



Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart

Forschungs- und Lehrgebiet
Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. T. Maier

Michael Tondera

**Wertigkeitsanalysen zur
Betätigungshaptik und -akustik
manuell-mechanischer Bedienelemente
im Pkw**

Bericht Nr. 720

Wertigkeitsanalysen zur Betätigungshaptik und -akustik manuell-mechanischer Bedienelemente im Pkw

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

vorgelegt von
Michael Tondera, M.Sc.
geboren in München

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

Tag der mündlichen Prüfung: 23.04.2024

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

2024

D 93

ISBN-13: 978-3-946924-25-8

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Entwicklung der Mercedes Benz Group AG. Allen meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen meiner Abteilung danke ich für die wertvollen Anregungen für die Unterstützung während meiner dreijährigen Tätigkeit in Sindelfingen, sowie meinen geschätzten Kolleginnen und Kollegen aus anderen Abteilungen, die mich ebenfalls tatkräftig unterstützt haben.

Die fachliche Betreuung der vorliegenden Arbeit erfolgte am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, der Universität Stuttgart. Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier danke ich ganz herzlich für das in mich gesetzte Vertrauen, die Betreuung der Arbeit und die wertvollen fachlichen Diskussionen, die einen entscheidenden Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h.c. Dieter Spath für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für das angenehme Umfeld und die sehr gute Zusammenarbeit. Besonders bedanken möchte ich mich außerdem bei Herrn Dr.-Ing. Markus Schmid, Herrn Dr.-Ing. Daniel Holder und Herrn Dr.-Ing. Matthias Fischer für den intensiven und hilfreichen wissenschaftlichen Austausch während des Promotionsvorhabens.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr.-Ing. Peter Schmid und Herrn Jonathan Kießling M.Sc. für die sorgfältige Durchsicht meiner Arbeit. Frau Suzann Adams danke ich an dieser Stelle ganz herzlich für die grammatikalische Durchsicht der Arbeit.

Mein größter Dank gilt allerdings meinen Eltern Ursula und Manfred Tondera, die mich in meiner Ausbildung und in meinem Werdegang stets bedingungslos unterstützt haben. Ich danke ihnen für ihre Motivation und ihren Rückhalt, um diese Arbeit erfolgreich fertigzustellen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	VII
Abstract.....	XII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit.....	2
1.2 Struktur der Arbeit.....	3
2 Grundlagen	5
2.1 Physiologie und Wahrnehmungsprozess.....	5
2.1.1 Tastsinn und haptische Wahrnehmung.....	5
2.1.2 Physiologie des Tastsinns	7
2.1.3 Psychophysische Beziehungen und Normzahlreihen	9
2.1.4 Der Schall und das Hören.....	11
2.1.5 Aufbau des Hörorgans und auditive Wahrnehmung	12
2.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle	14
2.2.1 Anzeige.....	15
2.2.2 Stellteil und Bedienelemente.....	17
2.2.3 Komfort- und Wertigkeitsmodelle	21
2.3 Erste Schlussfolgerungen zur Wertigkeit und Wertanmutung.....	23
2.4 Gestaltparameterübersicht mechanischer Bedienelemente.....	24
3 Stand der Technik und Forschung	26
3.1 Messung von Kraft und Drehmoment mittels Messrobotiksystem.....	26
3.2 Stand der Technik manuell-mechanischer Bedienelemente	29
3.2.1 Betätigungsart Schieben am Beispiel einer Luftdüse.....	30
3.2.2 Betätigungsart Drehen am Beispiel einer Luftdüse	34
3.2.3 Betätigungsart Drücken am Beispiel eines Ablagefaches.....	36
3.3 Relevante Forschungsarbeiten zur Betätigungshaptik.....	38
3.4 Relevante Forschungsarbeiten zur Oberflächenhaptik	43
3.5 Relevante Forschungsarbeiten zur Betätigungsakustik	46
4 Versuchsaufbau und Konkretisierung der Untersuchungsparameter.....	49
4.1 Versuchsaufbau	49
4.1.1 Wiener Testsystem – Motorische Leistungsserie.....	49
4.1.2 Anthropometrische Messung	50
4.1.3 Konzipierung und Konstruktion des Prüfstands Sitzkiste	52

4.1.4	Allgemeine Versuchsbedingungen.....	54
4.2	Konkretisierung der Untersuchungsparameter.....	56
5	Untersuchungen zur Wertigkeit der Betätigungshaptik.....	60
5.1	Versuchsreihe 1	60
5.1.1	Untersuchungsparameter und Hypothesen.....	60
5.1.1.1	Betätigungskraft F_B für Schieben und Schwenken	60
5.1.1.2	Material-Oberfläche und Form-Oberfläche	62
5.1.2	Versuchsablauf und -beschreibung.....	64
5.1.3	Stichprobe	67
5.1.4	Ergebnisse und Diskussion	69
5.1.4.1	Betätigungskraft F_B für Schieben und Schwenken.....	69
5.1.4.2	Material-Oberfläche und Form-Oberfläche	76
5.2	Versuchsreihe 2	81
5.2.1	Untersuchungsparameter und Hypothesen.....	81
5.2.2	Versuchsablauf und -beschreibung.....	83
5.2.2.1	Maximal übertragenes Drehmoment	83
5.2.2.2	Betätigungsmoment M_B beim Drehen.....	84
5.2.3	Stichprobe	85
5.2.4	Ergebnisse und Diskussion	86
5.2.4.1	Maximal übertragenes Drehmoment	87
5.2.4.2	Betätigungsmoment M_B beim Drehen.....	90
5.3	Versuchsreihe 3	96
5.3.1	Untersuchungsparameter und Hypothesen.....	96
5.3.1.1	Ausrastkraft F_A beim Schieben	96
5.3.1.2	Betätigungskraft und alternative Konzepte beim Drücken	97
5.3.2	Versuchsablauf und -beschreibung.....	99
5.3.3	Stichprobe	99
5.3.4	Ergebnisse und Diskussion	101
5.3.4.1	Ausrastkraft F_A beim Schieben	101
5.3.4.2	Betätigungskraft und alternative Konzepte beim Drücken	104
5.4	Ergebnisse der finalen Fragen – VR1 bis VR3.....	108
5.5	Übersicht der Hypothesenprüfung.....	110
6	Untersuchung zur Wertigkeit der Betätigungsakustik	112
6.1	Akustikmessungen	112
6.2	Untersuchung der auditiven Wertigkeit mittels Hörversuch.....	115
6.2.1	Versuchsablauf und -beschreibung.....	115
6.2.2	Stichprobe	117
6.2.3	Ergebnisse und Diskussion	117
6.3	Vorhersage der auditiven Wertigkeit	123

6.3.1	Regressionsanalysen mit Akustikparametern	123
6.3.1.1	Einfache lineare Regressionen	123
6.3.1.2	Multiple lineare Regressionen	126
6.3.2	Vergleich des Modells zur Vorhersage auditiver Wertigkeit	128
7	Gestaltungsempfehlungen	130
8	Zusammenfassung und Ausblick	133
	Literaturverzeichnis	137
	Anhang	146
A1	Probandeninstruktionen – Versuchsreihe 1 bis 3.....	146
A2	Fragebogen zur Demografie und Psychografie – Versuchsreihe 1 bis 3	147
A3	Messdiagramme – Versuchsreihe 1 bis 3	149
A4	Inferenzstatistische Daten – Versuchsreihe 1 bis 3	152
A5	Ergebnisse der subjektiven Beschreibung – Versuchsreihe 1 bis 3.....	159
A6	Kenngößen der Akustikuntersuchungen.....	162
A7	Ergebnis der einfachen linearen Regression beim Schließen.....	164
	Lebenslauf.....	165

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 einschließen.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
A	Anzeiger
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ANOVA	engl.: „Analysis of Variance“, Varianzanalyse
b_0	Konstante einer Geradengleichung
b_1	Steigung einer Geradengleichung
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
BTL	Bradley-Terry-Luce
CC	engl.: „Compact Car“, Kompaktwagen
cm	Zentimeter
C-SUV	engl.: „Compact Sport Utility Vehicle“, kleiner Stadtgeländewagen
dB(A)	Dezibel mit A-Bewertungsfilter
df	engl.: „degree of freedom“, Freiheitsgrade
DIN	Deutsches Institut für Normung
ebd.	ebenda
engl.	englisch
et al.	lateinisch: „et aliae“, und andere
etc.	lateinisch „et cetera“, und so weiter
f., ff.	folgende (bei Literaturangaben)
F	Teststatistik, benannt nach Ronald Fisher
FT	engl.: „Force-Torque“, Kraft-Drehmoment
F_A [N]	Austrastkraft beim Schieben [Newton]
F_B [N]	Betätigungskraft beim Schieben und Schwenken [Newton]
F_D [N]	Schaltkraft beim Drücken [Newton]
FDM	Fused Deposition Modeling
FFT	Fast Fourier Transformation

Abkürzung	Bezeichnung
FO	Form-Oberfläche
H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese
HSK	Handschuhkasten
Hz	Hertz
ΔI	Unterschiedsschwelle
I	Reizintensität
IKTD	Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
ISO	International Organization for Standardization
k	Weber-Konstante
KI	Konfidenzintervall
log	Logarithmus
kg	Kilogramm
M	Arithmetisches Mittel
max.	maximal
M [Ncm]	Drehmoment [Newtonzentimeter]
M_B [Ncm]	Drehmoment zur Betätigung beim Drehen [Newtonzentimeter]
M_{Max}	Maximal aufgebrauchtes Drehmoment der Probanden
MiKo-v	Ablagefach Mittelkonsole vorne
MiKo-h	Armablagefach Mittelkonsole
min.	minimal
MLS	Motorische Leistungsserie
mm	Millimeter
mm/s	Millimeter pro Sekunde
mm/s ²	Millimeter pro Quadratsekunde
MMS	Mensch-Maschine-System
MO	Material-Oberfläche
ms	Millisekunde

Abkürzung	Bezeichnung
n	engl.: „number“, Stichprobengröße
p	Signifikanzwert
p [Pa]	Druck [Pascal]
p_0 [μ Pa]	standardisierter Bezugsschalldruck [Mikropascal]
PA6	Polyamid 6
P_k	Punktzahl einer Lösung k im Kontext Technische Wertigkeit
φ [°]	Drehwinkel [Gradmaß]
Φ (i bzw. j)	Skalenwerte der BTL-Skala
Pkw	Personenkraftfahrzeug
PP	Polypropylen
PR	Prozentrang
r	Korrelationskoeffizient
r [mm]	Radius
R [N/mm]	Federrate
R10	Normzahlreihe, benannt nach Charles Renard
R^2	Bestimmtheitsmaß
RA	engl.: „rapid adapting“, schnell adaptierende Sensoren
S	Stellteil
s [mm]	Stellweg bzw. Schaltweg
S-Class	S-Klasse, Oberklasse Fahrzeug
SD	engl.: „Standard Deviation“, Standardabweichung
SLS	Selektives Lasersintern
SPL	engl.: „Sound Pressure Level“, Schalldruckpegel
SUV	engl.: „Sport Utility Vehicle“, Stadtgeländewagen
SA	engl.: „slow adapting“, langsam adaptierende Sensoren
t [s]	engl.: „time“, Zeit [Sekunde]
t -Wert	Teststatistik Mittelwertsvergleich
T-Wert	Teststatistik der Normwertskala

Abkürzung	Bezeichnung
U	engl.: „user“, Benutzer
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VIF	engl.: „Variable Inflation Factor“, Variabler Inflationsfaktor
VR	Versuchsreihe
vrnl	von rechts nach links
W	Wirkteil
W-Wert	Teststatistik Normalverteilung
W _t	Technische Wertigkeit
WTS	Wiener Test System
z	Teststatistik

Abstract

Manufacturers, driven by intensifying international competition, are increasing their efforts to design products that deliver a high customer value impression. A special approach to convey perceived quality is through human-product interaction. Notably, control elements should be designed in a way that ensures comfortable operation and imparts a premium feel. In addition to visual aspects, the haptic and acoustic elements, in particular, offer a means of conveying quality. Distinguishing itself from many other studies in this field, the present work focuses on investigating the haptic and acoustic qualities of real, manually operated mechanical control elements.

The aim of this study is to plan, conduct, and analyse user experiments in order to obtain technical human factors design recommendations. While the perception of value is dependent on various factors, such as user expectations, emotional state, psychographics, and brand preferences, this study is centred on methodically manipulating measurable technical parameters. The aim is to identify their optimized ranges to enhance the highest value perception. At the outset, various comfort and perceived quality models are analysed, forming the basis for establishing own working definitions. Additionally, an overview of design parameters is initially developed, based on JANNY [2018]. Furthermore, the investigations into haptics are conducted separately from those concerning acoustics.

For the haptics experiments, participants are presented with real mechanical components for actuation and assessment. Additionally, a specially constructed test rig, resembling a vehicle cockpit, is available within the facility. This rig replicates the posture and arm movements associated with driving. Figure 1 illustrates the experimental setup, displaying both the testing environment and a participant engaging in the assessment process.

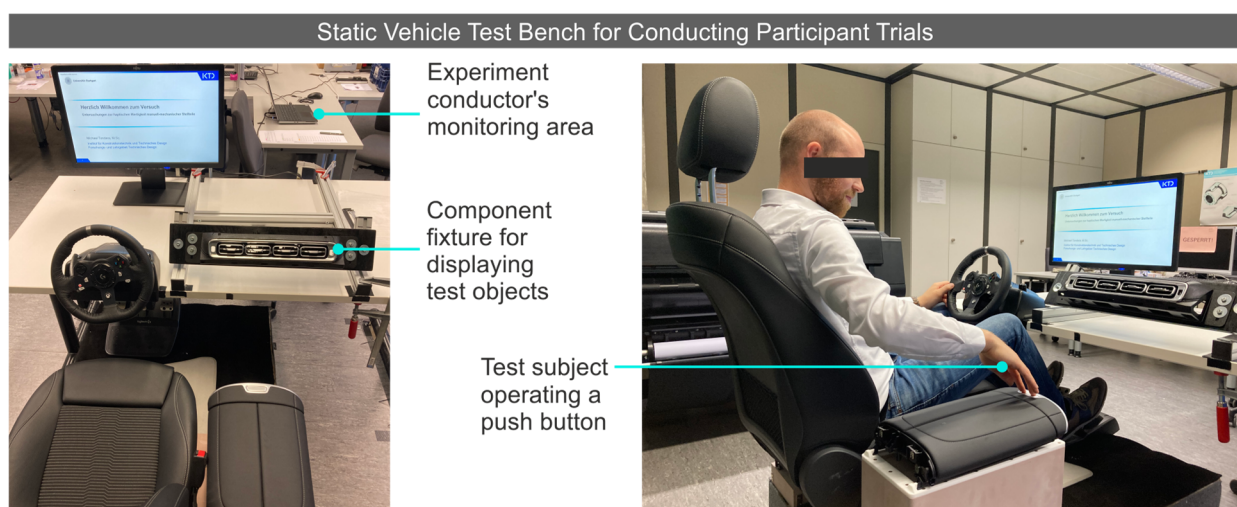


Figure 1: Experimental setup employed for the haptic studies

For each of the conducted experimental series, the components were pre-manipulated with a focus on the specific haptic attribute under examination. The objective measurement of manipulation and the extraction of technical parameters are facilitated by means of a robotic measurement system. The thesis introduces the robotic measurement system responsible for actuating the control elements and consequently capturing and visualizing the force-displacement or torque-angle profiles (see Chapter 3).

All other aspects, including design, were identical and components were sourced from a single batch. The studies are planned and categorized based on the user's type of movement (e.g. rotation), examining various haptic features (e.g. actuation torque). The results are intended to have general applicability and transferability across different user movement types (see Table 1).

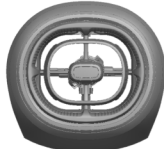
	Sliding	Swivel	Rotating	Pushing
<i>component/ test object</i>				
<i>grasp</i>	3-finger pinch grip		3-finger pinch grip	2-finger contact grip
<i>force/ torque</i>	Test Series 1 Actuation Force [N]	Test Series 1 Actuation Force [N]	Test Series 2 Torque [Ncm] x Grip Size r [mm]	Test Series 3 Switching Force N and alternative mechanisms
<i>detent force</i>	Test Series 3 Detent Force [N]			
<i>surface</i>	Test Series 1 Surface form Surface material 			

Table 1: Contents and Categorization of Haptics Investigations

A total of three sets of haptic experiments were undertaken, each engaging 30 participants, resulting in a multitude of findings and insights (see Chapter 5). Regarding sliding and swivelling, lower actuation forces are generally favoured, with a suggested specification of 1.3 N. Tolerances also warrant consideration, thus this study presents not only optimal outcomes but also favourable value ranges. Moreover, it clarifies the point at which the perception of quality experiences a notable decline.

In the context of rotation, the pairing of an 11 mm radius grip with 2.2 Ncm torque resulted in the most elevated perception of quality. The factors of grip size and torque demonstrated an interdependence. Specifically unfavourable pairings, such as a small grip coupled with high torque, led to substantial declines in both perceived quality and ergonomics. By measuring the participants' maximum torque capacity beforehand, an additional observation highlighted that the ratio of maximum torque to preferred torque remains consistently proportional across all grip sizes. The detent forces during sliding were also examined, revealing that an additional increment of 0.5 N in detent resistance to the actuation force is perceived as optimal. This corresponds to a force increase of 38 %.

Given that haptics also encompass surfaces, an assortment of materials and shapes were examined to ascertain preferences (see Chapter 5.3). Plain and smooth high-gloss surfaces are perceived as highly valuable. Notably, a metallic grip did not lead to an increase in perceived value. In terms of form-surface combinations, a specific pattern emerged as both high in perceived quality and in ergonomics. Promising surface prototypes, such as a satin-matte finish, also proved to be effective.

For the acoustic investigations, recordings of opening and closing sounds of various control elements were initially captured within the interiors of different vehicles. This approach was innovative, with the test conductor seated in the driver's seat to perform the actuation. Simultaneously, the recording took place from that position using a binaural headset microphone worn by the test conductor. Following the editing of audio signals, technical and psychoacoustic signal parameters were extracted. The trimmed audio signals also laid the basis for subsequent listening tests. These experiments took place in an acoustic studio, where participants were presented with two signals in each trial for evaluation. The paired comparison test results offer insights into subjective preference strengths and rankings. The objective signal parameters of the respective best control elements in their respective categories can thus be documented. By utilizing regression models, a formula for predicting auditory quality in opening sounds was derived. In this instance, the signal parameters of loudness and roughness function as predictors, allowing for the projection of auditory quality with a high degree of accuracy.

A compilation of design recommendations (see Chapter 7), along with a summary of the thesis and an outlook on possible future research (see Chapter 8) will be provided in the concluding section. Ultimately, costumer quality is profoundly influenced by the perception and the perceived quality. This aspect will continue to hold immense importance for consumer products. Furthermore, in the context of the increasing automation and electrification of powertrains, considerations such as actuation frequency and sound perception might gain further prominence.

1 Einleitung

Ziel der Gestaltung technischer Produkte aus Sicht der Ergonomie ist es, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren [DIN EN ISO 26800 2011]. Produkthersteller im Premium-Segment legen besonderen Wert auf eine hohe Qualitätswahrnehmung ihrer Produkte durch den Kunden. Im Fall von Fahrzeuginnenräumen beeinflusst nicht nur das Aussehen, sondern insbesondere die Akustik und Haptik die Wahrnehmung der Wertigkeit des Fahrzeugs [BUBB ET AL. 2015b, S. 285]. Im Interior ist eine Steigerung der Wertigkeit beispielsweise durch den Einsatz hochwertiger Materialien und Oberflächen zu erreichen, was allerdings maßgeblich mit höheren Kosten und höherem Aufwand zusammenhängt. Demgegenüber ist speziell der Bedienkomfort mit Blick auf das Gefallen von Bedeutung und hat vor der eigentlichen Nutzung bereits Einfluss auf die Kaufentscheidung [BUBB 2003, S. 6]. Um einen kundenrelevanten Eindruck von Wertigkeit während der Betätigung von Bedienelementen zu erzeugen, sind nutzerpräferierte akustische und haptische Eigenschaften erforderlich.

In der Bedürfnispyramide nach MASLOW [1943] hat das unterste Merkmal stets die größte Wichtigkeit. Erst durch vollumfängliche Erfüllung, beispielsweise der einwandfreien Funktionalität (vgl. Bild 1.1), wird die nächste Stufe relevant. Wie in Bild 1.1 dargestellt, haben BUBB [1995] und GLOHR ET AL. [2015] auf Basis von MASLOW [1943] eigene Modelle an sogenannten Komfort- und Wertigkeitspyramiden im Kontext Pkw und Bedienelemente entwickelt. Sind bei Bedienelementen in Fahrzeuginnenräumen ergonomische Anforderungen wie Funktionalität und eindeutige Rückmeldung zufriedenstellend erfüllt, ist eine weitere Komfort- und Wertigkeitssteigerung nur dann zu erreichen, wenn die technische Gestaltung des Produkts den Wertigkeits-Eindruck als Ergebnis des Gebrauchs durch die Nutzergruppe berücksichtigt. Basis-Merkmale wie Funktionalität und Rückmeldung betrachten Kunden hingegen oft als selbstverständlich [SAUERWEIN 2020, S. 28].

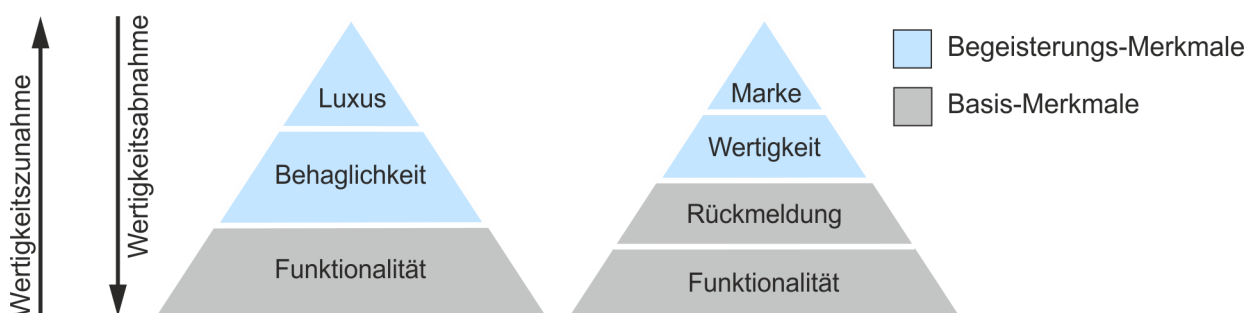


Bild 1.1: Komfortpyramide links nach [BUBB 1995] und Wertigkeitspyramide rechts nach [GLOHR ET AL. 2015] sowie die Kategorisierung der Merkmale nach dem Kano-Modell der Kundenzufriedenheit [SAUERWEIN 2020, S. 28]

Die Treiber dieser Art der nutzeroptimierten Produktgestaltung sind unter anderem ein gesteigertes Bedürfnis nach Komfort [PREUSCHOFF 2010, S. 27], der Wunsch der Hersteller nach Abgrenzung zum internationalen Wettbewerb [THOMÉ 2010, S. 41] oder die explizite Positionierung als Luxus-Marke [MERCEDES-BENZ 2022]. Überdies ist es für den Produktentwicklungsprozess von Bedeutung, Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen technischen Parametern und der menschlichen Wahrnehmung in Form von Gestaltungsrichtlinien zu verfügen. Dies ermöglicht es, Konzepte frühzeitig auf die Anforderungen der Nutzer anzupassen oder ergonomische Spezifikationen in die Entwicklungsaufträge einzubeziehen. Durch die Verfügbarkeit solcher Gestaltungsempfehlungen für ein Mensch-Maschine-System entsteht ein zusätzlicher Wettbewerbsvorteil.

Im Folgenden werden Zielsetzung und Abgrenzung (vgl. Kapitel 1.1) dieser Arbeit festgelegt. Danach werden die Struktur der Arbeit und eine Übersicht über die Inhalte in Kapitel 1.2 vorgestellt.

1.1 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Wahrnehmung und Bewertung von Bedienelementen im Pkw durch den Menschen. Ziel ist die Quantifizierung und Eingrenzung günstiger, technischer Parameter bezüglich Haptik und Akustik durch experimentelle Untersuchungen mit Probanden. Obschon sowohl die Marke und Kultur (vgl. [GLOHR 2018]), als auch die Erwartung und Befindlichkeit des Nutzers (vgl. [BUBB 1995]) Einfluss auf die Wertigkeitsempfindung haben, wird in dieser Arbeit der kausale Zusammenhang von systematischer Manipulation technischer Kenngrößen und dem subjektiven Gesamteindruck untersucht. Diese Arbeit zielt darauf ab, technische Kenngrößen für Betätigungshaptik und -akustik von Bedienelementen im Pkw quantitativ zu bestimmen. Dazu werden objektive Messungen mithilfe von Akustikmessungen, Kraft-Weg- und Drehmoment-Drehwinkel-Verläufen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen Gestaltungsempfehlungen liefern, um technische Parameter zu identifizieren, die einen positiven Einfluss auf das subjektive Wertigkeitserlebnis des Kunden haben, beispielsweise für Betätigungsarten wie Drehen und Drücken.

Obwohl sich eine zunehmende Verbreitung virtueller Bedienmöglichkeiten wie berührungsempfindliche Bildschirme oder Gestensteuerung abzeichnet, konzentriert sich diese Arbeit ausschließlich auf die Betätigung handbetätigter mechanischer Bedienelemente wie Ablagefächer oder Luftdüsen. Mechanische Bedienelemente gelten aufgrund ihrer direkten Rückkopplungsfunktionen und unmittelbaren Wirkung als zuverlässiger und präziser [TONDERA ET AL. 2021a]. Zusätzlich weisen die ermittelten technischen Parameter aufgrund ihrer Abhängigkeit von Bewegungs- und Greifart ein Transferpotential auf, was

eine Anwendung außerhalb des Automobilbereichs ermöglicht. Der Fokus auf den Untersuchungsgegenstand der direkten, mechanischen Bedienelemente stellt zugleich die Abgrenzung zu vielfachen Untersuchungen elektromechanischer Bedienelemente dar, wie dem Dreh-Drück-Schiebe-Steller (vgl. [ZEILINGER 2005], [REISINGER 2009], [ANGUELOV 2009], [HAMPEL 2011], [PAULIG ET AL. 2011], [KÜHNER 2013], [GLOHR 2018], [WINTERHOLLER 2019]). Bei der Untersuchung von translatorischen Bedienelementen mit der Bewegungsart Drücken wurden in jüngerer Vergangenheit ebenfalls überwiegend elektromechanische Taster mit Mikroschalter betrachtet (vgl. [KOSAKA & WATANABE 1996], [DOERRER 2004], [REISINGER 2009], [BURNETT & IRUNE 2009], [GLOHR 2018]).

Neben dem Hauptziel, Gestaltungsempfehlungen abzuleiten, stellt ein Schwerpunkt der Arbeit das Erfassen von Messgrößen mithilfe eines Robotiksystems dar. Eine präzise Beschreibung der untersuchten Reize ist unerlässlich, um valide Schlüsse über einzelne Kenngrößen zu ziehen. Zur Sicherstellung der externen Validität gehört der Aufbau eines Prüfstands, der das Maßkonzept eines Pkws abbildet. Dadurch wird die Lage und Anordnung von Bedienelementen und die daraus resultierende Bedienhaltung realitätsgetreu nachgebildet.

1.2 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Eine zusammenfassende Darstellung der Struktur der Arbeit sowie deren Kerninhalte zeigt Bild 1.2.

Kapitel 2 beginnt mit einer Einführung in die theoretischen Grundlagen menschlicher Wahrnehmungsprozesse und der Mensch-Maschine-Interaktion. In Kapitel 2.2.3 werden auch die Komfort- und Wertigkeitsmodelle verschiedener Autoren untersucht. Darauf aufbauend folgen erste eigene Schlussfolgerungen, um die Defizite in der Arbeitsdefinitionen von Wertigkeit und Wertanmutung im Kontext der technischen Produktgestaltung zu schließen (vgl. Kapitel 2.3). Das Kapitel endet mit einer Übersicht an Gestaltparametern mechanischer Bedienelemente (vgl. Kapitel 2.4). Kapitel 3 beinhaltet eine Erläuterung und Zusammenfassung von Messungen an Bauteilen mittels eines 6-Achs-Kraft-Moment-Sensors sowie relevanter wissenschaftlicher Forschungsergebnisse in Bezug auf Betätigungshaptik und -akustik.

Kapitel 4 befasst sich mit dem Versuchsaufbau für die Studien zur Haptik. Hierbei wird insbesondere die Konzipierung und der Aufbau des Prüfstands „Sitzkiste“ beschrieben (vgl. Kapitel 4.1.3). Außerdem folgen in Kapitel 4.2 eine Eingrenzung der Untersuchungsparameter und einer Übersicht über die verwendeten Versuchsobjekte in den jeweiligen Versuchsreihen.

Kapitel 5 beinhaltet die drei Hauptversuchsreihen zur Untersuchung der Haptik, die nach verschiedenen Bewegungsarten gegliedert sind. Versuchsreihe 1 (vgl. Kapitel 5.1) untersucht in einem ersten Teil die Betätigungskraft beim Schieben und Schwenken. Im zweiten Teil werden zusätzlich unterschiedliche Material- und Form-Oberflächen von Koppungsflächen am Griff untersucht. Versuchsreihe 2 (vgl. Kapitel 5.2) untersucht das Drehen mit kombinierten Faktorstufen aus Drehmoment und Griffgröße. Versuchsreihe 3 (vgl. Kapitel 5.3) schließt die Haptik-Untersuchungen mit der Untersuchung von Rastkräften sowie dem translatorischen Drücken von Tastern.

Kapitel 6 befasst sich mit dem Aufbau des Prüfstands und der Durchführung von Akustikaufnahmen in Realfahrzeugen. Mit Hilfe dieser Audioaufnahmen ist es möglich Hörversuche durchzuführen (vgl. Kapitel 6.2). Durch den Vergleich der Kenngrößen aus den Akustikaufnahmen und den subjektiven Bewertungen der Hörversuche erfolgt die Modellierung der auditiven Wertigkeit in Kapitel 6.3.

Kapitel 7 stellt anschließend zusammenfassend Gestaltungsempfehlungen vor. Die Arbeit schließt ab mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsmöglichkeiten in Kapitel 8.

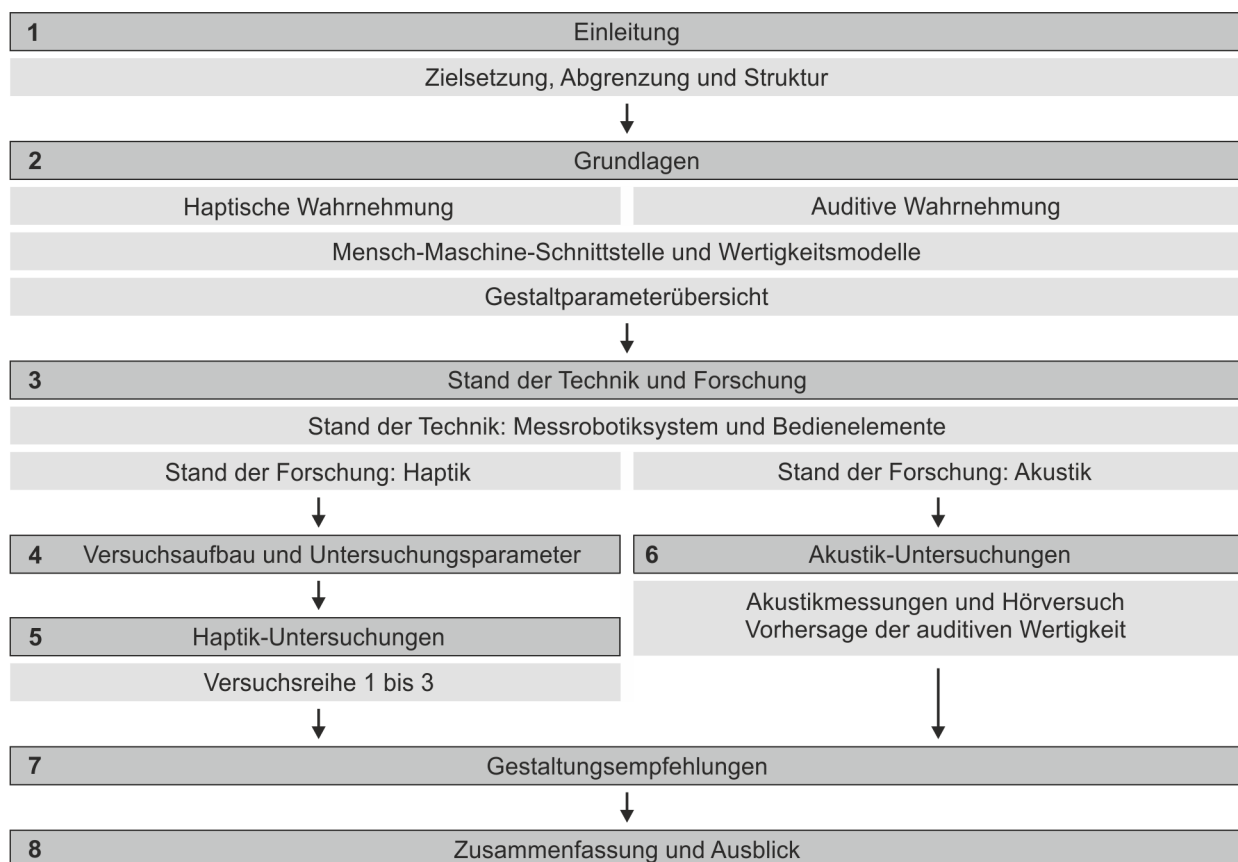


Bild 1.2: Struktur der vorliegenden Arbeit

2 Grundlagen

Zum besseren Verständnis dieser Arbeit folgen in diesem Kapitel Grundlagen zur Interaktion von Mensch und Maschine. Dies beinhaltet die relevanten menschlichen Wahrnehmungsprozesse, wie auch wesentliche Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion. Zusammenfassend zeigt ein Mensch-Maschine-Basischema den Sachverhalt. Es folgen Definitionen für Wertigkeit und Wertanmutung im Kontext technischer Produktgestaltung, die als Grundlage dieser Arbeit dienen sollen. Abschließend wird eine Übersicht an Gestaltparametern mit Einfluss auf Betätigungshaptik und -akustik gezeigt.

2.1 Physiologie und Wahrnehmungsprozess

Nach GOLDSTEIN [2011] kann der Wahrnehmungsprozess als ein sich ständig verändernder und wiederholender Kreislauf verstanden werden. In diesem Kreislauf kann ein verfügbarer beziehungsweise beachteter Reiz als ein Stimulus Rezeptoren aktivieren und zum sogenannten „Feuern“ bringen. Rezeptoren sind Nervenendigungen, die Umweltreize wie Licht, Schall oder Druck in elektrische Signale umwandeln. Die Transformation einer Energieform in ein elektrisches Signal wird Transduktion genannt. Auf die Transduktion folgt im Kreislauf die Weiterleitung jener Signale anhand neuronaler Bahnen zum Gehirn sowie innerhalb des Gehirns. Hierbei kommt es zur vielfältigen neuronalen Verarbeitung. Folglich ist Wahrnehmung die bewusste sensorische Sinneserfahrung und tritt auf, wenn beispielsweise Schall nach einer Transduktion sowie neuronaler Verarbeitung in der Erfahrung des Hörens resultiert. Die Fähigkeit des Zusammenfügens und des Einordnens der Wahrnehmungsinhalte wird als Erkennen beschrieben. Die Unfähigkeit wird (visuelle) Agnosie genannt. Betroffene können einzelne Komponenten eines Objekts wahrnehmen, ohne jedoch selbiges zu identifizieren. Es folgen das Handeln, also die Reaktion und das Verhalten des Menschen in Abhängigkeit von dessen Wissen. Mit dem nächsten verfügbaren Reiz beginnt der Kreislauf - stets ungleich - von vorne. Wahrnehmung ist folglich ein komplexer und dynamischer Prozess und mehr als die bloße Erregung von Sinnesnerven. [GOLDSTEIN 2011, S. 3-7]

2.1.1 Tastsinn und haptische Wahrnehmung

Im Wörterbuch Design [FRIEDRICH 2008] wird der Begriff *Haptik* definiert als die Lehre vom Tastsinn (griechisch *haptikòs* bedeutet „greifbar“). FRIEDRICH [2008, S. 187] unterscheidet feingliedriger einen eng gefassten Haptikbegriff, der die taktile Wahrnehmung (lateinisch *tangere* bedeutet „berühren“) im Sinne der Berührung von Oberflächen umfasst sowie einen weit gefassten Haptikbegriff, der sowohl taktile als auch kinästhetische

Wahrnehmung beinhaltet (griechisch *kinesis* bedeutet „Bewegung“ und *aisthesis* „Wahrnehmung“). Kinästhesie beschreibt die Fähigkeit der Bewegungsempfindung, -kontrolle und -steuerung des Körpers [FRIEDRICH 2008, S. 187]. Die beiden Wahrnehmungsinhalte des Tastsinns sind zur weiteren Erläuterung in Bild 2.1 dargestellt.

GRUNWALD [2001, S. 4] beschreibt den Tastsinn als *„jede Form der Tastwahrnehmung, unabhängig ob die Stimulation aktiv oder passiv erfolgt und unabhängig ob diese an der Haut, den Gelenken, Sehnen oder Muskeln hervorgerufen wird“*. Er unterscheidet den Tastsinn ebenfalls die taktile Wahrnehmung als Folge einer passiven Stimulation der Haut (vgl. Kapitel 2.1.2) und die haptische Wahrnehmung als Folge eines aktiven Explorationsprozesses [GRUNWALD 2001, S. 11]. Taktile Wahrnehmung entsteht somit durch die Berührung der Haut mit einem Gegenstand ohne Eigenbewegung des Körpers. Bei haptischer Wahrnehmung findet eine Bewegung statt und beinhaltet neben der Reizinformation der Hautsinne zusätzliche kinästhetische Empfindungen als Folge der Motorik des Körpers wie beispielsweise Lage im Raum, Widerstandskraft oder Gelenkwinkel [GRUNWALD 2001, S. 4]. Das Ertasten einer Oberfläche wie auch die Betätigung eines Mechanismus betrifft also die Haptik. Diese Einteilung der Haptik wird als Begriffsverständnis dieser Arbeit angenommen und ist in Bild 2.1 veranschaulicht.

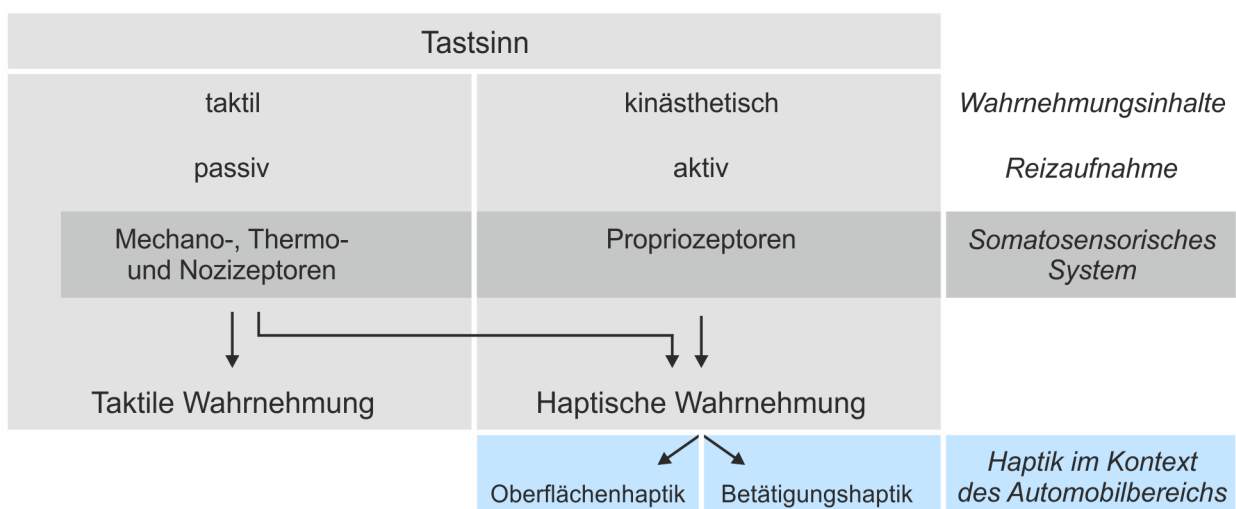


Bild 2.1: Taxonomie des Tastsinns; eigene Darstellung in Anlehnung an [GRUNWALD 2001, S. 11] und [BUBB ET AL. 2015b, S. 285]

Jede haptische Wahrnehmung impliziert einen taktilen Wahrnehmungsprozess [HAMPEL 2011, S. 9], weshalb die Betätigung eines Bedienelements folglich immer einem haptischen Wahrnehmungsprozess unterliegt. HATZFELD & KERN [2023, S. 76] verstehen Haptik ebenfalls als Integration von taktiler Wahrnehmung und Kinästhesie. Nach den Autoren ist die Haptik wesentlich beim Ertasten und Erkennen von unbekannten Objekten, inklusive der Beurteilung von deren Zweckmäßigkeit [HATZFELD & KERN 2023, S. 76].

Nach GLOHR [2018, S. 7] wird im Kontext des Automobilbereiches eine Differenzierung in Oberflächenhaptik und Betätigungshaptik vorgenommen. Die Oberflächenhaptik ist abhängig von Materialeigenschaften und der Form-Oberfläche. REISINGER [2009, S. 4] führt an, dass Oberflächenhaptik Material- und Qualitätseigenschaften von Oberflächen vermitteln. Ergänzend hierzu kann durch gezieltes Design der Oberflächenhaptik auch ein ergonomischer Vorteil erzielt werden, beispielsweise durch verbesserten Reibschluss während einer Betätigung.

Betätigungshaptik bezieht sich auf das haptische Feedback einer Betätigung [REISINGER 2009, S. 4]. „Die Betätigungshaptik selbst ist wesentlich charakterisiert durch den Kraft-Weg-Verlauf“ [BUBB ET AL. 2015b, S. 286]. Im Sinne haptischer Anzeigen (vgl. Kapitel 2.2.1) kann Betätigungshaptik gezielt zum Zweck der Informationsvermittlung genutzt werden, beispielsweise wenn eine Raste eine Mittelstellung kennzeichnet. Als Schlussfolgerung lässt sich festhalten, dass sowohl das Ertasten einer Oberfläche als auch die mechanische Rückkopplung bei der Betätigung einen vielversprechenden Ansatz bieten, um durch das Design der Haptik Wertigkeit zu vermitteln.

2.1.2 Physiologie des Tastsinns

Im Gegensatz zu anderen Sinneswahrnehmungen ist für die haptische Wahrnehmung die Integration multipler Informationen aus unterschiedlichen Körperregionen und verschiedenen Rezeptorsystemen erforderlich [GOLDSTEIN 2011, S. 13].

Das sensomotorische System ist eine Notwendigkeit der haptischen Wahrnehmung, da durch die Regelung und Steuerung der *Körpermotorik* die aktive Handlung möglich wird. Die neurophysiologische Grundlage der *Sinnesfunktion* der haptischen Wahrnehmung ist das somatosensorische System und dessen fünf Gruppen an Sensoren [TREEDE & BAUMGÄRTNER 2020, S. 644]:

- Mechanorezeption: Oberflächensensibilität, dient der Objekterkennung,
- Propriozeption: Tiefensensibilität, Wahrnehmung von Kraft und Gelenkstellung,
- Thermorezeption: Information über die Umgebungstemperatur,
- Nozizeption: Schmerzwahrnehmung, warnt vor Verletzungen,
- Viszerozeption: dient zahlreichen Regelkreisen der inneren Organe.

Nach BIRBAUMER & SCHMIDT [2006, S. 322] ist insbesondere die Mechanorezeption des Organs Haut für den Tastsinn wesentlich. Unterschiedliche Typen an Mechanorezeptoren kommen in unterschiedlichen Hautschichten vor (vgl. Tabelle 2.1). Die vier Mechanorezeptortypen können nach TREEDE & BAUMGÄRTNER [2020, S. 657] funktionell anhand der zwei Eigenschaften der Adaptionsgeschwindigkeit und der Größe des rezeptiven Feldes unterschieden werden:

- „*Slow adapting*“ SA1-Rezeptoren (vgl. Tabelle 2.1) adaptieren *langsam* und können so neben dem Druck auch die Dauer des Druckreizes wahrnehmen. Erst bei Beendigung des Reizes endet ihre Aktivität. Sie besitzen *kleine* rezeptive Felder und ermöglichen so das Erkennen von Formdetails eines Tastobjekts.
- SA2-Rezeptoren adaptieren ebenfalls *langsam*, haben jedoch ein *großes* rezeptives Feld und reagieren insbesondere auf tangentielle Zugspannung der Haut.
- „*Rapid adapting*“ RA1-Rezeptoren adaptieren *schnell* und besitzen *kleine* rezeptive Felder. Sie antworten nur bei bewegten Reizen bzw. einer Druckänderung.
- RA2-Rezeptoren adaptieren *schnell* und besitzen *große* rezeptive Felder. Sie reagieren ausschließlich auf gewisse zeitliche Änderungsraten einer Bewegung wie beispielsweise bei Vibration.

Zusammenfassend beschreibt KÜHNER [2013, S. 22f.] das Antwortverhalten der Mechanorezeptoren als eine Funktion der Frequenz und der Amplitude (Intensität) der Hautstimulation. Die jeweiligen schnell und langsam adaptierenden Rezeptorzellen sowie deren primäre Reizaktivierung zeigt nachfolgend Tabelle 2.1 in der Übersicht:

	Rezeptor	Name	Gewebe	Reiz	Wahrnehmung
taktil	Mechano	Merkel (SA1)	Lederhaut	Vertikaler Druck	Druck
		Meissner (RA1)	Ober-/Lederhaut	Druckveränderung	Berührung
		Ruffini (SA2)	Lederhaut	Laterale Zugspannung	Dehnung
		Pacini (RA2)	Unterhautfettgewebe	Beschleunigung	Vibration
	Nozi	Nozizeptoren	Haut, Sehnen, Muskel, Gelenk, etc.	Chemikalien, Druck, Kälte, Hitze	Schmerz
	Thermo	Warm-Sensor	unterschiedliche Tiefen der Haut	Temperatur 30-45°C	Wärme
		Kalt-Sensor		Temperatur 10-35°C	Kälte
kinästhetisch	Proprio	Muskelspindeln	Muskel	Muskeldehnung	Kraft
		Golgi-Sehnenorgan	Übergang von Muskel in die Sehne	Kontraktion	Kraft
		Gelenkrezeptor	Gelenkkapsel	Winkel/Weg	Position

Tabelle 2.1: Zusammenhang von Rezeptor, Reiz und haptischer Wahrnehmung [GOLDSTEIN 2011, S. 336f.], [TREEDE & BAUMGÄRTNER 2020, S. 655-662], [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 210-212]

Das Leistungsvermögen der Haut wird durch diverse Empfindungsschwellen für mechanische Reize deutlich: Bereits eine Hauteindellung von 0,01 mm kann eine Berührungsempfindung auslösen [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 322]. Die Fingernägel übernehmen

dabei als Widerlager eine wichtige Funktion für die Tastempfindlichkeit der Finger [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 209]. Vibrationen von 150-300 Hz können bereits bei einer Amplitude von 1 μm bewusst werden [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 323].

Die Dichte der Sensorzellen und folglich die Sensibilität der Haut sind allerdings nicht gleichmäßig verteilt. Das räumliche Auflösungsvermögen kann durch die simultane Raumschwelle, auch Zweipunktschwelle genannt, quantitativ ermittelt werden. Hierzu wird der kleinste Abstand gemessen, bei dem zwei gleichzeitig gesetzte Reize - in der Regel mit Hilfe von zwei Zirkelspitzen - noch getrennt wahrgenommen werden. Die simultane Raumschwelle auf einer Fingerspitze beträgt etwa 2,3 mm und auf dem Handrücken etwa 31,6 mm. [SCHMID & MAIER 2017, S. 66]

Nach Transduktion (vgl. Kapitel 2.1) der Reize an den Rezeptorzellen werden die Signale im somatosensorischen System über zwei Nervenbahnen in das Rückenmark und den Hirnstamm geleitet. Über den sensorischen Thalamus erreichen die Signale den primären und sekundären somatosensorischen Kortex der Großhirnrinde zur zentralen Verarbeitung der haptischen Wahrnehmung. [TREEDE & BAUMGÄRTNER 2020, S. 653]

Die Dichte des Sensorsystems ist auf der Hirnrinde räumlich repräsentiert. Die für den Tastsinn wichtigen Körperareale wie bspw. die Fingerspitzen nehmen ein überproportionales Areal im Kortexareal ein. Durch Übung können Raumschwellen auch verbessert, also verkleinert werden. Dabei kommt es zu einer Vergrößerung des zugehörigen Hirnareals, während die peripheren Empfindungsschwellen unverändert bleiben. Grundlage hierfür ist die Neuroplastizität des Gehirns. [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006, S. 312, 323f.]

2.1.3 Psychophysische Beziehungen und Normzahlreihen

Die zuvor in Kapitel 2.1.2 beschriebene Messung zur Bestimmung der simultanen Raumschwelle stellt eine klassische Methode der *Psychophysik* dar. FECHNER [1889, S. 8] beschreibt Psychophysik als die „*Lehre von den functionellen [sic!] oder Abhängigkeitsbeziehungen zwischen Körper und Seele, [...]*“. GOLDSTEIN [2011, S. 13] beschreibt Psychophysik auf Fechner beziehend als eine „*Anzahl an quantitativen Methoden zur Messung der Beziehung zwischen Stimulus und Wahrnehmung*“.

Ernst Weber befasste sich im 19. Jahrhundert mit der Bestimmung von Unterschiedsschwellen, also dem Intensitätsunterschied, den ein Reiz aufweisen muss, um als verschieden von einem ersten Reiz wahrgenommen zu werden. Eine grundlegende Gesetzmäßigkeit der Psychophysik stellt das Gesetz von Weber dar, wonach das Verhältnis von Unterschiedsschwelle zu Ausgangsreiz konstant ist. Aus diesem Zusammenhang folgt, dass, je größer eine Reizintensität I ist, sich umso mehr ein zweiter Reiz absolut gesehen

unterscheiden muss, um als verschieden wahrgenommen zu werden. Die Weber-Konstante k berechnet sich aus dem Quotienten der Unterschiedsschwelle ΔI und dem Reiz I für die jeweilige Intensitätsdimension. [HAGENDORF ET AL. 2011, S. 49]

$$k = \frac{\Delta I}{I} \quad (2.1)$$

Weber führte beispielsweise Versuche durch, in denen Probanden je ein Gewicht in beide Hände nehmen sollten. Er entdeckte, dass ein Gewicht gegenüber dem anderen konstant 1/30-mal schwerer oder leichter sein muss, damit ein Proband das Gewicht als unterschiedlich wahrnimmt [HAGENDORF ET AL. 2011, S. 49]. Das bedeutet, dass, wenn man ein Gewicht von 1 kg in der Hand hält, es ausreicht, 35 g aufzuschlagen. Wenn man jedoch 2 kg in einer Hand hält, sind 35 g keine ausreichende Erhöhung der Reizintensität, um eine Unterschiedsempfindung auszulösen. Es ergibt sich ein lineares Verhältnis von Unterschiedsschwelle zu präsentiertem Reiz.

Konstante Verhältnisse im Zuwachs kommen auch bei Normzahlreihen vor (vgl. Tabelle 2.2) [DIN 323-2 1974]. Bei der geometrischen Reihe R10 folgt nach zehn Gliedern in der fortschreitenden Reihe das Zehnfache des Ausgangswertes. Das Verhältnis von einem Glied der Reihe zum nächsten ist konstant. Für die Normzahlreihe R10 liegt der Skalierungsfaktor, auch Stufensprung genannt, folglich bei 1,25 (vgl. Tabelle 2.2). Die Normzahlreihen eignen sich zur Skalierung von Reizintensitäten haptischer Merkmale wie beispielsweise der Betätigungskraft F [N]. In der Versuchsplanung und der Skalierung technischer Kenngrößen wird so dem psychophysischen und konstanten Zusammenhang aus Reizintensität und Unterschiedsschwelle entsprochen. Die vorliegende Arbeit stellt daher auf abstrahierter Ebene eine psychophysische Arbeit zu Reizpräferenzen auf Basis von Reizunterschieden dar.

	Geometrische Reihe				
Ordnungs- nummer N	R5 $\sqrt[5]{10} \approx 1,60$	R10 $\sqrt[10]{10} \approx 1,25$	R20 $\sqrt[20]{10} \approx 1,12$	R40 $\sqrt[40]{10} \approx 1,06$	Genauwerte
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
2				1,06	1,0593
3			1,12	1,12	1,1220
4				1,18	1,1885
5		1,25	1,25	1,25	1,2589
6				1,32	1,3353
7			1,40	1,40	1,4125
8				1,50	1,4962
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabelle 2.2: Exemplarische Normzahlreihen nach [DIN 323-1 1974]

Die spezifische Weber-Konstante, wie auch die Psychophysik im Allgemeinen, können auf weitere Sinneswahrnehmungen angewendet werden. HAGENDORF ET AL. [2011, S. 50] berichtet beispielsweise Weber-Konstanten für Lautstärke (0,048), Helligkeit (0,079) und Salzgeschmack (0,083). Um beispielsweise das Hörempfinden abzubilden, werden eigens psychoakustische Kenngrößen definiert, die eine quantitative Rückführung auditiver Empfindungen auf den physikalischen Reiz zulassen (vgl. Kapitel 2.1.5).

2.1.4 Der Schall und das Hören

Der Reiz des Gehörsinns ist der Schall. „*Im täglichen Leben tritt Schall als Druckschwankungen in der Luft auf*“ [MOSER & ZENNER 2020, S. 686] (vgl. Bild 2.2). Auch im Wasser oder einem anderen Medium kann Schall durch Druckänderungen, ausgelöst durch die Bewegung eines Objekts, entstehen [GOLDSTEIN 2011, S. 259].

Ein Schallereignis kann anhand der Frequenz, also der Anzahl der Schallschwingungen pro Sekunde, beschrieben werden und wird in Hertz (Hz) angegeben [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 191]. „*Subjektiv besteht ein Zusammenhang zwischen der Frequenz und der empfundenen Tonhöhe*“ [MOSER & ZENNER 2020, S. 686]. Der sogenannte Hörbereich eines hörgesunden Menschen liegt in einem Frequenzband zwischen etwa 20 und 20.000 Hz [GOLDSTEIN 2011, S. 262]. Die Frequenzunterschiedsschwelle ist derart niedrig, dass bei 1000 Hz Änderungen um 0,3 %, also 3 Hz, wahrgenommen werden können [MOSER & ZENNER 2020, S. 696].

Neben der Frequenz ist außerdem ein Schallereignis wesentlich durch die Amplitude des Schalldrucks charakterisiert (vgl. Bild 2.2). Der Druck p wird nach konventioneller Weise in Pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$) gemessen [MOSER & ZENNER 2020, S. 686]. Bei 1000 Hz beträgt die Hörschwelle $3,2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, und die Schmerzgrenze ist bei einem Schalldruck von etwa 63 Pa erreicht [MOSER & ZENNER 2020, S. 686]. Wie Bild 2.2 zeigt, geht eine Zunahme der Amplitude mit einer erhöhten Empfindung (perzeptuell) der *Lautheit* einher.

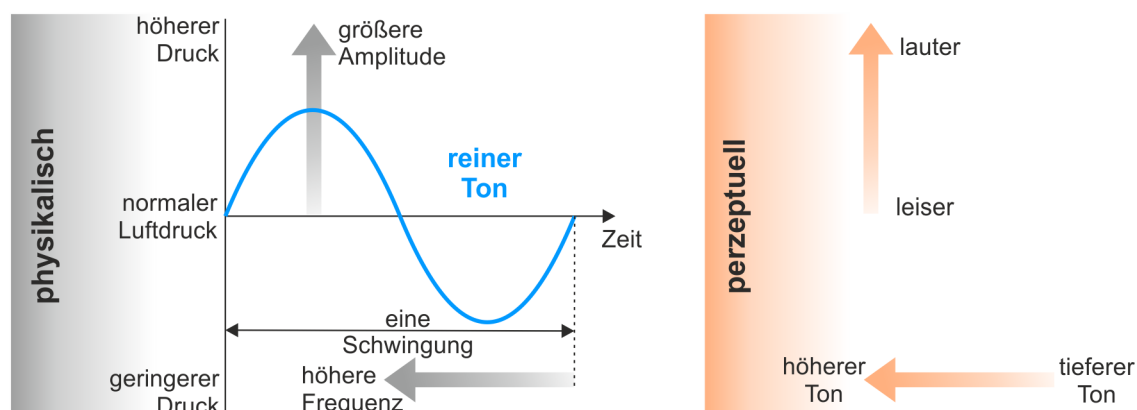


Bild 2.2: Luftschalländerung und die korrespondierende Wahrnehmungserfahrung; eigene Darstellung nach [GOLDSTEIN 2011, S. 260]

Aufgrund des zuvor angeführten weiten Schalldruckbereichs, den ein Hörsystem verarbeiten kann, und aufgrund des psychophysischen Umstands, dass, je größer ein Schalldruck ist, desto größer eine Schalldruckänderung ausfallen muss, um eine Lautheitsänderung zu erzeugen, wird konventionellerweise die Einheit *Dezibel* (dB) verwendet.

$$dB \text{ Wert} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (2.2)$$

Der Druck p (Pa) steht hierbei für den Schalldruck eines Stimulus und p_0 für einen standardisierten Bezugsschalldruck, der üblicherweise auf 20 Mikropascal (μPa) festgelegt ist [GOLDSTEIN 2011, S. 260]. Oftmals wird neben der dB-Angabe der Zusatz SPL für *Sound Pressure Level* gegeben, wenn es sich um Luftschalldruck handelt. Der Hörbereich von Druckschwankungen in Dezibel liegt bei etwa 0 bis 120 dB (SPL) und wird als Schall wahrgenommen [MOSER & ZENNER 2020, S. 687]. Der Filter Dezibel A (dB A) wird verwendet, da er der Filterfunktion des menschlichen Gehörs entspricht und folglich für tiefere (< 500 Hz) sowie höhere (> 2000 Hz) Frequenzen weniger empfindlich wird [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 191].

Ein reiner Sinuston, wie in Bild 2.2 dargestellt, kommt im alltäglichen Leben kaum vor. Mehrere Töne, die zueinander harmonisch abgestuft sind, setzen sich zu einem Klang zusammen, und ein Geräusch entsteht durch die Überlagerung vieler unterschiedlicher Töne [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 191]. Eine mechanisch erzeugte Betätigungsakustik ist, physikalisch dargestellt, immer ein Geräusch.

Ein Hilfsmittel zur Darstellung und Analyse von Geräuschen ist das Frequenzspektrum. Anstelle der Darstellung des Schalldrucks über die Zeit (t) kann mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) der Schalldruck, gemittelt über die gesamte Dauer des Audiosignals, in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt werden. Hierdurch kann abgelesen werden, welche Bereiche im Frequenzspektrum ein Geräusch beansprucht, um dementsprechend zwischen Breitband-Geräuschen sowie auf wenige Frequenzen konzentrierte schmalbandige Geräusche zu unterscheiden. [RAFFASEDER 2010, S. 60-61]

2.1.5 Aufbau des Hörorgans und auditive Wahrnehmung

Das Sinnesorgan Ohr beinhaltet sowohl das Gehör- als auch das Gleichgewichtsorgan. Wie in Bild 2.3 gezeigt, gliedert es sich in die drei Teile Außenohr, Mittelohr und Innenohr. Über die Ohrmuschel und den äußeren Gehörgang gelangt der einfallende Schall zum etwa 0,7 mm dünnen Trommelfell. Der dahinterliegende luftgefüllte Hohlraum des Mittelohrs nennt sich Paukenhöhle. Der Schall, der das Trommelfell in Schwingungen versetzt, wird durch die Gehörknöchelchen übertragen und verstärkt, da sich die Schallenergie auf einen kleinen Bereich des Steigbügels am ovalen Fenster konzentriert. Das runde Fens-

ter dient dem erforderlichen Druckausgleich der erzeugten Schwingungen des Steigbügels. Der schallaufnehmende Teil des Gehörorgans, das Innenohr, liegt hinter dem ovalen Fenster im Schläfenknochen. Hauptbestandteil des Innenohrs ist die Schnecke (lateinisch *cochlea*) beziehungsweise der sogenannte Schneckengang mit zwei bis drei Windungen. Innerhalb dessen befinden sich entlang einer knöchernen Leiste zwei Membranen. Die Bewegung des Steigbügels versetzt beide Membranen in Schwingung. Auf der Basilar-membran sitzt das Corti-Organ mit den Rezeptoren der Hörwahrnehmung, den inneren Haarzellen. Die inneren Haarzellen werden frequenzabhängig mechanisch erregt und lösen so langsamere und schnellere Folgen an Aktionspotentialen im Hörnerven aus. [SCHWEGLER & LUCIUS 2016, S. 186-191]

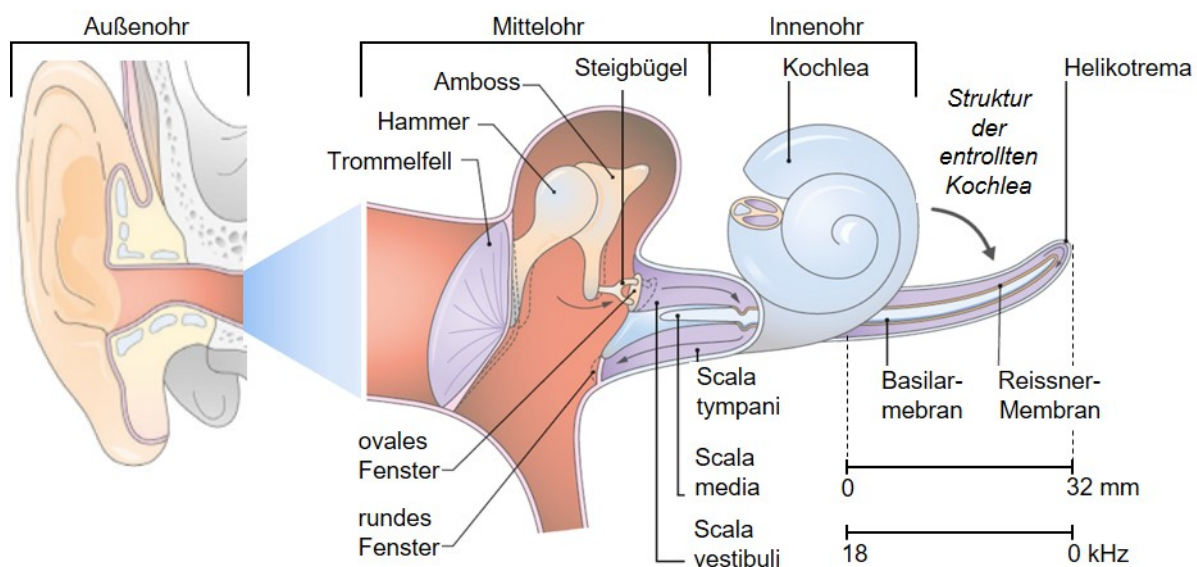


Bild 2.3: Schema des Hörorgans; eigene Darstellung nach [MOSER & ZENNER 2020, S. 685, 688] und [FASTL & ZWICKER 2007, S. 163]

Haarzellen an einem bestimmten Ort innerhalb der Kochlea werden folglich von nur einzelnen Frequenzen gereizt. Entlang der Basilar-membran wird eine Frequenzzzerlegung realisiert [MOSER & ZENNER 2020, S. 696]. Die erzeugten Signale werden über Hirnstamm und Thalamus zum primären auditorischen Kortex geleitet und verarbeitet [GOLDSTEIN 2011, S. 280]. Wichtige Funktionen des zentralnervösen auditiven Systems sind neben der allgemeinen Auswertung und Wahrnehmung auditiver Stimuli die auditive Lokalisation und die Sprachwahrnehmung [GOLDSTEIN 2011, S. 191].

