-Geisser korrigiert) ein signifikanter Effekt identifiziert werden. Generell liegen die Erkennungsraten in den betreffenden Teilversuchen sehr hoch und eng beieinander, was ohnehin nicht auf signifikante Unterschiede hindeutet.

Zur Untersuchung der Faktoren Darbietungsart (2 Stufen) und Richtung (8 Stufen) für den TSM-Bereich Sitzfläche wird eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 2x8-Design durchgeführt, welche die Ergebnisse der relevanten Teilversuche V1.3.2 und V1.4.2 einbezieht. Für den Faktor Darbietungsart ( $F(1.00, 23.00) = 0.34, p=0.564$ ) kann dabei kein signifikanter Effekt identifiziert werden. Für den Faktor Richtung wird ein Effekt nachgewiesen,  $F(7.00, 161.00) = 4.82, p<0.001, \eta_p^2=0.173$ . Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur kann der Schluss gezogen werden, dass die Erkennungsrate der Richtung „hinten rechts“ ( $96 \pm 14\%$ ) signifikant ( $p<0.05$ ) höher liegt, als die Erkennungsraten der Richtungen „rechts“ ( $74 \pm 35\%$ ) und „vorne rechts“ ( $68 \pm 33\%$ ) sowie hoch signifikant ( $p<0.01$ ) höher als die Erkennungsrate der Richtung „links“ ( $66 \pm 39\%$ ). Diese Unterschiede zwischen einzelnen Richtungen werden jedoch nicht als ausschlaggebend für die weitere Musterauswahl gesehen, da hierfür grundlegendere Vergleiche relevant sind.

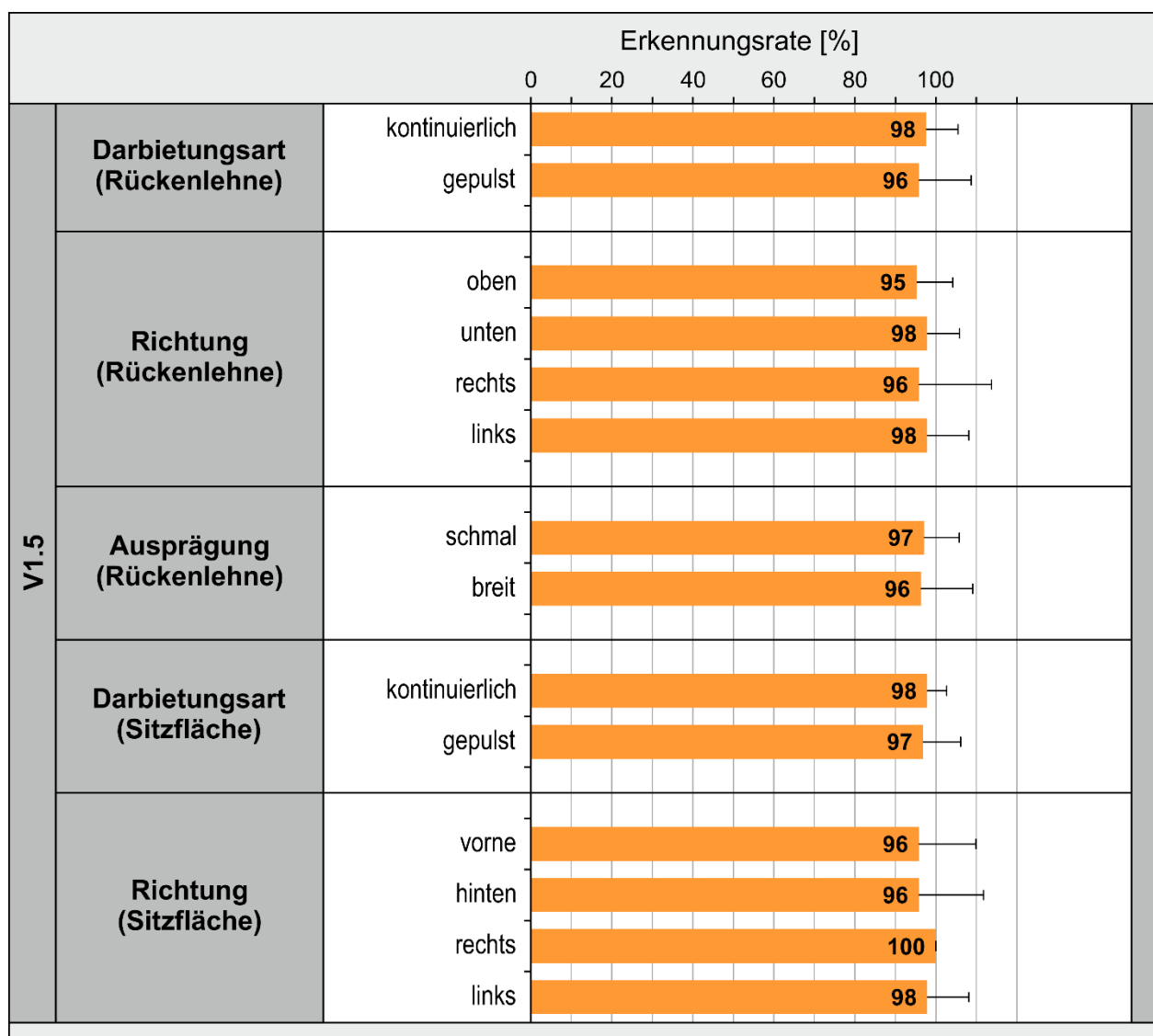
In den Teilversuchen V1.5.1 und V1.5.2 werden verschiedene Richtungs-Muster untersucht und verglichen, wobei stets aus 4 Richtungen gewählt werden muss. Zusätzlich werden Darbietungsart und TSM-Bereich sowie für die Anzeige an der Rückenlehne die Ausprägung variiert, wodurch jedem Probanden insgesamt 24 Reizmuster (jeweils zweimal) präsentiert werden. Hiervon werden 16 Reizmuster in V1.5.1 an der Rückenlehne angezeigt sowie 8 Reizmuster in V1.5.2 auf der Sitzfläche. In Abbildung 6.9 werden die Mittelwerte der Erkennungsraten sowie der Antwortzeiten der dargebotenen Muster jeweils mit Standardabweichung visualisiert.



**Abbildung 6.9:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) in V1.5 für die einzelnen Muster

Die Erkennungsraten in Teilversuch V1.5.1 (Rückenlehne) liegen generell sehr hoch und eng beieinander, was nicht auf signifikante Unterschiede hindeutet. Eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 2x4x2-Design zur Untersuchung der Faktoren Darbietungsart (2 Stufen), Richtung (4 Stufen) und Ausprägung (2 Stufen bzw. Varianten) bestätigt dies. Es können keine signifikanten Effekte für die Darbietungsart

( $F(1.00, 23.00) = 2.48, p=0.129$ ), Richtung ( $F(1.56, 35.91) = 0.91, p=0.390$ , Greenhouse-Geisser korrigiert) oder Ausprägung ( $F(1.00, 23.00) = 0.26, p=0.612$ ) identifiziert werden. Auch die Erkennungsraten in Teilversuch V1.5.2 (Sitzfläche) liegen generell sehr hoch und eng beieinander. Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 2x4-Design zur Untersuchung der Faktoren Darbietungsart (2 Stufen) und Richtung (4 Stufen) bestätigt auch hier, dass keine signifikanten Unterschiede vorliegen. Es können somit keine signifikanten Effekte für die Darbietungsart ( $F(1.00, 23.00) = 0.66, p=0.426$ ) oder Richtung ( $F(1.77, 40.67) = 0.75, p=0.463$ , Greenhouse-Geisser korrigiert) identifiziert werden. Die verglichenen Mittelwerte der beiden beschriebenen Unterschiedsprüfungen (ANOVAs) werden in Abbildung 6.10 dargestellt.

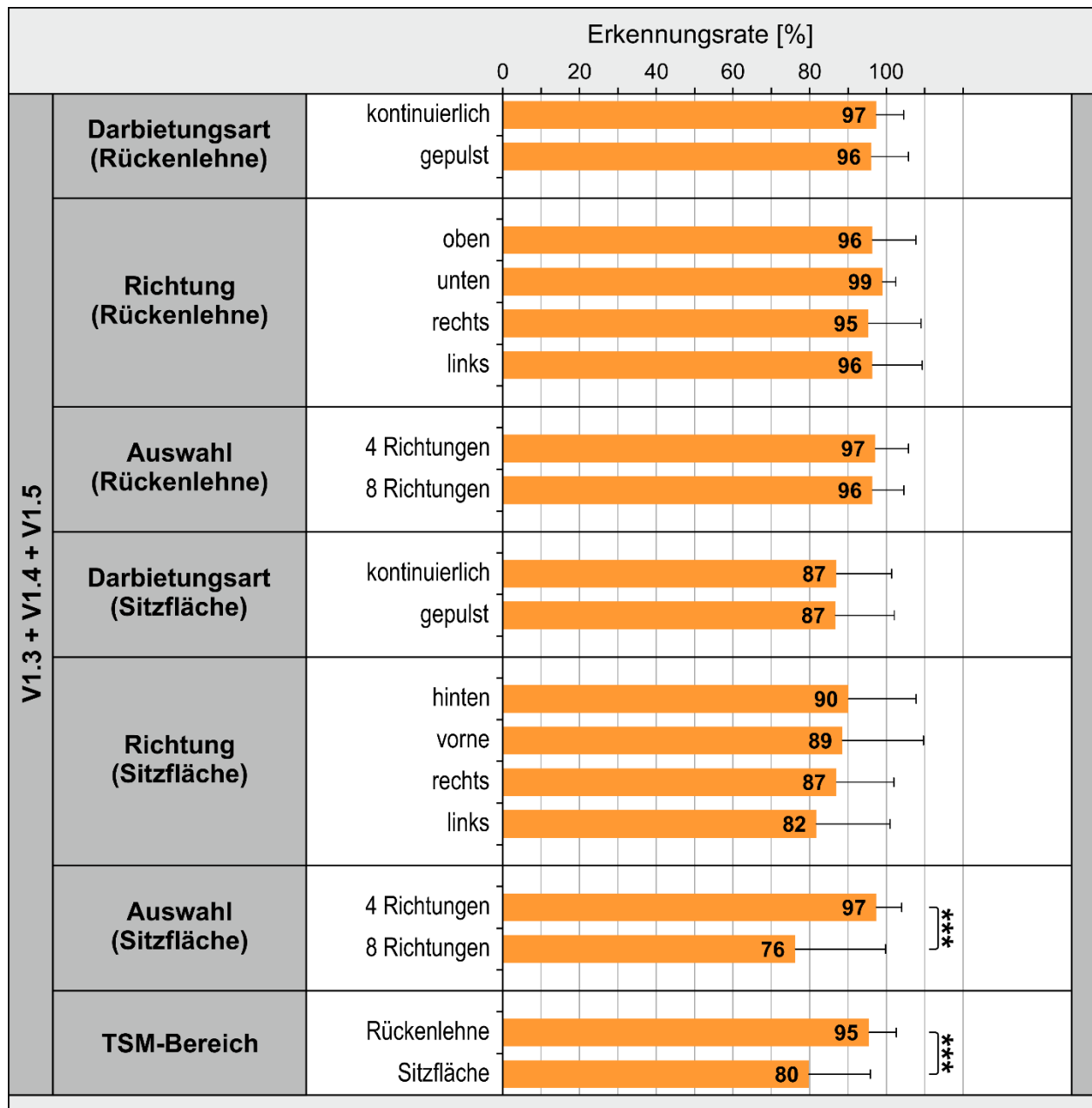


**Abbildung 6.10:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten in V1.5 nach Faktoren

Um den Faktor Auswahl (aus 4 bzw. aus 8 Richtungen) in die Auswertung zu integrieren, wird für die Faktoren Darbietungsart (2 Stufen), Richtung (4 Stufen) und Auswahl (2 Stufen) für den TSM-Bereich Rückenlehne eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 2x4x2-Design durchgeführt, welche die Ergebnisse der relevanten Teilversuche V1.3.1, V1.4.1 und V1.5.1 (nur Ausprägung „schmal“ berücksichtigt, da vergleichbar mit den anderen beiden Teilversuchen) einbezieht. Dabei können keine signifikanten Effekte für die Darbietungsart ( $F(1.00, 23.00) = 1.50, p=0.233$ ), Richtung ( $F(1.86, 42.74) = 0.74, p=0.474$ , Greenhouse-Geisser korrigiert) oder Auswahl ( $F(1.00, 23.00) = 0.68, p=0.417$ ) identifiziert werden.

Zur Untersuchung der Faktoren Darbietungsart (2 Stufen), Richtung (4 Stufen) und Auswahl (2 Stufen) für den TSM-Bereich Sitzfläche wird eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 2x4x2-Design durchgeführt, welche die Ergebnisse der relevanten Teilversuche V1.3.2, V1.4.2 und V1.5.2 (nur Ausprägung „schmal“ berücksichtigt, da vergleichbar mit den anderen beiden Teilversuchen) einbezieht. Für die Darbietungsart ( $F(1.00, 23.00) = 0.02, p=0.901$ ) sowie für die Richtung ( $F(3.00, 69.00) = 1.66, p=0.067$ ) können dabei keine signifikanten Effekte identifiziert werden. Es wird jedoch ein Effekt in Bezug auf den Faktor Auswahl ( $F(1.00, 23.00) = 25.81, p<0.001, \eta_p^2=0.529$ ) nachgewiesen. Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur kann der Schluss gezogen werden, dass Muster höchst signifikant besser erkannt werden, wenn nur aus 4 Richtungen (Erkennungsrate  $97,4 \pm 6,6$  %) statt aus 8 Richtungen (Erkennungsrate  $76,3 \pm 23,5$  %) gewählt werden muss ( $p<0.001$ ). Die verglichenen Mittelwerte der beiden beschriebenen Unterschiedsprüfungen (ANOVAs) werden in Abbildung 6.11 dargestellt. Ein zusätzlich durchgeführter Friedman-Test für den Faktor Auswahl auf Basis der zusammengeführten Datenreihen in Form von Mittelwerten bestätigt einen höchst signifikanten Unterschied mit starkem Effekt zwischen der Auswahl aus 4 Richtungen und 8 Richtungen ( $z=18.000, p<0.001, r=3.674$ ).

Ein weiterer Teilversuch-übergreifender Friedman-Test für den Faktor TSM-Bereich auf Basis der zusammengeführten Datenreihen in Form von Mittelwerten zeigt zudem einen höchst signifikanten Unterschied mit starkem Effekt zwischen der Anzeige über die Rückenlehne (V1.3.1 und V1.4.1) im Vergleich zur Sitzfläche (V1.3.2 und V1.4.2) ( $z=21.000, p<0.001, r=4.287$ ). Auch die zugehörigen Mittelwerte dieses Vergleichs sind in Abbildung 6.11 dargestellt.



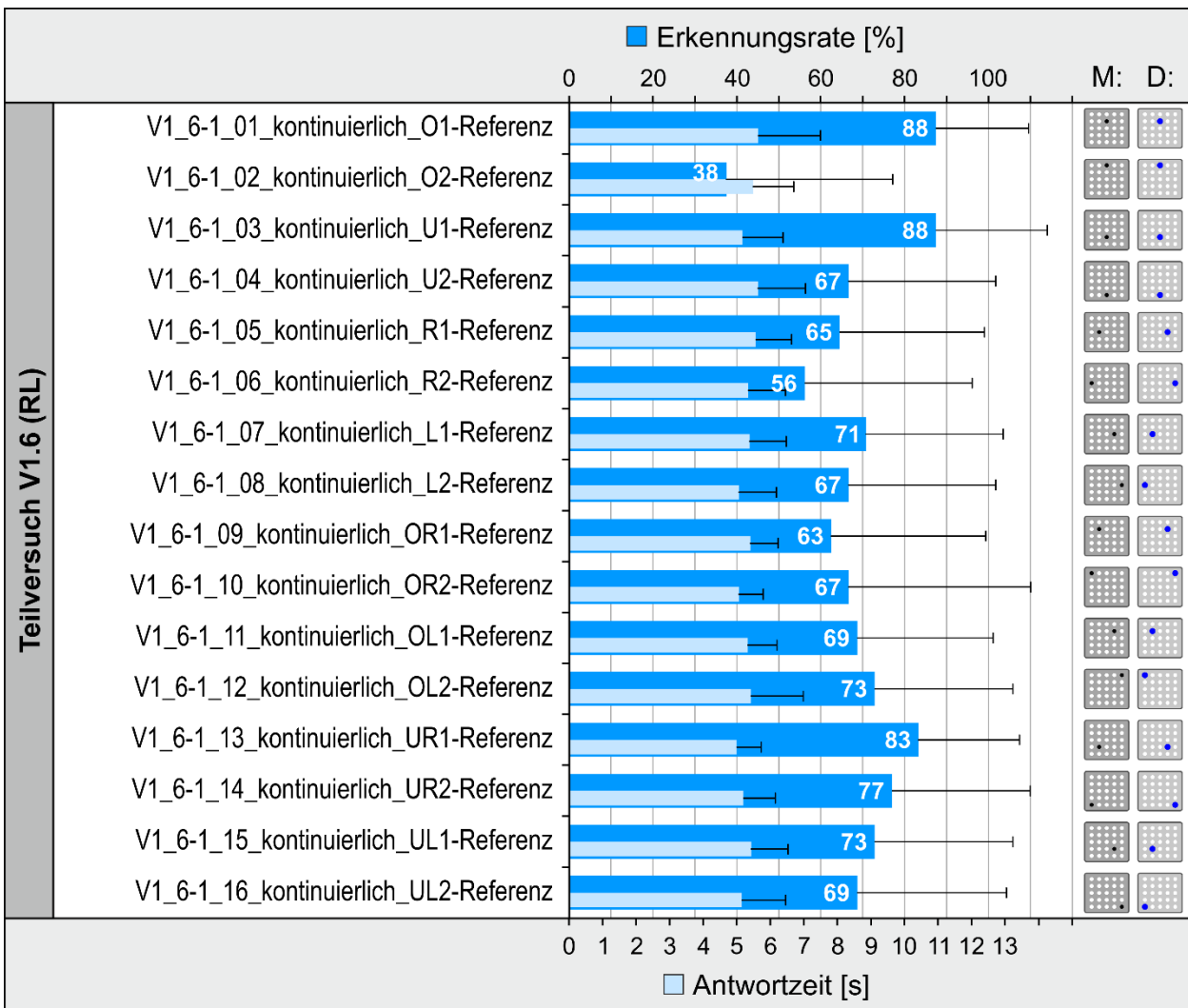
**Abbildung 6.11:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten in V1.3, V1.4 und V1.5 nach Faktoren mit signifikanten Unterschieden

Um einen Zusammenhang zwischen der erfassten Erkennungsrate und der Antwortzeit zu prüfen, werden Korrelationsanalysen nach Pearson für intervallskalierte Daten für die zusammengehörigen Teilversuche V1.3 und V1.4 sowie anschließend für Teilversuch V1.5 durchgeführt. Demnach korreliert die Antwortzeit bei V1.3.1, V1.3.2, V1.4.1 und V1.4.2 insgesamt hoch signifikant negativ mit der Erkennungsrate ( $r=-0.67$ ,  $df=22$ ,  $p<0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine mäßige Korrelation bzw. eine substantielle Beziehung vor. Auch bei V1.5.1 und V1.5.2 korreliert die Antwortzeit signifikant negativ mit der Erkennungsrate ( $r=-0.40$ ,  $df=22$ ,  $p<0.05$ ), was ebenfalls einer mäßigen Korrelation bzw. substantiellen Beziehung entspricht. Muster, die generell

besser erkannt werden, weisen demnach in beiden Fällen auch kürzere Antwortzeiten auf.

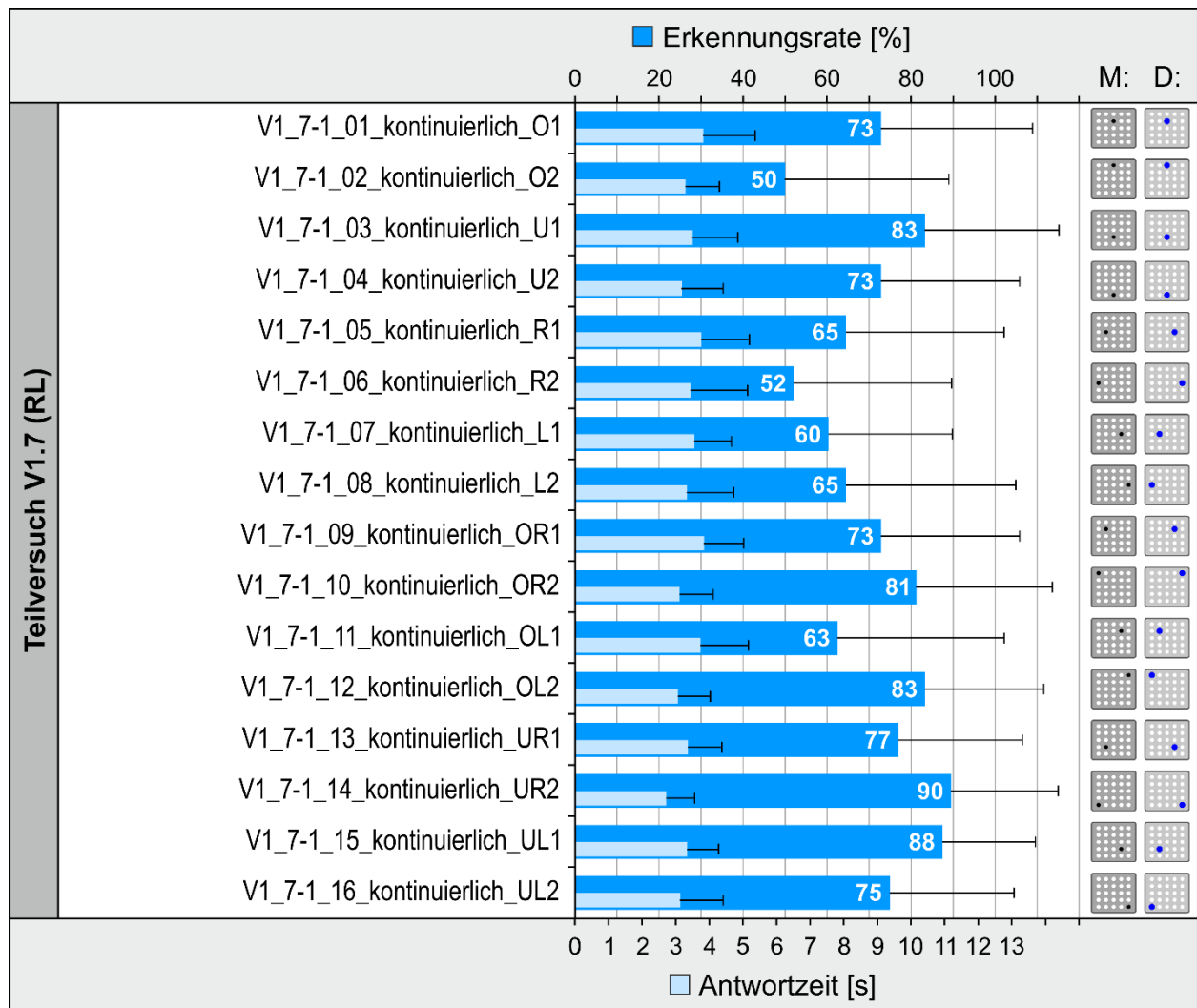
### 6.2.5 Ergebnisse – Punktuelle Reize

In den Teilversuchen V1.6 und V1.7 werden Muster untersucht und verglichen, die in Form von punktuellen Reizen durch Aktivierung von einzelnen Motoren realisiert werden. Dies erfolgt in V1.6 mit der vorgeschalteten Anzeige des mittleren Motors als Referenz (für zwei Sekunden, die bei der Auswertung der Antwortzeit herausgerechnet werden), während in V1.7 auf diese verzichtet wird. In jedem der beiden Teilversuche werden dem Probanden 8 Richtungen in je 2 Ausprägungen (innerer und äußerer „Ring“), also insgesamt 16 Reizmuster (jeweils zweimal) präsentiert. In Abbildung 6.12 (V1.6) und Abbildung 6.13 (V1.7) werden die Mittelwerte der Erkennungsraten sowie der Antwortzeiten der dargebotenen Muster jeweils mit Standardabweichung visualisiert.



**Abbildung 6.12:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) in V1.6 für die einzelnen Muster



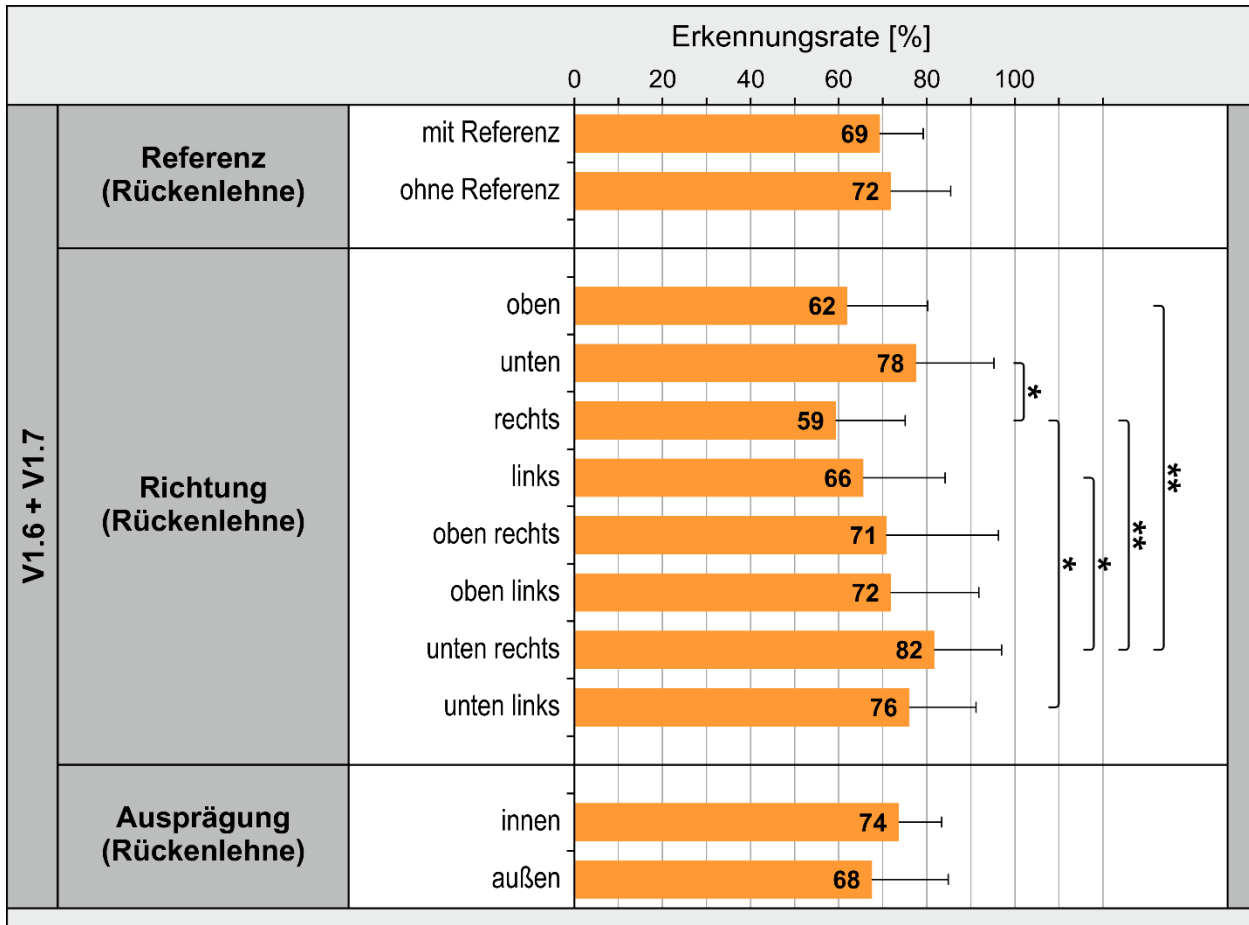


**Abbildung 6.13:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) in V1.7 für die einzelnen Muster

Zur Untersuchung der Faktoren Referenz (2 Stufen), Richtung (8 Stufen) und Ausprägung (2 Stufen) für den TSM-Bereich Rückenlehne wird eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im  $2 \times 8 \times 2$ -Design durchgeführt, welche die Ergebnisse der relevanten Teilversuche V1.6 und V1.7 einbezieht. Für die Referenz ( $F(1.00, 23.00) = 1.07$ ,  $p=0.312$ ) sowie für die Ausprägung ( $F(1.00, 23.00) = 2.49$ ,  $p=0.128$ ) können dabei keine signifikanten Effekte identifiziert werden. Es wird jedoch ein Effekt in Bezug auf den Faktor Richtung ( $F(7.00, 161.00) = 5.45$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta_p^2=0.191$ ) nachgewiesen.

Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur können folgende Schlüsse gezogen werden. Die Erkennungsrate der Richtung „unten rechts“ ist hoch signifikant höher als die der Richtungen „oben“ ( $p<0.01$ ) und „rechts“ ( $p<0.01$ ) sowie signifikant höher als die Erkennungsrate der Richtung „links“ ( $p<0.05$ ). Die Erkennungsrate der Richtung „unten links“ ist signifikant höher als die der Richtung „rechts“ ( $p<0.05$ ). Die Erkennungsrate der Rich-

tung „unten“ ist signifikant höher als die der Richtung „rechts“ ( $p < 0.05$ ). Es lässt sich festhalten, dass die Erkennungsraten von Richtungs-Mustern im unteren Bereich der Rückenlehne tendenziell höher sind als in den oberen Bereichen. Die verglichenen Mittelwerte der beschriebenen Unterschiedsprüfungen werden in Abbildung 6.14 dargestellt.



**Abbildung 6.14:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten in V1.6 u. V1.7 nach Faktoren mit Kennzeichnung signifikanter Unterschiede

Um einen Zusammenhang zwischen der erfassten Erkennungsrate und der Antwortzeit zu prüfen, werden für die beiden Teilversuche Korrelationsanalysen nach Pearson für intervallskalierte Daten durchgeführt. Die Korrelationsanalyse für V1.6 ergibt, dass die Antwortzeit in diesem Teilversuch nicht signifikant mit der Erkennungsrate korreliert ( $r = -0.23$ ,  $df = 22$ ,  $p > 0.10$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt jedoch eine schwache Korrelation bzw. eine definitive, aber geringe Beziehung vor. Muster, die generell besser erkannt werden, weisen demnach tendenziell auch kürzere Antwortzeiten auf. Die Korrelationsanalyse für V1.7 ergibt, dass die Antwortzeit hier signifikant negativ mit der Erkennungsrate korreliert ( $r = -0.44$ ,  $df = 22$ ,  $p < 0.05$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine mäßige Korrelation bzw. eine substantielle Beziehung vor. Mus-

ter, die generell besser erkannt werden, weisen demnach auch kürzere Antwortzeiten auf.

### 6.2.6 Ergebnisse – Radialer Verlauf

In den Teilversuchen V1.8 und V1.9 werden dynamische Muster an der Rückenlehne untersucht und verglichen, die bzgl. des Faktors Richtung einen radialen Verlauf nach innen (rein) oder nach außen (raus) aufweisen. In V1.8 werden Muster mit 7 verschiedenen Anordnungen (mit jeweils einer Bewegungsrichtung) verglichen, während in V1.9 die Erkennung von 4 Mustern (mit je zwei Bewegungsrichtungen) untersucht wird. Somit werden dem Probanden in V1.8 insgesamt 14 Muster (jeweils zweimal) sowie in V1.9 insgesamt 8 Muster (jeweils zweimal) präsentiert. In Abbildung 6.15 werden die Mittelwerte der Erkennungsraten sowie der Antwortzeiten der dargebotenen Muster in V1.8 jeweils mit Standardabweichung visualisiert. Eine Auswertung nach Faktoren wird in Abbildung 6.16 dargestellt.

Zur Untersuchung der Faktoren Anordnung (7 Stufen) und Richtung (2 Stufen) für den TSM-Bereich Rückenlehne wird eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 7x2-Design durchgeführt, welche die Ergebnisse des relevanten Teilversuchs V1.8 einbezieht. Für die Richtung ( $F(1.00, 23.00) = 2.31, p=0.142$ ) kann dabei kein signifikanter Effekt identifiziert werden. Es wird jedoch ein Effekt in Bezug auf den Faktor Anordnung nachgewiesen,  $F(3.61, 83.08) = 7.03, p<0.001, \eta_p^2=0.234$ , Greenhouse-Geisser korrigiert. Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur kann der Schluss gezogen werden, dass das Muster „vertikal, schmal“, unabhängig von der Richtung (rein/raus), hoch signifikant schlechter erkennbar ist, als die Muster „horizontal, breit“ ( $p<0.01$ ) und „Kombi-Form“ ( $p<0.01$ ) sowie höchst signifikant schlechter als das Muster „X-Form“ ( $p<0.001$ ).

Zusätzlich zur durchgeführten ANOVA wird für den Faktor Anordnung ein einfaktorierlicher, paarweiser Vergleich durch einen nichtparametrischen Friedman-Test (mit paarweisen Dunn-Bonferroni Vergleichen) durchgeführt. Hierzu werden die Datenreihen für den Faktor Anordnung in Form von Mittelwerten der beiden Richtungen (rein/raus) zusammengeführt. Es ergeben sich dabei gemittelte Erkennungsraten für die Richtungen „vertikal, schmal“ ( $80,2 \pm 18,0 \%$ ), „vertikal, breit“ ( $92,7 \pm 15,6 \%$ ), „horizontal, schmal“ ( $93,8 \pm 15,2 \%$ ), „horizontal, breit“ ( $99,0 \pm 5,1 \%$ ), „Plus-Form“ ( $89,6 \pm 19,4 \%$ ), „X-Form“ ( $100,0 \pm 0,0 \%$ ) und „Kombi-Form“ ( $97,9 \pm 7,1 \%$ ). Der Friedman-Test zeigt dabei jeweils einen signifikanten Unterschied mit mittlerem Effekt zwischen „vertikal, schmal“ und „horizontal, breit“ ( $z=-2.000, p<0.05, r=0.408$ ), „X-Form“ ( $z=-2.146, p<0.05, r=0.438$ ) sowie „Kombi-Form“ ( $z=-1.896, p<0.05, r=0.387$ ) und bestätigt damit die Ergebnisse der ANOVA.