Zur objektiven Beschreibung der subjektiven Hörwahrnehmung werden eine Vielzahl an psychoakustischen Metriken herangezogen [SINAMBARI & SENTPALI 2020, S. 289]. Im Folgenden wird nach [GENUIT & SOTTEK 2010, S. 54-70] ein grober Abriss der relevantesten psychoakustischen Metriken gegeben.

- **Lautheit** (*sone*) spiegelt die subjektiv empfundene Lautstärke von Schallen wider, unter der Berücksichtigung psychophysischer Verhältnisskalierung. Als Referenzsignal dient ein Sinuston von 40 dB bei 1 kHz, der per Definition 1 sone entspricht. Wenn der Ton 2 sone entspricht, wird dieser als doppelt so laut empfunden. Neben Schalldruckpegel haben auch die Frequenz, spektrale Breite und die Dauer Einfluss auf die Lautheit. DIN 45631/A1 [2010] normiert die Berechnung der Lautheit und beschreibt Anforderungen an Geräte sowie an das Vorgehen.
- **Schärfe** (*acum*) ist diejenige „Hörwahrnehmung, die denjenigen Aspekt der Klangfarbenwahrnehmung beschreibt, der mit der Frequenzverteilung der spektralen Hüllkurve von Schallen korreliert ist“ [DIN 45692 2009]. Je weiter sich die Schallenergie zu den hohen Frequenzen verschiebt, desto schärfer wird ein Geräusch wahrgenommen.
- **Rauigkeit** (*asper*) berücksichtigt die Veränderung von Amplituden und Frequenzen über die zeitliche Struktur innerhalb eines Signals. Insbesondere zeitliche Veränderungen zwischen 20 und 300 Hz werden als rau empfunden.
- **Schwankungsstärke** (*vacil*) ist analog zur Rauigkeit die Variation mit geringen Frequenzunterschieden von kleiner 20 Hz.
- **Tonalität** (*tu*) tritt auf, wenn innerhalb eines akustischen Signals einzelne Töne oder tonale Komponenten wahrnehmbar sind. In der Regel geht eine Tonalität mit erhöhter Lästigkeit eines Geräuschs einher, und deshalb wird nach DIN 45681 [2005] zur Beurteilung von Geräuschemissionen ein Tonzuschlag angewandt.

2.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Ein grundlegendes Konzept der Ergonomie ist das Systemkonzept, das die Wechselwirkungen zwischen dem Menschen und anderen Elementen in einem System behandelt [DIN EN ISO 26800 2011, S. 12]. Technische Systeme aller Art werden allgemein mit dem Begriff Maschine bezeichnet [JOHANNSEN 1993, S. 1]. Das Mensch-Maschine-System (MMS) kann als geschlossener Regelkreis schematisch dargestellt werden (vgl. Bild 2.4). Eine Regelung liegt vor, da dem Benutzer eine Information über mindestens eine Anzeige verfügbar gemacht wird und er aufgrund dessen über mindestens ein Stellteil Einfluss nehmen kann. Ein Bedienelement selbst ist stets auch ein Anzeiger (vgl. Kapitel 2.2.1). Eine weitere Rückmeldung bezüglich des Systemzustands erhält der Benutzer aus dem Grad der Aufgabenerfüllung. Andere Bestandteile des Systems sind die Einflüsse aus (Arbeits-) Aufgabe und Umwelt. Ein zentraler Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Beschreibung und Bewertung der MMS mittels Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (vgl. [BUBB & SCHMIDTKE 1981a], [BULLINGER 1994]). Ein konkretes Anwendungsbeispiel

stellt das Führen eines Kraftfahrzeugs dar mit dem Menschen als Regler. Die Fahraufgabe kann weiter in eine primäre, sekundäre oder tertiäre Fahraufgabe zerlegt werden (vgl. [BUBB ET AL. 2015b]). Innerhalb des MMS behandelt die vorliegende Arbeit die Haptik und Akustik handbetätigter Bedienelemente der tertiären Fahraufgabe, die nichts mit dem eigentlichen Fahren zu tun haben, sondern den persönlichen Komfort betreffen.

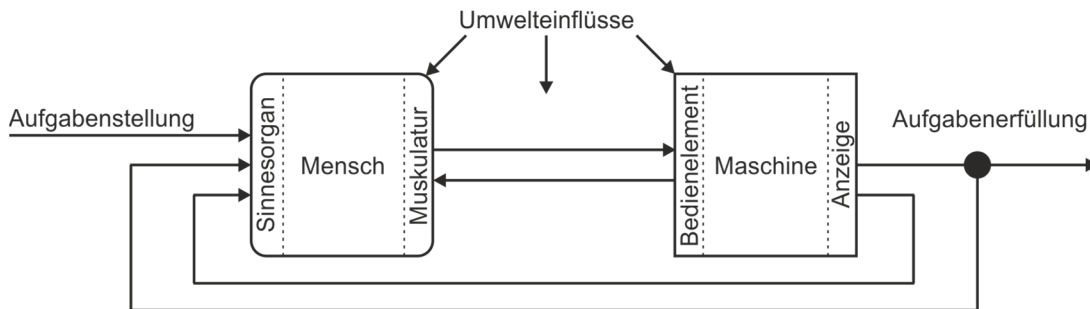


Bild 2.4: Allgemeines Schema des MMS [BUBB & SCHMIDTKE 1981b, S. 264f.]

Der ergonomische Gestaltungsansatz sieht vor, dass alle gestaltbaren Komponenten eines Systems, oder spezifischer eines technischen Produkts, an die Merkmale der vorgesehenen Benutzer und der gegebenen Aufgabe angepasst sind. Nicht der Mensch soll sich der Maschine anpassen, wenngleich die für die Gestaltung relevanten Merkmale der Zielpopulation zu ermitteln sind. [DIN EN ISO 26800 2011, S. 9], [DIN EN 894-1 2009, S. 6] Ziel der Gestaltung ist es, „das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren“ [DIN EN 614-1 2009, S. 6].

Zur abstrahierten Beschreibung der unmittelbaren Schnittstelle von Mensch und Maschine, auch *Interface* genannt, stellt SCHMID [2003, S. 76] die Interfaceelemente Stellteil (S), Anzeiger (A) und Wirkteil bzw. Wirkung (W) vor. Der Benutzer (U, von englisch *User*) erhält über die konkrete Interfacegestalt Zugang zu Anzeige und Stellteil. „Das Gesamtmodell wird als UASW-Modell definiert“ [SCHMID & MAIER 2017, S. 73].

2.2.1 Anzeige

RÜHMANN [1981, S. 352] definiert eine Anzeige als Information, die mittels einer technischen Einrichtung den menschlichen Sinnesorganen wahrnehmbar dargeboten wird. Analog dieser Definition betonen SCHMID & MAIER [2017, S. 133] die Unterscheidung zwischen *Anzeige* und *Anzeiger*. Ein Anzeiger ist demnach ein technisches Gebilde, das Informationen wahrnehmbar darbietet, wenngleich die Autoren betonen, dass heutzutage zumeist von „der Anzeige“ gesprochen wird [SCHMID & MAIER 2017, S. 132f.].

Anzeiger können in direkte und indirekte Anzeiger unterschieden werden. Direkte Anzeiger stellen die Information unmittelbar bereit, bspw. wenn direkte Sicht auf das Wirkteil oder die Wirkung besteht. Indirekte Anzeiger präsentieren visuelle, akustische und haptische Anzeigen. [SCHMID & MAIER 2017, S. 133]

Visuelle Anzeiger können weiterhin nach analog, digital und alphanumerisch kategorisiert werden [DIN EN 894-2 2009, S. 6]. Neben dem direkten (visuellen) Anzeiger Wirkteil kann auch ein Stellteil als indirekter visueller Anzeiger dienen. Zum Beispiel kann im Fahrzeuginnenraum das Stellteil des integrierten Griffs einer Luftdüse die Information der eingestellten Luftrichtung preisgeben. In diesem Beispiel fallen Stellteil, Anzeiger und Wirkteil in einem Ort zusammen, was diverse ergonomische Vorteile ermöglicht.

Akustische Anzeigen sind vielfach auditive Gefahrensignale, wie zum Beispiel die Luftschuttsirene oder aber Vermittler von Zustandsgrößen eines Systems wie etwa das Besetztzeichen am Telefon [RÜHMANN 1981, S. 352]. Im Kontext der Regelungstätigkeit im MMS kann ein Schallereignis dem Regler Mensch den Grad der Aufgabenerfüllung anzeigen. Als Beispiel kann hierzu das Öffnen eines Ablagefaches per Taster aufgeführt werden, bei dem die Betätigungsakustik die erfolgte Entriegelung bestätigt.

Neben akustischen können auch haptische Anzeigen zur Entlastung des visuellen Sinneskanals eingesetzt werden bzw. in sicherheitsrelevanten Zusammenhängen als multimodale und redundante Gestaltung genutzt werden [BULLINGER 1994, S. 346f.]. Taktile Informationsübertragung per Vibration eignet sich insbesondere als Melde- oder Alarmanzeige, wenngleich Richtungsinformationen ebenfalls ein geeignetes Einsatzgebiet darstellen [SCHWALK 2020, S. 172]. Die haptische Informationsübertragung der Betätigungshaptik beschreibt BUBB ET AL. [2015b, S. 285] als *„Rückwirkung eines Mechanismus auf die menschliche Wahrnehmung“*. Neben einer Information bezüglich des Systemzustands hat die haptische Anzeige *„auch erheblichen Einfluss auf die wahrgenommene Qualität des Fahrzeugs“* [BUBB ET AL. 2015b, S. 285]. Der erwähnte Wertigkeitsaspekt sowie Rückmeldecharakter kommen auch durch die Oberflächenhaptik und Form des angefassten Objekts zum Ausdruck, wobei die Wahrung der visuellen Erwartungskonformität bedacht werden muss [BUBB ET AL. 2015b, S. 286]. Weitere Anzeigen, die per Oberfläche übermittelt und gezielt gestaltet werden können, sind Temperaturempfindung und Reibkräfte zwischen der Oberfläche und der Haut [TIETZ 2001, S. 184]. Nach GÖTZ [2007, S. 113] ist die Greifelementgestalt in der Lage, Information bezüglich Funktion, Bewegung und Greifart zu vermitteln.

Neben der Darstellungsart sind Informationsinhalt und Darstellungsort wichtige Faktoren bei der Gestaltung von Anzeigen und müssen daher *„für jede Aufgabe oder Entwicklung neu überprüft und an die spezifischen Bedienungen angepasst werden“* [BRUDER & DIDIER 2015, S. 638]. Für weitere Differenzierungen und Anforderungen an Anzeigen im Kontext MMS vergleiche [RÜHMANN 1981, S. 352-362], [BULLINGER 1994, S. 345-358], [SCHMID & MAIER 2017, S. 132-144], [BRUDER & DIDIER 2015, S. 638-645], [BUBB ET AL. 2015b, S. 275-291] und [DIN EN 894-2 2009].

2.2.2 Stellteil und Bedienelemente

„*Stellteile sind Elemente eines Systems, mit dessen [sic!] Hilfe der Benutzer das System bedienen bzw. steuern kann.*“ [SCHMID & MAIER 2017, S. 145]. Im Gegensatz zum MMS-Überbegriff Stellteil könnte man das Bedienelement als die konkrete technische Einrichtung der Eingangsseite der Maschine betrachten. ZEILINGER [2005, S. 7] verwendet den Begriff Bedienelement synonymhaft mit Stellteil, Bedienteil, Betätigungsteil oder Steuerarmatur. Im Fahrzeuginnenraum eines Pkws überwiegen handbetätigte Stellteile. Ein handbetätigtes Stellteil ist „*ein Stellteil, das von Hand gestellt oder beeinflusst wird, um eine Veränderung an einem System zu bewirken*“ [DIN EN 894-3 2010, S. 5]. Berührungsempfindliches Stellen wie beispielsweise per Touchscreen ist in dieser Definition nicht einbezogen. Wie die Übersicht in Tabelle 2.3 zeigt, erfordern gewisse Stellteiltechnologien noch nicht einmal den Einsatz von Gliedmaßen.

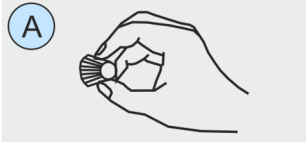
Stellteil-Technologie	Beschreibung	Erfordert	
		Glieder	Muskel
Mechanisches Stellteil	Mit dem mechanischen Stellteil werden die Kräfte und Momente direkt auf das Wirkelement übertragen.	x	x
Elektromechanisches Stellteil	Mit einer einstellbaren Kraft oder einem einstellbaren Moment wird der Wert eingestellt und über einen Servomotor die tatsächliche Kraft auf das Wirkelement übertragen.	x	x
Touchoberfläche	Bedienung in der Ebene. Nahezu kraftlos und ohne bzw. teilweise haptisches Feedback. Flächendeckender Einsatz aufgrund des hohen gestalterischen Freiheitsgrades.	x	x
Bedienung durch Gestik bzw. Mimik	Durch Erkennungssoftware von gestischen und mimischen Veränderungen wird Information in das System eingeleitet.	(x)	x
Bedienung durch Blickinteraktion	Die Blickinteraktion ist eine Interaktionsmodalität zur Bedienung von technischen Systemen durch bewusste und gezielte Blickbewegungen.	-	x
Bedienung durch Gedanken	Brain-Machine-Interface. Die Bedienung von Maschinen alleine durch Gedanken. Es stellt sich die Frage, wie stark der Benutzer seine Gedanken unter Kontrolle hat und somit diese bewusst steuern kann.	-	-

Tabelle 2.3: Abgrenzung von Stellteiltechnologien [SCHMID & MAIER 2017, S. 148]

Im Folgenden werden ausschließlich handbetätigte, mechanische Stellteile behandelt, die in ihrer konkreten technischen Umsetzung auch Bedienelemente genannt werden. Diese lassen sich hinsichtlich einer Vielzahl weiterer Merkmale beschreiben und differenzieren. Eine wesentliche Einordnung erfolgt auf Basis der Bewegungsmerkmale. Betätigt werden kann translatorisch mittels Drücken, Schieben und Ziehen sowie rotatorisch mittels Drehen und Schwenken [VDI/VDE 2258 1987, S. 2]. Kombiniert man die Bewegungsmerkmale mit der Greifart des Benutzers, so ergibt sich aus Nutzersicht bereits eine recht abgegrenzte Beschreibung der Betätigung (vgl. Tabelle 2.4). Die Greifart gibt an, wie Hand oder Finger mit dem Greifelement verbunden sind. Beim offenen Kontaktgriff liegen

die Finger oder die Hand auf der Kopplungsfläche lediglich auf, bspw. bei einem Taster. Der Zufassungsgriff ist geschlossen, und die Glieder liegen von mehreren Seiten punktuell am Greifelement, bspw. bei einem Drehknopf. Beim Umfassungsgriff wird das Greifelement vollständig mit der Hand umschlossen, bspw. das Lenkrad. Geläufig ist die Spezifizierung der Greifart unter Angabe der verwendeten Finger. [RÜHMANN 1981, S. 363], [BULLINGER 1994, S. 321f.]

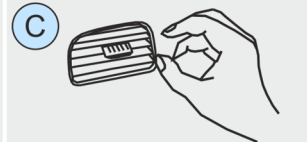
Bewegungs- Greifart	Drehen	Drücken	Schieben	Schwenken	Ziehen
Kontaktgriff		(B)			
Zufassungsgriff	(A)		(C) — (C)		
Umfassungsgriff					



(A)



(B)



(C)

Tabelle 2.4: 5x3-Matrix aus der Kombination von Bewegungs- und Greifarten sowie exemplarische Betätigungen [SCHMID & MAIER 2017, S. 151]

Die Kraftübertragung zwischen Hand bzw. Finger und Stellteil kann mittelbar oder unmittelbar erfolgen. Bei der mittelbaren Kraftübertragung über die Reibungskraft, genannt Reibschluss, wirkt die Kraft entlang der Berührungsfläche (vgl. Beispiel A in Tabelle 2.4). Bei unmittelbarer Kraftübertragung senkrecht zur Berührungsfläche spricht man vom Formschluss (vgl. Beispiel B in Tabelle 2.4). Für jede der Greifarten gilt, dass aufzubringende Kräfte des Nutzers im Reibschluss größer sind. [BULLINGER 1994, S. 323]

Parametrisierte Gestaltungsempfehlungen bzgl. Betätigungskräfte sollten folglich mit der Angabe von Kopplungsart und Greifart berichtet werden (vgl. Kapitel 5 und 7). Einfluss auf die Kraftübertragung hat weiterhin die Formgestalt des Bedienelements. So kann bspw. durch eine raue Oberfläche der Reibschluss begünstigt oder durch den größeren Durchmesser eines Drehrads der Hebel und das maximal übertragbare Drehmoment gesteigert werden. Form, Abmessung, Material und Oberfläche des Bedienelements, dessen Gestaltung nach BULLINGER [1994, S. 324] in dieser Reihenfolge erfolgen sollte, sind die wesentlichen Einflussgrößen der Formgestalt. Für Daten zur ergonomischen Auslegung von Abmessungen und Montageabstand vergleiche [SCHMIDTKE & JASTRZEBSKA-FRACZEK 2013, S. 74-11], [DIN EN 894-3 2010, S. 33], [DIN EN 894-4 2010, S. 17f.], [SACHS ET AL. 1994, S. 83-92] und [VDI/VDE 2258 1987, S. 5-11].

Weitere ergonomische Maximen behandelt DIN EN 894-4 [2010] mit der Lage und Anordnung von Stellteilen. Die Lage von Bedienelementen im Fahrzeuginnenraum kann nach Greifraumbereichen erfolgen und sollte neben der allgemeinen Erreichbarkeit eine günstige Körperhaltung erreichen [BULLINGER 1994, S. 204-208]. Hierzu werden digitale Mensch-Modelle verwendet, beispielsweise mittels anthropometrischer Werkzeuge wie RAMSIS oder Human Builder (vgl. [BULLINGER-HOFFMANN & MÜHLSTEDT 2016]). Zur anthropometrischen Auslegung gehört ferner die geeignete Gestaltung von Betätigungskraft und Drehmoment, dies wird ausführlich in Kapitel 3 behandelt.

Bei der Anordnung und Gruppierung von Stellteilen sind Häufigkeit und Wichtigkeit der Stellaufgaben zu berücksichtigen. Ein betriebstechnischer Zusammenhang von Stellteilen kann beispielsweise durch eine Gruppierung nach dem Prinzip der Nähe erfolgen [DIN EN 894-4 2010, S. 20]. Eine Reduzierung der Belastung folgt auch aus der Wahl der Stellteil-Bewegungsrichtung nach der erwarteten Wirkungs- und Anzeigerichtung und wird im Allgemeinen unter dem Begriff Kompatibilität zusammengefasst [SCHMID & MAIER 2017, S. 174]. Neben Lage, Anordnung und Bewegungsrichtung sind Form, Farbe und Grafik weitere redundante Anzeigen von Stellteilen [DIN EN 894-4 2010, S. 27], [GÖTZ 2007, S. 11]. Grundlegende Verfahren zur ergonomischen Bewertung von Stellteilen sind in den Arbeiten von DANGELMAIER [2001] und SCHMID [2003] zu finden. Tabelle 2.5 zeigt die Stellteil-Kategorisierung unterschiedlicher Autoren sowie eine Hervorhebung der in dieser Arbeit untersuchten Stellteile. Daraufhin folgt eine Beschreibung.

Unterscheidungsmerkmal	Kriterien			Quelle
Bewegungsart	translatorisch	rotatorisch	quasi-translatorisch	[RÜHMANN 1981, S. 363]
Extremität	einhändig	zweihändig	Fußbetätigung	[SACHS ET AL. 1994, S. 19]
Greifart	Kontaktgriff	Zufassungsgriff	Umfassungsgriff	[BULLINGER 1994, S. 321]
Dimensionalität	eindimensional	zweidimensional	-	[BUBB ET AL. 2015b, S. 292]
Eingabeform	diskret	kontinuierlich	monostabil	[BAUMANN & LANZ 1998, S. 37]
Arretierbarkeit	arretierbar	nicht arretierbar	-	[BUBB ET AL. 2015b, S. 292]
Technische Gestaltung	Schalter	Taster	Steller	[ZEILINGER 2005, S. 9]
Rückmeldung	aktiv	passiv	-	[RÜHMANN 1981, S. 373]
Funktionsbelegung	variabel (Softkey)	festgelegt (Hardkey)	-	[SCHMID & MAIER 2017, S. 154]

Tabelle 2.5: Unterscheidungsmerkmale von Stellteilen nach diversen Autoren

Auf technischer Ebene unterscheidet ZEILINGER [2005, S. 9] zwischen monostabilen Taster, diskretem Schalter sowie kontinuierlichem Steller. Bei kontinuierlicher Eingabeform

kann in unendlich viele Stellungen betätigt werden, während ein diskretes Bedienelement eine vordefinierte Anzahl an Rasten bzw. Stellungen aufweist. Analog dazu zeigt BUBB ET AL. [2015b, S. 292f.] die Kategorisierung nach Arretierbarkeit. Im Gegensatz zu einem diskreten, bistabilen Schalter bewegt sich der monostabile Taster nach Erreichen des Endanschlages in die Ausgangsposition zurück. Wie viele Funktionen ein Stellteil steuert, beschreibt die Dimensionalität [BUBB ET AL. 2015b, S. 292]. So verstellt bspw. an einigen Luftdüsen der Schiebegriff sowohl die Luftrichtung als auch die Luftmenge.

Mechanische Stellteile sind stets passive und festbelegte Stellteile. Sie sind unmittelbar mit dem dazugehörigen Wirkteil gekoppelt, und die Rückmeldung wird allein durch die Mechanik erzeugt. Nach der Eingangsinformation am Stellteil ist die Reaktion des Systems innerhalb von 200 ms zur Vermeidung von Desorientierung des Nutzers folglich absehbar [BUBB ET AL. 2015b, S. 296]. Im Gegensatz dazu stehen mechanisch entkoppelte, aktive Stellteile, die eine Rückmeldefunktion per Aktor aus unterschiedlichen Größen des Regelkreises erzeugen [RÜHMANN 1981, S. 373f]. Aufbau und Beschreibung aktiver und adaptiver Stellteile sind in der Arbeit von HAMPEL [2011] zu finden.

Abschließend zeigt Bild 2.5 zentrale Charakteristika handbetätigter, mechanischer Stellteile sowie die Funktion des Stellteils als Anzeiger.

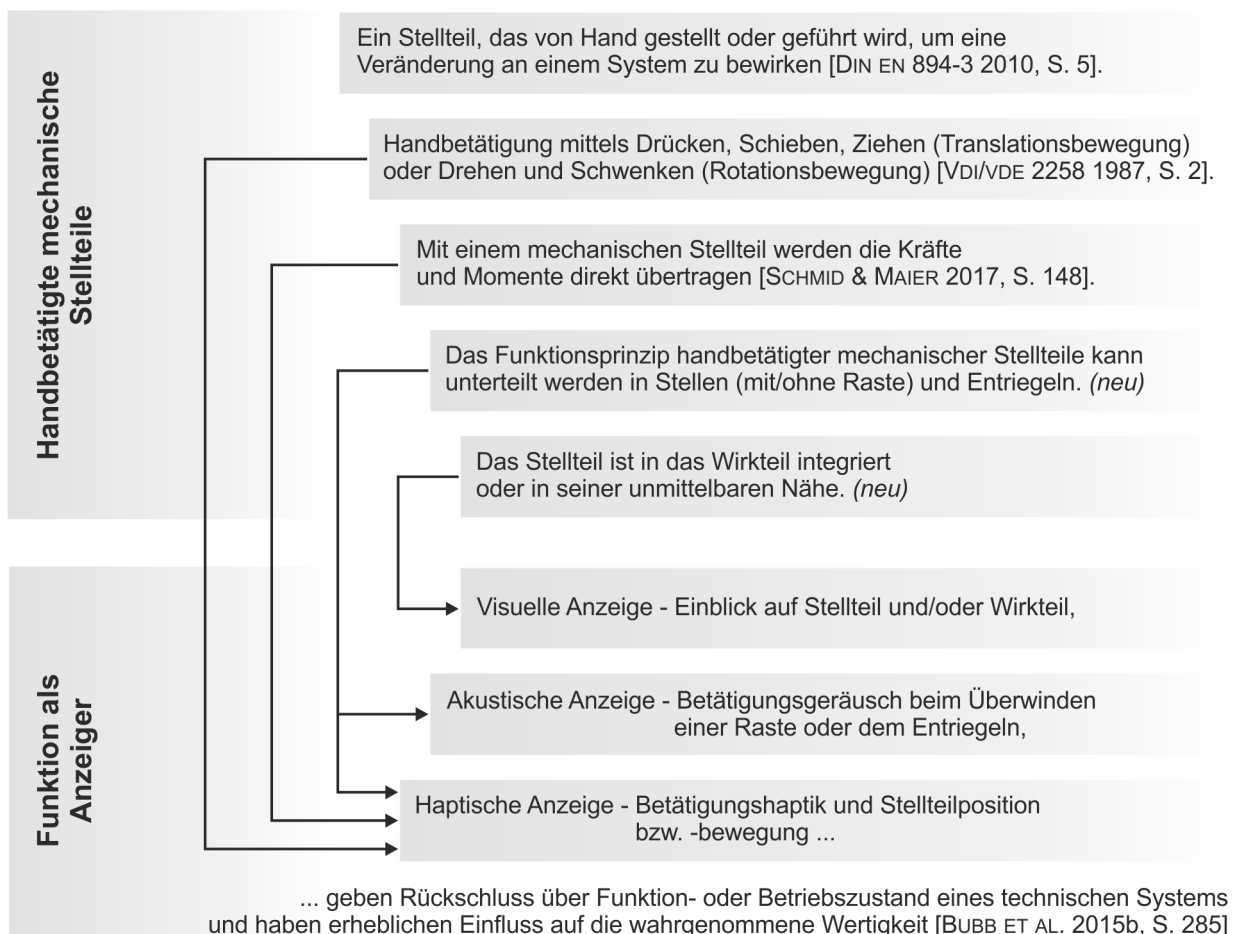


Bild 2.5 Zentrale Charakteristika handbetätigter mechanischer Stellteile

2.2.3 Komfort- und Wertigkeitsmodelle

In diesem Kapitel wird eine Übersicht bisheriger in Verwendung befindlicher Begriffe und Modelle des Komforts und der Wertigkeit gegeben. Es wird aufgezeigt, dass sich, insbesondere hinsichtlich der Begriffe *Wertigkeit* bzw. *Wertanmutung* ein Bedarf an Arbeitsdefinitionen im technischen Zusammenhang ergibt.

Der DUDEN [2022a] beschreibt die Bedeutung des Begriffs *Komfort* als „auf technisch ausgereiften Einrichtungen beruhende Bequemlichkeiten, [...]; einen bestimmten Luxus bietende Ausstattung“. Im Kontext des Fahrzeuginnenraums konzentrierte sich bisher ein Großteil der Forschung auf den Sitzkomfort (vgl. [KRIST 1994] und [ULHERR & BENGLER 2018]). Dabei findet das Komfortmodell nach ZHANG ET AL. [1996] weite Verbreitung, die auf Basis von gesammelten Beschreibungen bezüglich Komfort zwei unabhängige Faktoren ermitteln konnten. Der eine Faktor *Diskomfort* beinhaltet Beschreibungen der Cluster Schmerz, Müdigkeit und Biomechanik und kann mittels psychophysischer Methoden objektivierbar erfasst werden [BUBB ET AL. 2015a, S. 148]. Der zweite Faktor *Komfort* hingegen beinhaltet Aspekte des Gefallens und der Ästhetik, was bei einer zunehmenden Perfektionierung von Produkten an Bedeutung gewinnt und explizit den Bedienkomfort betrifft [BUBB 2003, S. 6]. Damit sich in einem Pkw ein Komforteindruck einstellt, ist nach [BUBB 1995, S. 3] die einwandfreie Funktionalität sowie deren Anpassung an die Erwartung der Nutzer zwingend erforderlich. Weiter ist der Komfort abhängig vom Kulturkreis, dem momentanen Zeitgeist sowie von individuellen Präferenzen [BUBB 1995, S. 4].

Im Zusammenhang mit Untersuchungen technischer Parameter von Bedienelementen findet weiterhin der Begriff *Wertigkeit* im Sinne von *hochwertig* Verwendung. So erhob REISINGER [2009] für Betätigungen von Drehstellern eine Bewertung mittels der Adjektiv-Pole *hochwertig*-*minderwertig*. Der Faktor Wertigkeit zeigte einen hohen Zusammenhang mit *Gefallen* und *Wohlbefinden*. Damit ein Bedienelement subjektiv als präzise beschrieben wird, muss es zu einem gewissen Grad als hochwertig und hart eingestuft werden [REISINGER 2009, S. 92]. Zur Bewertung der angebotenen Stimuli unterschiedlicher Drehsteller und Drucktastern verwendete ANGUELOV [2009] ebenfalls eine Ratingskala von *minderwertig* bis *hochwertig* als zentrale abhängige Variable. Laut Autor fördere eine gesteigerte haptische und akustische Wertigkeit im Fahrzeuginnenraum die Wertanmutung des gesamten Fahrzeugs. Die Wertigkeitspyramide von GLOHR [2018, S. 3] zeigt die grundlegenden Ebenen Funktionalität und Rückmeldung, nach deren erfolgreicher Umsetzung die Realisierung wertiger Auslegung von Bedienelementen möglich ist. Als Steigerung der Wertigkeit könne eine Markendifferenzierung auf Basis technischer Gestaltung erfolgen [GLOHR 2018, S. 3]. Auch bei weiteren Autoren im Kontext Bedienelemente bzw. Oberflächen wird das Ziel der Wertigkeit der technischen Gestaltung angeführt, das

wiederum teilweise synonym mit dem Begriff *Qualitätseindruck* verwendet wird (vgl. [CHRISTOF ET AL. 2009], [PAULIG ET AL. 2011], [BOBKA ET AL. 2022]). Die Angabe einer konkreten Arbeitsdefinition bezüglich Wertigkeit ist dabei nicht zu finden.

Untersuchungen zur Steigerung einer *Wertanmutung* lassen sich ebenfalls im Kontext von Bedienelementen bzw. Oberflächen finden (vgl. [RICHTER 2008], [SONNLEITNER 2009], [KÜHNER ET AL. 2011], [ANGUELOV 2009]). Laut DUDEN [2022b] ist eine Anmutung ein „*gefühlsmäßiges, unbestimmtes Eindruckserlebnis*“. Nach WELLMANN [2008, S. 15] meint der Begriff Anmutung „*den Eindruck, den das Objekt auf den Betrachter macht, die Wirkung, die es erzeugt, den Charakter, den es zu besitzen scheint, [...]*“ und resultiert aus dem vorangegangenen Design- bzw. Gestaltungsprozess. Eine Anmutung kann sowohl positiv als auch negativ empfunden werden, und falls sie mit der Nutzererwartung übereinstimmt, wird sie als stimmig und passend empfunden [WELLMANN 2008, S. 15].

Im Zusammenhang des „*technisch-wirtschaftlichen Konstruierens*“ stellt die Richtlinie VDI 2225-3 [1998] die Bewertungsmethode dar zur Bestimmung des Erfüllungsgrades von Anforderungen für Lösungsvarianten technischer Produkte. Ziel ist die Reduktion der Lösungsvarianten für die weitere Ausarbeitung und wird anhand der Kennzahl der *Technischen Wertigkeit* vorgenommen. Dazu werden Fest- und Wunschanforderungen einer zuvor erstellten Anforderungsliste einzeln mit einem Erfüllungsgrad von 0 bis 4 Punkten bewertet. Diese Anforderungen beziehen auch Design- und Mensch-Produkt-Anforderungen mit ein, die beispielsweise die Betätigung und Benutzung betreffen. Die Technische Wertigkeit W_t einer Lösung k ergibt sich aus der Summe der erzielten Punkte im Verhältnis zur maximal möglichen Punktzahl (vgl. Formel 2.2). Zur detaillierteren Bewertung können die einzelnen Anforderungen mit einer Gewichtung versehen werden.

$$W_t = \frac{\sum p_k}{\sum p_{ideal}} = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n * p_{max}} \quad (2.2)$$

Zusätzlich kann das Verhältnis von Herstellungskosten eines Produkts mit den ideellen Herstellungskosten für jede Lösungsvariante anhand der *Wirtschaftlichen Wertigkeit* angegeben werden [VDI 2225-3 1998].

In der Forschung findet ferner der englische Begriff *Perceived Quality* Verwendung. Demnach hängt der Kundenerfolg maßgeblich von der wahrgenommenen Qualität ab und nicht etwa von technischen Kennzahlen des Qualitätsmanagements [SCHMITT & NEUMANN 2013, S. 617]. Eine zentrale Fragestellung dabei ist, welche Sinnesmodalitäten und welche Produkteigenschaften für einen hohen Grad an Perceived Quality wichtig sind und folglich im Design- und Entwicklungsprozess besondere Aufmerksamkeit - gemeint sind Kosten und Zeit - erhalten sollen [LIEB ET AL. 2008]. Bild 2.6 zeigt die Abhängigkeit der Perceived Quality zwischen technischem Produkt und der Erwartung des Kunden.

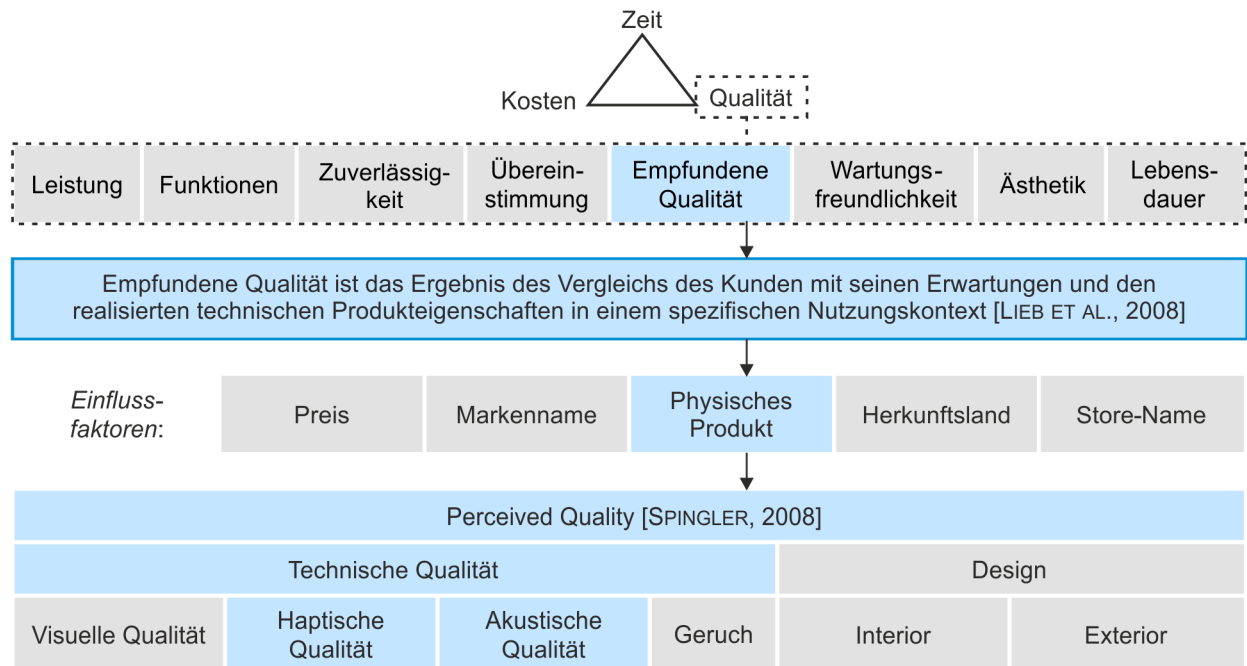


Bild 2.6: Definition, Einflussfaktoren und Unterteilung der Perceived Quality; eigene Darstellung nach [SPINGLER 2008, S. 106] und [LIEB ET AL. 2008]

SPINGLER [2011, S. 80] nennt bezüglich visueller Qualität (vgl. Bild 2.6) konkrete Gestaltungsparameter wie beispielweise Spaltmaße, Glanzgrad, Farbe und Narbung. Für Oberflächenhaptik werden Elastizität, Rückstellverhalten, Steifigkeit, Reibung, Rauigkeit und Temperaturempfinden angeführt. Betätigungshaptik ist laut SPINGLER [2011, S. 80] abhängig von Kraft- und Drehmomentverläufen, Reibung und dem Führungsspiel. Eine Angabe von Gewichtung oder Quantifizierung der Parameter wird vom Autor nicht gegeben.

2.3 Erste Schlussfolgerungen zur Wertigkeit und Wertanmutung

Auf Basis der Zielsetzung (vgl. Kapitel 1.1) sowie der recherchierten Komfort- und Wertigkeitsmodelle (vgl. Kapitel 2.2.3) werden nachfolgend eigene Arbeitsdefinitionen gegeben, die dem Zweck des Schließens einer Definitionslücke dienen sollen.

Kundenrelevante Wertigkeit im Kontext Fahrzeug-Interior wird abgegrenzt als:

Wertigkeit: *Erfüllungsgrad der gewichteten Anforderungen eines Produkts oder einer Bauteilgruppe, die auf ein kundenrelevantes Werterlebnis Einfluss nehmen. Dies schließt sowohl den Teilnutzwert des Designs einer Produktgestalt mit ein, als auch Mensch-Produkt- und Technisch-Physikalische Anforderungen.*

Wertigkeit betrifft also das konkrete technische Produkt und seine prüfbaren, gewichteten Anforderungen. Die Gewichtung resultiert aus dem unterschiedlichen Grad des Einflusses auf das Werterlebnis. Die zwei häufigsten Methoden zur Gewichtung sind die Vergabe von Gewichtungspunkten oder der Paarvergleich [BULLINGER 1995, S. 92].

Auf Basis einer Wertigkeit kann durch den Gebrauch ein resultierender Eindruck einer zweckfreien Wertanmutung ausgelöst werden:

Wertanmutung: *Unspezifischer und gefühlsmäßiger Eindruck durch den Gebrauch eines präsentierten Reizes, eines Produkts und dessen vermuteter Wertigkeit. Dieser Eindruck ergibt sich aus der Sinneswahrnehmung, im Falle des Bedienablaufs visuell, haptisch und akustisch, und deren Bewertung, bedingt durch die Erfahrung und Erwartung des Nutzers.*

Analog dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept ist die produktbezogene Wertigkeit folglich für alle Benutzer identisch. Die für den Nutzer vermutete Wertigkeit und die resultierende Wertanmutung ergeben sich individuell durch die Funktion aus Wertigkeit und Erwartung sowie Erfahrung der Nutzer. Das Basisschema der Mensch-Maschine-Interaktion in Bild 2.7 zeigt für die Phasen Wahrnehmung, Erkennen und Verhalten die Unterscheidung in zweckgebundener und zweckfreier Informationserkennung während des Gebrauchs. Zweckgebundene Information wie die Bedienerkennung sind erforderlich, damit der Nutzer eine mit Blick auf die Aufgabenerfüllung erfolgreiche Betätigung ausführen kann. Darüber hinaus soll die technische Gestaltung auch hinsichtlich des Eindrucks optimiert werden entsprechend der Unterscheidung in funktionale und formale-ästhetische Gestaltung der Interfacegestalt nach SCHMID & MAIER [2017, S. 41].

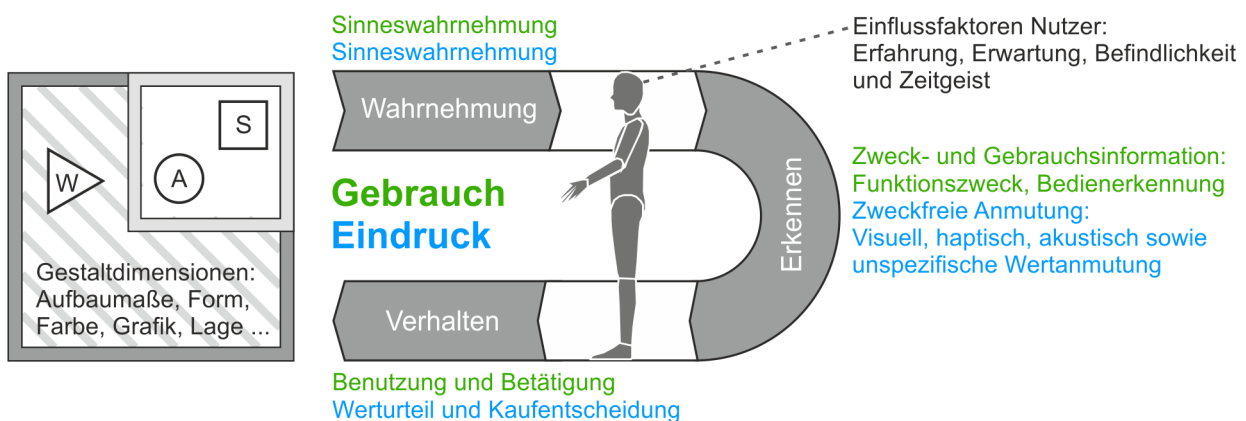


Bild 2.7: Basisschema der Mensch-Maschine-Interaktion nach [SCHMID & MAIER 2017, S. 57] mit zweckgebundener und zweckfreier Informationserkennung

2.4 Gestaltparameterübersicht mechanischer Bedienelemente

Handbetätigte, mechanische Bedienelemente lassen sich in fünf Bewegungsarten, drei Greifarten und den Funktionsprinzipien Stellen und Entriegeln kategorisieren (vgl. Kapitel 2.2.2). Anhand dieser Merkmale lässt sich die Betätigung des Nutzers sowie die ausgeführte Funktion beschreiben und abgrenzen (vgl. Bild 2.8). Zur gestalterischen Umsetzung eines Bedienelements ist ferner der Nutzungskontext relevant, der sich nach JANNY [2018, S. 50] aus der Menge der Einflussfaktoren Nutzer, Arbeitsaufgabe und Umgebung

ergibt. Auf Basis einer Befragung ermittelte JANNY [2018, S. 51] neun Gestaltdimensionen, innerhalb derer quantifizierbare Gestaltparameter aufgelistet sind. Die Bedienelementgestalt ergibt sich aus *Aufbau, Form, Oberfläche, Farbe und Grafik* (vgl. Bild 2.8). Die Bediencharakteristik resultiert aus den Gestaltdimensionen *Lage und Anordnung* sowie *Betätigung*. Bis auf *Farbe und Grafik* haben alle weiteren fünf Gestaltdimensionen Einfluss auf die Betätigungshaptik bzw. Oberflächenhaptik. Da die *Lage und Anordnung* von Bedienelementen ebenfalls nicht im Untersuchungsfokus dieser Arbeit stehen, sind diese in Bild 2.8 ohne hellblaue Markierung. Die Zerlegung der Gestaltdimensionen „in quantifizierbare Gestaltparameter ermöglicht eine gezielte Parametervariation“ [JANNY 2018, S. 52]. Diese Zerlegung ist notwendig, um mittels experimenteller Untersuchungen die Anforderung einer hohen Wertigkeit der Mensch-Produkt-Schnittstelle anhand von messbaren Parametern zu ermitteln. Die gestalterische Konkretisierung eines Bedienelements kann so anhand von quantifizierten und überprüften Wertebereichen einzelner Gestaltparameter erfolgen. Diese Gestaltungsrichtlinien bzw. -empfehlungen können weiterhin als Wertigkeits-Anforderungen bei der Spezifikation eines Pflichtenhefts zur Auftragsvergabe an einen Auftragsnehmer dienen.

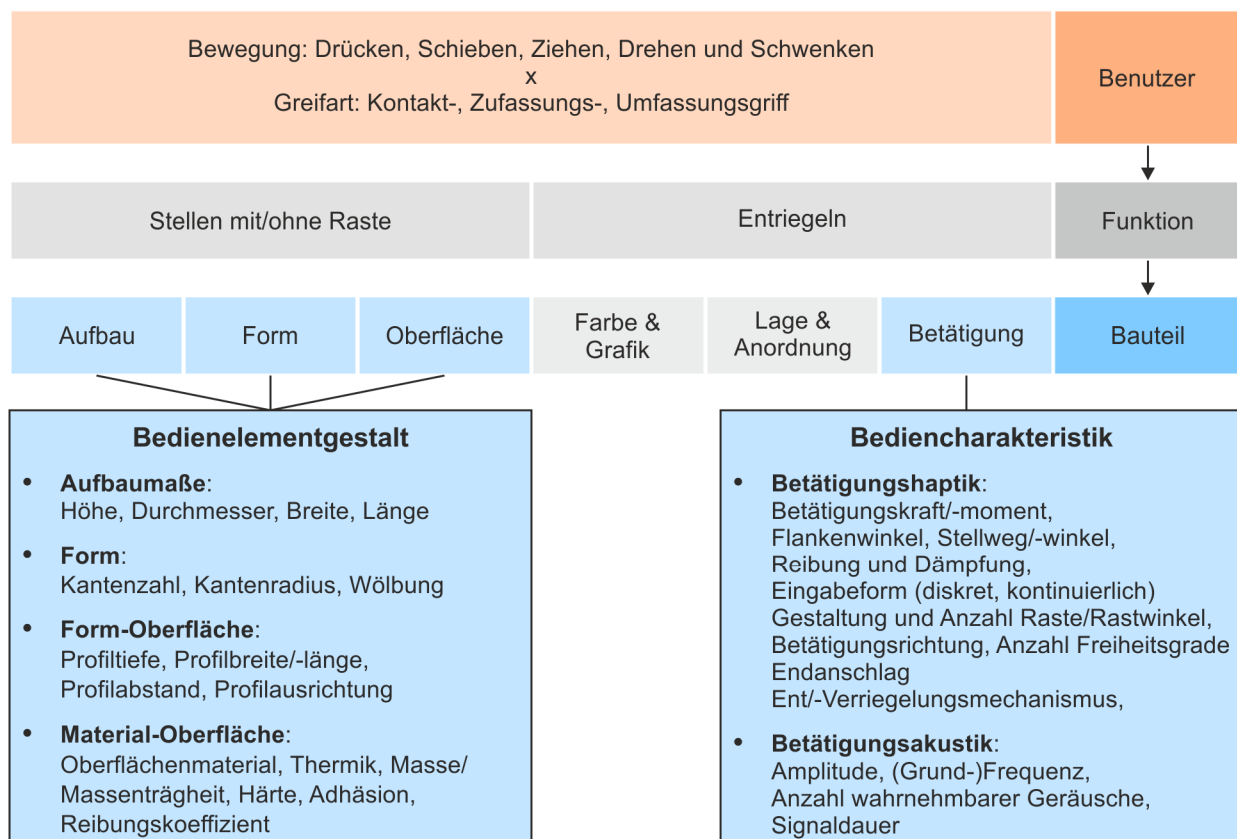


Bild 2.8: Übersicht der Gestaltparameter handbetätigter, mechanischer Bedienelemente; eigene Darstellung und Erweiterung nach [JANNY 2018, S. 82]

3 Stand der Technik und Forschung

Das vorliegende Kapitel dient dazu, ausgewählte mechanische Bedienelemente vorzustellen und deren technische Beschreibung darzustellen. Kapitel 3.1 behandelt das Messen und damit die objektive Darstellung der Betätigung der Bedienelemente mittels eines Robotiksystems. Daran anschließend behandelt Kapitel 3.2 konkrete Pkw-Bedienelemente und die technischen Mechanismen zur Generierung einer Betätigungshaptik oder Betätigungsakustik. In den Kapiteln 3.3 bis 3.5 werden die in der Forschung bisher erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse zur Haptik und Akustik unterschiedlicher Autoren aufgezeigt.

3.1 Messung von Kraft und Drehmoment mittels Messrobotiksystem

Zur messtechnischen Erfassung von Kraft-Weg- und Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinien werden Messrobotiksysteme eingesetzt (vgl. [ANGUELOV 2009], [SPINGLER 2011] und [PAULIG ET AL. 2011]). „Der Kraft-Wegverlauf $F(x)$ stellt die zentrale Beschreibung von translatorischen Bedienelementen dar“ [REISINGER & WILD 2008, S. 127]. Bei rotatorischen Bedienelementen stellt die Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie das Synonym dazu dar [REISINGER & WILD 2008, S. 131]. Vorteile gegenüber einfachen Handmessungen mittels Kraftdose sind die hohe Messgenauigkeit sowie die Reproduzierbarkeit der Messung. Durch die Darstellung des Kraft- bzw. Momenten-Verlaufs über den Weg bzw. Drehwinkel lassen sich neben Maximalkräften/-momenten gesamte Verläufe einer Betätigung darstellen, inklusive Flankenwinkel, Kraftsprünge/Rasten oder Stick-Slip-Effekte. Die Möglichkeit zur gezielten Parametervariation wird so erreicht. Nicht dargestellt werden können dynamische Parameter wie Massenträgheit oder Dämpfung [ZHOU ET AL. 2014, S. 178], die allerdings auch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen.

Das verwendete Messrobotiksystem besteht im Grunde aus einem Sechs-Achs-Knickarm-Industrieroboter und einem angeflanschten Sechs-Achs-Kraft-Moment-Sensor, kurz FT-Sensor genannt (englisch *Force-Torque*). Für die jeweilige Messaufgabe kann auf der Werkzeugseite des Sensors eine Ausrüstung unterschiedlicher Messtaster, Spannbacken oder formschlüssige Kappen erfolgen (vgl. Bild 3.1). Eine Messung der aufgebrachten Lasten erfolgt mit Echtzeit-Darstellung in allen sechs Freiheitsgraden der Kräfte F_x , F_y , F_z und Momente M_x , M_y , M_z . In der grafischen Darstellung wird in der Regel der resultierende Kraftvektor F_{absolut} angegeben. Zur Steuerung des Roboters und zur Durchführung des Messvorgangs wird eine spezielle Software (RobFlow 2.1.5) verwendet.

Soll nun ein Bedienelement vermessen werden, muss das Prüfobjekt auf dem Messtisch vor dem Roboterarm fixiert werden. Hierzu können beispielsweise Spannelemente

mit/ohne Schlitten und mit/ohne Spannnadeln zur Anpassung an die Bauteilgeometrie verwendet werden. Bei Bauteilen mit komplexer Kinematik ist gegebenenfalls eine eigene Bauteilaufnahme notwendig, damit durch das Einspannen keine ungewollte Beeinträchtigung der Betätigungskraft oder des Stellweges durch Klemmung erzeugt wird. Nach Fixierung des Prüfobjekts werden dem Roboter mittels der Software mehrere Punkte angelernt. Dadurch ist ein sicheres Anfahren an den Griff oder die Betätigungsfläche gewährleistet. Bei der Rückfahrt in die Ausgangsposition soll so eine Kollision mit dem Bauteil verhindert werden. In der Regel ist zur Sicherheit eine globale Abschaltkraft hinterlegt, um Unfälle durch ungünstige Trajektorien zu vermeiden. Ab dem letzten Annäherungspunkt wird eine Messtrajektorie programmiert, die bis zum Erreichen eines definierten Stellweges oder einer definierten Kraft automatisiert ausgeführt wird. Idealerweise ist durch günstige Ausrichtung des Bauteils nur in eine Richtung translatorisch zu verfahren bzw. die Drehung um nur eine Achse erforderlich.

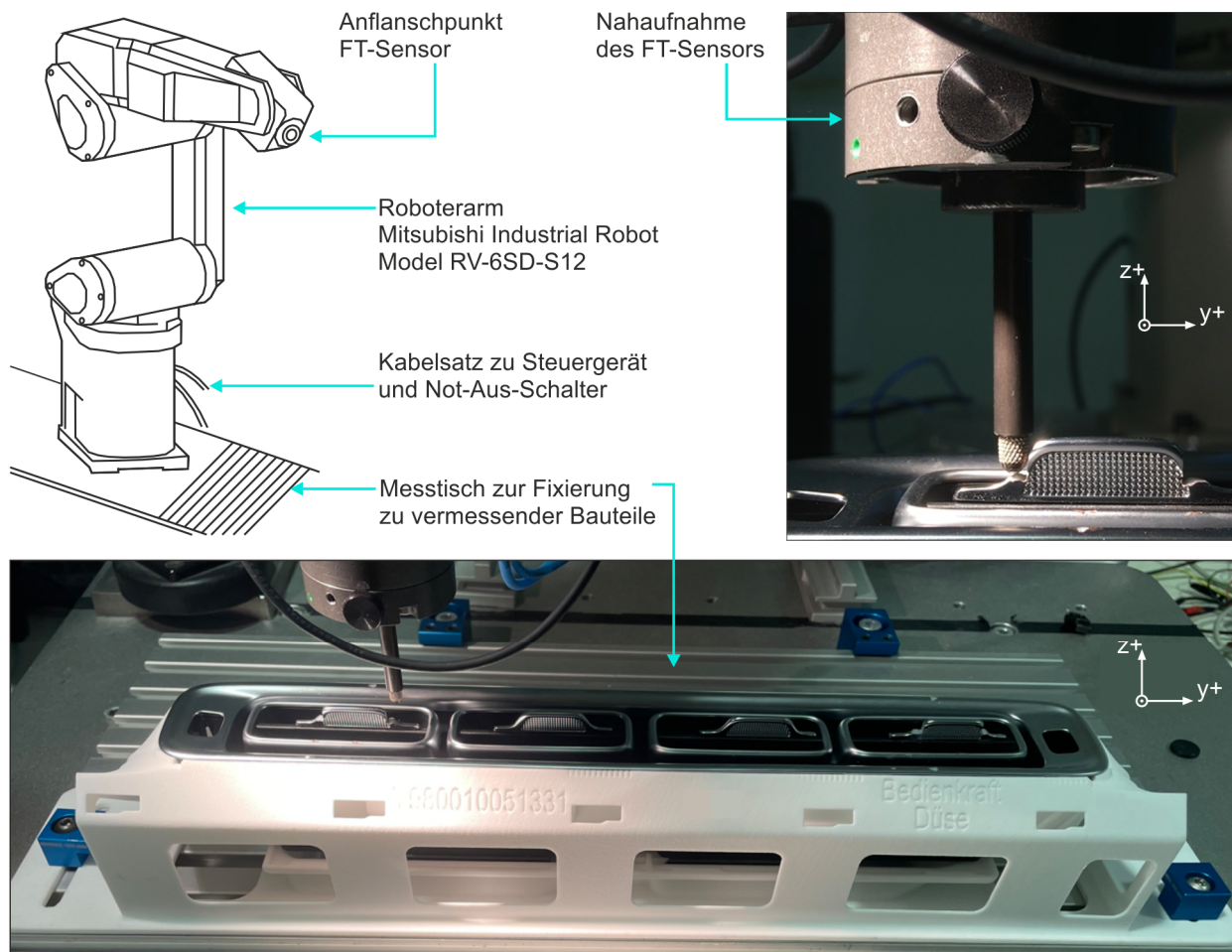


Bild 3.1: Darstellung der unterschiedlichen Komponenten des Robotersystems

Eine günstige Ausrichtung des Prüfobjekts ist beispielsweise, wenn eine Trajektorie für einen Schiebegriff nur nach y^+ erfolgen muss (vgl. Bild 3.1), oder die Betätigung eines Tasters geradlinig von oben nach unten in Richtung z^- erfolgt (vgl. Kapitel 5.3). Es ist

darauf zu achten, dass die Bewegungsrichtung des Messtasters der Betätigungsrichtung entspricht und senkrecht zur Betätigungsfläche angreift. Querkräfte sind zu vermeiden und erfordern gegebenenfalls das Abfräsen von gewölbten oder konischen Formen. So ist beispielsweise in Bild 3.1 oben rechts dargestellt, wie das ursprünglich trapezförmige Griffelement abgefräst wurde, um eine Fläche senkrecht zum Messtisch zu erzeugen. Bei Messtrajektorien, die als Rotation ausgeführt werden, ist das Ausfluchten mit der Drehachse des Bauteiles von wesentlicher Bedeutung. Zusätzlich, zur Vermeidung von Lastmomenten auf anderen Achsen als der Drehachse, kann eine Feder eingesetzt werden, deren elastische Verformung um die zu messende Rotationsachse mittels einer Sicherung unterbunden ist (vgl. Kapitel 5.2).

Die Messgeschwindigkeit hat ebenso Einfluss auf die Messung. ANGUELOV [2009, S. 50] nennt als optimale Messgeschwindigkeit 0,5 mm/s für Taster bzw. 5,0 °/s für Drehsteller, um Verfälschung aus Fliehkräften zu unterbinden. Beim Verfahren mit 0,5 mm/s würde eine Messung von $s = 30$ mm Stellweg eine Minute dauern. Eigene Versuche zeigen, dass bei Geschwindigkeiten < 10 mm/s nur geringe Abweichungen im Zehntelbereich eines Newton auftreten. Beim translatorischen Verfahren eines Schiebegriffs ergeben sich mit höher Geschwindigkeit geringe Kräfte. Bei der Messung von Kinematikbauteilen mit Zahnrädern resultiert eine höhere Messgeschwindigkeit in größeren Amplituden aufgrund der Verzahnung, da die größere Energiezufuhr selbige verstärkt. Entscheidend ist, dass dieselbe Last immer die gleichen Messwerte ausgibt. Die Reproduzierbarkeit sollte durch konstante Messgeschwindigkeiten gewährleistet sein. Die Reproduzierbarkeit ist die Differenz zwischen den gemessenen Werten, wenn jedes Mal die gleiche Last aufgebracht wird (vgl. [DIN ISO 5725-1 1997]). Bei Messungen im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit wurde translatorisch mit 5,0 mm/s und rotatorisch mit 5,0 °/s verfahren bei einer Beschleunigung von $\pm 5,0$ mm/s² bzw. 50 °/s².

Eine exemplarische Messung zeigt Bild 3.2, inklusive Messaufbau und das Ergebnis der Belastung einer Zugfeder. Für die Zugfeder RZ-024 aus Stahldraht [DIN EN ISO 6931-1 2020] des Herstellers Fa. Gutekunst gibt es von Herstellerseite neben der Angabe der Federrate $R = 0,013$ [N/mm], ein Kraft-Weg-Diagramm mit Federkennlinie [GUTEKUNST 2023]. Zur Validierung des Messsystems wurde ein Exemplar eben jener Feder einseitig fixiert und parallel zum Messtisch auf Zug belastet (vgl. Bild 3.2). Etwa alle 7 ms werden die Koordinaten des Roboterarms sowie die Lasten aller Achsen unter Zeitangabe aufgezeichnet und in einer CSV-Textdatei als resultierende Messdaten tabellarisch erfasst. In der Folge lässt sich der Funktionsgraph von F_{absolut} [N] über die zurückgelegte Distanz [mm] grafisch darstellen. Im Graphen von Bild 3.2 ist zu erkennen, dass eine lineare Federkennlinie ohne größere Artefakte oder periodischen Schwankungen aufgezeichnet

wurde. Beim Vergleich der ermittelten Federrate von $R = 0,012$ mit der des Herstellers ist eine auf Grund der Messtechnik oder der Toleranzen bedingte Abweichung von $0,0015$ N/mm oder etwa 10 % festzustellen. Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass ein zuverlässiges Messwerkzeug mit geringer Messabweichung zur Verfügung steht.

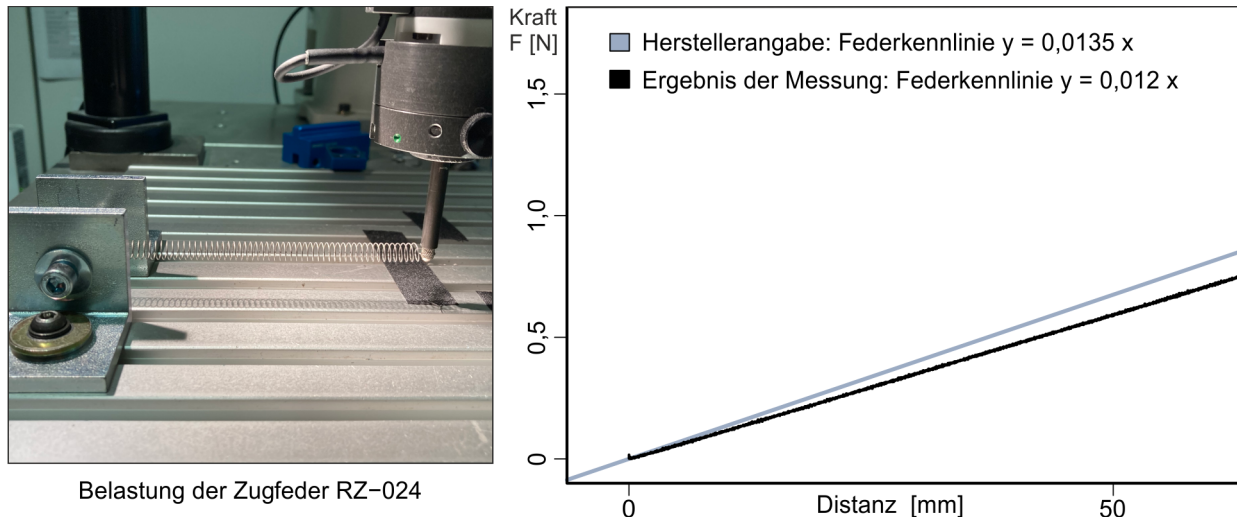


Bild 3.2: Belastung einer Zugfeder und Darstellung der Federkennlinie

Bei wiederholter Messung dieser gleichen Last mit identischen Messparametern war eine exakte Wiederholung des Graphen zu beobachten. Wenn der Rückweg, genannt Hysterese, ebenfalls gemessen wurde, ergab sich im gegebenen Beispiel ein minimaler Versatz der Geraden nach unten. Die geringen Kräfte beim Entlasten resultieren aus der reduzierten potenziellen Energie auf Grund von Dissipation. Die verrichtete Arbeit des Roboterarms bei identisch zurückgelegtem Weg ist in der Folge geringer. Fällt die Hysterese, im Gegensatz zum Beispiel der Zugfeder, mit deutlich geringerem Kraftniveau aus, kann dies ein Hinweis auf hohe Verluste durch Reibung im Bauteilsystem sein. Hieraus lassen sich womöglich Nachteile hinsichtlich Alterung und Störgeräusche über die Nutzungsdauer prognostizieren.

3.2 Stand der Technik manuell-mechanischer Bedienelemente

In Bild 3.3 sind exemplarisch unterschiedliche mechanische Bedienelemente eines Pkws abgebildet und beschrieben. Zusätzlich ist die Betätigungsrichtung farblich markiert. Es wird außerdem deutlich, dass mechanische Bedienelemente überwiegend zur Erledigung tertiärer Fahraufgaben verwendet werden (vgl. Kapitel 2.2). „Tertiäre Fahraufgaben haben mit der eigentlichen Fahraufgabe nichts zu tun“ [BUBB 2015a, S. 23]. Mit diesen Aufgaben nimmt der Fahrer Einfluss auf thermischen Komfort, Information und Kommunikation oder sie dienen schlicht der Unterhaltung [BUBB 2015a, S. 23]. Ergänzend hierzu müssen Ablagen und Staufächer angeführt werden, die dem persönlichen Komfort zugeordnet werden können.

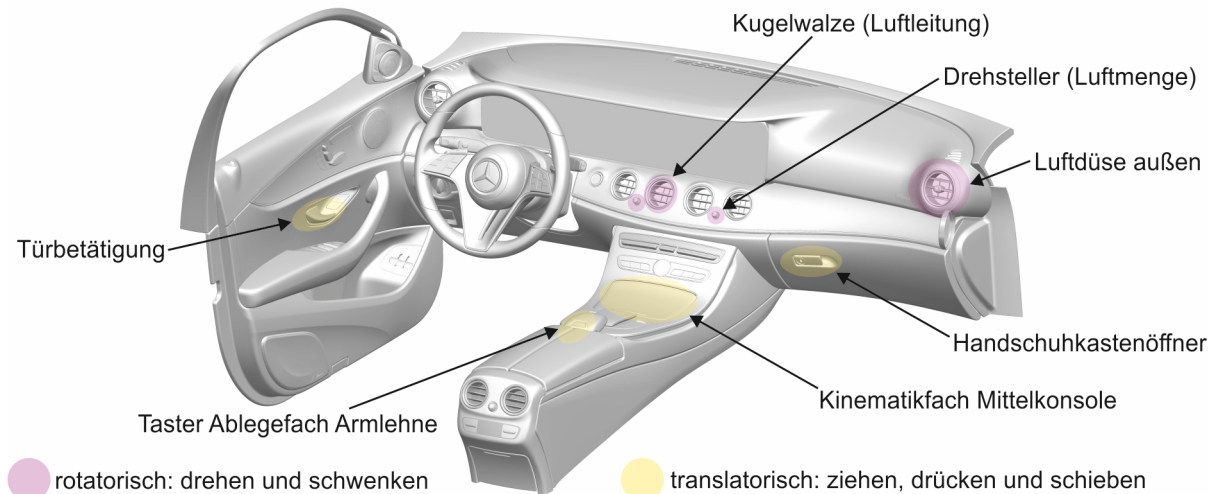


Bild 3.3: Mechanische Bedienelemente in einem Serienfahrzeugs des Herstellers Mercedes-Benz, Verkaufsbezeichnung E-Klasse [TONDERA ET AL. 2021a]

Tertiäre Fahraufgaben sollen den Fahrer nur mit geringen Abwendungszeiten beanspruchen. Durch die unmittelbare Kopplung ist dem Fahrer die Bedienung bei mechanischen Bedienelementen ohne Verzögerung möglich. Sofern der Fahrer künftig aus der Fahraufgabe entbunden ist, erhalten tertiäre Fahraufgaben eine gesteigerte Bedeutung. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass in Bild 3.3 das Lenkrad ein Beispiel für ein Bedienelement der primären Fahraufgabe ist. Der dahinter befindliche Lenkstockhebel ist ein Bedienelement der sekundären Fahraufgabe.

Nachfolgend werden Funktion und Aufbau ausgewählter mechanischer Bedienelemente gezeigt, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, um Betätigungsarten untersuchen zu können. Anhand von Messdiagrammen der Betätigung jener Bedienelemente kann der Zusammenhang aus technischer Gestaltung und der Generierung von Betätigungshaptik verdeutlicht werden.

3.2.1 Betätigungsart Schieben am Beispiel einer Luftdüse

Bedienelemente zum Schieben sind dadurch gekennzeichnet, dass „*sie durch Einleitung einer Kraft in einer Richtung bewegt werden und so lange in der eingestellten Position verharren, bis sie in gleicher Richtung weitergeschoben oder durch Änderung der Kraft-richtung in die Ausgangsstellung oder eine beliebige andere Zwischenstellung zurückbewegt werden*“ [SCHMIDTKE 1989, C-9.3.6, S. 1]. Je nach Formgebung des Griffelements können Finger-, Knopf- und Griffschieber unterschieden werden [EBD., S. 1].

Nachfolgend werden ausschließlich Griffschieber am Beispiel einer Luftdüse aus dem Pkw-Innenraum betrachtet. Als Teil des Klimasystems erfüllen Luftdüsen die Funktion der Verstellung der Luftrichtung oder Luftmenge bei der Ausströmung in den Fahrzeuginnen-

raum. Die am Klimakasten konditionierte Luft ist das Transportmedium für die erforderliche Wärme- und Stoffübertragung, und es wird zwischen Außen- und Umluftbetrieb unterschieden [GROßMANN & BÖTTCHER 2020, S. 35]. Um die individuellen Komfortanforderungen der Nutzer erfüllen zu können, kann so bspw. zugfreier, diffuser Luftstrom oder direkt mit hoher Luftmenge angeblasen werden. Per Schieben erreicht ein Nutzer bspw. die Ausrichtung auf die Seitenscheibe, um Beschlagfreiheit zu garantieren. Hierzu werden zur entsprechenden Luftablenkung die mit dem Schiebegriff gekoppelten Vertikal-Lamellen rotiert. Betätigung mechanischer Bedienelemente mittels Griffelement kann als Stellen mit und ohne Raste erfolgen (vgl. Kapitel 2.2.2).

Bei gewöhnlichen Lamellendüsen kann der Schiebegriff außerdem von oben nach unten geschwenkt werden zur Verstellung der Horizontal-Lamellen. Neben dem Schwenken wird bei einigen Konzepten der Schiebegriff auch zur Funktion des Setzens der Luftmenge auf Null eingesetzt, wenn die Vertikal-Lamellen bis zur Schließung rotiert werden. Für die Dimensionierung eines Schiebegriffs gibt SCHMIDTKE [1989, C-9.3.6, S. 3] als optimale Länge und Breite für einen Finger-Zufassungsgriff 20 x 50 mm an. Bild 3.4 zeigt exemplarisch eine Luftdüse mit Schiebegriff. Die gängige Betätigung erfolgt mittels Zufassungsgriff durch Daumen und einen oder mehrere Finger (vgl. Kapitel 2.2.2). Beim Schieben erfolgt eine mittelbare Kraftübertragung per Reibschluss. Neben der Gestaltung des Griffelements haben insbesondere mechanische Eigenschaften wesentlichen Einfluss auf die Wertanmutung. Die Steuerung der Betätigungskraft kann bspw. über eine Blattfeder zwischen Griff und Horizontal-Lamelle erreicht werden (vgl. Bild 3.4 rechts). Befindet sich eine Nut auf der Horizontal-Lamelle, rastet die Feder hier ein. Zum Ausrasten aus der Nut wird eine erhöhte Betätigungskraft erforderlich sein. Die dadurch erzeugte Haptik während der Betätigung wird an ausgewählten Merkmalen der Kraft-Weg-Kennlinie in Bild 3.4 erläutert, analog den Beschreibungen von REISINGER [2009, S. 32f. und S. 110]. Gleichzeitig gibt REISINGER [2009, S. 119] zu bedenken, dass die Benennungen der unterschiedlichen Darstellungen stark schwanken können und daher nach Möglichkeit Größenbezeichnungen eingeführt werden sollen, die an der jeweiligen Funktion der Punkte orientiert sind.

Die Messung von Luftdüse A erfolgte vom linken Endanschlag über den gesamten Stellweg s_1 [mm] bis zum rechten Endanschlag. Der Endanschlag ist in einer Kraft-Weg-Kennlinie charakterisiert durch einen sehr steilen Anstieg der Kraft F [N]. Auch die zuvor erwähnte (Mittel-)Raste ist im Diagramm erkennbar. Beim Einrasten der Feder in die Nut ist ein Kraftabfall zu beobachten, auch fallende Raste genannt. Für die Ausrastung aus der Nut ist die zu F_B zusätzliche Kraft F_A erforderlich. Die Raste kann auch als Kraftsprung in % beschrieben werden. Ein Kraftsprung muss eine gewissen Schwelle überschreiten,

um als impulshaft wahrgenommen zu werden [REISINGER 2009, S. 214]. Die Kraft F_B [N] definiert den vom Bediener notwendigen Kraftaufwand, um den Schiebegriff zum Endanschlag zu bewegen [GLOHR 2018, S. 35]. Sie resultiert aus der Überwindung aller Reaktionskräfte des Bauteilsystems beim Gleiten des Schiebegriffs. Neben der Federkraft ist im vorliegendem Anwendungsfall insbesondere die Gleitreibung im Lager der Lamellen gemeint. Die Bestimmung von F_B kann bspw. durch das Ablesen am Graphen erfolgen. Außerdem ist es möglich, den arithmetischen Mittelwert von F_B in den jeweilig relevanten Abschnitten rechnerisch anhand der Messdaten zu ermitteln. Toleranzbedingt wird es bei realen Bauteilen stets zu Abweichungen vom Soll-Wert kommen. Die Einhaltung einer vergebenen Toleranz stellt ein Wertigkeitskriterium dar.

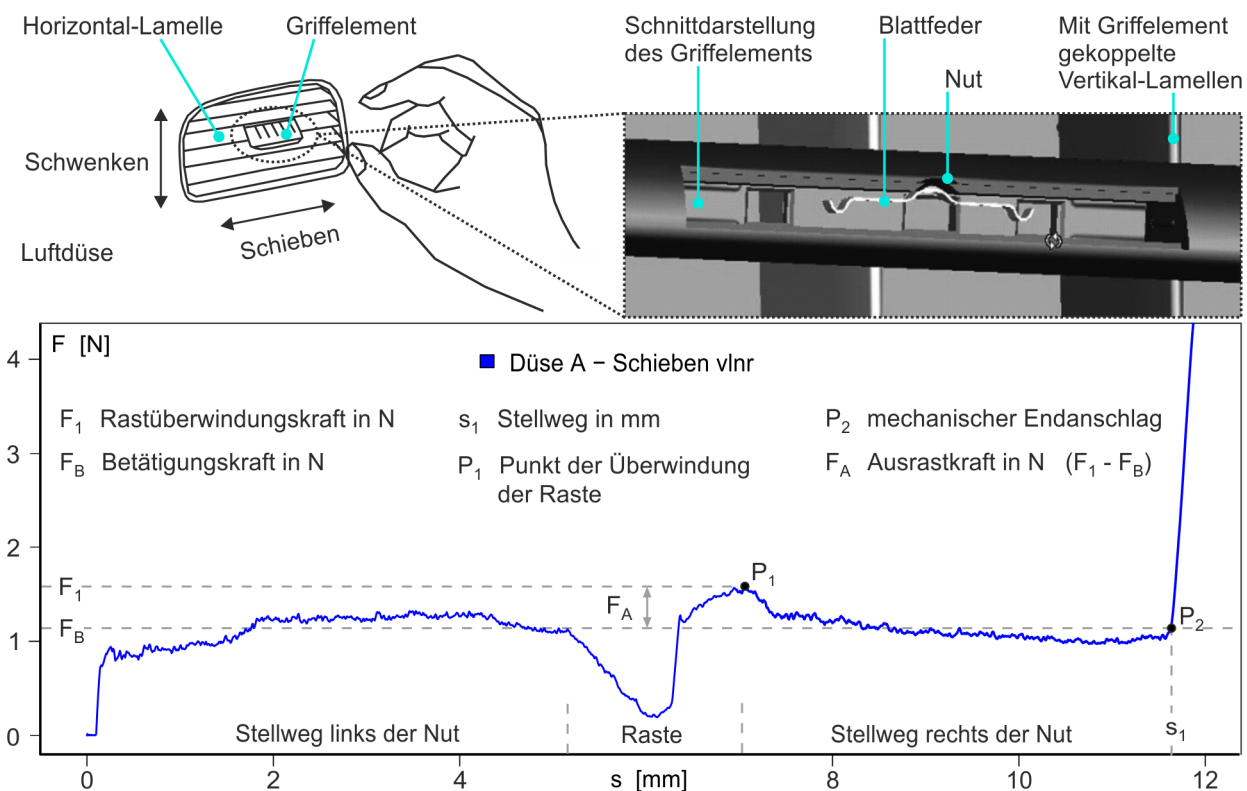


Bild 3.4: Exemplarische technische Gestaltung und gemessene Kraft-Weg-Kennlinie der Betätigung Schieben am Beispiel einer Luftdüse

Nach SCHMIDTKE [1981, S. 366f.] hat die Coulombsche Reibung gleichermaßen für translatorische als auch rotatorische Stellteile schädlichen Einfluss auf die Regelleistung, operationalisiert durch Einstellzeit und Fehlerquote. Als Grund kann die Nichtlinearität der Gleitreibung, also die Unabhängigkeit von der Geschwindigkeit der Betätigung, genannt werden. Weiterhin führen hohe Reibkräfte bei Umkehr der Bewegungsrichtung zum kurzzeitigen Verharren im Umkehrpunkt bis die Haftreibung überwunden ist [SCHMIDTKE 1981, S. 367]. Der nachteilige Effekt gilt insbesondere bei Bedienelementen mit geringer Eigenmasse und kurzem Stellweg.

Weitere mechanischen Eigenschaften, grundsätzlich abhängig von Konstruktionsprinzip und Materialwahl, die ebenfalls Einfluss auf die Regelleistung haben, sind mechanisches Spiel und Massenträgheit [SCHMIDTKE 1981, S. 367-370]. Ein mechanisches Spiel wäre im Kraft-Weg-Verlauf erkennbar durch eine zurückgelegte Distanz [mm] ohne Kraftanstieg [N] und ist ebenso zu vermeiden. Eine Zunahme des Spiels vermindert die Regelleistung [SCHMIDTKE 1981, S. 367]. Es ist davon auszugehen, dass die subjektive Wahrnehmung durch Spiel ebenso beeinflusst wird [KÜHNER 2013, S. 124].

Eine erhöhte Massenträgheit bei Bedienelementen *„drückt sich durch eine große Zeitkonstante in der Übertragungsfunktion aus und behindert schnelle Steuer- und feinfühligte Korrekturbewegungen“* [SCHMIDTKE 1981, S. 369]. Wie bei zu großer Haftreibung und entstehendem Stick-Slip-Effekt erschwert eine erhöhte Massenträgheit das schnelle und präzise Positionieren des Schiebegriffs. Bei kurzen Stellwegen könnte der Nutzer in der Folge ungewollt am Endanschlag anschlagen.

Mittels viskoser Reibung kann ein geschwindigkeitsproportionaler Betätigungswiderstand erzeugt werden [SCHMIDTKE 1981, S. 370]. Folglich führt der Parameter zu einer Dämpfung. Insgesamt gibt es für Bedienelemente nur sehr wenig dedizierte Gestaltungsempfehlungen bezüglich der Dämpfung. Eine positive Wirkung viskoser Reibung könnte der Ausgleich unbeabsichtigter Handbewegungen sein [SCHMIDTKE 1981, S. 370]. Dynamische Einflussgrößen wie Coulombsche Reibung, Dämpfung und Massenträgheit erfahren in der vorliegenden Arbeit keine Betrachtung und werden stets konstant gehalten. An dieser Stelle kann an KÜHNER [2013] verwiesen werden.

Ein beispielhafter Kraft-Weg-Verlauf, der sowohl mit Blick auf Regelleistung als auch Wertigkeit nicht ideal ist, zeigt Bild 3.5. Auf den ersten Blick ist die Kennlinie der Düse B gekennzeichnet durch zu hohe Betätigungskräfte F_B und einer zu hohen Ausrastkraft F_A . Bei einer Amplitude von größer 4 N ist davon auszugehen, dass der Nutzer nach der Ausrastung unkontrollierbar bis zum Endanschlag schiebt. Weiterhin verschlechtert die nichtlineare Kennlinie der Düse B die Regelleistung [SCHMIDTKE 1981, S. 369]. Die Asymmetrie ist außerdem hinsichtlich der Wertigkeit nachteilig. Ein Schieben von rechts nach links hat folglich einen anderen Verlauf als von links nach rechts (vgl. Bild 3.5 Düse B). Insbesondere beim Stellen mit und ohne Raste mittels Schieben würde man konstante Betätigungskräfte F_B erwarten. Das durchschnittliche Kraftniveau der Düse B ist rechts der Raste höher als links davon. Das Ruckgleiten bzw. der Haftgleiteffekt zu Beginn der Betätigung von Düse B kann sich nicht nur als haptische, sondern auch als akustische Auffälligkeit manifestieren. Für die Wahl eines Toleranzbandes, in dessen Bereich Amplituden des Stick-Slip-Effekts als noch in Ordnung anzusehen sind, wäre das Wissen um psychophysische Wahrnehmungsschwellen hinsichtlich Stick-Slip hilfreich.

Die Amplituden der Kennlinie Düse B in der Lage zwischen 1 bis 2 mm von bis zu 0,8 N kann allerdings gesichert als zu hoch und wahrnehmbar, folglich minderwertig, bewertet werden.

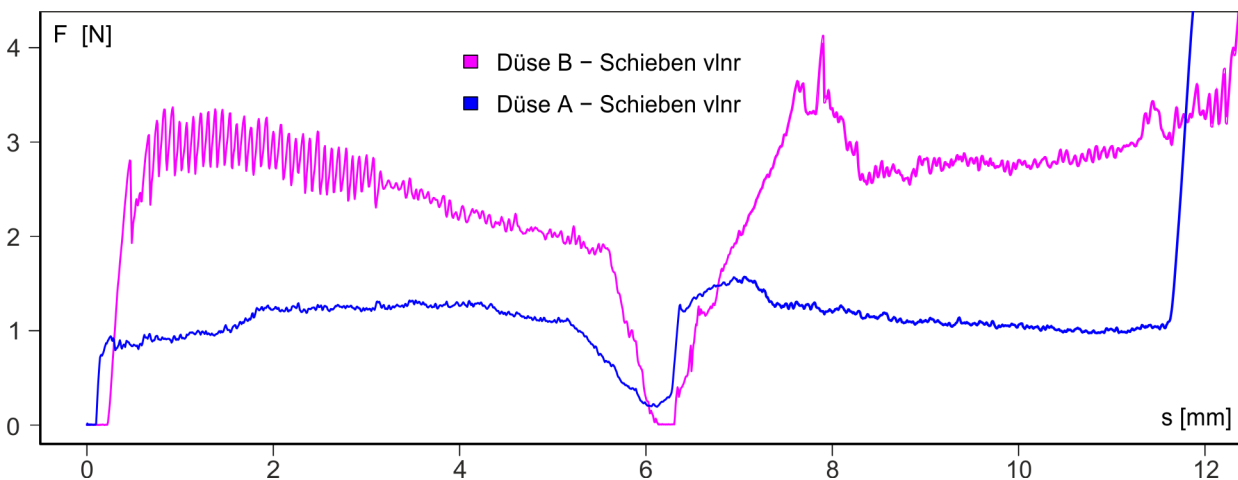


Bild 3.5: Kraft-Weg-Kennlinien zweier Luftdüsen mit unterschiedlichem Reifegrad

3.2.2 Betätigungsart Drehen am Beispiel einer Luftdüse

„Bedienelemente zum Drehen dienen zur Einleitung stetiger und unstetiger Drehbewegungen“ [VDI/VDE 2258 1987, S. 11]. Vorteile von Drehbedienelementen wie bspw. Drehknöpfe sind, dass sie einen geringen Platzbedarf für Montage und Bedienung erfordern [SCHMIDTKE 1989, C-9.4.1, S. 1]. Sie sind weit verbreitet und finden vorwiegend Anwendung, wenn nur sehr geringe Drehmomente aufzubringen sind [SCHMIDTKE 1989, C-9.4.1, S. 1]. Analog der technischen Beschreibung nach ZEILINGER [2005] unterscheidet REISINGER [2009, S. 27] in kontinuierliche Drehtaster und in rastende Drehschalter. Für den Begriff Drehschalter verwendet REISINGER [2009, S. 26] synonymhaft den Begriff Drehsteller. Große Verbreitung findet ferner auch der Begriff Drehknopf (vgl. [VDI/VDE 2258 1987], [SCHMIDTKE 1989, C-9.4.1] [DIN EN 894-3 2010] und [SCHMIDTKE & JASTRZEBSKA-FRACZEK 2013]). Für einen Drehknopf, ausgelegt auf einen Finger-Zufassungsgriff, gibt SCHMIDTKE [1989, C-9.4.1, S. 2] für Durchmesser und Höhe 25 mm als optimale Gestaltungsparameter an. Das optimale Drehmoment hierzu sei 3,5 Ncm [EBD., S. 2].

Ein beispielhaftes Bedienelement der Betätigungsart Drehen zeigt Bild 3.6. Es zeigt ein Luftdüsenkonzept, bei dem das Griffelement gedreht werden kann, um die Auslassklappen der Düse zu steuern. Die Funktion der Betätigung ist folglich die Regulierung der Luftmenge. Das Griffelement ist über eine Kardanwelle mit den Verschlussklappen im Übergang zum Luftkanal verbunden. Das Kardangelenkt ist erforderlich, damit mittels Griff die Rund-Düse zur Verstellung der Luftrichtung geschwenkt werden kann.

Ein Stift, an dessen Ende sich ein Silikonbett befindet (Mehrkomponenten-Spritzguss), dient als Silikonbremse an der Welle. Folglich hat die Federvorspannung der um den

genannten Stift gewickelten zylindrischen Schraubenfeder Einfluss auf das aufzubringende Drehmoment zur Betätigung (vgl. Bild 3.6). Die erzeugte Reibung zwischen Silikonbremse und Welle verhindert zu leichtes Drehen ohne merklichen Widerstand und sichert gegen eine Selbstverstellung ab. Unterschiede, bedingt durch Bauteiltoleranzen, werden außerdem so besser kontrollierbar. Die Silikonbremse bildet einen Ansatz zur Umsetzung der Drehmomente-Spezifikation in Abhängigkeit der Hebellänge. Die Hebellänge, spezifischer der Durchmesser des Griffelements, hat Einfluss auf den aufzubringenden Aufwand des Nutzers. Das einzuleitende Betätigungs-drehmoment M_B einer spezifischen Düse ist jedoch unabhängig von der Hebellänge stets konstant. Es wird stets dasjenige Drehmoment übertragen, das erforderlich ist, um die Reibung im System zu überwinden und die Welle ins Gleiten, also in eine Rotation, zu versetzen.

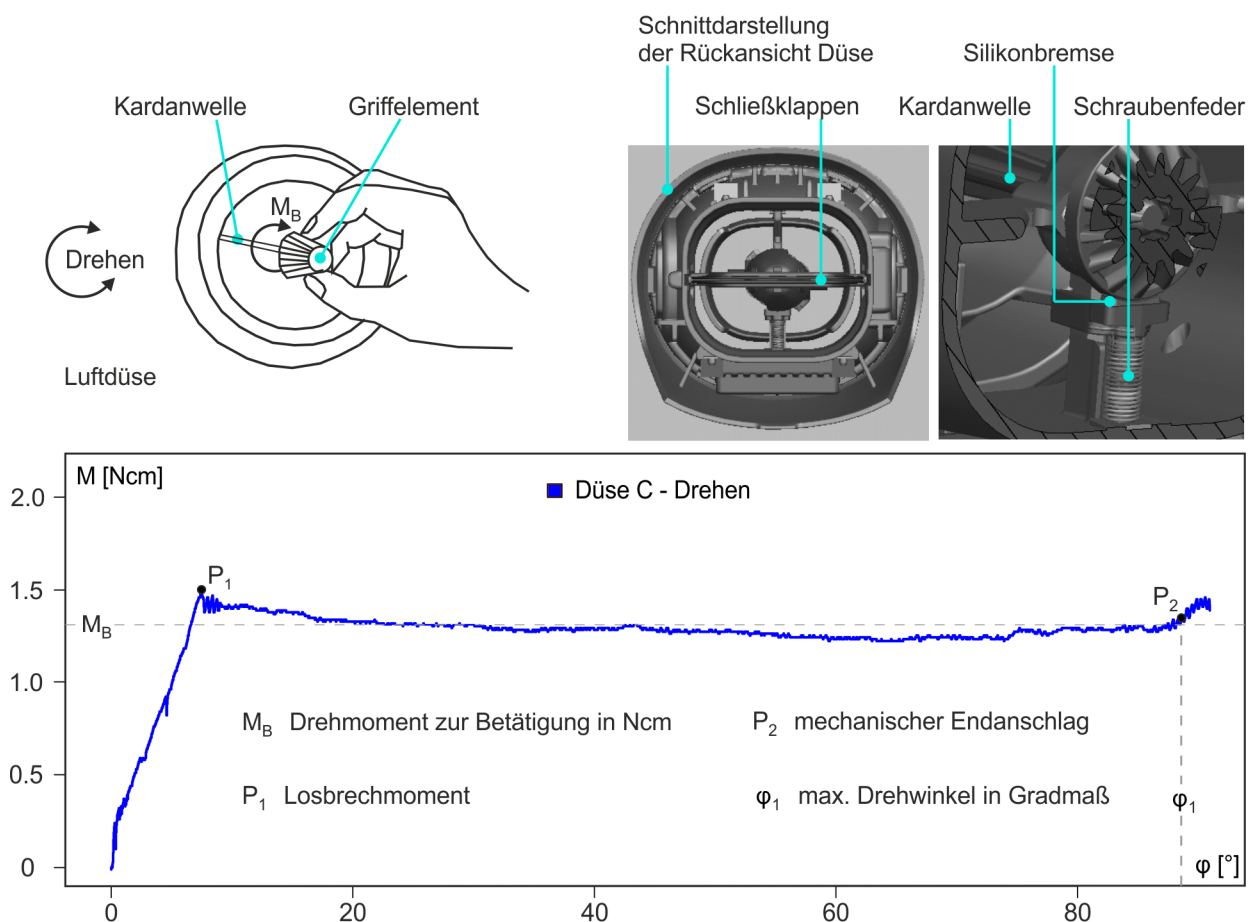


Bild 3.6: Exemplarische technische Gestaltung und gemessene Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie der Betätigung Drehen am Beispiel einer Luftdüse

In der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie der Düse C in Bild 3.6 ist zu erkennen, wie das erforderliche Drehmoment M_B zum Einleiten einer Drehbewegung aufgebaut werden muss. Nach der Überwindung des Losbrechmoments findet die Bewegung über den zurückgelegten Drehwinkel φ [°] statt. Der Drehwinkel φ_1 bis zum mechanischen Endan-

schlag beträgt etwa 90° , mit dem das Verschließen der Schließklappen erreicht ist. Bezüglich des Drehwinkels merken BAUMANN & LANZ [1998, S. 41] an, dass bis zu 120° mit der Hand ohne Umgreifen durchlaufen werden können. Das Drehmoment M_B zur Betätigung ist unter Berücksichtigung von Messfehlern und Toleranzen konstant, nicht zuletzt dank der Silikonbremse. Beim kontinuierlichen Stellen ohne Federzentrierung zur Mitte entspräche dies der Nutzererwartung. Ein starker Abfall des Drehmoments über den Drehwinkel hinweg hätte voraussichtlich einen nachteiligen Effekt auf Regelleistung und Wertigkeit des Bedienelements. Eine Besonderheit dieser Kennlinie stellt die Abwesenheit von jeglichen Rasten dar. REISINGER [2009, S. 112] merkt an, dass die überwiegende Mehrheit aller Bedienelemente einen Kraftsprung haben, wenngleich sie in Höhe und Form stark variieren. Gestalterisch denkbar wären am vorliegenden Anwendungsfall Rasten an den jeweiligen Endanschlägen, um die Systemzustände *offen* und *verschlossen* haptisch wie akustisch zu untermauern. Aus psychophysischer Sicht ist insbesondere der Zusammenhang aus Hebellänge und aufgebrachtem Drehmoment mit Blick auf Nutzerpräferenzen relevant. Denn ein Nutzer kann bei größerem Hebel mit geringerem Kraftaufwand das gleiche Drehmoment übertragen. Eine Spezifikation rein auf das Drehmoment ist aus ergonomischer Sicht nicht ausreichend.

3.2.3 Betätigungsart Drücken am Beispiel eines Ablagefaches

„Tasten werden bei Einleitung einer Kraft durch Druck in eine Richtung bewegt und kehren nach Aufhebung der eingeleiteten Kraft durch Federwirkung in die Ausgangsstellung zurück“ [VDI/VDE 2258 1987, S. 5]. Druckschalter und Drucktaster sind Stellteile, die sehr schnell, sicher und mit nur geringem Kraftaufwand und einer gleichermaßen geringen Aufmerksamkeitszuwendung betätigt werden können [SCHMIDTKE 1989, C-9.3.3, S. 1]. *„Die Bedienbarkeit wird durch die Ausbildung der Tastenflächen, die Größe des Tastendruckes und des Tastenhubes (Weg bis Anschlag) beeinflusst“* [VDI/VDE 2258 1987, S. 5].

Für die optimale Auslegung von Drucktastern mittels 1-Fingerbetätigung gibt SCHMIDTKE [1989, C-9.3.3, S.2] einen Durchmesser von 12 mm, Stellweg bzw. Tastenhub von 6-8 mm und eine Schaltkraft von 4 N an. SCHMIDTKE & JASTRZEBSKA-FRACZEK [2013, S. 90] bringen Empfehlungen für Drucktaster mit Fingerbetätigung mit einem Durchmesser von ≥ 10 mm, einem Stellweg von 3 bis 10 mm und einer Schaltkraft von 1 bis 7 N.

Einen exemplarischen Taster, der per Drücken betätigt wird, zeigt Bild 3.7. In dem gezeigten Anwendungsfall entriegelt der monostabile Taster einen geteilten Deckel eines Ablagefaches. Die Betätigungsfläche ist mit der Form-Oberfläche „Rändelung“ gestaltet, um sie als solche zu kennzeichnen. Der Taster wird mit einem oder zwei Fingern, alternativ mittels Daumen, senkrecht in Richtung z- betätigt. Es erfolgt eine unmittelbare Kraftübertragung mittels Formschluss. Im Führungsstück unmittelbar unterhalb des Tasters

bewirkt eine integrierte zylindrische Schraubenfeder, dass der Taster nach erfolgter Betätigung in seine Ausgangstellung zurückkehrt. Das Federelement hat folglich Einfluss auf die Kraft-Weg-Kennlinie des Drückens. Die beiden Klappdeckel sind ebenfalls mit vorgespannten Federn ausgerüstet. Sie öffnen daher automatisch, sobald die haltenden Rasthaken freigeben. Sie öffnen daher automatisch, sobald die haltenden Rasthaken freigeben.

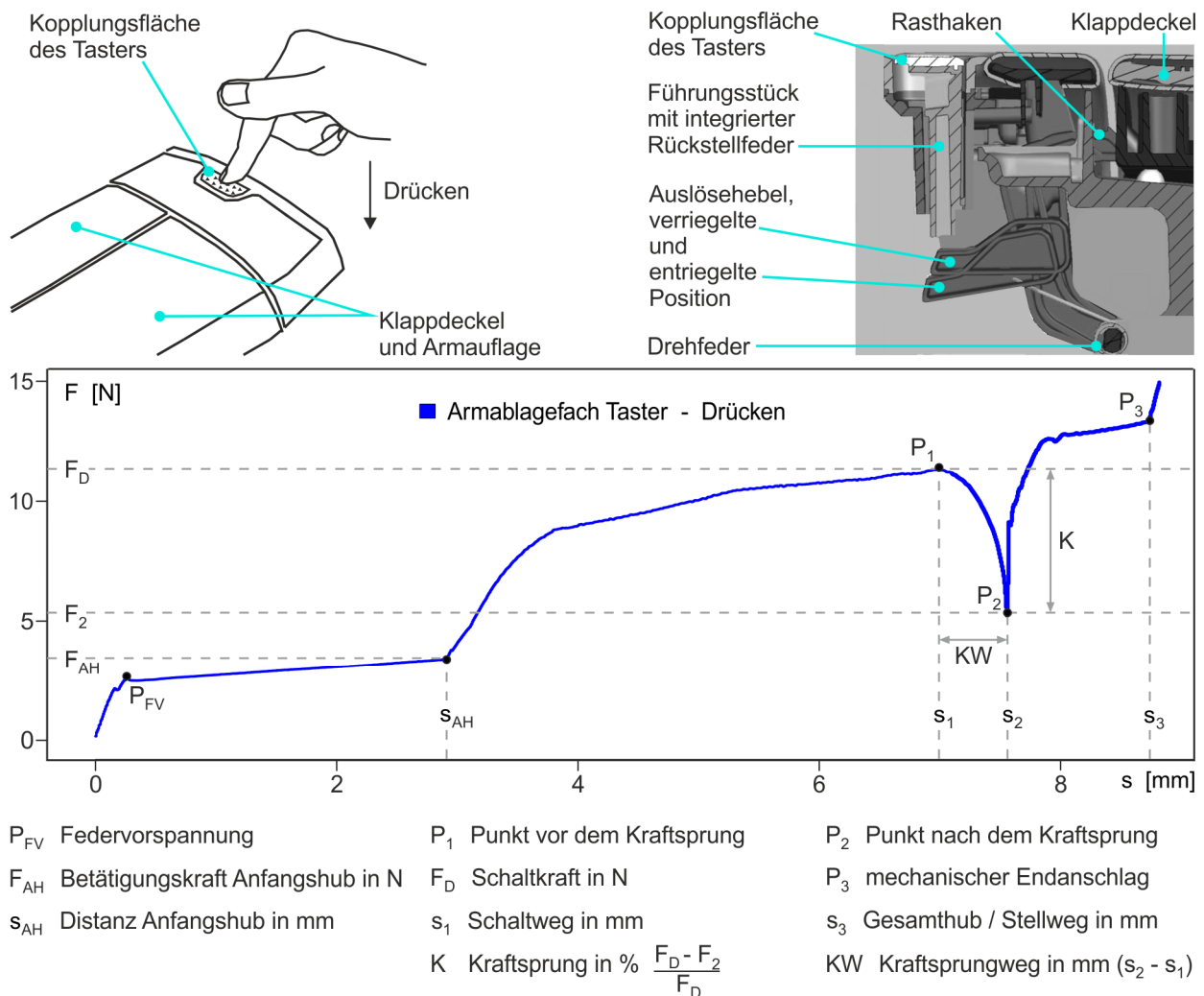


Bild 3.7: Exemplarische technische Gestaltung und gemessene Kraft-Weg-Kennlinie der Betätigung Drücken am Beispiel eines Entriegelungstasters

Beim Drücken des Tasters und des darunter befindlichen Führungsstückes kommt es zur Belastung eines Hebelarms der Rasthaken. Die Rasthaken inklusive der Auslösehebel sind in einer Drehachse schwenkbar gelagert mit Rückstellung durch eine Drehfeder. Beim Durchdrücken des Tasters kommt es in der Folge zu einer Freigabe der Klappdeckel durch die Rasthaken. Im oberen rechten Bereich von Bild 3.7 sind beide Stellungen der Auslösehebel dargestellt. Durch die Belastung der Auslösehebel kommt es zu einer Mischschaltung aus Reihen- und Parallelschaltung der Druckfeder zur Rückstellung des

Tasters und den beiden Drehfedern zur Rückstellung der Rasthaken. Die unterschiedlichen Federeinflüsse zeigen sich nach einer Messung charakteristisch im Kraft-Weg-Verlauf (vgl. Bild 3.7). Nach erfolgter Entriegelung wird durch die Federelemente ein Verschließen des Systems ermöglicht.

Analog den gängigen technischen Beschreibungen von Kraft-Weg-Verläufen translatorischer Bedienelemente nach REISINGER [2009, S. 110-112] muss zunächst ein Kraftanstieg der Federvorspannung (P_{FV}), auch Anfangswiderstand genannt, überwunden werden. Erst dann bewegt sich das Bedienelement. Die Federvorspannungskraft hat womöglich Einfluss auf die Wahrnehmung der „Tiefe“ eines Bedienelementes. Je höher die Federvorspannung ist, desto größer wird der Hub der Betätigung des Bedienelementes wahrgenommen [KOSAKA & WATANABE 1996].

Die anschließende Flanke des Anfangshubs (vgl. Bild 3.7 unten links) ist maßgeblich geprägt durch das Federelement zur Rückstellung des Tasters. Die zurückgelegte Distanz ist der Hub des Führungsstückes bis zum Auftreffen am Auslösehebel und damit die Kopplung zum eigentlichen Wirkteil. Bei Drucktastern bezeichnet REISINGER [2009, S. 111] die erste Flanke nach Überwindung der Federvorspannung als Leerhub, die sich aus Toleranzketten ergibt. Ob das Vorhandensein oder die Abwesenheit eines Anfangshubes bzw. Leerhubes das Werterlebnis des Drückens beeinflusst, dazu liegen kaum Untersuchungen vor.

Die folgende Flanke *Anstieg vor* führt bis zum Schaltweg s_1 . Die Form der Flanke kann konvex, konkav oder linear ausgeführt sein, allerdings sind auch hier kaum Arbeiten bekannt, die die Form untersucht haben [REISINGER 2009, S. 111]. Der zugehörige Funktionswert zu s_1 ist die Schaltkraft F_D , deren Überwindung die Entriegelung bedeutet. Das Maximum dieser Flanke stellt auch den Anfangspunkt P_1 des Kraftsprungs dar und dient als wesentlicher Parameter zur Spezifikation von Drucktastern (vgl. Bild 3.7 unten rechts). Der Kraftsprung K bezeichnet den schlagartigen Abfall der Kraft und kann mit Bestimmung von F_2 prozentual zu F_D referenziert werden. Die Flanke des Anstiegs nach dem Kraftsprung mündet im mechanischen Endanschlag (P_3) und begrenzt den Gesamthub des Tasters (s_3).

3.3 Relevante Forschungsarbeiten zur Betätigungshaptik

Insbesondere das Bediengefühl, mehr noch als das Sehen oder das Hören, hat im Zusammenhang mit Bedienelementen entscheidenden Einfluss auf das Qualitätsurteil des Nutzers (vgl. [ANGUELOV 2009], [BURNETT & IRUNE 2009] und [TONDERA ET AL. 2021b]). Es gibt eine Vielzahl an Forschungsarbeiten und -projekten, die sich mit der Haptik im Kontext von Bedienelementen beschäftigen. Von wesentlichem Interesse für die vorliegende

Arbeit sind Studien, welche die explizite Angabe technischer Parameter und deren Einfluss auf die Betätigungshaptik beinhalten. Eine Sammlung konkreter Gestaltungsempfehlungen für Betätigungshaptik von unterschiedlichen Autoren zeigen die Tabellen 3.1 und 3.2. Eine Abgrenzung erfolgt bezüglich translatorischer und rotatorischer Bedienelementen. Eine Vielzahl an Studien beschäftigt sich dabei mit Drucktastern und Drehstellern aus dem Kontext Pkw.

Zur Generierung der Betätigungshaptik können sogenannte Haptik-Simulatoren, das heißt mechatronische Systeme zur Erzeugung von variablen Haptik-Eindrücken, eingesetzt werden (vgl. [REISINGER 2009], [HUFENBACH ET AL. 2010], [PAULIG ET AL. 2011], [HUFENBACH ET AL. 2012], [HAMPEL 2011], [HATZFELD 2013], [KÜHNER 2013], [GRUBISIC ET AL. 2015], [GLOHR 2018] und [WINTERHOLLER 2019]). Bei Drehsteller-Simulatoren wird mittels Drehwinkelsensor, Drehmomentsensor, Gleichstrommotor und Motorsteuergerät ein Soll-Drehmoment positionsabhängig in Echtzeit errechnet und das entsprechende Gegenmoment eingeleitet. Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinien können so beliebig modelliert werden. Eine ausführliche Beschreibung eines rotatorischen Haptik-Simulators ist in der Arbeit von HAMPEL [2011, S. 23-33] zu finden.

Bei einem translatorischen Haptik-Simulator ist der Taster-Aufsatz mit einem Linearaktor und einem Positionsmesser verbunden. Auch hier sind Sensor und Aktor an ein Motorsteuergerät gekoppelt, und einzelne Wegpositionen werden mit dazugehörigen Reaktionskräften modelliert. [GLOHR 2018, S. 41]

Eine andere Vorgehensweise ist die Präsentation mehrerer realer Bedienelemente, die sich in einem oder mehreren technischen Merkmalen unterscheiden (vgl. [OSURAI ET AL. 1990], [BÖRSCHLEIN 1994], [WEIR ET AL. 2003], [ANGUELOV & SCHMAUDER 2006], [BURNETT & IRUNE 2009], [SONNLEITNER 2009], [GLOHR ET AL. 2015], [GLOHR 2018], [TONDERA ET AL. 2021a] und [TONDERA ET AL. 2021b]). Ein wesentlicher Grundsatz, den es zu beachten gilt, ist die experimentelle Versuchsplanung und die Orthogonalität der Faktoren. Sofern die Bewertung der Betätigungshaptik, das heißt die Wirkung, kausal auf ein messbares, haptisches Merkmal, das heißt die Ursache, zurückführen möchte, müssen Störeinflüsse konstant gehalten und Faktoren systematisch manipuliert werden [MYERS 2008, S. 37]. Das bedeutet, dass Bedienelemente sowie gegebenenfalls das dazugehörige Wirkteil baugleich und augenscheinlich identisch ausgeführt sein müssen und nur der zu untersuchende Faktor zu variieren ist. Wenn beispielsweise die Schaltkraft eines Drucktasters untersucht werden soll, jedoch neben der Schaltkraft auch Taster-Form und -Farbe geändert werden, ist die eindeutige Zuordnung des Probandenurteils unzulässig.

Bei Untersuchungen zu Auswirkungen technischer Parametern stellt sich grundsätzlich die Frage der Übertragbarkeit der Ergebnisse [REISINGER 2008, S. 40]. Speziell bei Bedienelementen im Kontext Pkw können sich unterschiedliche Kraft- und Drehmoment-Empfindungen ergeben in Abhängigkeit der Anordnung der Bedienelemente, oder wenn der Unterarm abgestützt wird. „Sollte kein Einfluss festgestellt werden, so kann von einer Übertragbarkeit der Ergebnisse und damit dem Vorhandensein der entsprechenden haptischen Konstanzleistung ausgegangen werden“ [REISINGER 2008, S. 41]. Für Drehsteller konnte REISINGER [2008] nachweisen, dass Probanden gleiche Drehmomente unabhängig von der Abstützungsart als gleich erkennen ($n = 29$). Auch die Lage des Bedienelements, im Versuch in der Instrumententafel und am Dachhimmel, führt zu keinem bedeutsamen Unterschied, wenngleich nur eine kleine Stichprobe untersucht wurde ($n = 14$). Die Versuchsergebnisse von KÜHNER ET AL. [2011] deuten darauf hin, dass sich auch Drucktaster in verschiedenen Einbaulagen gleich anfühlen ($n = 21$). Wenngleich der Mensch in der Lage ist, gleiche Bedienelemente als solche zu erkennen, müssen mit Blick auf Nutzerpräferenzen der Kontext und die Erwartungen der Nutzer dennoch beachtet werden (vgl. Kapitel 2.3).

Empfehlungen unterschiedlicher Autoren zu technischen Parametern für die Auslegung translatorischer Bedienelemente sind in Tabelle 3.1 in der Übersicht dargestellt. Mit hellblauer Markierung sind Werte unterlegt, die explizit auf eine Wertigkeit bzw. optimale Nutzerangepasstheit ausgelegt sind.

Quelle	Betätigungskraft [N]	Stellweg [mm]	Kraftsprung [%]
[ANGUELOV 2009, S. 127]	3,1 - 3,3	1,5 - 1,75	40 - 55
[BAUMANN & LANZ 1998, S. 38]	2,5 - 4,9	1,3 - 6,4	-
[DIN EN 894-3 2010, S. 33]	≤ 10	-	-
[GLOHR 2018, S. 139]	2 - 4	-	47
[NEUDÖRFER 1981, S. 95]	1,6 - 16	3,2 - 40	-
[OSURAI ET AL. 1990, S. 622]	2,4	-	-
[REISINGER 2009, S. 206f.]	3	0,5	33
[REISINGER & WILD 2008, S. 134]	3 - 5	0,4 - 2	-
[SCHMIDTKE 1989, C-9.3.3, S. 2]	4	6 - 8	-
[SCHMIDTKE & JASTRZEBSKA-FRACZEK 2013, S. 90]	1 - 7	3 - 10	-
[VDI/VDE 2258 1987, S. 5]	1 - 8	2 - 10	-

Tabelle 3.1: Gestaltungsempfehlungen für Bedienelemente der Betätigung Drücken

In einer der ersten bekannten Studien zu Drucktastern untersuchten OSURAI ET AL. [1990] mit $n = 10$ männlichen Probanden insgesamt 20 unterschiedliche Pkw-Drucktaster, die sich hinsichtlich Schaltkraft und Gesamthub unterschieden. Es zeigte sich, dass die Schaltkraft F_D (vgl. Bild 3.7) am stärksten mit dem subjektiven Eindruck *schwergängig* korrelierte und die am meisten präferierte Schaltkraft bei etwa 2,4 N lag. Zusätzlich zeigte die Verteilung der Probandenurteile, dass bei geringeren Kräften die Präferenz stärker abnahm als bei höheren Kräften.

Auch die Untersuchungen von REISINGER [2009, S. 208] ergaben, dass der subjektive Eindruck *schwergängig* maßgeblich von der Höhe der Schaltkraft beeinflusst wird. Weitere technische Parameter wie Schaltweg s_1 , Kraftsprung und Form der Flanke bis zum Schaltpunkt wurden von REISINGER [2009] untersucht. Grundsätzlich zeigten die Untersuchungen, dass die subjektive Bewertung *Gefallen* mit der *Wertigkeit* zusammenhängt. Der Hub des Tasters oder der Schaltpunkt zeigen keinen Einfluss auf die Wertigkeit [EBD., S. 210]. Wesentliche Bedeutung bei Drucktastern hat nach REISINGER [2009, S. 208] der Kraftsprung, bei dem eine gewisse Ausprägung zur Wahrnehmung des Schaltpunktes gewährleistet sein muss. Bei idealer Ausführung des Kraftsprungs von etwa 33 % zeigt sich ein Bezug zu *Präzision* und *Wertigkeit* [EBD., S. 208].

Gestaltungsempfehlungen für Drehbedienelemente sind gesammelt in Tabelle 3.2 dargestellt. Es wird hinsichtlich der Eingabeform *kontinuierlich* und *diskret* unterschieden (vgl. Kapitel 2.2.2). Bei diskreter Eingabeform ist die Drehmomentamplitude zur Überwindung einer Raste gemeint. Bei kontinuierlichen Drehstellern ist das konstante Drehmoment zur Betätigung angegeben (vgl. Bild 3.6). Es werden ausschließlich Werte gelistet, die sich auf eine Fingerbetätigung mittels Zufassungsgriff beziehen. Erneut sind Wertangaben mit explizitem Verweis auf eine Wertigkeit bzw. optimale Nutzerangepasstheit mit hellblauer Markierung gekennzeichnet.

Quelle	Eingabeform	Drehmoment [Ncm]	Durchmesser Griffelement [mm]
[ANGUELOV 2009, S. 128]	diskret	3 - 4	40 - 50
[BAUMANN & LANZ 1998, S. 41]	diskret / kontinuierlich	-	10 - 30
[BRADLEY 1969, S. 359]	kontinuierlich	-	44,5 - 63,5
[BULLINGER 1994, S. 222]	kontinuierlich	< 200	30
[DIN EN 894-3 2010, S. 33]	kontinuierlich	≤ 50	≥ 7
[GLOHR 2018, S. 138]	diskret	0,7 - 4,3	50
[GRUBISIC ET AL. 2015, S. 4]	kontinuierlich	20	50

Tabelle 3.2: Gestaltungsempfehlungen für Drehbedienelemente (Teil 1/2)

Quelle	Eingabeform	Drehmoment [Ncm]	Durchmesser Griffelement [mm]
[HAMPEL 2011, S. 136]	diskret	9	35
[NEUDÖRFER 1981, S. 98f.]	kontinuierlich	10 - 50	6,3 - 32
[REISINGER 2009, S. 150]	diskret	2,5	35,5
[REISINGER & WILD 2008, S. 122ff.]	diskret	≤ 3	7 - 50
[SCHMIDTKE 1989, C-9.4.2, S. 2]	kontinuierlich	15	30
[SCHMIDTKE & JASTRZEBSKA-FRACZEK 2013, S. 82]	kontinuierlich	2 - 5	≥ 15
[VDI/VDE 2258 1987, S. 11]	kontinuierlich	≤ 3	15
		≤ 5	30
[WINTERHOLLER 2019, S. 131]	diskret	9	35

Tabelle 3.2: Gestaltungsempfehlungen für Drehbedienelemente (Teil 2/2)

GLOHR [2018] entwickelte einen Fragebogen mit 18 Adjektiven, die das subjektive Empfinden bei der Betätigung unterschiedlicher Bedienelemente zum Drehen objektivieren sollen. Eine Faktorenanalyse der Items ergab für rotatorische Bedienelemente sechs zugrundeliegende Faktoren, die auch als Markenfaktoren dienen sollen. Die Reliabilität des Fragebogens wird als durchschnittlich gut reliabel angegeben [GLOHR 2018, S. 142].

GLOHR [2018, S. 108f.] präsentierte Probanden in Deutschland ($n = 35$) und China ($n = 35$) zwei unterschiedliche Drehsteller, um interkulturelle Unterschiede in der Beschreibung anhand des Fragebogens zu untersuchen. Es zeigten sich deutliche Unterschiede in der Beschreibung sowie in einer womöglich differenzierten Wahrnehmung haptischer Eigenschaften, wenngleich der Autor einen sprachlichen Einfluss des Übersetzungsprozesses nicht vollständig ausschließen kann [GLOHR 2018, S. 111].

Anschließend wurden den Probanden vier Drehsteller zur Untersuchung der haptischen Präferenz präsentiert. Die bewerteten Bedienelemente unterscheiden sich hoch signifikant ($p < 0,01$) voneinander, der Haupteffekt der Kultur war im Gegensatz dazu nicht bedeutsam ($p = 0,49$) [GLOHR 2018, S. 109]. Aufgrund der unterschiedlichen Rangfolge in der Präferenz der vier Drehsteller zwischen der Gruppe der Chinesen und der Deutschen schließt GLOHR [2018, S. 112] auf kulturelle Unterschiede bei rotatorischen Präferenzen. Der Einfluss aufgesetzter Griff-Kappen, um die Drehsteller zu homogenisieren und der resultierenden unterschiedlichen Massenträgheit sollte in diesem Kontext nicht vernachlässigt werden.

Weitere systematische Untersuchungen mittels Drehsimulator ergaben, dass insbesondere die Drehmomentamplitude die Beschreibung bedeutend beeinflusst und daher zur

markenspezifischen Gestaltung von diskreten Drehstellern geeignet ist. Die Drehmomentamplitude kann je nach Ausprägung die Markenfaktoren *Präzision und Robustheit*, *Geschmeidigkeit* und *Schwergängigkeit* vermitteln. [GLOHR 2018, S. 138]

Untersuchungen zu Komfortdrehmomenten beim kontinuierlichen Drehen führten GRUBISIC ET AL. [2015] am Beispiel von Heizkörperthermostaten durch. Beim Drehen an einer zylindrischen Standardform mit einem Durchmesser von 50 mm und glatter Oberflächen-textur konnte für einen Dreifinger-Zufassungsgriff ein optimales Drehmoment von 20 Ncm ermittelt werden. Für einen Umfassungsgriff lag der Komfortbereich entsprechend höher bei etwa 40 Ncm. Zusätzlich wurde das Maximalmoment der Probanden anhand der Fragebogenbewertung „zu hoch“ erfasst, um ein maximales Losbrechmoment spezifizieren zu können. Hier zeigte sich weiterhin ein geschlechterspezifischer Unterschied, der beim Umfassen deutlicher ausfiel, verglichen mit einer nur geringen Variabilität im Zufassungsgriff. Ein weiterer wichtiger Aspekt im Zusammenhang mit Drehmoment-Untersuchungen zeigte sich, als die Griffkappen variiert wurden. Bei Kappen mit Fein- und Grobprofil konnten höhere Maximalmomente erreicht werden. Der Umstand verdeutlicht die Wichtigkeit der Angaben zum Griffelement wie Durchmesser sowie Oberflächenmaterial und -textur.

3.4 Relevante Forschungsarbeiten zur Oberflächenhaptik

Wie im Kapitel 2.4 bemerkt, sind die Oberfläche und das Material von Bedienelementen weitere Faktoren, die es für Untersuchungen zur Wertigkeit zu beachten gilt. Neben dem Einfluss auf übertragbare Kräfte und dem Hinweis auf Betätigungsfunktionen durch taktile Reize können sich weitere Vorteile und Nachteile in Abhängigkeit der eingesetzten Materialien und Formen ergeben.

Durch Kunststoffbauteile und anschließende Veredlung, wie bspw. Galvanisierung oder Lackierung, erhöhen sich die Freiheitsgrade der Oberflächengestaltung. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, das Erscheinungsbild sowie die Oberflächenhaptik in positiver Weise zu verbessern [GUENTHER & MALECHA 2018]. Konkrete Gestaltparameter zu Material-Oberfläche sowie Form-Oberfläche sind in Kapitel 2.4 aufgelistet. Bei der Vielzahl an neuen Designs steigen allerdings parallel dazu die Anforderungen an Oberflächen: Langlebigkeit und Beständigkeit gegen unterschiedliche Einflüsse, Kratzfestigkeit, Anti-Bakteriell, Anti-Glare, Anti-Fingerprint sowie Easy-to-Clean [GUENTHER & MALECHA 2018]. Speziell im Premiumsegment ist die Verwendung von hochwertigen Materialien bedeutend [ESCH 2013, S. 115]. Nach GRUNWALD [2017, S. 223] zeichnet sich ein hochwertiges Material durch Langlebigkeit, geringe Neigung zu Gebrauchsspuren sowie Seltenheit aus. Als beispielhaftes, hochwertiges Material nennt BUBB ET AL. [2015b, S. 285] wärmeleitendes, als kühl empfundenes Metall. Außerdem auch weniger gut wärmeleitendes Material

wie eine polierte Holzoberfläche oder Leder versehen mit einer Ziernaht. Ein besonders minderwertiges Beispiel einer Oberflächenhaptik wäre ein Kunststoff, an dem Entgratungsränder zu spüren sind [BUBB ET AL. 2015b, S. 285].

Um die Bedürfnisse künftiger Zielgruppen im Automobilbereich zu erfüllen, muss nach BOBKA ET AL. [2022] der Aspekt der Nachhaltigkeit bei Materialien in Kombination mit hochwertigen Designs beachtet werden. Die Verwendung von austauschbaren, recycelbaren Teilen im Fahrzeuginnenraum sowie Materialien aus erneuerbaren oder recycelten Ressourcen, die in die Wertschöpfungskette zurückgeführt werden können, tragen zum Schutz von Ressourcen und Umwelt bei [BOBKA ET AL. 2022, S. 49]. Im Ergebnis der qualitativen Studie von BOBKA ET AL. [2022] scheinen Eigenschaften wie Qualität und Exklusivität auf die Wahrnehmung von Luxus jedoch größeren Einfluss auszuüben als nachhaltige Produktion und Verarbeitung.

Einige Studien zu Oberflächen untersuchten die Wahrnehmung und Beschreibung von Materialproben oder Bedienelementen mittels bipolarer Adjektivpaare (vgl. [RICHTER 2008], [MEYER 2001] und [WELLINGS ET AL. 2008]). Konkrete Angaben zu Werkstoff oder einer Parametrisierung bleiben aus. Nachfolgend werden zwei Studien zur Oberflächenhaptik von Bedienelementen vorgestellt:

JANNY [2018, S. 85f.] untersuchte insgesamt 12 unterschiedliche Drehbedienelemente zur grobmotorischen Kraftaufgabe zur Überwindung eines Anzugmoments sowie zur feinmotorischen Stellaufgabe am Beispiel eines Rollators.

- Die Basisvariante, gefertigt aus ABS-Kunststoff mittels FDM-Verfahren, hat einen Durchmesser von 50 mm und eine glatte Oberflächentextur.
- Zur Erzeugung der Variante *Nachgiebig* wurde ein Griffkern mit einer Gießharz-Schicht umgossen. Die anschließende Messung mittels Shore-Durometer ergab einen Wert von 52 Shore-A.
- Zur Erzeugung der Variante *Reibung* wurde ein Griff der Ausführung Basisvariante zweifach mittels Flüssig-Gummi-Tauchbad beschichtet.
- Die Profilvariante entsprach der Basisvariante mit einer aufgetragenen Profilierung von: Abstand 1 mm, Breite 2 mm, Tiefe 1,5 mm.

In zwei Studien mit jeweils $n = 30$ Probanden wurden die Gebrauchs- sowie Gestaltqualität der Drehbedienelemente untersucht. Zur Erfassung der Gebrauchsqualität kam unter anderem ein Drehmoment-Messgerät zum Einsatz, mit dessen Hilfe das maximal aufzubringende Drehmoment der Probanden sowohl im trockenen wie auch nassen Zustand gemessen wurde. Im trockenen Zustand erzielten die drei genannten Alternativvarianten im Durchschnitt höhere Maximalmomente als die Basisvariante. Mit den Varianten *Nachgiebigkeit* und *Reibung* ließen sich sogar signifikant höhere Drehmomente erreichen. Im

nassen Zustand hingegen erreichte nur die Profilvariante bedeutend höhere Drehmomente. In der Studie zum visuellen Gefallen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Drehstellern. Die Profilvariante erzielte jedoch im Mittel einen höheren Wert als die Basisvariante. Die Varianten *Nachgiebigkeit* und *Reibung* wurden bei der Bewertung des Gefallens nicht eingesetzt. [JANNY 2018, S. 134 und 137]

Speziell zu Stellteilerflächen im Kontext Pkw führte BÖRSCHLEIN [1994] Untersuchungen durch (n = 66). Sie untersuchte die Gestaltdimensionen Form, Material sowie Betätigungsgefühl hinsichtlich Komfort und Wertigkeit in acht Pkws unterschiedlicher Hersteller. Insgesamt wurden acht unterschiedliche Stellteilarten untersucht, wobei jedoch nur der Lenkstockhebel in allen acht Fahrzeugen vorhanden war. Alle acht Lenkstockhebel wurden von den Probanden im jeweiligen Fahrzeug bezüglich ihrer Blinkerfunktion untersucht. Der Fragebogen mit insgesamt 13 Items zu Form, Material und Betätigungsgefühl wurde von der Versuchsleiterin als Befragung vorgetragen, damit der Proband sich rein auf die Betätigung konzentrieren konnte. Eine Tarnung der Schrift- und Markenzeichen zur Kontrolle des Einflusses der Marke bzw. der Erwartung (vgl. [TONDERA ET AL. 2021a]) wurde nicht vorgenommen. Die Autorin merkt an, dass insbesondere die Bewertungen zum Gesamturteil daher stark beeinflusst ist. [BÖRSCHLEIN 1994]

Bezüglich dem Item *Material: Härte* ergab sich kein signifikanter Unterschied, alle Lenkstockhebel wurden gleichartig beurteilt. Hinsichtlich *Material: Oberflächenreibung* wurde der Lenkstockhebel des Mercedes-Benz, Baureihe W124, mit 76 % als *richtig* und damit am besten bewertet. Es zeigte sich die Tendenz, dass, je geringer die Anzahl an *richtig* Bewertungen war, desto öfter das Material des Lenkstockhebels als *etwas zu glatt* bewertet wurde. Leicht raue Stellteilerflächen sind hinsichtlich eines Qualitätseindrucks vorteilhaft. Eine Optimierung des Mercedes Lenkstockhebels kann den Ergebnissen nach durch eine minimal rauere Oberfläche erzielt werden. In dieser Stellteilart gewann der Mercedes auch in der Kategorie *Material: Gesamturteil*. Bei den Items *Größe*, *Flächenausprägung* und *Form: Gesamturteil* lag ebenfalls Mercedes vorne. Auf Basis der Antworten konnten für Höhe (22 bis 29 mm) und Breite (22 bis 28 mm) Empfehlungen abgeleitet werden. Tendenziell wurde der Lenkstockhebel bei allen Fahrzeugen häufiger als *zu groß* bewertet. Die beste Flächenausprägung beim Mercedes kann potenziell durch eine leicht abgerundete Ausprägung optimiert werden. [BÖRSCHLEIN 1994, S. 8-15]

Wenngleich das Ziel der vorliegenden Arbeit das Erfassen spezifischer, günstiger Parameter zur technischen Gestaltung ist, bleibt die abgestimmte Zusammenstellung, beispielsweise von Oberflächen, zu einem stimmigen Gesamteindruck wesentlich. Einen ganzheitlichen Ansatz zur Untersuchung und Bewertung der Fahrzeuginnenräume von

Realfahrzeugen wird in TONDERA ET AL. [2021a] vorgestellt. Neben Vorschlägen zum Versuchsaufbau, unter anderem zur Kontrolle des Markeneinflusses, zeigt ein Konzeptbaukasten, welche technischen, nutzerspezifischen und verhaltensbasierte Aspekte zu erheben und zu operationalisieren sind.

3.5 Relevante Forschungsarbeiten zur Betätigungsakustik

Akustische Anzeigen unterteilt BUBB ET AL. [2015b, S. 284] in Hinweise bzw. Warnungen und in Sprache, die detaillierte Information vermittelt. Ferner ist auch ein Betätigungsgeräusch eines Bedienelements eine Art einer akustischen Anzeige (vgl. Kapitel 2.2.1). Untersuchungen von TREIBER [2009] ergaben, dass eine akustische Rückmeldung die Dauer zur Erledigung einer Positionieraufgabe im Mittel um 74 ms verkürzen kann ($n = 22$). Neben den ergonomisch-funktionalen Aspekten, betont HÖCHSTETTER ET AL. [2015, S. 81] die wahrgenommene Wertigkeit der akustischen Produktqualität, insbesondere bei impulsartigen Funktions- und Betätigungsgeräuschen. Beim Erstkontakt des Kunden mit dem stillstehenden Produkt im ruhigen Verkaufsraum kommt dieser Art der Geräusche eine besondere Bedeutung zu [HÖCHSTETTER ET AL. 2015, S. 81]. Durch eine gesteigerte Wahrnehmung der Betätigungsgeräusche aufgrund des elektrifizierten Antriebsstrangs und durch eine Erhöhung des Anteils an tertiären Fahraufgaben im automatisierten Fahrbetrieb wird die Relevanz noch weiter zunehmen.

HÖCHSTETTER ET AL. [2015] untersuchten die Wertigkeit von Türzuschlagsgeräuschen und berichten ohne die Angabe einer Parametrisierung, dass insbesondere die Einflussgrößen Lautheit (sone) und Schärfe (acum) eine hohe Vorhersagekraft bzgl. des auditiven Qualitätseindrucks besitzen ($n = 42$). Mit der Identifizierung entscheidender physikalischer und psychoakustischer Parameter kann ein Modell zur Vorhersage auditiver Wertigkeit entwickelt werden, das die Ableitung systematisch prüfbarer Ziele und deren Integration in den Entwicklungsprozess erlaubt [HÖCHSTETTER ET AL. 2015, S. 85].

ANGUELOV [2009], TREIBER [2011] und GLOHR [2018] untersuchten im Zusammenhang von Bedienelementen den Einfluss akustischer Parameter auf die auditive Wertigkeit. Die Bedeutung der Einflussgröße *Schärfe*, die bei stationären Geräuschen wesentlich für eine akustische Wertigkeit ist, kann nach ANGUELOV [2009, S. 120] bei transienten Schallereignissen nicht bestätigt werden. ANGUELOV [2009] und GLOHR [2018] untersuchten synthetisch erzeugte Signale, die bei der Betätigung von Drucktasten und Drehschalter abgespielt wurden. Um die Vergleichbarkeit des synthetischen Klangs zu gewährleisten, wurden die Signale bezüglich Lautstärke homogenisiert. Mittels sogenanntem Pitch-Shifting konnte eine Tonhöhenvariation erreicht werden. Für die Untersuchung der Kenngröße *Tonhöhe* wurde der „physikalische Parameter „Peakfrequenz“ verwendet, der die

Frequenz darstellt, bei der die maximale Schallenergie übertragen wird“ [ANGUELOV 2009, S. 74]. Der Parameter kann über die Frequenzanalyse FFT (Fast Fourier Transformation) bestimmt werden, die ein Signal in einzelne spektrale Bestandteile zerlegt (vgl. [TONDERA ET AL. 2022]). Durch die hohe Streuung und geringe Vorhersagekraft ist der Parameter *Peakfrequenz* jedoch wohl nur bedingt dazu geeignet, die auditive Wertigkeit zu modellieren [GLOHR ET AL. 2017], [TONDERA ET AL. 2022].