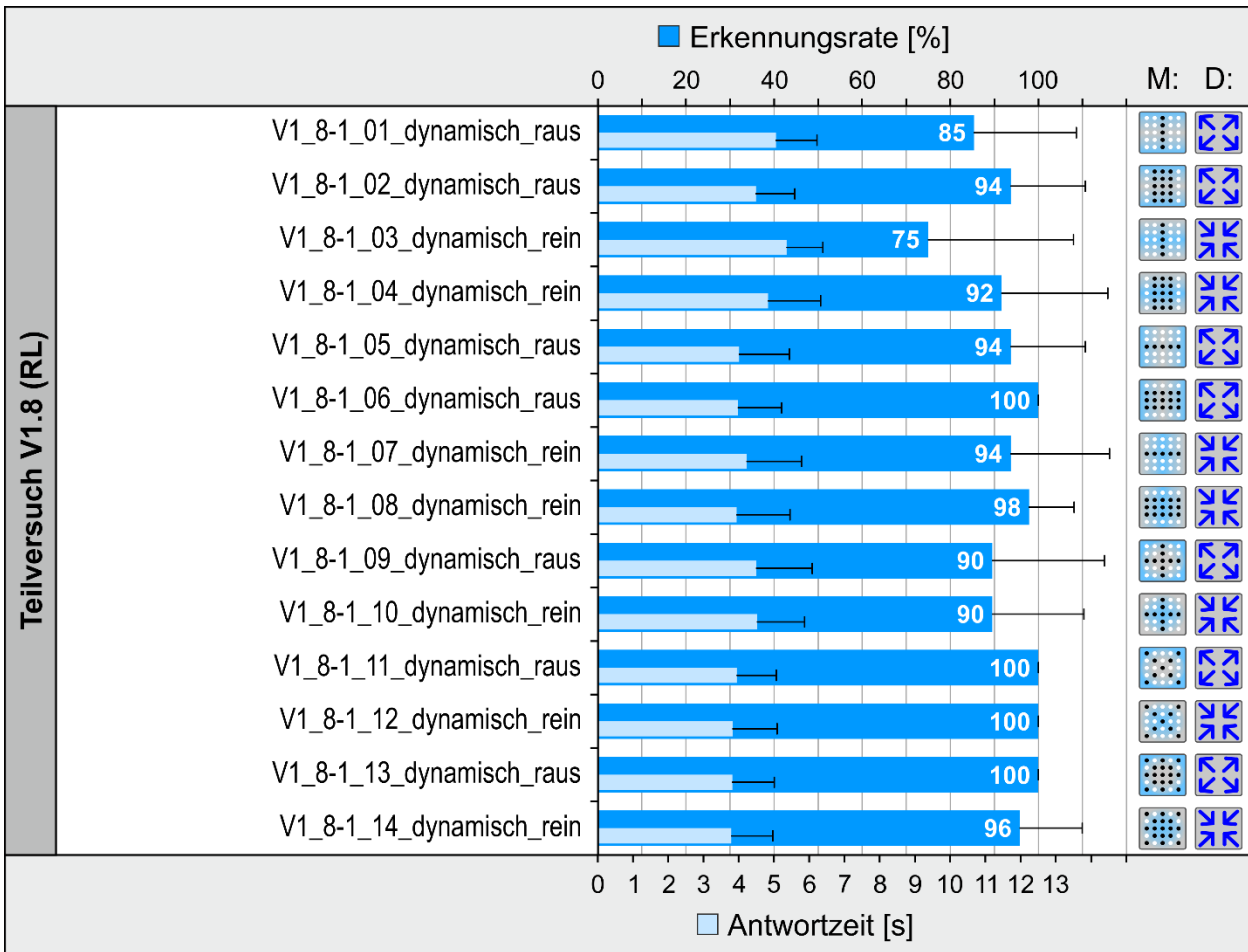


Abbildung 6.15: Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) in V1.8 für einzelne Muster

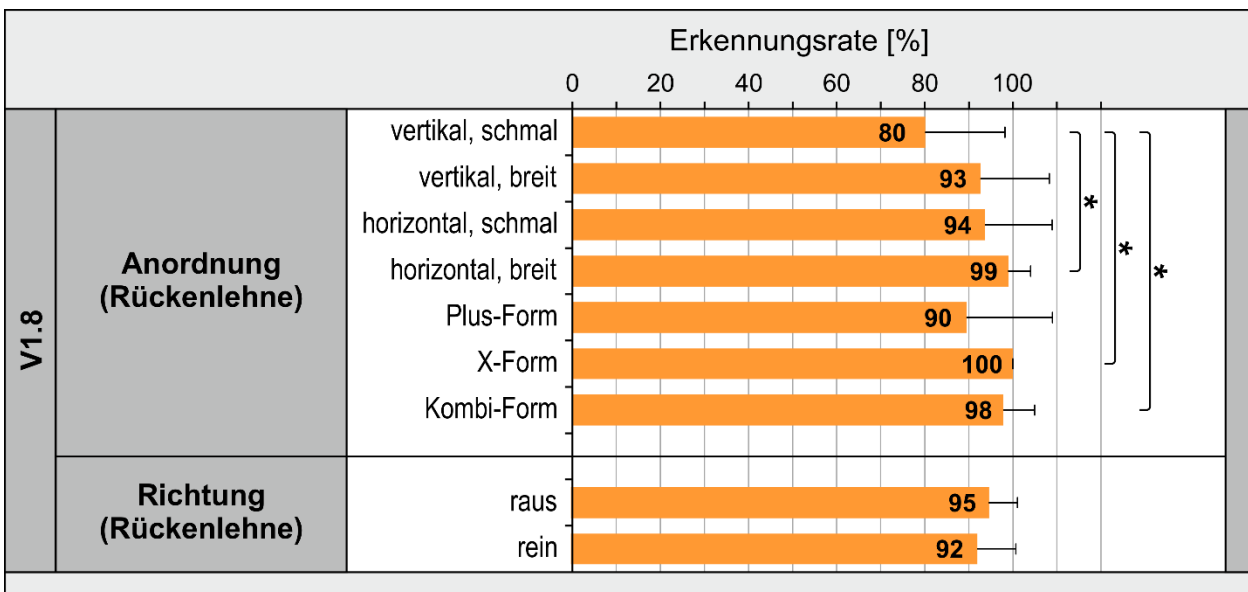
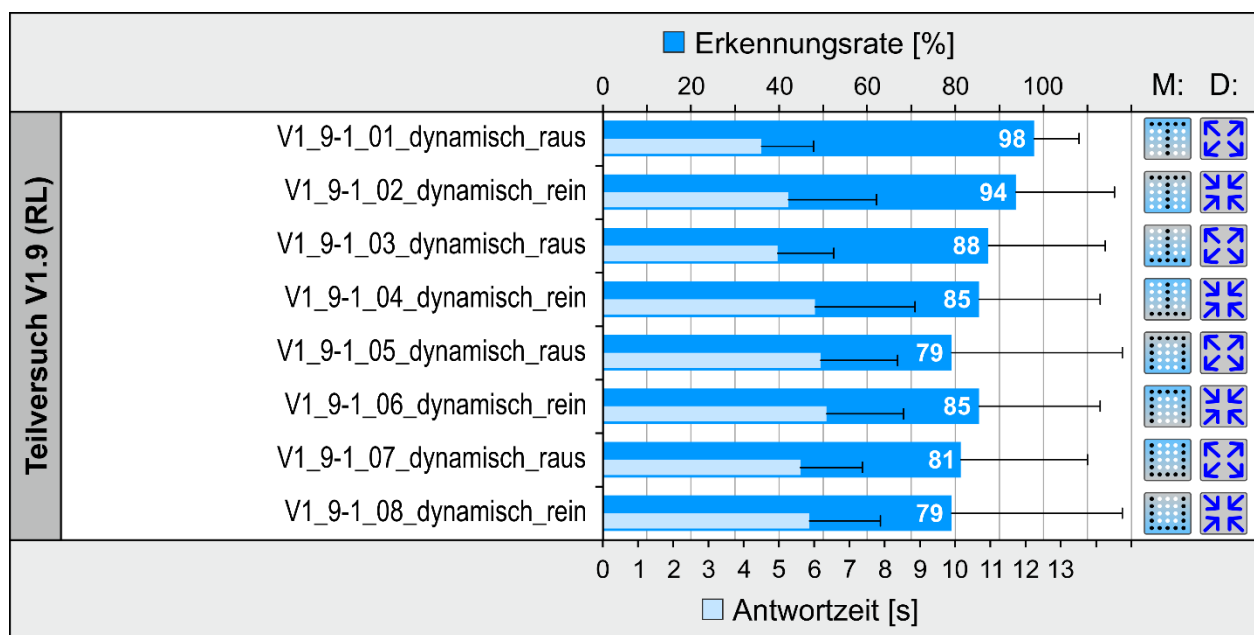


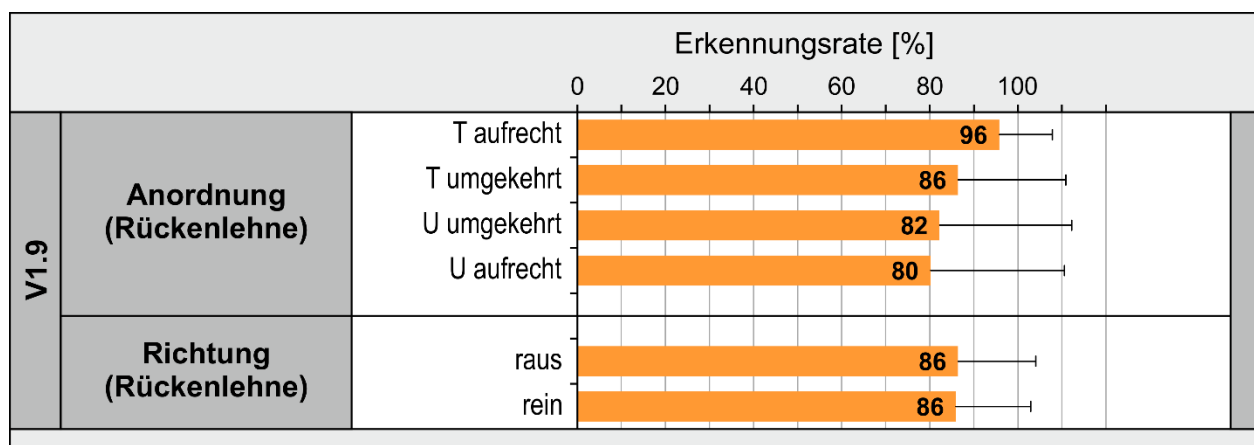
Abbildung 6.16: Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten in V1.8 nach Faktoren mit Kennzeichnung signifikanter Unterschiede

Um einen Zusammenhang zwischen der erfassten Erkennungsrate und der Antwortzeit zu prüfen, wird eine Korrelationsanalyse nach Pearson für intervallskalierte Daten durchgeführt. Demnach korreliert die Antwortzeit im Teilversuch V1.8 hoch signifikant negativ mit der Erkennungsrate ( $r=-0.92$ ,  $df=22$ ,  $p<0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine sehr hohe Korrelation bzw. eine sehr starke Beziehung vor. Besser erkennbare Muster weisen demnach auch kürzere Antwortzeiten auf.

Die Ergebnisse von Teilversuch V1.9 werden in Abbildung 6.17 dargestellt. Dabei werden die Mittelwerte der Erkennungsraten sowie der Antwortzeiten der dargebotenen Muster (T- und U-Form als Basis) jeweils mit Standardabweichung visualisiert. Eine Auswertung nach Faktoren wird in Abbildung 6.18 dargestellt.



**Abbildung 6.17:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) in V1.9 für einzelne Muster



**Abbildung 6.18:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten in V1.9 nach Faktoren

Zur Untersuchung der Faktoren Anordnung (4 Stufen) und Richtung (2 Stufen) für den TSM-Bereich Rückenlehne wird eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 4x2-Design durchgeführt, welche die Ergebnisse des relevanten Teilversuchs V1.9 einbezieht. Sowohl für die Anordnung ( $F(2.11, 48.05) = 2.01, p=0.142$ , Greenhouse-Geisser korrigiert) als auch für die Richtung ( $F(1.00, 23.00) = 0.02, p=0.894$ ) kann dabei kein signifikanter Effekt identifiziert werden.

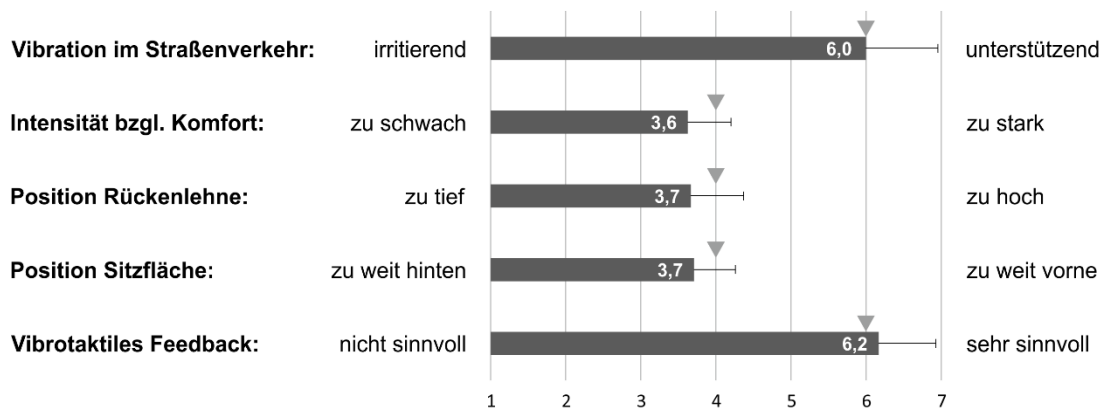
Um einen Zusammenhang zwischen der erfassten Erkennungsrate und der Antwortzeit zu prüfen, wird eine Korrelationsanalyse nach Pearson für intervallskalierte Daten durchgeführt. Demnach korreliert die Antwortzeit im Teilversuch V1.9 hoch signifikant negativ mit der Erkennungsrate ( $r=-0.76, df=22, p<0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine hohe Korrelation bzw. eine ausgeprägte Beziehung vor. Muster, die generell besser erkannt werden, weisen demnach auch in diesem Teilversuch kürzere Antwortzeiten auf.

### 6.2.7 Auswertung Fragebogen

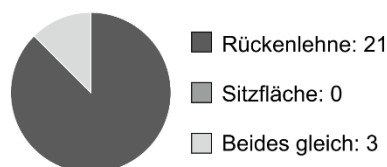
Neben der Auswertung der demografischen Daten und taktilen Wahrnehmungsleistung in Kapitel 6.1.5, werden in Abbildung 6.19 die Ergebnisse der Fragebogenabschnitte drei bis sechs für Versuchsreihe 1 wiedergegeben. Die Erhebung dieser Abschnitte erfolgt nach dem Versuchsteil auf der TSM und bezieht die dabei gemachten Erfahrungen mit ein. Der vollständige Fragebogen kann Anhang A2 entnommen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von vibrotaktilem Feedback im Fahrzeugsitz von den Teilnehmern generell als unterstützend und sinnvoll angesehen wird. Die technische Gestaltung in Bezug auf Vibrationsintensität und Positionierung der TSM wird als nahezu optimal wiedergegeben, was die Erkenntnisse aus Literatur und Vorstudien bestätigt. Als besser geeignet im Sinne von Komfort und Erkennbarkeit der Muster wird eindeutig die Rückenlehne beschrieben. Bei der Darbietungsart sind die Einschätzungen zur besseren Erkennbarkeit individuell unterschiedlicher, mit Vorteilen für die gepulste Darbietung. Auch die Einschätzung, wie viele vibrotaktile Muster im Fahrzeug eingesetzt werden können, ohne dass Verwechslungen auftreten, variiert stark (zwischen 2 und 50 Mustern, durchschnittlich 10). Des Weiteren korreliert die Einschätzung der Teilnehmer bzgl. ihrer erreichten Erkennungsrate mit der real erfassten Erkennungsrate. Die tatsächliche Erkennungsrate liegt dabei sogar höher. Daraus kann gefolgert werden, dass die Erkennbarkeit von vibrotaktilem Feedback im Sitz vom Fahrer selbst eher leicht unterschätzt als überschätzt wird. Dies ist ein wichtiger und positiver Aspekt in Bezug auf die Sicherheit beim Einsatz der Muster im realen Straßenverkehr.

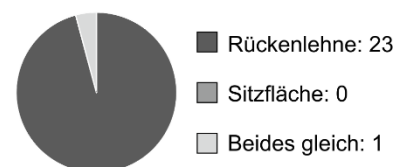
Komfortempfinden und technische Gestaltung:  Mittelwert  Standardabw.  Median



Wo ist vibrotaktiler Feedback angenehmer?



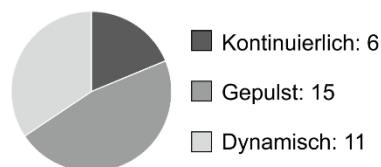
Wo sind vibrotaktile Muster besser erkennbar?



Wie viele Muster möglich ohne Verwechslungen?

Mittelwert: 10,5 (±10,0)  
Minimum: 2,0  
Maximum: 50,0

Bei welcher Darbietungsart sind Muster besser erkennbar (Mehrfachnennungen möglich)?



Selbst geschätzte (1) und reale (2) Erkennungsrate in Versuchsreihe 1:

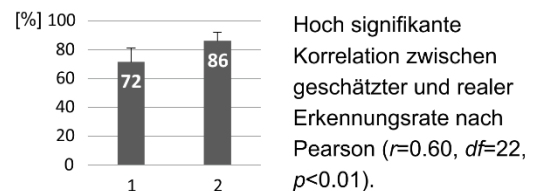


Abbildung 6.19: Fragebogenauswertung für Versuchsreihe 1 (N = 24)

### 6.2.8 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die in den vorherigen Kapiteln präsentierten Ergebnisse von Versuchsreihe 1 werden im Folgenden zusammengefasst und in Zusammenhang mit den zuvor aufgestellten Hypothesen diskutiert. Insgesamt werden in V1 146 Muster untersucht, welche den Probanden, aufgeteilt in mehrere Teilversuche, jeweils zweimal angezeigt werden. Die durchschnittliche Gesamterkennungsrate über alle Muster liegt bei 86,1 % (± 5,9 %). Diese variiert bei den einzelnen Teilnehmern zwischen 71,9 % und 95,6 %.

Die nachfolgende Tabelle 6.15 zeigt einen Überblick über die in Kapitel 6.1.1 formulierten Alternativhypothesen  $H_x$ . Dabei wird auf Basis der Versuchsergebnisse wiedergegeben, welche dieser Alternativhypothesen angenommen werden, was einem Verwerfen der jeweiligen Nullhypothese  $H_{0x}$  entspricht. Es erfolgt eine Unterscheidung in

„vollständig angenommen“ (ja), „teilweise angenommen“ (ja, teilweise) und „nicht angenommen“ (nein).

Alternativhypothesen H <sub>x</sub>		H <sub>x</sub> angenommen
H <sub>1</sub>	Die Erkennungsrate der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch die <b>Darbietungsart</b> der Muster (kontinuierlich / gepulst).	nein
H <sub>2</sub>	Die Erkennungsrate der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch den <b>TSM-Bereich</b> .	ja
H <sub>3</sub>	Die Erkennungsrate der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch die <b>Orientierung</b> der Muster.	ja
H <sub>4</sub>	Die Erkennungsrate der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch die angezeigte <b>Richtung</b> .	ja, teilweise
H <sub>5</sub>	Die Erkennungsrate der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch die Anzahl der <b>Auswahlmöglichkeiten</b> .	ja, teilweise
H <sub>6</sub>	Die Erkennungsrate der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch eine angezeigte <b>Referenz</b> (zentraler Motor) vor dem eigentlichen Muster.	nein
H <sub>7</sub>	Die Erkennungsrate der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch die <b>Ausprägung</b> / Variante eines Musters.	ja, teilweise
H <sub>8</sub>	Die Erkennungsrate der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch die <b>Anordnung</b> der Motoren.	ja
H <sub>9</sub>	Muster mit hoher Erkennungsrate weisen kürzere <b>Antwortzeiten</b> auf als Muster mit geringer Erkennungsrate.	ja

**Tabelle 6.15:** Hypothesenüberprüfung für Versuchsreihe 1

Die in Tabelle 6.15 dargestellte Übersicht ergibt sich aus den nachfolgend aufgeführten Schlussfolgerungen der einzelnen (signifikanten) Ergebnisse.

**H<sub>1</sub>:** Die Mittelwerte der jeweiligen Erkennungsraten für kontinuierliche und gepulste Darbietung liegen in den Teilversuchen V1.1 sowie V1.3, V1.4 und V1.5 eng beieinander und es werden keine signifikanten Unterschiede identifiziert. Dynamische Muster sind nicht Bestandteil dieses direkten Vergleichs. Bei diesen wird auf Basis von Vorversuchen eine bessere Erkennbarkeit im Vergleich zur kontinuierlichen und gepulsten Anzeige vorausgesetzt.

**H<sub>2</sub>:** In den betreffenden Teilversuchen V1.3, V1.4 und V1.5 werden Muster im Kontext von angezeigten Richtungen an der Rückenlehne besser erkannt als auf der Sitzfläche.



**H<sub>3</sub>:** Bei den statischen Orientierungen in Teilversuch V1.1 werden vertikale Muster besser erkannt als horizontale, während bei den dynamischen Orientierungen in V1.2 schwenkende Muster schlechter als horizontale, vertikale und drehende Muster abschneiden. Bei den nach rechts schwenkenden Mustern ist zudem die Tendenz abzuleiten, dass die Variante mit einem „längeren Hebel“ besser erkennbar ist, als die um die Mitte drehende Variante.

**H<sub>4</sub>:** Sowohl auf der Sitzfläche (vorne, hinten, rechts, links) als auch an der Rückenlehne (oben, unten, rechts, links) werden in den Teilversuchen V1.3, V1.4 und V1.5 keine signifikanten Unterschiede zwischen einzelnen Richtungen identifiziert. Auch in den Teilversuchen V1.8 und V1.9 unterscheiden sich die Erkennungsraten für die Richtungen „rein“ und „raus“ nicht signifikant. Bei den einzeln angesteuerten Motoren in V1.6 und V1.7 hingegen werden mehrere signifikante Unterschiede ermittelt. Dabei bestehen Vorteile für die Richtungen „unten rechts“, „unten“ sowie „unten links“. Die Erkennungsraten von Richtungs-Mustern sind also im unteren Bereich der Rückenlehne tendenziell höher.

**H<sub>5</sub>:** Bei der Untersuchung des Faktors Auswahl in den Teilversuchen V1.3, V1.4 und V1.5 bestehen an der Rückenlehne keine signifikanten Unterschiede. Die Erkennungsraten bei der Auswahl aus 4 bzw. 8 Richtungen sind nahezu identisch und generell sehr hoch (fast 100 %). Auf der Sitzfläche hingegen liegt die Erkennungsrate bei der Auswahl aus 4 Richtungen signifikant höher als bei der Auswahl aus 8 Richtungen.

**H<sub>6</sub>:** In den Teilversuchen V1.6 und V1.7 wird kein Unterschied bei den Erkennungsraten zwischen einer Darbietung mit und ohne Referenz festgestellt. Es wird daraus abgeleitet, dass die Verwendung einer Referenz nicht notwendig ist. Durch die Zeitersparnis, die durch das Wegfallen der vorgeschalteten Referenzanzeige entsteht, kann die Effizienz gesteigert werden.

**H<sub>7</sub>:** Die Art der Ausprägung bzw. der Vergleich von Varianten variiert pro Teilversuch. In V1.1 wird bei statischen Orientierungen ein Vorteil von einfachen, zentralen Spalten und Reihen gleichzeitig aktivierter Motoren gegenüber doppelten, äußeren Spalten und Reihen festgestellt. In den Teilversuchen V1.6 und V1.7 wird kein signifikanter Unterschied zwischen dem inneren und äußeren Ring der angezeigten punktuellen Reize nachgewiesen. Ebenso liegen die Erkennungsraten in Teilversuch V1.5.1 für die schmale und breite Anzeige jeweils auf einem vergleichbaren Niveau.

**H<sub>8</sub>:** Bei den Anordnungen der radial verlaufenden Muster in V1.8 werden einzelne Vergleiche der Erkennungsraten signifikant. Das schmale vertikale Muster ist dabei schlechter erkennbar als das breite horizontale Muster sowie die X-Form und Kombi-Form. In V1.9 wird kein signifikanter Unterschied ermittelt, es zeigt sich jedoch die Ten-

denz, dass das aufrecht stehende T-Muster besser erkennbar ist als die übrigen Muster.

**H<sub>9</sub>:** Die Antwortzeit korreliert in allen Teilversuchen von Versuchsreihe 1 signifikant negativ mit der Erkennungsrate. Muster, die generell besser erkannt werden, weisen demnach stets auch kürzere Antwortzeiten auf.

Zusätzlich zu der konkreten Überprüfung der Hypothesen können folgende Erkenntnisse ergänzt werden, die aus Versuchsreihe 1 hervorgehen:

- Die Erkennungsraten liegen generell auf einem sehr hohen Niveau. Alle Muster, die signifikante Vorteile gegenüber anderen Mustern aufweisen, liegen bei einer Erkennungsrate zwischen 90 und 100 %.
- Die Verwendung einzelner Motoren erscheint auf Basis der Ergebnisse nicht zweckmäßig. Eine Ausnahme bilden die vier Motoren in den Ecken der Rückenlehne, die im Kontext einer statischen Richtungsanzeige gut erkennbar sind.
- Für die Verwendung in Versuchsreihe 2 werden bei Bedarf auch Muster ausgewählt, die in V1 zwar nicht signifikant besser abschneiden, jedoch höhere absolute Erkennungsraten aufweisen. Durch die hohe Anzahl an Abfragen (24 Probanden x 2 Abfragen) besitzen diese bereits eine Aussagekraft zur Bewertung der Eignung einzelner Muster.

Die beschriebenen Ergebnisse der Versuchsreihe 1 dienen einerseits der generellen Bewertung eines breiten Spektrums an Mustern und Musterarten und bilden andererseits die Basis für die nachfolgend beschriebene Versuchsreihe 2.

## 7 Versuchsreihe 2: Bedeutung vibrotaktiler Muster

In Versuchsreihe 2 (V2) wird die intuitive Zuordnung von vibrotaktile Mustern und semantischen Inhalten untersucht, was der taktilen Semantik-Ebene zugeordnet werden kann (vgl. Kapitel 4). Dabei werden einerseits Einflussfaktoren auf die wahrgenommene Dringlichkeit von Mustern evaluiert. Zudem werden intuitive Verknüpfungen von Mustern mit konkreten Informationen ermittelt, welche sich aus den mentalen Modellen der Teilnehmer ergeben.

Um die Zuordnung von Mustern und konkreten Informationen abfragen zu können, ist entsprechend der in Kapitel 4 beschriebenen Methode die Definition eines konkreten Nutzungskontextes notwendig. Es erfolgt die Festlegung der Fahrer-PKW-Interaktion als Anwendungsfall, da diese eine häufige sowie immer komplexer werdende Mensch-Maschine-Interaktion darstellt. Des Weiteren können hierfür Versuchsteilnehmer mit entsprechender Erfahrung ohne eine differenzierte Expertise akquiriert werden, welche beispielsweise im Bereich mobiler Arbeitsmaschinen notwendig wäre. Trotzdem wird davon ausgegangen, dass die Versuchsergebnisse auch auf diesen und weitere Anwendungsbereiche übertragen werden können.

### 7.1 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Es folgt die Beschreibung der Ziele und Hypothesen von Versuchsreihe 2 sowie die Erläuterung des Versuchsaufbaus und der -bedingungen. Im Anschluss werden der Versuchsablauf sowie das Probandenkollektiv beschrieben.

#### 7.1.1 Ziele und Hypothesen

Versuchsreihe 2 gliedert sich in drei Teilversuche. Im ersten Teilversuch V2.1 wird der Einfluss der unabhängigen Variablen (Faktoren) Motoranzahl und Intervalldauer auf die empfundene Dringlichkeit bei der Darbietung vibrotaktiler Muster untersucht. In den Teilversuchen V2.2 und V2.3 wird die intuitive Zuordnung von Mustern und Informationen ermittelt.

Auf dieser Basis werden in Versuchsreihe 2 die nachfolgend aufgeführten Hypothesen überprüft, welche in Form von Alternativhypothesen  $H_x$  entsprechend der korrespondierenden Nullhypothesen  $H_{0x}$  (= kein Effekt/Zusammenhang) formuliert werden:

Die empfundene **Dringlichkeit** der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch

- **H<sub>10</sub>**: die Motoranzahl der Muster,
- **H<sub>11</sub>**: die Intervalldauer der Impulse der Muster.

In Bezug auf die **Zuordnung** von vibrotaktile Mustern und Informationen werden folgende Hypothesen formuliert:

- **H<sub>12</sub>**: Den vibrotaktile Mustern werden intuitiv bestimmte Informationen zugeordnet.
- **H<sub>13</sub>**: Den Informationen werden intuitiv bestimmte vibrotaktile Muster zugeordnet.
- **H<sub>14</sub>**: Es existieren Muster-Informationen-Kombinationen, die semantisch besser zusammen passen als andere.

Zur Überprüfung der aufgestellten Hypothesen wird in V2 nach den folgenden Schritten vorgegangen:

- Durchführung der Untersuchung zur Dringlichkeit,
- Sammeln von potenziellen Informationen aus unterschiedlichen Bereichen,
- Systematisches Kategorisieren, Bewerten und Auswählen von relevanten und geeigneten Informationen,
- Auswahl der zu verwendenden taktilen Muster auf Basis von V1,
- Festlegung der prinzipiellen Eignung von verschiedenen Mustern für bestimmte Informationen (Vorauswahl),
- Untersuchung zur intuitiven Zuordnung von taktilen Mustern und Informationen.

### 7.1.2 Generierung und Auswahl der Informationen

Für die Auswahl von Informationsinhalten, deren intuitive Zuordnung zu vibrotaktile Mustern innerhalb von V2 untersucht werden soll, wird zunächst eine systematische Sammlung von Informationsarten aus verschiedenen Bereichen der Mensch-Maschine-Interaktion erstellt. Dazu werden auf Basis von [SCHWALK & MAIER 2014] die Kategorien Systeminformationen, Räumliche Informationen, Objektinformationen (Funktionen) und Interaktionsinformationen definiert. Es erfolgt eine weitere Unterteilung in Unterkategorien, wodurch die in Abbildung 7.1 dargestellte Übersicht an potenziell relevanten Informationen entsteht. Die Gestalt-Informationen entstammen dabei der Terminologie des Technischen Designs nach Seeger [SEEGER 2005, S. 47]. Die Auflistung der Bewegungsarten basiert auf der Richtlinie [VDI/VDE 2258 1987, S. 18]. Ergänzt durch einen Expertenaustausch unter Kollegen wird die Auflistung als hinreichend vollständig betrachtet, um eine solide Basis für die Auswahl von relevanten und geeigneten Informationen für V2 zu bilden. In der Übersicht in Abbildung 7.1 wird bewusst noch keine Einschränkung auf den Anwendungsfall PKW vorgenommen, um eine möglichst umfassende und abstrakte Sammlung an Informationen zu ermöglichen. Die Bewertung der Eignung von einzelnen Informationen für einen Einsatz im PKW erfolgt im Anschluss.

<p><b>SYSTEMINFORMATION</b></p> <p><b>Zustand:</b>  Aktiv / Inaktiv (Ein / Aus)  Fahrbetrieb (Straße) / Werkzeugbetrieb (Feld)  Autonom / Manuell  Ladezustand Akku, Reichweite  Verriegeln / Entriegeln</p> <p><b>Qualität:</b>  Ja / Nein (Richtig / Falsch, Gut / Schlecht)  Bestätigt  Besser / Schlechter</p> <p><b>Warnungen:</b>  Achtung  Fehlermeldungen, Hinweise  Schaden, Defekt  Kollision  Spurhalteassistent  Totwinkel</p> <p><b>(Teil-)Automatisierte Fahrfunktionen:</b>  Kontrollübergabe  Kontrollübernahme (Take-Over Request)  Platooning (Kolonne)</p>	<p><b>OBJEKTINFORMATION</b></p> <p><b>Mobile Maschinen / Werkzeug:</b>  Werkzeug Ausfahren / Einfahren  Füllen / Leeren  Öffnen / Schließen (Auf / Zu)  Klappen, Kippen  Heben / Senken</p> <p><b>Flugzeugcockpit:</b>  Fahrwerk  Lage, Position (Nivellieren)</p> <p><b>Bahn:</b>  Position erreicht  Türen auf / zu  Ankoppeln (Kontakt)  Abkoppeln</p> <p><b>Gestalt:</b>  Aufbau  Form  Farbe  Oberfläche  Material  Grafik</p>
<p><b>RÄUMLICHE INFORMATION</b></p> <p><b>Navigation:</b>  Richtung  Orientierung (Kompass)  Wenden  Sackgasse  Stopp  Ziel erreicht</p> <p><b>Position:</b>  Arbeitsbereich  Arbeitsfläche  Abstand  Höhe  Höhenverstellung</p> <p><b>Bewegung:</b>  Geschwindigkeit  Beschleunigung / Bremsen (Schneller / Langsamer)  Annähern / Entfernen</p>	<p><b>INTERAKTIONSinFORMATION</b></p> <p><b>Bewegungsarten:</b>  Drücken  Ziehen  Schieben (längs, quer, diagonal)  Drehen (links, rechts)</p> <p><b>Human Computer Interaction:</b>  Auswahl  Bestätigung  Belohnung (z. B. für ökonomisches Fahren)  Löschen  Zurücksetzen (Reset)  Hochfahren (Booten)  Herunterfahren  Menü wechseln  Fortschrittsbalken  Bewertung  Eingabe</p> <p><b>Kommunikation:</b>  Senden  Empfangen  Telefonanruf</p>

**Abbildung 7.1:** Übersicht der Informationskategorien und -inhalte

Die zusammengestellten Informationen besitzen unterschiedliche Detaillierungsgrade, Wichtigkeit, Häufigkeit und Eignung für die Verwendung im vorliegenden Versuch. Es wird daher ein Bewertungssystem inkl. Bewertungsformel entwickelt, auf dessen Basis sinnfällige Informationen für V2 systematisch ausgewählt werden können. Die einzelnen

Informationen werden dabei in Bezug auf Wichtigkeit (W), Häufigkeit (H) und Eignung für eine taktile Anzeige (E) jeweils mit einem Erfüllungsgrad zwischen 0 und 4 bewertet, wobei höhere Werte eine höhere Zustimmung bedeuten. Das Bewertungsschema ist angelehnt an die Richtlinie VDI 2225-3 zur Bewertung der technischen Wertigkeit von Lösungskonzepten [VDI 2225-3 1998, S. 4]. Zudem erfolgt pro Information eine Einschätzung des potenziellen Anwendungsbereichs. Dabei wird bewertet, ob die Information auch in einem abstrahierten Kontext einsetzbar ist (z. B. „aktiv/inaktiv“, im Gegensatz zu einer konkreten Information wie „bitte wenden“) und ob ein Einsatz im Fahrzeug (PKW) sinnvoll ist. Diese beiden Kategorien werden mit 1 (Zustimmung) bzw. 0 (keine Zustimmung) bewertet. Des Weiteren erfolgt eine informative Angabe darüber, ob die jeweilige Information einer Entdeckungs-, Überwachungs- oder Steuerungsaufgabe zugeordnet werden kann. Aus der oben genannten Bewertung wird mithilfe der Formel 7.1 die Eignung der Informationen für die Verwendung in V2 in Form eines Eignungs-Scores „ $S_E$ “ berechnet:

$$S_E = (W+H+A) \cdot E \cdot F \quad (7.1)$$

W: Wichtigkeit (0 bis 4)

H: Häufigkeit (0 bis 4)

A: Abstraktion möglich (1 oder 0)

E: Eignung für taktile Anzeige (0 bis 4)

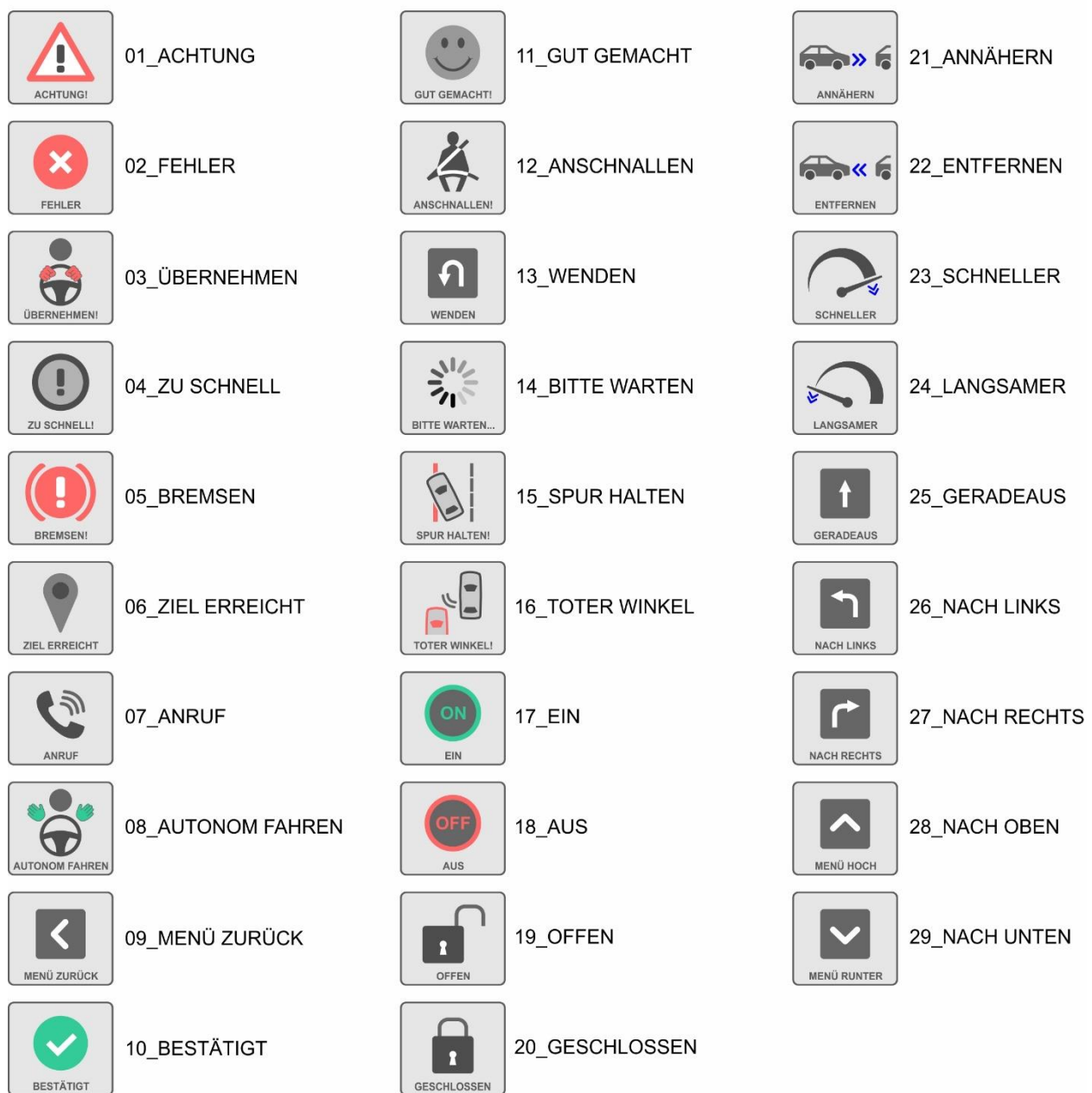
F: Einsatz im Fahrzeug (PKW) (1 oder 0)

Da die prinzipielle Eignung für eine taktile Darbietung (E) sowie ein sinnvoller Einsatz im Fahrzeug bzw. PKW (F) grundlegend und elementar sind, werden diese Parameter in Form von Faktoren integriert. Informationen, welche taktile nicht sinnvoll angezeigt werden können, scheiden somit aus (z. B. Anzeige eines absoluten Zahlenwertes). Auf Basis des entwickelten Bewertungsschemas ergibt sich die in Tabelle 7.1 gezeigte Bewertung der Informationen und Rangfolge nach ihrem Eignungs-Score  $S_E$ . Die am besten bewerteten 21 Informationen werden ausgewählt, da diese deutlich höhere Eignungs-Scores aufweisen, als alle weiteren Informationen (beim Sprung zwischen Rang 21 und 22 reduziert sich  $S_E$  um mehr als 60 %). Die restlichen Informationen werden aufgrund ihrer sowohl absolut als auch relativ gesehen niedrigen  $S_E$ -Werte als ungeeignet für die aktuelle Untersuchung identifiziert und nicht weiter verfolgt.