Die ermittelte Parametrisierung wertiger Betätigungsakustik von Bedienelementen unterschiedlicher Autoren zeigt Tabelle 3.3 in der Übersicht.

Stellteil	Quelle	SPL [dB(A)]	Lautheit [sone]	Tonhöhe [Hz]
translatorisch	[ANGUELOV 2009, S. 130]	-	-	900 - 1100
	[GLOHR ET AL. 2017, S. 5]	52,9	3,8	6200
	[TONDERA ET AL. 2022, S. 345]	72,1	10,2	810
rotatorisch	[ANGUELOV 2009, S. 130]	-	-	900 - 1100
	[GLOHR ET AL. 2017, S. 5]	52,9	3,7	2400
	[TREIBER & GRUHLER 2008, S. 2]	-	1,9	-

Tabelle 3.3: Gestaltungsempfehlungen für auditive Wertigkeit [TONDERA ET AL. 2022]

In der Psychoakustik als Teilgebiet der Psychophysik können nicht nur physikalische Reizgrößen quantifiziert werden (Druckniveau, Frequenz, Dauer), sondern auch die entsprechende Hörempfindung (Lautstärke, Schärfe, Rauigkeit, Tonalität, Schwankungsstärke) [ZWICKER 1982, S. 2f.]. Nicht zweifelsfrei geklärt scheint die Frage, welche Metriken bei transienten Signalen, also singulär impulshaften Schallen - im Gegensatz zu stationären oder quasi-stationären Signalen - zur Berechnung zulässig sind (vgl. [TONDERA ET AL. 2022]).

In der Studie von TONDERA ET AL. [2022] haben zunächst $n = 133$ Probanden in vier unterschiedlichen Fahrzeugen jeweils vier Bedienelemente mittels Fragebogen bewertet. Aus zwei Items zum Gefallen sowie zur Erwartung des Betätigungsgeräusches errechnete sich mit einer Gewichtung von 2:1 ein sogenannter *Auditory Perceived Quality Score (APQS)* für jedes Bedienelement. Hinterher erfolgten Aufnahmen der Betätigungsgeräusche jener Bedienelemente innerhalb der Fahrzeuge in einem Semi-Freifeldraum mittels zweier Mikrofone. Bei einem der Mikrofone handelte es sich um ein binaurales Aufnahmegerät [HEAD ACOUSTICS 2023b], das der Versuchsleiter als Headset trug, während er die Betätigung vom Fahrersitz aus ausführte. Aufnahme und Betätigung der Bedienelemente erfolgte folglich am selben Ort, von dem bereits die Probanden in der Realfahrzeugstudie die Betätigung und Bewertung durchführten.

Die so aufgenommenen Signale wurden mit einem einheitlichen Verfahren (vgl. [TONDERA ET AL. 2022, S. 343f.]) in Signale gleicher Länge (2,5 s) geschnitten. Da jede Betätigung eines Bedienelements fünfmal wiederholt wurde, konnten so fünf Signale gleicher Länge eines Bedienelements vergleichend übereinandergelegt werden. In der Darstellung des Schalldruckpegels über die Zeit erfolgte die Auswahl einer repräsentativen Betätigung, welche die geringsten Störgeräusche und Abweichungen aufzeigten. Anschließend wurden für das ausgewählte Signal physikalische und psychoakustische Parameter extrahiert, um diese der auditiven Wertigkeit zuzuordnen. Hierdurch ließen sich beispielsweise prüfbare Messgrößen des am besten sowie am schlechtesten bewerteten Bedienelements innerhalb einer Stellteilkategorie vergleichend gegenüberstellen. Maßbliche Parameter der besonders gut bewerteten Stellteile können als Zielwerte zur Spezifikation dienen, wenngleich ungeklärt bleibt, auf welche Parameter mit hohem Einfluss man sich insbesondere beschränken sollte. [TONDERA ET AL. 2022]

So gelang es beispielsweise WILLEMSSEN & RAO [2010], ein Regressionsmodell zu entwickeln, das die subjektive Lästigkeit von transienten Geräuschen, die bei IT-Geräten wie Druckern oder Tastaturen üblich sind, vorherzusagen. Hierzu wurden insgesamt zwölf exemplarisch impulsartige Geräusche mittels sogenannten binauralem Kunstkopf aufgenommen. Neun dieser Geräusche waren von Druckern erzeugt während des Druckens, der Selbstwartung und der Selbstkalibrierung. Die anderen drei Signale stammten von Eingabegeräuschen drei unterschiedlicher Tastaturen. Um die Signale für die Parameteranalysen vorzubereiten, wurde aus jeder Aufnahme ein repräsentatives 5-Sekunden-Segment ausgewählt. Dies sollte sicherstellen, dass die Ergebnisse nicht durch Unterschiede in der Dauer zwischen den 12 Aufnahmen beeinflusst werden. Die Vorhersage der Lästigkeit erfolgte auf Basis der psychoakustischen Metriken *Lautheit*, *Schärfe*, *Rauigkeit* und *Impulshaltigkeit*. Ein Vergleich der Vorhersage des Modells mit den tatsächlichen Probandenbewertungen ($n = 26$) aus einem Hörversuch zur subjektiven Lästigkeit zeigte eine gute Übereinstimmung sowie eine gute Modellanpassung ($R^2 = 0,93$). Den Autoren nach kann eine subjektive Bewertung der Klangqualität im Produktentwicklungsprozess oftmals umständlich und kostspielig sein. Eine praktikablere Lösung kann die Entwicklung eines objektiven Maßes für die subjektive Lästigkeit impulsartiger Geräusche versprechen, sofern das Maß anhand tatsächlicher, experimenteller Probandenbewertungen validiert ist. [WILLEMSSEN & RAO 2010]

4 Versuchsaufbau und Konkretisierung der Untersuchungsparameter

In diesem Kapitel folgt die Beschreibung des Versuchsaufbaus sowie der Versuchsbedingungen zur Durchführung der Untersuchungen zur Haptik, spezifischer zur Betätigungs- und Oberflächenhaptik (vgl. Kapitel 4.1). Die Abläufe der Akustikmessungen sowie der Hörversuche werden separat in Kapitel 6 behandelt. Am Ende des Kapitels wird außerdem eine Eingrenzung der zu untersuchenden Betätigungsarten und Untersuchungsparameter vorgenommen (vgl. Kapitel 4.2).

4.1 Versuchsaufbau

Zur Durchführung ungestörter, experimenteller Untersuchungen ist es erforderlich, einen eigenen Versuchsraum vorzubereiten. Zu Beginn des Versuchs, und somit vor den Bewertungen unterschiedlicher Bedienelemente, absolviert jeder Versuchsteilnehmer an zwei Stationen diverse Voruntersuchungen. Dies dient dem Zweck der Erhebung von Kontrollvariablen, wie zum Beispiel klassischerweise demografischen Angaben wie etwa Alter, Geschlecht, Händigkeit und Körpergröße. Neben dem Ausfüllen diverser Fragebögen sind für Vor- und Hauptuntersuchung unterschiedliche Aufbauten bzw. Werkzeuge notwendig. So wird beispielsweise die feinmotorische Leistungsfähigkeit der Probanden mittels Wiener Testsystem [SCHUHFRIED 2023] erfasst (vgl. Kapitel 4.1.1). Darüber hinaus wird an jeder Hand eines Probanden eine anthropometrische Messung durchgeführt und zusätzlich in einer Fotostation abfotografiert (vgl. Kapitel 4.1.2). Der eigentliche Hauptversuch wird am Prüfstand „Sitzkiste“ durchgeführt (vgl. Kapitel 4.1.3). Die Teilnehmer des Versuchs nehmen in dieser Sitzkiste Platz, und es erfolgt durch den Versuchsleiter die Präsentation unterschiedlicher, systematisch manipulierter Bauteile. Darauf folgt die Bewertung der Probanden als Reaktion auf die Betätigung der präsentierten Versuchsobjekte. Nachfolgend werden den Versuchsaufbau betreffende Inhalte vorgestellt und in Kapitel 4.1.4, nach Stationen geordnet, in der Übersicht dargestellt.

4.1.1 Wiener Testsystem – Motorische Leistungsserie

Das Wiener Testsystem (WTS) ist eine Zusammenstellung unterschiedlicher, psychologischer Tests auf einer computerbasierten Plattform. Vorteile einer Anwendung dieses Testsystems sind die umfangreiche Testauswahl, die automatisierte Ergebnisauswertung und die daraus resultierende Zeitersparnis. Zudem können die Testergebnisse mit einer bereits verfügbaren, großen Normstichprobe verglichen werden. Einheitliche Steuermodule als Probandeninterface sowie definierte Testvorgaben gewährleisten eine standardisierte Testdurchführung. [SCHUHFRIED 2023]

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit finden Tests der Motorischen Leistungsserie (MLS) Anwendung. Sie dienen der „Messung der feinmotorischen Fähigkeiten durch statische und dynamische Aufgaben für Finger-, Hand- und Armbewegung“ [NEUWIRTH & BENESCH 2004, S. 3]. Zur Durchführung der MLS wird eine MLS-Arbeitsplatte benötigt, die mit Bohrungen, Fräsungen und Kontaktflächen versehen ist (vgl. Bild 4.1). Rechts der Arbeitsplatte wird ein schwarzer Griffel angeschlossen, mit dem unterschiedliche Aufgaben, auch Subtests genannt, durchzuführen sind. Für jede Aufgabe sind standardisierte Instruktionen verfügbar. Der Versuchsleiter startet und kontrolliert die Testdurchführung mit Hilfe eines mit der MLS-Arbeitsplatte verbundenen Laptops. Bild 4.1 zeigt die vier eingesetzten Aufgaben der Feinmotorik-Voruntersuchung. Da die Betätigung und Bewertung der Bedienelemente der Hautversuche ausschließlich mit rechts stattfinden, wird folglich nur die motorische Leistungsfähigkeit der rechten Hand erfasst.

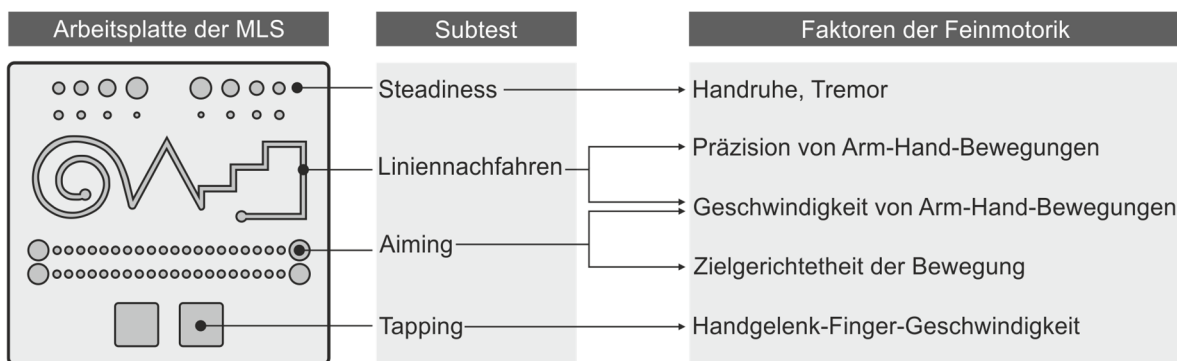


Bild 4.1: Schematische Darstellung der Arbeitsplatte der Motorischen Leistungsserie (MLS); eigene Darstellung nach [NEUWIRTH & BENESCH 2004, S. 7]

Aus den jeweils erhobenen Parametern jeder Aufgabe, wie beispielsweise Dauer und Fehleranzahl, werden Faktoren der Feinmotorik automatisiert ermittelt. Diese Ergebnisse lassen sich in Form von Testprotokollen mit einer Normstichprobe vergleichen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit der Charakterisierung der eigenen Stichprobe hinsichtlich feinmotorischer Fähigkeiten. Zudem wird der Ausschluss bzw. bewusste Vergleich von positiv wie negativ auffälligen Probanden ermöglicht.

4.1.2 Anthropometrische Messung

In einer weiteren Voruntersuchung werden insgesamt vier Maße (vgl. Tabelle 4.1) der rechten Hand der Probanden erfasst. Der Versuchsleiter verwendet hierzu einen Messschieber sowie ein Maßband. Die erhobenen Maße orientieren sich an den Beschreibungen für „wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung“ [DIN EN ISO 7250-1 2017]. Analog der Norm werden die Probanden gebeten, in normaler Sitzhaltung den Unterarm horizontal sowie die Hand gestreckt zu halten und mit der Handfläche nach oben auszurichten. Tabelle 4.1 zeigt die erhobenen Maße in der Übersicht.

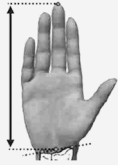
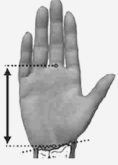
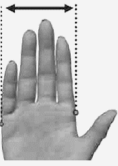
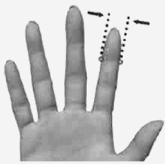
Bild	Maß	Quelle
	Handlänge (Styloid) Abstand von der Spitze des Mittelfingers entlang seiner Längsachse zum Messpunkt am Styloid-Fortsatz. Dieser entspricht ungefähr der mittleren Hautfurchung des Handgelenks.	[DIN EN ISO 7250-1 2017, S. 33]
	Handflächenlänge Der Abstand auf der Handfläche von einer Linie zwischen Styloid-Fortsatz des Handgelenks zur proximalen Furchung des Mittelfingers.	[DIN EN ISO 7250-1 2017, S. 33]
	Handbreite in Höhe der Metacarpalia Geradliniger Abstand auf der Höhe der Metacarpalköpfe von Zeigefinger bis Kleinfinger.	[DIN EN ISO 7250-1 2017, S. 34]
	Zeigefingerbreite, distal Maximale Breite des Zeigefingers in der Region des Gelenks zwischen medialer und distaler Phalanx.	[DIN EN ISO 7250-1 2017, S. 35]

Tabelle 4.1: Erhobene anthropometrische Maße der rechten Hand

Zusätzlich erfolgt eine Bilderfassung der rechten Hand der Probanden mittels Fotogrammetrie. Hierzu kommt eine eigens entwickelte Fotostation zum Einsatz, deren detaillierter Aufbau in KIESSLING ET AL. [2023] beschrieben wird. Nach der Positionierung der Hand des Probanden auf einer hierfür vorgesehenen Auflage vor einem schwarzen Hintergrund erfolgen innerhalb von 10 Sekunden 30 Bildaufnahmen mit einer handelsüblichen Webcam (vgl. Bild 4.2). Neben dem Vorteil der Schnelligkeit im Vergleich zur manuellen Messung ergibt sich die Möglichkeit, hinterher weitere Maße zu ermitteln, wie beispielsweise die Zeigefingerlänge. Die Erfassung der anthropometrischen Maße der Hand auf Basis des Bildmaterials erfolgt hinterher mittels maschineller Bilderkennung. Beim Vergleich der Maße derselben Hände anhand der digitalen Erfassung mit den manuellen Messungen des Versuchsleiters zeigt sich eine gute, jedoch verbesserungsfähige Genauigkeit des Systems (vgl. [KIESSLING ET AL. 2023]).

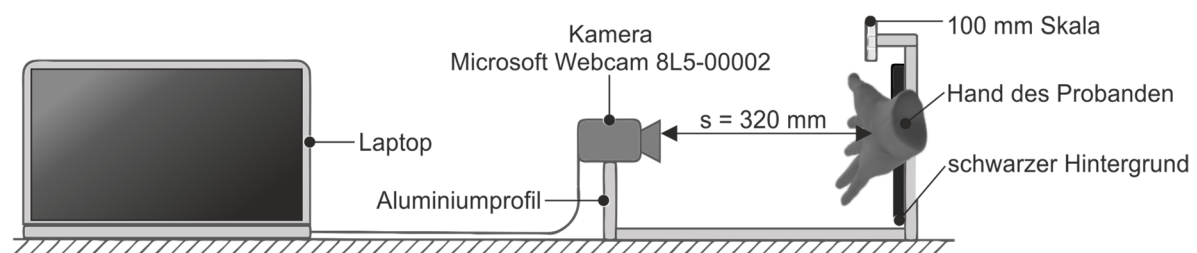


Bild 4.2: Eingesetzte Apparatur zur Bilderfassung der Hand [KIESSLING ET AL. 2023]

4.1.3 Konzipierung und Konstruktion des Prüfstands Sitzkiste

Die Erstellung und Verwendung sogenannter Sitzkisten für ergonomische Untersuchungen haben in der Fahrzeugindustrie eine lange Tradition [BUBB 2015b, S. 590]. In ihrer Grundstruktur sind Sitzkisten oftmals aus Holz aufgebaut, woher wohl auch der Begriff Kiste stammt [BUBB 2015b, S. 590]. Eine ausführliche Zusammenfassung verwendeter Sitzkisten und weiterer Ergonomie-Prüfstände in unterschiedlichen Forschungsarbeiten ist in der Arbeit von MANDEL [2019] zu finden.

Im vorliegenden Fall ist eine einfach aufgebaute Sitzkonstruktion (vgl. Bild 4.3) erforderlich, die als technische Einrichtung für die Durchführung von Wertigkeitsanalysen mit Probanden verwendet werden soll. Einfach bedeutet hier, dass keine veränderbaren Innenraumgeometrien oder Antriebstechniken eingesetzt werden und auch auf eine Fahrsimulation verzichtet wird. Die Bewertung der Bedienelemente erfolgt als Hauptaufgabe, nicht als Nebenaufgabe. Statt eines Fahr Szenarios wird auf dem Bildschirm ein Fragebogen zur Wertigkeitsanalyse angezeigt. Die notwendigen Anforderungen an die Sitzkiste beziehen sich insbesondere auf die Bauteilaufnahme. Die speziell manipulierten Bauteile, die als Versuchsobjekte dienen, werden den Probanden in randomisierter Reihenfolge zur Bewertung dargeboten. Hierzu gehört die Möglichkeit zur Anordnung und Befestigung von Bauteilen der Instrumententafel und der Mittelkonsole, wie auch die Möglichkeit des zügigen Austausches ebenjener Bauteile. Um Kontext und Bedienhaltung eines Pkws nachzubilden, wird die Sitzkiste mit einem Automobil-Sitz ausgerüstet und die Höhe des Sitzes über der Fersenhöhe (Maß H30-1, vgl. [BUBB & GRÜNEN 2015, S. 353]) so gewählt, dass ein Maßkonzept eines Kompaktwagens nachgebildet wird. Auch die Anordnung der Versuchsobjekte orientiert sich an dieser Pkw-Maßkonzeption.

Tabelle 4.2 zeigt im Vorfeld festgelegte Anforderungen an die Konstruktion der Sitzkiste.

F W B	Nr.	Anforderung Forderung (F) Wunsch (W) Bereichsforderung (B)	Beschreibung, Quantifizierung
	1	Sitzkiste	
F	1.1	Stabilität	Stabil und sicher genug, um die Gewichtsbelastung des Probanden zu tragen
F	1.2	Transport	mobil mittels Hubwagen
F	1.3	Verstellbarkeit	Verstellung des Sitzes in Länge, Höhe sowie Neigung der Lehne
B	1.4	Pkw-Maßkonzept, Kompaktklasse	Maß H30-1 = 245-300 mm [MANDEL 2019, S. 16]
W	1.5	Verkleidung, Kaschierung	Verkleidung der Tragwerksgestalt, Teppichboden
B	1.6	Pedale	Anordnung von Pedale in etwa nach Pkw-Maßkonzept, relativ zum Bezugspunkt am Sitz: $dx = -600 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$

Tabelle 4.2: Anforderungsliste des Prüfstands Sitzkiste (Teil 1/2)

F W B	Nr.	Anforderung Forderung (F) Wunsch (W) Bereichsforderung (B)	Beschreibung, Quantifizierung
	1	Sitzkiste	
B	1.7	Lenkrad	Anordnung des Lenkrads in etwa nach Pkw-Maßkonzept, relativ zum Bezugspunkt am Sitz: $dz = 400 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$
	2	Bauteilaufnahme	
F	2.1	Präsentation der Versuchsobjekte	Profilsystem und Aufnahmen zur Fixierung von Bauteilen
F	2.2	Verstellbarkeit	Wechsel bzw. Verstellbarkeit der Aufnahmen für unterschiedliche Bauteilarten
F	2.3	Austauschbarkeit	Zügige und zuverlässige Austauschbarkeit von Bauteilen während des Versuchs
B	2.4	Anordnung auf Instrumententafel	Anordnung der Stellteile in etwa nach Pkw-Maßkonzept, relativ zum Bezugspunkt am Sitz: $dx; dy; dz: [-230; 30; 510] \text{ mm}$
B	2.5	Anordnung auf Mittelkonsole	Anordnung der Stellteile in etwa nach Pkw-Maßkonzept, relativ zum Bezugspunkt am Sitz: $dx; dy; dz: [180; 130; 320] \text{ mm}$
	3	Umgebung	
F	3.1	Raum	Separater und ruhiger Versuchsraum
W	3.2	Neutralität	Neutrale Raumgestaltung ohne Ablenkungen
W	3.3	Waschbecken	Möglichkeit zum Händewaschen vor Start des Versuchs zum Zweck der Standardisierung der Handhygiene

Tabelle 4.2: Anforderungsliste des Prüfstands Sitzkiste (Teil 2/2)

Zur elementaren Grundstruktur der Sitzkiste dienen zwei aufeinander gestapelte und mittels Schraubverbindung fixierte Europaletten. Als Sitz steht ein Automobilsitz der Kompaktklasse zur Verfügung. Dieser hat die Besonderheit, dass die Sitzverstellung, wie beispielsweise Sitzhöhe und Längenverstellung, rein manuell-mechanisch erfolgt. Eine elektrische Antriebstechnik ist folglich nicht erforderlich, dennoch kann jeder Proband den Sitz auf seine Person eigenständig nach Belieben einstellen. Die Maße werden aus dem digitalen Fahrzeugmodell des betreffenden Fahrzeugs ermittelt, um die Höhe des Sitzes im Verhältnis zum Fersenpunkt zu bestimmen. Hierzu wird auf der rechten Längenverstellungsschiene des Sitzes ein Bezugspunkt (vgl. Bild 4.3) definiert und markiert. Von diesem Punkt aus wird im digitalen Fahrzeugmodell ein Vektor zu einer Referenzstelle wie dem Innenraumboden, dem Pedal oder dem Lenkrad gezogen. Basierend auf dem Vektor und seinen jeweiligen Komponenten auf den Achsen kann eine maßstabsgetreue reale Nachbildung konstruiert werden. Zum Beispiel befinden sich die Pedale -400 mm in x-Richtung vom Bezugspunkt am Sitz entfernt. Um das erforderliche Maß H30-1 zu erreichen, wurde der Sitz mit speziell angepassten Auflageblöcken um 600 mm in die z-Richtung angehoben (vgl. Bild 4.3). Es wird das Fahrzeugkoordinatensystem nach SAE J182 verwendet [BUBB & GRÜNEN 2015, S. 350]. Nachfolgend zeigt Bild 4.3 den Aufbau des Prüfstands Sitzkiste sowie die verwendeten Komponenten.

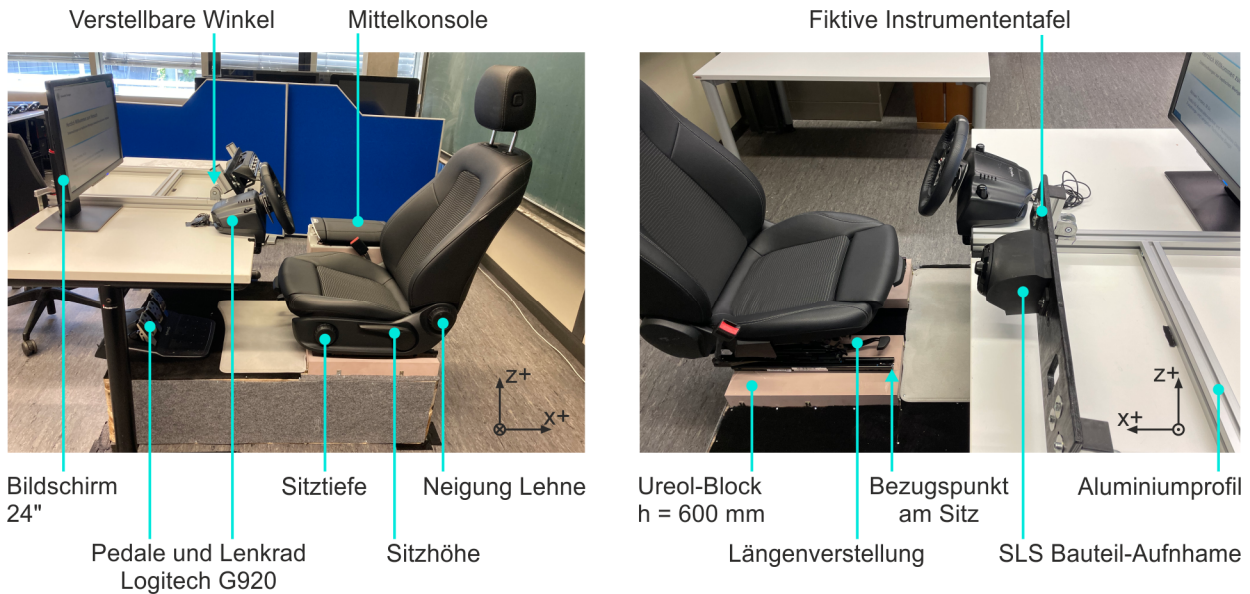


Bild 4.3: Versuchsaufbau der Haptik-Untersuchungen

Ein weiterer Teil des Prüfstands ist ein Tisch, dessen Höhe so abgestimmt ist, dass die Unterkante des Lenkrads einen gleichen Abstand zum Bezugspunkt hat wie im digitalen Fahrzeugmodell ($dz = 400 \text{ mm}$). Da keine Fahraufgabe durchgeführt wird, dient das Lenkrad nur zur Erhöhung der Immersion und als Orientierung bei der Anpassung der Sitzposition. Auf dem Tisch ist zudem ein Aluminium-Profilsystem mit Schraubklammern befestigt. Auf der fahrerzugewandten Seite sind zwei verstellbare Winkel montiert, die eine fiktive Instrumententafel aus Sperrholz halten (vgl. Bild 4.3). Diverse Bohrungen ermöglichen die Verwendung unterschiedlicher Bauteilaufnahmen, die mittels Lasersintern (SLS) hergestellt werden. Die Bauteile, inklusive der Bedienelemente, welche die haptischen Merkmale als zu bewertende Versuchsobjekte bereitstellen, können hier einfach eingesteckt und ausgesteckt werden. Die angepasste Geometrie der Aufnahme garantiert eine spielfreie Befestigung und eine schnelle Austauschbarkeit während des Versuchs. Bild 4.3 (links) und Bild 4.4 (Station 3) zeigen auch die Konstruktion der Mittelkonsole. Hier können die Versuchsobjekte der Ablagefächer mittels Klemmen befestigt und ausgetauscht werden.

4.1.4 Allgemeine Versuchsbedingungen

Um am Versuch teilnehmen zu können, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein, wie beispielsweise das Vorliegen einer gültigen Fahrerlaubnis (Klasse B). Das Alter der Teilnehmer muss zwischen 18 und 70 Jahren liegen. Ein weiteres Kriterium zum Ausschluss sind Beeinträchtigungen im Hand-Arm-System. Teilnehmer werden durch Hinweise in Vorlesungen und Aushängen im Universitätsgebäude akquiriert. Für die Teilnahme am Versuch wird eine Aufwandsentschädigung von 10 Euro in bar ausbezahlt.

Die Höhe der Aufwandsentschädigung wird bereits im Aushang der Akquise kommuniziert.

Der Versuchsraum ist in drei Bereiche, genannt Stationen, unterteilt. Bei Betreten des Raumes wird der Proband vom Versuchsleiter begrüßt und über den Verlauf des Versuchs ausführlich informiert. Der Versuchsraum verfügt über ein Waschbecken, und es wird den Probanden empfohlen, sich zu Beginn der Studie die Hände zu waschen. Dies dient nicht nur hygienischen Gründen, sondern auch zur Standardisierung des Ölgehalts der Haut.

Danach werden dem Probanden an Station 1 (vgl. Bild 4.4) ein Informationsblatt und ein Einwilligungsformular zur Unterzeichnung ausgehändigt. Es folgt das Ausfüllen von demografischen und psychografischen Fragebögen. Im Anschluss daran wird eine feinmotorische Voruntersuchung an der bereitgestellten MLS-Arbeitsplatte ausgeführt.

Anschließend wird der Proband aufgefordert, dem Versuchsleiter zu Station 2 zu folgen. Hier werden anthropometrische Messungen der Hand durchgeführt, wie auch Fotos der Hand aufgenommen.

An Station 3, der Sitzkiste, findet der Hauptversuch statt. Mit einer standardisierten Instruktion (vgl. Tabelle A.1.1 in Anhang A1) wird der Proband aufgefordert, eine für ihn komfortable Sitzposition einzunehmen, von der aus er alle Bedienelemente komfortabel erreichen kann. Der Versuchsleiter startet dann eine Präsentation auf dem Bildschirm, in der Informationen über den Hauptversuch erklärt werden. Zum Beispiel, welche Bauteile vorgestellt werden, welche Bewegungen ausgeführt werden sollen und welcher Griff verwendet werden soll. Außerdem wird der Fragebogen, der ebenfalls als Präsentation am Bildschirm eingeblendet wird, kurz erläutert. Die einzelnen Antwortoptionen sind mit Nummern hinterlegt, so dass der Proband seine Rückmeldung im Versuch mündlich dem Versuchsleiter mitteilt. Am Ende einer Einführung in jeder Versuchsreihe, wird zusammenfassend eine versuchsreihenspezifische, standardisierte Instruktion vorgelesen (vgl. Tabelle A.1.1 in Anhang A1).

Im Versuch werden die unterschiedlichen Bauteile nach einer für jeden Probanden randomisierten, festgelegten Reihenfolge durch den Versuchsleiter abwechselnd präsentiert. Der Proband hat die Möglichkeit, die Bedienelemente frei und mehrfach zu betätigen. Die Bewertung und Beschreibung der Bedienelemente erfolgt entlang des Fragebogens (vgl. Tabelle 5.3) und als mündliche Antwort. Der Versuchsleiter muss während des Versuchs den Austausch der Bauteile in der vorgegebenen Reihenfolge durchführen, die Folien des Fragebogens präsentieren und die Antworten korrekt digitalisiert aufzeichnen.

Am Ende des Versuchs werden allgemeine Fragen zu Präferenzen und Wertigkeit gestellt, und die Teilnehmer haben die Möglichkeit, ihre Kommentare und Meinungen zu äußern. Abschließend zeigt Bild 4.4 die einzelnen Stationen der Versuchsreihen 1 bis 3.

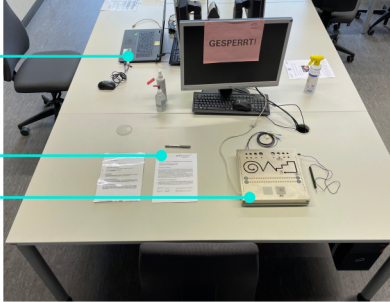
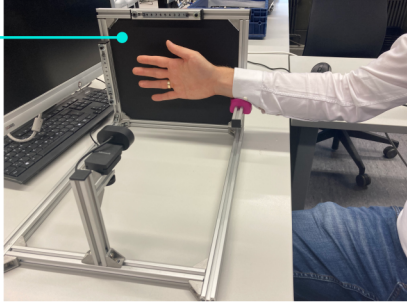
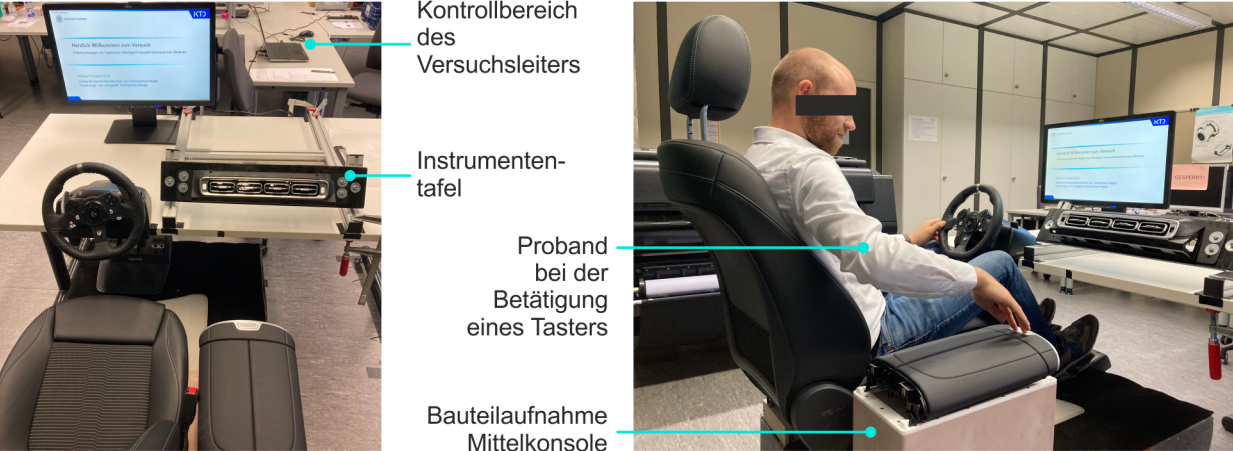
Versuchsraum 01.155 am IKTD, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart	
- Probanden begrüßen und ausführlich informieren - Händewaschen <i>Dauer: etwa 5 Minuten</i>	
Station 1 - Voruntersuchung  - Kontrollbereich des Versuchsleiters - Fragebogen - MLS Arbeitsplatte	Station 2 - Voruntersuchung  Aufbau zur Fotografie der Hand
- Probandeninformation und Einwilligungserklärung - Demografischer und psychografischer Fragebogen - Wiener Testsystem - Motorische Leistungsserie <i>Dauer: etwa 15 - 20 Minuten</i>	- Anthropometrische Messung der Hand - Fotografie der Hand <i>Dauer: etwa 5 Minuten</i>
Station 3 - Hauptversuch  - Kontrollbereich des Versuchsleiters - Instrumenten-tafel - Proband bei der Betätigung eines Tasters - Bauteilaufnahme Mittelkonsole	
- Sitzposition komfortabel einstellen - Einführung und Hinweise zum Fragebogen - Präsentation und Bewertung der Versuchsobjekte <i>Dauer je nach Versuchsreihe:</i> <i>Versuchsreihe 1: etwa 40 Minuten</i> <i>Versuchsreihe 2: etwa 35 Minuten</i> <i>Versuchsreihe 3: etwa 40 Minuten</i>	

Bild 4.4: Stationen des Versuchsraumes

4.2 Konkretisierung der Untersuchungsparameter

Nachfolgend werden für die vorliegende Forschungsarbeit relevante Untersuchungsparameter abgeleitet. Eine wesentliche Einordnung der Untersuchungen erfolgt auf Basis der Bewegungsmerkmale (vgl. Kapitel 2.2.2). Ein Bedienelement kann mittels Schieben, Schwenken, Drehen, Drücken und Ziehen betätigt werden [VDI/VDE 2258 1987, S. 2]. Die

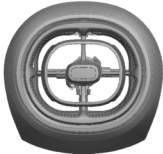
Wertigkeitsanalysen erfolgen innerhalb dieser Gliederung der Bewegungsarten. Neben einer Gliederung der Untersuchungen wird damit auch eine Abstraktion erzielt. In den Versuchsreihen ermittelte Gestaltungsempfehlungen verfügen folglich über ein Transferpotential auf Basis der Betätigungsart der Bedienelemente. So gilt beispielsweise ein ermitteltes Komfordrehmoment der Betätigungsart Drehen, erprobt am Versuchsobjekt Luftdüse, für weitere Bedienelemente, deren Betätigung sich durch kontinuierliches Drehen auszeichnen. Das Versuchsobjekt dient ausschließlich als Träger bzw. Manifestierung der zu untersuchenden haptischen Merkmale. Damit ein Transferpotential möglich ist, ist es notwendig, die Betätigungsart aus den Bewegungs- und Greifmerkmalen des Nutzers sowie die spezifischen Merkmale der Versuchsobjekte präzise zu beschreiben und abzugrenzen (vgl. Tabelle 4.3).

Bei der Auswahl der Versuchsobjekte sowie der zu untersuchenden haptischen Merkmale müssen sowohl die Relevanz als auch die technische Machbarkeit berücksichtigt werden. Da reale, manuell-mechanische Bedienelemente den Probanden zur Bewertung vorgelegt werden sollen, gilt es hier, einige Besonderheiten zu beachten. Ein Unterschied im Wertigkeitsurteil der Stichprobe soll kausal auf einen maßlichen, systematisch manipulierten und prüfbar Parameter zurückgeführt werden. Um einer experimentellen Untersuchung gerecht zu werden, müssen folglich weitere grundsätzlich veränderliche Einflussgrößen konstant gehalten werden. Das bedeutet konkret, dass sich die Bauteile ausschließlich hinsichtlich der unabhängigen Variable unterscheiden dürfen. Neben der Unabwendbarkeit eines identischen Designs müssen auch im Hinblick auf Bauteiltoleranzen Störvariable kontrolliert sein. Folglich werden zum Vergleich unterschiedlicher Komfordrehmomente Serienbauteile mit identischer Sachnummer sowie aus einem Baulos gewählt. Anschließend erfolgt ein spezifischer Umbau beziehungsweise die Anpassung der Bauteile zur Manipulation des Drehmoments nach Konzipierung per Stufensprung (vgl. Kapitel 2.1.3). Die Überprüfung des Parameters sowie die Überprüfung eventueller Störvariablen erfolgt per Messung im Messrobotiksystem (vgl. Kapitel 3.1).

Als Ausgangswert zur Parametrisierung einer Versuchsreihe kann einerseits der gemessene Parameter des jeweiligen Serienbauteils dienen. So wird beispielsweise neben dem Serienbauteil in Versuchsreihe 2 je zwei Bauteile mit nach Stufensprung höherem und niedrigerem Drehmoment herangezogen (vgl. Kapitel 5.2). Andererseits kann ein Minimalwert, beispielsweise eine minimale Betätigungskraft F_B des Schiebens, definiert werden und als Ausgangswert dienen. Diese Minimalwerte orientieren sich an der Vermeidung einer Selbstverstellung. Die konkrete Parametrisierung ist zu Beginn der jeweiligen Versuchsreihen dargestellt (vgl. Kapitel 5.1 bis 5.3). Die Diagramme der dazugehörigen Messungen sind gesammelt in Tabelle A.3.1 bis Tabelle A.3.4 im Anhang A3 hinterlegt.

Die Gestaltparameterübersicht in Kapitel 2.4 zeigt eine Vielzahl an Gestaltdimensionen sowie zugrundeliegende Gestaltparameter. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Gestaltparameter muss eine Eingrenzung aufgrund des Umfangs erfolgen.

Die in den jeweiligen Bewegungsarten untersuchten haptischen Merkmale sowie die Zuordnung zu den Versuchsreihen werden in Tabelle 4.3 in der Übersicht dargestellt. Von den insgesamt fünf Bewegungsarten werden in den Haptik-Untersuchungen vier berücksichtigt. Die fünfte Bewegungsart, das Ziehen, ist in Tabelle 4.3 nicht enthalten, da die Haptik-Untersuchungen keine Überprüfung von Bedienelementen zum Ziehen umfassen.

	Schieben	Schwenken	Drehen	Drücken
Bauteil/ Versuchs- objekt				
Funktion	Stellen mit Raste		Stellen ohne Raste	Entriegeln
Greifart	3-Finger Zufassen		3-Finger Zufassen	2-Finger Kontakt
Kraftschluss	Reibschluss	Formschluss	Formschluss	Formschluss
Verlauf	kontinuierlich mit Mittelraste		kontinuierlich	monostabil
Kraft/ Drehmoment	VR 1 Betätigungskraft F_B	VR 1 Betätigungskraft F_B	VR 2 Durchmesser Drehmoment M_B Maximalmoment M_{Max}	VR 3 Schalkraft F_D zusätzlich: alternative Mechanismen
Rastkraft	VR 3 Ausrastkraft F_A			
Oberfläche	VR 1 Kopplungsfläche Griff - Material-Oberfläche - Form-Oberfläche 			

VR: Versuchsreihe

Tabelle 4.3: Übersicht der Gliederung, der Versuchsobjekte und der unabhängigen Variablen der Haptik-Untersuchungen

Bezüglich der Bewegungsarten Schieben und Schwenken bietet sich die Untersuchung der präferierten, generellen Betätigungskraft F_B an (vgl. Tabelle 4.3). Zu Bedienelementen dieser Bewegungsart lassen sich teils nur wenige und recht ungenau Angaben finden (vgl. [VDI/VDE 2258 1987, S. 9], [SCHMIDTKE 1989, C-9.3.6, S. 2]). Eine zusätzliche Versuchsreihe mit variierenden Rastkräften soll die Frage klären, welche Ausrastkraft F_A in

diesem Zusammenhang als zusätzlicher Aufschlag zu F_B als nutzergerecht empfunden wird. Für die Funktion Stellen mit und ohne Raste in den gegebenen Bewegungsarten wären somit grundlegende, optimale Werteangaben verfügbar.

Bei der Untersuchung der Bewegungsart Drehen wird das Drehmoment als kontinuierliche Eingabeart in Abgrenzung zu den Drehmoment-Amplitudenverläufen des Dreh-Drückstellers untersucht. Da der empfundene Kraftaufwand des Nutzers nicht nur vom Drehmoment, sondern auch vom Durchmesser des Griffelements abhängt, wird der Durchmesser als zweiter Faktor in die Versuchsreihe einbezogen. Mit den verschiedenen Griffen und ihren jeweiligen Durchmessern soll auch das maximale aufgebrachte Drehmoment der Probanden erfasst werden (vgl. Tabelle 4.3). Hierdurch kann geprüft werden, ob und in welcher Ausprägung ein Zusammenhang zwischen Komfortdrehmoment und dem maximalen Drehmoment vorliegt.

Das Drücken bei manuell-mechanischen Bedienelementen wird anhand eines monostabilen Tasters eines Ablagefachs untersucht. Hierbei wird die Schaltkraft zur Entriegelung systematisch variiert und auf ihre Wertigkeit hin überprüft. In dieser dritten Versuchsreihe werden auch neue oder alternative Entriegelungsmechanismen eingesetzt, wie zum Beispiel Magnete in unterschiedlichen Anordnungen (anziehend oder abstoßend), anstelle von zylindrischen Schraubenfedern (vgl. Tabelle 4.3 rechts). Die translatorischen Kraft-Weg-Messungen des Tasters ermöglichen es, völlig neue Verläufe zu ermitteln. Weitere Parameter wie Schaltweg [mm], Kraftsprung [%] und Kraftsprungweg [mm] können ebenfalls extrahiert werden. Da allerdings nur stark abweichende Konzepte verglichen werden, ist die Aussagekraft hier eingeschränkt. Der am besten bewertete Mechanismus oder das beste Konzept wird identifiziert, und es können die Parameter der am besten bewerteten Konzepte berichtet werden.

In den Untersuchungen zur Haptik werden zusätzlich unterschiedliche Oberflächen des Griffelements untersucht (vgl. Tabelle 4.3 unten). Als Versuchsobjekt dienen hierzu hinsichtlich der Oberfläche variierende Griffelemente von Luftdüsen, die geschwenkt und gedreht werden können. Einen Vorschlag für zukünftige Überprüfungen weiterer Kombinationen an Bewegungsart und Gestaltparameter enthält der Ausblick in Kapitel 8.

5 Untersuchungen zur Wertigkeit der Betätigungshaptik

Der vorgestellte Versuchsaufbau und die ausgewählten Versuchsobjekte sind die Grundlage für die Durchführung der Studien zur Haptik. Das vorliegende Kapitel gliedert sich hauptsächlich in die Versuchsreihen 1, 2 und 3 (Kapitel 5.1, 5.2 und 5.3). In jeder Versuchsreihe werden die Messungen der Untersuchungsparameter präsentiert, und der jeweilige Ablauf des Experiments wird beschrieben. Zudem ist eine Beschreibung der Stichprobe für jede Versuchsreihe verfügbar. Nach der Darstellung der Versuchsergebnisse werden diese jeweils ausführlich diskutiert. Die Zusammenfassung aller Gestaltungsempfehlungen auf Basis der Studienergebnisse folgt in Kapitel 7.

5.1 Versuchsreihe 1

Versuchsreihe 1 umfasst zwei Teile zur Untersuchung der Betätigungskraft und der Kopplungsflächen (vgl. Tabelle 4.3). Im ersten Teil wird die Betätigungskraft F_B beim Schieben und Schwenken in jeweils sechs Abstufungen untersucht. Hierfür wurden sechs unterschiedliche Versuchsobjekte (Luftdüsen) eingesetzt. Die Beschreibung und Bewertung erfolgt für das Schieben und Schwenken separat. Im zweiten Teil werden insgesamt 13 Versuchsobjekte (Luftdüsen) als Reizmuster präsentiert, die sich in der Oberfläche des Griffelements unterscheiden. Zum Einsatz kommen sechs unterschiedliche Material-Oberflächen und sieben Form-Oberflächen. Nachfolgend werden die untersuchten Parameter vorgestellt und basierend darauf Hypothesen der Versuchsreihe 1 abgeleitet.

5.1.1 Untersuchungsparameter und Hypothesen

5.1.1.1 Betätigungskraft F_B für Schieben und Schwenken

Als Ausgangswert der Betätigungskraft F_B für das Schieben und Schwenken am Versuchsobjekt der Luftdüse wurde eigenständig ein Wert von 1,0 N festgelegt. Dieser Wert soll die geringste realisierbare Kraft für die Betätigung darstellen, da Kräfte unter 1 N nicht zuverlässig für die Einstellung der Luftrichtung während des Fahr- und Funktionsbetriebs sorgen können. Eine Selbstverstellung durch den Luftstrom oder aufgrund von Erschütterungen im Fahrbetrieb erwirken voraussichtlich einen ungleich höheren Diskomfort als einen möglichen Komfortgewinn, sofern die präferierte Betätigungskraft unter 1 N liegt.

Die Definition der weiteren Untersuchungsparameter erfolgt gemäß der Normreihe R10 [DIN 323-1 1974] (vgl. Kapitel 2.1.3). Um eine fehlerhafte Angabe von Hundertstel Newton zu vermeiden, wurde 1,3 als Skalierungsfaktor verwendet anstelle von 1,25. Die technische Modifikation der Serienteile wurde, um die Zielwerte zu erreichen, von der Werkstatt des Herstellers der Luftdüse vorgenommen. Um höhere Betätigungskräfte zu realisieren,

werden Schraubenelemente eingesetzt, die Kräfte auf Lager oder bewegliche Teile wirken lassen. Tabelle 5.1 zeigt die zu prüfenden Untersuchungsparameter von Teil 1 der Versuchsreihe 1. Die einzelnen Messdiagramme jeder Faktorstufe sind in Tabelle A.3.1 in Anhang A3 zu finden.

Bewegungsart	Untersuchte Parameter der Betätigungskraft F_B [N]						Delta [N]
Schieben	1,0	1,3	1,6	2,0	2,5	3,1	$\Delta 2,1$
Schwenken	1,0	1,3	1,6	2,0	2,5	3,1	$\Delta 2,1$

Tabelle 5.1: Untersuchungsparameter bei Variation der Betätigungskraft F_B – VR1

Nach Darstellung der Untersuchungsparameter lassen sich für Teil 1 der Versuchsreihe 1 nachfolgende Null- und Alternativhypothesen formulieren. Das Urteil der Hypothesenprüfung ist im entsprechenden Diskussionsteil jeder Versuchsreihe zu finden. Eine Zusammenfassung aller Hypothesenentscheidungen wird in Kapitel 5.5 präsentiert.

- **H₀₋₁:** Es gibt keinen Unterschied zwischen den Betätigungskräften F_B im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Schieben.
- **H₁₋₁:** Es gibt einen Unterschied zwischen den Betätigungskräften F_B im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Schieben.
- **H₀₋₂:** Es gibt keinen Unterschied zwischen den Betätigungskräften F_B im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Schwenken.
- **H₁₋₂:** Es gibt einen Unterschied zwischen den Betätigungskräften im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Schwenken.
- **H₀₋₃:** Es gibt keinen Zusammenhang zwischen der Beschreibung der Probanden und dem Wertigkeitsurteil.
- **H₁₋₃:** Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Beschreibung der Probanden und dem Wertigkeitsurteil.
- **H₀₋₄:** Das Geschlecht hat keinen Einfluss auf die Bewertung von F_B .
- **H₁₋₄:** Das Geschlecht hat einen Einfluss auf die Bewertung von F_B .
- **H₀₋₅:** Das Alter hat keinen Einfluss auf die Bewertung von F_B .
- **H₁₋₅:** Das Alter hat einen Einfluss auf die Bewertung von F_B .

Obschon im Fragebogen neben der Wertigkeit auch die Ergonomie abgefragt wird (vgl. Tabelle 5.3), werden keine Hypothesen bezüglich der Ergonomie formuliert. Dennoch bilden eine nutzergerechte Rückmeldung und, allgemeiner gefasst, eine ergonomische Bedienung ein Fundament innerhalb der Komfort- und Wertigkeitspyramiden (vgl. Bild 1.1).

Sie sind somit wesentliche Bestandteile einer wertigen Produktgestaltung. Wegen dieses Zusammenhangs erfolgt zwar eine Erhebung und Auswertung der Ergonomie-Bewertungen der Probanden, jedoch erfolgt aufgrund des Umfangs und Fokus der Arbeit keine gesonderte Hypothesenformulierung bezüglich Ergonomie.

5.1.1.2 Material-Oberfläche und Form-Oberfläche

Zur besseren Beschreibung der Griffelemente, deren Oberfläche im Versuch variiert wurde, zeigt Bild 5.1 exemplarisch ein Versuchsobjekt und die Anzahl der Faktorstufen.



Bild 5.1: Ein Versuchsobjekt und die variierte Oberfläche des Griffelements – VR1

Um eine schnelle Austauschbarkeit während des Versuchs zu gewährleisten, wurde jeder Griff vorab auf einer Luftdüse montiert. Die 13 unterschiedlichen Versuchsobjekte werden im Versuch nacheinander randomisiert präsentiert. Die Besonderheit dieses Versuchs ist, dass der Proband während einer tatsächlichen Betätigung eines Bedienelements unterschiedliche Oberflächen wahrnimmt. Es gibt keine Vorrichtung, um einen visuellen Einblick auf die Stellteile zu verhindern. Bei den jeweiligen Form-Oberflächen (FO) wird jedoch stets der gleiche Werkstoff und die gleiche Farbe verwendet. Bei der Variation der Material-Oberfläche (MO) kommen unterschiedliche Farben bei stets gleicher Form-Oberfläche vor. Nachfolgend zeigt Tabelle 5.2 die Gestaltung und Beschreibung der eingesetzten Griff-Oberflächen.

Nr.	Code	Beschreibung der Oberfläche	Bild
VR1.01	MO-La	lackierte Oberfläche	
VR1.02	MO-Ku1	Kunststoff hochglanz Werkstoff: PA6	
VR1.03	MO-Ku2	Kunststoff matt 600 Werkstoff: PA6 mit Schleifmittel Körnung 600 behandelt	

Tabelle 5.2: Faktorstufen der Oberfläche des Griffelements – VR1 (Teil 1/2)

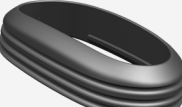
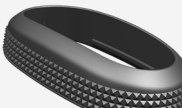
Nr.	Code	Beschreibung der Oberfläche	Bild
VR1.04	MO-Ku3	Kunststoff matt 60 Werkstoff: PA6 mit Schleifmittel Körnung 60 behandelt	
VR1.05	MO-PP	3D-Druck Griff Werkstoff: Polypropylen (PP) Fertigung: additive Fertigung	
VR1.06	MO-Alu	metallischer Griff Legierung: AISi10Mg Fertigung: Selective Laser Melting (SLM)	
VR1.07	FO-Rq	Breite b = 1 mm Tiefe t = 0,5 mm Abstand (senkrecht) a = 0,5 mm	
VR1.08	FO-R1	Breite b = 1 mm Tiefe t = 0,5 mm Abstand (senkrecht) a = 1,5 mm	
VR1.09	FO-R2	Breite b = 1 mm Tiefe t = 0,5 mm Abstand (senkrecht) a = 4 mm	
VR1.10	FO-N1	Breite b und Länge l = 1 mm Höhe h = 0,5 mm Abstand horizontal a = 0,50 mm Abstand vertikal a = 0,50 mm	
VR1.11	FO-N2	Breite b und Länge l = 1 mm Höhe h = 0,5 mm Abstand horizontal a = 2,10 mm Abstand vertikal a = 0,50 mm	
VR1.12	FO-Go	Breite b und Länge l = 1,5 mm Radius r = 0,75 mm Abstand horizontal a = 1,60 mm Abstand vertikal a = 0,5 mm	
VR1.13	FO-Ra	Breite b und Länge l = 0,75 mm Höhe h = 0,75 mm Abstand horizontal a = 0,20 mm Abstand vertikal a = 0,10 mm	

Tabelle 5.2: Faktorstufen der Oberfläche des Griffelements – VR1 (Teil 2/2)

Auf Basis der unterschiedlichen Material- und Form-Oberflächen des Griffelements lauten die Formulierungen für Null- und Alternativhypothese wie folgt:

- **H₀₋₆:** Es gibt keinen Unterschied zwischen den Oberflächen im Wertigkeitsurteil.
- **H₁₋₆:** Es gibt einen Unterschied zwischen den Oberflächen im Wertigkeitsurteil.

- **H₀₋₇:** Es gibt keinen Zusammenhang zwischen der Empfindung bzw. Beschreibung der Oberflächen und dem Wertigkeitsurteil.
- **H₁₋₇:** Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Empfindung bzw. Beschreibung der Oberflächen und dem Wertigkeitsurteil.

5.1.2 Versuchsablauf und -beschreibung

An Station 1 des Versuchs (vgl. Kapitel 4.1.4) wird ein erster Fragebogen zu demografischen Angaben wie beispielsweise Alter, Geschlecht, Händigkeit und Beruf ausgefüllt. Daran anschließend folgt ein psychografischer Fragebogen hinsichtlich der Fahrzeugnutzung. Die eingesetzten Fragebögen können den Tabellen A.2.1 und Tabelle A.2.2 im Anhang A2 entnommen werden. Bei dem psychografischen Fragebogen handelt es sich um eine Kurzfassung des validierten Fragebogens ERPI-A (*Ergonomierelevantes Persönlichkeitsinventar für das Auto*) nach POMIERSKY [2021]. Mit diesem Messinstrument können unterschiedliche Ausprägungen von Persönlichkeitsmerkmalen im Kontext Fahrzeugnutzung erhoben werden [POMIERSKY 2021, S. 208]. In der verwendeten Kurzfassung werden die Faktoren *Fahrspaß*, *Infotainmentorientierung*, *Komfortaffinität*, *Aufwandsvermeidung* und *Diskomfortempfindlichkeit* mit je drei Items erhoben. Die Reliabilität anhand der Berechnung der internen Konsistenz liegt für die verwendeten Faktoren bei einem Cronbachs Alpha von 0,718 bis 0,874 und damit im befriedigenden und guten Bereich [POMIERSKY 2021, S. 111].

Darauf folgen die Voruntersuchungen zur Feinmotorik und die Vermessung der rechten Hand (vgl. Kapitel 4.1). Der Hauptteil an Station 3 beginnt für die Probanden mit dem eigenständigen Einstellen in eine komfortable Sitzposition nach standardisierter Instruktion (vgl. Tabelle A.1.1 in Anhang A1).

Die Einführung zu Teil 1 des Hauptversuchs beginnt mit der Erklärung und den Vorgaben des Ablaufs. Die Probanden erhalten die Instruktion, die Betätigung stets am linken Griff mit einem 3-Finger-Zufassungsgriff durchzuführen. Die Bewegungsarten Schieben und Schwenken werden vorgestellt, und es folgt der Hinweis, dass die vorgegebene Bewegungs- und Greifart strikt einzuhalten ist. Es folgt eine kurze Vorstellung des Fragebogens zur Bewertung und Beschreibung der Betätigung. Tabelle 5.3 zeigt den Fragebogen zur Bewertung, der vom Original in Bezug auf Format und Darstellung abweicht. In diesem Fragebogen findet der Begriff *Hochwertigkeit* Verwendung, der als für die Allgemeinheit zugänglicher angenommen wird. Die Wertigkeit ist von den Probanden im Kontinuum von *sehr minderwertig* (1) bis *sehr hochwertig* (7) anzugeben. Der Fragebogen enthält außerdem eine Frage zur Ergonomie, die sich darauf konzentriert, wie präzise das vorliegende Bedienelement ist (vgl. Tabelle 5.3). Zusätzlich wird spezifisch der subjektiv empfundene

Kraftaufwand abgefragt, wobei die Skala von *zu leicht* (1) bis *zu schwer* (7) reicht. Der Grad des Zutreffens der Bewertung der Betätigung ist auf einer siebenstufigen Antwortskala anzugeben:

VR1 – Bewertung						
Betätigen Sie das Bedienelement frei und mehrfach mittels Zufassungsgriff						
Beantworten Sie anschließend folgende Fragen. Hierbei kommt es allein auf Ihre Einschätzung an. Alle Abstufungen haben den gleichen Abstand.						
Hochwertigkeit	Als wie hochwertig empfinden Sie das Bedienelement insgesamt?					
	sehr minderwertig			weder noch		sehr hochwertig
	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5	6
Ergonomie	Wie gut eignet sich das Bedienelement für eine präzise Einstellung?					
	sehr schlecht			weder noch		sehr gut
	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5	6
Betätigungskraft	Für eine präzise Verstellung empfinde ich die aufzubringende Betätigungskraft als...					
	zu leicht			optimal		zu schwer
	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5	6

Tabelle 5.3: Fragebogen zur Bewertung von Schieben und Schwenken – VR1

Die Beschreibung der Betätigung erfolgte anhand der unipolaren Items *deutlich*, *gleitend*, *kratzig*, *schwergängig* und *sportlich*. Es handelt sich dabei um eine Kurzfassung des von GLOHR [2018] entwickelten Fragebogens zur Objektivierung des subjektiven Empfindens bei der Betätigung von Bedienelementen. Die durchschnittliche innere Konsistenz ist mit Cronbachs Alpha von 0,7 angegeben [GLOHR 2018, S. 142]. Der Grad des Zutreffens der Empfindung bei der Betätigung ist auf einer siebenstufigen Antwortskala anzugeben.

Am Ende der Einführung liest der Versuchsleiter eine standardisierte und zusammenfassende Instruktion vor (vgl. Tabelle A.1.1 in Anhang A1). Anschließend werden die Probanden gebeten, das jeweilige Versuchsobjekt zuerst durch Schieben und dann durch Schwenken zu betätigen, wobei der identische Fragebogen zur Bewertung verwendet wird. Danach tauscht der Versuchsleiter das Versuchsobjekt gemäß einer zuvor festgelegten, randomisierten Reihenfolge aus. Anschließend werden die Probanden erneut gebeten, das Schieben zu betätigen und anhand desselben Fragebogens zu bewerten. Am Ende des ersten Teils werden drei abschließende Fragen zu jeder Bewegungsart gestellt (vgl. Tabelle 5.4). Die Ergebnisse dieser finalen Bewertung einer jeden Versuchsreihe werden versuchsübergreifend in Kapitel 5.4 zusammengefasst. Den Probanden wird außerdem die Möglichkeit gegeben, ihre Kommentare und Meinungen frei zu äußern.

VR1 – finale Bewertung						
Einfluss	Wie hoch ist Ihrer Meinung nach der Einfluss der Kraft auf die Wertigkeit des Bedienelements?					
kaum Einfluss				weder noch		sehr hoher Einfluss
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6	7
Stellweg	Für eine präzise Verstellung der Luftführung empfinde ich den Stellweg als...					
sehr schlecht			weder noch			sehr gut
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6	7
Verständnis	Die Luftführung zu verstellen, gelingt spontan und sicher.					
zu leicht			optimal			zu schwer
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6	7

Tabelle 5.4: Allgemeine und finale Fragen zum Schieben und Schwenken – VR1

Hiernach endet Teil 1 der ersten Versuchsreihe, und es folgt ein kurzer Umbau des Profilsystems durch den Versuchsleiter, um die Versuchsobjekte von Teil 2 ausrüsten zu können. Die 13 Versuchsobjekte des zweiten Teils (vgl. Tabelle 5.2), die sich hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Oberfläche an den Griffelementen unterscheiden, werden, wie schon in Teil 1, vom Versuchsleiter in zufälliger Reihenfolge fortlaufend zur Betätigung präsentiert. Der Fragebogen zur Bewertung des Bedienelements besteht aus zwei Fragen zur Wertigkeit und Ergonomie des Griffs, ähnlich dem Fragebogen aus Teil 1 (vgl. Tabelle 5.3). Darauf folgt ein sogenanntes Polaritätsprofil, auch Semantisches Differential genannt [OSGOOD ET AL. 1957], zur Beschreibung der Griff-Oberflächen. Ein Semantisches Differential gilt als ein Werkzeug zur Messung von konnotativer Bedeutung bzw. affektiver Qualität eines Objekts oder Begriffs [DÖRING & BORTZ 2016, S. 276f.]. Ferner ist von Interesse, welche subjektive Oberflächenbeschreibung mit einem positiven Wertigkeitsurteil einhergeht. Tabelle 5.5 zeigt die verwendeten Adjektive und das Antwortformat des Fragebogens zur Oberflächenbeschreibung.

VR1 – Polaritätsprofil								
fein	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	grob
glatt	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	rau
alltäglich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	einmalig
dezent	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	auffällig
zweckdienlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	verspielt
altbacken	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	modern

Tabelle 5.5: Polaritätsprofil zur Beschreibung der Griff-Oberflächen – VR1

Analog der Vorgehensweise in Teil 1 werden nach Ende der Bewertung und Beschreibung aller Versuchsobjekte ein finaler Fragebogen (vgl. Tabelle 5.4) vorgelegt. Neben den Fragen zum Einfluss auf die Wertigkeit und zum Verständnis, werden die Teilnehmer gebeten, aus der Gesamtheit aller Griff-Oberflächen jeweils einen Griff auszuwählen, der ihnen am besten (*Best*) und am schlechtesten (*Worst*) gefallen hat. Die Probanden werden weiterhin dazu ermutigt, Kommentare und Meinungen abzugeben.

5.1.3 Stichprobe

Die Stichprobe der ersten Versuchsreihe setzt sich aus insgesamt 30 Probanden im Alter von 18 bis 66 Jahren zusammen ($M = 32,07$; $SD = 12,17$). Der Erhebungszeitraum der Studie erstreckte sich vom 31. März bis zum 13. April 2023. Ein Proband wurde kurz nach Antritt des Versuchs aufgrund einer fehlenden gültigen Fahrerlaubnis der Klasse B aus dem Probandenkollektiv ausgeschlossen. Tabelle 5.6 fasst alle relevanten Daten der Stichprobe der ersten Versuchsreihe zusammen.

VR 1 (n = 30)	Min.	Max.	<i>M</i>	<i>SD</i>
Alter [Jahre]	18	66	32,07	12,17
Führerscheinbesitz [Jahre]	1	49	14,70	12,05
Nutzungsdauer [Tage/Woche]	1	7	3,17	2,07
Körpergröße [mm]	1610	1980	1794	92,5
Gewicht [kg]	51	107	76,83	15,58
Handlänge [mm]	165	210	188,2	11,7
Handflächenlänge [mm]	95	125	110	7,9
Handbreite [mm]	69	93	83,6	6,2
Zeigefingerbreite [mm]	10	22	16,5	2,2
Geschlecht	21 männlich (70 %); 9 weiblich (30 %)			
Händigkeit	1 links (3,3 %); 29 rechts (96,7 %)			

Tabelle 5.6: Beschreibung des Probandenkollektivs – VR1

Die Verteilung des Geschlechts liegt bei 70/30 zugunsten männlicher Probanden. Einen Universitätsabschluss haben 77 % der Teilnehmer. Einen wissenschaftlichen bzw. technischen Beruf üben nach eigener Angabe 60 % der Probanden aus. Weitere 30 % der Stichprobe waren Studenten. Die Zusammensetzung der Stichprobe bedingt sich insbesondere durch die Akquise im Hochschulumfeld mit technischer Ausrichtung.

Im Durchschnitt sind die Probanden seit 14,7 ($SD = 12,05$) Jahren im Besitz ihres Führerscheins. Dabei wird ein Pkw durchschnittlich an 3,17 ($SD = 2,07$) Tagen in der Woche gefahren. Mehr als die Hälfte der Probanden (66 %) gaben an, einen Pkw zu besitzen.

Die meistgefahrenen Fahrzeug-Marken innerhalb der letzten sechs Monate waren Mercedes-Benz und Opel (je sechs Nennungen), gefolgt von BMW mit drei Nennungen.

Rund 33 % der Probanden geben an, ein feinmotorisches Hobby auszuüben. Wiederum 80 % davon entfallen auf das Hobby Heimwerken und (Fahrrad-) Reparaturen. Weiterhin spielen 30 % der Befragten ein Musikinstrument, wie beispielsweise Gitarre oder Klavier mit je 3 Nennungen.

Hinsichtlich der psychografischen Einordnung in Bezug auf die Fahrzeugnutzung zeigt die vorliegende Stichprobe eine hohe Ausprägung an *Fahrspaß* ($M = 3,98$) und eine geringe Ausprägung an *Diskomfortempfindlichkeit* ($M = 2,13$). Die Ergebnisse der einzelnen psychografischen Dimensionen zeigt Bild 5.2 als Boxplot und anfangs des Ergebniskapitels 5.1.4 wird eine detaillierte Erläuterung zur deskriptiven Darstellung mittels Boxplots präsentiert. Der Faktor *Aufwandsvermeidung* liegt im mittleren Bereich ($M = 3,14$), sodass ausgeschlossen werden kann, dass die Teilnehmer nur kaum bis selten Verstellmöglichkeiten im Fahrzeug nutzen. *Infotainmentorientierung* und *Komfortaffinität* sind etwas oberhalb der Mitte ausgeprägt. Die Ergebnisse der Psychografie wie auch der Voruntersuchung zur Feinmotorik können womöglich durch die Altersstruktur der Stichprobe bedingt sein.

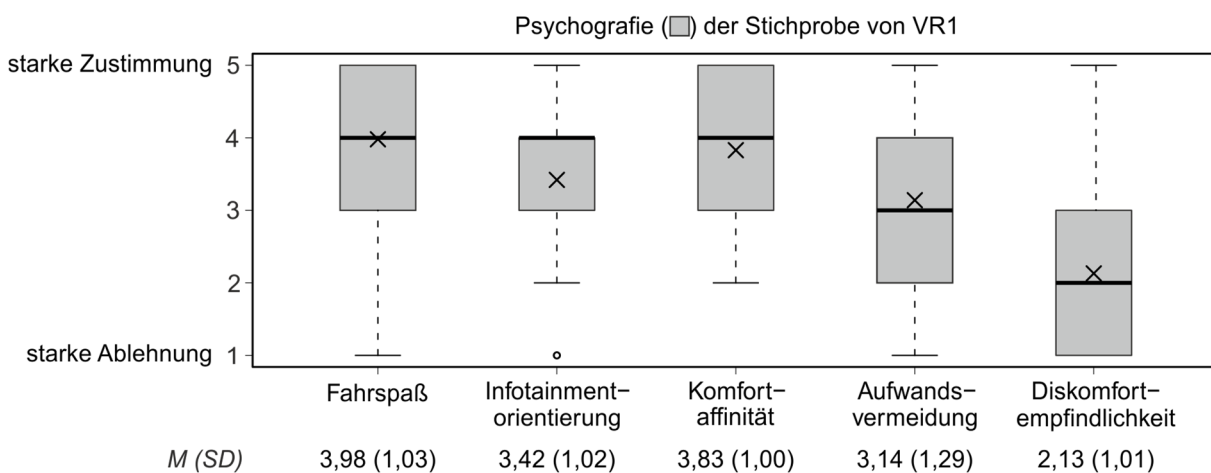


Bild 5.2: Ergebnisse der Voruntersuchung zur Psychografie – VR1

Die feinmotorischen Fähigkeiten der Stichprobe entsprechen dem Normbereich des Wiener Testsystems (WTS), der mit einem Prozentrang (PR) von 16 bis 84 angegeben wird. Auch die T-Werte liegen im Durchschnittsbereich, wenngleich tendenziell an der oberen Grenze (vgl. Tabelle 5.7). Die vorliegende Stichprobe (18 bis 66 Jahre) zeigt im Vergleich zur Normstichprobe (18 bis 91 Jahre) des Wiener Testsystems (WTS) eine jüngere Altersstruktur. Dies hat möglicherweise zur Folge, dass bei den Aufgaben bessere Leistungen erzielt werden. Insbesondere im Hinblick auf den Faktor *Handruhe/Tremor* erzielte die untersuchte Stichprobe überdurchschnittliche Ergebnisse. Zusammenfassend kann

jedoch praktisch ausgeschlossen werden, dass Ergebnisse der Hauptuntersuchung auf mangelnde Feinmotorik zurückzuführen sind. Tabelle 5.7 zeigt die Ergebnisse des angewandten Tests der Motorischen Leistungsserie.

VR 1 – Feinmotorik (n = 30)		Handruhe, Tremor	Präzision	Geschwindigkeit
T-Wert (Normwertskala)	< 40: unterdurchschnittlich ≥ 60: überdurchschnittlich	62	56	60
Prozentrang (PR)	PR = 50 bedeutet, dass 50 % der Normstichprobe schwächere oder gleich gute Leistungen erreichten	83	69	75

Tabelle 5.7: Ergebnisse der Voruntersuchung zur Feinmotorik – VR1

5.1.4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe dargestellt. Zunächst erfolgt die deskriptive und inferenzstatistische Auswertung zur Bewertung und Beschreibung innerhalb der jeweiligen Versuchsreihe. Daran anschließend folgt die Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des Kraftaufwandes. Die Ergebnisse der finalen Fragen werden für die Versuchsreihen übergreifend am Ende in Kapitel 5.4 vorgestellt.

Für die deskriptive Darstellung der Ergebnisse wird eine Darstellung als Boxplot verwendet. Die geometrische Mitte, der Median, ist als hervorgehobener Querstrich gekennzeichnet. Zusätzlich ist das arithmetische Mittel mit einem Kreuz markiert. Neben den Maßen der zentralen Tendenz hat das Boxplot weitere Vorteile, wie etwa die Darstellung von Ausreißern, der Verteilung und der Schiefe. Die Box um den Median definiert die Grenze, innerhalb derer die mittleren 50 % der Daten liegen [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 73]. Folglich stellt die obere Grenze der Box das 75. Perzentil und die untere Grenze das 25. Perzentil dar [EBD., S. 73]. Je größer dieser Interquartilabstand ist, desto größer ist die Streuung der Daten. Die Spanne der Verteilung wird durch die dünnen Linien, genannt Whiskers, verdeutlicht. Die untere Linie reicht bis zum minimalen Messwert, und die obere Linie erfasst den maximalen Messwert. Eine Ausnahme bilden Ausreißer, die mehr als den eineinhalbfachen Interquartilabstand der Box vom 25. bzw. 75. Perzentil entfernt liegen [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 75]. Diese Ausreißer sind mit einem Kreis gekennzeichnet. Die Boxen und die Länge der Whiskers geben außerdem Aufschluss darüber, ob die Verteilung symmetrisch ist. Liegt der Median nicht in der Mitte der Box, so ist von Asymmetrie und einer Schiefe der Verteilung auszugehen [EBD., 2012, S. 76].

5.1.4.1 Betätigungskraft F_B für Schieben und Schwenken

Schieben: Bild 5.3 zeigt das aggregierte Ergebnis der Probandenurteile bezüglich Wertigkeit und Ergonomie beim Schieben mit variierteter Betätigungskraft F_B . Die Ergebnisse zeigen, dass $F_B = 1,3$ N für am wertigsten befunden wird ($M = 5,07$; $SD = 1,39$). Bei

geringerer Betätigungskraft ($F_B = 1,0 \text{ N}$) sowie bei höheren Kräften ($F_B \geq 1,6 \text{ N}$) werden sukzessive geringere Messwerte erreicht. Am minderwertigsten haben die Probanden beim Schieben die höchste Faktorstufe $F_B = 3,1 \text{ N}$ bewertet ($M = 2,73$; $SD = 1,36$).

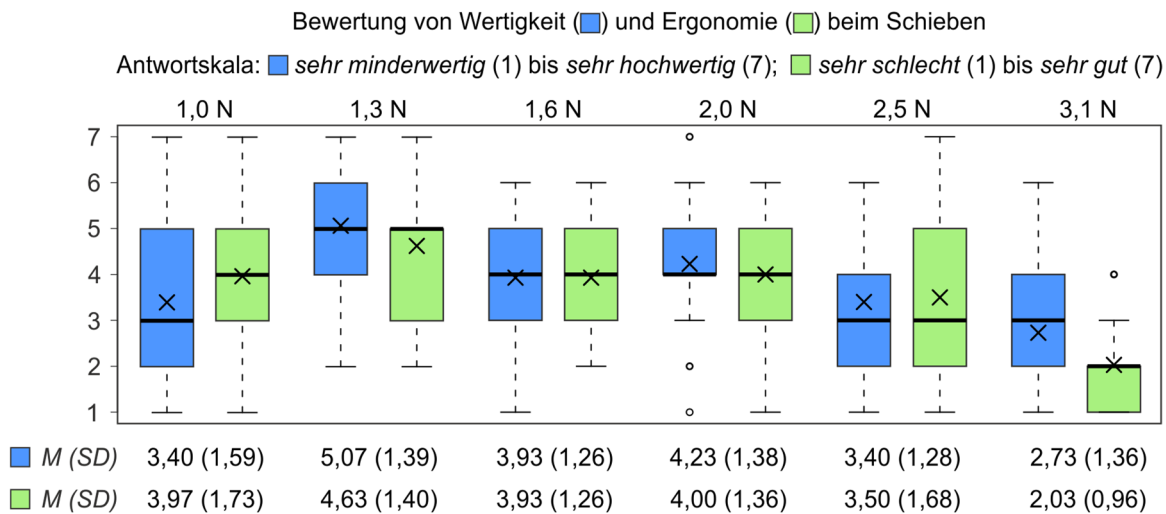


Bild 5.3: Ergebnisse der Bewertung beim Schieben – VR1

Ob die Unterschiede aufgrund der Parametervariation statistisch bedeutsam sind, soll ein inferenzstatistisches Verfahren ermitteln. Für eine Rangvarianzanalyse mit abhängigen Stichproben wird der voraussetzungsfreie Friedman-Test herangezogen [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 470-482]. Die Durchführung des Tests zeigt, dass sich die Messwerte hinsichtlich Wertigkeit höchst signifikant unterscheiden ($\text{Chi-Quadrat}(5) = 46,91$; $p < 0,001$; $n = 30$). Die Nullhypothese H_{0-1} kann bereits verworfen werden, denn es gibt einen signifikanten Unterschied in der Wertigkeit auf Basis der Betätigungskraft F_B . Um zu klären, welche Paarungen Unterschiede aufweisen, werden paarweise Vergleiche mittels Dunn-Bonferroni-Tests bei allen 15 Paaren durchgeführt (vgl. Tabelle 5.8). Bei diesen Post-hoc-Tests wird ein adjustiertes, konservativeres Signifikanzniveau verwendet, um die Wahrscheinlichkeit von Fehlern 1. Art aufgrund der Mehrfachtestung zu kontrollieren [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 554].

Wie Tabelle 5.8 zeigt, besteht der größte Unterschied und die größte Teststatistik ($z = 2,80$, $p < 0,001$) logischerweise bei der Paarung zwischen der besten Bewertung von $F_B = 1,3 \text{ N}$ und der schlechtesten Bewertung bei $F_B = 3,1 \text{ N}$. Aufgrund der besonders hohen Mittelwertdifferenz bei diesem Paarvergleich liegt gar ein höchst signifikantes Ergebnis vor ($p < 0,001$). Auch die geringere Betätigungskraft $F_B = 1,0 \text{ N}$ fällt überzufällig minderwertiger aus im Vergleich zu $F_B = 1,3 \text{ N}$. Die höheren Betätigungskräfte unterscheiden sich ebenfalls alle signifikant voneinander (vgl. Tabelle 5.8) bis auf $F_B = 2,0 \text{ N}$ ($z = 1,00$; $p = 0,577$). Dass letzterer Unterschied nicht signifikant ausfällt, liegt insbesondere an der recht konservativen Bonferroni-Korrektur.

VR1 - Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Schieben					
$n = 30$	$F_B = 1,0 \text{ N}$	$F_B = 1,3 \text{ N}$	$F_B = 1,6 \text{ N}$	$F_B = 2,0 \text{ N}$	$F_B = 2,5 \text{ N}$
$F_B = 1,3 \text{ N}$	$z = -2,23$; $p < 0,001$ ***	-	-	-	-
$F_B = 1,6 \text{ N}$	$z = -0,78$; $p = 1,00$	$z = 1,45$; $p = 0,040$ *	-	-	-
$F_B = 2,0 \text{ N}$	$z = -1,23$; $p = 0,160$	$z = 1,00$; $p = 0,577$	$z = -0,45$; $p = 1,00$	-	-
$F_B = 2,5 \text{ N}$	$z = -0,12$; $p = 1,00$	$z = 2,12$; $p < 0,001$ ***	$z = 0,67$; $p = 1,00$	$z = 1,12$; $p = 0,312$	-
$F_B = 3,1 \text{ N}$	$z = 0,57$; $p = 1,00$	$z = 2,80$; $p < 0,001$ ***	$z = 1,35$; $p = 0,078$	$z = 1,80$; $p = 0,003$ **	$z = 0,68$; $p = 1,00$
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant					

Tabelle 5.8: Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Schieben – VR1

Die Bewertung der Ergonomie beim Schieben (vgl. Bild 5.3) zeigt ein ähnliches Ergebnis, wie das der Wertigkeit. Die Faktorstufe $F_B = 1,3 \text{ N}$ erzielt das beste Ergebnis hinsichtlich Ergonomie ($M = 4,63$; $SD = 1,40$). Auffällig ist, dass $F_B = 3,1 \text{ N}$ ergonomisch besonders schwach ausfällt ($M = 2,03$; $SD = 0,96$). Die Unterschiede der Ergonomie-Messwerte sind nach Friedmann-Test ebenfalls höchst signifikant (Chi-Quadrat (5) = 49,15; $p < 0,001$; $n = 30$), das heißt mindestens eine Paarung der Faktorstufen unterscheidet sich signifikant. Die dazugehörigen Paarvergleiche können der Tabelle A.4.1 im Anhang A4 entnommen werden. Die Korrelation zwischen Wertigkeit und Ergonomie beim Schieben wurde mit Spearmans rho berechnet und ergab einen Wert von $r = 0,56$ ($p < 0,001$), was nach COHEN [1988, S. 81] einen starken Zusammenhang zeigt.

Im Fragebogen wird außerdem spezifisch der aufzubringende Kraftaufwand bei jedem Versuchsobjekt abgefragt (vgl. Tabelle 5.3). Die Probanden bewerteten ihren jeweils subjektiv empfundenen Kraftaufwand auf einer 7-stufigen Skala, wobei die Skala von *zu leicht* (1) bis *zu schwer* (7) reicht und die Mitte (4) der Skala als *optimal* definiert ist. Bild 5.4 zeigt, dass Versuchsobjekt $F_B = 1,3 \text{ N}$ nicht nur am wertigsten ausfällt, sondern darüber hinaus am nächsten einer *optimalen* Betätigungskraft entspricht ($M = 4,3$; $SD = 1,06$). Zu erkennen ist außerdem, dass der Mittelwert von $F_B = 1,0 \text{ N}$ als einziges unterhalb von *optimal* liegt ($M = 3,63$; $SD = 1,25$). Anhand der Ergebnisse der 30 Probanden ist in Bild 5.4 konsequent zu beobachten, dass generell ein höherer subjektiver Kraftaufwand bewertet wurde, wenn die Parameterausprägung [N] der Faktorstufe höher war. Der höchste Kraftaufwand mit $M = 6,7$ ($SD = 0,52$) lag bei der schwersten Betätigungskraft $F_B = 3,1 \text{ N}$ und entspricht nahezu dem maximalen Wert auf der Skala (7). Es ist zu beachten, dass in Bild 5.4 und weiteren Abbildungen zwar Informationen zur Streuung

anhand des Boxplots vorliegen, jedoch im Text nur ausgewählte Werte für Standardabweichungen (*SD*) berichtet werden.

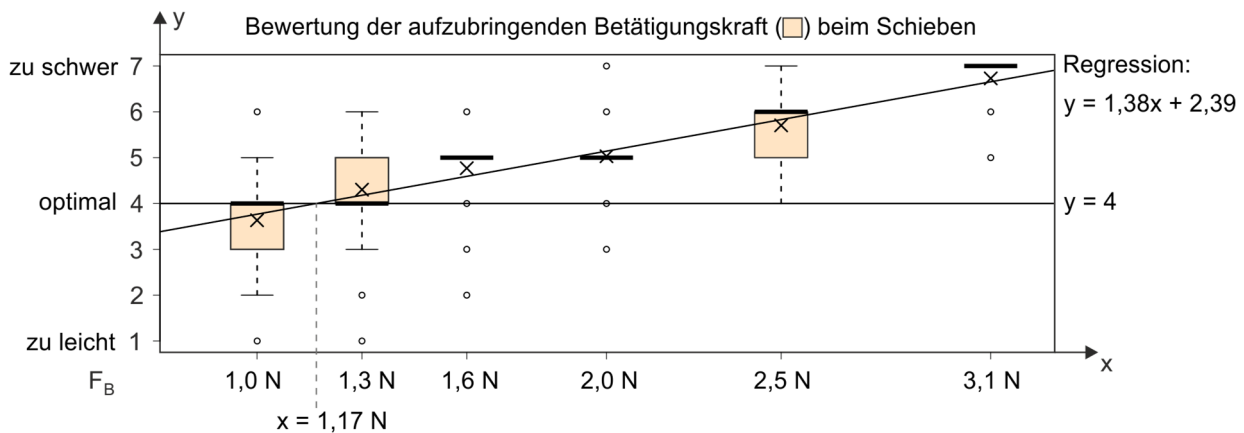


Bild 5.4: Bewertung des Kraftaufwands beim Schieben – VR1

Auf Basis der gesamten Kraftbewertungen aller Probanden lässt sich mit der Hilfe eines linearen Regressionsmodells die optimale Betätigungskraft vorhersagen. Eine ausführliche Erläuterung der linearen Regression wird zu Beginn des Kapitels 6.3.1.1 gegeben, da ein Regressionsmodell das zentrale Ergebnis der Akustikuntersuchungen darstellt.

Bei der einfachen linearen Regression soll ein Kriterium, die Bewertung des Kraftaufwands durch die Probanden, auf den Prädiktor F_B zurückgeführt werden. Um den Zusammenhang zwischen beiden Variablen zu analysieren, wird eine lineare Funktion abgeleitet, die die Datenpunkte optimal beschreibt. Die Methode der kleinsten Quadrate führt zur Bestimmung des besten linearen Modells. [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 585-594]

In Bild 5.4 sind die Regressionsgleichung sowie die dazugehörige Regressionsgerade dargestellt. Durch Einsetzen des Wertes $y = 4$ (*optimal*) in die Regressionsgleichung kann die optimale Betätigungskraft auf Basis des Modells berechnet werden, indem nach x aufgelöst wird. Die aus den Bewertungen aller Probanden modellierte und errechnete, optimale Betätigungskraft F_B , beim Schieben mittels 3-Finger Zufassungsgriff liegt demnach bei 1,17 N (vgl. Bild 5.4).

Mittels eines nicht-parametrischen Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben wurde der Einfluss des Geschlechts auf die Bewertung des Kraftaufwands untersucht. Zwischen den beiden Gruppen kann kein statistisch relevanter Unterschied bei den Bewertungen festgestellt werden. Die Teststatistik beträgt $z = -0,008$ und ist nicht signifikant ($p = 0,994$). Der Zusammenhang zwischen dem Alter und den Bewertungen des Kraftaufwands ist nicht vorhanden und statistisch irrelevant (Spearman rho $r = 0,02$; $p = 0,77$).

Schwenken: Bild 5.5 zeigt das aggregierte Ergebnis der Probandenurteile bezüglich Wertigkeit und Ergonomie beim Schwenken in Abhängigkeit unterschiedlicher Betäti-

gungskräfte. Wie schon bei der zuvor geprüften Bewegungsart Schieben, fällt die Faktorstufe $F_B = 1,3 \text{ N}$ am wertigsten aus ($M = 5,37$; $SD = 1,16$). Die geringste Betätigungskraft $F_B = 1,0 \text{ N}$ erzielt diesmal ein ebenfalls sehr hohes Ergebnis ($M = 5,10$; $SD = 1,16$). Der Unterschied zwischen den beiden Faktorstufen, die am besten abschnitten, fällt nicht signifikant aus ($z = -0,15$; $p = 1,00$). Tendenziell nimmt die Wertigkeit beim Schwenken mit zunehmender Betätigungskraft ab. $F_B = 3,1 \text{ N}$ ist erneut am minderwertigsten bewertet, mit $M = 3,47$ ($SD = 1,57$) jedoch auf einem deutlich höheren Niveau als beim Schieben ($M = 2,73$; $SD = 1,36$; vgl. Bild 5.3). Generell ist zu beobachten, dass die Versuchssubjekte beim Schwenken im Mittel höhere Messwerte erreichen.

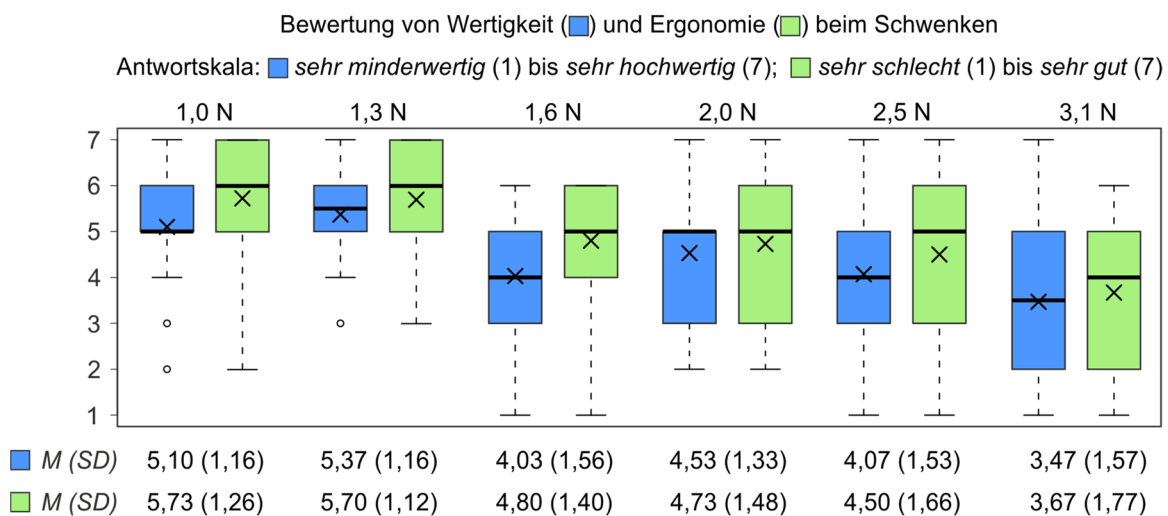


Bild 5.5: Ergebnisse der Bewertung beim Schwenken – VR1

Die Unterschiede in der Wertigkeit im Schwenken sind nach Friedman-Test höchst signifikant ($\text{Chi-Quadrat}(5) = 34,89$; $p < 0,001$). Die Nullhypothese H_{0-2} wird folglich verworfen. Die paarweisen Vergleiche mittels Dunn-Bonferroni-Tests sind in Tabelle 5.9 abgebildet.

VR1 - Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Schwenken					
$n = 30$	$F_B = 1,0 \text{ N}$	$F_B = 1,3 \text{ N}$	$F_B = 1,6 \text{ N}$	$F_B = 2,0 \text{ N}$	$F_B = 2,5 \text{ N}$
$F_B = 1,3 \text{ N}$	$z = -0,15$ $p = 1,00$	-	-	-	-
$F_B = 1,6 \text{ N}$	$z = 1,18$ $p = 0,214$	$z = 1,33$ $p = 0,087$	-	-	-
$F_B = 2,0 \text{ N}$	$z = 0,80$ $p = 1,00$	$z = 0,95$ $p = 0,738$	$z = -0,38$ $p = 1,00$	-	-
$F_B = 2,5 \text{ N}$	$z = 1,43$ $p = 0,045 *$	$z = 1,58$ $p = 0,016 *$	$z = 0,25$ $p = 1,00$	$z = 0,63$ $p = 1,00$	-
$F_B = 3,1 \text{ N}$	$z = 2,03$ $p < 0,001 ***$	$z = 2,18$ $p < 0,001 ***$	$z = 0,85$ $p = 1,00$	$z = 1,23$ $p = 0,160$	$z = 0,60$ $p = 1,00$
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant					

Tabelle 5.9: Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Schwenken – VR1

Die hohen Betätigungskräfte $F_B = 2,5 \text{ N}$ und $F_B = 3,1 \text{ N}$ unterscheiden sich im paarweisen Vergleich signifikant zu den am besten bewerteten Faktorstufen $F_B = 1,0 \text{ N}$ und $F_B = 1,3 \text{ N}$ (vgl. Tabelle 5.9).

Auch bezüglich der Bewertung der Ergonomie unterscheiden sich die Ergebnisse signifikant (Chi-Quadrat (5) = 44,62; $p < 0,001$). Die größten ergonomischen Vorteile bietet dabei $F_B = 1,0 \text{ N}$ ($M = 5,73$; $SD = 1,26$). Die Ergonomie-Messwerte nehmen mit steigender Betätigungskraft kontinuierlich ab (vgl. Bild 5.5). Die Paarvergleiche zur Ergonomie beim Schwenken können der Tabelle A.4.1 im Anhang A4 entnommen werden. Wie schon beim Schieben liegt erneut ein starker Zusammenhang zwischen Wertigkeit und Ergonomie vor, da die Korrelation nach Spearmans rho $r = 0,65$ ($p < 0,001$) beträgt.

Betrachtet man in Bild 5.6 die Bewertungen des Kraftaufwands beim Schwenken, so liegt $F_B = 1,0 \text{ N}$ sehr nahe am Optimum ($M = 4,23$; $SD = 0,82$). Diese Beobachtung deckt sich mit dem hohen Wertigkeits-Ergebnis der Faktorstufe $F_B = 1,0 \text{ N}$. Da alle durchschnittlichen Kraftbewertungen oberhalb von *optimal* (4) liegen, schneidet die Regressionsgerade die Horizontale $y = 4$ unterhalb von $x = 1,0 \text{ N}$ bei $x = 0,6 \text{ N}$.

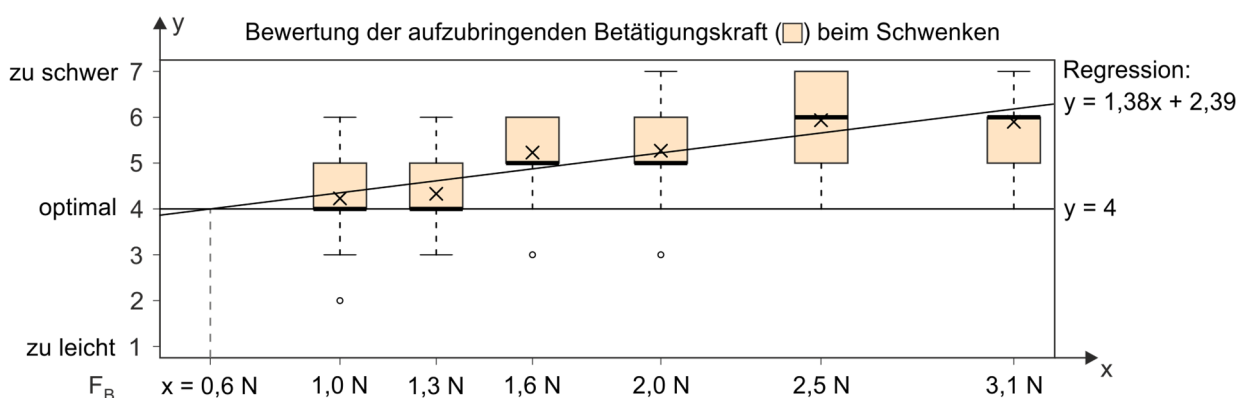


Bild 5.6: Bewertung des Kraftaufwands beim Schwenken – VR1

Zwischen den Geschlechtern ist auch beim Schwenken hinsichtlich der Bewertung des Kraftaufwands kein bedeutsamer Unterschied festzustellen ($z = 0,53$; $p = 0,597$). Zu diesem Zweck wurde ein nicht-parametrischer Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt. Die Korrelation von Alter und Kraftaufwand ist erneut sehr gering mit $r = 0,098$ ($p = 0,189$), und ein Zusammenhang kann praktisch ausgeschlossen werden. Die beiden Nullhypothesen H_{0-4} und H_{0-5} bleiben folglich über diese Falsifizierungsversuche hinweg bestehen.

Als nächstes werden die subjektiven Beschreibungen der Betätigung (vgl. Kapitel 5.1.2) in Abhängigkeit der Betätigungskraft F_B betrachtet. Sowohl beim Schieben, als auch beim Schwenken ergeben sich für alle fünf eingesetzten, unipolaren Adjektive signifikante Unterschiede ($p < 0,05$; Friedman-Test) über die Betätigungskräfte F_B hinweg. Das heißt im

konkreten Fall, dass unterschiedliche Kräfte zu unterschiedlichen Beschreibungen führen und H_{0-3} folglich abzulehnen ist. Allgemeiner formuliert lässt sich sagen, dass die Items in der Lage sind, auf Basis der Manipulation haptischer Merkmale Unterschiede in der Empfindung der Betätigung zu objektivieren. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen von GLOHR [2018], aus dessen Fragebogen die Items zur Objektivierung von Empfindungen stammen.

Bild 5.7 veranschaulicht den Vergleich der subjektiven Beschreibung zweier Faktorstufen mittels Radardiagrammen. Der höchste Wert (7) auf der Antwortskala entspricht dem höchsten Zutreffen des jeweiligen Adjektivs. Exemplarisch werden die Beschreibungen beim Schwenken des am wertigsten ($F_B = 1,3 \text{ N}$) und des am minderwertigsten ($F_B = 3,1 \text{ N}$) befundenen Versuchsobjekts dargestellt. In Bild 5.7 ist zu erkennen, dass ein wertiges Schwenken ($F_B = 1,3 \text{ N}$) als ausgeprägt *gleitend*, *deutlich* und *sportlich* beschrieben wird und zudem als geringfügig weniger *kratzig*. Die hohe Betätigungskraft $F_B = 3,1 \text{ N}$ wird als sehr *schwergängig* beschrieben, was plausibel ist. Die Mittelwerte der Beschreibungen aller Versuchsobjekte für das Schieben und Schwenken sind in Tabelle A.5.1 in Anhang A5 aufgeführt.



Bild 5.7: Vergleich der Beschreibungen des hochwertigsten und des minderwertigsten Versuchsobjekts beim Schwenken – VR1

Zusätzlich untersucht werden die Zusammenhänge zwischen den Beschreibungen aller Versuchsobjekte und deren Wertigkeit. Es zeigt sich, dass insbesondere das Item *schwergängig* einen starken Zusammenhang, wenn auch entgegengesetzt, mit der Wertigkeit aufweist ($r = -0,59$). Daraus folgt, dass, je schwergängiger ein Versuchsobjekt beschrieben wird, desto wahrscheinlicher es als minderwertig bewertet wird. Im positiven Zusammenhang mit der Wertigkeit stehen die Beschreibungen *deutlich* ($r = 0,57$) und *gleitend* ($r = 0,55$). Ein im Vergleich dazu relativ schwächerer Zusammenhang liegt bei *kratzig* ($r = -0,42$) und *sportlich* ($r = 0,30$) vor.

Diskussion: In den Messwerten der Wertigkeit wurde sowohl beim Schieben als auch beim Schwenken ein signifikanter Unterschied festgestellt. Diese Unterschiede lassen

sich auf die Variation der Betätigungskraft F_B zurückführen, die aufgrund des Versuchsdesigns als kausaler Faktor anzusehen ist. Daher eignet sich der Gestaltungsparameter Betätigungskraft dazu, bei günstiger Auslegung den kundenrelevanten Wertigkeitseindruck zu erhöhen. Eine Betätigungskraft von $F_B = 1,3 \text{ N}$ wurde jeweils am wertigsten bewertet. Aus den linearen Modellen der Bewertungen des Kraftaufwands lassen sich optimale Betätigungskräfte F_B von $1,17 \text{ N}$ (Schieben, vgl. Bild 5.4) und $0,6 \text{ N}$ (Schwenken, vgl. Bild 5.6) ermitteln. Unter Beachtung einer selbst festgelegten Toleranz von $\pm 0,3 \text{ N}$ ist es sinnvoller, die Spezifikation auf $F_B = 1,3 \text{ N}$ festzulegen. Dies ermöglicht eine Anpassung an ein geeigneteres Toleranzfeld und verhindert unrealisierbare Kräfte ($< 1 \text{ N}$). Generell liegen die Bewertungen zur Wertigkeit beim Schwenken (vgl. Bild 5.5) durchgehend auf einem höheren Niveau als beim Schieben (vgl. Bild 5.3). Eine mögliche Erklärung ist die asymmetrische Bewegungsfreiheit. Beim Schwenken ist die Horizontallamelle in nur zwei Punkten als Achse gelagert und wird um diese rotiert. Beim Schieben müssen zwei Kunststoffbauteile, der Griff und die Horizontallamelle, relativ zueinander bewegt werden. Die Kontaktfläche ist so deutlich vergrößert, und auch die entstehenden Störgeräusche sind ausgeprägter. In Versuchsreihe 1 spielen auch diverse Limitationen eine Rolle, wie beispielsweise das Fehlen einer kaschierten Instrumententafel, die zur Dämpfung von Störgeräuschen beitragen würde, sowie Wind- und Rollgeräusche während des Fahrbetriebs. Außerdem muss erwähnt werden, dass es keinen Luftstrom gab, der die haptische Wahrnehmung beeinflussen konnte, sofern hier ein Einfluss vorliegen sollte. Jegliche Vibrationen, wie sie im Fahrbetrieb vorkommen können, sind ferngeblieben. Zudem muss bedacht werden, dass keine primäre Fahraufgabe ausgeführt wurde und die Betätigung nicht als Nebenaufgabe erfolgte. Die Versuchsbedingungen entsprechen jedoch denen eines Verkaufsraums.

5.1.4.2 Material-Oberfläche und Form-Oberfläche

Angeichts der Vielzahl an Griffoberflächen ist es wenig überraschend, dass die Bewertungen der Wertigkeit signifikant voneinander abweichen. Der dazu durchgeführte Friedman-Test ergab ein Chi-Quadrat (12) von $= 87,35$; $p < 0,001$, bei einer Stichprobengröße von $n = 30$. Die Nullhypothese H_{0-6} , welche besagt, dass kein Unterschied im Wertigkeitsurteil zwischen den Oberflächen besteht, kann somit aufgrund des höchst signifikanten Ergebnisses verworfen werden. Alle Paarvergleiche zur Wertigkeit der Griffoberflächen sind in der Tabelle A.4.2 in Anhang A4 aufgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die beiden Kategorien Material-Oberfläche und Form-Oberfläche separat betrachtet. Wie in Bild 5.8 dargestellt, belegen die Material-Oberflächen Kunststoff-hochglanz MO-Ku1 ($M = 5,53$; $SD = 1,41$) und Kunststoff-lackiert MO-La ($M = 5,43$; $SD = 1,63$) die Plätze eins und zwei, welche nah beieinander liegen. Die mit einem äußerst feinen Schleifmittel

behandelte und leicht mattierte Oberfläche MO-Ku2 belegt mit einer gemittelten Bewertung von $M = 4,27$ ($SD = 1,70$) den dritten Rang. Der metallische Griff MO-Alu liegt mit $M = 4,0$ ($SD = 1,88$) in der geometrischen Mitte und auf Platz vier. Der Griff MO-PP aus Polypropylen und ohne Formelemente erreicht mit einem Wert von $M = 3,73$ ($SD = 1,53$) den vorletzten Platz innerhalb der Material-Oberflächen. Dieser Werkstoff wurde durchgehend für die Versuchsobjekte der Form-Oberfläche verwendet (vgl. Tabelle 5.2).

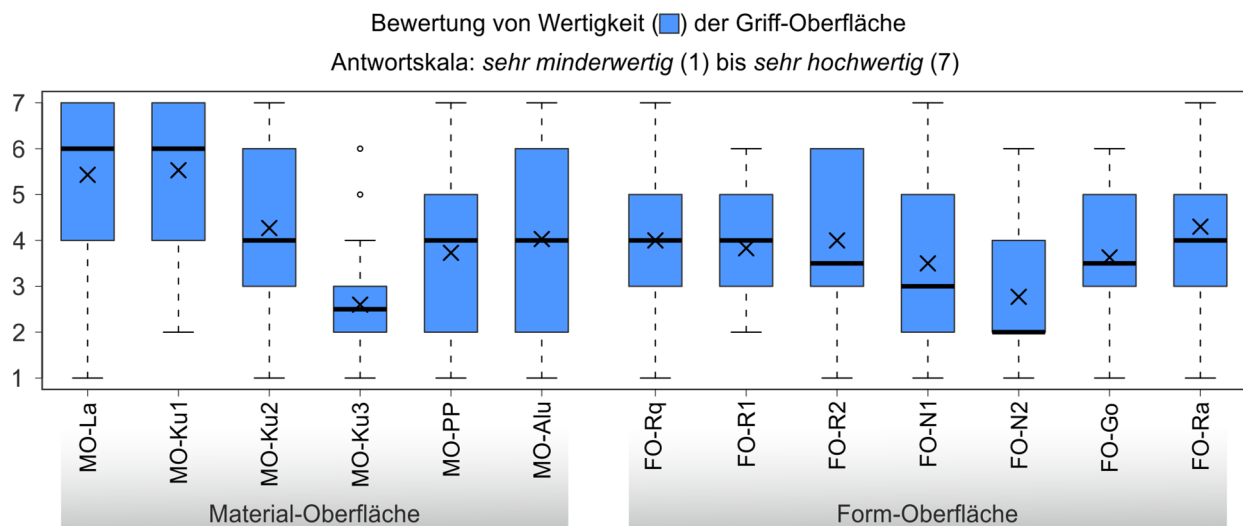


Bild 5.8: Ergebnisse der Bewertung der Wertigkeit von Griff-Oberflächen – VR1

Die Material-Oberfläche MO-Ku3 platziert sich insgesamt auf dem letzten Platz ($M = 2,60$; $SD = 1,35$). Diese Oberfläche wurde mit einem sehr groben Schleifmittel der Körnung 60 behandelt und erzeugt aufgrund der stark aufgerauten Oberfläche einen sehr minderwertigen Eindruck.

Innerhalb der Kategorie der Material-Oberfläche fallen die Bewertungen zur Wertigkeit höchst signifikant aus (Chi-Quadrat (5) von $= 60,35$; $p < 0,001$; $n = 30$). Die Teststatistik der einzelnen Paarvergleiche sind in Tabelle A.4.2 im Anhang A4. Es unterscheiden sich die am besten bewerteten Versuchsobjekte MO-La und MO-Ku1 jeweils hoch bzw. höchst signifikant von MO-Ku3 und MO-PP. Der am minderwertigsten ausgefallene Griff MO-Ku3 ist zudem hoch signifikant bzw. signifikant schlechter als MO-Ku2 und MO-Alu. Die am besten bewertete Form-Oberfläche ist FO-Ra mit $M = 4,3$ ($SD = 1,47$). Die Rändelung von FO-Ra besteht aus einem Pyramiden-Muster. Trotz des eher schwach abschneidenden Polypropylen-Werkstoffs der Form-Oberflächen erreicht FO-Ra insgesamt unter allen 13 Versuchsobjekten einen dritten Platz (vgl. Bild 5.8). Die Form-Oberflächen mit Noppen-Muster FO-N1, FO-N2 sowie das Golfball-Muster FO-Go, die durch kreisförmige Strukturen erzeugt wurden, erzielten die niedrigsten Bewertungen. Der Friedman-Test zur Wertigkeit der Form-Oberflächen zeigt, dass mindestens ein Paar mit signifikantem Unterschied vorliegt (Chi-Quadrat (6) von $= 18,12$; $p = 0,006$; $n = 30$). Bedingt durch

die konservative Bonferroni-Korrektur bei vielfachen Paarvergleichen kann lediglich ein statistisch hoch signifikanter Unterschied bei der wertigsten Form-Oberfläche FO-Ra und dem minderwertigen Noppen-Muster FO-N2 festgestellt werden ($z = -2,02$; $p = 0,006$; vgl. Tabelle A.4.2 Anhang A4).

Die Bewertungen der Ergonomie waren vergleichsweise eng aneinander anliegend, mit einem Mittelwertbereich von $M = 4,23$ (MO-Ku2) bis $M = 5,67$ (FO-Ra). Die Form-Oberfläche FO-Ra, die von den Probanden am wertigsten bewertet wurde, erweist sich auch als die ergonomischste, wie in Bild 5.9 dargestellt. Im Gegensatz dazu führen weiter ausgeprägte Form-Oberflächen wie FO-N1 oder FO-N2 zu keinen ergonomischen Vorteilen. Insgesamt schneiden die Form-Oberflächen im Mittel besser ab als die Gruppe der Material-Oberflächen ($M = 4,43$ zu $M = 5,0$).

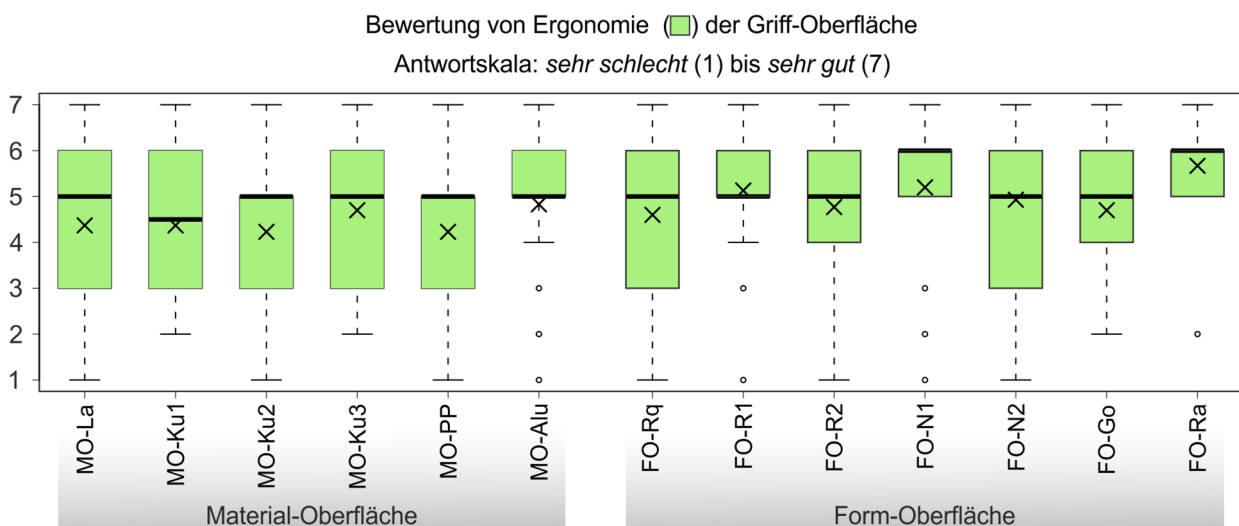


Bild 5.9: Ergebnisse der Bewertung der Ergonomie von Griff-Oberflächen – VR1

Die Überprüfung der Inferenzstatistik hinsichtlich der Ergonomie bei den Versuchsubjekten der Material-Oberfläche fällt ohne signifikantes Ergebnis aus (Chi-Quadrat (5) = 6,15; $p = 0,292$; $n = 30$). Dies ist insofern plausibel, da bei identischer Form-Oberfläche (glatt) und einer nicht kraftbetonten Aufgabe keine dieser Material-Oberflächen als nutzerge-rechter hervorgehen kann.

In der Gruppe Form-Oberfläche liegt mindestens ein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsubjekten vor (Chi-Quadrat (12) von = 37,27; $p < 0,001$). Die gesamten Paarvergleiche zur Ergonomie sind in Anhang A4 in Tabelle A.4.3 aufgeführt. Die Auswertung zeigt einen signifikanteren Unterschied, wobei FO-Ra im Bereich Ergonomie signifikant besser abschneidet als FO-Go ($z = -1,73$; $p = 0,040$). Somit erzielt die Rändelung FO-Ra die höchste Bewertung in Bezug auf Wertigkeit und Ergonomie unter den untersuchten Form-Oberflächen. Form-Oberflächen wiederum weisen im Vergleich zu den Material-Oberflächen eine geringfügig bessere Ergonomie-Bewertung auf.

Die subjektive Beschreibung erfolgte bei den Versuchen zu den Griff-Oberflächen mit Hilfe des eingesetzten Polaritätsprofils (vgl. Kapitel 5.1.2). Die Analyse mittels Friedman-Test zeigt, dass es aufgrund der variierenden Versuchsobjekte bei jedem Adjektivpaar signifikante Unterschiede in der Beschreibung gibt ($p < 0,01$). Demnach beeinflussen die verschiedenen Oberflächen sämtliche Aspekte der abgefragten subjektiven Beschreibung. Alle Mittelwerte des Polaritätsprofils sind in Anhang A5 in Tabelle A.5.2 aufgeführt. Tendenziell, je mehr eine Griffoberfläche als *grob* beschrieben wird, desto geringer fällt die Wertigkeit aus ($r = -0,46$). Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass Oberflächen, die näher am Gegenpol *fein* bewertet werden, ein höheres Ergebnis an Wertigkeit erzielen. Ähnliche Beobachtungen lassen sich auch bezüglich des Kontinuums *glatt-rau* feststellen ($r = -0,40$). Praktisch kein Zusammenhang besteht hingegen zwischen der Beschreibung auf der Skala *alltäglich-einmalig* und der Wertigkeit ($r = 0,02$). Geringe Zusammenhänge lassen sich bei *dezent-auffällig* ($r = -0,15$) und *zweckdienlich-verspielt* ($r = 0,13$) mit der Bewertung der Wertigkeit beobachten. Allerdings korreliert die Wertigkeit stark mit der Wahrnehmung einer Griffoberfläche als *modern* statt *altbacken* ($r = 0,54$). Die Nullhypothese H_{0-7} , die besagt, dass es keinen Zusammenhang zwischen der Empfindung bzw. Beschreibung der Oberflächen und dem Wertigkeitsurteil gibt, kann verworfen werden. Bild 5.10 zeigt exemplarisch zwei Polaritätsprofile im Vergleich.

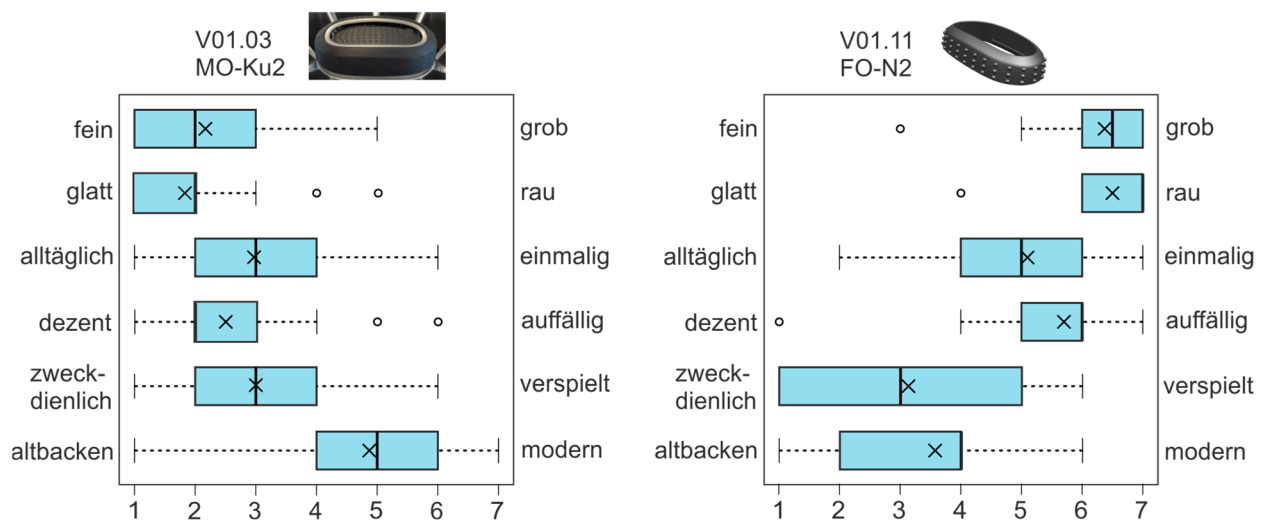


Bild 5.10: Vergleich der Polaritätsprofile von zwei Griff-Oberflächen – VR1

MO-Ku2 (Bild 5.9 links) wurde am Ende des Versuchs, als alle Griffe noch einmal in der Übersicht gezeigt wurden, am häufigsten als am besten ausgewählt (sechs Mal). Im Vergleich dazu wurde FO-N2 am häufigsten als am schlechtesten ausgewählt (19 Mal). Bei der Wertigkeitsbewertung erzielt FO-N2 zudem das schwächste Ergebnis (vgl. Bild 5.8).

Diskussion: Bei den Material-Oberflächen werden die sehr glatten Oberflächen MO-La und MO-Ku1 am hochwertigsten bewertet. Es lässt sich beobachten, dass eine Griffoberfläche wertig ist, wenn sie auch als modern, fein und glatt beschrieben wird. Die anderen

Adjektivpaare, die signifikant unterschiedlich ausfallen in Abhängigkeit der Faktorstufe, jedoch nicht mit der Wertigkeit korrelieren, könnten sich möglicherweise als sogenannte Markenfaktoren eignen.

Vergleichsweise gut bewertet und am Ende am häufigsten als *bester* Griff ausgewählt, wurde MO-Ku2. Dies ist insofern interessant, da es sich hierbei um einen Prototyp handelt, denn MO-Ku2 hat ein glattes und seidenmattes Finish aufgrund der Behandlung mit sehr feinem Schleifmittel. Das glatte, matte Finish wird als sehr modern beschrieben und hat auch den Vorteil, dass Fingerabdrücke nach Betätigung nicht so schnell sichtbar werden. Probandenaussagen während des Versuchs deuten auch darauf hin, dass diese Oberfläche bei feuchten Fingern angenehmer ist.

Obwohl der metallische Griff MO-Alu sich gegenüber den Kunststoff- und lackierten Oberflächen nicht als überlegen erwies, schneidet er nicht signifikant schlechter ab. Der Griff MO-Alu, der aus einer Aluminiumlegierung gesintert (SLS) wurde, konnte jedoch auch keine höhere Wertigkeit erreichen. Eine kühlere und härtere Oberfläche wurde von den Probanden kaum festgestellt, was möglicherweise auf die geringe Masse des Griffelements zurückzuführen ist, die nicht ausreichend ist, um einen thermisch wahrnehmbaren Unterschied zu erzeugen. Metalle haben in der Regel eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Kunststoffe, wodurch sie Wärme schneller von der Haut ableiten und sich daher kühl anfühlen können. Um eine noch höhere Wärmeleitfähigkeit zu erreichen, könnte ein Griff aus Vollmetall gefräst werden, was aber wiederum mit erhöhten Kosten verbunden ist. Dieses Ergebnis legt nahe, dass ein metallischer Griff, unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit, möglicherweise keine zusätzlichen Vorteile bietet.

Unter den getesteten Form-Oberflächen konnte das Versuchsobjekt FO-Ra mit seinem recht rauen, aber dennoch feinen Rändelungsmuster den ersten Platz belegen. Es erwies sich auch hinsichtlich der Ergonomie als das beste Versuchsobjekt, da es dezent ist und dennoch einen guten Reibschluss ermöglicht. Im Vergleich zu einigen glatten Material-Oberflächen schnitt FO-Ra diesbezüglich signifikant besser ab. Die Noppen FO-N1 und FO-N2 schnitten bezüglich Wertigkeit hingegen sehr schwach ab und könnten aufgrund ihrer starken Ausprägung bei häufiger Betätigung des Griffs störend bis schmerzhaft sein. Die Noppen-Oberflächen sowie die Golfball-Struktur wirken eher altbacken. Interessanterweise schnitten bei der Wertigkeitsbewertung alle Form-Oberflächen, die durch Kreise erzeugt wurden, mit dem letzten Platz ab, während alle Form-Oberflächen, die durch Linien erzeugt wurden, durchweg höhere Ränge belegten.

Die Limitationen der vergleichsweise niedrigen Realitätsdarstellung (engl. *low fidelity*) im Kontext Pkw-Fahrt sind dieselben wie in Teil 1 zuvor. Es ist zu beachten, dass die Probanden bei den Versuchen zur Oberfläche keinen Sichtschutz, wie zum Beispiel einen

Vorhang, hatten. Dadurch hatten sie visuellen Einblick auf die Versuchsobjekte und deren Gestaltung. Wenn kein visueller Einblick ermöglicht wird, muss zuvor die Unterschiedsschwellen mittels Zweipunktschwelle jedes Probanden ermittelt werden, um zu überprüfen, ob manche Form-Oberflächen überhaupt wahrnehmbar sind. Im Fragebogen ist explizit darauf hingewiesen, dass die Oberflächenhaptik zu bewerten ist. Die Entscheidung für den vorliegenden Versuchsaufbau wurde bewusst getroffen, um den Probanden neben dem Ertasten auch einen Blick auf die Versuchsobjekte zu ermöglichen, indem sie sich nach vorne beugen.

5.2 Versuchsreihe 2

Versuchsreihe 2 untersucht die Bewegungsart Drehen (vgl. Tabelle 4.3). Der Versuchsaufbau in Kapitel 5.2.2 sowie die Ergebnisse in Kapitel 5.2.4 gliedern sich erneut in zwei Teile. Der jeweils erste Teil ist die Untersuchung zum maximal erreichbaren Drehmoment der Probanden. Teil 2 stellt den eigentlichen Hauptversuch dar, in dem die Bewertung unterschiedlicher Versuchsobjekte erfolgt. Im Folgenden werden die untersuchten Parameter vorgestellt und basierend darauf die Hypothesen vorgestellt.

5.2.1 Untersuchungsparameter und Hypothesen

Eine Besonderheit der zweiten Versuchsreihe ist, dass ein zweifaktorielles Versuchsdesign gewählt wurde. Die erste unabhängige Variable ist das Drehmoment M_B in fünf Stufen. Hierzu wurden fünf unterschiedliche Versuchsobjekte (Luftdüsen) ausgewählt, systematisch manipuliert und vermessen (vgl. Bild 5.12). Bild 5.11 zeigt die Parametrisierung der fünf Faktorstufen von 0,75 bis 7,0 Ncm. Als Ausgangswert dienen die 1,3 Ncm des Serienbauteils. Der Skalierungsfaktor zwischen den Stufen entspricht in etwa 1,75. Der Aufbau des Versuchsobjekts Luftdüse sowie die technische Umsetzung der Drehmoment-Manipulation sind in Kapitel 3.2.2 dargestellt. Die Diagramme der Drehmomentmessungen können der Tabelle A.3.2 in Anhang A3 entnommen werden. Der Aufbau einer Drehmomentmessung mittels Messrobotiksystems zeigt Bild 5.12.

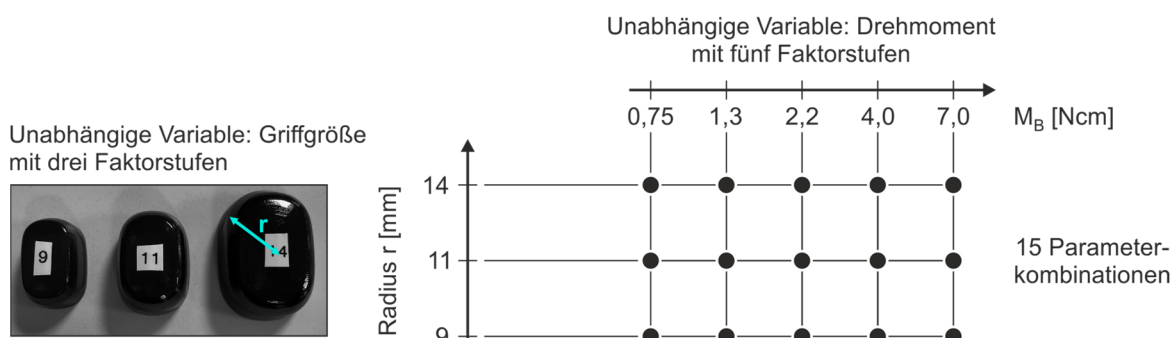


Bild 5.11: 3 x 5 Versuchsplan der zweiten Versuchsreihe

Die fünf unterschiedlichen Versuchsobjekte werden in Kombination mit einer der drei Stufen der zweiten unabhängigen Variable Griffgröße präsentiert. Die Griffgröße wird durch das Anbringen einer der drei Griffkappen am Bedienelement zum Drehen operationalisiert (vgl. Bild 5.11). Dieses Bedienelement weicht von einer zylindrischen Form ab und ist stattdessen elliptisch gestaltet. Daraus ergibt sich die Bemaßung für den Radius von 9, 11 und 14 mm, der von der Mitte des Griffs bis zu dem Punkt gemessen wird, an dem das höchste Drehmoment mittels Formschluss aufgebracht werden kann (vgl. Bild 5.11). Folglich sind in der zweiten Versuchsreihe insgesamt 15 verschiedene Parameterkombinationen zu untersuchen.

Es ist wichtig zu beachten, dass unabhängig von der Griffgröße, zur Betätigung eines spezifischen Versuchsobjekts stets das gleiche Drehmoment M_B erforderlich ist, welches notwendig ist, um den Reibwiderstand in den Lagern zu überwinden und eine Gleitbewegung zu ermöglichen. Der errechenbare, theoretische Kraftaufwand, aus dem Quotienten von Drehmoment und Hebellänge, nimmt für die Probanden mit größerer Griffgröße ab. Möglicherweise erweist sich ein theoretisch errechneter Kraftaufwand als ideal, unabhängig davon wie sich dieser aus Moment und Hebel zusammensetzt. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Faktoren Griffgröße und Drehmoment unabhängig voneinander sind und kein Interaktionseffekt vorliegt. Denn denkbar wäre beispielsweise, dass ein hohes Drehmoment mit kleinem Griff besonders minderwertig empfunden wird.

Nach Darstellung der Untersuchungsparameter werden für Versuchsreihe 2 folgende Null- und Alternativhypothesen aufgestellt:

- **H₀₋₈:** Es gibt keinen Unterschied zwischen den Drehmomenten M_B im Wertigkeitsurteil.
- **H₁₋₈:** Es gibt einen Unterschied zwischen den Drehmomenten M_B im Wertigkeitsurteil.
- **H₀₋₉:** Es gibt keinen Unterschied zwischen den Griffgrößen im Wertigkeitsurteil.
- **H₁₋₉:** Es gibt einen Unterschied zwischen den Griffgrößen im Wertigkeitsurteil.
- **H₀₋₁₀:** Es gibt keinen Interaktionseffekt zwischen Drehmoment und Griffgröße.
- **H₁₋₁₀:** Es gibt einen Interaktionseffekt zwischen Drehmomenten und Griffgröße.
- **H₀₋₁₁:** Es gibt keinen Zusammenhang zwischen dem Maximalmoment und dem präferierten Drehmoment M_B .
- **H₁₋₁₁:** Es gibt einen Zusammenhang zwischen dem Maximalmoment und dem präferierten Drehmomenten M_B .

5.2.2 Versuchsablauf und -beschreibung

Die Stationen 1 und 2 des Versuchs (vgl. Kapitel 4.1.4) sind identisch mit der ersten Versuchsreihe. Dies umfasst den demografischen und psychografischen Fragebogen, die Feinmotorikuntersuchung und die Vermessung der Hand des Probanden. An Station 3, der Sitzkiste, findet der Hauptversuch in zwei Teilabschnitten statt.

5.2.2.1 Maximal übertragenes Drehmoment

Im ersten Versuchsteil wird an der fiktiven Instrumententafel der Sitzkiste ein Drehmoment-Messgerät (K20, Fa. Kolver) montiert. Das Drehmoment-Messgerät ist so befestigt, dass die Haltung und Gelenkwinkelstellung beim Betätigen dem bisherigen Fahrzeug-Modell entsprechen. Ein eigens angefertigter Griff (SLS), der in Bezug auf die Maße und das Design mit dem Seriengriff des Versuchsobjekts übereinstimmt, wird über eine formschlüssige Sechskantverbindung am Drehmoment-Messgerät angebracht (vgl. Bild 5.12 rechts). Da sich der Griff des Drehmoment-Messgeräts nicht drehen lässt, handelt es sich korrekterweise um ein Torsionsmoment, das von den Probanden erzeugt wird.

Bild 5.12 zeigt in einer Gegenüberstellung zwei unterschiedliche technische Einrichtungen zur Messung von Drehmomenten. In Bild 5.12 links sind beispielhaft die Messungen der verwendeten Versuchsobjekte vor dem Versuch dargestellt. Hierzu wurde eine zusätzliche Bauteilaufnahme angefertigt, die auch im Hauptversuch verwendet wird, um die Versuchsobjekte zu präsentieren. Um Querkräfte und -momente zu vermeiden, wird im Messrobotiksystem eine Entkopplungsfeder eingesetzt. Diese Feder erlaubt eine Bewegung in alle Richtungen, außer in die Richtung, in der die Rotation und Messung erfolgt. Dies ist erforderlich, falls der Griff und die Welle des Bauteils nicht exakt fluchten. In Bild 5.12 rechts wird das verwendete Drehmoment-Messgerät zusammen mit dem zuvor erwähnten Griffelement gezeigt, das dem Seriengriff nachgebildet ist.