Information	Aufgabenart			Bewertung (0 bis 4)			Anwendungsbereich		Score
	Entdeckung	Überwachung	Steuerung	Wichtigkeit	Häufigkeit	Einfachheit	Abstraktion möglich	Fahrzeug (PKW)	Eignungs-Score: $S_E = (W+H+A)*E*F$
				W	H	E			
Bewegen (in Richtung ...)			1	2	3	4	1	1	24
Schneller / Langsamer			1	2	3	3	1	1	18
Achtung (Gefahr)	1			4	1	3	1	1	18
Bestätigung für Eingabe		1		2	3	2	1	1	12
Annähern / Entfernen		1		2	3	2	1	1	12
Spurhalteassistent	1			4	2	2	0	1	12
Totwinkelwarnung	1			4	2	2	0	1	12
Kollisionswarnung / Bremsen! (Stopp)			1	4	1	2	1	1	12
Aktiv / Inaktiv (Ein/Aus)		1		2	2	2	1	1	10
Menüwechsel		1		1	3	2	1	1	10
Offen / Geschlossen (Entriegelt/Verriegelt)		1		2	2	2	1	1	10
Kontrollübernahmeaufforderung (Take-Over Request)			1	4	1	2	0	1	10
Geschwindigkeitsüberschreitung	1			3	2	2	0	1	10
Bitte Anschnallen			1	3	2	2	0	1	10
Fehlermeldung (Hinweis, Schaden, Defekt)	1			2	1	2	1	1	8
Bitte warten (Ladevorgang / Suchvorgang)		1		1	2	2	1	1	8
Belohnung (z. B. für ökonomisches Fahren)	1			1	2	2	1	1	8
Kontrollübergabe (Angebot)		1		3	1	2	0	1	8
Wenden			1	2	2	2	0	1	8
Ziel erreicht		1		2	2	2	0	1	8
Eingehender Telefonanruf	1			1	3	2	0	1	8
Ladezustand (Akku) / Reichweite		1		2	1	1	0	1	3
Öffnen / Schließen		1		1	1	1	1	1	3
Drehen (links/rechts)			1	1	1	1	1	1	3
Füllstand steigt / sinkt		1		1	1	1	1	1	3
Fortschrittsbalken		1		1	1	1	1	1	3
Platooning (Kolonne)		1		1	1	1	0	1	2
Sackgasse		1		1	1	1	0	1	2
Höhenverstellung (hoch/runter)		1		1	1	2	1	0	0
Ausfahren / Einfahren (z. B. Werkzeug)		1		2	2	2	1	0	0
Gelöscht		1		1	2	2	1	0	0
Orientierung (Kompass)		1		1	1	2	1	0	0
Werkzeug Heben / Senken		1		2	2	2	1	0	0
Distanz / Abstand (absolut)		1		1	2	0	1	1	0
Geschwindigkeit absolut		1		1	3	0	1	1	0
Zahlenwert		1		1	2	0	1	1	0
Fahrbetrieb / Werkzeugbetrieb		1		1	1	1	0	0	0
Ja/Nein (Richtig/Falsch, Gut/Schlecht)		1		1	2	1	1	0	0
Lage / Position (Nivellieren)		1		2	1	1	0	0	0
Besser/Schlechter		1		2	1	1	1	0	0
Klappen, Kippen		1		2	2	1	1	0	0
Fahrwerk		1		3	1	1	0	0	0
Position erreicht (Werkzeug)		1		1	2	2	0	0	0
Ankoppeln (Kontakt)		1		2	1	2	0	0	0
Abkoppeln		1		1	1	1	0	0	0
Aufbau		1		1	1	1	1	0	0
Form		1		1	1	1	1	0	0
Farbe		1		1	1	0	1	0	0
Oberfläche		1		1	1	0	1	0	0
Material		1		1	1	0	1	0	0
Grafik		1		1	1	0	1	0	0
Höhe		1		1	2	1	1	0	0
Arbeitsbereich / -fläche		1		1	1	1	0	0	0
Drücken / Vor (transl.)			1	2	1	2	1	0	0
Ziehen / Zurück (transl.)			1	2	1	2	1	0	0
Zurücksetzen (Reset)		1		1	2	1	1	0	0
Hochfahren (Booten)		1		1	1	1	1	0	0
Herunterfahren		1		1	1	1	1	0	0
Senden / Empfangen			1	1	1	2	1	0	0

Tabelle 7.1: Bewertung und Auswahl (blau markiert) der Informationen für V2

In einem weiteren Schritt werden die ausgewählten Informationen verfeinert und teilweise aufgeteilt (z. B. Geschwindigkeitsinformationen „schneller“ und „langsamer“ getrennt), wodurch insgesamt 29 Informationen entstehen. Für alle Informationen werden Piktogramme zur Anzeige auf dem Touchscreen für den Probanden erstellt. Eine Übersicht der final ausgewählten Informationen mit Benennung und zugehörigen Piktogrammen für V2 findet sich in Abbildung 7.2. Für einen effizienten Versuchsablauf werden die beidseitig vorkommenden Informationen „Toter Winkel“ und „Spur halten“ nur für eine Fahrzeugseite implementiert (links), da diese später auch auf die rechte Fahrzeugseite übertragen werden können. Ähnliches gilt für die Information „Menü zurück“, die eine spätere Übertragung auf die Information „Menü vor“ ermöglicht.



**Abbildung 7.2:** Übersicht der ausgewählten Informationen mit Piktogrammen



### 7.1.3 Generierung und Auswahl der taktilen Reizmuster

Der Generierung und Festlegung von taktilen Reizmustern für V2 liegen die Muster und Musterarten mit hohen Erkennungsraten aus V1 zugrunde. Ergänzt werden diese durch Muster, welche im Rahmen von Vorstudien als zweckmäßig identifiziert werden (vgl. Kapitel 5.3). Diese Vorstudien enthalten auch bereits erste Hinweise zur intuitiven, semantischen Verknüpfung von Informationsinhalten mit bestimmten taktilen Mustern. Die somit zur Verfügung stehenden, geeigneten vibrotaktilen Muster werden für die Verwendung in V2 nachfolgend weiterentwickelt, um eine noch größere Differenzierung zwischen den einzelnen Mustern zu erreichen. Die in V2 verwendeten vibrotaktilen Muster können in die folgenden Kategorien unterteilt werden: Orientierungen; Dynamische Richtungen; Statische Richtungen; Radiale Verläufe; T-Form; Dynamische Verläufe; Bereiche; Flächige Muster.

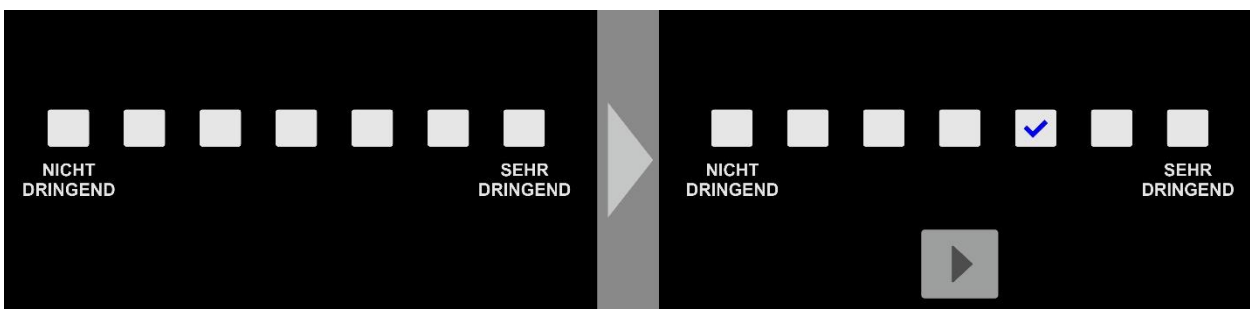
In V2 werden die Muster bei der nicht-dynamischen Darbietung ausschließlich gepulst angezeigt. Die kontinuierliche Anzeige wird zurückgestellt, da die semantische Zuordnung durch die Probanden auf Basis der Motorenanordnung erfolgen soll und dieser Faktor daher konstant gehalten wird. In V3 steht die kontinuierliche Anzeige als Erweiterung der semantischen Differenzierung wieder zur Verfügung. Die einzelnen in V2 verwendeten Muster werden im nachfolgenden Kapitel 7.1.4 mithilfe von Tabelle 7.2 beschrieben. Die Beschreibung der für Teilversuch V2.1 verwendeten Muster zur Übermittlung von Dringlichkeits-Informationen erfolgt ebenfalls im folgenden Kapitel. Als Basis dienen hierfür u. a. die Erkenntnisse von [JONES & SARTER 2008, S. 105], wonach kürzere Intervalle für wichtigere bzw. dringlichere Warnungen verwendet werden sollen.

### 7.1.4 Versuchsaufbau und -bedingungen

In einem ersten Teilversuch der Versuchsreihe 2 erfolgt zunächst eine allgemeine Untersuchung der empfundenen Dringlichkeit. Dazu werden in Teilversuch 1 (V2.1) die Faktoren Motoranzahl und Intervalldauer zwischen den Impulsen bei der Musteranzeige ausgehend von einem Basismuster variiert. Als Basismuster wird eine sternförmige Anordnung an der Rückenlehne gewählt, die sowohl horizontal als auch vertikal symmetrisch ist und eine Variation der Motoranzahl ohne Veränderung der Orientierung erlaubt. Als Faktorstufen für die Motoranzahl werden die vier äquidistanten Werte 1, 5, 9 und 13 festgelegt. Die Intervalldauer zwischen den Impulsen einer Muster-Anzeige wird ausgehend von dem in Versuchsreihe 1 verwendeten Basiswert von 250 ms in äquidistanten Schritten von jeweils 50 ms in insgesamt sieben Stufen (jeweils drei Stufen nach oben und nach unten) variiert. Dies führt zu den Werten 100, 150, 200, 250, 300, 350 und 400 ms für die Intervalldauer (vgl. Abbildung 7.3). Die zugehörige Anzeigedauer wird jeweils auf die zweifache Intervalldauer festgelegt, um eine stimmige Reizdarbietung

sicherzustellen. Der Proband wählt jeweils auf einer siebenstufigen, äquidistanten Skala von „nicht dringend“ bis „sehr dringend“ aus, wie er die Dringlichkeit des angezeigten taktilen Musters empfindet. In V2.1 werden insgesamt 28 Reizmuster verwendet.

Motor-anordnung																												
Motor-anzahl	1							5							9							13						
Intervall-dauer [ms]	100	150	200	250	300	350	400	100	150	200	250	300	350	400	100	150	200	250	300	350	400	100	150	200	250	300	350	400
Anzeige-dauer [ms]	200	300	400	500	600	700	800	200	300	400	500	600	700	800	200	300	400	500	600	700	800	200	300	400	500	600	700	800
Benennung	D_01_M01_100	D_02_M01_150	D_03_M01_200	D_04_M01_250	D_05_M01_300	D_06_M01_350	D_07_M01_400	D_08_M05_100	D_09_M05_150	D_10_M05_200	D_11_M05_250	D_12_M05_300	D_13_M05_350	D_14_M05_400	D_15_M09_100	D_16_M09_150	D_17_M09_200	D_18_M09_250	D_19_M09_300	D_20_M09_350	D_21_M09_400	D_22_M13_100	D_23_M13_150	D_24_M13_200	D_25_M13_250	D_26_M13_300	D_27_M13_350	D_28_M13_400



**Abbildung 7.3:** Reizmuster (oben) und Probanden-Interface (unten) für die Untersuchung der empfundenen Dringlichkeit in V2.1

Für die Teilversuche V2.2 und V2.3 wird auf Basis der generierten taktilen Reizmuster sowie der ausgewählten Informationen eine Vorauswahl bzgl. möglicher, sinnvoller Verknüpfungen vorgenommen, da eine Überprüfung bzw. Abfrage aller potenzieller Kombinationen den Versuchsrahmen deutlich sprengen würde. Zudem existieren viele Kombinationen, die nicht als sinnvoll erachtet werden, sodass eine Vorauswahl prinzipiell geeigneter Kombinationen auf Basis von Vorstudien (vgl. u. a. Kapitel 5.3) und der in Kapitel 2.2.4 beschriebenen X-Kompatibilitäten erfolgt. Das Ergebnis dieser systematischen Vorauswahl zeigt die Matrix in Tabelle 7.2. Alle prinzipiell als sinnvoll bewerteten Kombinationen aus den definierten 46 taktilen Mustern und 29 ausgewählten Informationen sind in der Matrix blau markiert. Auf Basis dieser Vorauswahl kommen für die einzelnen taktilen Muster jeweils bis zu sieben Informationen infrage, die mit dem jeweiligen Muster sinnvoll angezeigt werden können (vgl. unterste Zeile in Tabelle 7.2). Es wird davon ausgegangen, dass diese maximal sieben gleichzeitig angezeigten Auswahlmöglichkeiten während des Versuchs vom Probanden im Sinne des sog. „Chunking“ ohne Mühe erfasst und bewertet werden können [MILLER 1956], [KLUWE 2006, S. 47]. Für die einzelnen Informationen kommen jeweils bis zu dreizehn taktilen Muster infrage, über welche eine sinnvolle Anzeige erfolgen kann (vgl. letzte Spalte in

Tabelle 7.2). Die in V2 verwendeten dynamischen Muster werden teilweise in Wellenform (1-3 gleichzeitig aktivierte Einzelschritte) und teilweise kumulativ angezeigt (dabei kommen alle Einzelschritte nacheinander hinzu, bis das Muster mit allen beteiligten Motoren komplett angezeigt ist). Die einzelnen Schritte der in Tabelle 7.2 dargestellten dynamischen Muster entsprechen für die Kategorien „Dynamische Richtungen“, „Radiale Verläufe“ und „T-Form“ größtenteils denen in V1. Bei der Kategorie „Dynamische Verläufe“ handelt es sich um wellenförmige bzw. kumulative Darbietungen in jeweils eine Richtung. Die Verlaufsrichtung wird dabei über das jeweilige Piktogramm dargestellt (von grau zu blau). Die Einzelschritte aller in V2 verwendeten dynamischen Muster können Anhang A3 entnommen werden.

In V2.2 werden für 43 der definierten 46 vibrotaktile Muster jeweils zwischen zwei und sieben Informationen mithilfe der erstellten Piktogramme auf dem Touchscreen angeboten. Aus diesen möglichen Informationen wählt der Versuchsteilnehmer aus, welche für ihn intuitiv am besten, zweitbesten und drittbesten zum jeweils angezeigten vibrotaktile Muster passt. Es wird hierbei bewusst lediglich die Rangfolge der „besten“ Assoziationen abgefragt, da eine quantitative Bewertung der jeweiligen Güte ohne direkten Vergleich als nicht zielführend erachtet wird. Es muss mindestens ein Muster als am besten geeignet gewählt werden, während die Wahl eines zweitbesten und drittbesten Musters zwar gewünscht aber optional ist. Den drei übrigen der insgesamt 46 Muster wird bei der Vorauswahl jeweils bereits direkt eine einzelne Information zugeordnet, wodurch eine Abfrage in V2.2 entfällt.

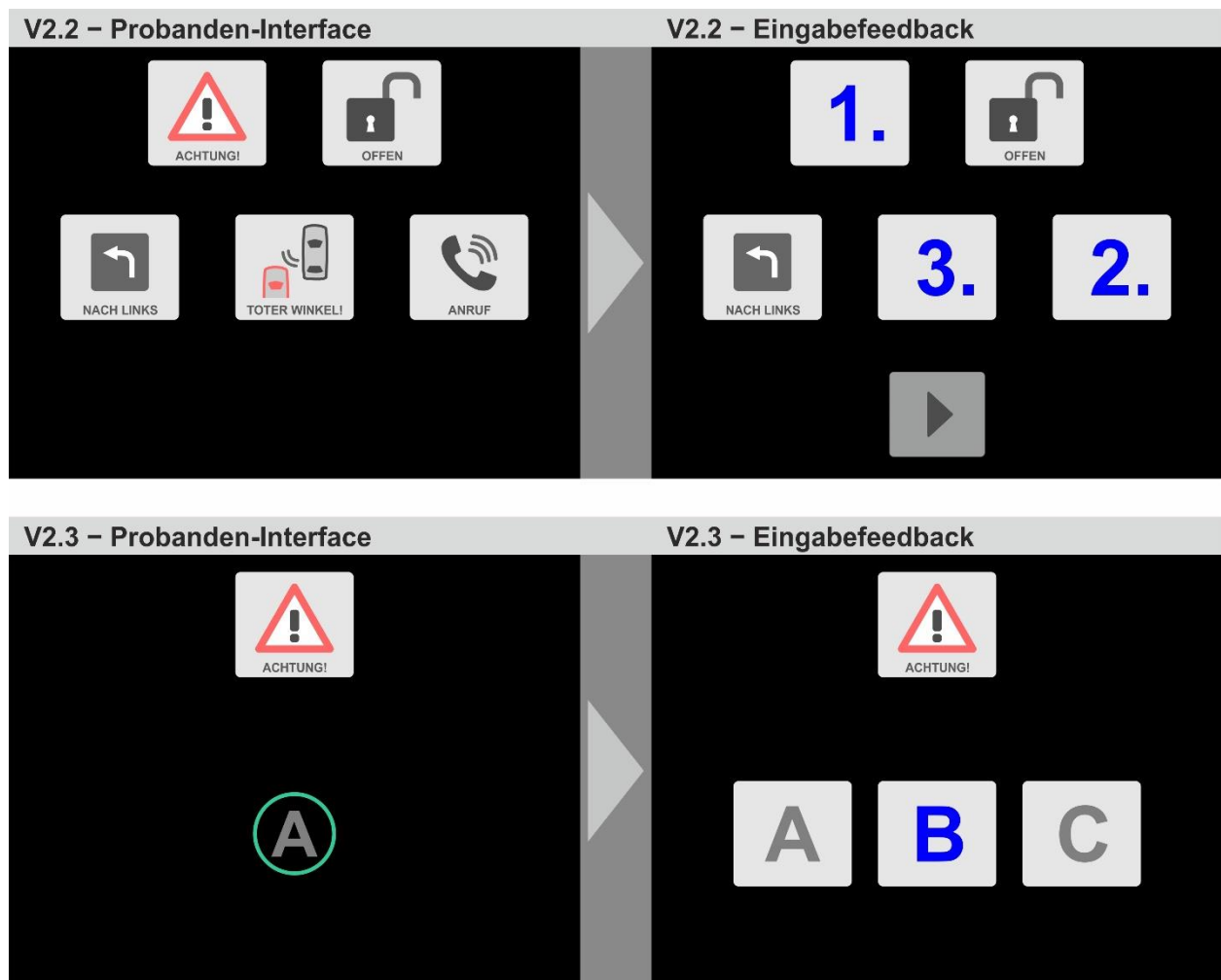
In V2.3 werden für 26 der definierten 29 Informationen jeweils zwischen zwei und dreizehn vibrotaktile Muster angeboten. Da die Muster im Gegensatz zu den Informationen in V2.2 nicht parallel angezeigt werden können, erfolgt (abhängig von der Anzahl der zur Auswahl stehenden Muster) zunächst eine sequenzielle Anzeige von zwei bzw. drei Mustern (Benennung A, B und ggf. C) mit einer nachfolgend auf dem Touchscreen dargestellten Auswahlmöglichkeit auf Basis dieser Bezeichnungen. Die 2er- bzw. 3er-Gruppen von taktilen Mustern für diese erste Abfrage werden für jede Information definiert und beinhalten meist ähnliche Muster, um eine sinnvolle Vorauswahl vorzunehmen. Anschließend werden alle vom Probanden ausgewählten Muster jeweils durch randomisierte paarweise Vergleiche miteinander verglichen. Der Proband gibt bei jedem Vergleich an, welches Muster für ihn intuitiv besser zur angezeigten Information passt. Aus diesen Eingaben wird bei der Auswertung eine Rangfolge für die Eignung der taktilen Muster pro Information gebildet. Für die drei übrigen der insgesamt 29 Informationen wird kein passendes taktilen Muster gesucht. Diese dienen lediglich bei der Abfrage in V2.2 als potenzielle Antwortmöglichkeiten, wodurch eine Abfrage in V2.3 entfällt.



Während des Versuchs werden folgende Randomisierungen vorgenommen:

- V2.1: Randomisierte Reihenfolge der 28 (4x7) Reizmuster,
- V2.2: Randomisierte generelle Reihenfolge der angezeigten taktilen Muster,
- V2.2: Randomisierte Position bzw. Reihenfolge der zur Auswahl stehenden Informationen (Piktogramme) bei jedem taktilen Muster,
- V2.3: Randomisierte generelle Reihenfolge der angezeigten Informationen,
- V2.3: Randomisierte Reihenfolge der paarweisen Vergleiche von taktilen Mustern bei jeder Information.

Das Probanden-Interface für die Teilversuche V2.2 und V2.3 ist in Abbildung 7.4 exemplarisch dargestellt. Die linke Seite wird dem Probanden bei der Reizdarbietung präsentiert, während die rechte Seite das jeweilige Eingabefeedback zeigt.



**Abbildung 7.4:** Probanden-Interface und Eingabefeld für die Teilversuche V2.2 und V2.3 (exemplarisch)

Im gezeigten Beispiel für V2.2 ist in Abbildung 7.4 (oben) die parallele Anzeige von fünf zur Auswahl stehenden Informationen zu sehen, die einem gleichzeitig dargebotenen taktilen Muster zugeordnet werden sollen. Der rechte Screen zeigt exemplarisch das

Ergebnis der Eingabe, wonach der Proband in diesem Fall die Information „Achtung“ als am besten, die Information „Anruf“ als am zweitbesten und die Information „Toter Winkel“ als am drittbesten geeignet findet, um mit dem aktuellen taktilen Muster übermittelt zu werden. Das Beispiel für V2.3 in Abbildung 7.4 (unten) zeigt exemplarisch die vorgegebene Information „Achtung“, für die nacheinander die taktilen Muster A, B und C mithilfe der TSM angezeigt werden. Parallel zum jeweils angezeigten taktilen Muster erscheint auf dem Bildschirm der zugehörige Buchstabe. In der nachfolgenden Eingabemaske wählt der Proband in diesem Fall das taktile Muster B als am besten geeignet aus, um die Information „Achtung“ wiederzugeben.

### 7.1.5 Versuchsablauf

Um den Ablauf sowie die Anzeige- und Eingabemodalitäten während des Versuchs einheitlich und eindeutig zu gestalten, werden allen Teilnehmern vor Beginn von Versuchsreihe 2 die folgenden Hinweise gegeben:

- Es werden die taktilen Muster bzw. geeignete Muster-Informations-Kombinationen getestet, nicht der Proband.
- Es werden zwei verschiedene Darbietungsarten verwendet: gepulst und dynamisch (mal begrenzt, mal in Endlosschleife).
- Aufgabe: Intuitive Verknüpfung von taktilen Mustern und Informationen (kein „richtig“ oder „falsch“).
- Der Versuch gliedert sich in drei Versuchsteile (Reihenfolge von V2.2 und V2.3 bei 50 % der Probanden getauscht):
  - V2.1: Dringlichkeit.
  - V2.2: Zuordnung von passenden Informationen zu jeweils einem definierten taktilen Muster.
  - V2.3: Zuordnung von passenden taktilen Mustern zu jeweils einer definierten Information.
- Pro Teilversuch wird jeweils ein Beispiel zu Beginn gezeigt.
- Bitte Zeit nehmen und intuitiv entscheiden, es kommt nicht auf Schnelligkeit an.
- Eine Korrektur der Eingabe ist nicht möglich.
- Proband klickt selbst auf „weiter“ (bzw. „play“) sobald er bereit ist, um die Anzeige des nächsten Reizmusters (nach zwei Sekunden) auszulösen.

Bevor der Versuch startet, wird dem Probanden die Übersicht der Informationen mit Piktogrammen gezeigt und alle Informationen kurz erläutert, um semantische Unklarheiten zu vermeiden. Im Anschluss werden letzte Rückfragen des Probanden beantwortet und der Gehörschutz angelegt. Zwischendurch bekommt der Proband immer mithilfe

eines Piktogramms angezeigt, wann er den Gehörschutz abnehmen soll, um ein kurzes Briefing (Inhalt und Eingabemaske) zum neuen Teilversuch zu erhalten und das jeweilige Beispiel durchzuspielen.

Es erfolgt im Gegensatz zu V1 pro Proband jeweils nur eine Abfrage, da in V2 nicht die Erkennbarkeit untersucht wird, sondern eine intuitive erste Zuordnung bzw. Assoziation erfolgen soll. Bei jeweils 50 % der Probanden (je Geschlecht) wird die Reihenfolge der Teilversuche V2.2 und V2.3 getauscht, um einen möglichen Effekt der gegenseitigen Beeinflussung der beiden Versuchsteile auszuschließen.

### 7.1.6 Probandenkollektiv

An der zweiten Versuchsreihe nehmen 24 Personen ( $N = 24$ ) bei einer ausgeglichenen Geschlechter-Verteilung (12m, 12w) teil. Pro Geschlechtergruppe absolvieren je sechs Teilnehmer den Versuch in Reihenfolge 1 bzw. Reihenfolge 2 (vgl. Kapitel 7.1.5). Ein Einfluss von Geschlecht und Reihenfolge (bei vergleichenden Teilversuchen) auf die Versuchsergebnisse wird somit ausgeschlossen. Die Tabelle 7.3 zeigt eine Übersicht der demografischen Daten, taktilen Wahrnehmungsleistung und Fahrerfahrung des Probandenkollektivs. Dies entspricht den ersten drei Abschnitten des Fragebogens (vgl. Kapitel 5.4). Ergänzt werden die über den Fragebogen erfassten Daten um die Uhrzeit des Versuchsbeginns (Versuchsteil auf der TSM) sowie die prozentuale Angabe der Höhe der Rückenkontaktfläche im Verhältnis zur Schulterhöhe im Sitzen, da dieser Wert in der Literatur bisher kaum zu finden ist und dadurch über die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche hinaus eine Relevanz besitzt.

Probandenkollektiv der Versuchsreihe V2: $N = 24$   12 männlich, 12 weiblich   20 Rechtshänder, 4 Linkshänder						
	Kategorie	Einheit	Mittelwert	Standardabw.	Minimum	Maximum
Demografische Daten	Uhrzeit des Versuchsbeginns	[hh:mm]	13:45	$\pm 3:07$	8:48	18:04
	Alter	[Jahre]	25,4	$\pm 3,3$	20	32
	Körpergewicht	[kg]	68,5	$\pm 12,1$	50	92
	Körperhöhe (ohne Schuhe)	[cm]	174,4	$\pm 10,6$	158,0	195,0
	Schulterhöhe stehend (ohne Schuhe)	[cm]	145,7	$\pm 9,3$	129,5	162,5
	Schulterhöhe sitzend	[cm]	62,4	$\pm 3,8$	56,5	71,5
	Höhe Rückenkontaktfläche sitzend	[cm]	55,3	$\pm 3,9$	50,0	66,0
	Verhältnis Rückenkontaktfläche zu Schulterhöhe	[%]	88,6	$\pm 2,8$	82,8	92,8
	Höhe der Fußaufstellfläche	[cm]	6,0	$\pm 2,5$	2,4	9,6
Taktile	Zweipunktschwelle	[mm]	37,1	$\pm 7,2$	30,0	55,0
	Vibrationsempfinden	[Stufe 1-8]	7,6	$\pm 0,5$	6,5	8,0
Erfahrung	Fahrerfahrung im PKW (zeitlich)	[Jahre]	7,5	$\pm 3,0$	3,0	14,0
	Fahrerfahrung im PKW (Strecke im letzten Jahr)	[km]	6.801	$\pm 8.713$	20	30.000
	Anteil der Ablenkung durch akustische Reize	[%]	83,2	$\pm 14,8$	50,0	100,0

**Tabelle 7.3:** Probandenkollektiv der Versuchsreihe V2 ( $N = 24$ )

## 7.2 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden zunächst die ausgewählten statistischen Verfahren sowie die allgemeine Ergebnisdarstellung beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der einzelnen Teilversuche sowie Teilversuch-übergreifende Erkenntnisse wiedergegeben. Nach einer Auswertung des Fragebogens erfolgt abschließend eine Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse mit Bezug zu den aufgestellten Hypothesen.

Bei der Durchführung von Versuchsreihe 2 werden einzelne technisch bedingte Ausfälle bzw. Fehler bei der Datenerfassung identifiziert. In der Auswertung werden diese wie folgt behandelt:

- Der Ausfall eines Vibrationsmotors (Sitzfläche, hinten, halb links) bei den Probanden P07, P08 und P09 kann vernachlässigt werden, da dieser Motor kaum verwendet wird und die Anzeige der Muster, in denen er vorkommt, durch den Ausfall nicht maßgeblich beeinträchtigt wird.
- Der im Programm hinterlegte Zufallsgenerator zur Randomisierung der Reihenfolge der angezeigten Informationen in Teilversuch V2.3 funktioniert erst ab Proband P04. Die Reihenfolge der Informationen für die Probanden P01, P02 und P03 ist somit identisch. Durch die umgesetzte Randomisierung ab P04 wird davon ausgegangen, dass die fehlende Randomisierung zu Versuchsbeginn keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse hat.
- Bei den Probanden P01, P02 und P03 fehlen in V2.3 für manche Informationen die Werte (Ränge) für die Eignung der jeweils zur Auswahl stehenden vibrotaktile Muster. In der Auswertung wird daher bei jeder dieser Informationen für alle zur Wahl stehenden Muster jeweils der Rang 1 vergeben.

### 7.2.1 Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung

In Teilversuch V2.1 werden die Faktoren Motoranzahl und Intervalldauer systematisch variiert und dabei die abhängige Variable „empfundene Dringlichkeit“ erfasst. Die Ergebnisse werden einer Unterschiedsprüfung mithilfe einer zweifaktoriellen ANOVA unterzogen. Eine detaillierte Beschreibung mehrfaktorieller ANOVAs sowie der dafür notwendigen Voraussetzungen findet sich in Kapitel 6.2.1. Durch die äquidistanten Abstände der siebenstufigen Skala, auf der der Proband seine Eingabe tätigt, wird von intervallskalierten Daten ausgegangen [BORTZ & LIENERT 2008, S. 28]. Signifikante Unterschiede werden in den Ergebnis-Diagrammen mit Sternen (\* bis \*\*\*, vgl. Beschreibung in Kapitel 6.2.1) gekennzeichnet. Ein möglicher Zusammenhang zwischen der empfundenen Dringlichkeit und der Motoranzahl bzw. Intervalldauer wird darüber hin-

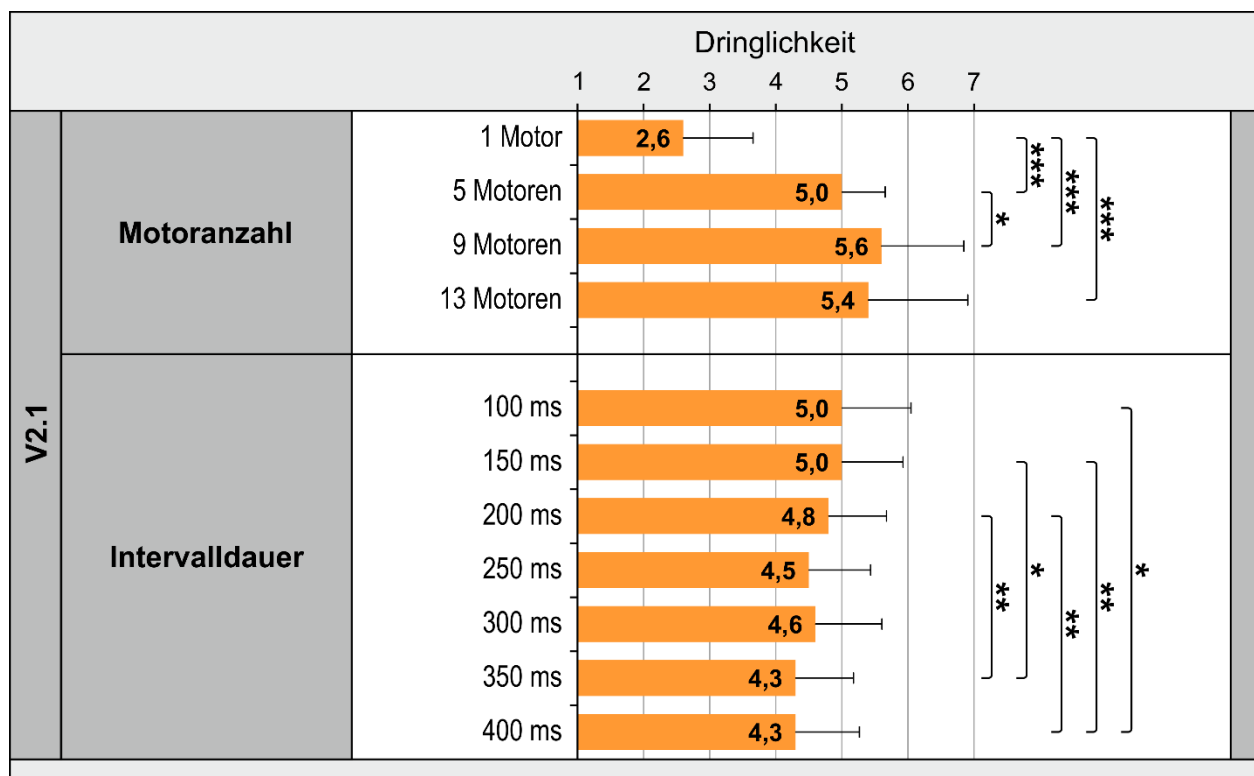


aus jeweils mit einer Korrelationsanalyse nach Pearson untersucht. Auch dieses Verfahren wird im oben genannten Kapitel genauer beschrieben.

In den Teilversuchen V2.2 und V2.3 werden durch die Probanden-Eingaben Rangdaten bzgl. der Eignung von Muster-Informationen-Kombinationen erzeugt. Rangdaten sind ordinalskaliert und eine Unterschiedsprüfung erfolgt durch Bilden von Rangsummen (Summe der Ränge aller einzelnen Probanden pro Reizmuster) sowie anschließend durchgeführten nichtparametrischen Friedman-Tests [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018B].