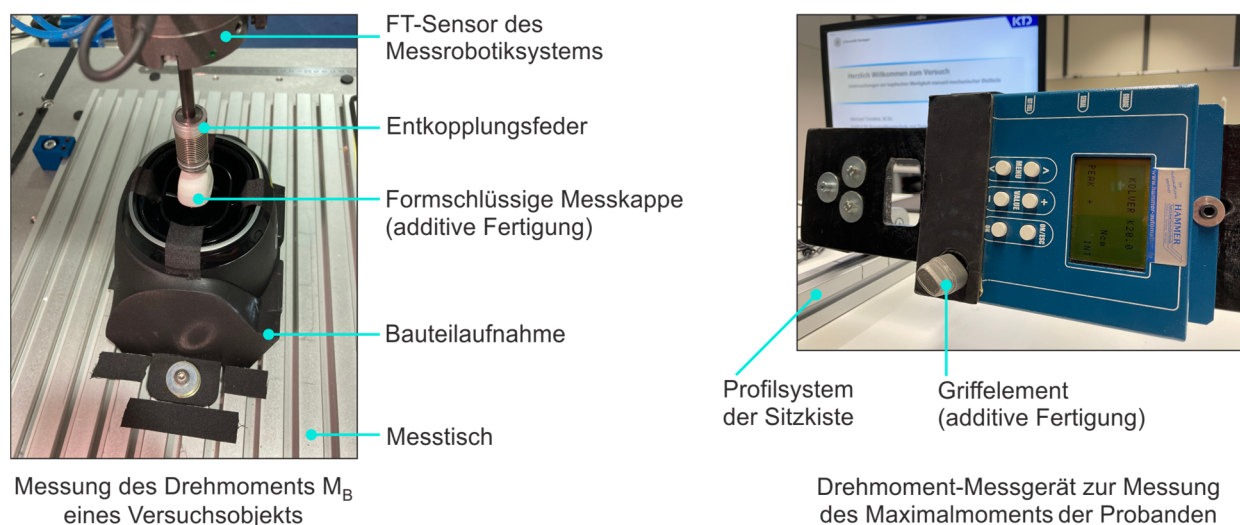


Bild 5.12: Aufbau zur Durchführung verschiedener Drehmomentmessungen – VR2

Nachdem der Proband in der Sitzkiste Platz genommen hat und gemäß der Instruktion (vgl. Tabelle A.1.1 in Anhang A1) den Sitz auf eine für ihn komfortable Position eingestellt hat, beginnen die Durchgänge zur Messung des Maximalmoments. Die gleichen Griffkappen, die auch im Hauptversuch verwendet werden (vgl. Bild 5.11), werden vom Versuchsleiter in randomisierter Reihenfolge am Drehmoment-Messgerät angebracht. Den Probanden wird erklärt, dass sie den Griff impulsartig mit maximaler Kraft im Uhrzeigersinn drehen sollen. Das Drehmoment-Messgerät zeigt auf dem Display den Höchstwert des erreichten Drehmoments [Ncm] an, den der Proband durch die kurzzeitige Anwendung maximaler Kraft erzeugt. Der Versuchsleiter notiert diesen Wert anschließend manuell. Um Ermüdungseffekte auszugleichen, werden die verschiedenen Griffkappen für jeden Probanden in einer vorher festgelegten, randomisierten Reihenfolge präsentiert. Nach jeweils zwei Messungen wechselt der Versuchsleiter die Griffkappe. Insgesamt führt jeder Proband acht Messungen durch, jeweils zwei Messungen mit jeder der drei verschiedenen Griffkappen sowie jeweils zwei Messungen mit dem Seriengriff.

5.2.2.2 Betätigungsmoment M_B beim Drehen

Bevor der eigentliche Hauptversuch von Versuchsreihe 2 startet, erfolgt eine kurze Umbaupause. Der Versuchsleiter demontiert das Drehmoment-Messgerät und bringt die Bauteilaufnahme (vgl. Bild 5.12) an der Instrumententafel an. Sodann kann direkt das erste Versuchsobjekt eingesteckt und präsentiert werden. Bevor der Proband mit der Betätigung und Bewertung beginnt, wird analog der ersten Versuchsreihe der Fragebogen auf dem Bildschirm gezeigt und erklärt.

Der Fragebogenteil zur Bewertung ist mit seinen Fragen zur Wertigkeit, Ergonomie und Kraftaufwand bis auf geringfügige Anpassungen identisch zu VR1 (vgl. Tabelle 5.3). Die Beschreibung der Betätigung erfolgt anhand der gleichen unipolaren Items wie in VR1, wobei das Item *gedämpft* zusätzlich hinzugefügt wurde. Diese Auswahl an Items entspricht erneut einer verkürzten Version des Fragebogens zur Beschreibung der Betätigungshaptik, diesmal speziell für rotatorische Bedienelemente [GLOHR 2018, S. 199]. Die finale Bewertung ist im Wesentlichen gleich der von VR1 (vgl. Tabelle 5.4), bis auf kleinere Anpassungen, wie etwa dem Ersetzen des Begriffs Stellweg mit Stellwinkel.

Vor Versuchsstart zur Bewertung der Versuchsobjekte liest der Versuchsleiter die standardisierte Instruktion vor (vgl. Tabelle A.1.1 in Anhang A1). Dem Versuchsleiter liegen zwei Listen zur Randomisierung der Reihenfolge vor. Anhand der ersten Liste wird die Luftdüse ausgewählt. Ist diese in der Bauteilaufnahme einmal eingesteckt, verbleibt sie dort so lange, bis sie mit allen drei Griffgrößen (vgl. Bild 5.11) bewertet wurde. Die Reihenfolge der aufzubringenden Griffvarianten legt die zweite Liste fest.

5.2.3 Stichprobe

Für Versuchsreihe 2 konnten erneut 30 Probanden herangezogen werden. Diese waren im Durchschnitt etwas jünger ($M = 27,80$; $SD = 8,05$) als im ersten Versuch. Erneut ergibt sich eine Geschlechterverteilung von 70/30 zugunsten der Männer. Die Durchführung des Versuchs erfolgte vom 30. Juni bis 05. Juli 2022.

Ein Proband hatte durch einen Unfall Teile seines rechten Zeigefingers verloren. Die Messung des Handmaßes des Zeigefingers entfiel für diesen Probanden. Ein Ausschluss dieser oder anderer Versuchspersonen von weiteren Untersuchungen erfolgte nicht. Tabelle 5.10 zeigt die statistische Zusammensetzung der zweiten Stichprobe.

VR 2 (n = 30)	Min.	Max.	<i>M</i>	<i>SD</i>
Alter [Jahre]	18	55	27,80	8,05
Führerscheinbesitz [Jahre]	1	37	10,63	7,92
Nutzungsdauer [Tage/Woche]	1	7	3,43	2,33
Körpergröße [mm]	1600	1980	1795	102,5
Gewicht [kg]	52	107	75,63	14,36
Handlänge [mm]	175	215	192,2	11,8
Handflächenlänge [mm]	100	125	112,7	7,28
Handbreite [mm]	72	102	84,5	7,42
Zeigefingerbreite [mm]	11	20	15,66	1,78
Geschlecht	21 männlich (70 %); 9 weiblich (30 %)			
Händigkeit	0 links (0 %); 28 rechts (93,3 %); 2 beidhändig (6,7 %)			

Tabelle 5.10: Beschreibung des Probandenkollektivs – VR2

60 % gaben an, in einem wissenschaftlichen oder technischen Beruf zu arbeiten, während 37 % Studierende sind. Im Durchschnitt besitzen die Probanden ihren Führerschein seit 10,6 ($SD = 7,92$) Jahren und fahren einen Pkw im Schnitt 3,43 ($SD = 2,33$) Tage pro Woche. 66 % der Probanden besitzen ein Fahrzeug, wobei Mercedes-Benz (6 Nennungen), Ford (4 Nennungen) sowie VW und Opel (je 3 Nennungen) die am häufigsten gefahrenen Marken innerhalb der letzten sechs Monate waren. Etwa ein Drittel der Teilnehmer gaben an, ein Hobby zu haben, das feinmotorische Fähigkeiten erfordert. Unter diesen Hobbys sind insbesondere Heimwerken und (Fahrrad-) Reparaturen beliebt (3 Nennungen) sowie das Zeichnen (2 Nennungen). Darüber hinaus spielen etwa 23 % der Befragten ein Musikinstrument, am häufigsten Klavier (3 Nennungen).

Die psychografische Einordnung der Fahrzeugnutzung zeigt, dass die zweite Stichprobe ebenfalls ein hohes Maß an *Fahrspaß* empfindet und eine niedrige Diskomfortempfindlichkeit aufweist. Das Ergebnis der psychografischen Voruntersuchung der Stichprobe der zweiten Versuchsreihe zeigt Bild 5.13.

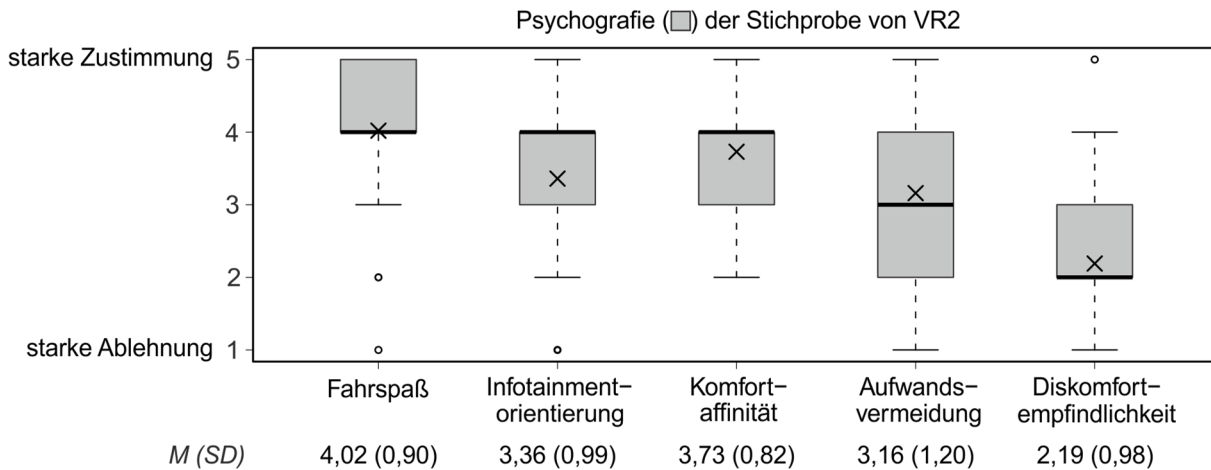


Bild 5.13: Ergebnisse der Voruntersuchung zur Psychografie – VR2

Der Faktor *Aufwandsvermeidung* liegt im mittleren Bereich, was bedeutet, dass die Teilnehmer durchaus Verstellmöglichkeiten im Fahrzeug nutzen. Die Altersstruktur der Stichprobe könnte die Ergebnisse der Psychografie beeinflusst haben und muss folglich bei der Betrachtung der Ergebnisse bedacht werden.

Mit Blick auf Alter und Geschlecht konnte im Vergleich zur ersten Stichprobe kein höherer Grad an Heterogenität erreicht werden. Dies zeigt sich insbesondere im Ergebnis der Feinmotorik-Voruntersuchung, die erneut in recht guten und teils überdurchschnittlichen Leistungen im Vergleich zur älteren Normstichprobe resultierten. Wie in Tabelle 5.11 dargestellt, sind die Ergebnisse zur *Handruhe/Tremor* und *Geschwindigkeit* mit T-Werten von 62 und 61 überdurchschnittlich, allerdings auch nicht stark fern des Normbereichs.

VR 2 – Feinmotorik (n = 30)		Handruhe, Tremor	Präzision	Geschwindigkeit
T-Wert (Normwertskala)	< 40: unterdurchschnittlich ≥ 60: überdurchschnittlich	62	58	61
Prozentrang (PR)	PR = 50 bedeutet, dass 50 % der Normstichprobe schwächere oder gleich gute Leistungen erreichten	83	72	80

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Voruntersuchung zur Feinmotorik – VR2

5.2.4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe gezeigt. Zunächst werden die Maximalmoment-Messungen behandelt. Dabei werden nicht nur die erreichten Drehmomente in Abhängigkeit vom Griff dargestellt, sondern auch Zusammenhänge und Unterschiede mit ausgewählten Kontrollvariablen aufgezeigt. Im Anschluss folgen die Ergebnisse zur Bewertung von Wertigkeit, Ergonomie und zum Kraftaufwand, wobei der Kraftaufwand auch in Verbindung mit den erreichten Maximalmomenten betrachtet wird.

5.2.4.1 Maximal übertragenes Drehmoment

Bild 5.14 zeigt die Ergebnisse der erreichten Drehmomente der Probanden am Drehmoment-Messgerät mittels 3-Finger-Zufassungsgriff. Auf der Abszisse sind die vier Griffvarianten abgetragen. Der Radius 7 mm bezieht sich auf den Griff des Serienbauteils, der über die Sechskantverbindung am Messgerät montiert ist (vgl. Bild 5.12). Die Radien 9, 11 und 14 mm beziehen sich auf die eingesetzten Griffkappen (vgl. Bild 5.11). Allgemein betrachtet kann man festhalten, dass mit größerem Griff ein höheres Maximalmoment erreicht wird, was auch die eingezeichnete Regressionsgerade verdeutlicht.

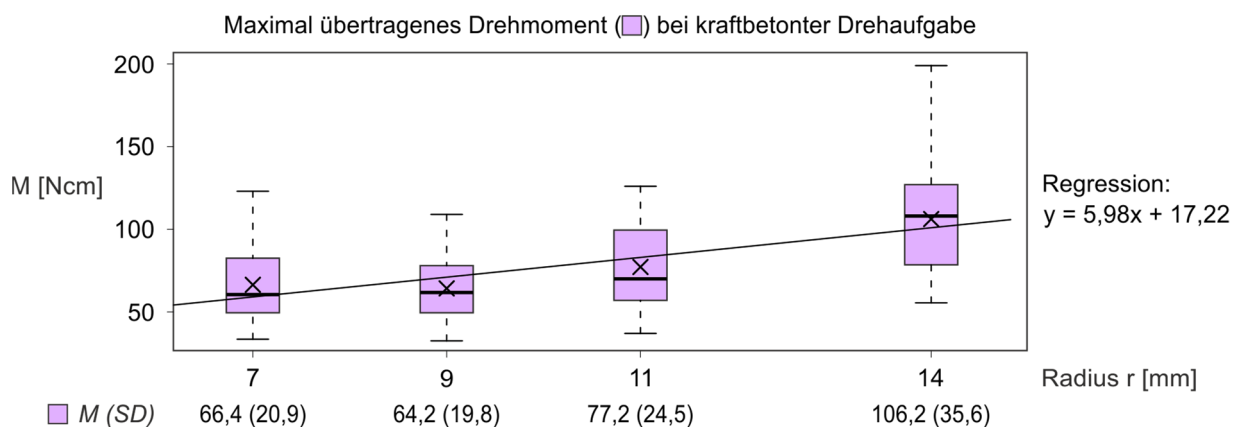


Bild 5.14: Maximal übertragenes Drehmoment in Abhängigkeit der Griffgröße – VR2

Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass mit den beiden kleinsten Griffvarianten in etwa das gleiche Drehmoment (ca. 65 Ncm) erreicht wird. Das Ergebnis mit Griff $r = 9$ mm liegt sogar etwas unter dem von $r = 7$ mm (64,2 zu 66,4 Ncm). Ein Grund hierfür könnte sein, dass durch den unterschiedlichen Werkstoff der Reibschluss bei der Kunststoff-Kappe geringer ist. Bei den Griffvarianten 11 und 14 mm manifestiert sich jedoch der Vorteil des größeren Hebels. Eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) und Greenhouse-Geisser Korrektur bestätigt signifikante Unterschiede in Bezug auf die Griffvarianten ($F(1,575) = 94,212$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,765$; $n = 30$). Eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser ist notwendig, da das Ergebnis des Mauchly-Tests signifikant ist ($p < 0,001$), was darauf hinweist, dass die Annahme der Sphärizität verletzt ist. Anschließend durchgeführte t -Tests als post-hoc-Analysen mit Bonferroni-Korrektur zeigen auf, dass alle Paare hochsignifikante Mittelwertunterschiede ($p < 0,001$) aufweisen, bis auf das Paar 7 und 9 mm ($t = 2,17$; $p = 0,955$).

Mit der zuvor erwähnten Regressionsgeraden lässt sich die Abhängigkeit der Parameter M (in Ncm) und r (in mm) modellieren (vgl. Bild 5.14). Beispielsweise kann errechnet werden, dass die Stichprobe mit einem Griff $r = 10$ mm im Mittel ein Maximalmoment von 76,0 Ncm erreichen wird. Oder es kann vorausgesagt werden, welcher Griff benötigt wird, um 100 Ncm zu erreichen ($r = 13,83$ mm).

Die Ergebnisse der erreichten Maximalmomente können auch in Zusammenhang mit diversen Kontrollvariablen gebracht werden. Bild 5.15 zeigt jeweils zwei Gruppen ausgewählter Kontrollvariablen mit Blick auf das erreichte Maximalmoment im Vergleich.

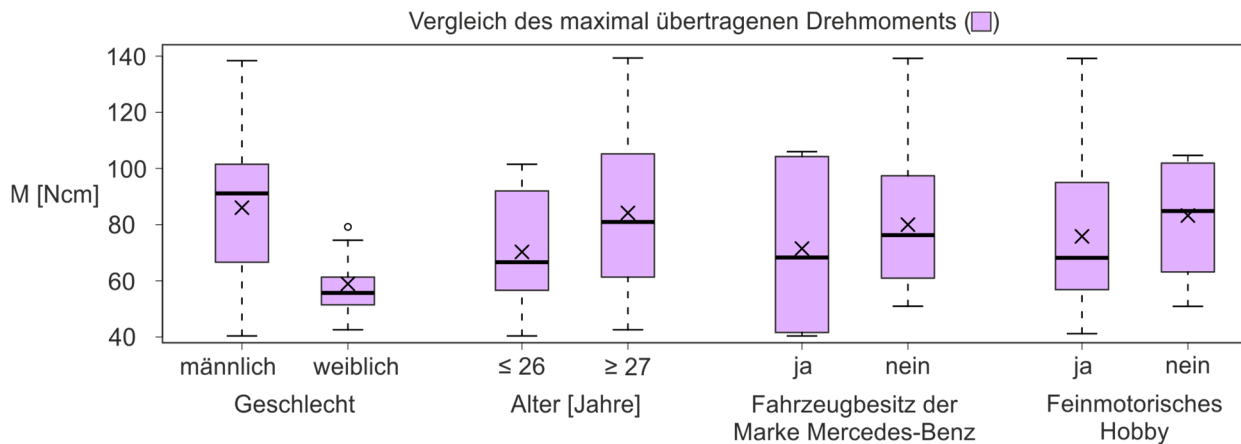


Bild 5.15: Maximales Drehmoment in Abhängigkeit von Kontrollvariablen – VR2

Erwartungsgemäß schneiden männliche Probanden bei der Aufgabe am Drehmoment-Messgerät besser ab. Interessant ist, dass der schwächste männliche Proband (41,3 Ncm) in etwa das gleiche Ergebnis erzielt wie die schwächste weibliche Probandin (42,5 Ncm). Der stärkste männliche Proband (139,3 Ncm) ist jedoch deutlich stärker als die stärkste Dame (79,1 Ncm). Ein Mann-Whitney-U-Test zeigt, dass der Unterschied zwischen den Geschlechtern signifikant ist ($p = 0,001$). Die ältere Hälfte der Stichprobe erreicht am Drehmoment-Messgerät höhere Werte als die jüngeren 50 %. Dieses Ergebnis bestätigt die Korrelation von $r = 0,25$ mit dem Alter aus Tabelle 5.12. Der Unterschied zwischen den beiden Altersgruppen fällt jedoch mit $p = 0,157$ nicht signifikant aus. Bei der Kontrollvariable Fahrzeugbesitz zeigt sich tatsächlich nur ein geringfügiger Unterschied im Mittelwert, was als plausibel anzusehen ist ($p = 0,595$). Ähnliches gilt für die Kontrollvariable feinmotorisches Hobby ($p = 0,328$).

Eine Korrelationsanalyse wurde durchgeführt, um die Zusammenhänge zwischen dem erreichten Maximalmoment und ausgewählten Kontrollvariablen zu analysieren. Wie in Tabelle 5.12 dargestellt, zeigen sich moderate Korrelationen (grün hinterlegt) mit verschiedenen Körpermaßen. Beispielsweise bestehen signifikante Zusammenhänge mit der Körperhöhe ($p = 0,020$) oder der Handbreite ($p = 0,017$). Die höchste Korrelation zeigt sich zwischen dem erreichten Maximalmoment und dem Körpergewicht der Probanden (orange hinterlegt), mit einer Pearson-Korrelation von $r = 0,549$ ($p = 0,002$).

Diese Beobachtung erscheint plausibel, da es naheliegend ist anzunehmen, dass Personen mit einer größeren Körpermasse und größeren Händen im Durchschnitt mehr Kraft aufbringen können.

	Kontrollvariable		Drehmoment der Probanden über alle Griffe gemittelt (n=30)	
Demografie und Körpermaße	Alter	Pearson-Korrelation	0,252	
		p (2-seitig)	0,179	
	Körperhöhe	Pearson-Korrelation	0,423	
		p (2-seitig)	0,020*	
	Körpergewicht	Pearson-Korrelation	0,549	
		p (2-seitig)	0,002**	
	Fahrzeugnutzung pro Woche	Pearson-Korrelation	-0,118	
		p (2-seitig)	0,534	
	Handlänge	Pearson-Korrelation	0,362	
		p (2-seitig)	0,049*	
	Handbreite	Pearson-Korrelation	0,431	
		p (2-seitig)	0,017*	
	Fingerbreite	Pearson-Korrelation	0,389	
		p (2-seitig)	0,034*	
Psychografie	Fahrspaß	Spearman-Korrelation	0,042	
		p (2-seitig)	0,828	
	Infotainmentorientierung	Spearman -Korrelation	-0,175	
		p (2-seitig)	0,355	
	Komfortaffinität	Spearman -Korrelation	-0,380	
		p (2-seitig)	0,038*	
	Aufwandsvermeidung	Spearman -Korrelation	-0,126	
		p (2-seitig)	0,506	
	Diskomfortempfindlichkeit	Spearman -Korrelation	-0,214	
		p (2-seitig)	0,257	
Feinmotorik	Handruhe, Tremor	Pearson-Korrelation	-0,078	
		p (2-seitig)	0,684	
	Präzision	Pearson-Korrelation	-0,257	
		p (2-seitig)	0,170	
	Geschwindigkeit	Pearson-Korrelation	0,039	
		p (2-seitig)	0,837	
* Signifikanz bei <i>p</i> -Wert < 0,05 und ** Signifikanz bei <i>p</i> -Wert < 0,01 bedeutet, dass sich der Korrelationskoeffizient signifikant von Null unterscheidet				Mittlere Korrelation <i>r</i> > 0,30
				Hohe Korrelation <i>r</i> > 0,50

Tabelle 5.12: Korrelationen aus erreichtem Drehmoment und Kontrollvariablen – VR2

Es besteht praktisch kein Zusammenhang zwischen den erreichten Drehmomenten und dem Persönlichkeitsmerkmal *Fahrspaß*. Probanden, bei denen die *Komfortaffinität* hoch ausgeprägt ist, erreichen geringe Maximalmomente ($r = -0,380$; $p = 0,038$). Ein ähnliches Ergebnis, wenn auch kein signifikantes, lässt sich für *Diskomfortempfindlichkeit* beobachten ($r = -0,214$; $p = 0,257$). Probanden, die also empfindlich gegenüber Diskomfort sind, erreichen geringere Maximalmomente. Ob ein Proband hohe oder niedrige Testergebnisse bezüglich *Handruhe* und *Geschwindigkeit* erreicht, ist völlig unkorreliert von seinem Kraftvermögen. Wenn ein Proband jedoch feinmotorisch sehr *präzise* ist, erreicht er im Schnitt geringere Maximalmomente ($r = -0,257$; $p = 0,170$). Ein möglicher Zusammenhang könnte darin liegen, dass Probanden, die über ein großes und kraftvolles Hand-Arm-System verfügen, schwächere Ergebnisse in Feinmotorik-Untersuchungen erzielen.

5.2.4.2 Betätigungsmoment M_B beim Drehen

Bild 5.16 zeigt das Ergebnis der Bewertung von Wertigkeit und Ergonomie in Abhängigkeit der Faktorkombination aus Betätigungsdrehmoment M_B und Griffgröße r .

Die insgesamt wertigste Parameterkombination liegt bei $M_B = 2,20$ Ncm und $r = 11$ mm vor ($M = 4,30$; $SD = 1,15$). Das zweitwertigste Ergebnis erzielt $M_B = 2,20$ Ncm in Kombination mit $r = 14$ mm ($M = 4,17$; $SD = 1,53$). Allgemein betrachtet zeigt sich, dass die Reihe mit einem Drehmoment von 2,20 Ncm besonders gut abschneidet. In Bezug auf die Griffgröße liegt die Reihe mit $r = 11$ mm vorne (vgl. Bild 5.16).

Ungünstige Randparameterkombinationen wie ein niedriges Drehmoment (0,75 Ncm) und ein großer Griff ($r = 14$ mm) erzielen das schlechteste Ergebnis mit $M = 2,83$. Ein ähnlich schwaches Ergebnis ist auch bei dem entgegengesetzten Beispiel (7 Ncm und 9 mm) mit $M = 2,87$ zu beobachten.

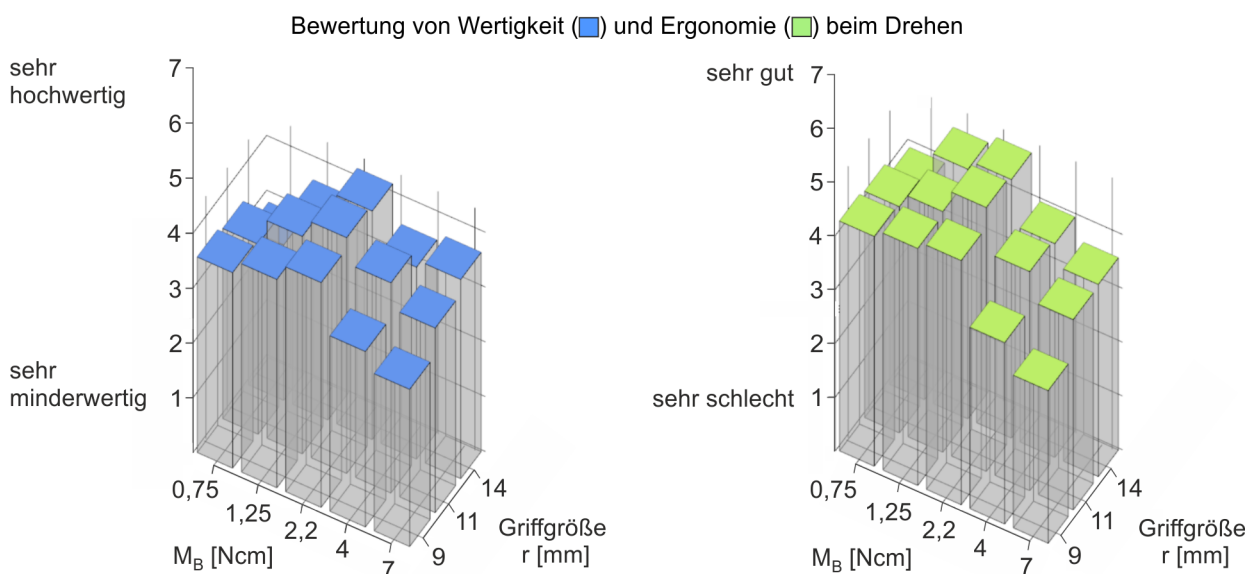


Bild 5.16: Ergebnisse der Bewertung beim Drehen – VR2

Eine geeignete Methode zur inferenzstatistischen Überprüfung ist die zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung. Dabei wird der Einfluss von zwei unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable analysiert, wobei dieselbe Stichprobe alle Bedingungen durchläuft. Jedoch sind für die Durchführung dieser Analyse bestimmte Voraussetzungen zu beachten [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 518f.]. Eine Balanciertheit des Designs liegt vor, da für jeden Probanden exakt ein Messwert für jeden Messzeitpunkt vorliegt. Obwohl bei der Likert-Skala kein Intervallskalenniveau vorliegt, wird im Fragebogen explizit darauf hingewiesen, dass die Abstände zwischen den Antwortmöglichkeiten als gleich anzusehen sind. DERRICK & WHITE [2017] argumentieren, dass die Anwendung parametrischer Tests bei der Likert-Skala angemessen ist. Die per Shapiro-Wilk-Test durchgeführten Überprüfungen zeigen, dass nicht in allen Faktorstufen eine Normalverteilung vorliegt. Bei ausreichend großer Stichprobe ($n \geq 30$) zeigt sich jedoch, dass das Verfahren relativ robust gegenüber dieser Verletzung ist [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 518]. Die Annahme der Sphärizität besagt, dass die Differenzen aller Stufen der unabhängigen Variablen gleich sind. Die Überprüfung dieser Annahme mittels Mauchly-Test ($p < 0,01$) macht eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser erforderlich [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 519].

Zur Wertigkeit zeigt die zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Drehmoment M_B ($F(2,21; 64) = 3,187; p = 0,043$). Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass das Drehmoment einen Einfluss auf die abhängige Variable hat und einen bedeutsamen Unterschied im Wertigkeitsurteil auslöst.

Hingegen wurde für den Faktor Griffgröße r kein signifikanter Haupteffekt festgestellt ($F(1,50; 43,46) = 1,694; p = 0,200$). Dies bedeutet, dass die Griffgröße keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Wertigkeit aufweist. Ein Grund hierfür liegt möglicherweise in dem polarisierenden Effekt der Griffgröße, und die Wertigkeit wird in Abhängigkeit des Drehmoments in entgegengesetzte Richtungen beeinflusst.

Interessanterweise wird eine signifikante Wechselwirkung zwischen Drehmoment und Griffgröße festgestellt ($F(4,79; 1,77) = 2,404; p = 0,042$). Dies zeigt, dass die Auswirkungen von Drehmoment M_B und Griffgröße r auf die Wertigkeit nicht isoliert betrachtet werden können. Vielmehr interagieren diese beiden Faktoren miteinander, und, wie zuvor in Bild 5.16 gezeigt, können ungünstige Kombinationen besonders schwache Ergebnisse auslösen. Der signifikante Interaktionseffekt legt nahe, dass zur Erhöhung der Wertigkeit eine optimale, gegenseitige Abstimmung beider Faktoren erforderlich ist.

Auf Basis der 15 Parameterkombinationen ergeben sich 105 zu errechnende Paarvergleiche. Der hierfür verwendete Dunn-Bonferroni-Test weist nur für den Paarvergleich von $M_B = 2,20$ Ncm in Verbindung mit Griffgröße $r = 11$ mm gegen $M_B = 0,75$ Ncm mit

Griff $r = 14$ mm ein signifikantes Ergebnis aus ($z = -4,37$; $p = 0,016$). Aufgrund der Anpassung der Alphafehler-Korrektur für multiple Vergleiche wird nur der Vergleich zwischen dem besten und dem schlechtesten Ergebnis signifikant. Die Tabelle A.4.4 in Anhang A4 enthält eine Zusammenstellung der statistischen Kenngrößen für alle Paarvergleiche bezüglich der Wertigkeit beim Drehen.

Die Ergebnisse der Ergonomie ähneln stark denen der Wertigkeit (vgl. Bild 5.16). Die Korrelation zwischen Wertigkeit und Ergonomie liegt bei $r = 0,63$ ($p < 0,001$). Am besten schneidet ebenfalls die Parameterkombination $M_B = 2,20$ und $r = 11$ mm ab ($M = 4,90$; $SD = 1,09$). Ungünstige Randparameterkombinationen aus hohem Drehmoment und kleinem Hebel sowie umgekehrt führen zu erheblichen ergonomischen Nachteilen. Aus Gründen des Umfangs wird auf weiterführende Analysen zur Ergonomie verzichtet.

Die Ergebnisse der subjektiven Beschreibung der Versuchsobjekte sind aufgrund ihres Umfangs erneut im Anhang zu finden (vgl. Tabelle A.5.3 im Anhang A5). Bei der Analyse der Zusammenhänge zwischen Beschreibungen und dem wahrgenommenen Wertigkeitseindruck beim Drehen zeigen sich eine starke Korrelation zwischen den Items *sportlich* ($r = 0,51$) und *deutlich* ($r = 0,46$) und der Wertigkeit. Ein mittlerer Zusammenhang liegt für *gleitend* ($r = 0,22$) vor. Kein Zusammenhang mit der Wertigkeit zeigen die Items *kratzig* ($r = -0,03$), *schwergängig* ($r = -0,02$) und *gedämpft* ($r = 0,09$).

Auch bei der Bewegungsart Drehen bewerteten die Probanden den subjektiv empfundenen Kraftaufwand auf einer 7-stufigen Skala. Bild 5.17 zeigt das Ergebnis für jedes der fünf präsentierten Versuchsobjekte unter Verwendung des von den Probanden favorisierten 11 mm Griffs. Es zeigt sich, dass 2,20 Ncm mit $M = 4,03$ ($SD = 1,03$) annähernd als *optimal* empfunden wird. Die Kombination aus 2,20 Ncm Drehmoment und 11 mm Griff ist außerdem die am wertigsten bewertete Parameterkombination (vgl. Bild 5.16).

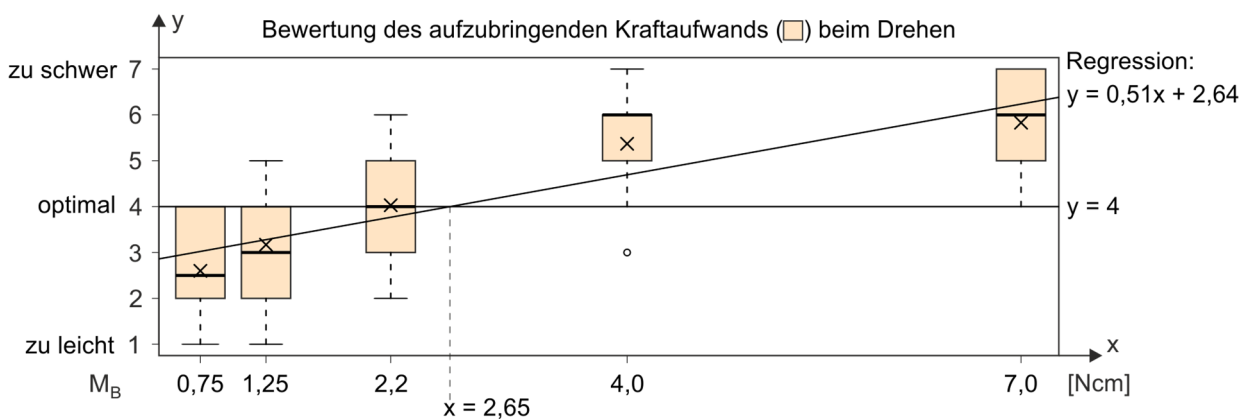


Bild 5.17: Bewertung des Kraftaufwands beim Drehen mit Griffkappe $r = 11$ mm – VR2

Allgemein ist eine höhere subjektive Einschätzung des Kraftaufwands festzustellen, wenn die Parameterausprägung [Ncm] der Faktorstufe höher ist. Konsequenterweise kann der

höchste Kraftaufwand mit $M = 5,83$ ($SD = 0,95$) bei 7,0 Ncm beobachtet werden. Wenn ein lineares Regressionsmodell basierend auf allen Probandenbewertungen zur Vorhersage des Kraftaufwands gebildet wird, ergibt sich ein optimales Betätigungs Drehmoment von 2,65 Ncm (vgl. Bild 5.17).

In Tabelle 5.13 sind die Regressionsgleichungen der weiteren verwendeten Griffe dargestellt. Bei Betrachtung der errechneten optimalen Betätigungs Drehmomente für verschiedene Griffe wird festgestellt, dass bei größeren Griffen ein höheres Drehmoment bevorzugt wird. Obschon ein Proband an einem Versuchsobjekt stets das gleiche Drehmoment zur Betätigung überträgt, verringert sich der Kraftaufwand, wenn der Versuchsleiter einen größeren Griff montiert.

Tabelle 5.13 enthält in der zweiten Spalte zusätzlich das Ergebnis des erreichten Maximalmoments am Drehmoment-Messgerät in Abhängigkeit von der Griffgröße. Setzt man nun das Maximalmoment und das optimale Drehmoment in ein Verhältnis, so ergibt sich ein Moment-Wertigkeits-Quotient. Interessanterweise liegt dieser psychophysische Quotient durchgehend bei einem Wert von etwa 30 (vgl. Tabelle 5.13).

Griff	Ø Erreichtes Maximalmoment	Regressionsgleichung der Bewertungen	Optimales Drehmoment ($y = 4$)	Moment-Wertigkeits-Quotient
$r = 9$ [mm]	64,23 [Ncm]	$y = 0,563x + 2,756$	2,21 [Ncm]	$64,23 / 2,21 = \mathbf{29,06}$
$r = 11$ [mm]	77,2 [Ncm]	$y = 0,514x + 2,637$	2,65 [Ncm]	$77,20 / 2,65 = \mathbf{29,13}$
$r = 14$ [mm]	106,2 [Ncm]	$y = 0,505x + 2,238$	3,49 [Ncm]	$106,20 / 3,49 = \mathbf{30,43}$
alle Griffe zusammen	82,53 [Ncm]	$y = 0,527x + 2,544$	2,76 [Ncm]	$82,53 / 2,76 = \mathbf{29,90}$

Tabelle 5.13: Moment-Wertigkeits-Quotienten mit unterschiedlichen Griffen – VR2

Das heißt, für jeden Griff wird das optimale Drehmoment 1/30 oder 3,34 % des mit diesem Griff maximal zu erreichenden Drehmoments betragen. Diese psychophysische Konstante ist anzunehmen für alle Griffe unter der Variation der Griffgröße.

Abschließend zeigt Bild 5.18 das Ergebnis der Bewertung der Griffgröße. Der 11 mm Griff wurde mit $M = 4,26$ ($SD = 0,69$) am ehesten als *optimal* bewertet. Dieser Griff erzielte bereits bei den Ergebnissen zur Wertigkeit das beste Ergebnis (vgl. Bild 5.16). Der Seriengriff mit 7 mm wird tendenziell als zu klein bewertet ($M = 2,4$; $SD = 0,77$). Darüber hinaus wurde der größte Radius von 14 mm am größten bewertet ($M = 5,87$; $SD = 1,14$), was plausibel erscheint. Die mittels Regressionsgleichung errechnete optimale Griffgröße beträgt $r = 10,5$ mm.

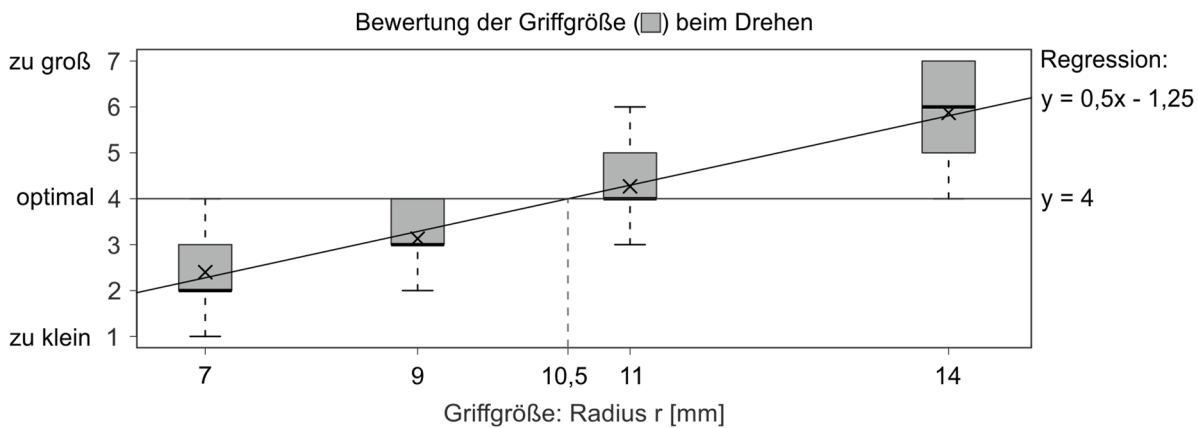


Bild 5.18: Bewertung der Griffgröße beim Drehen – VR2

Diskussion: In der Versuchsreihe 2 wurde die Bewegungsart des Drehens untersucht. Zunächst wurden 30 Probanden in Bezug auf das erreichte Maximalmoment unter Verwendung verschiedener Griffe untersucht. Anschließend wurden manipulierte Versuchsobjekte mit unterschiedlichen Kombinationen von Drehmoment und Griffgröße präsentiert und bewertet.

Der Faktor Drehmoment zeigt einen signifikanten Einfluss auf die Wertigkeit, und die Nullhypothese H_{0-8} ist folglich zu verwerfen. Das beste Ergebnis unter den präsentierten Betätigungs-drehmomenten zeigt $M_B = 2,20$ Ncm. Das errechnete ideale Drehmoment in Verbindung mit einem 11 mm Griff beträgt 2,65 Ncm.

Der Faktor der Griffgröße zeigt im vorliegenden Versuch keine signifikante Wirkung, daher wird die Nullhypothese H_{0-9} beibehalten. Die verwendeten Radien [mm] bewegten sich in einem engen Bereich, der immer noch als wertig betrachtet werden kann. Möglicherweise könnte eine Auswahl der Griffe nach Fahrzeugkategorien erfolgen, beispielsweise könnte der größere Griff $r = 14$ mm bei SUVs oder Geländewagen Verwendung finden. Der beste Griff hatte einen Radius von 11 mm, während der prognostizierte ideale Griff einen Radius von 10,5 mm aufweist.

Die Interaktion zwischen Drehmoment und Griffgröße ergab ein signifikantes Ergebnis, und die Nullhypothese H_{0-10} wird folglich verworfen. Bei höheren Drehmomenten wurden größere Griffe bevorzugt, während bei geringeren Momenten entsprechend kleinere Griffe bevorzugt wurden. Die insgesamt wertigste Parameterkombination war ein Drehmoment von 2,20 Ncm in Verbindung mit einem 11 mm Griff. Der signifikante Interaktionseffekt unterstreicht die hohe Bedeutung einer optimalen Abstimmung der beiden abhängigen Gestaltparameter. Eine Parameterkombination wird als wertig betrachtet, wenn Probanden die Betätigung als *deutlich* und *sportlich* beschreiben.

Eine weitere Beobachtung ist, dass das Verhältnis zwischen dem bevorzugten Betätigungsdrehmoment und dem maximal erreichbaren Moment konstant ist. Für alle untersuchten Griffe ergibt sich ein konstantes Verhältnis von 1 zu 30, und daher kann auch H_{0-11} verworfen werden. Wenn ein neuer Griff entwickelt wird, könnte das ideale Betätigungsmoment auf 3,34 % des maximal erreichbaren Moments spezifiziert werden. Es ist besonders interessant, weitere Versuche durchzuführen, um zu prüfen, ob diese psychophysische Konstante bestätigt wird und wie sie sich bei anderen Gestaltparametern, wie beispielsweise der Form- oder Oberflächenmanipulation, verhält.

5.3 Versuchsreihe 3

In der dritten und letzten Versuchsreihe der Haptik-Untersuchungen werden die Bewegungsarten Schieben und Drücken untersucht (vgl. Tabelle 4.3). Beim Schieben wird das haptische Merkmal einer Raste untersucht, welche die Mittelstellung kennzeichnet. Hierzu kommen erneut Luftdüsen als Versuchsobjekte zum Einsatz, und die einzelnen Faktorstufen werden parametrisiert als Ausrastkraft F_A in Newton [N] angegeben.

Teil 2 des Versuchs untersucht die Bewegungsart Drücken anhand unterschiedlicher Taster zum Öffnen von Ablagefächern. Hier wird zum einen die Schaltkraft F_D systematisch manipuliert, zum anderen werden unterschiedliche, alternative Entriegelungsmechanismen präsentiert und bewertet. Die Kapitel zur Vorstellung der Untersuchungsparameter (Kapitel 5.3.1) sowie zur Darstellung der Ergebnisse (Kapitel 5.3.4) untergliedern sich jeweils in Teil 1 und Teil 2 des Versuchs.

5.3.1 Untersuchungsparameter und Hypothesen

5.3.1.1 Ausrastkraft F_A beim Schieben

Als Ausgangswert der Ausrastkraft F_A dienen die am Serienbauteil gemessenen 0,6 N des Versuchsobjekts. Das Messdiagramm des Serienbauteils sowie die Diagramme der weiteren verwendeten Faktorstufen sind in Tabelle A.3.3 im Anhang A3 aufgeführt. Tabelle 5.14 zeigt, dass um den Ausgangswert zwei niedrigere und zwei höhere Faktorstufen konzipiert wurden. Ein ursprünglich angedachtes sechstes Versuchsobjekt musste nach Messungen im Messrobotiksystem aussortiert werden, da die Ausrastkraft F_A nicht der konzipierten Vorgabe entsprach. Als Folge liegen ungleiche Skalierungsfaktoren vor. Der Skalierungsfaktor, der jeweils etwa zwischen 1,2 und 1,6 liegt, bewegt sich weiterhin in einem relativ engen Rahmen.

Bewegungsart	Untersuchte Parameter der Ausrastkraft F_A [N]					Delta [N]
Schieben	0,4	0,5	0,6 (Serie)	0,95	1,4	Δ 1,0

Tabelle 5.14: Untersuchungsparameter bei Variation der Ausrastkraft F_A

Nach Darlegung der Untersuchungsparameter lassen sich folgende Null- und Alternativhypothesen formulieren:

- **H_{0-12} :** Es gibt keinen Unterschied zwischen den Ausrastkräften F_A im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Schieben.
- **H_{1-12} :** Es gibt einen Unterschied zwischen den Ausrastkräften F_A im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Schieben.

5.3.1.2 Betätigungskraft und alternative Konzepte beim Drücken

Für Versuchsteil 2 wurden im Vorfeld insgesamt 12 verschiedene Versuchsobjekte von einem Taster in einem Ablagefach aufgebaut. Bei vier Versuchsobjekten wurde ausschließlich die Taster-Rückstellfeder (vgl. Bild 3.7) variiert, um die Schaltkraft F_D zu untersuchen. Tabelle 5.15 zeigt die Parametrisierung dieser vier Versuchsobjekte in der Übersicht. Die gemessenen 11,2 N Schaltkraft F_D stammen vom Serienbauteil. Bei den zwei schwereren Tastern ist eine vollständige Messung mittels Messroboter aufgrund der hohen Kräfte nicht möglich. In diesen Fällen erfolgt die Messung manuell, indem eine sogenannte Kraftmessdose verwendet wird.

Bewegungsart	Untersuchte Parameter der Schaltkraft F_D [N]				Delta [N]
Drücken	10,8	11,2 (Serie)	16*	20*	Δ 9,2
* Keine Messung mittels Messrobotiksystem. Messung per Kraftmessdose					

Tabelle 5.15: Untersuchungsparameter bei Variation der Schaltkraft F_D

Zusätzlich werden acht weitere Ablagefächer mit unterschiedlichen Entriegelungsmechanismen aufgebaut. Diese untergliedern sich mit je vier Versuchsobjekten in die Gruppe *Alternativ* und *Magnet*. Zusammenfassend zeigt Tabelle 5.16 die Parameter zur technischen Beschreibung der gemessenen Kraft-Weg-Kennlinien (vgl. Bild 3.7). Wichtig ist zu beachten, dass bei den Versuchsobjekten VR3.05 bis VR3.12 keine systematische Manipulation erfolgt, sondern ausschließlich neue Konzepte erprobt werden.

Nr.	Code	Kraft-Anfangshub F_{AH} [N]	Anfangshub s_{AH} [mm]	Schaltkraft F_D [N]	Schaltweg s_1 [mm]	Kraftsprung K [%]	Kraftsprungweg KW [mm]
VR3.01	leicht	2,2	2,3	10,8	6,1	35	0,7
VR3.02	mittel	3,3	2,4	11,2	6,0	30	0,7
VR3.03	schwer	10*	-	16*	6,0	-	-
VR3.04	schwerer	16*	-	20*	6,0	-	-
VR3.05	Ea-soft	3,3	3,0	14,7	6,5	0	0
VR3.06	Ea-hard	3,2	2,4	12	6,3	0	0
VR3.07	Sil	0	0	16	6,1	13,75	0,3
VR3.08	Direkt	0	0	9	2,1	58	0,6
VR3.09	Mag1	5	0,2	14,7	3,2	39,5	0,8
VR3.10	Mag2	0,6	3,2	7	6,6	47	0,7
VR3.11	Mag3	3,8	3,7	11,6	4,6	40,5	1,2
VR3.12	Mag4	1,6	0,8	11,7	5,2	34	0,7
* Keine Messung mittels Messrobotiksystem. Messung per Kraftmessdose							

Tabelle 5.16: Technische Kenngrößen aller Taster der Ablagefächer

Bedeutsame Unterschiede oder herausstechende Favoriten können nur als konzeptseitig besser erkannt werden, ohne dass ein Unterschied auf einzelne Merkmale zurückzuführen wäre. Nachfolgend werden die Alternativ- und Magnetkonzepte kurz vorgestellt:

- *Ea-soft* und *Ea-hard* beziehen sich auf die technische Gestaltung des Endanschlags des Tasters. In den Kraft-Weg-Kennlinien (vgl. Tabelle A.3.4, Anhang A3) zeigt sich bei VR3.06 *Ea-hard* ein steiler Anstieg unmittelbar vor dem Endanschlag. Im Gegensatz dazu ist bei VR3.05 *Ea-soft* dieser Anstieg früher erkennbar und weist eine geringere Steigung auf.
- Das Konzept *Sil* verwendet anstelle der Standard-Rückstellfeder und der Drehfeder an den Haken (vgl. Bild 3.7) ausschließlich sogenannte Silikonfedern. Eine Silikonfeder ist in diesem Zusammenhang ein Elastikfaden, der die erforderliche Dehnbarkeit und Rückstellkraft aufweist. Das wesentliche Merkmal im Messdiagramm von VR3.07 *Sil* ist die lineare Federkennlinie bis zum Kraftsprung der Entriegelung (vgl. Tabelle A.3.4, Anhang A3).
- Im Konzept *Direkt* löst die Entriegelung bereits nach einem sehr kurzem Stellweg aus, was sich deutlich in einem frühen Kraftsprung im Messdiagramm zeigt (vgl. Tabelle A.3.4, Anhang A3). Die technische Umsetzung hierfür erfolgt durch eine Verlängerung des Führungsstücks (vgl. Bild 3.7).
- *Mag1* bis *Mag4*: Der Einsatz von Magneten eröffnet vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten für Ver- und Entriegelungsmechanismen. Im vorliegenden Fall werden Neodym-Ringmagnete verwendet, die sowohl in anziehender als auch abstoßender Wirkung angeordnet werden können. Diese Magnetpaare sind sowohl für die Rückstellung der Taster als auch für die Rasthaken eingesetzt. In Anhang A3 in Tabelle A.3.4 sind die resultierenden Kraft-Weg-Kennlinien zu sehen, die sich aus den unterschiedlichen Anordnungen der Magnete ergeben.

Abschließend lassen sich für Teil 2 der dritten Versuchsreihe folgende Null- und Alternativhypothesen formulieren:

- **H₀₋₁₃:** Es gibt keinen Unterschied zwischen der Betätigungskraft im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Drücken.
- **H₁₋₁₃:** Es gibt einen Unterschied zwischen der Betätigungskraft im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Drücken.
- **H₀₋₁₄:** Es gibt keinen Unterschied zwischen den Entriegelungskonzepten im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Drücken.
- **H₁₋₁₄:** Es gibt einen Unterschied zwischen den Entriegelungskonzepten im Wertigkeitsurteil bei der Bewegungsart Drücken.

5.3.2 Versuchsablauf und -beschreibung

Die Voruntersuchungen an Station 1 und 2 des Versuchsraums verlaufen identisch zu den vorherigen Versuchsreihen (vgl. Bild 4.4). An Station 3 nehmen die Probanden erneut in der Sitzkiste Platz und werden instruiert, den Fahrersitz auf ihre Person einzustellen (vgl. Anhang A1). Für Teil 1 des Versuchs werden die Versuchsobjekte mit den unterschiedlich ausgeprägten Rasten in randomisierter Reihenfolge in der Bauteilaufnahme der fiktiven Instrumententafel präsentiert. Die Probanden können frei und mehrfach das präsentierte Versuchsobjekt mittels 3-Finger-Zufassungsgriff betätigen.

In Teil 2 werden die Versuchsobjekte durch den Versuchsleiter in der Bauteilaufnahme der fiktiven Mittelkonsole fixiert (vgl. Bild 4.4). Die Probanden erhalten die Instruktion, den Taster mittels 1-Finger-Kontaktgriff zu betätigen (vgl. Anhang A1). Nach dem Öffnen schließen die Probanden das Fach eigenständig, um eine erneute Betätigung zu ermöglichen.

Der auf dem Bildschirm angezeigte Fragebogen zur Bewertung ist bis auf versuchsspezifische Anpassungen weitgehend identisch mit den vorherigen Versuchsreihen (vgl. Kapitel 5.1.2 und Kapitel 5.2.2).

5.3.3 Stichprobe

In der dritten Versuchsreihe wurden 30 Personen zwischen 19 und 62 Jahren akquiriert für die Erhebung während des Zeitraums vom 09. bis zum 18. August 2022. Das Durchschnittsalter liegt mit 34,13 Jahren ($SD = 11,28$) vergleichsweise höher als in den Versuchen zuvor. Diesmal waren über ein Drittel der Probanden weiblich (37 %). Die vollständige statistische Charakteristik der Stichprobe ist in der Tabelle 5.17 zusammengefasst.

VR 3 (n = 30)	Min.	Max.	<i>M</i>	<i>SD</i>
Alter [Jahre]	19	62	34,13	11,28
Führerscheinbesitz [Jahre]	2	44	16,6	10,86
Nutzungsdauer [Tage/Woche]	0	7	4	2,46
Körpergröße [mm]	1600	1980	1783	91,5
Gewicht [kg]	52	105	76,63	13,66
Handlänge [mm]	170	210	188,2	11,4
Handflächenlänge [mm]	95	125	108,8	7,95
Handbreite [mm]	73	97	84,7	6,22
Zeigefingerbreite [mm]	13	22	15,9	1,74
Geschlecht	19 männlich (63 %); 11 weiblich (37 %)			
Händigkeit	1 links (3,3 %); 29 rechts (96,7 %)			

Tabelle 5.17: Beschreibung des Probandenkollektivs der dritten Versuchsreihe

Von den Teilnehmern berichten 63 % davon, dass sie in einem wissenschaftlichen oder technischen Beruf arbeiten, während etwa 17 % Studierende sind. Der Durchschnittswert für den Führerscheinbesitz der Probanden beträgt 16,6 ($SD = 10,86$) Jahre, und sie fahren im Schnitt 4 ($SD = 2,46$) Tage pro Woche mit einem Pkw. Etwa 73 % der Probanden besitzen ein Fahrzeug, wobei die am häufigsten gefahrenen Marken in den letzten sechs Monaten Mercedes-Benz (mit 7 Nennungen) und Opel (mit 5 Nennungen) sind.

Etwa 37 % der Teilnehmer haben ein Hobby, bei dem feinmotorische Fähigkeiten gefragt sind, wie zum Beispiel Heimwerken oder (Fahrrad-) Reparaturen (mit 3 Nennungen). Auch Modellbau wird von zwei Teilnehmern als Hobby genannt. Zudem geben etwa 33 % der Befragten an, ein Musikinstrument zu spielen, wobei Gitarre am häufigsten genannt wurde (mit 5 Nennungen).

Bild 5.19 zeigt das Ergebnis der psychografischen Voruntersuchung. Das Ergebnis des ERPI-A Fragebogens (vgl. Tabelle A.2.2, Anhang A2) in Bezug auf die Fahrzeugnutzung zeigt, dass die Dimensionen *Fahrspaß* ($M = 3,93$) und *Komfortaffinität* ($M = 3,83$) die höchste Ausprägung erreicht. Erneut ist die *Diskomfortempfindlichkeit* ($M = 2,38$) am geringsten ausgeprägt. Der Faktor *Aufwandsvermeidung* liegt, wie bei den vorangegangenen Stichproben, im mittleren Bereich ($M = 3,36$). Daher kann ausgeschlossen werden, dass die Teilnehmer die Verstellmöglichkeiten im Fahrzeug nur selten oder kaum nutzen.

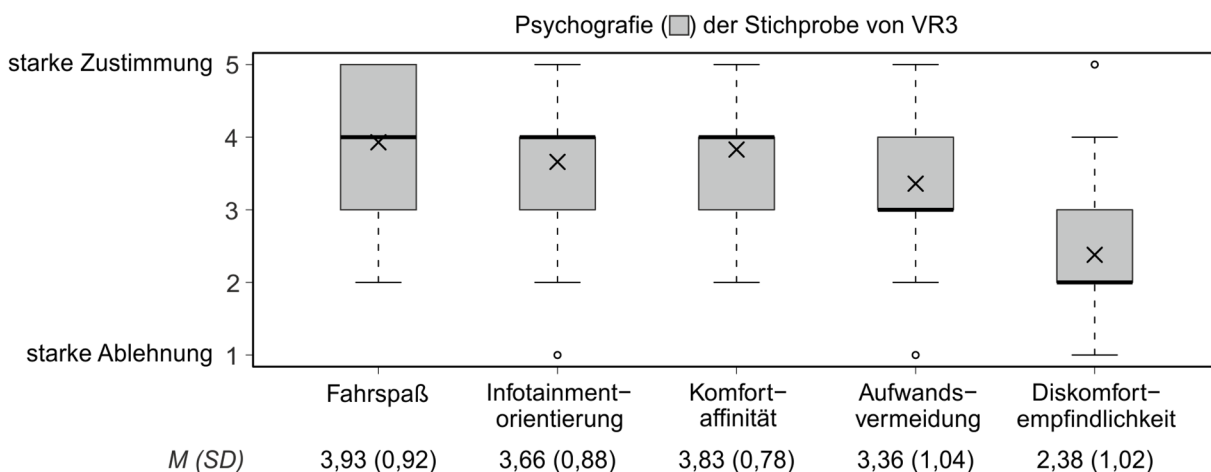


Bild 5.19: Ergebnisse der Voruntersuchung zur Psychografie – VR3

Die etwas erhöhte Altersstruktur der Stichprobe im Vergleich zu den Versuchsreihen 1 und 2 resultiert erwartungsgemäß in etwas geringeren Leistungen der Feinmotorik (vgl. Tabelle 5.18). Die drei untersuchten Faktoren der Feinmotorik liegen an der oberen Grenze des Durchschnittsbereichs. In den drei Stichproben der Haptik-Untersuchungen kamen bezüglich der Feinmotorik keine extremen Messwerte, negativ wie positiv, vor. Die Leistungen der Stichproben bewegen sich im Normbereich, und folglich muss kein Teilnehmer ausgeschlossen werden.

VR 3 – Feinmotorik (n = 30)		Handruhe, Tremor	Präzision	Geschwin- digkeit
T-Wert (Normwertskala)	< 40: unterdurchschnittlich ≥ 60: überdurchschnittlich	60	56	60
Prozentrang (PR)	PR = 50 bedeutet, dass 50 % der Normstichprobe schwächere oder gleich gute Leistungen erreichten	77	66	77

Tabelle 5.18: Ergebnisse der Voruntersuchung zur Feinmotorik – VR3

5.3.4 Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die Ergebnisse der dritten Versuchsreihe präsentiert. Zuerst folgt das Ergebnis der Bewertungen der Ausrastkraft F_A (vgl. Kapitel 5.3.4.1). Danach folgt das Kapitel 5.3.4.2 mit den Ergebnissen der Untersuchungen der Bewegungsart Drücken.

Eine zusammenfassende Darstellung der finalen Fragen aller Versuchsreihen VR1-VR3 ist in Kapitel 5.4 zu finden, während in Kapitel 5.5 eine Übersicht der Hypothesenprüfung für sämtliche Versuchsreihen gegeben wird.

5.3.4.1 Ausrastkraft F_A beim Schieben

In Bild 5.20 sind die aggregierten Ergebnisse der Probandenbewertungen in Bezug auf Wertigkeit und Ergonomie beim Schieben mit unterschiedlicher Ausrastkraft F_A dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass $F_A = 0,40$ N am wertigsten bewertet wird ($M = 5,30$; $SD = 1,26$). Mit steigender Ausrastkraft sinken die Wertigkeitsurteile sukzessiv bis zur minderwertigsten Raste $F_A = 0,95$ N mit $M = 3,80$ ($SD = 1,42$). Auffällig ist, dass die höchste Ausrastkraft $F_A = 1,40$ N das drittstärkste Ergebnis erzielt ($M = 4,63$; $SD = 1,22$).

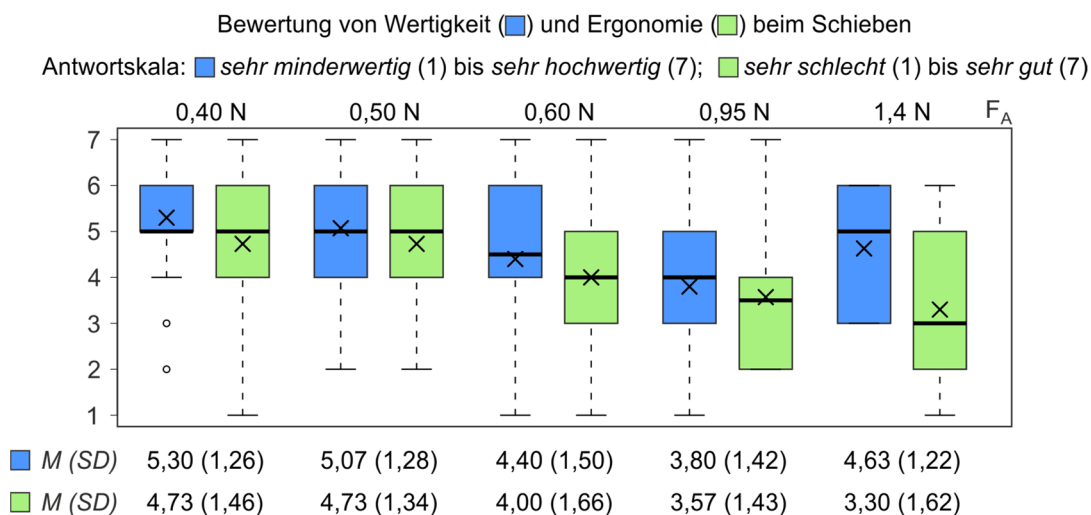


Bild 5.20: Ergebnisse der Bewertung beim Schieben (Ausrastkraft) – VR3

Dem gegenüber sind die Messwerte der Ergonomie bei steigender Ausrastkraft kontinuierlich abnehmend (vgl. Bild 5.20). Am ergonomischsten wird die geringste Raste mit

$F_A = 0,40$ N bewertet ($M = 4,73$; $SD = 1,46$). Am schwächsten schneidet $F_A = 1,40$ N mit $M = 3,30$ ($SD = 1,62$) ab. Mit einer Korrelation von $r = 0,70$ zeigen Wertigkeit und Ergonomie einen starken positiven Zusammenhang.

Die Durchführung eines nicht-parametrischen Friedman-Tests ergibt signifikante Unterschiede in den Messwerten zur Wertigkeit (Chi-Quadrat (4) = 23,57; $p < 0,001$; $n = 30$). In Tabelle 5.19 sind die vollständigen Paarvergleiche zur Wertigkeit aufgeführt. Es zeigen sich hoch signifikante Unterschiede zwischen der minderwertigen Faktorstufe $F_A = 0,95$ N zu den beiden am besten bewerteten Stufen $F_A = 0,40$ N und $F_A = 0,50$ N. Der Unterschied zwischen den beiden besten Faktorstufen fällt wiederum statistisch nicht bedeutsam aus (vgl. Tabelle 5.19).

VR3 - Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Schieben (Ausrastkraft)				
$n = 30$	$F_A = 0,40$ N	$F_A = 0,50$ N	$F_A = 0,60$ N	$F_A = 0,95$ N
$F_A = 0,50$ N	$z = 0,15$; $p = 1,00$	-	-	-
$F_A = 0,60$ N	$z = 0,98$; $p = 0,160$	$z = 0,83$; $p = 0,412$	-	-
$F_A = 0,95$ N	$z = 1,58$; $p = 0,001$ **	$z = 1,43$; $p = 0,004$ **	$z = 0,60$; $p = 1,00$	-
$F_A = 1,40$ N	$z = 0,87$; $p = 0,338$	$z = 0,72$; $p = 0,792$	$z = -0,12$; $p = 1,00$	$z = -0,72$; $p = 0,792$
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant				

Tabelle 5.19: Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Schieben Ausrastkraft – VR3

Auch hinsichtlich der Ergonomie ergeben sich signifikante Unterschiede mittels Friedman-Test (Chi-Quadrat (4) = 24,80; $p < 0,001$; $n = 30$). Die Post-hoc-Tests zu den Messwerten der Ergonomie sind in Tabelle A.4.5 in Anhang A4 hinterlegt. Hier zeigt sich, dass die Faktorstufen $F_A = 0,95$ und $1,40$ N im Vergleich zu den Faktorstufen $F_A = 0,40$ und $0,50$ N signifikant und hoch signifikant schlechter abschneiden (vgl. Bild 5.20).

In Bild 5.21 wird die Bewertung der aufzubringenden Ausrastkraft durch die Probanden dargestellt. Die Ausrastkräfte von $F_A = 0,4$ bis $0,6$ N liegen alle nahe an der *optimalen* (4) Bewertung. Anhand der Richtung der Regressionslinie ist zu erkennen, dass mit einer Zunahme von F_A die Bewertungen tendenziell in Richtung der Antwortmöglichkeit *zu schwer* gehen. Die optimale Ausrastkraft F_A , berechnet mithilfe der Regressionsgleichung, beträgt $0,20$ N (vgl. Bild 5.21).

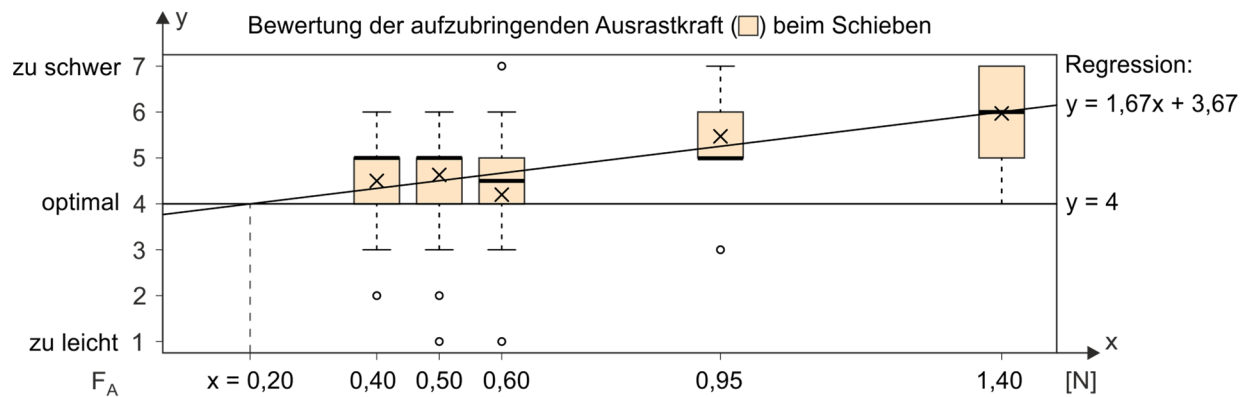


Bild 5.21: Bewertung der Ausrastkraft beim Schieben – VR3

Diskussion: Im ersten Teil der Versuchsreihe 3 wurden fünf verschiedene Versuchssubjekte präsentiert, bei denen die Ausrastkraft unterschiedlich von 0,40 N bis 1,40 N ausgeprägt war. Die Ausrastkraft F_A in Newton [N] bezeichnet den zusätzlichen Aufwand, der neben der Betätigungskraft F_B erforderlich ist, um aus einer Raststellung ohne vorherigen Anstieg auszurasen (vgl. Kapitel 3.2.1). In vorliegendem Fall markiert die Raste eine mittlere Position, die gleichzeitig als Standard-Designstellung fungiert. Eine Raste ist somit ein haptisches Merkmal, das mittels haptischer Rückmeldung einen Informationsinhalt überträgt, ohne dass eine Blickabwendung von der Fahraufgabe erforderlich ist.

Um die Frage zu beantworten, welchen prüfbar parametrisierten Wert die Ausrastkraft idealerweise haben sollte, gaben insgesamt 30 Probanden im Versuch ihre Bewertungen. Dabei erzielt die Faktorstufe $F_A = 0,40$ N die höchste Wertigkeit, gefolgt von 0,5 N und 0,6 N. Die am niedrigsten bewertete Faktorstufe $F_A = 0,95$ N erhält signifikant schlechtere Bewertungen im Vergleich zu 0,4 N und 0,5 N. Somit kann die Nullhypothese H_{0-12} , die besagt, dass es keinen Unterschied in den Wertigkeitsurteilen der Ausrastkräfte gibt, verworfen werden.

Geringere Ausrastkräfte werden auch als ergonomischer bewertet. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bei zu hohen Ausrastkräften die anschließende Verstellung erschwert wird und der Nutzer möglicherweise sogar direkt auf den folgenden Endanschlag trifft. Gleichzeitig darf eine Rastung nicht zu unauffällig gestaltet werden, um sicherzustellen, dass sie insbesondere während der Fahrt wahrgenommen wird.

Unter Berücksichtigung einer vermuteten Toleranz von $\pm 0,3$ N erscheint 0,5 N als ein geeigneter Ausgangswert, um wahrnehmbare und gleichzeitig nicht zu hohe, unergonomische Werte zu erreichen. Die Bewertung des Kraftaufwands bei $F_A = 0,5$ N liegt nahe dem Wert $y = 4$, was einer optimalen Bewertung entspricht (vgl. Bild 5.21). $F_A = 0,5$ N befindet sich zudem in der Mitte der drei sehr gut bewerteten Faktorstufen (vgl. Bild 5.20).

In diesem Versuch wurde ausschließlich der Parameter Ausrastkraft systematisch variiert, während die Betätigungskraft der Versuchsobjekte konstant bei 1,3 N blieb. Die ermittelten idealen 0,5 N als zusätzliche Kraft zum Ausrasten entsprechen ungefähr 28 % der Amplitude. Es wäre interessant, künftige Versuchsreihen durchzuführen, um zu untersuchen, ob sich dieses Verhältnis zwischen Ausrastkraft und Betätigungskraft bestätigt. Im Kontext von Drucktastern berichtet REISINGER [2009, S. 204] von einer optimalen Ausprägung des Kraftsprungs, der sich auf 33 % der Schaltkraft F_D beläuft.

5.3.4.2 Betätigungskraft und alternative Konzepte beim Drücken

In Bild 5.22 sind die Wertigkeitsurteile der Probanden für alle 12 Versuchsobjekte abgebildet. Bei Betrachtung der Gruppe *Betätigungskraft* ist zu erkennen, dass die Faktorstufe *mittel* mit einer Schaltkraft von $F_D = 11,2$ N das beste Ergebnis erzielt ($M = 5,17$; $SD = 1,46$). Das Versuchsobjekt *leicht* mit $F_D = 10,8$ N erreicht ein etwas schwächeres, insgesamt jedoch ein recht gutes Ergebnis mit $M = 4,6$ ($SD = 1,81$). Die höheren Betätigungskräfte *schwer* und *schwerer* vermindern die Wertigkeit deutlich, und insbesondere die Faktorstufe *schwerer* mit Schaltkraft $F_D = 20$ N wird als sehr minderwertig bewertet ($M = 2,27$; $SD = 1,34$).

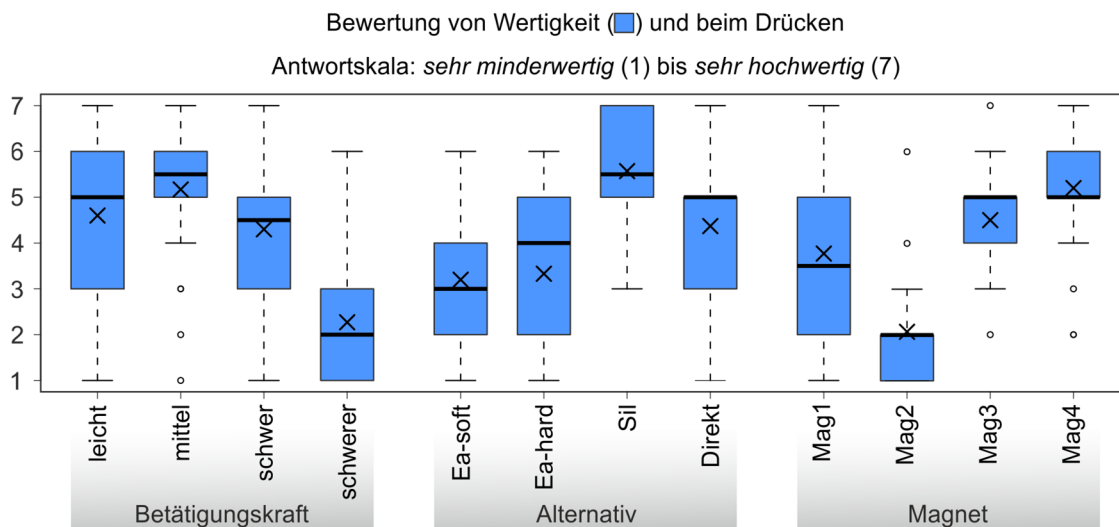


Bild 5.22: Bewertung der Wertigkeit beim Drücken – VR3

Der Friedman-Test innerhalb der Gruppe *Betätigungskraft* zeigt an, dass signifikante Unterschiede in der Bewertung vorliegen (Chi-Quadrat (3) = 38,64; $p < 0,001$; $n = 30$). Aus den sechs Post-hoc-Paarvergleichen nach Dunn-Bonferroni ergibt sich, dass drei Paare ein signifikant ungleiches Ergebnis ausweisen. Die Faktorstufe *schwerer* schneidet bedeutend schlechter ab im Vergleich zu den anderen drei ($p < 0,001$). Des Weiteren liefert der Friedman-Test über alle 12 Reizmuster ebenfalls ein signifikantes Ergebnis (Chi-Quadrat (11) = 127,14; $p < 0,001$; $n = 30$). Trotz einer Bonferroni-Korrektur wurden ins-

gesamt 21 signifikant ungleiche Paare ermittelt. Die detaillierte Teststatistik aller nachgeschalteten Post-hoc-Paarvergleiche nach Dunn-Bonferroni kann der Tabelle A.4.6 in Anhang A4 entnommen werden.

Bei der Betrachtung aller Bewertungen fällt auf, dass das Konzept mit Silikonfedern (*Sil*) insgesamt am besten abschneidet ($M = 5,57$; $SD = 1,22$). Das zweitbeste Ergebnis wird ebenfalls von einem Prototypen erzielt, und zwar vom Magnetkonzept *Mag4* mit $M = 5,20$ ($SD = 1,47$). Das schlechteste Ergebnis wird vom Magnetkonzept *Mag2* erzielt mit einem Mittelwert von 2,07 ($SD = 1,44$). Bei diesem Konzept waren die Neodymmagnete zur Tasterrückstellung und an den Rasthaken jeweils abstoßend angeordnet. Anhand der Kraft-Weg-Kennlinie (vgl. Tabelle A.3.4 in Anhang A3) ist zu erkennen, dass die abstoßende Kraft der Magnete insbesondere im Anfangshub deutlich zu schwach ausgeprägt war. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Anfangshub eine Kraft von mehr als 1 N erfordern sollte, um ein angemessenes Widerstandsniveau zu gewährleisten. Dadurch wird eine zu leichte Betätigung vermieden und eine ausreichende haptische Rückmeldung an den Nutzer gegeben.

Des Weiteren sollte die Schaltkraft F_D unter 20 N liegen, um eine komfortable Bedienung zu ermöglichen (vgl. Tabelle 5.16). Ebenso sollte der Stellweg auf etwa maximal 6 mm begrenzt sein, um eine klare Rückmeldung und eine reibungslose Entriegelung zu gewährleisten. Bei zu tiefem Drücken könnte ansonsten der Eindruck entstehen, dass die Entriegelung nicht oder nur sehr schwer erfolgt.

Bei der Betätigung von *Ea-soft* und *Ea-hard* war aufgrund der eingesetzten Dämpfung für den manipulierten Endanschlag kein Kraftsprung mehr messbar. Dies führt zu einer schlechten Bewertung beider Versuchsobjekte, da dadurch die eindeutige Kennzeichnung eine erfolgreiche Betätigung und Entriegelung entfällt. Versuchsobjekte mit einem wahrnehmbaren Kraftsprung von mehr als 10 % (vgl. Tabelle 5.16) wurden von den Probanden positiv bewertet (vgl. Bild 5.22). Der Kraftsprung wird in einem relativ weiten Wertebereich zwischen 13,75 % und 30 % gut bewertet.

Es konnte kein erkennbarer Einfluss des Kraftsprungweges (in mm) auf die Bewertung festgestellt werden. Eine Übersicht über die Einschätzung der Probanden bezüglich des Einflusses einzelner Gestaltparameter auf die Wertigkeit wird im nachfolgenden Kapitel 5.4 präsentiert.

Auf eine Bewertung der Ergonomie beim Drücken wurde verzichtet, da die Bewegungsart, die eine translatorische Bewegung nach unten darstellt, aufgrund ihrer Simplizität wenig Raum für Fehlanwendungen bietet.

Wie bereits zu Beginn erwähnt, ist es im vorliegenden Experiment nicht zulässig, die Wertigkeitsunterschiede eindeutig auf einzelne Parameter zurückzuführen, da keine systematische Manipulation der Parameter vorgenommen wurde.

Dem hingegen kann berichtet werden, welche subjektiven Beschreibungen der Probanden im Allgemeinen mit hoher Wertigkeit einhergehen. Die Mittelwerte der Beschreibungen aller Versuchsobjekte für das Drücken sind in Tabelle A.5.4 in Anhang A5 aufgeführt. Für alle eingesetzten Items ergeben sich aufgrund des unterschiedlichen Kraft-Weg-Verlaufs signifikante ungleiche Beschreibungen ($p < 0,001$). Eine hohe positive Korrelation liegt für die Items *gleitend* ($r = 0,56$) und *deutlich* ($r = 0,53$) vor. Zudem erreichten Versuchsobjekte eine hohe Wertigkeit, wenn sie auch als *sportlich* ($r = 0,43$) und *geführt* ($r = 0,38$) beschrieben werden. Je ausgeprägter eine Betätigung als *schwergängig* ($r = -0,27$) und *klappernd* ($r = -0,28$) beschrieben wird, desto niedriger fällt die Bewertung der Wertigkeit aus. Praktisch kaum ein Zusammenhang mit der Wertigkeit liegt bei dem Item *klickend* vor ($r = 0,07$). Bild 5.23 zeigt exemplarisch zwei Radardiagramme im Vergleich. Hier ist das Beschreibungsprofil des wertigsten Versuchsobjekts *Sil* dem des minderwertigsten Konzept *Mag2* gegenübergestellt. Der höchste Wert (7) auf der Antwortskala entspricht dem höchsten Zutreffen des jeweiligen Adjektivs. Wie die Korrelationen bereits gezeigt haben, müssen Betätigungen des Drückens möglichst *gleitend*, *deutlich*, *geführt* und *sportlich* sein, um ein hohes Wertigkeitserlebnis auszulösen.

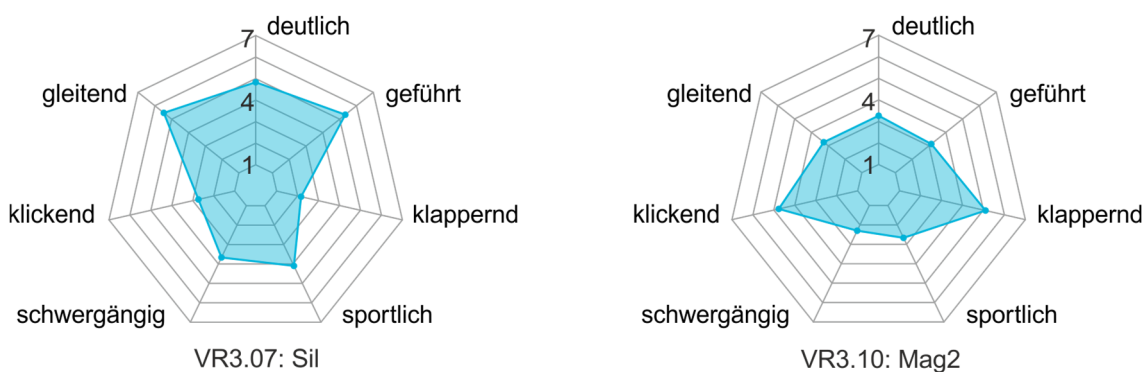


Bild 5.23: Vergleich der Beschreibungen des hochwertigsten und des minderwertigsten Versuchsobjekts beim Drücken – VR3

Diskussion: Im zweiten Teil der dritten Versuchsreihe zur Untersuchung der Bewegungsart *Drücken* wurden Ablagefächer einer Mittelkonsole als Versuchsobjekte verwendet. Diese Ablagefächer verfügen über einen Taster, der zum Öffnen beider Klappen und zur Freigabe des Ablagefachs dient. Insgesamt wurden 12 dieser Versuchsobjekte aus einem bestimmten Baulos ausgewählt und vorbereitet, um unterschiedliche Betätigungskräfte und alternative Entriegelungskonzepte, wie bspw. den Einsatz von Magneten, zu

untersuchen. Dabei handelte es sich nicht um eine isolierte und gezielte Parametermanipulation, sondern vielmehr um eine erste allgemeine Untersuchung, die erste Hinweise für Gestaltungsempfehlungen liefert und die Möglichkeit bietet zu prüfen, ob alternative Konzepte in der Lage sind, einen vergleichbaren Wertigkeitseindruck zu erzeugen wie konventionelle, in Serie befindliche, Konzepte und Öffnungsmechanismen.

Innerhalb der Gruppe der Betätigungskraft wurden bei den vier ausgewählten Versuchsobjekten Tasterrückstellfedern mit unterschiedlichem Härtegrad eingesetzt. Es konnten signifikante Unterschiede in der Bewertung der Wertigkeit festgestellt werden, wobei die Faktorstufe *mittel* mit einer Schaltkraft von $F_D = 11,2 \text{ N}$ das beste Ergebnis erzielte. Die Faktorstufe *schwerer* hingegen schnitt besonders schlecht ab und wies eine gemessene Schaltkraft von 20 N auf. Somit wird die Nullhypothese H_{0-13} , die besagt, dass es keinen Unterschied zwischen den Betätigungskräften beim Drücken gibt, abgelehnt.

Interessanterweise belegen bei Betrachtung der Ergebnisse aller Versuchsobjekte das Konzept mit Silikonfedern (*Sil*) sowie das Magnetkonzept *Mag4* die ersten beiden Plätze. Dies zeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, wertige Betätigungsmechanismen für das Drücken zu konstruieren, ohne auf konventionelle zylindrische Schraubenfedern zurückzugreifen. Die Verwendung elastischer Bänder könnte zudem kostengünstiger sein, wobei jedoch der Verschleiß und die Haltbarkeit über den Produktlebenszyklus hinweg berücksichtigt werden muss. Der Einsatz von Magneten sollte verschleißfrei möglich sein, jedoch ist beim Einsatz von Dauermagneten deren potentielle Gefährdung von elektronischer Komponenten wie Herzschrittmacher und Datenträger zu berücksichtigen. Das Magnetkonzept *Mag4* mit einer anziehend-abstoßenden Magnetanordnung erscheint auf konzeptioneller Ebene unter den Magnetkonzepten besonders vielversprechend. Die Kraft-Weg-Kennlinie ist durch einen kurzen spürbaren Anstieg gefolgt von einem deutlich ausgeprägten Kraftsprung (etwa 34 %) gekennzeichnet. Die Nullhypothese H_{0-14} , die besagt, dass es keinen Unterschied zwischen den Entriegelungskonzepten im Wertigkeitssurteil gibt, wird bis auf weiteres verworfen. Unabhängig vom gewählten Entriegelungskonzept sollte sich das Betätigungserlebnis für den Nutzer deutlich, gleitend, sportlich und geführt anfühlen.

Zusammenfassend lassen sich aus diesem Versuch Wertebereiche ableiten, die insbesondere darauf hinweisen, was zu vermeiden ist. Der Anfangshub sollte beispielsweise eine Kraft von mehr als 1 N aufweisen. Die Schaltkraft sollte unter 20 N liegen, der Kraftsprung sollte mehr als 10 % betragen, und der Stellweg sollte nicht wesentlich länger als 6 mm sein.

Der vorliegende Versuch zeigt, dass Magnetkonzepte grundsätzlich eine wertige Machbarkeit aufweisen. In zukünftigen Versuchen können weitere Feinabstimmungen erfolgen, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Im Vergleich zum Verlauf einer kontinuierlichen Drehbewegung weist die Kraft-Weg-Kennlinie beim Drücken vielfältige Merkmale und Möglichkeiten zur Parametrisierung auf. Dadurch eröffnen sich eine Vielzahl an Möglichkeiten, verschiedene Untersuchungen durchzuführen und die Gestaltung weiter zu optimieren.

5.4 Ergebnisse der finalen Fragen – VR1 bis VR3

Am Ende jeder Versuchsreihe wurde den Probanden der sogenannte *finale Fragebogen* vorgelegt (vgl. Tabelle 5.4). Die Ergebnisse zur Bewertung des Einflusses auf die Wertigkeit sind in Bild 5.24 dargestellt. Hierbei bezieht sich der Einfluss auf die im Versuch variierten Gestaltparameter. Die Probanden nahmen während des Versuchs unterschiedliche Wertebereiche der Faktoren wahr. Interessanterweise wird den Faktoren insgesamt eine recht hohe Einflussnahme auf die Wertigkeit zugeschrieben. Die Aussagen der Probanden legen somit nahe, dass diese Gestaltparameter relevant sind und die Wertigkeit maßgeblich beeinflussen können.

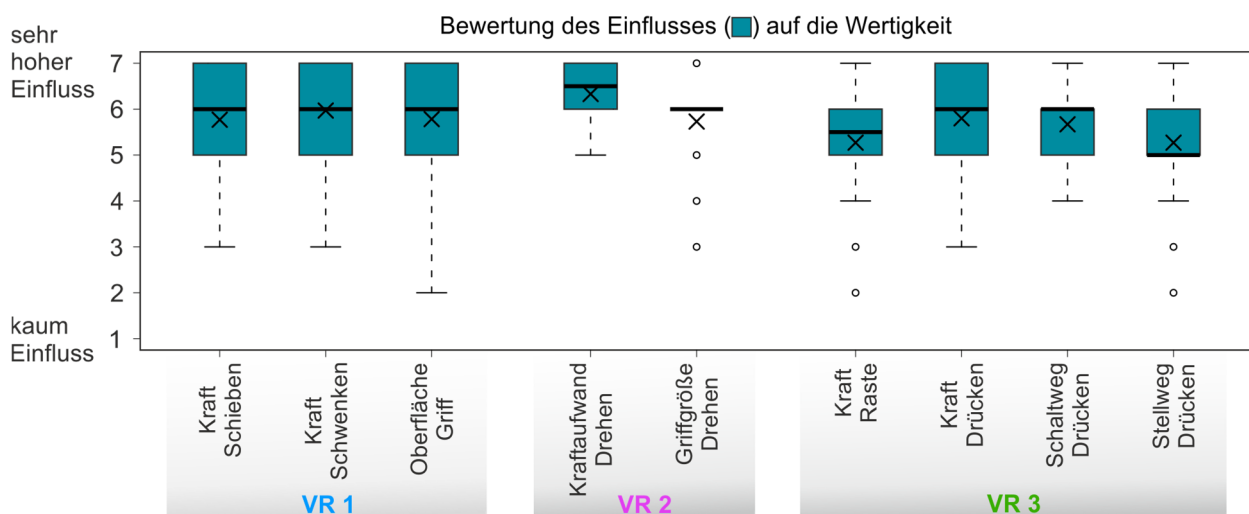


Bild 5.24: Bewertung des Einflusses auf die Wertigkeit – VR1 bis 3

Dem Kraftaufwand beim Drehen wird mit $M = 6,33$ ($SD = 0,76$) der höchste Einfluss zugesprochen. Alle weiteren Bewertungen liegen auf einem hohen Niveau zwischen 5 und 6, wie in Bild 5.24 dargestellt. Der geringste Einfluss unter allen Faktoren wird der Raste, genauer der Ausrastkraft, zugesprochen ($M = 5,27$; $SD = 1,23$). Ein ausgeführter Friedman-Test mit nachgeschaltetem Dunn-Bonferroni Test zeigt, dass mindestens ein signifikanter Unterschied vorliegt (Chi-Quadrat (7) = 17,34; $p = 0,015$; $n = 30$). Ein signifikant

ungleiches Paar ist zwischen dem Faktor *Kraftaufwand beim Drehen* und der *Ausrastkraft* F_A festzustellen ($z = 2,20$; $p = 0,014$). Dies bedeutet, dass die Probanden dem Kraftaufwand beim Drehen mehr Einfluss auf die Wertigkeit zusprechen als der Ausrastkraft. Bei der Betrachtung der Ergebnisse zur Bewertung des Einflusses auf die Wertigkeit ist zu beachten, dass die Probanden nicht alle Einflussparameter präsentiert und erlebt hatten, sondern nur diejenigen der Versuchsreihe, an der sie teilgenommen haben.

Eine weitere *finale Frage* befasste sich mit dem Stellweg bzw. -winkel (vgl. Tabelle 5.4). Abgesehen von den Ablagefächern in Versuchsreihe 3 wurde dieser nicht verändert und blieb konstant. In Bild 5.25 ist zu sehen, wie die Probanden den Stellweg bei den verwendeten Versuchsobjekten bewerteten. Auffällig ist dabei, dass die Lamellendüse in Versuchsreihe 1 beim horizontalen Betätigen mit einem Schiebeweg von 12 mm als zu kurz bewertet wird ($M = 2,90$; $SD = 0,99$). In Versuchsreihe 3, bei der Untersuchung der Ausrastkraft, kam erneut dasselbe Düsenmodell zum Einsatz, und der Stellweg wurde mit $M = 2,53$ ($SD = 1,04$) ebenfalls als zu kurz bewertet (vgl. Bild 5.25). Möglicherweise wären hier 15 mm bzw. 7 bis 8 mm von der Mittellaste bis zum Endanschlag ideal, um eine komfortable und präzise Einstellung vorzunehmen. Der verwendete Stellwinkel von 60° bzw. 19 mm Bogenlänge beim Schwenken (VR 1) sowie der Stellwinkel von 90° beim Drehen (VR 2) scheinen hingegen angemessen zu sein.

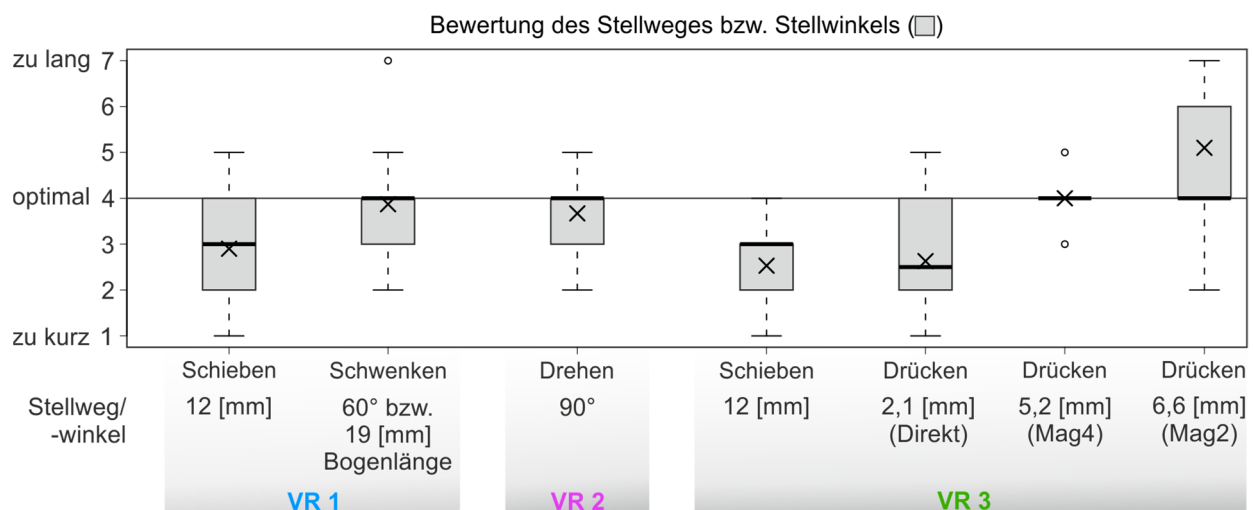


Bild 5.25: Bewertung des Stellweges – VR1 bis 3

Aus der Untersuchung zum Drücken sind die Bewertungen von drei Versuchsobjekten in Bild 5.25 dargestellt. Dabei wurden das Versuchsobjekt mit dem kürzesten Schaltweg (*Direkt*, 2,1 mm) sowie das mit dem längsten (*Mag2*, 6,6 mm) ausgewählt. Es ist zu erkennen, dass diese von den Probanden als *zu kurz* ($M = 2,63$; $SD = 1,27$) bzw. *zu lang* ($M = 5,10$; $SD = 1,27$) bewertet werden. Das Magnetkonzept *Mag4* mit einem Schaltweg von 5,2 mm erzielte mit sehr geringer Streuung ($SD = 0,46$) eine *optimale* Wertung von

$M = 4,00$. Aus Versuchsreihe 3 zum Drücken wurde das kürzeste, optimalste und längste Versuchsobjekt für Bild 5.25 ausgewählt. Es zeigt sich, dass der Eindruck beziehungsweise die bewertete Länge des Stellwegs sich mit den tatsächlichen, objektiven Stellwegen [mm] deckt (vgl. Bild 5.25).

Außerdem wurde das *Verständnis* zur Betätigung bei jedem Versuchsobjekt abgefragt (vgl. Tabelle 5.4). Dabei wurden durchgehend hohe Bewertungen erzielt mit einem Mittelwert von 5,57 bis 6,53. Die runden Kugeldüsen aus Versuchsreihe 1 - Teil 2 und aus Versuchsreihe 2 schnitten hierbei geringfügig schlechter ab als die Lamellendüse aus Versuchsreihe 1 und 3. Die durchweg hohen Bewertungen lassen dennoch den Schluss zu, dass alle Versuchsobjekte verständlich gestaltet sind und dass eine Betätigung sowohl spontan als auch sicher gelingt.

5.5 Übersicht der Hypothesenprüfung

Tabelle 5.20 gibt einen Überblick über die in den Versuchen zur Haptik untersuchten Forschungshypothesen. Da im Rahmen der experimentellen Überprüfung eine aufgestellte Alternativhypothese nicht angenommen, sondern lediglich eine Nullhypothese nach erfolgreicher Falsifikation abgelehnt werden kann, wird der Ausgang der Hypothesenprüfung anhand von H_0 dargestellt.

Nach der Überprüfung der Hypothesen zeigt sich, dass die Betätigungskraft F_B [N] beim Schieben und Schwenken sowie die Betätigungskraft F_D [N] beim Drücken in der Lage sind, das Wertigkeitsurteil der Probanden signifikant zu beeinflussen (H_{0-1} , H_{0-2} und H_{0-13} werden abgelehnt).

In Versuchsreihe 1 wurde ein überzufälliger Zusammenhang zwischen den subjektiven Beschreibungen der Probanden und ihren Wertigkeitsurteilen nachgewiesen, sowohl beim Schieben und Schwenken als auch bei der Bewertung von Oberflächen (H_{0-3} und H_{0-7} abgelehnt). Die demografischen Kontrollvariablen Alter und Geschlecht hatten keinen Einfluss auf die Bewertung der aufzubringenden Betätigungskraft F_B [N] in Versuchsreihe 1 (H_{0-4} und H_{0-5} bleiben erhalten).

Neben der Betätigungskraft F_B [N] führen ebenso die aufzubringende Drehmomentkraft M_B [Ncm] sowie Rastkräfte F_A [N] beim Schieben zu bedeutenden Unterschieden im Wertigkeitsurteil (H_{0-11} sowie H_{0-12} verworfen). In der zweiten Versuchsreihe führten die eingesetzten, unterschiedlichen Griffgrößen [mm] nicht zu einem Wertigkeitsunterschied (H_{0-9} bleibt erhalten), jedoch besteht eine bedeutsame Wechselwirkung zwischen Drehmoment M_B [Ncm] und Griffgröße r [mm] (H_{0-10} abgelehnt). Zusätzlich ist das bevorzugte Drehmoment M_B von dem zu erreichenden Maximalmoment der Probanden in einem konstanten Verhältnis abhängig (H_{0-11} wurde verworfen).

In Versuchsreihe 3 zur Bewegungsart Drücken konnte nachgewiesen werden, dass nicht nur unterschiedliche Betätigungskräfte F_D , sondern auch verschiedene Entriegelungsmechanismen wie beispielsweise Magnetkonzepte in der Lage sind, signifikante Unterschiede in der Bewertung der Wertigkeit auszulösen (H_{0-13} und H_{0-14} abgelehnt). Abschließend zeigt Tabelle 5.20 sämtliche Entscheidungen zu den Hypothesen in der Übersicht.

H_{1-x}	Formulierung Alternativhypothese	H_{0-x} verworfen
H_{1-1}	Es gibt einen Unterschied zwischen den <i>Betätigungskräften</i> im <i>Wertigkeitsurteil</i> bei der Bewegungsart <i>Schieben</i> .	ja
H_{1-2}	Es gibt einen Unterschied zwischen den <i>Betätigungskräften</i> im <i>Wertigkeitsurteil</i> bei der Bewegungsart <i>Schwenken</i> .	ja
H_{1-3}	Es gibt einen Zusammenhang zwischen der <i>Beschreibung</i> der Probanden und dem <i>Wertigkeitsurteil</i> .	ja
H_{1-4}	Das <i>Geschlecht</i> hat einen Einfluss auf die Bewertung von F_B .	nein
H_{1-5}	Das <i>Alter</i> hat einen Einfluss auf die Bewertung von F_B .	nein
H_{1-6}	Es gibt einen Unterschied zwischen den <i>Oberflächen</i> im <i>Wertigkeitsurteil</i> .	ja
H_{1-7}	Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Empfindung bzw. <i>Beschreibung</i> der <i>Oberflächen</i> und dem <i>Wertigkeitsurteil</i> .	ja
H_{1-8}	Es gibt einen Unterschied zwischen den <i>Drehmomenten</i> M_B im <i>Wertigkeitsurteil</i> .	ja
H_{1-9}	Es gibt einen Unterschied zwischen den <i>Griffgrößen</i> im <i>Wertigkeitsurteil</i> .	nein
H_{1-10}	Es gibt einen <i>Interaktionseffekt</i> zwischen <i>Drehmoment</i> und <i>Griffgröße</i> .	ja
H_{1-11}	Es gibt einen Zusammenhang zwischen <i>Maximalmoment</i> und dem präferierten <i>Drehmoment</i> M_B .	ja
H_{1-12}	Es gibt einen Unterschied zwischen den <i>Ausrastkräften</i> F_A im <i>Wertigkeitsurteil</i> bei der Bewegungsart <i>Schieben</i> .	ja
H_{1-13}	Es gibt einen Unterschied zwischen den <i>Betätigungskräften</i> im <i>Wertigkeitsurteil</i> bei der Bewegungsart <i>Drücken</i> .	ja
H_{1-14}	Es gibt einen Unterschied zwischen den <i>Entriegelungskonzepten</i> im <i>Wertigkeitsurteil</i> bei der Bewegungsart <i>Drücken</i> .	ja

Tabelle 5.20: Übersicht der Hypothesenentscheidung der Haptik-Untersuchungen

6 Untersuchung zur Wertigkeit der Betätigungsakustik

Kapitel 6 behandelt den Aufbau und die Durchführung von Akustikaufnahmen in vier verschiedenen Realfahrzeugen. Dabei wird insbesondere auf die Anforderungen an festgelegte Abläufe und die verwendete Technik bei den Akustikmessungen eingegangen (vgl. Kapitel 6.1). Die gewonnenen Audiodaten werden zur Bewertung der akustischen Qualität und des Hörerlebnisses von Öffnungs- und Schließgeräuschen in Hörversuchen verwendet (vgl. Kapitel 6.2). Zudem dienen die Akustikaufnahmen als Grundlage für den Vergleich der Kenngrößen aus den Aufnahmen mit den subjektiven Bewertungen der Hörversuche (vgl. Kapitel 6.3). Die Erkenntnisse ermöglichen die Ableitung von Zielgrößen für den akustischen Komfort und tragen gleichzeitig zur Kosten- und Aufwandsreduzierung im Entwicklungsprozess bei.

6.1 Akustikmessungen

Im Folgenden wird die Methode zur Durchführung von Akustikaufnahmen gemäß den Beschreibungen in TONDERA ET AL. [2022] dargestellt. Hierzu gehört auch die Auswahl und Extraktion relevanter Signalabschnitte aus den aufgenommenen Audiodaten.

Bei Betätigungsgeräuschen manuell-mechanischer Bedienelementen handelt es sich um sogenannte impulshafte, transiente Schallereignisse. Die Aufnahme dieser Betätigungsgeräusche erfolgt in einem Akustikprüfstand, der als Halbfreifeldraum konzipiert ist und mit Kompaktabsorbern ausgestattet ist. Diese schallabsorbierenden Elemente sind an den Wänden und der Decke angebracht, um eine Aufnahme weitgehend frei von Störungen zu ermöglichen. Zur Vermeidung von Störsignalen ist während der Aufnahme nur eine Person, der Versuchsleiter, anwesend. Die Fahrzeuge werden im Akustikprüfstand zentriert platziert. Tabelle 6.1 stellt die vier Bauteile bzw. Bedienelemente vor, die in den jeweils vier unterschiedlichen Fahrzeugen verschiedener Fahrzeugsegmente untersucht werden. Es wird sowohl die Betätigung Öffnen als auch das Schließen analysiert.

Verwendete Fahrzeuge	Abk.	Jeweils analysierte Bedienelemente	Abk.
Kompaktwagen (Compact Car)	CC	Türinnenbetätigung	Tür
Kleiner Geländewagen (Compact SUV)	C-SUV	Öffner des Handschuhkastens	HSK
Großer Geländewagen (SUV)	SUV	Ablagefach Mittelkonsole (vorne)	MiKo-v
Oberklasse (Full-size luxury car)	S-Class	Taster Armablagefach Mittelkonsole	MiKo-h

Tabelle 6.1: Die unabhängige Variable Fahrzeugklasse mit ihren vier Stufen sowie die jeweils untersuchten Bedienelemente

Um Störeffekte zu kontrollieren und die Messaufnahmen zu standardisieren, wurden anhand eines Protokolls Versuchsspezifikationen für jedes Fahrzeug festgelegt:

- Alle losen Gegenstände aus dem Fahrzeuginnenraum entfernen,
- Kopflehnen nach unten fahren,
- Rücksitzbank hochklappen,
- Kofferraumabdeckung installiert und eingefahren,
- Zündung aus und Lüftung auf Null.

Während der Aufnahmen saß der Versuchsleiter auf dem Fahrersitz und führte von dort die Betätigung aus. Vor Beginn einer Aufnahme benennt der Versuchsleiter mithilfe des mobilen Aufnahmegeräts Squadriga II [HEAD ACOUSTICS 2020] die nachfolgende Aufnahme, um hinterher die Zuordnung der Audiodateien zu ermöglichen. Die Betätigung wurde vorab umfangreich geübt, um eine reproduzierbare Durchführung sicherzustellen. Während der Aufnahmen wurde jede Betätigung 5-mal durchgeführt, beginnend mit dem Öffnen und gefolgt von dem Schließen nach einer Pause von etwa zwei Sekunden. Da das Aufnahmesystem sehr empfindlich ist, muss die gleiche Pause auch beim ersten Berühren des Öffnungselements eingehalten werden, da selbst bei der Kopplung von Hand und Bauteil ein Schallereignis registriert wird. Ebenso muss vor dem Ablösen der Finger kurz ingehalten werden. Bild 6.1 zeigt eine exemplarische Betätigung des Versuchsleiters sowie die verwendete Technik des Aufnahmesystems.

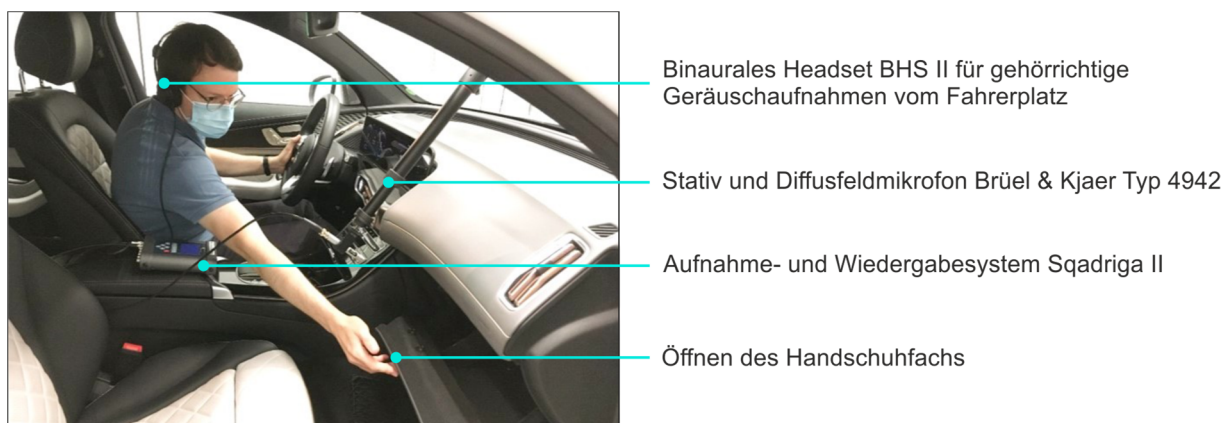


Bild 6.1: Aufbau zur Durchführung von Akustikaufnahmen in Realfahrzeugen

Für die Audioaufnahmen wird ein monaurales sowie ein binaurales Messgerät eingesetzt. Die binaurale Akustikaufnahme erfolgt mit einem mobilen Kopfbügelmikrofon BHS II [HEAD ACOUSTICS 2023b] für gehörrichtige Aufnahmen. Es reproduziert den Einfluss des menschlichen Körpers und den Abstand der Ohren auf die auditive Wahrnehmung. Bei der Wiedergabe ermöglicht es folglich eine realistische Wiedergabe der interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen [HEAD ACOUSTICS 2023b]. Beim Anschluss des binauralen Headsets an das Aufnahmegerät wird automatisch eine pegelrichtige Konfiguration und Entzerrung

vorgenommen [HEAD ACOUSTICS 2023b]. Das Headset ermöglicht außerdem die Wiedergabe der Geräuschdateien zur Überprüfung der Aufnahmen. Der Ort der Aufnahme ist zugleich der Ort der Ohren bei der Betätigung vom Fahrersitz aus. Folglich entfällt die Festlegung einer standardisierten Distanz zwischen Kopfbügelmikrofon und den Bauteilen. Alternativ kann auch ein sogenanntes Kunstkopfsystem für binaurale Aufnahmen verwendet werden (vgl. [ANGUELOV 2009] und [HÖCHSTETTER ET AL. 2015]). Dies hätte jedoch zur Folge, dass entweder der Versuchsleiter oder das Kunstkopfsystem auf dem Fahrersitz Platz findet und die Betätigung und Aufnahme so von unterschiedlichen Positionen aus stattfindet.

Ein zweites Gerät, ein Diffusfeldmikrofon vom Typ 4942 (Größe ½-Zoll) der Fa. Brüel & Kjaer wird in einem standardisierten Abstand von 200 mm senkrecht zu jedem jeweiligen Öffnungselement installiert. Laut Herstellerangabe eignet es sich besonders für die Messung in Fahrzeugen, da der Schall von Oberflächen des Fahrzeuginnenraums reflektiert wird [BRUEL & KJAER 2023]. Eine Kalibrierung wurde im Vorfeld der Aufnahmen mit einem Schallkalibrator durchgeführt, der auf 94 [dB] bei 1 [kHz] eingestellt war. Dadurch wird eine Empfindlichkeitseinstellung des Mikrofons auf 0,048 [mV/Pa] festgelegt. Beide Mikrofonsysteme sind mit dem Aufnahmegerät Squadriga II verbunden, das die Audiodateien auf einer SD-Karte speichert (vgl. Bild 6.1). Das Aufnahmeformat liegt bei 24 Bit und die Abtastfrequenz ist hierzu auf 48 kHz eingestellt.

Nach den Aufnahmen im Akustikprüfstand erfolgt im Anschluss das Schneiden, Auswählen und Analysieren der Audiosignale mit Hilfe der Software ArtemiS Suite [HEAD ACOUSTICS 2023a]. Eine Audiodatei enthält die zuvor erwähnten fünf geübten Betätigungen des Öffnens und Schließens eines jeden Bedienelements. Diese müssen zunächst in einzelne Audiosegmente gleicher Länge zerschnitten werden. Dies wird in einer Pegelüber-Zeit-Darstellung (SPL [dB(A)] x t [s]) durchgeführt, indem als erstes ein Marker an den letzten Nulldurchlauf vor Beginn des Geräusches gesetzt wird. Von diesem Punkt aus wird auf der Zeitachse eine Sekunde zurück definiert, um den Startpunkt eines einzelnen Betätigungssignals festzulegen. Anschließend wird jedes Signal auf eine Länge von 2,5 s zugeschnitten, um eine vergleichbare Dauer und Ruhephase zu gewährleisten. Die Audiosignale werden auf eine Dauer von 2,5 Sekunden zugeschnitten, um sie als Audio-Reizmuster für die Hörversuche zu verwenden. Dies ermöglicht ausreichende Ruhephasen vor und nach dem Geräusch, um die auditive Wahrnehmung der Probanden nicht zu überlasten. Ein zweiter Schnitt der Audiosignale auf eine einheitliche Dauer von 1,2 s wird vorgenommen, um das Extrahieren der technischen und psychoakustischen Metriken zu ermöglichen (vgl. [TONDERA ET AL. 2022, S. 347]). Bei diesem kürzeren Schnitt

auf 1,2 s nimmt das Betätigungsgeräusch einen höheren Anteil im gesamten Signal ein und es enthält folglich weniger Störgeräusche.

Die Pegel-über-Zeit-Diagramme der fünf Öffnungen eines jeden Bauteils werden anschließend übereinandergelegt. In einem Ausschlussverfahren wird die Anzahl reduziert, beispielsweise aufgrund von Störgeräuschen oder Abweichungen, bis schließlich nur ein repräsentatives Geräuschsignal übrigbleibt. Da das Schließen der Bauteile einfacher zu reproduzieren und mit geringerer Schwankung durchführbar ist, wird direkt nur ein Signal für die nachfolgenden Analysen ausgewählt. Die Ermittlung technischer und psychoakustischer Metriken aus den repräsentativen Audiosignalen des kürzeren Schnitts (1,2 s) erfolgt ebenfalls mit Hilfe der Software ArtemiS Suite. Die Ergebnisse dieser Analysen können in der Tabellen A.6.1 und Tabelle A.6.2 in Anhang A6 eingesehen werden.

6.2 Untersuchung der auditiven Wertigkeit mittels Hörversuch

Die Audiosignale, die auf eine Dauer von 2,5 Sekunden zugeschnitten sind, bilden die Grundlage für die Durchführung mehrerer Hörversuche. In einem Akustikstudio werden den Probanden über Kopfhörer die Öffnungs- und Schließgeräusche präsentiert. Durch einen sogenannten Paarvergleich werden die Audiosignale eines Bedienelements zwischen den verschiedenen Fahrzeugen vollständig paarweise verglichen, um eine subjektive Qualitätsbewertung zu erlangen.

6.2.1 Versuchsablauf und -beschreibung

Bei dem vorliegenden Hörversuch werden die Audiodateien über Kopfhörer in einem Akustikstudio abgespielt und bewertet. Das Akustikstudio befindet sich im Entwicklungsbereich eines Pkw-Herstellers und verfügt über einen schallisolierten Raum mit insgesamt zwölf Plätzen. Im Akustikstudio wird jeweils nur jeder zweite Platz besetzt, sodass insgesamt drei Hörversuche durchzuführen sind. Dies hat jedoch den Vorteil, dass dadurch Störungen und Ablenkungen für die Probanden minimal gehalten sind.

Betrifft eine Probandengruppe das Akustikstudio, so ist zunächst der demografische Fragebogen auszufüllen (vgl. Kapitel 6.2.2). Anschließend gibt der Versuchsleiter eine Einführung und Erklärung in den Versuch. Jeder Platz im Akustikstudio ist mit einem berührungsempfindlichen Bildschirm und Kopfhörern ausgestattet. Die zu bewertenden, binauralen Audiosignale werden über eine geeignete Software [HEAD ACOUSTICS 2023c] auf die Computer der Probanden übertragen.

Mit der Methode des Paarvergleichs werden den Probanden immer zwei Reize systematisch gegenübergestellt. Im Versuch werden zwei Betätigungsgeräusche einer Audiosignal-Klasse, wie bspw. *Öffnen – Handschuhkasten*, verwendet. Da alle Probanden einen vollständigen Paarvergleich durchführen, müssen insgesamt sechs (vgl. Formel 6.1)

Paarvergleiche für die vier verschiedenen Fahrzeuge durchgeführt werden. Die Anzahl der durchzuführenden Paarvergleiche kann mittels Binomialkoeffizient errechnet werden, wie nachfolgend anhand des vorliegenden Falles mit vier Stimuli veranschaulicht wird.

$$\binom{4}{2} = \frac{4!}{2! \times (4-2)!} = \frac{24}{2 \times 2} = 6 \quad (6.1)$$

Die Information, um welches spezifische Fahrzeug es sich handelt, wird nicht mitgeteilt. Stattdessen entscheiden sich die Probanden für Signal A oder B auf dem User-Interface, das auf dem Touchscreen zur Verfügung gestellt wird. Bild 6.2 zeigt das User-Interface mit den Abspieloptionen sowie die Entscheidungsfelder. Die zentrale Frage während des Versuchs lautet stets: „Welches Betätigungsgeräusch ist angenehmer?“.

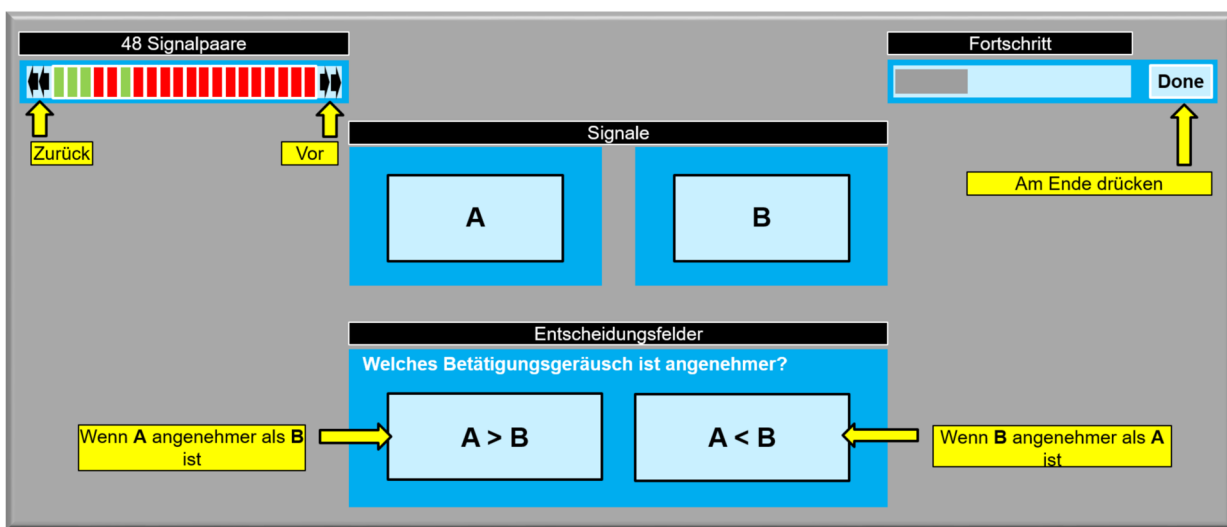


Bild 6.2: Graphische Benutzerschnittstelle zur Bewertung der Audiosignale

In Bild 6.3 sind die Fahrzeuge, die bereits in Kapitel 6.1 vorgestellt wurden, sowie die untersuchten Bauteile dargestellt. Durch die Betätigung des Öffnens bzw. Schließens ergeben sich insgesamt 48 durchzuführende Paarvergleiche für die Probanden.

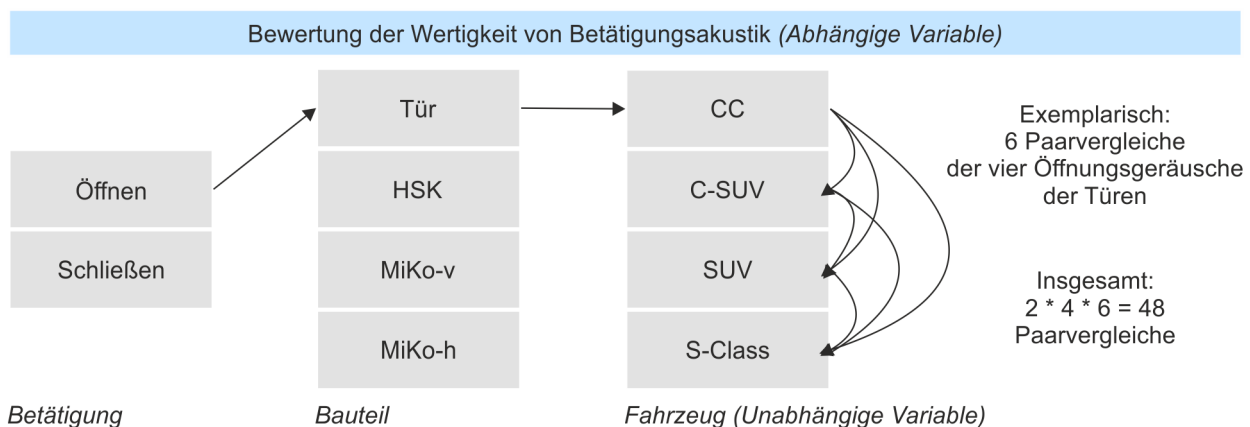


Bild 6.3: Versuchsdesign des Hörversuchs. Ein Bauteil und dessen Betätigung wird zwischen den vier Fahrzeugen verglichen und bewertet

Ein Vorteil dieser Vorgehensweise mittels Paarvergleich besteht in der Einfachheit des Versuchs. Der Proband muss lediglich zwei Reize vergleichen und seine Präferenz angeben, ohne dass eine komplexe Rangordnung oder Quantifizierung der Präferenz erforderlich ist. Aufgrund der vergleichsweise geringen kognitiven Belastung sind auch höhere Anzahlen an Vergleichen innerhalb einer Sitzung zumutbar [HELD ET AL. 2007, S. 11]. Die Ergebnisse der Probandenentscheidungen, also welcher Reiz im jeweiligen Vergleichspaar dominiert, werden automatisch in einer sogenannten Paarvergleichs- oder Präferenzmatrix gespeichert.

6.2.2 Stichprobe

Im Januar 2022 fanden drei Hörversuche im Akustikstudio statt, an denen insgesamt 16 Probanden teilnahmen. Alle Probanden wurden aus dem Entwicklungsbereich des Pkw-Herstellers rekrutiert. Es lässt sich festhalten, dass alle Teilnehmer ein hohes technisches Verständnis aufweisen, wobei einige von ihnen Spezialisten im Bereich Akustik sind. Das Alter der Probanden variierte zwischen 22 und 60 Jahren ($M = 35,94$; $SD = 11,05$). Das Geschlechterverhältnis lag bei 7 zu 9 zugunsten der Männer. Keiner der Probanden gab an, unter einer Hörschwäche zu leiden. Zudem besitzen alle Teilnehmer eine gültige Pkw-Fahrerlaubnis mit einer durchschnittlichen Fahrerfahrung von $M = 18,56$ Jahren ($SD = 11,14$). Alle 16 Probanden gaben an, ein eigenes Fahrzeug zu besitzen.

6.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Nachdem eine Versuchsperson einen vollständigen Paarvergleich einer Audiosignal-Klasse, wie beispielsweise *Öffnen-Tür* (vgl. Bild 6.3), durchgeführt hat, liegt eine Datenmatrix der Größe 4×4 vor (vgl. Tabelle 6.2), da immer alle vier Fahrzeuge gegeneinander verglichen wurden. Die Elemente jeder Zelle sind binär, nämlich eine „2“, wenn die Zeile die Spalte geschlagen hat, während eine „1“ bedeutet, dass die Zeile der Spalte unterlegen war. Der Grundsatz zur Interpretation der Matrix lautet hierbei „Zeile dominiert Spalte“. Aufgrund der acht Audiosignal-Klassen, resultierend aus zwei Betätigungen (Öffnen/Schließen) und vier Bauteilen, sowie aus der Teilnahme von 16 Probanden ergeben sich insgesamt 128 Präferenzmatrizen.

Präferenzmatrix von Versuchsperson 1 für die Audiosignal-Klasse <i>Öffnen - Tür</i>					
<i>Öffnen - Tür</i>	S-Class	SUV	C-SUV	CC	<i>Erläuterung</i>
S-Class	-	2	2	2	<i>S-Class > SUV, C-SUV, CC</i>
SUV	1	-	2	2	<i>SUV < S-Class; SUV > C-SUV, CC</i>
C-SUV	1	1	-	2	<i>C-SUV < S-Class, SUV; C-SUV > CC</i>
CC	1	1	1	-	<i>CC < S-Class, SUV, C-SUV</i>

Tabelle 6.2: Exemplarische Präferenzmatrix als Ergebnis des Hörversuchs

Beim Paarvergleich besteht jedoch die Möglichkeit von sogenannten Inkonsistenzen, wenn es zu widersprüchlichen Präferenzentscheidungen kommt. Beispielsweise kann der Fall auftreten, dass $A > B$, $B > C$ und gleichzeitig $C > A$ als Ergebnis der Probandenentscheidungen auftritt. Das Vorliegen widersprüchlicher Beurteilungen bei Paarvergleichen führt zu verzerrten Ergebnissen [BITTERLICH 2013, S. 8]. Ein inkonsistenter Paarvergleich wird auch als zirkuläre Triade bezeichnet [FREDELAKE & HOLUBE 2010, S. 152]. Innerhalb der vorliegenden 128 Präferenzmatrizen treten bei 13 davon zirkuläre Triaden auf, was einem Anteil von etwa 10 % entspricht. Inkonsistente Paarvergleiche mit zirkulärer Triade werden für die nachfolgende Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

Eine Möglichkeit zur weiteren Auswertung ist nun, die Anzahl an „2“ innerhalb einer Zeile zusammenzuzählen, um zu ermitteln, wie häufig die Zeile, also das Fahrzeug, gewonnen hat. Anhand der Siege könnte man eine Rangfolge der Fahrzeuge ermitteln, dabei würde allerdings nur ein ordinalskaliertes Datenniveau vorliegen. Ordinalskalierte Rangreihen geben jedoch nur einen groben Überblick bezüglich der Präferenzen der Probanden und enthalten keine Information zu den Distanzen zwischen den Reizen [FREDELAKE & HOLUBE 2010, S. 149].

Stattdessen wird für jede Audiosignal-Klasse eine kumulative Präferenzmatrix erstellt, in der die Anzahl an Siegen über alle 16 Probanden hinweg aufsummiert gelistet ist. So kann folglich herausgelesen werden, wie oft jedes Fahrzeug gegen jedes andere Fahrzeug über alle Probanden hinweg gewonnen hat. Diese Daten bilden die Grundlage für eine Transformation in ein sogenanntes BTL-Modell (vgl. [BRADLEY & TERRY 1952] und [LUCE 2005], gefunden in [HELD ET AL. 2007]). Die Wahrscheinlichkeit, dass $i > j$ im Paarvergleich zutrifft, berechnet sich nach HELD ET AL. [2007, S. 10] anhand der nachfolgenden Formel 6.2.

$$P(i > j) = \frac{\Phi(i)}{\Phi(i) + \Phi(j)} \quad (6.2)$$

Die Werte $\Phi(i)$ sind die Skalenwerte der BTL-Skala und werden auch *merit score* genannt (vgl. [GAO ET AL. 2023, S. 1073]). Sie geben an, welche Präferenzstärke ein Objekt oder ein Reiz hat, denn je höher der Skalenwert ist, desto wahrscheinlicher ist ein Sieg in einem Paarvergleich. Die Wahrscheinlichkeit, dass Fahrzeug A gegenüber B präferiert wird, ergibt sich aus dem Skalenwert $\Phi(A)$ dividiert durch die Summe aus $\Phi(A)$ und $\Phi(B)$. Das BTL-Modell ist folglich ein Wahrscheinlichkeitsmodell, das relative Stärken der verglichenen Reize modelliert, mit Hilfe derer theoretisch der Ausgang noch nicht erfolgter Paarvergleiche vorhergesagt werden kann.

Wurden die Daten mit der Methode des vollständigen Vergleichs gewonnen und ist die innere Konsistenz der Urteile gegeben, so kann bei den Skalenwerte des BTL-Modells

von einem intervallskalierten Datenniveau ausgegangen werden, und folglich liegen bedeutsame Information bezüglich der Unterschiede der Präferenzen vor [FREDELAKE & HOLUBE 2010, S. 155].

Im BTL-Modell werden die Skalenwerte relativ zueinander geschätzt. Um Vergleiche zwischen den Objekten zu ermöglichen, wird ein Baseline-Reiz ausgewählt, der einen festen Wert von 0 als Skalenwert erhält. Die Skalenwerte der anderen Reize werden dann im Verhältnis zum Skalenwert des Baseline-Reizes geschätzt. Um negative Skalenwerte zu vermeiden, wird in der Auswertung in jeder Audiosignal-Klasse der schwächste Reiz als Baseline gewählt. Nachfolgend zeigt Bild 6.4 das Ergebnis der Auswertung der durchgeführten Paarvergleiche in den jeweiligen Audiosignal-Klasse anhand von BTL-Skalenwerten. In Tabelle A.6.1 und A.6.2 in Anhang A6 sind die BTL-Skalenwerte zusätzlich in der letzten Spalte nach den ermittelten psychoakustischen Kenngrößen der einzelnen Audiosignale enthalten.