### 7.2.2 Ergebnisse – Dringlichkeit

In Teilversuch V2.1 wird die empfundene Dringlichkeit von vibrotaktilen Mustern untersucht und verglichen. Dies erfolgt durch gezieltes Variieren der Faktoren Motoranzahl und Intervalldauer, wodurch jedem Probanden insgesamt 28 Reizmuster präsentiert werden (vgl. Abbildung 7.3). Die Antwort des Probanden erfolgt jeweils über eine subjektive Bewertung der Dringlichkeit auf einer siebenstufigen, äquidistanten Skala von „nicht dringend“ bis „sehr dringend“. In Abbildung 7.5 werden die Mittelwerte der Bewertung der Dringlichkeit mit Standardabweichung jeweils für die Faktoren Motoranzahl und Intervalldauer visualisiert.



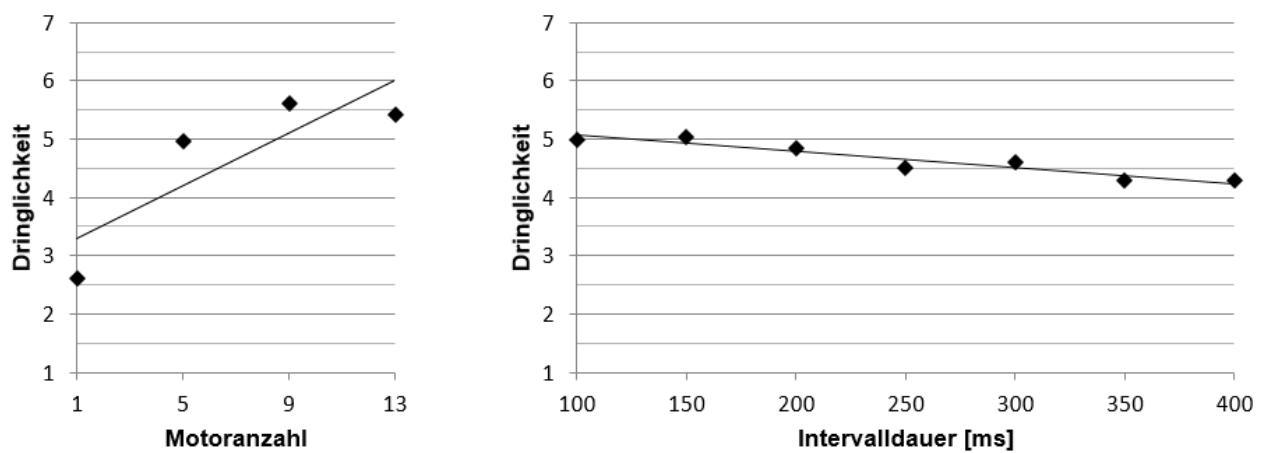
**Abbildung 7.5:** Mittelwerte und Standardabweichung der Dringlichkeit für Motoranzahl und Intervalldauer in V2.1 mit signifikanten Unterschieden

Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung im 4x7-Design weist einen signifikanten Effekt für die beiden Faktoren Motoranzahl (4 Stufen) und Intervalldauer (7 Stufen) nach. Für den Faktor Motoranzahl wird der Effekt beschrieben durch  $F(1.21, 27.92) = 49.81$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.684$  (Greenhouse-Geisser korrigiert). Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur können folgende Schlüsse gezogen werden. Im Vergleich zu einem einzelnen Motor führt eine Motoranzahl von 5 ( $p < 0.001$ ), 9 ( $p < 0.001$ ) oder 13 ( $p < 0.001$ ) jeweils zu einer höchst signifikant höher bewerteten Dringlichkeit. Zudem sorgt die Anzahl von 9 Motoren für eine signifikant höher empfundene Dringlichkeit im Vergleich zu 5 Motoren ( $p < 0.05$ ). Somit kann festgehalten werden, dass ein einzelner Motor nicht ausreicht, um die Dringlichkeit einer Information auszudrücken. Des Weiteren deuten die Ergebnisse darauf hin, dass beim vorliegenden Versuchsdesign mindestens 9 Motoren verwendet werden sollten, um eine möglichst hohe Dringlichkeit auszudrücken. Im Vergleich zur Erhöhung der Motoranzahl von 1 auf 5 sowie von 5 auf 9 besteht beim Sprung von 9 auf 13 kein weiterer signifikanter Unterschied.

Der Effekt für den Faktor Intervalldauer wird ausgedrückt durch  $F(2.97, 68.34) = 8.46$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.269$  (Greenhouse-Geisser korrigiert). Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur können folgende Schlüsse gezogen werden. Eine Intervalldauer von 350 ms sorgt für eine signifikant bzw. hoch signifikant niedriger empfundene Dringlichkeit als eine Intervalldauer von 150 ms ( $p < 0.05$ ) oder 200 ms ( $p < 0.01$ ). Liegt die Intervalldauer bei 400 ms, sorgt dies für eine signifikant niedriger bewertete Dringlichkeit im Vergleich zu einer Intervalldauer von 100 ms ( $p < 0.05$ ) sowie für eine hoch signifikant niedriger bewertete Dringlichkeit im Vergleich zu einer Intervalldauer von 150 ms ( $p < 0.01$ ) oder 200 ms ( $p < 0.01$ ). Somit kann festgehalten werden, dass eine Intervalldauer zwischen 100 ms und 300 ms (in Kombination mit einer sinnvoll gewählten Motoranzahl) geeignet ist, um die erhöhte Dringlichkeit einer Information auszudrücken. Intervalldauern ab 350 ms sorgen für eine niedriger empfundene Dringlichkeit.

Um einen Zusammenhang zwischen der erfassten Dringlichkeit und der Motoranzahl zu prüfen, wird neben der beschriebenen ANOVA eine Korrelationsanalyse nach Pearson für intervallskalierte Daten durchgeführt. Hierzu werden die einzelnen Daten der unterschiedlichen Intervalldauer für jede Motoranzahl jeweils in Form von Mittelwerten zusammengefasst. Demnach korreliert die Dringlichkeit hoch signifikant mit der Motoranzahl ( $r = 0.84$ ,  $df = 22$ ,  $p < 0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine hohe Korrelation bzw. eine ausgeprägte Beziehung vor. Reizmuster, die mehr Motoren enthalten, weisen somit auch eine höher empfundene Dringlichkeit auf (vgl. Abbildung 7.6).

Zur Prüfung des Zusammenhangs zwischen der erfassten Dringlichkeit und der Intervalldauer, wird ebenfalls eine Korrelationsanalyse nach Pearson für intervallskalierte Daten durchgeführt. Hierzu werden die einzelnen Daten der unterschiedlichen Motoranzahl für jede Intervalldauer jeweils in Form von Mittelwerten zusammengefasst. Demnach korreliert die Dringlichkeit hoch signifikant negativ mit der Intervalldauer ( $r=-0.95$ ,  $df=22$ ,  $p<0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine sehr hohe Korrelation bzw. eine sehr starke Beziehung vor. Reizmuster, die eine kürzere Intervalldauer aufweisen, besitzen somit auch eine höhere empfundene Dringlichkeit (vgl. Abbildung 7.6).



**Abbildung 7.6:** Korrelation von Dringlichkeit und Motoranzahl bzw. Intervalldauer

### 7.2.3 Ergebnisse – Zuordnung von Informationen

Im Teilversuch V2.2 wird von jedem Probanden für jedes angezeigte taktile Muster jeweils eine direkte Rangfolge der am besten dazu passenden Informationen wiedergegeben. Bei jeder Abfrage muss der Proband mindestens eine Information als am besten geeignet auswählen, die Angabe einer am zweitbesten bzw. drittbesten geeigneten Information ist optional. Alle Informationen, die nicht explizit vom Probanden ausgewählt werden, erhalten denselben Rang, welcher stets um den Wert 1 in Bezug auf den zuletzt definierten Rang erhöht wird. Wenn der Proband beispielsweise an zwei Informationen die Ränge 1 und 2 vergibt, erhalten alle übrigen Informationen, die zur Auswahl standen, den Rang 3. Somit entsteht für jeden Probanden eine Rangliste an passenden Informationen für jedes taktile Muster. Im Anschluss werden aus diesen ermittelten Rängen der einzelnen Probanden die Rangsummen für jedes taktile Muster gebildet [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018B]. Diese Rangsummen (RS) sowie die sich daraus ergebenden Gesamttrangfolgen (R) für jedes taktile Muster werden nachfolgend angegeben. Niedrigere Rangsummen deuten dabei auf eine prinzipiell bessere Eignung der jeweiligen Information zur Wiedergabe über das angezeigte taktile Muster hin.

Tabelle 7.4 zeigt die Ergebnisse für alle 43 im Versuch integrierten taktile Muster, um jeweils die am besten dazu passenden Informationen zu identifizieren, sowie unpassende Kombinationen auszuschließen. Für jedes taktile Muster wird dabei die ermittelte Rangfolge der jeweils zur Auswahl stehenden Informationen inkl. der Rangsummen angegeben.

Muster	R	Information	
		Benennung	RS
01_gepulst_vertikal_1	1	10 BESTÄTIGT	36
	2	17 EIN	52
	3*	19 OFFEN	65
	4*	11 GUT GEMACHT	69
	5*	09 MENÜ ZURÜCK	81
02_gepulst_horizontal	1	06 ZIEL ERREICHT	49
	2	10 BESTÄTIGT	51
	3	18 AUS	54
	4	20 GESCHLOSSEN	63
	5	09 MENÜ ZURÜCK	67
03_gepulst_diagonal	1	12 ANSCHNALLEN	43
	2	16 TOTER WINKEL	49
	3	09 MENÜ ZURÜCK	53
	4	15 SPUR HALTEN	58
04_gepulst_vertikal_2	1	01 ACHTUNG	40
	2	03 ÜBERNEHMEN	51
	3	02 FEHLER	58
	4*	10 BESTÄTIGT	82
	5*	11 GUT GEMACHT	85
	6*	08 AUTONOM FAHREN	86
05_dynamisch_hoch	1	28 MENÜ HOCH	54
	2	07 ANRUF	55
	3	17 EIN	60
	4	19 OFFEN	63
	5	11 GUT GEMACHT	66
06_dynamisch_runter	1	29 MENÜ RUNTER	45
	2	18 AUS	58
	3	08 AUTONOM FAHREN	61
	4	20 GESCHLOSSEN	67
	5*	06 ZIEL ERREICHT	71
5*	07 ANRUF	71	
07_dynamisch_links	1	26 NACH LINKS	29
	2*	09 MENÜ ZURÜCK	43
09_dynamisch_unten_rechts	1	12 ANSCHNALLEN	28
	2*	27 NACH RECHTS	44
10_dynamisch_links_drehen_1	1	13 WENDEN	38
	2	14 BITTE WARTEN	39
	3*	08 AUTONOM FAHREN	69
	4*	09 MENÜ ZURÜCK	72
11_dynamisch_links_drehen_2	1	13 WENDEN	39
	2	14 BITTE WARTEN	42
	3*	08 AUTONOM FAHREN	63
	4*	09 MENÜ ZURÜCK	71
12_gepulst_oben	1	17 EIN	39
	2	19 OFFEN	51
	3*	28 MENÜ HOCH	59
	4*	11 GUT GEMACHT	69
13_gepulst_unten	1	06 ZIEL ERREICHT	44
	2	18 AUS	54
	3	29 MENÜ RUNTER	55
	4	20 GESCHLOSSEN	60
14_gepulst_links	1	16 TOTER WINKEL	40
	2	26 NACH LINKS	43
	3*	15 SPUR HALTEN	67
	4*	09 MENÜ ZURÜCK	70
	5*	27 NACH RECHTS	80
17_gepulst_zentral	1	07 ANRUF	30
	2	10 BESTÄTIGT	50
	3*	17 EIN	72
	4*	11 GUT GEMACHT	76
	5*	18 AUS	79
	6*	09 MENÜ ZURÜCK	83
18_gepulst_Sitz_hinten	1	22 ENTFERNEN	35
	2	13 WENDEN	44
	3*	21 ANNÄHERN	50
19_gepulst_Sitz_vorne	1	25 GERADEAUS	31
	2	21 ANNÄHERN	44
20_gepulst_Sitz_links	3*	22 ENTFERNEN	57
	1	26 NACH LINKS	38
	2	15 SPUR HALTEN	42
21_dynamisch_horizontal_raus	3*	16 TOTER WINKEL	58
	4*	27 NACH RECHTS	75
	1	01 ACHTUNG	46
	2	02 FEHLER	61
	3	19 OFFEN	62
	4*	11 GUT GEMACHT	69
22_dynamisch_horizontal_rein	5*	07 ANRUF	70
	6*	17 EIN	72
	1	20 GESCHLOSSEN	38
	2	18 AUS	47
	3	06 ZIEL ERREICHT	51
	1	01 ACHTUNG	54
23_dynamisch_X_raus	2	04 ZU SCHNELL	69
	3	02 FEHLER	70
	3	05 BREMSEN	70
	5	07 ANRUF	74
	6*	19 OFFEN	81
	7*	17 EIN	85
	1	20 GESCHLOSSEN	41
24_dynamisch_X_rein	2	18 AUS	45
	3	06 ZIEL ERREICHT	49
	1	07 ANRUF	39
25_dynamisch_T_raus	2	11 GUT GEMACHT	51
	3*	02 FEHLER	60
	4*	01 ACHTUNG	61

**Tabelle 7.4:** V2.2 – Zuordnung von Informationen zu taktile Mustern mit Kennzeichnung (grau) signifikant schlechter geeigneter Informationen (Teil 1/2)

Muster	Information			Muster	Information			
	R	Benennung	RS		R	Benennung	RS	
26_dynamisch_Sitz_vor	1	21 ANNÄHERN	41	34_kumulativ_Gesamt_runter_vor_2	1	08 AUTONOM FAHREN	33	
	2	25 GERADEAUS	50		2	03 ÜBERNEHMEN	39	
	3	23 SCHNELLER	58	35_kumulativ_Gesamt_zurück_hoch_2	1	23 SCHNELLER	39	
	4*	08 AUTONOM FAHREN	78		2	01 ACHTUNG	54	
27_dynamisch_Sitz_zurück	4*	22 ENTFERNEN	78	3	24 LANGSAMER	57		
	1	22 ENTFERNEN	45	4*	02 FEHLER	69		
	2	24 LANGSAMER	55	36_dynamisch_Sitz_links_vor	1	15 SPUR HALTEN	30	
	3	04 ZU SCHNELL	71		2*	16 TOTER WINKEL	42	
	4*	21 ANNÄHERN	74	37_dynamisch_Sitz_links_zurück	1	15 SPUR HALTEN	30	
	5*	05 BREMSEN	75		2*	16 TOTER WINKEL	42	
	6*	13 WENDEN	78	38_dynamisch_links_runter	1	16 TOTER WINKEL	34	
7*	03 ÜBERNEHMEN	83	2		15 SPUR HALTEN	38		
28_dynamisch_runter_1	1	24 LANGSAMER	45	39_dynamisch_links_hoch	1	16 TOTER WINKEL	33	
	2	04 ZU SCHNELL	55		2	15 SPUR HALTEN	39	
	3*	05 BREMSEN	71	40_gepulst_Gesamt_vertikal_aussen	1	01 ACHTUNG	33	
	4	29 MENÜ RUNTER	73		2	02 FEHLER	39	
	5*	08 AUTONOM FAHREN	75	3*	19 OFFEN	69		
	6*	23 SCHNELLER	82	41_gepulst_Gesamt_vertikal_innen	1	01 ACHTUNG	31	
1	03 ÜBERNEHMEN	55	2		02 FEHLER	46		
2	23 SCHNELLER	58	3*		20 GESCHLOSSEN	64		
29_dynamisch_hoch_1	3	01 ACHTUNG	60	42_gepulst_Gesamt_links	1	16 TOTER WINKEL	37	
	4	28 MENÜ HOCH	65		2	15 SPUR HALTEN	47	
	5	24 LANGSAMER	72	3	26 NACH LINKS	58		
	6	02 FEHLER	79	4*	27 NACH RECHTS	84		
	30_dynamisch_Gesamt_runter_vor_1	1	25 GERADEAUS	41	43_gepulst_links	1	16 TOTER WINKEL	36
		2	23 SCHNELLER	54		2	15 SPUR HALTEN	52
2		29 MENÜ RUNTER	54	3	26 NACH LINKS	55		
31_dynamisch_Gesamt_zurück_hoch_1	4	08 AUTONOM FAHREN	59	4*	27 NACH RECHTS	85		
	1	03 ÜBERNEHMEN	43	44_gepulst_Sitz_flächig	1	05 BREMSEN	53	
	2	01 ACHTUNG	54		2	04 ZU SCHNELL	55	
	3	24 LANGSAMER	64		3	01 ACHTUNG	59	
	4	28 MENÜ HOCH	65		4	02 FEHLER	62	
5*	02 FEHLER	76	5		03 ÜBERNEHMEN	67		
32_kumulativ_runter_2	1	04 ZU SCHNELL	47	45_gepulst_flächig	1	01 ACHTUNG	46	
	2	05 BREMSEN	49		2	05 BREMSEN	62	
	3	24 LANGSAMER	53		3	03 ÜBERNEHMEN	70	
	4*	08 AUTONOM FAHREN	74		4*	04 ZU SCHNELL	74	
5*	23 SCHNELLER	81	5*		02 FEHLER	80		
33_kumulativ_hoch_2	1	03 ÜBERNEHMEN	49	46_gepulst_Gesamt_flächig	1	01 ACHTUNG	52	
	2	23 SCHNELLER	57		2	05 BREMSEN	55	
	3	01 ACHTUNG	58		3	03 ÜBERNEHMEN	66	
	4	24 LANGSAMER	61		4	04 ZU SCHNELL	73	
	5	02 FEHLER	68		5*	02 FEHLER	82	

**Tabelle 7.4:** V2.2 – Zuordnung von Informationen zu taktilen Mustern mit Kennzeichnung (grau) signifikant schlechter geeigneter Informationen (Teil 2/2)

Die Tabelle enthält ferner eine Kennzeichnung der Informationen, die pro taktilen Muster nach Auswertung der Friedman-Tests signifikant schlechter abschneiden als mindestens eine der weiteren Informationen (Signifikanzwert  $p < 0.05$ ). Diese Informationen werden durch Markierung des jeweiligen Ranges mit einem Stern (\*) sowie einen grauen Hintergrund gekennzeichnet und im weiteren Vorgehen als ungeeignete Kombinationen ausgeschlossen. Die Angabe der jeweils am besten geeigneten Kombinationen ist als Tendenz zu sehen. Die hierdurch als sinnvoll erscheinenden Kombinationen müssen im nächsten Schritt mit dem Teilversuch V2.3 abgeglichen werden (vgl. Kapitel 7.2.5).

### 7.2.4 Ergebnisse – Zuordnung von Mustern

Im Teilversuch V2.3 wird vom Probanden für jede angezeigte Information jeweils ein Vergleich zwischen den zur Auswahl stehenden taktilen Mustern vorgenommen. Dabei werden stets zwei bzw. drei taktile Muster direkt miteinander verglichen und intuitiv be-

wertet, welches davon besser zur Übermittlung der jeweiligen Information geeignet ist. Für jeden „gewonnenen“ Vergleich wird an das jeweilige Muster je ein Punkt vergeben. Die daraus für jedes Muster gebildete Summe wird im Anschluss in eine Reihenfolge transformiert, welche die unterschiedliche Eignung der zur Auswahl stehenden Muster zur Anzeige der jeweiligen Information widerspiegelt. Somit entsteht für jeden Probanden eine Rangliste an passenden taktilen Mustern für jede Information. Im Anschluss werden aus diesen ermittelten Rängen der einzelnen Probanden die Rangsummen für jede Information gebildet [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018B]. Diese Rangsummen (RS) sowie die sich daraus ergebenden Gesamtrangfolgen (R) für jede Information werden nachfolgend angegeben. Niedrigere Rangsummen deuten dabei auf eine prinzipiell bessere Eignung des jeweiligen Musters zur Wiedergabe der angezeigten Information hin.

Tabelle 7.5 zeigt die Ergebnisse für alle 26 im Versuch integrierten Informationen, um jeweils die am besten dazu passenden taktilen Muster zu identifizieren, sowie unpassende Kombinationen auszuschließen. Für jede Information wird dabei die ermittelte Rangfolge der jeweils zur Auswahl stehenden taktilen Muster inkl. der Rangsummen angegeben. Die Darstellung enthält zudem eine Kennzeichnung der taktilen Muster, die pro Information nach Auswertung der Friedman-Tests signifikant schlechter abschneiden als mindestens eines der weiteren taktilen Muster (Signifikanzwert  $p < 0.05$ ). Diese taktilen Muster werden durch Markierung des jeweiligen Ranges mit einem Stern (\*) sowie einen grauen Hintergrund gekennzeichnet und im weiteren Vorgehen als ungeeignete Kombinationen ausgeschlossen. Die Angabe der jeweils am besten geeigneten Kombinationen ist als Tendenz zu sehen. Die hierdurch als sinnvoll erscheinenden Kombinationen müssen im nächsten Schritt mit dem Teilversuch V2.2 abgeglichen werden (vgl. Kapitel 7.2.5).

Information	Muster			
	R	Benennung	RS	
01_ACHTUNG	1	45_gepulst_flächig	74	
	2	29_dynamisch_hoch_1	100	
	3	21_dynamisch_horizontal_raus	102	
	4	31_dynamisch_Gesamt_zurück_hoch_1	106	
	4	41_gepulst_Gesamt_vertikal_innen	106	
	6	04_gepulst_vertikal_2	109	
	7	25_dynamisch_T_raus	115	
	8	33_kumulativ_hoch_2	117	
	9	35_kumulativ_Gesamt_zurück_hoch_2	127	
	10*	46_gepulst_Gesamt_flächig	130	
	11*	23_dynamisch_X_raus	131	
	11*	40_gepulst_Gesamt_vertikal_aussen	131	
	13*	44_gepulst_Sitz_flächig	140	
02_FEHLER	1	46_gepulst_Gesamt_flächig	88	
	2	23_dynamisch_X_raus	89	
	3	33_kumulativ_hoch_2	97	
	4	40_gepulst_Gesamt_vertikal_aussen	103	
	5	35_kumulativ_Gesamt_zurück_hoch_2	109	
	6	44_gepulst_Sitz_flächig	115	
	7	04_gepulst_vertikal_2	116	
	8	41_gepulst_Gesamt_vertikal_innen	119	
	9	21_dynamisch_horizontal_raus	122	
	10	45_gepulst_flächig	126	
	11	29_dynamisch_hoch_1	127	
	12	31_dynamisch_Gesamt_zurück_hoch_1	130	
	13*	25_dynamisch_T_raus	140	
03_ÜBERNEHMEN	1	31_dynamisch_Gesamt_zurück_hoch_1	66	
	2	29_dynamisch_hoch_1	70	
	3	04_gepulst_vertikal_2	79	
	3	45_gepulst_flächig	79	
	5	35_kumulativ_Gesamt_zurück_hoch_2	95	
	6	46_gepulst_Gesamt_flächig	104	
	7	33_kumulativ_hoch_2	105	
	8*	27_dynamisch_Sitz_zurück	108	
	9*	44_gepulst_Sitz_flächig	110	
04_ZU SCHNELL	1	28_dynamisch_runter_1	60	
	2	27_dynamisch_Sitz_zurück	72	
	3	44_gepulst_Sitz_flächig	73	
	3	46_gepulst_Gesamt_flächig	73	
	5	23_dynamisch_X_raus	79	
	6	32_kumulativ_runter_2	82	
	7	45_gepulst_flächig	86	
	05_BREMSEN	1	28_dynamisch_runter_1	66
		2	45_gepulst_flächig	71
		3	23_dynamisch_X_raus	72
		4	32_kumulativ_runter_2	73
		4	46_gepulst_Gesamt_flächig	73
		6	27_dynamisch_Sitz_zurück	79
7		44_gepulst_Sitz_flächig	88	
06_ZIEL ERREICHT	1	13_gepulst_unten	41	
	2	02_gepulst_horizontal	54	
	2	22_dynamisch_horizontal_rein	54	
	4	06_dynamisch_runter	55	
	5*	24_dynamisch_X_rein	63	
07_ANRUF	1	17_gepulst_zentral	36	
	2	25_dynamisch_T_raus	53	
	3*	05_dynamisch_hoch	59	
	3*	21_dynamisch_horizontal_raus	59	
	5*	23_dynamisch_X_raus	60	
	6*	06_dynamisch_runter	66	
08_AUTONOM FAHREN	1	32_kumulativ_runter_2	68	
	2	10_dynamisch_links_drehen_1	71	
	3	34_kumulativ_Gesamt_runter_vor_2	75	
	4	04_gepulst_vertikal_2	79	
	4	11_dynamisch_links_drehen_2	79	
	4	30_dynamisch_Gesamt_runter_vor_1	79	
	7	06_dynamisch_runter	82	
	8	26_dynamisch_Sitz_vor	87	
	9	28_dynamisch_runter_1	91	
09_MENÜ ZURÜCK	1	07_dynamisch_links	48	
	2	14_gepulst_links	59	
	3	17_gepulst_zentral	70	
	4	02_gepulst_horizontal	71	
	5	03_gepulst_diagonal	73	
	6*	01_gepulst_vertikal_1	82	
	6*	10_dynamisch_links_drehen_1	82	
	8*	11_dynamisch_links_drehen_2	85	
10_BESTÄTIGT	1	17_gepulst_zentral	37	
	2	02_gepulst_horizontal	51	
	3	01_gepulst_vertikal_1	55	
	4*	04_gepulst_vertikal_2	58	

**Tabelle 7.5:** V2.3 – Zuordnung von taktilen Mustern zu Informationen mit Kennzeichnung (grau) signifikant schlechter geeigneter Muster (Teil 1/2)

Information	Muster		
	R	Benennung	RS
11_GUT GEMACHT	1	25_dynamisch_T_raus	60
	2	17_gepulst_zentral	62
	3	04_gepulst_vertikal_2	67
	4	21_dynamisch_horizontal_raus	68
	5	01_gepulst_vertikal_1	71
	6	12_gepulst_oben	73
	7	05_dynamisch_hoch	82
12_ANSCHNALLEN	1	09_dynamisch_unten_rechts	30
	2*	03_gepulst_diagonal	42
13_WENDEN	1	11_dynamisch_links_drehen_2	41
	2	27_dynamisch_Sitz_zurück	50
	3	10_dynamisch_links_drehen_1	52
	4	18_gepulst_Sitz_hinten	58
14_BITTE WARTEN	1	10_dynamisch_links_drehen_1	30
	2*	11_dynamisch_links_drehen_2	39
15_SPUR HALTEN	1	42_gepulst_Gesamt_links	50
	2	20_gepulst_Sitz_links	60
	3	43_gepulst_links	66
	4	38_dynamisch_links_runter	73
	4	39_dynamisch_links_hoch	73
	6	36_dynamisch_Sitz_links_vor	80
	7	37_dynamisch_Sitz_links_zurück	81
	8	14_gepulst_links	82
	9*	03_gepulst_diagonal	86
16_TOTER WINKEL	1	15_gepulst_oben_links	58
	2	43_gepulst_links	60
	3	14_gepulst_links	78
	4	42_gepulst_Gesamt_links	86
	5	20_gepulst_Sitz_links	96
	6*	39_dynamisch_links_hoch	105
	7*	37_dynamisch_Sitz_links_zurück	113
	7*	38_dynamisch_links_runter	113
	9*	16_gepulst_unten_links	116
	9*	36_dynamisch_Sitz_links_vor	116
	11*	03_gepulst_diagonal	120
17_EIN	1	17_gepulst_zentral	46
	2	12_gepulst_oben	55
	3	01_gepulst_vertikal_1	56
	4	05_dynamisch_hoch	57
	4	23_dynamisch_X_raus	57
	6	21_dynamisch_horizontal_raus	62
18_AUS	1	17_gepulst_zentral	41
	2	13_gepulst_unten	52
	3	06_dynamisch_runter	57
	4	02_gepulst_horizontal	59
	5*	22_dynamisch_horizontal_rein	62
5*	24_dynamisch_X_rein	62	
19_OFFEN	1	12_gepulst_oben	52
	2	23_dynamisch_X_raus	53
	2	40_gepulst_Gesamt_vertikal_aussen	53
	4	01_gepulst_vertikal_1	58
	4	21_dynamisch_horizontal_raus	58
	6	05_dynamisch_hoch	59
20_GESCHLOSSEN	1	13_gepulst_unten	46
	2	22_dynamisch_horizontal_rein	52
	3	02_gepulst_horizontal	55
	4	41_gepulst_Gesamt_vertikal_innen	57
	5	24_dynamisch_X_rein	60
	6	06_dynamisch_runter	63
21_ANNÄHERN	1	26_dynamisch_Sitz_vor	42
	2	19_gepulst_Sitz_vorne	45
	3	27_dynamisch_Sitz_zurück	54
	4	18_gepulst_Sitz_hinten	60
22_ENTFERNEN	1	27_dynamisch_Sitz_zurück	32
	2	18_gepulst_Sitz_hinten	47
	3*	19_gepulst_Sitz_vorne	58
	4*	26_dynamisch_Sitz_vor	64
23_SCHNELLER	1	26_dynamisch_Sitz_vor	56
	2	33_kumulativ_hoch_2	66
	3	29_dynamisch_hoch_1	67
	4	28_dynamisch_runter_1	77
	5	32_kumulativ_runter_2	78
	6	30_dynamisch_Gesamt_runter_vor_1	86
	7*	34_kumulativ_Gesamt_runter_vor_2	92
24_LANGSAMER	1	28_dynamisch_runter_1	50
	2	27_dynamisch_Sitz_zurück	66
	3	32_kumulativ_runter_2	68
	4	35_kumulativ_Gesamt_zurück_hoch_2	82
	5*	29_dynamisch_hoch_1	84
	5*	33_kumulativ_hoch_2	84
	7*	31_dynamisch_Gesamt_zurück_hoch_1	88
25_GERADEAUS	1	26_dynamisch_Sitz_vor	34
	2	19_gepulst_Sitz_vorne	40
2	30_dynamisch_Gesamt_runter_vor_1	40	
26_NACH LINKS	1	14_gepulst_links	48
	2	07_dynamisch_links	50
	3	08_dynamisch_Sitz_links	54
	4	20_gepulst_Sitz_links	58
	4	42_gepulst_Gesamt_links	58
	6	43_gepulst_links	65

**Tabelle 7.5:** V2.3 – Zuordnung von taktilen Mustern zu Informationen mit Kennzeichnung (grau) signifikant schlechter geeigneter Muster (Teil 2/2)



### 7.2.5 Ergebnisse – Muster-Informations-Kombinationen

Die beschriebenen Ergebnisse der Teilversuche V2.2 (vgl. Kapitel 7.2.3) und V2.3 (vgl. Kapitel 7.2.4) liefern die Basis für die Auswahl optimaler Muster-Informations-Kombinationen. Die dabei in beiden Richtungen identifizierten Rangfolgen führen einerseits zum Ausschluss von signifikant schlechter bewerteten Kombinationen und geben andererseits klare Tendenzen vor, welche Muster zur Anzeige welcher Information am besten geeignet sind und umgekehrt. Im Folgenden wird die bisherige Betrachtung aus den beiden Perspektiven *Muster* und *Information* zusammengeführt, um daraus möglichst intuitive Muster-Informations-Kombinationen abzuleiten. Eine *ideale* Kombination entsteht dabei, wenn ein Muster (aus mehreren zur Auswahl stehenden) für die Darbietung einer bestimmten Information auf Rang 1 liegt und gleichzeitig für dieses Muster dieselbe Information (aus mehreren zur Auswahl stehenden) ebenfalls Rang 1 belegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass solche idealen Kombinationen rein zufällig entstehen, kann als äußerst gering eingeschätzt werden. Durchschnittlich stehen für die angezeigten Muster jeweils 4,2 ( $\pm 1,4$ ) Informationen zur Auswahl. Für jede Information liegt der Mittelwert der zur Auswahl stehenden Muster bei 6,6 ( $\pm 2,9$ ). Die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit, dass eine ideale Muster-Informations-Kombination zufällig entsteht, ergibt sich aus dem Produkt der beiden Kehrwerte und liegt bei lediglich 3,6 %. Umgekehrt ausgedrückt kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 96,4 % davon ausgegangen werden, dass eine solche Kombination nicht zufällig, sondern auf Basis der mentalen Modelle der Probanden entsteht. Neben diesen idealen Kombinationen gilt es, möglichst viele gut geeignete sowie praktikable Kombinationen abzuleiten. Hierzu werden die folgenden Punkte berücksichtigt:

- Für manche Informationen ist nur eine paarweise Muster-Auswahl sinnvoll (bspw. „Ein“ und „Aus“).
- Bei den idealen Kombinationen wird geprüft, ob diese sich gegenseitig beeinträchtigen (z. B. durch Verwechslungsgefahr) und ob sinnvolle Alternativen existieren, falls paarweise Kombinationen notwendig sind.
- Aufgabenart und Wichtigkeit bzw. Dringlichkeit der Informationen werden berücksichtigt, um insbesondere Verwechslungen bei sicherheitsrelevanten Informationen zu vermeiden, wenn Muster für mehrere Informationen als passend bewertet werden.
- Im Zweifel wird nach den Ergebnissen von Teilversuch V2.2 ausgewählt, da Betrachtung in dieser „Richtung“ in der Praxis relevanter ist. Dabei wird ein konkretes vibrotaktiler Muster angezeigt, dessen Bedeutung vom Nutzer richtig interpretiert werden muss.

- Es wird geprüft ob Informationen zusammengefasst werden sollen, die semantisch nahe beieinander liegen.

Auf Basis dieser Grundgedanken werden die in Tabelle 7.6 dargestellten Kriterien definiert, um eine systematische Auswahl und Festlegung möglichst vieler sinnvoller Kombinationen zu ermöglichen. Dabei wird für die Güte der Kombinationen zusätzlich eine Farbkodierung eingeführt, die in der Matrix in Tabelle 7.7 verwendet wird, um die Auswahl der am besten geeigneten Kombinationen aus Mustern und Informationen zu visualisieren.

Nr.	Kriterium / Beschreibung	Güte der Kombination	Farbe
1	Kombination in beiden Richtungen auf Rang 1	Ideal	
2	Kombination in beiden Richtungen unter den ersten drei Rängen	Sehr gut	
3	Kombination in einer Richtung unter den ersten drei Rängen, in der anderen Richtung unter den ersten fünf Rängen	Tolerierbar	
4	In keiner Richtung unter den ersten drei Rängen	Aussortiert	
5	Mindestens in einer Richtung nicht unter den ersten fünf Rängen	Aussortiert	
6	Mindestens in einer Richtung als signifikant schlechter identifiziert als andere Auswahlmöglichkeiten	Aussortiert	
7	Ausgewählte Kombinationen für das weitere Vorgehen	Ausgewählt	

**Tabelle 7.6:** Kriterien für die systematische Auswahl von intuitiven Muster-Informationen-Kombinationen

Basierend auf den Ergebnissen der Teilversuche V2.2 und V2.3 sowie den in Tabelle 7.6 definierten Auswahlkriterien, erfolgt die Darstellung der systematischen Auswahl von geeigneten und intuitiven Kombinationen von Mustern und Informationen in der nachfolgenden Tabelle 7.7. In der Tabelle werden die Muster in Form einer Matrix über den Informationen abgetragen und die Kombinationen entsprechend der beschriebenen Farbkodierung markiert. Die Matrix enthält für jede Kombination in den einzelnen Zellen zudem die jeweils ermittelten Ränge aus den Teilversuchen V2.2 (erste Zahl: Rang der Information für jeweiliges Muster, Rangfolge spaltenweise zu lesen) und V2.3 (zweite Zahl: Rang des taktilen Musters für jeweilige Information, Rangfolge zeilenweise zu lesen). Eine „0“ steht dabei für eine signifikant schlechter geeignete Kombination, die auf Basis der Ergebnisse in den vorherigen Kapiteln ausgeschlossen wird.

Vibrotaktile Muster	Kategorie	Orientierungen					Dynamische Richtungen					Statische Richtungen					Radial					T					Dynamische Verläufe					Bereiche					Flächig					Anzahl Möglichkeiten									
		01_gepulst_vertikal_1	02_gepulst_horizontal	03_gepulst_diagonal	04_gepulst_vertikal_2	05_dynamisch_hoch	06_dynamisch_unter	07_dynamisch_links	08_dynamisch_Sitz_links	09_dynamisch_unten_rechts	10_dynamisch_links_drehen_1	11_dynamisch_links_drehen_2	12_gepulst_oben	13_gepulst_unten	14_gepulst_links	15_gepulst_oben_links	16_gepulst_unten_links	17_gepulst_zentral	18_gepulst_Sitz_hinten	19_gepulst_Sitz_vorne	20_gepulst_Sitz_links	21_dynamisch_horizontal_raus	22_dynamisch_horizontal_rein	23_dynamisch_X_raus	24_dynamisch_X_rein	25_dynamisch_T_raus	26_dynamisch_Sitz_vor	27_dynamisch_Sitz_zurück	28_dynamisch_runter_1	29_dynamisch_hoch_1	30_dynamisch_Gesamt_runter_vor_1	31_dynamisch_Gesamt_zurück_hoch_1	32_kumulativ_runter_2	33_kumulativ_hoch_2	34_kumulativ_Gesamt_runter_vor_2	35_kumulativ_Gesamt_zurück_hoch_2	36_dynamisch_Sitz_links_vor	37_dynamisch_Sitz_links_zurück	38_dynamisch_links_runter	39_dynamisch_links_hoch	40_gepulst_Gesamt_vertikal_aussen		41_gepulst_Gesamt_vertikal_innen	42_gepulst_Gesamt_links	43_gepulst_links	44_gepulst_Sitz_flächig	45_gepulst_flächig	46_gepulst_Gesamt_flächig			
Max. Motorenzahl		5	5	5	10	9	9	9	12	9	3	6	2	2	2	1	1	4	4	4	15	15	9	9	9	12	12	15	15	15	15	6	6	6	6	3	3	3	3	18	18	9	5	8	13	21					
Dynamisch (Weile)																																																			
Dynamisch (Kumulativ)																																																			
01_ACHTUNG				1 6																																															
02_FEHLER				3 7																																															
03_ÜBERNEHMEN				2 3																																															
04_ZU SCHNELL																																																			
05_BREMSEN																																																			
06_ZIEL ERREICHT																																																			
07_ANRUF																																																			
08_AUTONOM FAHREN																																																			
09_MENU ZURÜCK																																																			
10_BESTÄTIGT																																																			
11_GUT GEMACHT																																																			
12_ANSCHMALLEN																																																			
13_WENDEN																																																			
14_BITTE WARTEN																																																			
15_SPUR HALTEN																																																			
16_TOTER WINKEL																																																			
17_EIN																																																			
18_AUS																																																			
19_OFFEN																																																			
20_GESCHLOSSEN																																																			
21_ANNÄHERN																																																			
22_ENTFERNEN																																																			
23_SCHNELLER																																																			
24_LANGSAMER																																																			
25_GERADEAUS																																																			
26_NACH LINKS																																																			
27_NACH RECHTS																																																			
28_NACH OBEN																																																			
29_NACH UNTEN																																																			
Anzahl Möglichkeiten		5	5	4	6	5	6	5	6	2	1	2	4	4	4	1	6	3	3	4	6	3	7	3	4	5	7	6	6	4	2	2	4	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5		

Tabelle 7.7: Auswahl-Matrix – Vibrotaktile Muster und Informationen

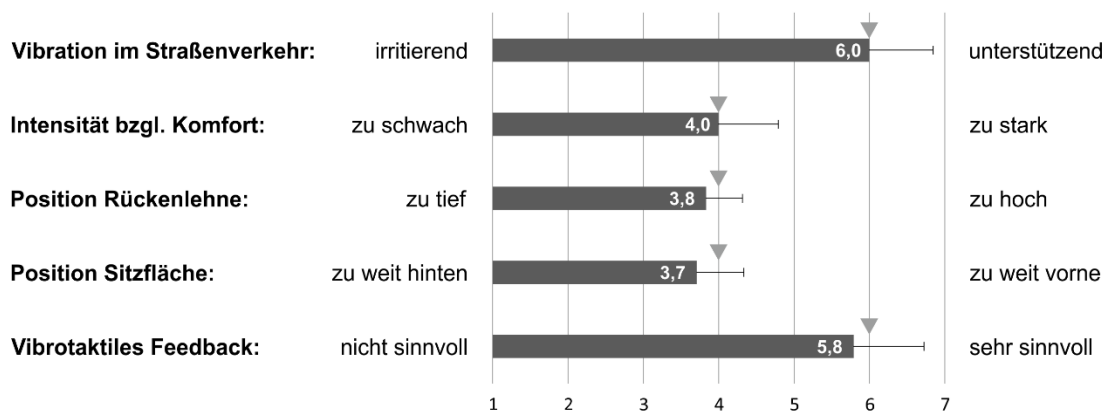
Im Zuge der beschriebenen, systematischen Auswahl werden die folgenden Informationen aussortiert: „Bremsen“, „Ziel erreicht“, „Menü Zurück“, „Gut Gemacht“ und „Bitte Warten“ (jeweils rot markiert in Tabelle 7.7). Diese werden entweder mit semantisch verwandten Informationen zusammengelegt (z. B. „Bremsen“ mit „Achtung“) oder besitzen eine geringe Relevanz und sollen die Erkennung von wichtigeren Informationen nicht beeinträchtigen (z. B. „Menü Zurück“). Für die Information „Geradeaus“ wird unabhängig von den zur Auswahl gestellten Mustern das sehr gut erkennbare (vgl. V1) und noch verfügbare Muster „01“ ausgewählt. Des Weiteren werden für V3 die Informationen „Nach Rechts“, „Toter Winkel (rechts)“ und „Spur Halten (rechts)“ entsprechend der geeigneten Muster für die linke Seite ergänzt. Somit werden insgesamt 24 Muster-Informationen-Kombinationen für die weitere Verwendung in V3 erarbeitet.

### 7.2.6 Auswertung Fragebogen

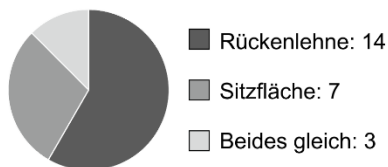
Neben der Auswertung der demografischen Daten und taktilen Wahrnehmungsleistung in Kapitel 7.1.6, werden in Abbildung 7.7 die Ergebnisse der Fragebogenabschnitte drei bis sechs für Versuchsreihe 2 wiedergegeben. Die Erhebung dieser Abschnitte erfolgt nach dem Versuchsteil auf der TSM und bezieht die dabei gemachten Erfahrungen mit ein. Der vollständige Fragebogen kann Anhang A2 entnommen werden.

Die Ergebnisse zeigen wie in Versuchsreihe 1, dass der Einsatz von vibrotaktilem Feedback im Fahrzeugsitz von den Teilnehmern generell als unterstützend und sinnvoll angesehen wird. Die technische Gestaltung in Bezug auf Vibrationsintensität und Positionierung der TSM wird als nahezu optimal wiedergegeben, was die Erkenntnisse aus Literatur und Vorstudien bestätigt. Als besser geeignet im Sinne von Komfort und Erkennbarkeit der Muster wird die Rückenlehne beschrieben. Die Unterschiede zur Sitzfläche sind jedoch im Vergleich zu V1 geringer. Bei der Darbietungsart bestehen leichte Vorteile für die dynamische Anzeige, jedoch sind beide Darbietungsarten für die meisten Teilnehmer gleich gut geeignet. In Bezug auf die Dringlichkeit sind die meisten Probanden der Meinung, dass die Intervalldauer einen größeren Einfluss auf die empfundene Dringlichkeit hat als die Motoranzahl. Dies deckt sich insofern mit den in Kapitel 7.2.2 dargestellten empirischen Ergebnissen, dass der Korrelationskoeffizient  $r$  zwischen Dringlichkeit und Intervalldauer ( $r=-0.95$ ) im Betrag höher ist als der zwischen Dringlichkeit und Motoranzahl ( $r=0.84$ ). Die Einschätzung, wie viele vibrotaktile Muster im Fahrzeug eingesetzt werden können, ohne dass Verwechslungen auftreten, variiert weniger stark als in V1 (hier zwischen 5 und 20 Mustern, durchschnittlich ebenfalls 10). Des Weiteren bestätigen alle Teilnehmer, dass es gut möglich ist, sich drei sequenziell angezeigte vibrotaktile Muster merken zu können, um im Anschluss eine Auswahl zur Eignung für die Übermittlung einer bestimmten Information treffen zu können.

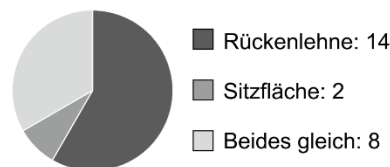
Komfortempfinden und technische Gestaltung:  Mittelwert  Standardabw.  Median



Wo ist vibrotaktiler Feedback angenehmer?



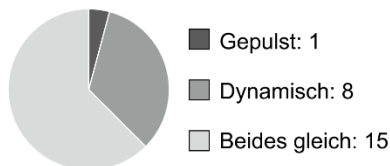
Wo sind vibrotaktile Muster besser erkennbar?



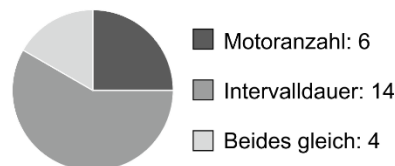
Wie viele Muster möglich ohne Verwechslungen?

Mittelwert: 10,2 (±3,7)  
Minimum: 5,0  
Maximum: 20,0

Bei welcher Darbietungsart Muster besser erkennbar?



Welcher Faktor ausschlaggebender für Dringlichkeit?



3 sequenziell angezeigte Muster gut zu merken?

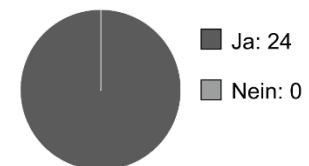


Abbildung 7.7: Fragebogenauswertung für Versuchsreihe 2 (N = 24)

### 7.2.7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die in den vorherigen Kapiteln präsentierten Ergebnisse von Versuchsreihe 2 werden im Folgenden zusammengefasst und in Zusammenhang mit den zuvor aufgestellten Hypothesen diskutiert. Insgesamt werden in V2 184 Muster-Informationskombinationen auf deren Eignung untersucht, welche den Probanden, aufgeteilt in die Teilversuche V2.2 und V2.3, jeweils in beiden „Richtungen“ präsentiert werden. Zudem erfolgt in V2.1 die Bewertung der empfundenen Dringlichkeit von Mustern in Abhängigkeit der Faktoren Motoranzahl und Intervalldauer.

Die nachfolgende Tabelle 7.8 zeigt einen Überblick über die in Kapitel 7.1.1 formulierten Alternativhypothesen H<sub>x</sub>. Dabei wird auf Basis der Versuchsergebnisse wiedergegeben, welche dieser Alternativhypothesen angenommen werden, was einem Verwerfen der

jeweiligen Nullhypothese  $H_{0x}$  entspricht. Es erfolgt eine Unterscheidung in „vollständig angenommen“ (ja) und „teilweise angenommen“ (ja, teilweise).

Alternativhypothesen $H_x$		$H_x$ angenommen
$H_{10}$	Die empfundene <b>Dringlichkeit</b> der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch die <b>Motoranzahl</b> der Muster.	ja
$H_{11}$	Die empfundene <b>Dringlichkeit</b> der vibrotaktile Muster wird beeinflusst durch die <b>Intervalldauer</b> der Impulse der Muster.	ja
$H_{12}$	Den vibrotaktile Mustern werden <b>intuitiv</b> bestimmte Informationen zugeordnet.	ja, teilweise
$H_{13}$	Den Informationen werden <b>intuitiv</b> bestimmte vibrotaktile Muster zugeordnet.	ja, teilweise
$H_{14}$	Es existieren <b>Muster-Informations-Kombinationen</b> , die semantisch besser zusammen passen als andere.	ja

**Tabelle 7.8:** Hypothesenüberprüfung für Versuchsreihe 2

Die in Tabelle 7.8 dargestellte Übersicht ergibt sich aus den nachfolgend aufgeführten Schlussfolgerungen der einzelnen (signifikanten) Ergebnisse.

**H<sub>10</sub>:** In V2.1 wird nachgewiesen, dass eine signifikante, hohe Korrelation zwischen Dringlichkeit und Motoranzahl besteht. Eine Mindestanzahl von 9 Motoren kann bei der gewählten Konfiguration empfohlen werden, um die erhöhte Dringlichkeit eines Musters auszudrücken, da die Dringlichkeit hierbei signifikant höher bewertet wird als für einen einzelnen Motor bzw. für 5 Motoren.

**H<sub>11</sub>:** Auch zwischen Dringlichkeit und Intervalldauer bei der Musteranzeige wird in V2.1 eine signifikante, sehr hohe Korrelation identifiziert. Signifikant höher wird die Dringlichkeit bei einer Intervalldauer zwischen 100 ms und 300 ms im Vergleich zu Intervalldauern ab 350 ms bewertet. Die Erkenntnisse zur Dringlichkeit ermöglichen eine semantische Verfeinerung der Muster, die nachfolgend in V3 verwendet werden.

**H<sub>12</sub>:** Die Betrachtung der Zuordnung von passenden Informationen zu einzelnen taktilen Mustern in V2.2 liefert Tendenzen dafür, welche Kombinationen auf Basis der mentalen Modelle der Probanden intuitiv geknüpft werden. Zudem können einzelne Kombinationen ausgeschlossen werden, die signifikant schlechter abschneiden als mindestens eine weitere zur Verfügung stehende Kombination.

**H<sub>13</sub>:** Die Betrachtung der Zuordnung von passenden taktilen Mustern zu einzelnen Informationen in V2.3 liefert Tendenzen dafür, welche Kombinationen auf Basis der mentalen Modelle der Probanden intuitiv geknüpft werden. Zudem können einzelne Kombi-

nationen ausgeschlossen werden, die signifikant schlechter abschneiden als mindestens eine weitere zur Verfügung stehende Kombination.

**H<sub>14</sub>:** Die Zusammenführung der Ergebnisse aus den Teilversuchen V2.2 und V2.3 ermöglicht den Abgleich der intuitiven Zuordnung aus beiden „Richtungen“. Dadurch werden einige Muster-Informationen-Kombinationen als intuitiv und geeignet identifiziert, die mit großer Wahrscheinlichkeit nicht zufällig zustande kommen. Im Versuch werden dabei alleine zehn Kombinationen ermittelt, die in beiden Teilversuchen jeweils als geeignetste Verbindung (jeweils Rang 1 aus mehreren zur Auswahl stehenden Möglichkeiten) bewertet werden (vgl. Tabelle 7.7).

Gerade diese Verknüpfung der beiden Perspektiven ist entscheidend für die Ermittlung optimaler Kombinationen. Einerseits muss die Anzeige eines konkreten taktilen Musters eine direkte und korrekte Interpretation des Fahrers unterstützen und damit eine richtige und teilweise sicherheitsrelevante Reaktion auslösen. Auf der anderen Seite muss jedoch auch die Erwartungshaltung des Fahrers erfüllt werden, wenn er mit der taktilen Anzeige einer konkreten Information rechnet, damit es dabei nicht zu Überraschungen oder Fehlern kommt.





## 8 Versuchsreihe 3: Lernen und Abrufen vibrotaktiler Muster

Mit Versuchsreihe 3 (V3) wird entsprechend der in Kapitel 4 beschriebenen Methode die Pragmatik-Ebene der taktilen Informationsübertragung adressiert. Dabei werden insbesondere die Erlernbarkeit, kombinierte Anwendung und sinnvolle Anzahl taktiler Muster innerhalb eines konkreten Nutzungskontextes untersucht. Auf Basis der Vorstudien (vgl. Kapitel 5.3) sowie der Versuchsreihen 1 und 2 werden die verwendeten taktilen Muster jeweils mit konkreten Informationen verknüpft. Während des Versuchs werden die so definierten Muster und Bedeutungen vom Probanden gelernt und anschließend abgefragt. Als Nutzungskontext dient, aufbauend auf Versuchsreihe 2, die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im PKW. Ziel der Untersuchung ist die effektive und effiziente Zusammenstellung eines adäquaten Musterpools für den definierten Anwendungsfall, um den Nutzer durch die taktilen Informationsübermittlung bestmöglich beim sicheren Erreichen seiner Ziele zu unterstützen.

### 8.1 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Nachfolgend werden die Ziele und Hypothesen von Versuchsreihe 3 beschrieben sowie der Versuchsaufbau und die Versuchsbedingungen erläutert. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung des Versuchsablaufs und des Probandenkollektivs.

#### 8.1.1 Ziele und Hypothesen

Versuchsreihe 3 gliedert sich in eine Lernphase (Teilversuch V3.1) sowie eine Abfragephase (Teilversuch V3.2). In der Lernphase werden die verwendeten Muster und deren jeweilige Bedeutung erklärt und schrittweise erlernt. Dabei wird der Faktor Erlernbarkeit untersucht, welcher durch die Erfassung der abhängigen Variablen Fehleranzahl und Antwortzeit operationalisiert wird. In der zweiten Phase werden die gelernten Muster abgefragt, wobei der Einfluss des Faktors Musterpoolgröße auf die erfasste Erkennungsrate untersucht wird.

Auf dieser Basis werden in Versuchsreihe 3 die nachfolgend aufgeführten Hypothesen überprüft, welche in Form von Alternativhypothesen  $H_x$  entsprechend der korrespondierenden Nullhypothesen  $H_{0x}$  (= kein Effekt/Zusammenhang) formuliert werden:

In Bezug auf die **Erlernbarkeit** von vibrotaktile Mustern und zugehörigen Informationen werden für den Teilversuch V3.1 folgende Hypothesen formuliert:

- **H<sub>15</sub>**: Es existieren Muster-Informations-Kombinationen, die leichter erlernbar sind als andere.

- **H<sub>16</sub>**: Muster-Informationen-Kombinationen, die leichter (mit weniger Fehlern) erlernt werden können, weisen kürzere Antwortzeiten auf als Kombinationen, die schwieriger (mit mehr Fehlern) erlernt werden.

In Bezug auf die **Abfrage / Wiedergabe** der gelernten vibrotaktile Muster und zugehörigen Informationen werden für den Teilversuch V3.2 folgende Hypothesen formuliert:

- **H<sub>17</sub>**: Es existieren Muster-Informationen-Kombinationen, die besser erkennbar sind als andere.
- **H<sub>18</sub>**: Muster-Informationen-Kombinationen mit hoher Erkennungsrate weisen kürzere Antwortzeiten auf als Kombinationen mit niedriger Erkennungsrate.
- **H<sub>19</sub>**: Die Erkennbarkeit der Muster-Informationen-Kombinationen wird beeinflusst durch die Größe des verwendeten Musterpools.
- **H<sub>20</sub>**: Die Antwortzeit bei der Erkennung der Muster-Informationen-Kombinationen wird beeinflusst durch die Größe des verwendeten Musterpools.
- **H<sub>21</sub>**: Die Erkennbarkeit der Muster-Informationen-Kombinationen wird beeinflusst durch die Ähnlichkeit der zur Auswahl stehenden Kombinationen.

Zusätzlich zu den formulierten Hypothesen dient Versuchsreihe 3 auch als Validierung der in V1 ermittelten Erkennungsraten der einzelnen Muster bzw. Musterarten, die hier in weiterentwickelter Form verwendet werden. Dabei erfolgt insgesamt eine große Anzahl an Abfragen pro Muster, um auf dieser Basis empirisch fundierte Aussagen zu den einzelnen, absoluten Erkennungsraten treffen zu können.

Des Weiteren wird mit V3 überprüft, ob eine derartig kurze und intensive Lernphase (20-25 min) generell zu zufriedenstellenden Ergebnissen bei der Abfrage der vibrotaktile Muster und deren Bedeutungen führen kann. Für einen Einsatz der entwickelten Muster in der Praxis ist dies eine wichtige und notwendige Voraussetzung.

### 8.1.2 Generierung der Reizmuster

Die Generierung der Reizmuster für V3 basiert auf den Ergebnissen von V2. Die dabei ausgewählten 21 Muster werden um drei weitere Muster ergänzt, die zu den in V2 lediglich für die linke Seite betrachteten Informationen „Toter Winkel“, „Spur Verlassen“ und „Nach Links“ jeweils die Entsprechung für die rechte Seite darstellen. Somit kommen in V3 insgesamt 24 Muster zum Einsatz, die jeweils eine konkrete Information repräsentieren und bzgl. der taktilen Darbietung weiter verfeinert werden (siehe Tabelle 8.1). Dabei wird eine weitere Differenzierung der einzelnen Muster angestrebt sowie die semantische Bedeutung durch Anpassung der taktilen Darbietung jeweils verstärkt. Die Einzelschritte der dynamischen Muster sind in Anhang A3 dargestellt.





































Reizmuster / Information	Taktiler Muster inkl. Darbietungsart und Benennung	TSM-Bereich	Anordnung der Motoren	Motoranzahl (max.)	Anzeige- / Intervalldauer (bei dynamischen Mustern pro Schritt)	Anzahl Aktivierungen / Durchläufe	Beschreibung / Anpassung	Entdeckungsaufgabe	Überwachungsaufgabe	Steuerungsaufgabe
01_FAHRSPUR_TOTER-WINKEL-L 	01_gepulst_oben_links	RL		1	300/150	∞	Endlosschleife, sehr kurze Intervalle	1		
02_FAHRSPUR_TOTER-WINKEL-R 	02_gepulst_oben_rechts	RL		1	300/150	∞	Endlosschleife, sehr kurze Intervalle	1		
03_FAHRSPUR_SPUR-VERLASSEN-L 	03_kontinuierlich_Gesamt_links	GS		9	∞	1	kontinuierlich	1		
04_FAHRSPUR_SPUR-VERLASSEN-R 	04_kontinuierlich_Gesamt_rechts	GS		9	∞	1	kontinuierlich	1		
05_WARNUNG_ACHTUNG 	05_gepulst_flächig	RL		13	300/150	∞	Endlosschleife, sehr kurze Intervalle	1		
06_WARNUNG_ÜBERNEHMEN 	06_dynamisch_Gesamt_zurück_hoch_1	GS		15	100 p.S.	∞	Endlosschleife			1
07_WARNUNG_ZU-SCHNELL 	07_gepulst_Sitz_flächig	SF		8	500/250	3	Drei Pulse mit kurzem Intervall	1		
08_WARNUNG_ANSCHNALLEN 	08_dynamisch_unten_rechts	RL		9	200 p.S.	∞	Endlosschleife			1
09_HINWEIS_BESTÄTIGT 	09_gepulst_zentral	RL		1	700	1	Einzelner mittlerer Puls		1	
10_HINWEIS_FEHLER 	10_dynamisch_X_raus	RL		9	200 p.S.	3	Drei Durchläufe	1		
11_HINWEIS_AUTONOM-FAHREN 	11_dynamisch-kumulativ_Gesamt_runter_vor_2	GS		6	200 p.S.	∞	Endlosschleife		1	
12_HINWEIS_ANRUF 	12_dynamisch_T_raus	RL		9	150 p.S.	∞	Endlosschleife	1		
13_BEWEGUNG_LANGSAMER 	13_dynamisch-kumulativ_runter_2	RL		6	200 p.S.	∞	Endlosschleife			1
14_BEWEGUNG_SCHNELLER 	14_dynamisch-kumulativ_hoch_2	RL		6	200 p.S.	∞	Endlosschleife			1
15_BEWEGUNG_ENTFERNEN 	15_dynamisch_Sitz_zurück	SF		12	150 p.S.	∞	Endlosschleife		1	
16_BEWEGUNG_ANNÄHERN 	16_dynamisch_Sitz_vor	SF		12	150 p.S.	∞	Endlosschleife		1	
17_NAVIGATION_NACH-LINKS 	17_dynamisch_links	RL		9	150 p.S.	∞	Endlosschleife			1
18_NAVIGATION_NACH-RECHTS 	18_dynamisch_rechts	RL		9	150 p.S.	∞	Endlosschleife			1

Tabelle 8.1: Übersicht der Reizmuster für V3 (Teil 1/2)

Reizmuster / Information		Taktiler Muster inkl. Darbietungsart und Benennung	TSM-Bereich	Anordnung der Motoren	Motoranzahl (max.)	Anzeige-/ Intervalldauer (bei dynamischen Mustern pro Schritt)	Anzahl Aktivierungen / Durchläufe	Beschreibung / Anpassung	Entdeckungsaufgabe	Überwachungsaufgabe	Steuerungsaufgabe
19_NAVIGATION_GERADEAUS		19_gepulst_vertikal_1	RL		5	700/350	3	Drei Pulse mit mittlerem Intervall			1
20_NAVIGATION_WENDEN		20_dynamisch_links_drehen_2	RL		6	150 p.S.	∞	Endlosschleife			1
21_ZUSTAND_OFFEN		21_dynamisch_horizontal_raus	RL		15	300 p.S.	1	Einzelner Durchlauf		1	
22_ZUSTAND_GESCHLOSSEN		22_dynamisch_horizontal_rein	RL		15	300 p.S.	1	Einzelner Durchlauf		1	
23_ZUSTAND_EIN		23_gepulst_oben	RL		2	1400	1	Einzelner langer Puls			1
24_ZUSTAND_AUS		24_gepulst_unten	RL		2	1400	1	Einzelner langer Puls			1

**Tabelle 8.1:** Übersicht der Reizmuster für V3 (Teil 2/2)

Es erfolgt eine Gliederung der Reizmuster in die Informationskategorien Fahrspur, Warnungen, Hinweise, Bewegung, Navigation und Zustand, welche sich ebenfalls im Interface für den Probanden wiederfindet (vgl. Abbildung 8.1).



**Abbildung 8.1:** Probanden-Interface für V3

Zudem ist festzuhalten, dass die ausgewählten Reizmuster eine heterogene und damit anwendungsnahe Zusammenstellung in Bezug auf den verwendeten TSM-Bereich (Sitzfläche und Rückenlehne), die Ähnlichkeit der Muster, die Dringlichkeit sowie die Informationsarten (ausgewogene Adressierung von Steuerungs-, Überwachungs- und Entdeckungsaufgaben) darstellen.

Während des ersten Schrittes der Lernphase wird dem Probanden nacheinander jedes Reizmuster kurz angezeigt und dabei durch eine blaue Hervorhebung das jeweils aktive Muster bzw. die zugehörige Information gekennzeichnet. Eine getätigte Eingabe (Auswählen eines Reizmusters auf dem Touchscreen) führt während des zweiten und dritten Schrittes beim Lernen zu einer kurz angezeigten grünen Hinterlegung des jeweiligen Eingabefeldes, wenn die Eingabe richtig ist. Bei falscher Eingabe färbt sich das jeweilige Eingabefeld rot während gleichzeitig die richtige Auswahlmöglichkeit grün gekennzeichnet wird, um das Erlernen zu unterstützen. Sowohl in der Lernphase als auch bei der Abfrage werden jeweils nur die Eingabefelder von Reizmustern auf dem Touchscreen gezeigt, welche im jeweiligen Versuchsteil zur Auswahl stehen. Alle Eingabefelder der aktuell nicht verwendeten Reizmuster (z. B. beim Lernen einer einzelnen der sechs Gruppen) werden ausgeblendet. Die grau hinterlegten Bereiche sowie die Benennung der sechs Kategorien bleiben jedoch über die gesamte Versuchsreihe 3 sichtbar und behalten auch ihre Positionen bei, da sich der Proband an die Positionen gewöhnen soll und der Versuch nicht durch unnötiges Suchen verfälscht wird. Im realen Fahrzeug sind dem Fahrer die Positionen der Anzeiger und Stellteile zudem ebenfalls bewusst. Das beschriebene Feedback-Konzept ist exemplarisch in Abbildung 8.2 dargestellt.



**Abbildung 8.2:** Feedback-Konzept bei der Probandeneingabe in V3 (exemplarisch)

### 8.1.3 Versuchsaufbau und -bedingungen

In der Lernphase (Teilversuch V3.1), die insgesamt ca. 20-25 Minuten dauert, erfolgt ein dreistufiges Lernen der 24 ausgewählten Reizmuster. In den ersten beiden Schritten werden die Reizmuster dabei in einer verkürzten bzw. begrenzten Version (max. drei Sekunden bzw. drei Durchläufe) angezeigt, um einen effizienten Versuchsablauf zu gewährleisten. Im dritten Schritt erfolgt die Darbietung entsprechend der in Tabelle 8.1 beschriebenen Version, die auch exakt der Abfrage in Teilversuch V3.2 entspricht. Dabei werden unter anderem einzelne Muster in einer Endlosschleife angezeigt (solange bis eine Eingabe getätigt wird). Die drei Schritte der Lernphase in V3.1 sind:

- V3.1.1 – Kennenlernen aller 24 Muster und ihrer Bedeutungen:
  - Anzeige aller Reizmuster von 1 bis 24,
  - Anzeige erfolgt mit kurzer Anzeigedauer und blauer Hervorhebung des gerade aktiven Musters auf dem Touchscreen.
- V3.1.2 – Lernen und Abfrage in den sechs einzelnen Informationskategorien:
  - Randomisierte Abfolge der sechs Kategorien,
  - Nacheinander Anzeigen der vier Reizmuster innerhalb jeder Kategorie,
  - Anzeige erfolgt mit kurzer Anzeigedauer und blauer Hervorhebung des gerade aktiven Musters auf dem Touchscreen,
  - Anschließend rein taktile Anzeige der Reizmuster in randomisierter Reihenfolge und Abfrage mit Feedback (grün für richtig, rot für falsch) innerhalb der Gruppe bis alle Muster zweimal richtig erkannt wurden,
  - Falsch interpretierte Muster werden erneut in den Musterpool gemischt.
- V3.1.3 – Abfrage aller 24 Muster:
  - Keine vorgeschaltete Anzeige der Muster,
  - Rein taktile Anzeige aller 24 Reizmuster in randomisierter Reihenfolge mit realer, vollständiger Anzeigedauer und Abfrage mit Feedback (grün für richtig, rot für falsch) bis alle Muster zweimal richtig erkannt wurden,
  - Falsch interpretierte Muster werden erneut in den Musterpool gemischt.

Für Teilversuch V3.2 (Abfragephase), der ca. 35-40 Minuten dauert, gelten folgende Randbedingungen:

- Es werden 9 verschieden große Musterpools verwendet. Dabei wird die Poolgröße zwischen 8 (4 Musterpaare) und 24 (12 Musterpaare) in Zwischenschritten variiert. Die dabei gebildeten Musterpaare stehen jeweils in einem semantischen Zusammenhang. Diese Musterpaare werden nie getrennt in einem Musterpool verwendet, die Abfrage erfolgt jedoch jeweils einzeln und unabhängig voneinander.

- Randomisierte Reihenfolge der neun unterschiedlich großen Musterpools bei der Abfrage, um den Einfluss eines möglichen weiteren Lerneffekts sowie der nachlassenden Aufmerksamkeit während des Versuchs auszuschließen.
- Innerhalb eines Musterpools werden alle Muster zwei Sekunden nach der vorherigen Eingabe automatisch angezeigt.
- Vor jedem neuen Musterpool erfolgt eine kurze Pause mit manuellem „Weiter-Button“, der durch den Probanden betätigt wird, sobald er bereit ist.
- Es folgt eine Anzeige des jeweiligen Eingabe-Interface (mit in diesem Pool verwendeten Informationen) mit „Start-Button“ für den Probanden.
- Da nicht alle Musterpaare in jedem (unterschiedlich großen) Musterpool gleich oft vorkommen können, wird im LabVIEW-Programm hinterlegt, dass alle Musterpaare bei jedem Probanden sechsmal vorkommen und dabei jeweils randomisiert auf die neun unterschiedlichen Musterpools verteilt werden. Innerhalb eines Pools erfolgen jeweils zwei Abfragen jedes Musters, sodass für jedes Muster pro Proband 12 Abfragen entstehen. Die zweifache Abfrage ist wichtig, da der Proband somit weiß, dass Muster mehrfach vorkommen können (dies wird auch im Briefing mitgeteilt) und er dadurch nicht nach dem Ausschlusskriterium vorgehen kann.
- Insgesamt wird jedes Muster somit probandenübergreifend theoretisch 360-mal abgefragt (12 Abfragen bei jeweils 30 Probanden). Da die randomisierte Verteilung der Musterpaare auf die verschiedenen Musterpools nicht immer komplett aufgeht, wird dies im Programm bei jedem Probanden jeweils automatisch ausgeglichen, indem Muster bzw. Musterpaare vereinzelt seltener oder häufiger als sechsmal (bzw. 12-mal bei doppelter Anzeige) verwendet werden. Die theoretische Anzahl von insgesamt 360 Abfragen pro Muster schwankt daher in der Realität zwischen 347 und 372. Es wird davon ausgegangen, dass diese Schwankung keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat. Die durchschnittliche Anzahl an Abfragen pro Muster liegt bei genau 360.

#### 8.1.4 Versuchsablauf

Um den Ablauf sowie die Anzeige- und Eingabemodalitäten während des Versuchs einheitlich und eindeutig zu gestalten, werden allen Teilnehmern vor Beginn von Versuchsreihe 3 die folgenden Hinweise gegeben:

- Es kommen verschiedene Darbietungsarten von Mustern zum Einsatz (kontinuierlich, gepulst, dynamisch – teilweise mit endlosem Verlauf).
- Insgesamt kommen 24 Muster (Rücken / Sitzfläche) vor, die gelernt und anschließend wiedergegeben werden sollen.

- Diese unterteilen sich in 6 Informationskategorien (→ kurze Erklärung).
- Die Anordnung der Informationen und Kategorien bleibt über den Versuch gleich.
- Lernphase:
  - Kennenlernen aller 24 Muster (mit kurzer Anzeige) und ihrer Bedeutungen durch jeweils einzelne Anzeige.
  - Lernen in 6 Gruppen (mit kurzer Anzeige) + Abfrage mit Feedback (grün für richtig, rot für falsch) pro Gruppe bis alle Muster zweimal richtig erkannt wurden.
  - Abfrage aller 24 Muster mit Feedback (mit realer Anzeigedauer) bis alle Muster zweimal richtig erkannt wurden.
- Abfragephase:
  - Abfrage der Muster in 9 unterschiedlich großen Musterpools (zufällige Reihenfolge, jeweils nur vorkommende Informationen eingeblendet, kurzes Eingabefeedback, keine Rückmeldung ob richtig oder falsch).
  - Immer 2 Sekunden Pause zwischen einzelnen Mustern (es geht automatisch weiter).
  - Jedes angezeigte Muster kann einem der sichtbaren Eingabefelder zugeordnet werden.
  - Muster können mehrmals vorkommen.
  - Es kommt auf Richtigkeit an, nicht auf Schnelligkeit.
  - Keine Korrektur und kein Passen möglich.
  - Zwischen Musterpools immer kurze Pause mit Weiter-Button (selbst anklicken).

Bevor der Versuch startet, wird dem Probanden die Übersicht der Informationen mit Piktogrammen gezeigt und alle Informationen kurz erläutert, um semantische Unklarheiten zu vermeiden. Im Anschluss werden letzte Rückfragen des Probanden beantwortet und der Gehörschutz angelegt. Zwischendurch bekommt der Proband immer mithilfe eines Piktogramms angezeigt, wann er den Gehörschutz abnehmen soll, um ein kurzes Briefing zum neuen Versuchsteil zu erhalten.

In V3 wird im Vergleich zu V1 kein Preis für die höchste Erkennungsrate unter den Teilnehmern vergeben. Es wird davon ausgegangen, dass in V3 generell ein höherer „Joy of Use“ bei der Bearbeitung der Aufgaben erreicht wird und damit eine zusätzliche Motivation nicht notwendig ist. Dies wird damit begründet, dass bei der aktuellen Versuchsreihe generell nur noch gut erkennbare Muster verwendet werden und Feedback in der Lernphase gegeben wird (positiv bestärkend bei richtiger Eingabe). Potenzieller Frust der Teilnehmer durch teilweise schlecht bzw. nur mühsam erkennbare Muster sowie



durch den Mangel an Feedback und ein dadurch vergleichsweise monotoner Versuchsablauf wird in V3 nicht erwartet.

### 8.1.5 Probandenkollektiv

An der dritten Versuchsreihe nehmen 30 Personen ( $N = 30$ ) bei einer ausgeglichenen Geschlechter-Verteilung (15m, 15w) teil. Die Tabelle 8.2 zeigt eine Übersicht der demografischen Daten, taktilen Wahrnehmungsleistung und Fahrerfahrung des Probandenkollektivs. Dies entspricht den ersten drei Abschnitten des Fragebogens (vgl. Kapitel 5.4). Ergänzt werden die über den Fragebogen erfassten Daten um die Uhrzeit des Versuchsbeginns (Versuchsteil auf der TSM) sowie die prozentuale Angabe der Höhe der Rückenkontaktfläche im Verhältnis zur Schulterhöhe im Sitzen, da dieser Wert in der Literatur bisher kaum zu finden ist und dadurch über die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche hinaus eine Relevanz besitzt.

Probandenkollektiv der Versuchsreihe V3: $N = 30$   15 männlich, 15 weiblich   26 Rechtshänder, 4 Linkshänder						
	Kategorie	Einheit	Mittelwert	Standardabw.	Minimum	Maximum
Demografische Daten	Uhrzeit des Versuchsbeginns	[hh:mm]	13:44	$\pm 2:47$	8:46	18:01
	Alter	[Jahre]	24,8	$\pm 3,4$	20	33
	Körpergewicht	[kg]	69,1	$\pm 11,3$	52	103
	Körperhöhe (ohne Schuhe)	[cm]	174,7	$\pm 9,0$	160,0	189,0
	Schulterhöhe stehend (ohne Schuhe)	[cm]	145,7	$\pm 8,3$	132,0	160,0
	Schulterhöhe sitzend	[cm]	62,7	$\pm 3,2$	55,0	70,0
	Höhe Rückenkontaktfläche sitzend	[cm]	55,7	$\pm 2,9$	50,0	61,0
	Verhältnis Rückenkontaktfläche zu Schulterhöhe	[%]	88,8	$\pm 3,2$	81,0	94,4
	Höhe der Fußaufstellfläche	[cm]	6,4	$\pm 2,8$	2,4	12,0
Taktil	Zweipunktschwelle	[mm]	41,2	$\pm 8,4$	30,0	55,0
	Vibrationsempfinden	[Stufe 1-8]	7,7	$\pm 0,3$	7,0	8,0
Erfahrung	Fahrerfahrung im PKW (zeitlich)	[Jahre]	7,3	$\pm 3,1$	3,0	15,0
	Fahrerfahrung im PKW (Strecke im letzten Jahr)	[km]	10.220	$\pm 9.083$	100	30.000
	Anteil der Ablenkung durch akustische Reize	[%]	86,8	$\pm 17,0$	30,0	100,0

**Tabelle 8.2:** Probandenkollektiv der Versuchsreihe V3 ( $N = 30$ )

## 8.2 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden zunächst die ausgewählten statistischen Verfahren sowie die allgemeine Ergebnisdarstellung beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse von Versuchsreihe 3 für die Lernphase (V3.1) sowie für die Abfragephase (V3.2) wiedergegeben. Nach einer Auswertung des Fragebogens erfolgt abschließend eine Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse mit Bezug zu den aufgestellten Hypothesen.

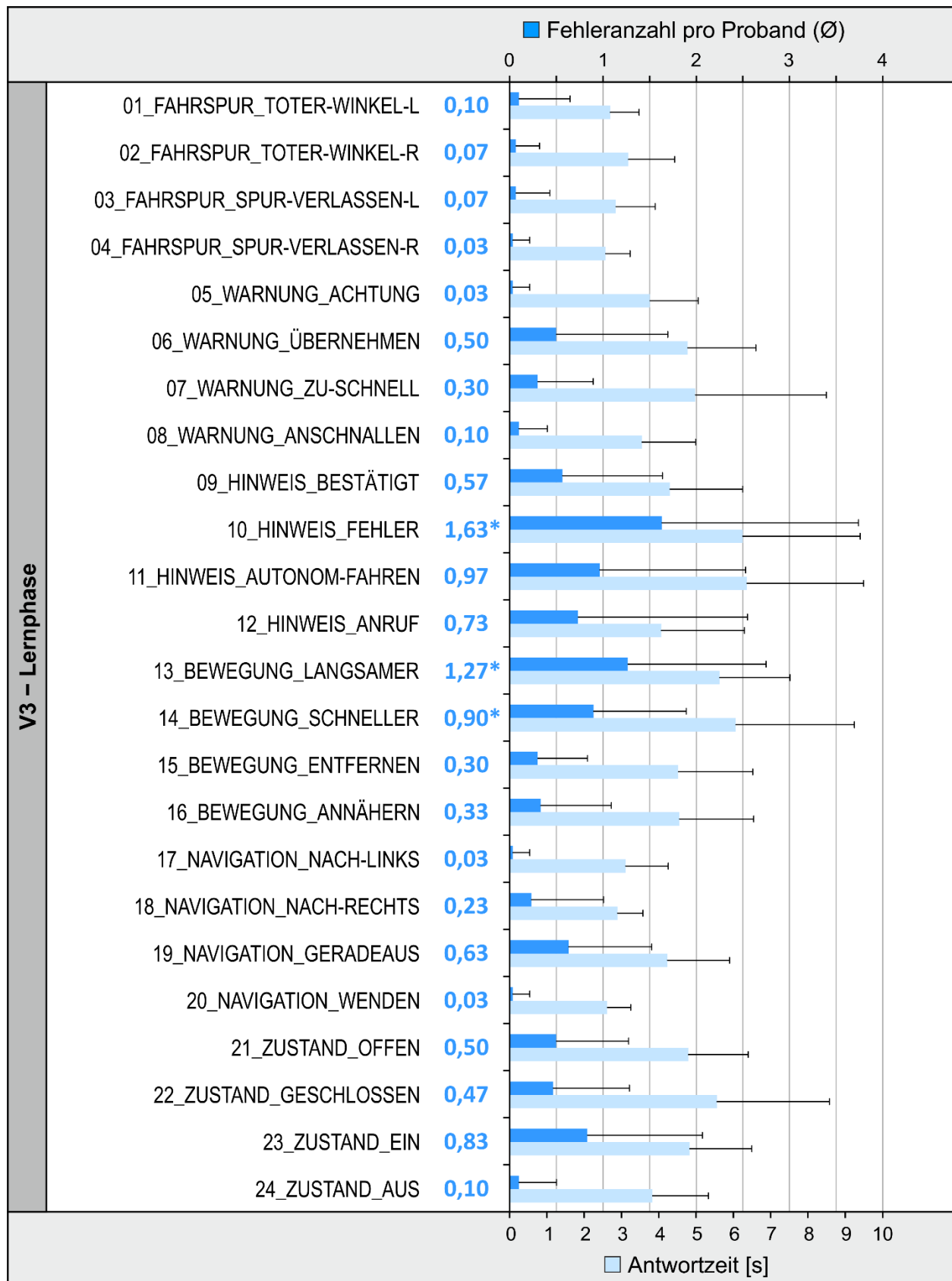
### 8.2.1 Auswahl statistischer Verfahren und Ergebnisdarstellung

Bei der Fehleranzahl bzw. Erkennungsrate wird auf Basis der großen Datenmenge (durchschnittlich 360 Abfragen pro Muster in V3.2) von einer Intervallskala ausgegangen. Eine Unterschiedsprüfung in Bezug auf die Mittelwerte der einzelnen Muster erfolgt jeweils durch einfaktorielle ANOVAs für die Faktoren Reizmuster (24 Stufen) und Musterpoolgröße (9 Stufen, nur in der Abfragephase). Da die Probanden keine Kenntnis von der Erfassung der Antwortzeit haben, kann dieser Faktor als unabhängig betrachtet werden. Zusammenhangsprüfungen werden mithilfe von Korrelationsanalysen nach Pearson durchgeführt. Beide Verfahren werden in Kapitel 6.2.1 genauer beschrieben. Die jeweilige, detaillierte Beschreibung der Ergebnisdarstellung erfolgt im Zuge der nachfolgenden Auswertung der Teilversuche.

### 8.2.2 Ergebnisse – Lernphase

Die Lernphase (Teilversuch V3.1) ist in drei Abschnitte unterteilt. Im ersten Schritt (V3.1.1) erfolgt das reine Kennenlernen der Reizmuster, während im zweiten Schritt (V3.1.2) gruppenweise gelernt wird. Dabei werden die Muster innerhalb der sechs einzelnen Informationskategorien (Gruppen) jeweils zunächst angezeigt und anschließend abgefragt. Diese beiden Schritte dienen der Vorbereitung auf die eigentliche Lernphase im dritten Schritt (V3.1.3). Eine Auswertung erfolgt dabei ausschließlich für den dritten Schritt (Hauptlernphase), in welchem die reine Abfrage aller 24 Reizmuster erfolgt, ohne dass diese vorher erneut gezeigt werden. Die Erlernbarkeit der Muster wird überprüft, indem die Fehleranzahl sowie die Antwortzeit erfasst und ausgewertet werden. Jedes Muster wird bei jedem Probanden so oft abgefragt (und ggf. wieder neu in den Musterpool gemischt) bis es jeweils zweimal richtig erkannt wird. Sobald dies der Fall ist, wird die Lernphase (V3.1) als abgeschlossen angesehen und der Teilversuch V3.2 (Abfragephase) gestartet.

Zunächst erfolgt die deskriptive Auswertung der Fehleranzahl bei der Eingabe sowie der dabei benötigten Antwortzeit (jeweils in Form von Mittelwerten mit Standardabweichung). Die Ergebnisse für alle 24 Reizmuster werden in Abbildung 8.3 dargestellt. Die durchschnittliche Fehleranzahl pro Proband (= Fehlersumme pro Muster geteilt durch 30 Probanden) bewegt sich dabei zwischen 0,03 ( $\pm 0,18$ ) Fehlern für die Muster 04, 05, 17, 20 und 1,63 ( $\pm 2,11$ ) Fehlern für Muster 10. Die Antwortzeiten liegen zwischen 2571 ms ( $\pm 661$  ms) für Muster 04 und 6360 ms ( $\pm 3133$  ms) für Muster 11. Es kann festgehalten werden, dass die Fehleranzahl bei den meisten Mustern generell niedrig ausfällt, was auf eine prinzipiell gute Erlernbarkeit schließen lässt.



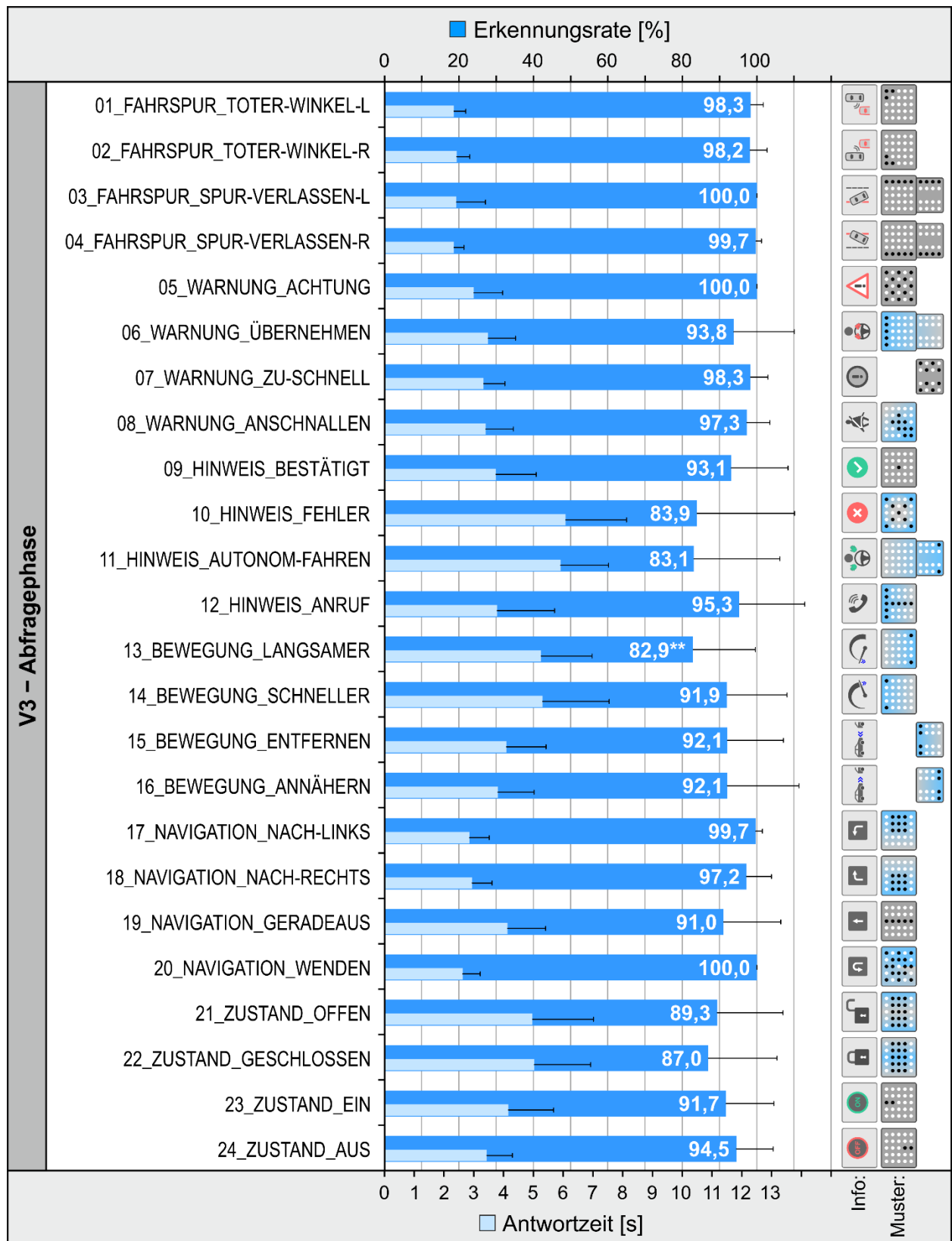
**Abbildung 8.3:** Mittelwerte und Standardabweichung der Fehleranzahl (blau) und der Antwortzeiten (hellblau) pro Proband für die 24 Reizmuster in V3.1.3 mit Kennzeichnung signifikant höherer Fehleranzahl

Eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung weist einen signifikanten Effekt bzgl. der Fehleranzahl für den Faktor Reizmuster (24 Stufen) nach,  $F(5.12, 148.61) = 7.10$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.197$  (Greenhouse-Geisser korrigiert). Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur können folgende Schlüsse gezogen werden. Das Muster 10 weist eine signifikant höhere Fehleranzahl auf als das Muster 05 ( $p < 0.05$ ). Für Muster 13 liegt die Fehleranzahl hoch signifikant höher als bei Muster 03 ( $p < 0.01$ ) und signifikant höher als bei den Mustern 04 ( $p < 0.05$ ), 05 ( $p < 0.05$ ), 08 ( $p < 0.05$ ), 17 ( $p < 0.05$ ), 20 ( $p < 0.05$ ) und 24 ( $p < 0.05$ ). Muster 14 weist eine hoch signifikant höhere Fehleranzahl auf als die Muster 08 ( $p < 0.01$ ) und 24 ( $p < 0.01$ ) und eine signifikant höhere Fehleranzahl als die Muster 03 ( $p < 0.05$ ), 04 ( $p < 0.05$ ), 05 ( $p < 0.05$ ), 17 ( $p < 0.05$ ), 18 ( $p < 0.05$ ) und 20 ( $p < 0.05$ ). In Abbildung 8.3 sind die signifikanten Unterschiede ebenfalls gekennzeichnet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden dabei nur die drei beschriebenen Muster mit signifikant höherer Fehleranzahl mit einem Stern (\*) markiert, ohne jeden einzelnen Vergleich einzuzichnen. Unterschiede, die teilweise deutlich wirken, jedoch nicht signifikant werden, liegen darin begründet, dass bei manchen Mustern eine hohe Fehleranzahl teilweise durch einzelne Probanden verursacht wird.

Um einen Zusammenhang zwischen den erfassten Eingabefehlern und der Antwortzeit zu prüfen, wird eine Korrelationsanalyse nach Pearson für intervallskalierte Daten durchgeführt. Demnach korreliert die Antwortzeit hoch signifikant mit der Fehleranzahl ( $r = 0.83$ ,  $df = 28$ ,  $p < 0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine hohe Korrelation bzw. eine ausgeprägte Beziehung vor. Muster mit einer höheren Fehleranzahl weisen demnach auch längere Antwortzeiten auf.

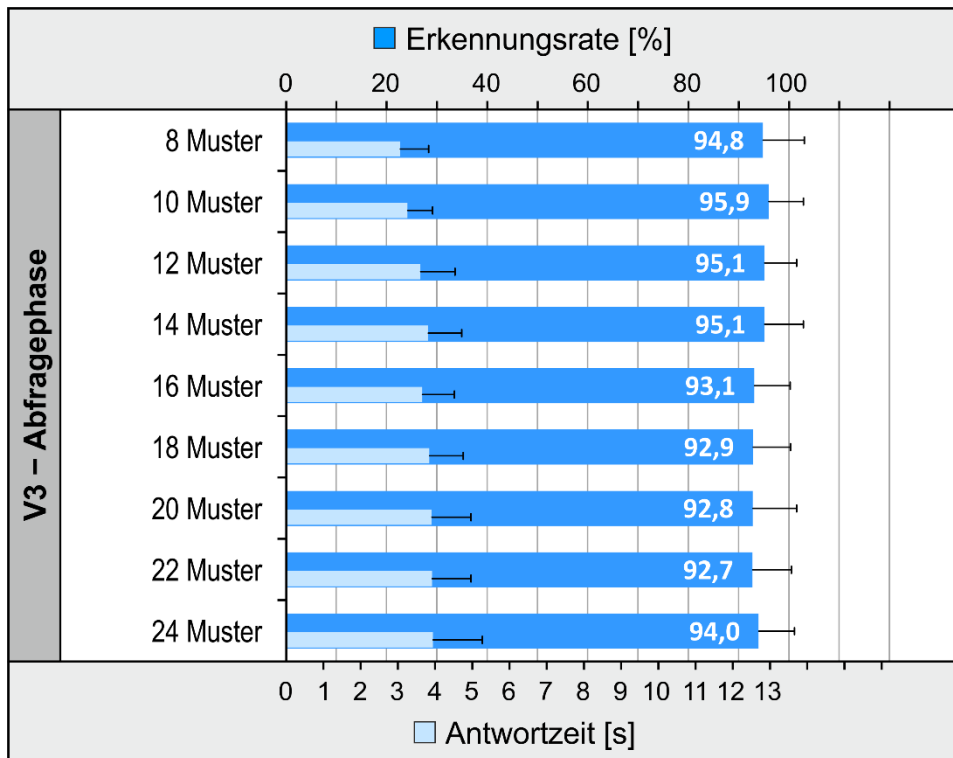
### 8.2.3 Ergebnisse – Abfragephase

In der Abfragephase (Teilversuch V3.2) wird der Einfluss der beiden Faktoren Reizmuster (24 Stufen) und Musterpoolgröße (9 Stufen) auf die erfassten abhängigen Variablen Erkennungsrate und Antwortzeit untersucht. Durch das gewählte und in Kapitel 8.1.3 beschriebene Versuchsdesign können nicht alle Reizmuster bei allen Probanden in allen unterschiedlich großen Musterpools vorkommen, da dies die akzeptable Versuchsdauer um ein Vielfaches sprengen würde. Somit ist das Setup in dieser Hinsicht nicht vollfaktoriell. Um die Daten auszuwerten, werden diese zunächst bei jedem Probanden für die beiden Faktoren jeweils in Form von Mittelwerten zusammengeführt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die beiden Faktoren als unabhängig voneinander angesehen werden können. Für jeden Probanden werden somit zunächst für jedes der 24 Reizmuster die Mittelwerte (mit Standardabweichung) der Erkennungsrate angegeben, die über alle unterschiedlich großen Musterpools gebildet werden (siehe Abbildung 8.4).



**Abbildung 8.4:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) u. Antwortzeiten (hellblau) für alle 24 Reizmuster (gemittelt über Musterpoolgröße) mit Kennz. signifikant schlechter erkannter Muster

In einer weiteren Betrachtung wird die Erkennungsrate bei jedem Probanden über die unterschiedlichen Muster zusammengefasst und in Form von Mittelwerten (mit Standardabweichung) für die neun Musterpoolgrößen angegeben (siehe Abbildung 8.5).



**Abbildung 8.5:** Mittelwerte und Standardabweichung der Erkennungsraten (blau) und Antwortzeiten (hellblau) für alle neun Musterpoolgrößen (gemittelt über Reizmuster)

Für die beiden unabhängigen Faktoren Reizmuster und Musterpoolgröße wird in Bezug auf die Erkennungsraten jeweils eine Varianzanalyse durchgeführt. Eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung weist einen signifikanten Effekt bzgl. der Erkennungsrate für den Faktor Reizmuster (24 Stufen) nach,  $F(6.08, 176.44) = 5.87$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.168$  (Greenhouse-Geisser korrigiert). Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur kann folgender Schluss gezogen werden. Die Erkennungsrate des Musters 13 ist hoch signifikant niedriger als die Erkennungsraten der zehn am besten erkennbaren Muster 01, 02, 03, 04, 05, 07, 08, 17, 18 und 20 (jeweils  $p < 0.01$ ). In Abbildung 8.4 wird das hoch signifikant schlechter erkannte Muster 13 mit zwei Sternen (\*\*) gekennzeichnet.

Eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung zur Untersuchung des Faktors Musterpoolgröße (9 Stufen) ergibt keinen signifikanten Effekt,  $F(5.53, 160.28) = 2.08$ ,  $p = 0.064$ , Greenhouse-Geisser korrigiert.

Eine Korrelationsanalyse nach Pearson für intervallskalierte Daten ergibt, dass die erfasste Erkennungsrate der 24 Muster mit der dabei benötigten Antwortzeit hoch signifi-

kant negativ korreliert ( $r=-0.94$ ,  $df=28$ ,  $p<0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine sehr hohe Korrelation bzw. eine sehr starke Beziehung vor. Muster, die generell besser erkannt werden, weisen demnach auch kürzere Antwortzeiten auf.

Um einen Zusammenhang zwischen der erfassten Erkennungsrate und der Musterpoolgröße zu prüfen, wird eine weitere Korrelationsanalyse nach Pearson durchgeführt. Demnach korreliert die Erkennungsrate hoch signifikant negativ mit der Musterpoolgröße ( $r=-0.74$ ,  $df=28$ ,  $p<0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine hohe Korrelation bzw. eine ausgeprägte Beziehung vor. Bei größeren Musterpools werden demnach niedrigere Erkennungsrate der angezeigten Muster beobachtet.

Eine weitere Korrelationsanalyse nach Pearson ergibt, dass die (jeweils über die 24 Muster zusammengeführte bzw. gemittelte) Antwortzeit mit der Musterpoolgröße hoch signifikant korreliert ( $r=-0.89$ ,  $df=28$ ,  $p<0.01$ ). Nach [ALBERT & MARX 2010, S. 129] liegt damit eine hohe Korrelation bzw. eine ausgeprägte Beziehung vor. Bei größeren Musterpools werden demnach längere Antwortzeiten bei der Erkennung der angezeigten Muster beobachtet.

Generell kann festgehalten werden, dass die Erkennungsrate der 24 verwendeten Reizmuster in V3.2 mit durchschnittlich 93,8 % ( $\pm 5,5$  %) insgesamt sehr hoch sind. Einzelne Muster erreichen sogar eine Erkennungsrate von 100 % oder liegen knapp darunter, wodurch von einer Eignung für den effektiven und sicheren Einsatz in der praktischen Anwendung ausgegangen werden kann. Dagegen existieren jedoch auch Muster, die sowohl bzgl. der Erlernbarkeit als auch bzgl. der Erkennbarkeit nicht zufriedenstellend abschneiden. Es folgt daher eine dezidierte Betrachtung der jeweils beobachteten Eingabefehler für die 24 Reizmuster (zusammengeführt bzw. gemittelt über die unterschiedlichen Poolgrößen). Dies wird mithilfe einer Fehlermatrix umgesetzt (vgl. z. B. [THULLIER ET AL. 2012] und [JONES ET AL. 2009]), die für jedes Reizmuster die reale Gesamtanzahl an Abfragen sowie die jeweilige Differenzierung zwischen richtigen und falschen Eingaben enthält. Neben der zuvor ausgewerteten Erkennungsrate der Muster wird somit eine weitere Dimension hinzugefügt. In der Fehlermatrix wird für jedes Muster dargestellt, mit welchen anderen Mustern es bei der Eingabe wie oft verwechselt und dadurch nicht erkannt wird (siehe Tabelle 8.3). In der Tabelle sind die angezeigten 24 Reizmuster (horizontal) über den jeweils als Antwort ausgewählten Mustern (vertikal) abgetragen. Die Felder auf der Diagonalen von oben links nach unten rechts zeigen die jeweilige Anzahl der richtigen Antworten (grün bis gelb), während alle Abweichungen davon die Eingabefehler repräsentieren. Wird ein Muster maximal in sieben Fällen statt des richtigen ausgewählt ( $< 2$  % bezogen auf die minimale Anzahl an Abfragen von 347), wird dieses Maß an Verwechslungsgefahr als akzeptabel angesehen und in der

Tabelle orange dargestellt. Alle Felder mit größerer Fehleranzahl werden aufgrund der erhöhten Verwechslungsgefahr mit dem jeweils richtigen Muster einer detaillierteren Betrachtung unterzogen und sind in der Tabelle rot markiert.



	01_FAHRSPUR_TOTER-WINKEL-L	02_FAHRSPUR_TOTER-WINKEL-R	03_FAHRSPUR_SPUR-VERLASSEN-L	04_FAHRSPUR_SPUR-VERLASSEN-R	05_WARNUNG_ACHTUNG	06_WARNUNG_ÜBERNEHMEN	07_WARNUNG_ZU-SCHNELL	08_WARNUNG_ANSCHNALLEN	09_HINWEIS_BESTÄTIGT	10_HINWEIS_FEHLER	11_HINWEIS_AUTONOM-FAHREN	12_HINWEIS_ANRUF	13_BEWEGUNG_LANGSAMER	14_BEWEGUNG_SCHNELLER	15_BEWEGUNG_ENTFERNEN	16_BEWEGUNG_ANNÄHERN	17_NAVIGATION_NACH-LINKS	18_NAVIGATION_NACH-RECHTS	19_NAVIGATION_GERADEAUS	20_NAVIGATION_WENDEN	21_ZUSTAND_OFFEN	22_ZUSTAND_GESCHLOSSEN	23_ZUSTAND_EIN	24_ZUSTAND_AUS	
01_FAHRSPUR_TOTER-WINKEL-L	352	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02_FAHRSPUR_TOTER-WINKEL-R	0	350	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
03_FAHRSPUR_SPUR-VERLASSEN-L	5	0	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
04_FAHRSPUR_SPUR-VERLASSEN-R	0	2	0	363	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
05_WARNUNG_ACHTUNG	0	1	0	0	352	1	0	0	0	7	1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	
06_WARNUNG_ÜBERNEHMEN	0	0	0	0	0	330	0	0	0	1	20	2	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
07_WARNUNG_ZU-SCHNELL	0	0	0	0	0	0	364	0	0	0	0	0	0	0	10	6	0	0	2	0	0	0	0	0	
08_WARNUNG_ANSCHNALLEN	0	0	0	0	0	0	0	363	0	0	0	1	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	
09_HINWEIS_BESTÄTIGT	0	0	0	0	0	0	0	0	327	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	7	5	16	6	
10_HINWEIS_FEHLER	0	1	0	0	0	0	1	0	0	293	1	0	2	1	0	0	0	0	19	0	13	10	3	0	
11_HINWEIS_AUTONOM-FAHREN	0	0	0	0	0	12	0	0	0	8	292	1	41	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12_HINWEIS_ANRUF	0	2	0	0	0	4	0	0	0	4	3	343	1	6	0	0	0	4	0	0	0	0	0	2	
13_BEWEGUNG_LANGSAMER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	35	0	300	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
14_BEWEGUNG_SCHNELLER	0	0	0	0	0	2	0	1	0	13	0	12	10	337	0	1	0	0	0	0	1	2	0	0	
15_BEWEGUNG_ENTFERNEN	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	338	21	0	0	0	0	0	0	0	0	
16_BEWEGUNG_ANNÄHERN	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	1	0	0	16	330	0	0	0	0	0	0	0	0	
17_NAVIGATION_NACH-LINKS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	353	0	1	0	0	0	0	0	
18_NAVIGATION_NACH-RECHTS	0	0	0	0	0	0	0	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	337	0	0	0	0	0	0	
19_NAVIGATION_GERADEAUS	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	330	0	0	0	0	0	
20_NAVIGATION_WENDEN	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	366	0	0	0	0	
21_ZUSTAND_OFFEN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	332	28	1	0	
22_ZUSTAND_GESCHLOSSEN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	14	315	0	1	
23_ZUSTAND_EIN	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4	3	338	11	
24_ZUSTAND_AUS	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	7	340	
Erkennungsrate real	98,3	98,2	100,0	99,7	100,0	93,8	98,3	97,3	93,1	83,9	83,1	95,3	82,9	91,9	92,1	92,1	99,7	97,2	91,0	100,0	89,3	87,0	91,7	94,5	
Anzahl Abfragen real	358	356	360	364	352	350	370	372	352	349	352	360	364	368	366	358	354	347	363	366	366	371	366	366	360
Anzahl Abfragen bereinigt	358	355	360	364	352	335	364	371	328	-	-	346	-	-	-	-	354	347	341	366	-	-	-	-	
Anzahl Fehler bereinigt	6	5	0	1	0	5	0	8	1	-	-	3	-	-	-	-	1	10	11	0	-	-	-	-	
Erkennungsrate bereinigt	96,3	98,6	100,0	99,7	100,0	98,5	100,0	97,8	99,7	-	-	99,1	-	-	-	-	99,7	97,1	96,8	100,0	-	-	-	-	

**Tabelle 8.3:** Fehlermatrix für die Erkennung der 24 Reizmuster mit bereinigter Erkennungsrate für ausgewählte Muster (blau)

Auf Basis der beschriebenen Fehlermatrix werden folgende Maßnahmen abgeleitet, um das Potenzial der verwendeten Muster für den Fall abzuschätzen, dass die identifizierten Verwechslungen nicht auftreten:

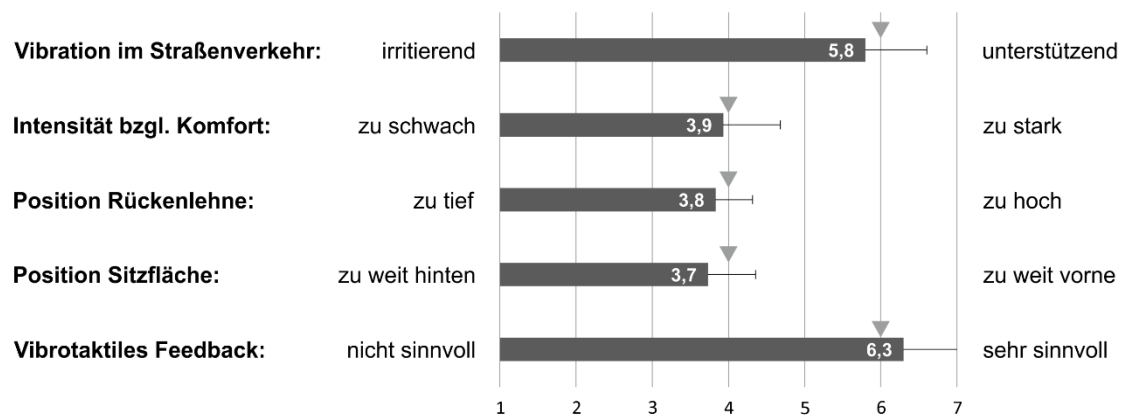
- Ausschluss von Mustern, die regelmäßig zu Verwechslungen führen,
- Entsprechende Anpassung (Reduzierung) der Anzahl an Abfragen und Fehlern,
- Neuberechnung der Erkennungsraten auf Basis der reduzierten Anzahl an Abfragen und Fehlern (ohne die aussortierten Muster),
- Ergebnis: „Bereinigte“ Erkennungsrate für die eindeutigsten Muster.

Durch das beschriebene Vorgehen können theoretisch die ebenfalls in Tabelle 8.3 dargestellten „bereinigten“ Erkennungsraten für die übrig gebliebenen 14 Muster erreicht werden. Diese liegen zwischen 96,8 % und 100 % bei einem Mittelwert von 99,0 % ( $\pm 1,1$  %). Die theoretische Betrachtung auf Basis der Fehlermatrix sowie die Berechnung der bereinigten Erkennungsraten dient einer Abschätzung und erfordert im Nachgang der vorliegenden Arbeit eine weitere Untersuchung und Evaluation.

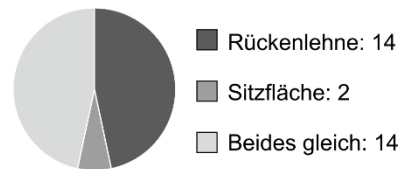
#### **8.2.4 Auswertung Fragebogen**

Neben der Auswertung der demografischen Daten und taktilen Wahrnehmungsleistung in Kapitel 8.1.5 werden in Abbildung 8.6 und Abbildung 8.7 die Ergebnisse der Fragebogenabschnitte drei bis sechs für Versuchsreihe 3 wiedergegeben. Die Erhebung dieser Abschnitte erfolgt nach dem Versuchsteil auf der TSM und bezieht die dabei gemachten Erfahrungen mit ein. Der vollständige Fragebogen kann Anhang A2 entnommen werden. Die Ergebnisse zeigen wie in V1 und V2, dass der Einsatz von vibrotaktilen Feedback im Fahrzeugsitz von den Teilnehmern generell als unterstützend und sinnvoll angesehen wird. Die technische Gestaltung in Bezug auf Vibrationsintensität und Positionierung der TSM wird als nahezu optimal wiedergegeben, was die Erkenntnisse aus der Literatur und den Vorstudien bestätigt. Als besser geeignet im Sinne des Komfortempfindens der Muster wird tendenziell die Rückenlehne beschrieben. Genauso viele Teilnehmer geben jedoch auch an, dass Rückenlehne und Sitzfläche gleich gut geeignet sind. In Bezug auf eine bessere Erkennbarkeit favorisieren die Probanden die Rückenlehne. Zu erwähnen ist dabei, dass in V3 insgesamt 17 Muster über die Rückenlehne, drei über die Sitzfläche und vier über den gesamten Sitz angezeigt werden. Die Einschätzung, wie viele vibrotaktile Muster im Fahrzeug eingesetzt werden können, ohne dass Verwechslungen auftreten, variiert zwischen 8 und 30 Mustern, wobei die durchschnittlich angegebenen 16 Muster im Vergleich zu V1 und V2 (jeweils 10) eine deutliche Steigerung bedeuten. Dies wird damit begründet, dass in V3 eine Auswahl der am besten geeigneten Muster zum Einsatz kommt, die eine Anwendung im Straßenverkehr realistischer abbildet.

Komfortempfinden und technische Gestaltung:  Mittelwert  Standardabw.  Median



Wo ist vibrotaktiler Feedback angenehmer?



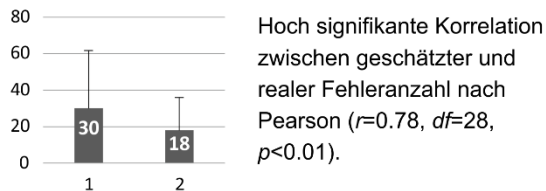
Wo sind vibrotaktile Muster besser erkennbar?



Wie viele Muster möglich ohne Verwechslungen?

Mittelwert: 16,0 (±4,8)  
 Minimum: 8,0  
 Maximum: 30,0

Selbst geschätzte (1) und reale (2) Fehleranzahl in Versuchsreihe 3:



**Abbildung 8.6:** Fragebogenauswertung für Versuchsreihe 3 (N = 30) – Teil 1

Des Weiteren korreliert die Einschätzung der Teilnehmer bzgl. ihrer Fehleranzahl mit der real erfassten Fehleranzahl. Die tatsächlich erfasste Fehleranzahl liegt dabei niedriger als die selbst geschätzte. Daraus kann wie in V1 gefolgert werden, dass die Erkennbarkeit von vibrotaktilem Feedback im Sitz vom Fahrer selbst eher unterschätzt als überschätzt wird. Dies ist ein wichtiger und positiver Aspekt in Bezug auf die Sicherheit beim Einsatz der Muster im realen Straßenverkehr. In Abbildung 8.7 wird für jedes der 24 verwendeten Muster angegeben, wie viele Probanden das jeweilige Muster subjektiv als besonders gut oder besonders schlecht erkennbar einstufen. Die Darstellung enthält alle Nennungen, die die Teilnehmer nach dem Versuch von sich aus tätigen. Es wird nicht jedes einzelne Muster von jedem Probanden bewertet. Diese subjektiven Ergebnisse decken mit der objektiven Auswertung der Erkennungsraten und den über die Fehlermatrix in Tabelle 8.3 ausgeschlossenen Mustern. Eine Ausnahme

stellt lediglich Muster 09 dar (einzelner Motor an der Rückenlehne), welches zwar subjektiv häufig als schlecht erkennbar genannt wird, jedoch objektiv mit einer Erkennungsrate von 93,1 % vergleichsweise gut abschneidet.

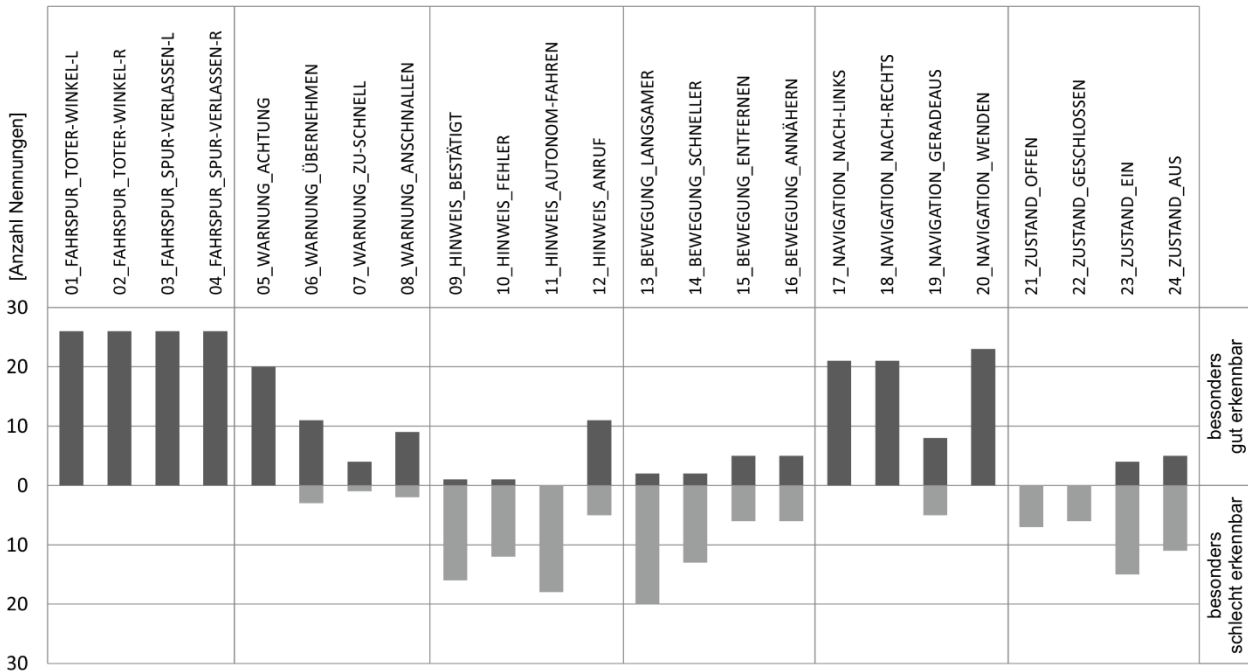


Abbildung 8.7: Fragebogenauswertung für Versuchsreihe 3 (N = 30) – Teil 2

### 8.2.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die in den vorherigen Kapiteln präsentierten Ergebnisse von Versuchsreihe 3 werden im Folgenden zusammengefasst und in Zusammenhang mit den zuvor aufgestellten Hypothesen diskutiert. Insgesamt werden in V3 24 Reizmuster untersucht, welche den Probanden in einer Lernphase und einer Abfragephase angezeigt werden. Die Reizmuster werden dabei in der Abfragephase über alle Probanden hinweg jeweils zwischen 347- und 372-mal abgefragt, sodass den berechneten Erkennungsrate eine umfangreiche Datenbasis zugrunde liegt. Die durchschnittliche Gesamterkennungsrate über alle Reizmuster liegt bei 93,8 % ( $\pm 5,5$  %). Diese variiert bei den einzelnen Teilnehmern zwischen 73,6 % und 99,7 %.

Die nachfolgende Tabelle 8.4 zeigt einen Überblick über die in Kapitel 8.1.1 formulierten Alternativhypothesen  $H_x$ . Dabei wird auf Basis der Versuchsergebnisse wiedergegeben, welche dieser Alternativhypothesen angenommen werden, was einem Verwerfen der jeweiligen Nullhypothese  $H_{0x}$  entspricht. Es erfolgt eine Unterscheidung in „vollständig angenommen“ (ja) und „teilweise angenommen“ (ja, teilweise).

Die in Tabelle 8.4 dargestellte Übersicht ergibt sich aus den nachfolgend aufgeführten Schlussfolgerungen der einzelnen (signifikanten) Ergebnisse.

Alternativhypothesen H <sub>x</sub>		H <sub>x</sub> angenommen
H <sub>15</sub>	Es existieren Muster-Informations-Kombinationen, die <b>leichter erlernbar</b> sind als andere.	ja
H <sub>16</sub>	Muster-Informations-Kombinationen, die <b>leichter</b> (mit weniger Fehlern) <b>erlernt</b> werden können, weisen <b>kürzere Antwortzeiten</b> auf als Kombinationen, die schwieriger (mit mehr Fehlern) erlernt werden.	ja
H <sub>17</sub>	Es existieren Muster-Informations-Kombinationen, die <b>besser erkennbar</b> sind als andere.	ja
H <sub>18</sub>	Muster-Informations-Kombinationen mit <b>hoher Erkennungsrate</b> weisen <b>kürzere Antwortzeiten</b> auf als Kombinationen mit niedriger Erkennungsrate.	ja
H <sub>19</sub>	Die <b>Erkennbarkeit</b> der Muster-Informations-Kombinationen wird beeinflusst durch die <b>Größe des verwendeten Musterpools</b> .	ja
H <sub>20</sub>	Die <b>Antwortzeit</b> bei der Erkennung der Muster-Informations-Kombinationen wird beeinflusst durch die <b>Größe des verwendeten Musterpools</b> .	ja
H <sub>21</sub>	Die <b>Erkennbarkeit</b> der Muster-Informations-Kombinationen wird beeinflusst durch die <b>Ähnlichkeit</b> der zur Auswahl stehenden Kombinationen.	ja, teilweise

**Tabelle 8.4:** Hypothesenüberprüfung für Versuchsreihe 3

**H<sub>15</sub>:** Die Fehleranzahl fällt in der Lernphase (V3.1.3) bei den meisten Mustern generell niedrig aus. Trotzdem werden einzelne signifikante Unterschiede ermittelt, die zeigen, dass bestimmte Muster leichter, d. h. mit weniger Fehlern, erlernt werden können.

**H<sub>16</sub>:** In der Lernphase (V3.1.3) korreliert die Fehleranzahl signifikant mit der dabei benötigten Antwortzeit (ausgeprägte Beziehung). Reizmuster mit einer niedrigeren Fehleranzahl weisen demnach auch kürzere Antwortzeiten auf.

**H<sub>17</sub>:** In der Abfragephase (V3.2) wird für den Faktor Reizmuster eine signifikant niedrigere Erkennungsrate für ein Reizmuster (Muster 13) im Vergleich zu den zehn am besten erkannten Mustern festgestellt.

**H<sub>18</sub>:** Zwischen der Erkennungsrate und der dabei benötigten Antwortzeit wird in V3.2 eine signifikant negative Korrelation (sehr starke Beziehung) ermittelt. Reizmuster, die generell besser erkannt werden, weisen demnach auch kürzere Antwortzeiten auf.

**H<sub>19</sub>:** In Bezug auf den Faktor Musterpoolgröße wird in V3.2 kein signifikanter Effekt mithilfe der durchgeführten ANOVA identifiziert. Jedoch wird eine signifikant negative Kor-

relation (ausgeprägte Beziehung) zwischen Musterpoolgröße und Erkennungsrate festgestellt. Dies bedeutet, dass bei größeren Musterpools niedrigere Erkennungsraten beobachtet werden.

**H<sub>20</sub>:** Eine weitere Korrelationsanalyse ergibt, dass die Antwortzeit mit der Musterpoolgröße signifikant korreliert (ausgeprägte Beziehung). Bei größeren Musterpools werden demnach längere Antwortzeiten beobachtet. Dies wird in erster Linie damit begründet, dass der Proband bei einer größeren, zur Verfügung stehenden Auswahl mehr Zeit benötigt, um alle Antwortmöglichkeiten zu erfassen und dem vibrotaktile Muster anschließend eine der möglichen Informationen möglichst korrekt zuzuordnen.

**H<sub>21</sub>:** Die Betrachtung über die Fehlermatrix zeigt, dass die ohnehin bereits hohen Erkennungsraten noch gesteigert werden können, wenn zu ähnliche Muster vermieden werden, die durch Verwechslung zu Fehleingaben führen. Dies ist eine theoretische und qualitative Einschätzung, die in Folgestudien evaluiert werden muss.

Über die Hypothesenprüfung hinaus stellt V3 eine Validierung der auf Basis von V1 und V2 generierten und weiterentwickelten Muster dar. Durch die hohe Anzahl an Abfragen pro Muster (Ø: 360) sowie die generell hohen Erkennungsraten wird das methodische Vorgehen zur Generierung gut erkennbarer und intuitiv zuzuordnender taktile Muster bestätigt. Außerdem scheint die kurze, intensive Lernphase von 20-25 Minuten (ca. eine Minute pro Muster) ausreichend, was sich mit den Erkenntnissen von [JONES 2014] und BARBER ET AL. 2015, S. 487-488] deckt. Zu erwähnen ist, dass die acht wichtigsten und sicherheitsrelevanten Muster in V3 (Kategorien „Fahrspur“ und „Warnungen“) trotz der zahlreichen Abfragen und Ablenkung durch weniger gut erkennbare Muster hohe Erkennungsraten zwischen 93,8 % ( $\pm 16,3$  %) und 100 % bei einem Mittelwert von 98,2 % ( $\pm 4,6$  %) aufweisen (vgl. Abbildung 8.4). Allein die eindeutige Unterscheidbarkeit zwischen „Toter Winkel“ und „Spur Verlassen“ (jeweils über 98 %) liefert einen wertvollen Input für die zuverlässige Umsetzung im Fahrzeug. Hervorzuheben sind außerdem die Muster für „Achtung“ (05) und „Wenden“ (20), welche neben „Spur Verlassen Links“ (03) bei einer Erkennungsrate von 100 % liegen. Ferner sind die Erkennungsraten von schwieriger erlernbaren Mustern (mehr Fehler beim Lernen) bei der Abfrage tendenziell niedriger und die subjektive Einschätzung der Probanden deckt sich mit den empirisch erfassten Ergebnissen. Auf Basis des in V3 verwendeten Musterpools lassen die Ergebnisse darauf schließen, dass eine Mindestanzahl von 14 vibrotaktile Mustern zuverlässig und eindeutig innerhalb eines Nutzungskontextes erkannt und unterschieden werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass diese Gesamtanzahl an schnell zu lernenden Mustern noch erweitert werden kann, wenn weitere Möglichkeiten der Differenzierung genutzt werden (z. B. Variation der Vibrationsfrequenz).

## 9 Zusammenfassung

Die taktile Informationsübermittlung bietet ein nahezu unbegrenztes Potenzial, um die Gebrauchstauglichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion zu unterstützen und zu optimieren. In verschiedenen Anwendungsgebieten kommen bereits taktile Anzeiger zum Einsatz, die meist zusätzlich zu einer visuellen oder akustischen Darbietung eingesetzt werden. Zahlreiche Studien weisen dabei kürzere Reaktions- bzw. Antwortzeiten sowie geringere Fehlerraten bei der Bedienung nach. Häufig wird in der Literatur dabei der Fokus auf den Vergleich der Wahrnehmungsmodalitäten gelegt. Komplexere taktile Muster werden zumeist in Kombination mit aktiven Explorationsvorgängen der Hände bzw. Finger eingesetzt und evaluiert. In Bezug auf taktiles Feedback im Fahrzeugsitz werden die verwendeten taktilen Muster häufig detailliert beschrieben, jedoch nicht systematisch hergeleitet und begründet.

Die vorliegende Arbeit liefert einen systematischen Ansatz, um die Basis für eine taktile Sprache am Beispiel des Fahrzeugsitzes grundlegend zu erforschen. Dabei wird zunächst das methodische Vorgehen aus dem Informationsübertragungsmodell nach Gitt [GITT 2002] abgeleitet und die TSM als Prüfstand für die Realisierung entwickelt. Die Methode beschreibt in Anlehnung an die drei mittleren Ebenen der Informationsübertragung die folgenden drei Schritte zur Generierung einer taktilen Sprache:

- Erkennbarkeit vibrotaktile Muster (Syntax-Ebene),
- Bedeutung vibrotaktile Muster (Semantik-Ebene),
- Lernen und Abrufen vibrotaktile Muster (Pragmatik-Ebene).

Jede dieser drei Ebenen wird in einer separaten Versuchsreihe behandelt und jeweils mit einem definierten Probandenkollektiv ohne Vorprägung evaluiert, wobei insgesamt 21 Hypothesen überprüft werden. Als Nutzungskontext bzw. Anwendungsbeispiel wird die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im PKW gewählt.

In Versuchsreihe 1 ( $N = 24$ ) wird zunächst systematisch und umfassend untersucht, welche taktilen Muster und Darbietungsarten vom Menschen generell erkannt und unterschieden werden können. Die Untersuchung von insgesamt 146 Mustern mit unterschiedlichen Darbietungsarten und Motoranordnungen liefert grundlegende Aussagen zur Eignung von konkreten vibrotaktile Mustern und Musterarten. Auf dieser Basis werden die Reizmuster für Versuchsreihe 2 ( $N = 24$ ) ausgewählt, welche erstmals in diesem Umfang semantische Verknüpfungen zwischen taktilen Mustern und expliziten Informationen auf Basis von intuitiven Zuordnungen der Versuchsteilnehmer liefert. In der Literatur wird ein solches Vorgehen bisher nicht beobachtet. Die Probanden bewer-

ten die insgesamt 184 Muster-Informationen-Kombinationen in „beiden Richtungen“. Dabei werden den einzelnen taktilen Mustern jeweils passende Informationen (aus einer definierten Auswahl) zugeordnet und umgekehrt, je nachdem was der Proband intuitiv als semantisch zugehörig bewertet. Durch die Bewertung in beiden Richtungen können gut geeignete Muster-Informationen-Kombinationen identifiziert werden, die wiederum als Basis für Versuchsreihe 3 ( $N = 30$ ) dienen. Dabei werden 24 Informationen mit zugehörigen Mustern definiert, welche von den Probanden gelernt und anschließend in neun unterschiedlich großen Musterpools abgerufen werden. Durchschnittlich werden dabei alle Reizmuster 360-mal abgefragt und generell sehr hohe Erkennungsraten bis zu 100 % erreicht. Auf Basis der Ergebnisse wird davon ausgegangen, dass eine Anzahl von mindestens 14 vibrotaktilen Mustern in kurzer Zeit (ca. 1 min pro Muster) gelernt und in einem Nutzungskontext zuverlässig eingesetzt werden kann. Die detaillierten Ergebnisse können den Zusammenfassungen der einzelnen Versuchsreihen (Kapitel 6.2.8, 7.2.7 und 8.2.5) sowie den zugehörigen ausführlichen Ergebnisdarstellungen entnommen werden.

Neben den konkreten Ergebnissen für die entwickelten Muster zur Fahrer-Fahrzeug-Interaktion liefert die vorliegende Arbeit das methodische Vorgehen zur Entwicklung einer taktilen Sprache, welches auch auf andere Anwendungsfälle übertragbar ist. Ziel ist dabei stets die Aufrechterhaltung des Situationsbewusstseins des Nutzers sowie eine gezielte und komfortable Aufmerksamkeitssteuerung, insbesondere in sicherheitsrelevanten Bediensituationen. In diesem Zusammenhang liefert auch der Vergleich zwischen der subjektiven Bewertung der Versuchsergebnisse durch die Probanden selbst und den empirischen Daten wichtige Erkenntnisse. Demnach können die Teilnehmer ihre eigene „Performanz“ während des Versuchs sehr gut einschätzen. Dies unterstützt den Sicherheitsaspekt bei der taktilen Informationsübertragung, da es scheinbar weder zu einer deutlichen Unter- noch zu einer Überschätzung bzgl. der Erkennung taktiler Hinweisreize kommt, was eine wichtige Voraussetzung für den adäquaten Einsatz der Technologie im Straßenverkehr darstellt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Richtungsinformationen generell weiterhin als wichtigstes Einsatzgebiet für taktile Reize angesehen werden. Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch, dass darüber hinaus großes Potenzial für vibrotaktilen Feedback besteht, um auch komplexere Informationen zu übermitteln und damit den Nutzer bei der Bewältigung seiner Aufgaben zu unterstützen. Dabei ist zu bedenken, dass in der vorliegenden Arbeit rein taktile Muster entwickelt und untersucht werden. Da bereits hier sehr hohe Erkennungsraten erreicht werden, eröffnet die kombinierte Darbietung mit visuellen und/oder akustischen Reizen weitere, vielversprechende Anwendungs- und Erweiterungsmöglichkeiten.



## 10 Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert das methodische Vorgehen zur Entwicklung einer taktilen Sprache für die Mensch-Maschine-Interaktion sowie umfangreiche, konkrete Ergebnisse für geeignete vibrotaktile Muster im Nutzungskontext PKW, die durch drei experimentelle Versuchsreihen mit insgesamt 78 Probanden erarbeitet werden. Trotz dieser umfangreichen Datenerhebung werden nachfolgend wichtige Aspekte aufgeführt, die aus Sicht des Verfassers in weiterführenden Forschungsarbeiten thematisiert werden sollten. Zunächst sei daran erinnert, dass das Probandenkollektiv der durchgeführten Untersuchungen eine homogene Alterskohorte mit Durchschnittsalter 25,3 Jahren ( $\pm 3,3$  Jahre) repräsentiert. Die Untersuchungen sollten mit älteren Alterskohorten wiederholt und verglichen werden, um den Einfluss des Alters auf die Mustererkennung und -zuordnung sowie die Erlernbarkeit zu ermitteln. Ein weiterer wichtiger Schritt ist die Validierung der Studienergebnisse in einer realistischeren Fahrsituation, auch unter Einbeziehung von Zeitdruck bei der Erkennung der Muster. Dies kann über die Integration einer interaktiven Fahrsimulation erfolgen, bspw. mithilfe des am IKTD aufgebauten Fahrzeugergonomie-Prüfstandes (vgl. [MANDEL 2019]). Dabei könnten u. a. Effekte der Ablenkung und Blickabwendung von der Straße untersucht werden, auch im Vergleich mit anderen Wahrnehmungsmodalitäten. Die sinnvolle Verwendung komplexer vibrotaktiler Muster in Zusammenhang mit dem automatisierten Fahren stellt dabei einen Sonderfall dar, der u. a. Bestandteil des vom BMWi geförderten Forschungsprojektes „TANGO“ ist [TANGO 2019]. Dieses Projekt wird aktuell in Kooperation mit mehreren Partnern der Automobilindustrie am IKTD bearbeitet. Zur Untersuchung eventueller Masking-Effekte durch Überlagerung von Fahrzeugvibrationen mit der Vibration der TSM, muss darüber hinaus ein Transfer ins Realfahrzeug erfolgen. Zudem sind weitere Studien zur Effektivität und Effizienz beim Lernen der taktilen Muster notwendig, um optimierte Lernstrategien zu entwickeln. Bspw. kann dabei zwischen dem rein taktilen Lernen und dem kombinierten Lernen mit gleichzeitiger visueller Anzeige der jeweils aktivierten Motoren unterschieden werden. Auch eine umfassendere Erhebung bzgl. Komfortempfinden und Akzeptanz von Vibration im Sitz wird empfohlen, obwohl die Befragungsergebnisse in der vorliegenden Arbeit in diesem Zusammenhang bereits ein positives Bild zeichnen. Durch die Kombination von vibrotaktilen Feedback mit einer im Sitz integrierten Druckmesssensorik könnte zudem eine Adaptivität (z. B. in Abhängigkeit des Körpergewichtes) bzw. Individualisierung erreicht werden, die sowohl das Komfortempfinden als auch die Erkennung unterstützen kann.



## Literaturverzeichnis

- [ALBERT & MARX 2010] Albert, R.; Marx, N.: Empirisches Arbeiten in Linguistik und Sprachlehrforschung – Anleitung zu quantitativen Studien von der Planungsphase bis zum Forschungsbericht. Tübingen: Narr-Verlag, 2010.
- [ARDUINO 2014] Arduino Website: Mikrocontroller Arduino Mega 2560 (online) <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560> (abgerufen am 30.07.2014).
- [BARBER ET AL. 2015] Barber, D. J.; Reinerman-Jones, L. E.; Matthews, G.: Toward a Tactile Language for Human-Robot Interaction: Two Studies of Tacton Learning and Performance. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol. 57, Nr. 3, 2015, S. 471-490.
- [BEYER & WEISS 2001] Beyer, L.; Weiss, T.: Elementareinheiten des somatosensorischen Systems als physiologische Basis der taktil-haptischen Wahrnehmung. In: Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.): Der bewegte Sinn. Basel, Schweiz: Birkhäuser Verlag, 2001, S. 25-38.
- [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006] Birbaumer, N.; Schmidt, R. F.: Biologische Psychologie. 6. Aufl., Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2006.
- [BORTZ & LIENERT 2008] Bortz, J.; Lienert, G. A.: Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung – Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben. 3. Aufl., Heidelberg: Springer Medizin, 2008.
- [BROWN 2007] Brown, L. M.: Tactons: Structured Vibrotactile Messages for Non-Visual Information Display. Department of Computing Science, University of Glasgow, Dissertation, 2007.
- [BUBB & BUBB 2013] Bubb, P.; Bubb, H.: Menschliche Zuverlässigkeit (Kapitel A-13). In: Schmidtke, H. (wiss. Bearbeitung): Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden. Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage, Band 2, Koblenz: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, aktualisiert 2013.
- [BUBB & GRÜNEN 2015] Bubb, H.; Grünen, R. E.: Anthropometrische Fahrzeuggestaltung. In: Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M. (Hrsg.): Automobilergonomie. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 347-470.

- [BUBB & STRÄTER 2006] Bubb, H.; Sträter, O.: Grundlagen der Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen. In: Zimolong, B.; Konradt, U. (Hrsg.): Ingenieurpsychologie. Göttingen: Hogrefe Verlag GmbH & Co. KG, 2006, S. 143-180.
- [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.
- [CHANG ET AL. 2010] Chang, W.; Lee, K.; Ji, Y.; Pyun, J.; Kim, S.: The Study of Human Haptic Perception for Vehicle Haptic Seat Development. In: Kaber, D. B.; Boy, G. (Hrsg.): Advances in Cognitive Ergonomics, CRC Press, 2010, S. 397-407.
- [CHANG ET AL. 2011] Chang, W.; Hwang, W.; Ji, Y. G.: Haptic Seat Interfaces for Driver Information and Warning Systems. In: International Journal of Human-Computer Interaction, 27:12, 2011, S. 1119-1132.
- [CHOLEWIAK 1979] Cholewiak, R. W.: Spatial Factors in the Perceived Intensity of Vibrotactile Patterns. In: Sensory Processes, Vol. 3(2):, 1979, S. 141-156.
- [CONRAD 2014] Conrad Website: STMicroelectronics, Datenblatt ULN 2803A (online) [http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/171824-da-01-en-IC\\_ULN2803\\_DIL18.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/171824-da-01-en-IC_ULN2803_DIL18.pdf) (abgerufen am 09.11.2014).
- [DE GROOT ET AL. 2011] De Groot, S.; De Winter, J. C. F.; García, J. M. L.; Mulder, M.; Wieringa, P. A.: The Effect of Concurrent Bandwidth Feedback on Learning the Lane-Keeping Task in a Driving Simulator. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol. 53, Nr. 1, 2011, S. 50-62.
- [DE VRIES ET AL. 2009] De Vries, S. C.; Van Erp, J. B. F.; Kiefer, R. J.: Direction coding using a tactile chair. In: Applied Ergonomics, Vol. 40(3), 2009, S. 477-484.
- [DIN 33402-2 2005] Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag, 2005.
- [DIN 44300-1 1995] Informationsverarbeitung – Begriffe – Teil 1: Allgemeine Begriffe, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag, 1995.

- [DIN EN ISO 14915-3 2003] Software-Ergonomie für Multimedia-Benutzerschnittstellen – Teil 3: Auswahl und Kombination von Medien, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- [DIN EN ISO 9241 -210 2011] Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag, 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: Beuth Verlag, 2011.
- [DIN EN ISO 9241-11 2018] Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag, 2018.
- [DINGES 1982] Dinges, W.: Das Verkehrsflugzeug als Mensch Maschine System (Teil 1). In: Dinges, W.; Faber, G.: System Mensch-Flugzeug. Rossdorf: Air Report Verlag, 1982.
- [DUTHOIT ET AL. 2016] Duthoit, V.; Sieffermann, J.-M.; Enrègle, E.; Blumenthal, D.: Perceived Intensity of Vibrotactile Stimuli: Do your Clothes Really Matter? In: Bello, F.; Kajimoto, H.; Visell, Y. (Hrsg.): Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications. EuroHaptics 2016, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9774, Cham: Springer, S. 412-418.
- [EISERT & BALDWIN 2014] Eisert, J. L.; Baldwin C. L.: Driving by the Seat of Your Pants: A Vibrotactile Navigation Study. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 58<sup>th</sup> Annual Meeting, 2014, S. 2033-2037.
- [EISERT ET AL. 2013] Eisert, J.; Garcia, A.; Payne, J. J.; Baldwin, C. L.: Tactile Route Guidance Performance and Preference. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 57<sup>th</sup> Annual Meeting, 2013, S. 1504-1508.
- [ENDSLEY 1995] Endsley, M. R.: Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 37(1), 1995, S. 32-64.

- [ERIKSSON ET AL. 2006] Eriksson, L.; Van Erp, J.; Carlander, O.; Levin, B.; Van Veen, H.; Veltman, H.: Vibrotactile and Visual Threat Cueing with High G Threat Intercept in Dynamic Flight Simulation. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 50<sup>th</sup> Annual Meeting, 2006, S. 1547-1551.
- [FERRIS ET AL. 2010] Ferris, T.; Stringfield, K.; Sarter, N.: Tactile "Change Blindness" in the Detection of Vibration Intensity. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 54<sup>th</sup> Annual Meeting, 2010, S. 1316-1320.
- [FITCH 2008] Fitch, G. M.: Driver Comprehension of Integrated Collision Avoidance System Alerts Presented through a Haptic Driver Seat. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, Industrial and Systems Engineering, Dissertation, 2008.
- [FITCH ET AL. 2007] Fitch, G. M.; Kiefer, R. J.; Kleiner, B. M.; Hankey, J. M.: Identifying the Pattern of Localization Responses with a Haptic Seat Intended to Alert Drivers to the Direction of a Crash Threat. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 51<sup>st</sup> Annual Meeting, 2007, S. 1517-1521.
- [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.
- [GALLACE ET AL. 2006] Gallace, A.; Tan, H. Z.; Spence, C.: The failure to detect tactile change: A tactile analogue of visual change blindness. In: Psychonomic Bulletin & Review, 13(2), 2006, 300-303.
- [GENERAL MOTORS 2013] General Motors Website: 2014 Sierra Safety Alert Seat Aids Driver Awareness – Haptic seat technology a first in full-size pickup segment, 30.04.2013 (online) <http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2013/Apr/0430-sierra.html> (abgerufen am 11.11.2015).
- [GIGERENZER 2008] Gigerenzer, G.: Bauchentscheidungen – Die Intelligenz des Unbewussten und die Macht der Intuition. München: Wilhelm Goldmann Verlag, 2008.
- [GITT 2002] Gitt, W.: Am Anfang war die Information, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Holzgerlingen: Hänssler Verlag, 2002.

- [GOLDSTEIN 2008] Goldstein, E. B.: Wahrnehmungspsychologie – Der Grundkurs. Irtel, H. (Hrsg. der deutschen Ausgabe). 7. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [GOLDSTEIN 2010] Goldstein, E. B.: Encyclopedia of Perception. Thousand Oaks, California: SAGE Publications, Inc., 2010.
- [GRUNWALD 2001] Grunwald, M.: Begriffsbestimmungen zwischen Psychologie und Physiologie. In: Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.): Der bewegte Sinn. Basel, Schweiz: Birkhäuser Verlag, 2001, S. 1-14.
- [HEUTEN ET AL. 2008] Heuten, W.; Henze, N.; Boll, S.; Pielot, M.: Tactile Wayfinder: A Non-Visual Support System for Wayfinding. In: NordiCHI '08: Proceedings of the 5<sup>th</sup> Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Building Bridges, 2008, S. 172-181.
- [HOGEMA ET AL. 2009] Hogema, J. H.; De Vries, S. C.; Van Erp, J. B. F.; Kiefer, R. J.: A Tactile Seat for Direction Coding in Car Driving: Field Evaluation. In: IEEE Transactions on Haptics, Vol. 2, Nr. 4, 2009, S. 181-188.
- [ITU 2010] ITU Telecommunication Standardization Bureau: Decreasing Driver Distraction – ITU-T Technology Watch Report, August 2010.
- [JI ET AL. 2011] Ji, Y. G.; Lee, K.; Hwang, W.: Haptic Perceptions in the Vehicle Seat. In: Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, Vol. 21, Nr. 3, 2011, S. 305-325.
- [JONES & RAY 2008] Jones, L. A.; Ray, K.: Localization and Pattern Recognition with Tactile Displays. In: Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, 2008, S. 33-39.
- [JONES & SARTER 2008] Jones, L. A.; Sarter, N. B.: Tactile Displays: Guidance for Their Design and Application. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol. 50, Nr. 1, 2008, S. 90-111.
- [JONES 2014] Jones, L. A.: Vortrag „Good Vibrations: How Tactile Cues Can Assist Navigation“, Navigation Lecture Series, Radcliffe Institute for Advanced Study, Harvard University, 02.12.2014 (online) <https://www.radcliffe.harvard.edu/video/lynette-jones-how-tactile-cues-can-assist-navigation> (abgerufen als Video am 01.05.2018).

- [JONES ET AL. 2004] Jones, L. A.; Nakamura, M.; Lockyer, B.: Development of a Tactile Vest. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'04), 2004, S. 82-89.
- [JONES ET AL. 2006] Jones, L. A.; Lockyer, B.; Piateski, E.: Tactile display and vibrotactile pattern recognition on the torso. In: Advanced Robotics, Vol. 20, Nr. 12, 2006, S. 1359-1374.
- [JONES ET AL. 2009] Jones, L. A.; Kunkel, J.; Piateski, E.: Vibrotactile pattern recognition on the arm and back. In: Perception, Vol. 38, Nr. 1, 2009, S. 52-68.
- [KERN 2009A] Kern, T. A.: Biologische Grundlagen haptischer Wahrnehmung. In: Kern, T. A. (Hrsg.): Entwicklung Haptischer Geräte – Ein Einstieg für Ingenieure, 1. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2009, S. 39-64.
- [KERN 2009B] Kern, T. A.: Identifikation von Anforderungen. In: Kern, T. A. (Hrsg.): Entwicklung Haptischer Geräte – Ein Einstieg für Ingenieure, 1. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2009, S. 119-133.
- [KERN ET AL. 2009] Kern, T. A.; Matysek, M.; Sindlinger, S.: Aktorentwurf. In: Kern, T. A. (Hrsg.): Entwicklung Haptischer Geräte – Ein Einstieg für Ingenieure, 1. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2009, S. 199-324.
- [KIRMAN 1983] Kirman, J. H.: Tactile apparent movement: The effects of shape and type of motion. In: Psychonomic Society, Inc.: Perception & Psychophysics, 1983, 34(1), S. 96-102.
- [KLOPP 1999] Klopp, A.: Integration multimodaler Raumwahrnehmung über gemeinsame interne Referenzrahmen? Der Oblique-Effekt als Untersuchungsparadigma. In: Pabst Science Publishers: TeaP '99 – Beiträge zur 41. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, 1999, S. 43-48.
- [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.
- [LEE ET AL. 2004] Lee, J. D.; Hoffman, J. D.; Hayes, E.: Collision Warning Design to Mitigate Driver Distraction. In: CHI 2004 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Vol. 6, Nr. 1, 2004, S. 65-72.



- [LINDMAN 1974] Lindman, H. R.: Analysis of variance in complex experimental designs. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1974.
- [LOOMIS & LEDERMAN 1986] Loomis, J. M.; Lederman, S. J.: Tactual perception. In: Boff, K. R.; Kaufman, L.; Thomas, J. P. (Hrsg.): Handbook of Perception and Human Performance, Volume II: Cognitive Processes and Performance. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1986, Ch. 31.
- [LU & SARTER 2014] Lu, S. A.; Sarter, N.: Tactile Change Blindness in an Unmanned Aerial Vehicle Control Task. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 58<sup>th</sup> Annual Meeting, 2014, S. 1706-1710.
- [MAIER & SCHMID 2017] Maier, T.; Schmid, M.: Technisches Design. Unveröffentlichtes Manuskript zur Vorlesung Technisches Design, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Univ. Stuttgart, 2017.
- [MANDEL 2019] Mandel, R.: Komfortmodell und Untersuchung zum Einfluss der Innenraumgeometrie auf die Wahrnehmung und Wirkung von Fahrzeugeigenschaften. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Dissertation, 2019.
- [MCGRATH & RUPERT 2014] McGrath, B.; Rupert, A.: Tactile Displays: From the Cockpit to the Clinic. In: Ahram, T.; Karwowski, W.; Marek, T. (Hrsg.): Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE), 2014, S. 939-947.
- [MILLER 1956] Miller, G. A.: The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information. In: Psychological Review 63, 1956, S. 81-97.
- [MOBILIS ROLYAN 2017] Mobilis Rolyan Website, Workshop Two-Point Discrimination (online) [http://otnotes.com/wp-content/uploads/2017/05/Two\\_Point\\_Discrimination.pdf](http://otnotes.com/wp-content/uploads/2017/05/Two_Point_Discrimination.pdf) (abgerufen am 03.06.2018).
- [MORRELL & WASILEWSKI 2010] Morrell, J.; Wasilewski, K.: Design and evaluation of a vibrotactile seat to improve spatial awareness while driving. In: IEEE Haptics Symposium, 2010, S. 281-288.
- [MURATA ET AL. 2013] Murata, A.; Kemori, S.; Moriwaka, M.; Hayami, T.: Proposal of Automotive 8-directional Warning System That Makes Use of Tactile Apparent Movement. In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on DHM and Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management: Healthcare and Safety of the Environment and Transport – Part I, 2013, S. 98-107.

- [NAVARRO ET AL. 2010] Navarro, J.; Mars, F.; Forzy, J.-F.; El-Jaafari, M.; Hoc, J.-M.: Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. In: Accident Analysis and Prevention, Vol. 42, Nr. 3, 2010, S. 904-912.
- [NIWA ET AL. 2009] Niwa, M.; Lindeman, R. W.; Itoh, Y.; Kishino, F.: Determining Appropriate Parameters to Elicit Linear and Circular Apparent Motion Using Vibrotactile Cues. In: World Haptics – Third Joint Euro-Haptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2009, S. 75-78.
- [NORMAN 2013] Norman, D.: The Design of Everyday Things. Revised and Expanded Edition, New York: Basic Books, 2013.
- [NUKARINEN ET AL. 2014] Nukarinen, T.; Raisamo, R.; Farooq, A.; Evreinov, G.; Surakka, V.: Effects of Directional Haptic and Non-Speech Audio Cues in a Cognitively Demanding Navigation Task. In: NordiCHI '14 Proceedings of the 8<sup>th</sup> Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational, 2014, S. 61-64.
- [NUKARINEN ET AL. 2015] Nukarinen, T.; Rantala, J.; Farooq, A.; Raisamo, R.: Delivering Directional Haptic Cues through Eyeglasses and a Seat. In: IEEE World Haptics Conference, 2015, S. 345-350.
- [OLMA 2012] Olma, R.: Unfälle durch Ablenkung – Zehn Prozent der Unfälle durch Multi-Tasking, Motor Presse Stuttgart GmbH, Auto Motor und Sport, 20.04.2012 (online) <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/unfaelle-durch-ablenkung-zehn-prozent-der-unfaelle-durch-multi-tasking-4466804.html> (abgerufen am 02.11.2014).
- [OTHERSEN 2016] Othersen, I.: Vom Fahrer zum Denker und Teilzeitlenker – Einflussfaktoren und Gestaltungsmerkmale nutzerorientierter Interaktionskonzepte für die Überwachungsaufgabe des Fahrers im teilautomatisierten Modus. In: Volkswagen Aktiengesellschaft (Hrsg.): AutoUni – Schriftenreihe, Band 90, Wiesbaden: Springer, 2016.
- [PETERMANN-STOCK ET AL. 2015] Petermann-Stock, I.; Hackenberg, L.; Muhr, T.; Josten, J.; Eckstein, L.: „Bitte übernehmen Sie das Fahren!“ – Ein multimodaler Vergleich von Übernahmestrategien. In: Intelligente Transport- und Verkehrssysteme und -dienste Niedersachsen e.V. (Hrsg.): Tagungsband zur AAET 2015 – Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 2015, S 345-369.

- [PETERMANN-STOCK 2015] Petermann-Stock, I.: Automation und Transition im Kraftfahrzeug – Nutzerzentrierte Gestaltung von Übergabe- und Übernahme-situationen innerhalb eines mehrstufigen Automationsansatzes. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Lebenswissenschaften, Dissertation, 2015.
- [PETERMEIJER ET AL. 2015] Petermeijer, S. M.; Abbink, D. A.; Mulder, M.; De Winter, J. C. F.: The Effect of Haptic Support Systems on Driver Performance: A Literature Survey. In: IEEE Transactions on Haptics, Vol. 8, Nr. 4, 2015, S. 467-479.
- [PETERMEIJER ET AL. 2016] Petermeijer, S. M.; De Winter, J. C. F.; Bengler, K. J.: Vibrotactile Displays: A Survey With a View on Highly Automated Driving. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, Nr. 4, 2016, S. 897-907.
- [PETERMEIJER ET AL. 2017A] Petermeijer, S. M.; Hornberger, P.; Ganotis, I.; De Winter, J. C. F.; Bengler, K. J.: The Design of a Vibrotactile Seat for Conveying Take-Over Requests in Automated Driving. In: Stanton, N. A. (Hrsg.): Advances in Human Aspects of Transportation: Proceedings of the AHFE 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 597, 2017.
- [PETERMEIJER ET AL. 2017B] Petermeijer, S. M.; Cieler, S.; De Winter, J. C. F.: Comparing spatially static and dynamic vibrotactile take-over requests in the driver seat. In: Accident Analysis and Prevention, Vol. 99, Teil A, 2017, S.218-227.
- [PETROV 2012] Petrov; A.: Usability-Optimierung durch adaptive Bediensysteme. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Dissertation, 2012.
- [PETROV ET AL. 2011] Petrov, A.; Pfeffer, S.; Maier, T.: Visuelle Präsentation und taktile Repräsentation – redundante, substitutive oder komplementäre Informationsdarbietung? In: 9. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, Berlin, 2011.
- [PFEFFER 2016] Pfeffer, S.: Entwicklung einer modularen Methode zur Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion mit Applikation bei Medizinprodukten. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Dissertation, 2016.

- [PIELOT ET AL. 2008] Pielot, M.; Henze, N.; Heuten, W.; Boll, S.: Evaluation of Continuous Direction Encoding with Tactile Belts. In: HAID '08: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Haptic and Audio Interaction Design, 2008, S. 1-10.
- [PRECISION MICRO-DRIVES 2014] Precision Microdrives Website, Datenblatt Pico Vibe Vibrationsmotor 310-113 (online) <https://www.precisionmicrodrives.com/product/datasheet/310-113-10mm-vibration-motor-3mm-type-datasheet.pdf> (abgerufen am 13.11.2014).
- [RIDDLE & CHAPMAN 2012] Riddle, D. L.; Chapman, R. J.: Tactile Language Design. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 56<sup>th</sup> Annual Meeting, 2012, S. 478-482.
- [RIENER & FERSCHA 2008] Riener, A.; Ferscha, A.: Simulation Driven Experiment Control in Driver Assistance Assessment. In: 12<sup>th</sup> IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications, 2008, S. 217-226.
- [ROSENGREN & WENNERHOLM 2008] Rosengren, P., Wennerholm, K.: Design of a vibro-tactile warning system in an automobile application. Linköpings University, Division of Industrial Ergonomics, Department for Management and Engineering, Master thesis, 2008.
- [RUCK 2015] Hellmut Ruck GmbH Website, Stimmgabel Gebrauchsanweisung, Art.-Nr.: 20904 (online) [https://www.hellmut-ruck.de/media/pdf/58/5f/5e/20904\\_Gebrauchsanweisung\\_Stimmgabel-pdf/Udt92qnSebcP.pdf](https://www.hellmut-ruck.de/media/pdf/58/5f/5e/20904_Gebrauchsanweisung_Stimmgabel-pdf/Udt92qnSebcP.pdf) (abgerufen am 03.06.2018).
- [SALZER & ORON-GILAD 2012] Salzer, Y.; Oron-Gilad, T.: A comparison of „on-thigh“ vibrotactile, combined visual-vibrotactile, and visual-only alerting systems for the cockpit under visually demanding conditions. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 56<sup>th</sup> Annual Meeting, 2012, S. 1644-1648.
- [SALZER ET AL. 2011] Salzer, Y.; Oron-Gilad, T.; Ronen, A.; Parmet, Y.: Vibrotactile „On-Thigh“ Alerting System in the Cockpit. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol. 53, Nr. 2, 2011, S. 118-131.
- [SCHAAL ET AL. 2014] Schaal, S.; Kunsch, K.; Kunsch, S.: Der Mensch in Zahlen – Eine Datensammlung in Tabellen mit über 20000 Einzelwerten, 4. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.

- [SCHANDRY 2006] Schandry, R.: Biologische Psychologie. 2. überarbeitete Auflage, Weinheim: Beltz Verlag, 2006.
- [SCHLICK ET AL. 2010] Schlick, C. M.; Luczak, H.; Bruder, R.: Arbeitswissenschaft, 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- [SCHMID & MAIER 2017] Schmid, M.; Maier, T.: Technisches Interface Design – Anforderungen, Bewertung und Gestaltung. Berlin Heidelberg: Springer 2017.
- [SCHMID & MAIER 2018] Schmid, M.; Maier, T.: Interface-Design. Unveröffentlichtes Manuskript zur Vorlesung Interface-Design, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, 2018.
- [SCHWALK & MAIER 2014] Schwalk, M.; Maier, T.: Multimodale HMI – Untersuchungen zur Erweiterung der Arbeitsgedächtniskapazität durch visuell-taktile Anzeiger. In: Krzywinski, J.; Linke, M.; Wölfel, C.; Kranke, G. (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2014 – Beiträge zum Technischen Design. Dresden, 2014, S. 233-242.
- [SCHWALK & MAIER 2016] Schwalk, M.; Maier, T.: Effects of Pressure and Vibration Stimuli on the Usability of Human-Machine Systems – Studies on Spatial Recognition and Response Times Using a Variable Tactile Belt. In: Deml, B.; Stock, P.; Bruder, R.; Schlick, C. M. (Hrsg.): Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes – Proceedings of the Annual Meeting of GfA 2015. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2016, S. 343-359.
- [SCHWALK ET AL. 2015A] Schwalk, M.; Sperl, M.; Maier, T.: Abbildung von Druck- und Vibrationsreizen auf dem menschlichen Körper durch einen variablen taktilen Hüftgurt. In: VerANTWORTung für die Arbeit der Zukunft, 61. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA), 2015.
- [SCHWALK ET AL. 2015B] Schwalk, M.; Kalogerakis, N.; Maier, T.: Driver support by a vibrotactile seat matrix – Recognition, adequacy and workload of tactile patterns in take-over scenarios during automated driving. In: 6<sup>th</sup> International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE) and the Affiliated Conferences, 2015.

- [SCHWALK ET AL. 2016] Schwalk, M.; Cui, H.; Maier, T.: Informationskodierung mittels Taktiler Sitz-Matrix (TSM) – Wie gut erkennen wir vibrotaktile Muster?. In: Arbeit in komplexen Systemen – Digital, vernetzt, human?!, 62. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA), 2016.
- [SCHWALK ET AL. 2017] Schwalk, M.; Helbeck, M.; Maier, T.: Vibrotaktile Kodierung von Geschwindigkeitsinformationen mittels Taktiler Sitz-Matrix (TSM) – statische vs. dynamische Muster. In: Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels – kreativ, innovativ, sinnhaft; 63. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA), 2017.
- [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018A] Schwarz, J.; Bruderer Enzler, H. (Hrsg.): Website Methodenberatung (Varianzanalyse), Universität Zürich (UZH), 13.08.2018 (online) [https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse\\_spss/unterschiede/zentral/evarianzmessw.html](https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/evarianzmessw.html) (abgerufen am 16.09.2018)
- [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018B] Schwarz, J.; Bruderer Enzler, H. (Hrsg.): Website Methodenberatung (Friedman-Test), Universität Zürich (UZH), 13.08.2018 (online) [https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse\\_spss/unterschiede/zentral/friedman.html](https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/friedman.html) (abgerufen am 16.09.2018).
- [SEEGER 2005] Seeger, H.: Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme – Industrial Design Engineering. 2. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- [SIEGLE 2015] Siegle, D.: r Critical Value Table, Neag School of Education – University of Connecticut, 24.02.2015 (online) [https://researchbasics.education.uconn.edu/r\\_critical\\_value\\_table/](https://researchbasics.education.uconn.edu/r_critical_value_table/) (abgerufen am 29.09.2018)
- [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.
- [STANLEY 2006] Stanley, L. M.: Haptic and auditory cues for lane departure warnings. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 50<sup>th</sup> Annual Meeting, Nr. 22, 2006, S. 2405-2408.

- [STEVENS & CHOO 1996] Stevens, J. C.; Choo, K. K.: Spatial Acuity of the Body Surface over the Life Span. In: Somatosensory and Motor Research, Vol. 13, Nr. 2, 1996, S. 153-166.
- [TAN ET AL. 2003] Tan, H. Z.; Gray, R.; Young, J. J.; Traylor, R.: A Haptic Back Display for Attentional and Directional Cueing. In: Haptics-e, Vol. 3, Nr. 1, 2003.
- [TANGO 2019] Website des Forschungsprojektes TANGO – Technologie für automatisiertes Fahren nutzergerecht optimiert (online) <https://projekt-tango-trucks.com/> (abgerufen am 07.07.2019).
- [TELPAZ ET AL. 2015] Telpaz, A.; Rhindress, B.; Zelman, I.; Tsimhoni, O.: Haptic Seat for Automated Driving: Preparing the Driver to Take Control Effectively. In: AutomotiveUI '15, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 2015, S. 23-30.
- [THOMAS 2013] Thomas, L. C.: Vibro-tactile seat interface as a cueing device for different types of information. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 57<sup>th</sup> Annual Meeting, 2013, S. 1184-1188.
- [THULLIER ET AL. 2012] Thullier, F.; Bolmont, B.; Lestienne, F. G.: Vibrotactile Pattern Recognition: A Portable Compact Tactile Matrix. In: IEEE – Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 59, Nr. 2, 2012, S. 525-530.
- [VAN ERP & VAN VEEN 2001] Van Erp, J. B. F.; Van Veen, H. A. H. C.: Vibro-Tactile Information Presentation in Automobiles. In: Proceedings of EuroHaptics, 2001, S. 99–104.
- [VAN ERP & VAN VEEN 2004] Van Erp, J. B. F., Van Veen H A (2004) Vibrotactile in-vehicle navigation system. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Vol. 7, Nr. 4-5, 2004, S. 247-256.
- [VAN ERP 2006] Van Erp, J. B. F.: The Multi-Dimensional Nature of Encoding Tactile and Haptic Interactions: From Psychophysics to Design Guidelines. In: Proceedings of The Human Factors and Ergonomics Society, 50<sup>th</sup> Annual Meeting, 2006, S. 685-688.

- [VAN ERP ET AL. 2003] Van Erp, J. B. F.; Veltman, J. A.; Van Veen, H. A. H. C.; Oving, A. B.: Tactile Torso Display as Countermeasure to Reduce Night Vision Goggles Induced Drift. In: Proceedings of RTO Meeting on Spatial Disorientation in Military Vehicles: Causes, Consequences and Cures, Vol. 86, 2003, S. 49-1–49-8.
- [VDA 2015] Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA): Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. Brandenburgische Universitätsdruckerei und Verlagsgesellschaft Potsdam mbh, 2015.
- [VDI 2225-3 1998] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung – Blatt 3. Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- [VDI/VDE 2258 1987] VDI/VDE-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik: Feinwerkelemente; Bedienelemente, mechanisch. Berlin: Beuth Verlag, 1987.
- [WENTURA & FRINGS 2013] Wentura, D., Frings C.: Kognitive Psychologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [WICKENS & HOLLANDS 1999] Wickens, C. D.; Hollands, J. G.: Engineering Psychology and Human Performance, Third Edition. New Jersey (USA): Prentice-Hall Inc., 1999.
- [WIPPICH 2001] Wippich, W.: Implizite und explizite Gedächtnisleistungen. In: Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.): Der bewegte Sinn. Basel, Schweiz: Birkhäuser Verlag, 2001, S. 99-108.
- [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**

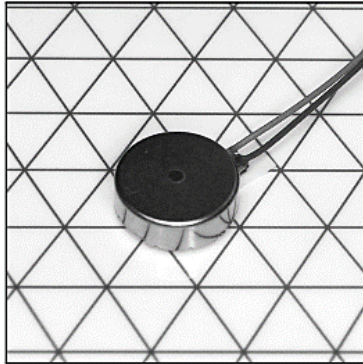
- [KALOGERAKIS 2014] Kalogerakis, N.: Experimentelle Untersuchungen zur multimodalen Informationsdarbietung beim automatisierten Fahren. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Masterarbeit, 2014.
- [MINCH 2013] Minch, K.: Konzeption und Konstruktion einer Versuchsvorrichtung zur Kodierung von taktilen Informationen im Fahrzeugcockpit. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2013.



## Anhang

### A1 Datenblatt – Vibrationsmotor

310-113



10mm Vibration Motor - 3mm Type  
Shown on 6mm Isometric Grid



#### Product Data Sheet Pico Vibe™

#### 10mm Vibration Motor - 3mm Type

**Model: 310-113**

#### Ordering Information

The model number 310-113 fully defines the model, variant and additional features of the product. Please quote this number when ordering. For stocked types, testing and evaluation samples can be ordered directly through our online store.

#### Datasheet Versions

It is our intention to provide our customers with the best information available to ensure the successful integration between our products and your application. Therefore, our publications will be updated and enhanced as improvements to the data and product updates are introduced.

To obtain the most up-to-date version of this datasheet, please visit our website at: [www.precisionmicrodrives.com](http://www.precisionmicrodrives.com)

The version number of this datasheet can be found on the bottom left hand corner of any page of the datasheet and is referenced with an ascending R-number (e.g. R002 is newer than R001). Please contact us if you require a copy of the engineering change notice between revisions.

If you have any questions, suggestions or comments regarding this publication or need technical assistance, please contact us via email at: [enquiries@precisionmicrodrives.com](mailto:enquiries@precisionmicrodrives.com) or call us on +44 (0) 1932 252 482

#### Key Features

Body Diameter:	10 mm [± 0.1]
Body Length:	3.4 mm [± 0.1]
Rated Operating Voltage:	3 V
Rated Vibration Speed:	12,200 rpm [± 2,500]
Typical Rated Operating Current:	60 mA
Typical Norm. Amplitude:	1.34 G

**Abbildung A. 1:** Pico Vibe Motor 310-113, Übersicht [PRECISION MICRODRIVES 2014]

#### Typical Haptic Characteristics

PARAMETER	CONDITIONS	SPECIFICATION
Typical Lag Time	At rated voltage using the inertial test load	47 ms
Typical Rise Time	At rated voltage using the inertial test load	91 ms
Typical Stop Time	At rated voltage using the inertial test load	112 ms
Typical Active Brake Time	Time taken from steady-state to 0.04 G under inverse polarity at max. voltage	46 ms

**Abbildung A. 2:** Pico Vibe Motor 310-113, Grenzen [PRECISION MICRODRIVES 2014]

### Typical Vibration Motor Performance Characteristics

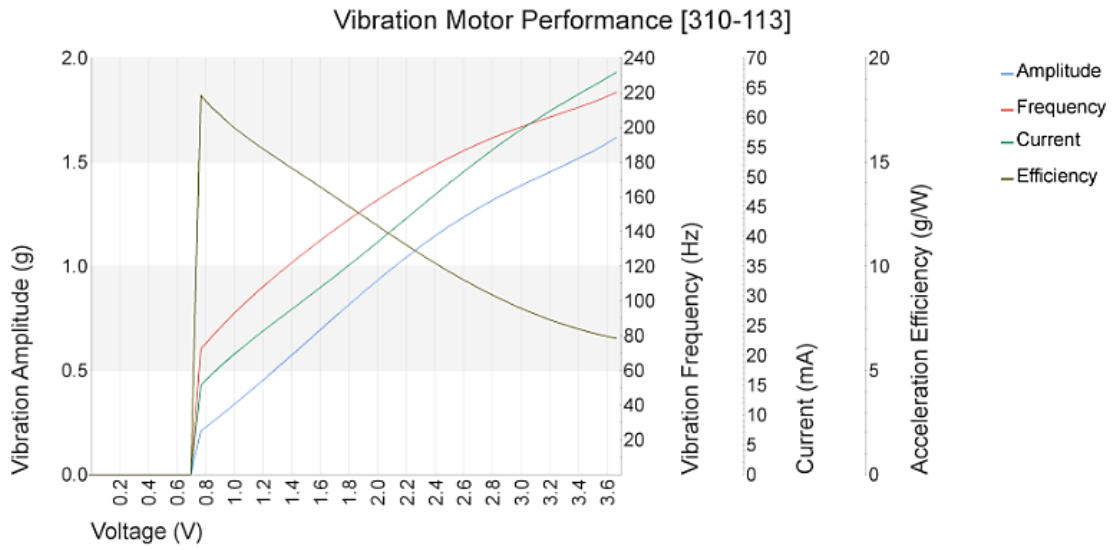


Abbildung A. 3: Pico Vibe Motor 310-113, Diagramm [PRECISION MICRODRIVES 2014]

### Product Dimensional Specification

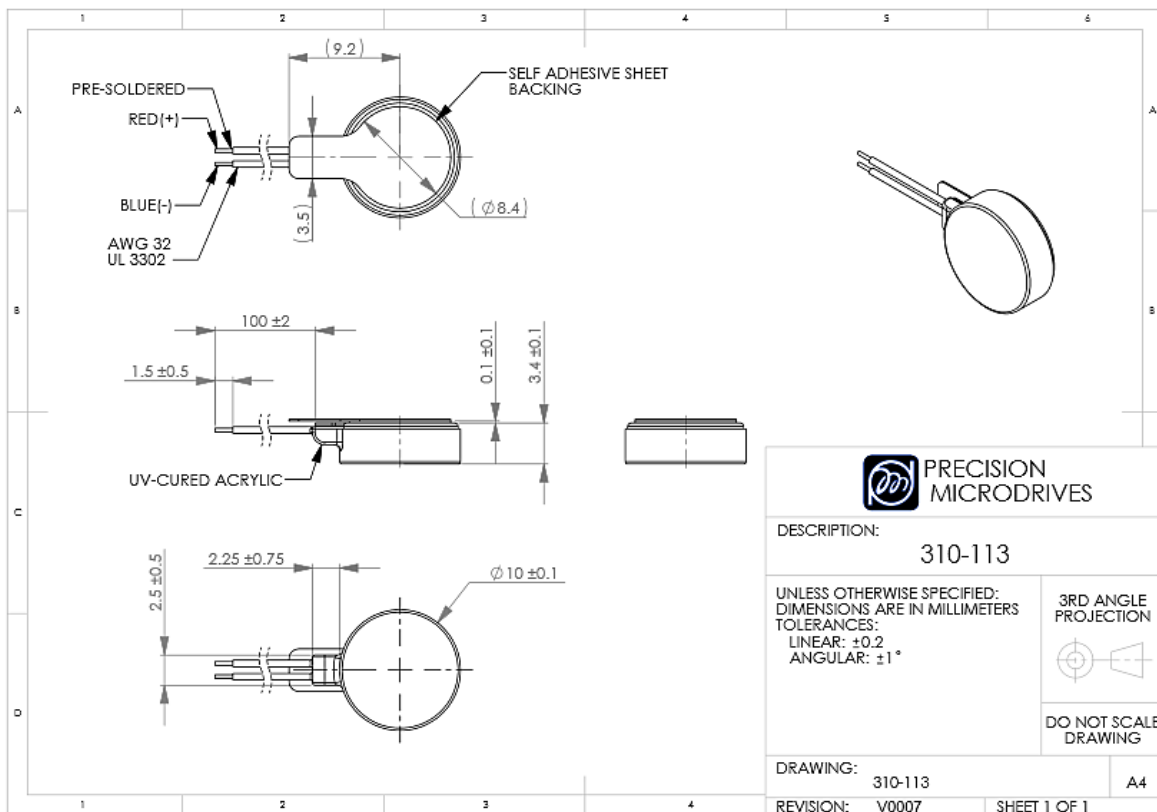


Abbildung A. 4: Pico Vibe Motor 310-113, Maße [PRECISION MICRODRIVES 2014]

## A2 Fragebogen

<b>IKTD</b> Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design Universität Stuttgart	Probanden-ID <input type="text"/>
--	-----------------------------------

**Befragung zur Informationskodierung mittels  
Taktiler Sitz-Matrix (TSM)**

**Versuchsreihe 1 / 2 / 3**

Die folgende Befragung ist Bestandteil der Dissertation von Dipl.-Ing. Matti Schwalk und dient der Ermittlung von demografischen Daten sowie subjektiven Einschätzungen der Versuchsteilnehmer(innen) zur Verwendung der TSM.

Hinweis zum Ausfüllen: Bei Fragen zum Ankreuzen ist von äquidistanten Abständen zwischen den Antwortkästchen auszugehen.

Alle Angaben werden entsprechend den Bestimmungen der Einverständniserklärung anonymisiert und getrennt von persönlichen Daten ausgewertet.

Das Ausfüllen des Fragebogens dauert ca. 10 Minuten.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an dieser Befragung!

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. M. Schwalk (IKTD)  
0711/685-66673  
matti.schwalk@iktd.uni-stuttgart.de

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)  
Universität Stuttgart | 2017

**Abbildung A. 5:** Fragebogen – Seite 1

### 1) Demografische Daten

Geschlecht  weiblich  männlich

Händigkeit  links  rechts

Alter \_\_\_\_\_ Jahre

Gewicht \_\_\_\_\_ kg

Stehend: Körperhöhe (mit Schuhen) \_\_\_\_\_ cm

Absatz / Sohle \_\_\_\_\_ cm

Stehend: Schulterhöhe \_\_\_\_\_ cm

Sitzend: Schulterhöhe \_\_\_\_\_ cm

Sitzend: Höhe Rückenkontaktfläche \_\_\_\_\_ cm

Höhe der Fußaufstellfläche \_\_\_\_\_ cm

Kleidung beim Versuch: **Hose**  Jeans \_\_\_\_\_

Leder \_\_\_\_\_

Stoff \_\_\_\_\_

Bemerkungen: \_\_\_\_\_

Kleidung beim Versuch: **Oberteil**  1 Lage \_\_\_\_\_

2 Lagen \_\_\_\_\_

3 Lagen \_\_\_\_\_

Bemerkungen: \_\_\_\_\_

Abbildung A. 6: Fragebogen – Seite 2

## 2) Taktile Wahrnehmungsleistung

Zweipunktdiskrimination (gemessen am rechten Unterarm, vor d. Ellbogen, außen)

- Je Messung randomisierte Reihenfolge der sechs Distanzen
- Distanz „10 mm“ zur Prüfung → Antwort muss „Ein Punkt“ sein

	50 mm	45 mm	40 mm	35 mm	30 mm	10 mm
Messung 1						
Messung 2						
Messung 3						

1: einen Punkt wahrgenommen

2: zwei Punkte wahrgenommen

---

Vibrationsempfinden (gemessen am rechten Ellbogengelenk)

- Testwerkzeug: Rydel-Seiffer Stimmgabel bzw. Vibrationsgabel bei kalibrierten 64 Hz

Messung 1	
Messung 2	
Messung 3	

Skala: 1-8

### 3) Erfahrung beim Führen eines PKW

In welchem Alter haben Sie Ihre Fahrerlaubnis für einen PKW erhalten?

mit \_\_\_\_\_ Jahren

Wie viele Kilometer haben Sie in den letzten 12 Monaten am Steuer eines Pkw zurückgelegt?

\_\_\_\_\_ km

In wie viel Prozent der Zeit sind Sie beim Fahren akustischen Reizen wie Musik, Unterhaltungen oder Telefonaten ausgesetzt?

\_\_\_\_\_ %

### 4) Komfortempfinden und Leistungseinschätzung

Halten Sie die einzelnen Vibrationsmuster (unabhängig von der gezeigten Anzahl im Versuch) für irritierend oder unterstützend bei der Anwendung im Straßenverkehr?








irritierend

unter-  
stützend

Wie empfanden Sie die Vibrations-Intensität beim Versuch in Bezug auf Ihr Komfortempfinden?








zu schwach

zu stark

Auf welchem Bereich des Sitzes empfinden Sie vibrotaktilen Feedback als angenehmer?




Rückenlehne

Sitzfläche

Beides gleich

Auf welchem Bereich des Sitzes sind die vibrotaktilen Muster besser erkennbar?




Rückenlehne

Sitzfläche

Beides gleich

Abbildung A. 8: Fragebogen – Seite 4

Wie viele verschiedene vibrotaktile Muster könnten Ihrer Einschätzung nach maximal verwendet werden, ohne dass es zu Verwechslungen kommt?

\_\_\_\_\_

**V1:** Wie hoch schätzen Sie Ihre durchschnittliche Erkennungsrate für den gesamten Versuch?

\_\_\_\_\_ %

**V1:** Bei welcher Darbietungsart sind die Muster am besten zu erkennen (Mehrfachnennungen möglich)?

kontinuierlich       gepulst       dynamisch

**V2:** Bei welcher Darbietungsart sind die Muster besser zu erkennen?

gepulst       dynamisch       beides gleich

**V2:** Welcher Faktor ist Ihrer Einschätzung nach ausschlaggebender für die empfundene Dringlichkeit einer Information (Versuchsteil 1)?

Motoranzahl       Anzeige-/Intervalldauer       beides gleich

**V2:** Konnten Sie sich die drei sequenziell angezeigten Muster für die anschließende Bewertung gut merken?

ja       nein

**V3:** Wie hoch schätzen Sie Ihre Fehleranzahl für den gesamten Versuch?

\_\_\_\_\_

**V3:** Gibt es Muster, die besonders gut oder besonders schlecht zu erkennen sind?

gut: \_\_\_\_\_

schlecht: \_\_\_\_\_

Abbildung A. 9: Fragebogen – Seite 5

### 5) Technische Gestaltung der TSM

Wie beurteilen Sie die Höhe der Matrix am **Rücken** für eine optimale Muster-Erkennung?

zu tief

zu hoch

Wie beurteilen Sie die Position der Matrix auf der **Sitzfläche** für eine optimale Muster-Erkennung?

zu weit  
hinten

zu weit  
vorne

Wie sinnvoll finden Sie generell den Einsatz von vibrotakilem Feedback im Sitz?

nicht  
sinnvoll

sehr  
sinnvoll

### 6) Allgemeine Bemerkungen zur TSM und zum Versuch

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Abbildung A. 10: Fragebogen – Seite 6



### A3 Einzelschritte der dynamischen Muster

In Tabelle A. 1 bis Tabelle A. 4 werden die Einzelschritte der in Versuchsreihe 1 verwendeten dynamischen Muster beschrieben. Die Angabe zum TSM-Bereich bezieht sich dabei auf die Rückenlehne (RL) bzw. Sitzfläche (SF). Wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, erfolgt bei allen dynamischen Mustern eine „überlappende Anzeige“ von (bis zu) drei gleichzeitig aktivierten Einzelschritten, um eine flüssige Bewegung zu generieren.

Teilversuch	Inhalt	Benennung	Anordnung	TSM-Bereich	Aktivierungsdauer pro Schritt	Anzahl Schritte	Einzelschritte										
							1	2	3	4	5	6	7	8	9		
V1.0 Beispiel-muster	V1_0-5_01_dynamisch_nach unten		RL	150	9												
	V1_0-6_01_dynamisch_nach vorne		SF	150	7												

**Tabelle A. 1:** Einzelschritte der dynamischen Beispiel-Muster in V1.0

Teilversuch	Inhalt	Benennung	Anordnung	TSM-Bereich	Aktivierungsdauer pro Schritt	Anzahl Schritte	Einzelschritte										
							1	2	3	4	5	6	7	8	9		
V1.2 Orientierungen dynamisch (Bewegungsarten)	V1_2-1_01_dynamisch_hoch		RL	150	7												
	V1_2-1_02_dynamisch_hoch		RL	150	7												
	V1_2-1_03_dynamisch_hoch		RL	150	8												
	V1_2-1_04_dynamisch_runter		RL	150	7												
	V1_2-1_05_dynamisch_runter		RL	150	7												
	V1_2-1_06_dynamisch_runter		RL	150	8												
	V1_2-1_07_dynamisch_rechts		RL	150	7												
	V1_2-1_08_dynamisch_rechts		RL	150	7												
	V1_2-1_09_dynamisch_rechts		RL	150	8												
	V1_2-1_10_dynamisch_links		RL	150	7												
	V1_2-1_11_dynamisch_links		RL	150	7												
	V1_2-1_12_dynamisch_links		RL	150	8												

**Tabelle A. 2:** Einzelschritte der dynamischen Muster in V1.2 (Teil 1/2)

Teilversuch	Inhalt	Benennung	Anordnung	TSM-Bereich	Aktivierungs- dauer pro Schritt	Anzahl Schritte	Einzelschritte																	
							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
							10	11	12	13	14	15	16	17	18									
V1.2	Orientierungen dynamisch (Bewegungsarten)	V1_2-1_13_dynamisch_rechts drehen		RL	150	11																		
		V1_2-1_14_dynamisch_rechts drehen		RL	150	15																		
		V1_2-1_15_dynamisch_rechts drehen		RL	150	11																		
		V1_2-1_16_dynamisch_links drehen		RL	150	11																		
		V1_2-1_17_dynamisch_links drehen		RL	150	15																		
		V1_2-1_18_dynamisch_links drehen		RL	150	11																		
		V1_2-1_19_dynamisch_rechts schwenken		RL	150	5																		
		V1_2-1_20_dynamisch_rechts schwenken		RL	150	6																		
		V1_2-1_21_dynamisch_rechts schwenken		RL	150	7																		
		V1_2-1_22_dynamisch_links schwenken		RL	150	5																		
		V1_2-1_23_dynamisch_links schwenken		RL	150	6																		
		V1_2-1_24_dynamisch_links schwenken		RL	150	7																		

**Tabelle A. 2:** Einzelschritte der dynamischen Muster in V1.2 (Teil 2/2)




































































































































Teilversuch	Inhalt	Benennung	Anordnung	TSM-Bereich	Aktivierungsdauer pro Schritt	Anzahl Schritte	Einzelschritte								
							1	2	3	4	5	6	7	8	9
V1.8	Radialer Verlauf, 1 Bewegungsrichtung	V1_8-1_01_dynamisch_raus		RL	200	5									
		V1_8-1_02_dynamisch_raus		RL	200	5									
		V1_8-1_03_dynamisch_rein		RL	200	5									
		V1_8-1_04_dynamisch_rein		RL	200	5									
		V1_8-1_05_dynamisch_raus		RL	200	5									
		V1_8-1_06_dynamisch_raus		RL	200	5									
		V1_8-1_07_dynamisch_rein		RL	200	5									
		V1_8-1_08_dynamisch_rein		RL	200	5									
		V1_8-1_09_dynamisch_raus		RL	200	5									
		V1_8-1_10_dynamisch_rein		RL	200	5									
		V1_8-1_11_dynamisch_raus		RL	200	5									
		V1_8-1_12_dynamisch_rein		RL	200	5									
		V1_8-1_13_dynamisch_raus		RL	200	5									
		V1_8-1_14_dynamisch_rein		RL	200	5									

**Tabelle A. 3:** Einzelschritte der dynamischen Muster in V1.8

Teilversuch	Inhalt	Benennung	Anordnung	TSM-Bereich	Aktivierungs- dauer pro Schritt	Anzahl Schritte	Einzelschritte								
							1	2	3	4	5	6	7	8	9
V1.9	Radialer Verlauf, 2 Bewegungsrichtungen	V1_9-1_01_dynamisch_raus		RL	150	9									
		V1_9-1_02_dynamisch_rein		RL	150	9									
		V1_9-1_03_dynamisch_raus		RL	150	9									
		V1_9-1_04_dynamisch_rein		RL	150	9									
		V1_9-1_05_dynamisch_raus		RL	150	9									
		V1_9-1_06_dynamisch_rein		RL	150	9									
		V1_9-1_07_dynamisch_raus		RL	150	9									
		V1_9-1_08_dynamisch_rein		RL	150	9									

**Tabelle A. 4:** Einzelschritte der dynamischen Muster in V1.9

In Tabelle A. 5 werden die Einzelschritte der dynamischen Muster aus Versuchsreihe 2 beschrieben, die nicht bereits in V1 aufgezeigt werden. Die Angabe zum TSM-Bereich bezieht sich dabei auf die Rückenlehne (RL), Sitzfläche (SF) bzw. den Gesamtsitz (GS).

Versuchsreihe	Benennung	Anordnung	TSM-Bereich	Aktivierungsdauer pro Schritt	Anzahl Schritte	Einzelschritte											
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
V2	08_dynamisch_Sitz_links		SF	150	6												
	09_dynamisch_unten_rechts		RL	150	7												
	26_dynamisch_Sitz_vor		SF	150	6												
	27_dynamisch_Sitz_zurück		SF	150	6												
	28_dynamisch_runter_1		RL	150	7												
	29_dynamisch_hoch_1		RL	150	7												
	30_dynamisch_Gesamt_runter_vor_1		GS	150	11												
	31_dynamisch_Gesamt_zurück_hoch_1		GS	150	11												
	32_kumulativ_runter_2		RL	150	5												
	33_kumulativ_hoch_2		RL	150	5												
	34_kumulativ_Gesamt_runter_vor_2		GS	150	9												
	35_kumulativ_Gesamt_zurück_hoch_2		GS	150	9												
	36_dynamisch_Sitz_links_vor		SF	150	6												
	37_dynamisch_Sitz_links_zurück		SF	150	6												
	38_dynamisch_links_runter		RL	150	7												
	39_dynamisch_links_hoch		RL	150	7												

**Tabelle A. 5:** Einzelschritte der dynamischen Muster in V2

In Tabelle A. 6 erfolgt die Beschreibung der Einzelschritte für alle dynamischen Muster, die in Versuchsreihe 3 eingesetzt werden.

Versuchsreihe	Benennung	Anordnung	TSM-Bereich	Aktivierungs- dauer pro Schritt	Anzahl Schritte	Einzelschritte										
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V3	06_WARNUNG_ÜBERNEHMEN		GS	100	11											
	08_WARNUNG_ANSCHNALLEN		RL	200	7											
	10_HINWEIS_FEHLER		RL	200	5											
	11_HINWEIS_AUTONOM-FAHREN		GS	200	9											
	12_HINWEIS_ANRUF		RL	150	9											
	13_BEWEGUNG_LANGSAMER		RL	200	5											
	14_BEWEGUNG_SCHNELLER		RL	200	5											
	15_BEWEGUNG_ENTFERNEN		SF	150	6											
	16_BEWEGUNG_ANNÄHERN		SF	150	6											
	17_NAVIGATION_NACH-LINKS		RL	150	7											
	18_NAVIGATION_NACH-RECHTS		RL	150	7											
	20_NAVIGATION_WENDEN		RL	150	11											
	21_ZUSTAND_OFFEN		RL	300	5											
	22_ZUSTAND_GESCHLOSSEN		RL	300	5											

**Tabelle A. 6:** Einzelschritte der dynamischen Muster in V3

## Lebenslauf

### Persönliche Angaben:

Name: Matti Schwalk  
Geburtsdatum: 05.05.1985  
Geburtsort: Stuttgart  
Staatsangehörigkeit: deutsch

### Ausbildung:

10/2005 – 03/2012 Studium des Maschinenbaus (Abschluss: Dipl.-Ing.)  
an der Universität Stuttgart,  
Hauptfächer: Konstruktionstechnik, Umformtechnik

07/2004 Allgemeine Hochschulreife,  
Ernst-Sigle-Gymnasium Kornwestheim

### Berufserfahrung:

01/2018 – 09/2019 Mitgründer und Geschäftsführer des Dienstleistungsunternehmens *USE-Ing.* für Beratung zur nutzerzentrierten Produktentwicklung

05/2012 – 12/2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart, Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design











ISBN: 978-3-946924-10-4