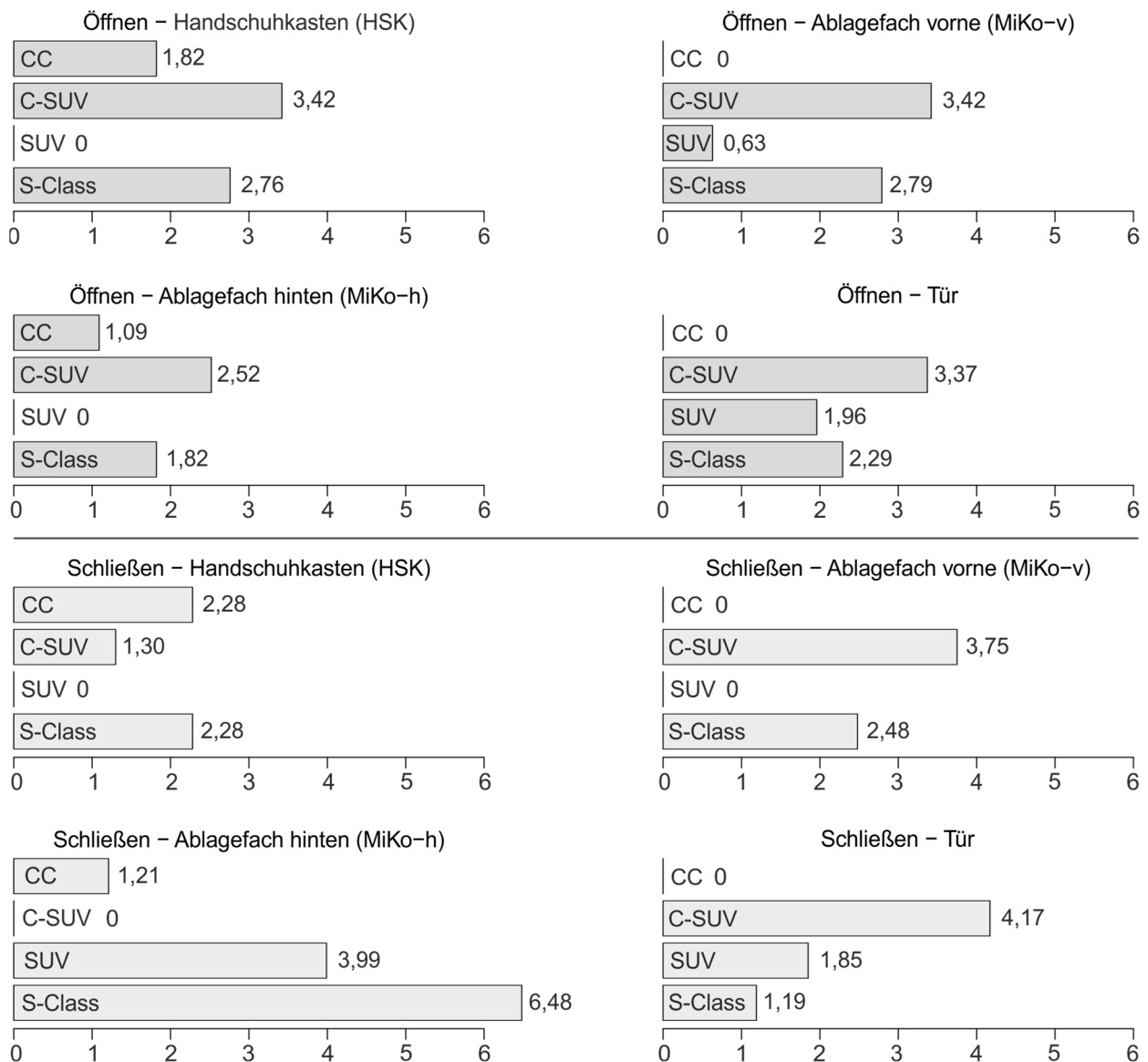


Bild 6.4: Bewertung der auditiven Qualität anhand von BTL-Skalenwerten

Je höher der Skalenwert ist, desto stärker ist die subjektive Präferenz. Anhand der Formel 6.2 kann die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, mit der ein bestimmtes Fahrzeug in einem Paarvergleich dominiert. Zudem ermöglichen die Skalenwerte die Ableitung einer Rangfolge. Die Kenngrößen des Audiosignals mit der besten Bewertung können als Zielgrößen verwendet werden (vgl. Tabelle A.6.1 und A.6.2 in Anhang A6). Dabei ist zu bedenken, dass dies noch nicht das Optimum an auditiver Wertigkeit darstellt, sondern lediglich die Identifizierung einer Präferenz innerhalb der gegebenen Auswahl.

Im Bild 6.5 werden exemplarisch der erste und der vierte Rang der subjektiven Bewertung einander gegenübergestellt, basierend auf der Audiosignal-Klasse *Öffnen Handschuhkasten*. Zusätzlich sind je zwei Diagramme abgebildet, zum einen eine Pegelanalyse (Schalldruckpegel, Zeit), zum anderen jeweils ein Spektrogramm als zeitvariante Darstellung der Frequenzverteilung (Frequenz, Schalldruckpegel, Zeit).

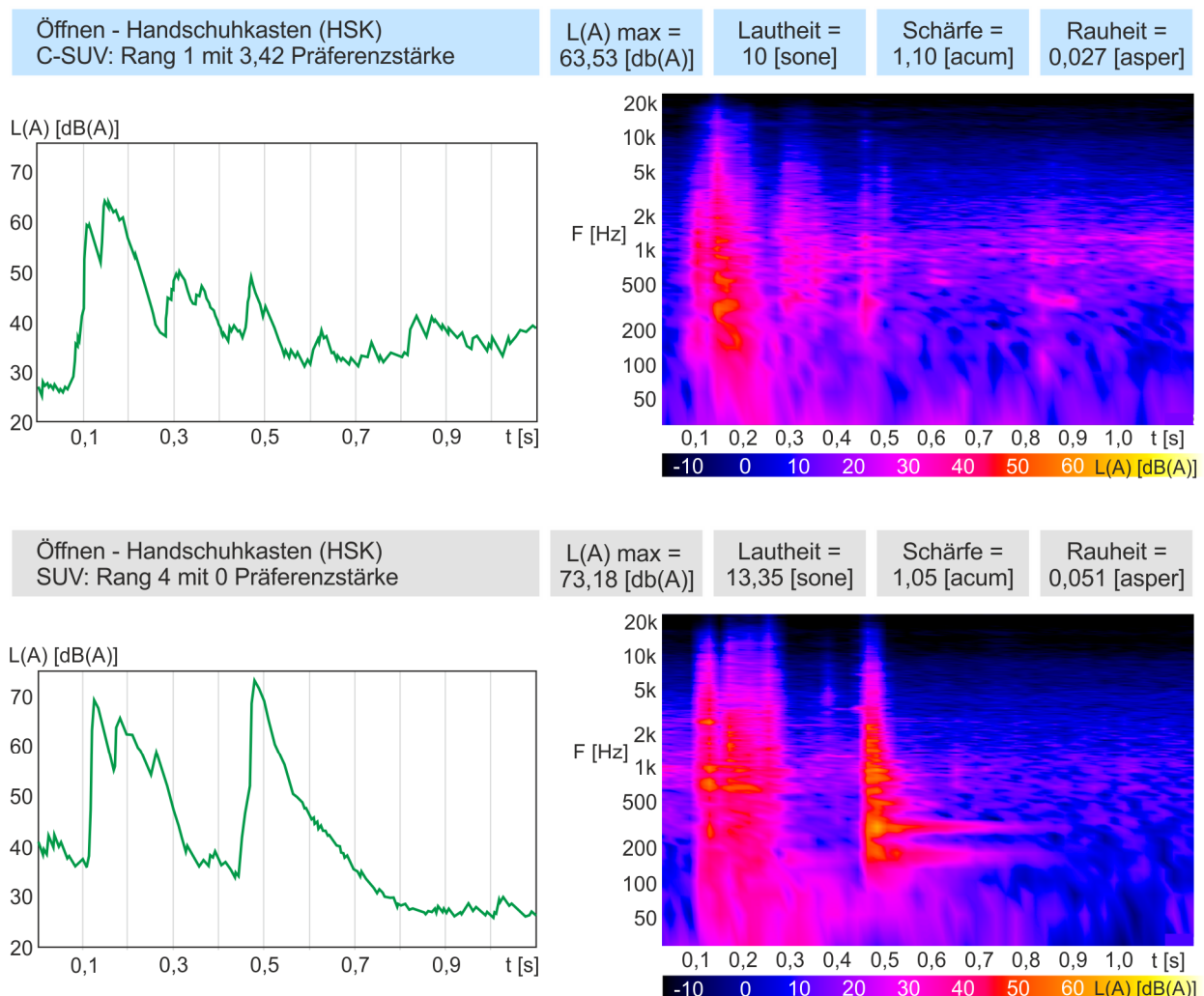


Bild 6.5: Vergleich des am besten bewerteten und am schlechtesten bewerteten Betätigungsgeräuschs anhand des Öffnens des Handschuhkastens und entsprechender objektiver Kenngrößen

Betrachtet man den Schalldruckpegel $L(A)$ und die Lautheit [DIN 45631/A1], so fällt auf, dass bei minderwertigen Audiosignalen (vgl. Bild 6.5 unten) höhere Werte hinsichtlich dieser beiden Parameter erreicht wird. Dies gilt für das gegebene Beispiel in Bild 6.5, allerdings auch beim oberflächlichen Durchsehen der Daten aller Bauteile fällt auf, dass Rang 4 Bauteile oftmals höhere *Dezibel*- und *sone*-Werte aufweisen als Rang 1 Bauteile (vgl. Tabelle A.6.1, Anhang A6). Dies deckt sich mit den Ergebnissen von TREIBER [2009, S. 8], wonach besonders positiv bewertete Bedienelemente eine wesentlich geringe Lautheit aufweisen.

Auffällig ist im gegebenen Beispiel von Bild 6.5 die zweite Pegelspitze beim Öffnungsgeräusch des SUVs (vgl. Bild 6.5 unten). Möglicherweise wirken sich anzahlmäßig wenige Geräusche günstig auf auditive Wertigkeit aus, da diese Betätigungsgeräusche dann als präzise und als intakt empfunden werden. Wertige Signale sollten folglich eine geringe Anzahl von Geräuschereignissen aufweisen oder diese liegen innerhalb eines kurzen Zeitabstands und sind somit nicht auflösbar. Hierzu könnte auch das Lautheit-Diagramm herangezogen werden, das wahrnehmbare Geräuschspitzen darstellt.

Ein wesentlicher Signalparameter zur Beurteilung des Frequenzspektrums ist möglicherweise die Schärfe nach [DIN 45692] (vgl. [HÖCHSTETTER ET AL. 2015]). Durch die Angabe des Schärfe-Werts [*acum*] in Bild 6.5 ist erkennbar, dass das präferierte Audiosignal einen höheren Schärfe-Wert aufweist. Eine hohe Schärfe deutet darauf hin, dass das Geräusch als scharf und deutlich empfunden wird. Es bleibt abzuwarten, ob die Ergebnisse von HÖCHSTETTER ET AL. [2015] bestätigt werden können und ob dieser Parameter einen signifikanten Zusammenhang mit auditiver Qualität aufweist (vgl. Kapitel 6.3).

Neben dem gezeigten Spektrogramm (vgl. Bild 6.5 rechts) könnte auch eine FFT (vgl. Kapitel 2.1.4) zur Darstellung der Frequenzanteile herangezogen werden. Aus der FFT lässt sich auch die sogenannte Peakfrequenz auslesen. Die Peakfrequenz der beiden Fahrzeuge aus Bild 6.5 betrug 258 Hz (C-SUV) bzw. 275 Hz (SUV), obwohl ihre bewertete Präferenz deutlich unterschiedlich war. Die nahezu identische Peakfrequenz deutet darauf hin, dass diese Kenngröße als kritisch betrachtet werden sollte. Laut GLOHR [2018, S. 119] liegt der Grund hierfür im breitbandigen Frequenzspektrum eines Betätigungsgeräusches sowie im Fehlen einer dominierenden Frequenz, wie es bei einem reinen Ton der Fall ist. Dies verdeutlicht, dass es wichtig ist, weitere Kenngrößen zu berücksichtigen. Bis hierhin geht die vorläufige Annahme von dem bewerteten Schalldruckpegel $L(A)$, der Lautheit und der Schärfe als zentrale, konservative Signalparameter aus.

Die psychoakustischen Signalparameter Rauigkeit und Schwankungsstärke werden in den Analysen berücksichtigt, obschon sie aufgrund ihrer nicht genormten Quantifizierung

von anderen Autoren ausgeschlossen wurden (vgl. [GLOHR 2018, S. 118]). In der vorliegenden Arbeit werden diese Parameter einbezogen, da bereits WILLEMSSEN & RAO [2010] sie bei transienten, impulsartigen Geräuschen berücksichtigt haben. Zusätzlich wird der Parameter der Impulshaltigkeit einbezogen, welcher ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen von WILLEMSSEN & RAO [2010] ist. Die Berechnung dieser Parameter erfolgt mit Hilfe der selben Auswertungssoftware Artemis Suite nach einem Algorithmus der Fa. HEAD acoustics [HEAD ACOUSTICS 2018b, S. 1-6].

Die bis hierhin präsentierten Ergebnisse ermöglichen eine systematische Ableitung von überprüfbaren Zielkenngrößen (Rang 1 Bauteile) und die Möglichkeit zur Integration in den Entwicklungsprozess. Jedoch ist zu beachten, dass die begrenzte Stichprobengröße im Hörversuch sowie die begrenzte Anzahl an betrachteten Bauteilen und Fahrzeugen als Limitation anzusehen sind. Trotz dieser Einschränkungen erlaubt der gewählte Ansatz eine neuartige Vorgehensweise, die durch Akustikaufnahmen in Realfahrzeugen und anschließende Hörversuche die Dokumentation und Bewertung des Reifegrads der auditiven Qualität ermöglicht. Für künftige Untersuchungen bietet es sich an, die Auswahl an Signalmerkmalen für die Geräuschanalyse zu erweitern und zu verfeinern. Außerdem ist der Umfang an untersuchten Bedienelementen einer Audiosignal-Klasse zu erweitern.

Obwohl die bisherigen Analysen verschiedene Zielkenngrößen ableiten können, bleibt bislang unklar, welche technischen und psychoakustischen Parameter einen wesentlichen Einfluss auf die auditive Wertigkeit haben. Um diese Fragestellung zu untersuchen, werden im nachfolgenden Kapitel 6.3 die ermittelten intervallskalierten BTL-Skalenwerte als abhängige, zu erklärende Variable verwendet. Die Analyse dieser subjektiven und objektiven Werte soll klären, welche ableitbaren Signalparameter die Wertigkeit der Betätigungsakustik maßgeblich beeinflussen.

6.3 Vorhersage der auditiven Wertigkeit

Analog dem Vorgehen von WILLEMSSEN & RAO [2010] sollen nachfolgend zunächst die individuellen Beziehungen zwischen jedem der berechneten Signalparameter und den subjektiven Präferenzbewertungen geprüft werden. Hierzu werden einfache lineare Regressionsmodelle berechnet, um anhand diverser statistischer Kennzahlen den Grad des Zusammenhangs zu untersuchen. Basierend auf diesen Analysen soll ein multiples Regressionsmodell erstellt werden, das es ermöglicht, die zu erwartende auditive Wertigkeit allein aus objektiven Signalparametern abzuleiten. Abschließend werden die vorhergesagten und tatsächlichen auditiven Wertigkeiten miteinander verglichen und somit die Güte des Modells evaluiert (vgl. Kapitel 6.3.2).

6.3.1 Regressionsanalysen mit Akustikparametern

6.3.1.1 Einfache lineare Regressionen

Eine Korrelation gibt lediglich Auskunft über die Stärke des Zusammenhangs zweier Variablen. Ziel der nachfolgenden Regressionsanalysen ist es, die Unterschiede in einer abhängigen Variablen Y auf einen oder mehrere Prädiktoren X zurückzuführen. Auf Basis der Daten lässt sich die Relation von Y und X berechnen sowie eine lineare Funktion ableiten, die jedem x-Wert einen y-Wert zuweist. [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 586f]

Mit nur einem Prädiktor X zur Vorhersage von Y ($\hat{y}_i$) kann die allgemein gültige Gleichung für die Regressionsgerade nach BÜHNER & ZIEGLER [2012, S. 592] wie in Formel 6.3 formuliert werden:

$$\hat{y}_i = b_1 * x_i + b_0 \quad (6.3)$$

Die Steigung (*engl. slope*) bzw. der Regressionskoeffizient b_1 und die Konstante bzw. der Y-Achsenabschnitt (*engl. intercept*) b_0 können in einer Regressionsanalyse ermittelt werden. Mit ihrer Hilfe lässt sich beschreiben, wie sich Änderungen in X auf Y auswirken und umgekehrt [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 602].

Tabelle 6.3 zeigt einfache lineare Regressionen mit den verschiedenen Signalparametern der Öffnungsgeräusche als Prädiktor. Die Betätigungsgeräusche des Öffnens und Schließens (vgl. Tabelle A.7.1, Anhang A7) wurden aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit getrennt betrachtet. Außerdem wurden die Signalparameter sowie die Bewertungen der Bauteile der Tür nicht verwendet, da diese Geräusche deutlich verschieden sind. Die übrigen Bauteile Handschuhkasten, Ablagefach-vorne und Ablagefach-hinten, wurden als Ablagefächer zusammengefasst (n = 12). Tabelle 6.5 zeigt folglich, wie gut und in welchem Zusammenhang ein objektiver Signalparameter (Prädiktor) die subjektive Präferenzstärke (BTL-Score) der Probanden vorhersagen kann.

Prädiktor	R^2	$F(df, df) = p$	b_1	b_0	b_1 95%-KI
Anzahl an Lautheits-Spitzen > 5 [sone]	0,2620	3,551(1, 10) = 0,0889	-0,4808	3,2118	[-1,0494; 0,0877]
Lautheit [sone]	0,5320	11,37(1, 10) = 0,0071	-0,2654	4,5966	[-0,4407; -0,0900]
Max. Lautheit [sone]	0,3060	4,413(1, 10) = 0,0620	-0,1621	4,0360	[-0,3339; 0,0098]
Schärfe [acum]	0,0289	0,2973(1, 10) = 0,5975	1,3541	0,0140	[-4,1790; 6,8872]
Lautheit * Schärfe	0,4777	9,148(1, 10) = 0,0128	-0,2151	4,5646	[-0,3735; -0,0566]
Peak-Frequenz [Hz]	0,0799	0,8687(1, 10) = 0,3733	-0,0013	2,5520	[-0,0043; 0,0018]
Rauhigkeit [asper]	0,3313	4,955(1, 10) = 0,0502	-75,314	4,018	[-150,7040; 0,0751]
Impulshaltigkeit [iu]	0,1115	1,255(1, 10) = 0,2888	-0,7205	2,7925	[-2,1534; 0,7124]
Schwankungsstärke [vacil]	0,0430	0,4498(1, 10) = 0,5176	46,4177	0,6575	[-107,801; 200,637]

Tabelle 6.3: Einfach lineare Regression mit den Signalparametern der Betätigungsgeräusche des Öffnens als Prädiktor

Um den Erkenntnissen aus Kapitel 6.2.3 Rechnung zu tragen, wurden aus den Lautheit-über-die-Zeit-Diagrammen der Audiosignale die Anzahl an Lautheits-Spitzen größer 5 sone ermittelt und in die Regressionsanalysen implementiert. Es bestätigt sich die Vermutung, dass, je weniger Schallereignisse ein Betätigungsgeräusch enthält ($b_1 = -0,48$), es desto wertiger empfunden wird (vgl. Tabelle 6.3).

Das zugehörige Bestimmtheitsmaß R^2 , als statistische Kennzahl für die Güte einer Regression, beträgt 0,262. Dies bedeutet inhaltlich, dass etwa 26 % der Unterschiede in der Präferenzstärke durch den Prädiktor Lautheits-Spitzen erklärt werden können (vgl. [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 667]). Nach BÜHNER & ZIEGLER [2012, S. 667] gilt die Konvention, dass ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 > 0,26$ bereits als ein starker Effekt einzuordnen ist. Der zum R^2 zugehörige F-Test bringt ein Ergebnis von $p = 0,0889$, was bedeutet, dass die Varianzaufklärung R^2 nicht signifikant von 0 verschieden ist (vgl. [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 666]). Analog WILLEMSSEN & RAO [2010, S. 5] kann auch angenommen werden, dass ein Regressionsverhältnis nicht signifikant ist, wenn das 95%-Konfidenzintervall des Regressionskoeffizienten b_1 die Null enthält.

Das höchste R^2 und damit stärkster Prädiktor ist der Signalparameter Lautheit [sone] mit $R^2 = 0,532$ und $p = 0,0071$, was ein höchst signifikantes Ergebnis ist (vgl. Tabelle 6.3).

Dies entspricht einer Pearson-Korrelation von $r = -0,73$, und es ist von einem sehr starken Zusammenhang auszugehen. Anhand des angegebenen Regressionskoeffizienten $b_1 = -0,2654$ ist zu erkennen, dass eine Erhöhung der Lautheit um eine Einheit die Präferenzstärke um 0,2654 sinken lässt. Das vorliegende Ergebnis deckt sich mit Analysen von HÖCHSTETTER ET AL. [2015, S. 84], wonach die Lautheit als ein bedeutsamer Prädiktor akustischer Wertigkeit gilt.

Dass bei impulshaften Geräuschen vor allem die Schärfe gute Vorhersagequalität hinsichtlich Wertigkeit trägt (vgl. [HÖCHSTETTER ET AL. 2015, S. 84]), kann mit dem vorliegenden Datensatz nicht bestätigt werden ($R^2 = 0,0289$; $p = 0,5975$).

WILLEMSSEN & RAO [2010, S. 6] hatten in ihren Modellen weiterhin das Produkt aus Lautheit und Schärfe mit aufgenommen. Die Autoren begründen dies dadurch, dass die Schärfe nicht unabhängig von der Lautheit ist. Im vorliegenden Fall stellt sich dieses Produkt als signifikanter Prädiktor heraus ($R^2 = 0,4777$; $p = 0,0126$). Dies liegt wahrscheinlich vorwiegend am hohen Einfluss der Lautheit. Generell sollte es vermieden werden, stark korrelierende unabhängige Variablen zu verwenden, da sonst möglicherweise Multikollinearität vorliegt [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 681]. Insbesondere für die nachfolgenden multiplen Regressionsanalysen ist es wenig sinnvoll, redundante Prädiktoren in ein Modell zu berücksichtigen, die kaum einen weiteren Beitrag zur Varianzaufklärung leisten.

Dies betrifft auch den maximal auftretenden Lautheitswert der Audiosignale, der ebenfalls ein starkes R^2 von 0,306 ($p = 0,0620$) aufweist (vgl. Tabelle 6.3). Zur Berechnung eines Modells aus mehreren Prädiktoren wird folglich der Standard-Einzelwert der Lautheit verwendet (vgl. [DIN 45631/A1] und [HEAD ACOUSTICS 2018a, S. 3]). Interessanterweise ist bei den Analysen zum Schließen (vgl. Tabelle A.7.1 in Anhang A7) der maximale Lautheitswert der stärkste Prädiktor mit $R^2 = 0,3225$ ($p = 0,0541$). Ein möglicher Grund könnte darin liegen, dass das Schließen generell zu höheren Pegelwerten [dB(A)] führt (vgl. Tabelle A.6.2 in Anhang A6). Besonders die hohen Lautheitswerte gelten als störend und mindern die Wertigkeit erheblich.

Auf Basis der vorliegenden Daten zeigt sich (vgl. Tabelle 6.3), dass die Rauigkeit nach der Lautheit der zweit wichtigste Signalparameter zur Vorhersage der Wertigkeit ist ($R^2 = 0,3313$; $p = 0,0502$). Je höher die Rauigkeit in [asper] ausgeprägt ist, desto minderwertiger wird ein Öffnungsgeräusch bewertet ($b_1 = -75,314$). Dieses Ergebnis deckt sich mit den Analysen von WILLEMSSEN & RAO [2010, S. 6], wonach die Lästigkeit von impulshaften Geräuschen mit der Rauigkeit zunimmt.

Praktisch keinen Zusammenhang zur Präferenzstärke hat der Signalparameter Peak-Frequenz ($R^2 = 0,0799$; $p = 0,3733$) und sollte folglich künftig nicht weiter berücksichtigt werden. Ein nur sehr geringes Bestimmtheitsmaß weisen außerdem die Signalparameter

Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke auf (vgl. Tabelle 6.3). Die Bedeutsamkeit der Schwankungsstärke in [vacil] nach WILLEMSSEN & RAO [2010] wird somit nicht bestätigt.

6.3.1.2 Multiple lineare Regressionen

In einem nächsten Schritt werden nun multiple Regressionen durchgeführt, um ein ganzheitliches Modell zur Vorhersage der akustischen Wertigkeit auf Basis von Signalparametern zu entwickeln. Die einfachen linearen Regressionen dienen der Ermittlung guter Prädiktoren, welche als die Favoriten für das Modell gelten. Zur Modellierung der akustischen Wertigkeit für Öffnungsgeräusche erscheint es nur sinnvoll, die Signalparameter Lautheit und Rauigkeit zu verwenden (vgl. Tabelle 6.3). Der drittstärkste Prädiktor der maximalen Lautheit wird nicht mitaufgenommen, da sonst von einer hohen Korrelation zwischen den Prädiktoren auszugehen ist. Das Modell zur Vorhersage der kundenrelevanten Wertigkeit von Betätigungsgeräuschen beim Öffnen wird mit den stärksten Prädiktoren Lautheit und Rauigkeit erstellt und ist in Tabelle 6.4 dargestellt.

Prädiktoren	R^2	R^2 korrigiert	$F(df, df) = p$	b_1	b_0
Lautheit [sone]	0,548	0,447	5,453(2, 11) = 0,028	-0,225	4,834
Rauigkeit [asper]				-21,906	

Tabelle 6.4: Multiple lineare Regression zur Vorhersage der Wertigkeit der Betätigungsakustik bei Öffnungsgeräuschen von Ablagefächern

Es zeigt sich, dass mit $R^2 = 0,548$ und korrigiertem $R^2 = 0,447$ ein Modell mit hoher Anpassungsgüte vorliegt und nach COHEN [1988, S. 414] von einer starken Varianzaufklärung ($|R^2| > 0,26$) ausgegangen werden kann. Das korrigierte R^2 wird bei multiplen Regressionen verwendet und stellt eine Korrektur des R^2 dar, wenn mehrere Prädiktoren verwendet werden [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 714]. Ein Modell mit weniger Prädiktoren ist vorzuziehen, wenn es die gleiche Varianz erklärt. Das korrigierte R^2 im Modell aus Tabelle 6.4 ist daher etwas niedriger, aber dennoch weiterhin sehr stark.

Die Prädiktoren Lautheit und Rauigkeit sagen statistisch signifikant das Kriterium Präferenzstärke voraus, $F(2, 11) = 5,453$; $p = 0,028$. Unterschiede oder Veränderungen in Lautheit und Rauigkeit eines Öffnungsgeräusches sind für 45 % der Unterschiede in den subjektiven Präferenzstärken verantwortlich. Anhand der Regressionskoeffizienten aus Tabelle 6.4 lässt sich folgende Gleichung aufstellen (vgl. Formel 6.4), die die vorhergesagte Präferenzstärke ($\hat{y}_{PS}$) abschätzt:

$$\hat{y}_{PS} = -0,225 * x_{Lautheit [sone]} + (-21,906) * x_{Rauigkeit [asper]} + 4,834 \quad (6.4)$$

Diverse Voraussetzungen wurden bei der Berechnung des Modells betrachtet und geprüft (vgl. [BÜHNER & ZIEGLER 2012, S. 716-721]).

- Ob Linearität zwischen den unabhängigen Variablen zur abhängigen Variable vorliegt, wurde mittels Streudiagramm geprüft. Eine grafische Überprüfung zeigt, dass sowohl Lautheit als auch Rauigkeit jeweils negativ und ziemlich linear mit den BTL-Skalenwerten zusammenhängen (vgl. Bild 6.6).
- Zur Kollinearitätsdiagnose wurde der statistische Kennwert des *Variance Inflation Factors* (VIF) herangezogen. VIF ist ein Maß für die Multikollinearität in einem Regressionsmodell. Es gibt an, wie stark die unabhängigen Variablen im Modell miteinander korreliert sind. Im Modell aus Tabelle 6.4 liegt dieser Wert bei $VIF = 1,77$, was unter der Schwelle von $VIF < 10$ liegt und folglich als gering kollinear beschrieben werden kann.
- Die Normalverteilung der Fehlerterme ist gegeben, wie eine statistische Überprüfung mittels Shapiro-Wilk-Test ($W = 0,951$; $p = 0,6575$) beweist. Die Fehlerterme, oder auch Residuen genannt, sind die Abweichungen zwischen den beobachteten Daten und den Werten, die das Modell vorhersagt.
- Homoskedastizität liegt nach grafischer Prüfung ebenfalls vor und zeigt, dass sich die Fehlerterme nicht unterscheiden. Die vorhergesagten Präferenzwerte streuen in Abhängigkeit vom Audiosignal nicht andersartig um die tatsächlich beobachteten Präferenzstärken (vgl. Bild 6.6).

Bei den Schließgeräuschen sind die maximale Lautheit und das Lautheit-Schärfe-Produkt die stärksten Prädiktoren (vgl. Tabelle A.7.1 in Anhang A7). Als kombinierte Prädiktoren ist von einer hohen Kollinearität auszugehen. Dies bestätigt sich mit einem vergleichsweise hohen FIV von 7,85. Insbesondere verringert sich die Anpassungsgüte des Modells bei der Verwendung beider Prädiktoren auf ein korrigiertes $R^2 = 0,250$. Damit liegt die multiple Regression deutlich unter den Modellen mit den jeweils einzelnen Parametern der maximalen Lautheit ($R^2 = 0,3225$) und des Lautheit-Schärfe-Produkts ($R^2 = 0,385$). Diese liegen nahe beieinander und könnten beide als alleinige Prädiktoren dienen. Das Lautheit-Schärfe-Produkt ist allerdings etwas stärker und zudem der einzige signifikante Prädiktor ($F(1, 10) = 6,261$; $p = 0,0313$) bei den Schließgeräuschen. Steigung b_1 und die Konstante b_0 können der bereits erwähnten Tabelle A.7.1 in Anhang A7 entnommen werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei Öffnungs- und Schließgeräuschen unterschiedliche Signalparameter den subjektiven Wertigkeitseindruck beeinflussen. Für die

Öffnungsgeräusche wurde ein stärkeres Modell entwickelt, basierend auf der vorhandenen Datenbasis, welches eine starke Effektstärke aufweist (korrigiertes $R^2 = 0,447$). Dies bedeutet, dass 45 % der Unterschiede in der Präferenzstärke durch Unterschiede in den zwei standardisierten, technischen Signalparametern des Audiosignals erklärt werden können. Allgemein gesagt, wird ein Betätigungsgeräusch des Öffnens von Probanden besser bewertet, wenn die Signalparameter des Audiosignals geringe Lautheits- und Rauigkeitswerte aufweisen.

6.3.2 Vergleich des Modells zur Vorhersage auditiver Wertigkeit

Bild 6.6 dient der Validierung des Modells durch das Abtragen von Punkten aus einer Funktion aus tatsächlichen und vorhergesagten Präferenzstärken. Wenn die Datenpunkte in Bild 6.6 entlang der Diagonalen $y = x$ liegen, würde eine perfekte Übereinstimmung zwischen den tatsächlichen und vorhergesagten Werten vorliegen. Die Fehlerterme streuen zufällig um den tatsächlichen Wert, sowohl nach oben als auch nach unten.

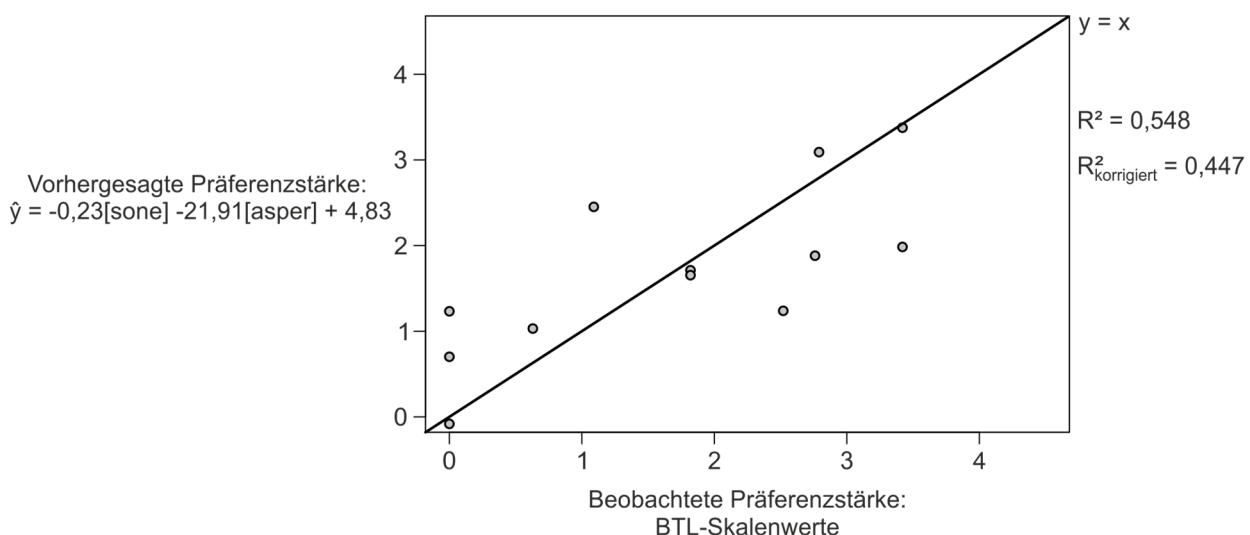


Bild 6.6: Vergleich der aus den Signalparametern vorhergesagten Präferenzstärken mit den tatsächlichen Präferenzstärken aus dem Hörversuch

Bei den Regressionen wurden diverse Voraussetzungen geprüft (vgl. Kapitel 6.3.1.2) und als gültig befunden. Als Limitation ist jedoch anzumerken, dass für die abhängige Variable lediglich $n = 12$ Audiosignale zur Modellierung zur Verfügung standen. Obwohl WILLEMSSEN & RAO [2010] ebenfalls nur 12 Audiosignale verwendet haben, ist es dennoch ratsam, die Anzahl in Zukunft zu erhöhen oder in künftigen Studien darauf zu achten, diese Zahl ausreichend hoch zu halten.

In einer frühen Phase eines Entwicklungsprozesses besteht nun die Möglichkeit, gemäß der in dieser vorliegenden Arbeit vorgestellten Vorgehensweise Öffnungsgeräusche von einer Auswahl prototypischer Ablagefächer beziehungsweise unterschiedlicher Konzepte standardisiert aufzunehmen. Sobald die beiden relevanten technischen Signalparameter,

Lautheit [sone] und Rauigkeit [asper], extrahiert sind, genügen diese, um mithilfe des robusten multiplen Regressionsmodells (korrigiertes $R^2 = 0,447$) die kundenrelevante, auditive Wertigkeit abzuschätzen und eine Auswahl zu treffen. Durch diese Vorgehensweise wird die Abhängigkeit von aufwendigen Probandenversuchen oder intransparenten Expertenauswahlen wesentlich reduziert.

Modelle wie das vorliegende Regressionsmodell zur Vorhersage der auditiven Wertigkeit könnten künftig weiter an Bedeutung gewinnen, insbesondere im Zusammenhang mit der automatisierten Geräuschanalyse über im PKW-Innenraum verbaute Mikrofone. Womöglich lassen sich mit Hilfe des Einsatzes künstlicher Intelligenz Fehlerursachenanalysen über den gesamten Produktlebenszyklus ausführen.

7 Gestaltungsempfehlungen

Kapitel 7 bietet eine abschließende und übersichtliche Zusammenfassung der Gestaltparameterempfehlungen, die aus den verschiedenen Wertigkeitsanalysen abgeleitet sind. Insgesamt nahmen 106 Probanden an vier Probandenversuchen zur Bewertung unterschiedlicher Betätigungen teil. Durch die im Vorfeld durchgeführten Messungen der im Versuch präsentierten Reize können gezielte technische Parameter aufgezeigt werden.

Tabelle 7.1 zeigt haptische Gestaltungsempfehlungen und stellt zum Zweck der Übersichtlichkeit nur eine reduzierte Darstellung der Ergebnisse dar. Die technischen Parameter werden aus den Ergebnissen der Haptik-Untersuchungen der Versuchsreihen 1 bis 3 in Kapitel 5 abgeleitet. Um ein umfassendes Verständnis zu gewährleisten und mögliche Limitationen zu berücksichtigen, empfiehlt sich die eingehendere Betrachtung der Diskussionen zu den jeweiligen Versuchsreihen (vgl. Kapitel 5.1.4, 5.2.4 und 5.3.4). In der vollständigen Ergebnisdarstellung werden nicht nur einzelne, optimale Werte berücksichtigt, sondern auch günstige Wertebereiche an ausgewählten Einflussgrößen.

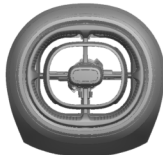
	Schieben	Schwenken	Drehen	Drücken
Bauteil/ Versuchs- objekt				
Funktion	Stellen mit Raste		Stellen ohne Raste	Entriegeln
Greifart	3-Finger Zufassen		3-Finger Zufassen	2-Finger Kontakt
Kraftschluss	Reibschluss	Formschluss	Formschluss	Formschluss
Verlauf	kontinuierlich mit Mittelraste		kontinuierlich	monostabil
Gestaltungsempfehlungen:				
Kraft/ Drehmoment Stellweg/ -winkel	Betätigungskraft F_B : • 1,3 N Stellweg: • 15 bzw. 7,5/7,5 mm	Betätigungskraft F_B : • 1,3 N Stellwinkel/-weg: • 60° bzw. 30°/30° • 19 mm Bogenlänge	Drehmoment M_B : • 2,6 Ncm • oder 3,34 % * M_{Max} Griffgröße r: 11 mm	Schaltkraft F_D : 11,2 N Schaltweg s_1 : 5,2 mm Kraftsprung: 14 - 30 %
Rastkraft	Ausrastkraft F_A : • 0,5 N • 0,4 - 0,6 N wertig			
Oberfläche	• Rändelung ist die beste Form-Oberfläche, sowohl bzgl. Wertigkeit als auch Ergonomie • Hochglanz-schwarz ist sehr hochwertig • Seidenmatt-schwarz ist vielversprechend			

Tabelle 7.1: Haptische Gestaltungsempfehlungen

Wichtige Erkenntnisse aus den Haptik-Untersuchungen der Versuchsreihen 1 bis 3 zeigen, dass insbesondere beim Schieben und Schwenken tendenziell niedrige Betätigungskräfte F_B bevorzugt werden. Unter Berücksichtigung von Bauteiltoleranzen und der Vermeidung von Selbstverstellung im Fahrbetrieb wird eine Spezifikation von jeweils 1,3 N empfohlen. Der zugehörige Stellweg sollte sich beim Schieben auf etwa 15 mm und bei Schwenken auf eine Bogenlänge von 19 mm belaufen. Wenn eine Raste beim Schieben eine Mittelposition oder eine Designstellung markieren soll, wird empfohlen, dass die zusätzliche Ausrastkraft $F_A = 0,5$ N beträgt, was etwa 28 % der gesamten Amplitude entspricht.

In Bezug auf Oberflächen wird festgestellt, dass eine Rändelung sowohl ergonomisch als auch hinsichtlich Wertanmutung die beste Form-Oberfläche bietet. Ein fein-raues seidenmattes Finish zeigt vielversprechende Eigenschaften für eine wertige Oberflächengestaltung, da Fingerabdrücke nicht sichtbar sind und auch mit feuchten Händen ein guter Kraftschluss gelingt.

Beim Drehen ergab die Kombination von 2,2 Ncm Betätigungs-drehmoment M_B und einem $r = 11$ mm Griff das höchste Wertigkeits-Ergebnis unter den 15 präsentierten Faktorkombinationen. Probanden gaben bei der Bewertung des Kraftaufwands an, dass mit einem 11 mm Griff ein Betätigungs-drehmoment von 2,6 Ncm bevorzugt wird. Eine alternative Methode zur Spezifikation des Betätigungs-drehmoments M_B bei einem bestimmten Griff ist die Verwendung eines Verhältnisses des maximalen Moments (3,34 %), welches Probanden mit gegebenen Griff erreichen können.

Beim Drücken sollte, sofern vorhanden, ein Anfangshub eine Betätigungskraft $F_{AH} > 1$ N erfordern, um einen angemessenen Widerstand zu gewährleisten und ein undefiniertes Betätigungsgefühl zu vermeiden. Die Schaltkraft F_D sollte auf jeden Fall unter 20 N liegen und die beste Bewertung erhielt $F_D = 11,2$ N. Der Schaltweg s_1 sollte nicht mehr als 6 mm betragen. Ein wahrnehmbarer Kraftsprung K sollte mindestens 10 % aufweisen, wobei eine empfohlene Bandbreite von 13,75 % bis 30 % liegt. Auch mit einer linearen Federkennlinie, beispielsweise mittels Silikonfeder, kann ein hochwertiges Betätigungsgefühl erzeugt werden. Alternativ können auch Magneten als Entriegelungsmechanismus in Betracht gezogen werden. Insbesondere erweist sich die Magnetanordnung, zunächst anziehend in der Testrückstellung und gefolgt von abstoßend an den Rasthaken zur Freigabe des Ablagefachs, als vielversprechend.

In den separat behandelten Analysen zur Betätigungsakustik wird zwischen Öffnungs- und Schließgeräuschen unterschieden. Durch Audioaufnahmen im Fahrzeuginnenraum standen Audiosignale gleicher Länge zur Bewertung im Hörversuch bereit. Durch die

Auswertung der Ergebnisse des Paarvergleichs kann das jeweils beste Bauteil einer Audiosignal-Klasse identifiziert werden. Durch weitere Analysen zur Überprüfung des Einflussgrades von Signalparametern auf die akustische Wertigkeit können in Tabelle 7.2 die relevantesten technischen und psychoakustischen Größen der Öffnungsgeräusche berichtet werden. Hierbei werden die technischen Zielkenngrößen der Rang-1-Bauteile berichtet, also diejenigen Bauteile, deren Öffnungsgeräusche im Hörversuch mit Probanden am besten abschnitten. In Tabelle A.6.2 in Anhang A6 können durch die Angabe der BTL-Skalenwerte die Rang 1 Signalparameter des Schließens entnommen werden.

Rang 1 Bauteil	SPL [dB(A)]	Lautheit DIN45631 [sone]	Maximaler Lautheitswert [sone]	Schärfe DIN45631 [acum]	Rauigkeit [asper]
Handschuhkasten	63,53	10,00	11,77	1,10	0,027
Ablagefach-vorne	56,45	4,87	7,72	1,19	0,017
Ablagefach-hinten	74,13	12,31	21,23	1,18	0,038
Türinnenbetätigung	74,01	12,14	14,69	0,92	0,206

Tabelle 7.2: Signalparameter der jeweils am besten bewerteten Audiosignale von den Öffnungsgeräuschen, die als Zielkenngrößen dienen sollen

Im Gegensatz zu den Haptik-Untersuchungen wurde hier kein parametrisiertes Optimum nach systematischer Manipulation ermittelt. Vielmehr wird aus einer Auswahl an Realfahrzeugen das jeweils beste Bedienelement präsentiert. Durch die Regressionsmodelle in Kapitel 6.3 besteht jedoch die Möglichkeit, die akustische Wertigkeit neuer Bauteile abzuschätzen. Steht im Entwicklungsprozesses eine Auswahl mehrerer Prototypen zur Verfügung, ermöglicht die Vorhersage eine schnelle und kostengünstige Auswahl nach höchster auditiver Qualität.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bedienung im Innenraum eines Pkws bietet einen vielversprechenden Ansatz zur Steigerung des Reifegrads und der wahrgenommenen Qualität des Produkts. Zahlreiche Vorteile ergeben sich aus der technischen Auslegung zur Steigerung eines kundenrelevanten Wertigkeitserlebnisses bei der Produktinteraktion und der haptischen und akustischen Rückmeldung.

Nutzer profitieren zum einen von einer ergonomischen und angepassten Gestaltung der Bedienelemente. Der Eindruck beim Anfassen des Produkts fügt sich so möglicherweise nahtlos in das Gesamterlebnis ein, harmonisch abgestimmt auf andere Aspekte wie das Exterior-Design des Fahrzeugs. Dies schafft für den Kunden ein durchgängig hochwertiges Qualitätserlebnis. Hersteller wiederum können durch eine optimierte Gestaltung ihr Image aufwerten und möglicherweise ihre Verkaufszahlen steigern. Gelingt einem Hersteller die Produktpositionierung im Luxussegment, beziehungsweise wird diese plausibilisiert, eröffnen sich potenziell höhere Margen. Zusätzlich ergeben sich für den Hersteller und die Stakeholder klare Vorteile aus der Anwendung von gestaltungsrelevanten und menschenzentrierten Empfehlungen. Während des Produktentwicklungsprozesses lassen sich durch die Verfügbarkeit jener ergonomischer Daten Kosten und Zeit einsparen, was wiederum die Gesamtqualität des Produkts erhöht.

Die vorliegende Arbeit untersucht messbare Kenngrößen zur Bewertung durch Probanden mit dem Ziel, die kundenrelevante Wertigkeit zu steigern. Dazu wurden zunächst die Grundlagen der Sinneswahrnehmung sowie der zugrundeliegenden physikalischen Reize behandelt (vgl. Kapitel 2.1). Des Weiteren erfolgt in Kapitel 2.2 eine umfassende Aufarbeitung des Themas Mensch-Maschine-Schnittstelle. Hierbei wird die Beschreibung und Kategorisierung von Anzeigen und Bedienelementen erläutert. Auf Basis von bereits bestehenden Komfort- und Wertigkeitsmodellen werden eigene Arbeitsdefinitionen entwickelt. Das Kapitel zu den Grundlagen schließt mit einer Übersicht über Gestaltungsparameter, die die vielfältigen Möglichkeiten der technischen Gestaltung von Bedienelementen verdeutlichen.

Eine präzise Messung ist von entscheidender Bedeutung, um ermittelte Wertigkeitsunterschiede auf technische Kenngrößen rückzuführen. Im Kapitel Stand der Technik und Forschung wird zunächst in das verwendete Messrobotiksystem eingeführt, welches Bewegungen objektiv in Kraft-Weg- bzw. Drehmoment-Drehwinkel-Verläufen aufzeichnen kann (vgl. Kapitel 3.1). Zusätzlich werden in Kapitel 3.2 verschiedene Bedienelemente

anhand der Bewegungsart des Nutzers während der Betätigung unterteilt und näher erläutert. Umfassende Einblicke in die bisherige Forschung im Bereich der Betätigungshaptik und -akustik bieten die Kapitel 3.3 bis 3.5.

Für die Durchführung der Haptik-Untersuchungen wurde ein eigener Prüfstand, eine sogenannte Sitzkiste, konstruiert und aufgebaut. Die Unterteilung der Untersuchungen erfolgte entsprechend den Bewegungsarten sowie den zu analysierenden haptischen Merkmalen, wie Betätigungskraft oder Ausrastkraft (vgl. Kapitel 4). Als Träger der zu untersuchenden haptischen Merkmale dienten äußerlich identische Versuchsobjekte, die gezielt modifiziert sind, um eine skalierte Bandbreite an Ausprägung darzustellen. Die haptischen Merkmale können mithilfe der Robotik-Messungen objektiv erfasst und in Form von Funktionsgrafiken visualisiert werden (vgl. Bild 3.4, Bild 3.6 und Bild 3.7).

Die subjektive Bewertung erfolgte in drei Versuchsreihen mit jeweils 30 Versuchspersonen (vgl. Kapitel 5). Neben optimalen Wertausprägungen und günstigen Wertebereichen werden auch subjektive Beschreibungen der Betätigung erfasst. Die Haptik-Untersuchungen zeichnen sich durch ihre umfassende Vorgehensweise aus. Sie beginnen mit einer präzisen Objektivierung mittels eines Messrobotiksystems, gefolgt von stringent durchgeführten Probandenversuchen unter experimentellen Bedingungen. Das sorgfältig strukturierte Versuchsdesign trägt dazu bei, unter Beachtung zulässiger Kausalzusammenhänge aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

Besonders bemerkenswert ist die Beobachtung eines psychophysischen Zusammenhangs bei der Bewegungsart *Drehen*. Dabei wurde festgestellt, dass das bevorzugte, als wertig empfundene Betätigungs Drehmoment in einem gegebenen Griff etwa 3,34% des Maximalmoments darstellt, das von den Probanden mit diesem selben Griff erreicht wird. Ähnlich wie bei Webers Gesetz (vgl. Kapitel 2.1.3), bei dem das Verhältnis zwischen Unterschiedsschwelle und Ausgangsreiz konstant bleibt, ist auch das Verhältnis zwischen Maximal- und Komfortkraft eine Konstante. Zusätzlich zur Identifizierung einer vorliegenden psychophysischen Konstanten in diesem Verhältnis zeigt sich, dass ihr Betrag der Weberkonstante bei Unterschiedsschwellen von Gewichten entspricht, nämlich 1/30 (vgl. Kapitel 2.1.3). Neben Untersuchungen zu Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen könnten weiterhin Untersuchungen zu Präferenzverhältnissen in diesem Kontext der Psychophysik von Interesse sein und wertvolle Erkenntnisse liefern.

In Kapitel 6 werden die Akustik-Untersuchungen separat behandelt. Dabei wurde eine neue Methode vorgestellt, wie mithilfe verschiedener technischer Werkzeuge Aufnahmen der Akustik und gleichzeitig die Betätigungen vom Fahrerplatz aus durchgeführt werden können. Die aufgenommenen Audiodaten dienen einerseits als Grundlage für Hörversuche zur subjektiven Beurteilung der akustischen Qualität. Andererseits werden aus den

Audiosignalen technische und psychoakustische Parameter extrahiert, die das Betätigungsgeräusch objektiv beschreiben und als vergleichbare Signalparameter dienen. Die Signalparameter der am besten bewerteten Bauteile in ihrer jeweiligen Klasse können als Ziel- oder Referenzgrößen im Produktentwicklungsprozess verwendet werden. Weiterführende Analysen haben aufgezeigt, wie stark und in welchem Maß die Signalparameter die akustische Qualität beeinflussen. Beispielsweise sind bei den Betätigungsgeräuschen des Öffnens von Ablagefächern die Lautheit und die Rauigkeit bedeutsam. Ein Modell, das diese beiden Kenngrößen kombiniert, erzielt eine hohe Anpassungsgüte für die Vorhersage der akustischen Wertigkeit (vgl. Kapitel 6.3). Mithilfe dieses Modells ist in einer Prototypenphase ohne aufwändige Probandenversuche recht schnell die auditive Qualität abschätzbar. Neben den Zielkenngrößen und dem Vorhersagemodell ist besonders die entwickelte Methode der binauralen Aufnahmen in Fahrzeugen hervorzuheben. Diese Methode erzeugt ein äußerst realitätsgetreues Audiosignal von Betätigungsgeräuschen. Ebenso verdient die systematische Bewertung dieser Audiodateien in Hörversuchen mit Probanden besondere Beachtung.

Zusammenfassend präsentiert Kapitel 7 kompakt die aus den Kapiteln 5 und 6 gewonnenen Gestaltungsempfehlungen.

Im folgenden Ausblick wird weiterhin behandelt, welche potenziellen Untersuchungsparameter und künftige Forschungsfragen vielversprechend sind. Die in Tabelle 4.3 vorgestellte Matrix bietet hierzu eine Übersicht über die bereits behandelten Bewegungsarten und haptischen Merkmale in den drei Versuchsreihen. Ein bisher unberücksichtigter Aspekt betrifft dabei die Bewegungsart des Ziehens. Ebenso wurden Rastungen bisher ausschließlich in Bezug auf das Schieben untersucht. Eine erstrebenswerte Erweiterung wäre hier die Ergänzung der Matrix, um sie zu vervollständigen.

Von anderen Autoren werden insbesondere dynamische Eigenschaften wie die Coulombsche Reibung, Dämpfung, Massenträgheit, Spiel und Stick-Slip als sinnvolle wissenschaftliche Betrachtungen zur Betätigungshaptik angesehen (vgl. [REISINGER 2009, S. 216f.] und [KÜHNER 2013, S. 124]). Besonders im Fall des Stick-Slip-Effekts oder des Spiels wäre es äußerst hilfreich zu wissen, ab welcher Ausprägung dieser Effekte eine Wahrnehmung oder eine Empfindung von Minderwertigkeit seitens der Nutzer auftritt. Diese Erkenntnisse könnten nicht nur zu einer gelungenen technischen Gestaltung beitragen, sondern auch dazu dienen, unnötig enge Toleranzen oder übermäßig aufwendige Auslegungen zu vermeiden, die wiederum die Kosten steigern könnten.

Haptik und Akustik wurden in der vorliegenden Arbeit getrennt untersucht. Da das übergeordnete Ziel die Steigerung des ganzheitlichen, kundenrelevanten Wertigkeitsempfindens ist, könnte die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, kombinierte Versuche

durchzuführen. Dies würde jedoch zweifellos aufwendiger und komplexer sein, oder es bestünde die Gefahr, dass das Versuchsdesign in Bezug auf die Validität leidet, wenn beispielsweise das Betätigungsgeräusch über Kopfhörer wiedergegeben wird. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass auch der visuelle Einfluss eine maßgebliche Rolle spielt. Neben dem gewählten Ansatz, die Versuchsobjekte als Träger der Merkmale zu nutzen, kann auch die Verwendung weiter abstrahierter Versuchsobjekte in Erwägung gezogen werden. Diese wären unabhängig vom spezifischen Design, einer Marke oder einer Funktion eines konkreten Bauteils. Gegebenenfalls wird durch diese Maßnahme die interne Validität der Versuchsergebnisse weiter gesteigert.

Mit Blick auf die externe Validität der Versuche kann in Betracht gezogen werden, Realfahrzeugversuche durchzuführen. Hierbei würde die Betätigung der Bedienelemente als Nebenaufgabe erfolgen im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen, bei denen dies die Hauptaufgabe darstellte. Dieser Ansatz hätte den Vorteil, dass verschiedene Einflüsse des Fahrbetriebs, wie beispielsweise Vibrationen und Fahrgeräusche, in die Betätigung und Bewertung einfließen würden. Dies könnte eine realitätsnähere Einschätzung der Wertigkeit der Bedienelemente ermöglichen.

Um die externe Validität weiter zu erhöhen, ist es wichtig, auch die Repräsentativität der Stichproben zu berücksichtigen. Neben einer erweiterten Altersspanne sollte auch eine homogene Geschlechterverteilung angestrebt werden. Andere demografische Gruppen könnten unterschiedliche Präferenzen aufweisen, und physiologische Besonderheiten des Hand-Arm-Systems oder kognitive Unterschiede könnten ebenfalls Einfluss nehmen. In diesem Kontext ist auch der Einfluss der kulturellen Hintergründe zu erwähnen, der bereits von GLOHR [2018] untersucht wurde. Gleichzeitig sollte die technische Gestaltung im Hinblick auf die Wertigkeit eine gewisse Allgemeingültigkeit besitzen und für einen möglichst großen Teil der Bevölkerung ein möglichst hohes Wertigkeitserlebnis bieten.

Die Gestaltung einer nutzeroptimierten Bedienung könnte möglicherweise weiter an Relevanz gewinnen, wenn Fahrzeuginsassen künftig von der Fahraufgabe zeitweise oder weitestgehend entbunden sind und ihnen folglich mehr Zeit für tertiäre Fahraufgaben zur Verfügung steht. Die Elektrifizierung des Antriebs und der daraus resultierend ruhige Innenraum setzen die Betätigungsgeräusche noch stärker als bisher in den Fokus.

Abschließend sei festgehalten, dass Kundenqualität stets das darstellt, was der Kunde als Qualität empfindet. Dieser Aspekt wird insbesondere bei Endverbraucherprodukten immer von Bedeutung sein. In diesem Zusammenhang wird das Erreichen einer neuen Qualitätsstufe im Hinblick auf den internationalen Wettbewerb vorteilhaft sein.

Literaturverzeichnis

- [ANGUELOV 2009] Anguelov, N.: Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und Bedienelementen für den Kfz-Innenraum. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2009.
- [ANGUELOV & SCHMAUDER 2006] Anguelov, N.; Schmauder, M.: Steigerung der Wertanmutung von Bedienteilen im Kfz-Innenraum durch psychohaptische Kenngrößen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaften, Nr. 52, 2006, S. 87-90.
- [BAUMANN & LANZ 1998] Baumann, K.; Lanz, H.: Mensch-Maschine-Schnittstellen elektronischer Geräte. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.
- [BIRBAUMER & SCHMIDT 2006] Birbaumer, N.-P.; Schmidt, R. F.: Biologische Psychologie. 6. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [BITTERLICH 2013] Bitterlich, M.: Regularisierte Schätzverfahren für Bradley-Terry-Luce Modelle. Ludwig-Maximilians-Universität München, Masterarbeit, 2013.
- [BOBKA ET AL. 2022] Bobka, K.; Kern, M.; Kluge, N.; Riester, Y.; Stegmüller, S.: Material Matters. In: Fraunhofer IAO, 2022.
- [BÖRSCHLEIN 1994] Börschlein, E.-M.: Untersuchung zum haptischen Komforteindruck ausgewählter Handstellenteile in verschiedenen Personenkraftwagen. Katholische Universität Eichstätt, 1994.
- [BRADLEY 1969] Bradley, J. V.: Optimum Knob Diameter. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol. 11, Nr. 4, 1969, S. 353-360.
- [BRADLEY & TERRY 1952] Bradley, R. A.; Terry, M.: Rank Analysis of Incomplete Block Designs: I. The Method of Paired Comparisons. In: Biometrika, Vol. 39, Nr. 3/4, 1952, S. 324-324.
- [BRUDER & DIDIER 2015] Bruder, R.; Didier, M.: Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. In: Winner, H. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 633-646.
- [BRUEL & KJAER 2023] Brüel & Kjaer: Type 4942, ½-inch Diffusefield Microphone, Prepolarized, <https://www.bksv.com/de/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4942>, 25.06.2023.
- [BUBB 1995] Bubb, K.-P.: Komfort und Ergonomie in Kraftfahrzeugen. In: Haus der Technik e.V. Veranstaltungsunterlagen, Essen: 1995.
- [BUBB 2003] Bubb, H.: Komfort und Diskomfort. In: Ergonomie Aktuell, Nr. 004, 2003.
- [BUBB 2015a] Bubb, H.: Einführung. In: Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M. (Hrsg.): Automobilergonomie, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 1-26.
- [BUBB 2015b] Bubb, H.: Methoden der ergonomischen Fahrzeugentwicklung. In: Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M. (Hrsg.): Automobilergonomie, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 583-616.

- [BUBB ET AL. 2015a] Bubb, H.; Vollrath, M.; Reinprecht, K.; Mayer, E.; Körber, M.: Der Mensch als Fahrer. In: Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M. (Hrsg.): Automobilergonomie, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 67-162.
- [BUBB ET AL. 2015b] Bubb, H.; Bengler, K.; Breuninger, J.; Gold, C.; Helmbrecht, M.: Systemergonomie des Fahrzeugs. In: Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M. (Hrsg.): Automobilergonomie, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 259-340.
- [BUBB & GRÜNEN 2015] Bubb, H.; Grünen, R. E.: Anthropometrische Fahrzeuggestaltung. In: Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M. (Hrsg.): Automobilergonomie, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 345-470.
- [BUBB & SCHMIDTKE 1981a] Bubb, H.; Schmidtke, H.: Belastung und Beanspruchung. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 2. Auflage, München, Wien: Hanser, 1981, S. 105-162.
- [BUBB & SCHMIDTKE 1981b] Bubb, H.; Schmidtke, H.: Systemergonomie. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 2. Auflage, München, Wien: Hanser, 1981, S. 263-376.
- [BÜHNER & ZIEGLER 2012] Bühner, M.; Ziegler, M.: Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. 3. Aufl., München: Pearson Studium, 2012.
- [BULLINGER 1994] Bullinger, H.-J.: Ergonomie. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1994.
- [BULLINGER 1995] Bullinger, H.-J.: Arbeitsgestaltung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1995.
- [BULLINGER-HOFFMANN & MÜHLSTEDT 2016] Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J.: Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [BURNETT & IRUNE 2009] Burnett, G.; Irune, A.: Drivers quality ratings for switches in cars: Assessing the role of the vision, hearing and touch senses. In: Proceedings of the First International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. 2009, S. 107-114.
- [CHRISTOF ET AL. 2009] Christof, S.; Bartels, J.; Sigloch, A.; Orf, A.; Plocher, B.: Innenraum mit hoher Wertanmutung. In: ATZextra, Vol. 14, Nr. 1, 2009, S. 102-109.
- [COHEN 1988] Cohen, J.: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2. Auflage, Hoboken: Taylor and Francis, 1988.
- [DANGELMAIER 2001] Dangelmaier, M.: Ein Verfahren zur ergonomischen Bewertung des Fahrerplatzes von Pkw. Heimsheim: Jost-Jetter, 2001.
- [DERRICK & WHITE 2017] Derrick, B.; White, P.: Comparing two samples from an individual Likert question. In: International Journal of Mathematics and Statistics, Nr. 18, 2017, S. 1-13.
- [DIN 323-1 1974] Normzahlen und Normzahlreihen, Blatt 1: Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1974.
- [DIN 323-2 1974] Normzahlen und Normzahlreihen, Blatt 2: Einführung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1974.

- [DIN 45631/A1 2010] Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum - Verfahren nach E. Zwicker. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2010.
- [DIN 45681 2005] Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2005.
- [DIN 45692 2009] Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2009.
- [DIN EN 614-1 2009] Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Gestaltungsgrundsätze - Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2009.
- [DIN EN 894-1 2009] Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2009.
- [DIN EN 894-2 2009] Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 2: Anzeigen. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2009.
- [DIN EN 894-3 2010] Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 3: Stellteile. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2010.
- [DIN EN 894-4 2010] Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 4: Lage und Anordnung von Anzeigen und Stellteilen. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2010.
- [DIN EN ISO 26800 2011] Ergonomie - Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2011.
- [DIN EN ISO 6931-1 2020] Nichtrostende Stähle für Federn - Teil 1: Draht. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2020.
- [DIN EN ISO 7250-1 2017] Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung - Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2017.
- [DIN ISO 5725-1 1997] Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1997.
- [DOERRER 2004] Doerrer, C.: Entwurf eines elektromechanischen Systems für flexibel konfigurierbare Eingabefelder mit haptischer Rückmeldung. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2004.
- [DÖRING & BORTZ 2016] Döring, N.; Bortz, J.: Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016.
- [DUDEN 2022a] Duden: Komfort. Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft, <https://www.duden.de/rechtschreibung/Komfort>, 12.12.2022.
- [DUDEN 2022b] Duden: Wert. Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft, <https://www.duden.de/rechtschreibung/Wert>, 12.12.2022.

- [ESCH 2013] Esch, F.-R.: Strategie und Technik des Automobilmarketing. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [FASTL & ZWICKER 2007] Fastl, H.; Zwicker, E.: Psychoacoustics. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [FECHNER 1889] Fechner, G. T.: Elemente der Psychophysik. 2. Auflage, Leipzig: Breitkopf & Härtel, 1889.
- [FREDELAKE & HOLUBE 2010] Fredelake, S.; Holube, I.: Qualitätsbeurteilungen durch Paarvergleich. In: Z Audiol, Nr. 49, 2010, S. 149-156.
- [FRIEDRICH 2008] Friedrich, T.: Haptik. In: Friedrich, T. (Hrsg.): Wörterbuch Design, Birkhäuser Basel, 2008, S. 187-189.
- [GAO ET AL. 2023] Gao, C.; Shen, Y.; Zhang, A. Y.: Uncertainty quantification in the Bradley–Terry–Luce model. In: Information and Inference: A Journal of the IMA, Nr. 12, 2023, S. 1073-1140.
- [GENUIT & SOTTEK 2010] Genuit, K.; Sottek, R.: Das menschliche Gehör und Grundlagen der Psychoakustik. In: Genuit, K. (Hrsg.): Sound-Engineering im Automobilbereich, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, S. 39-89.
- [GLOHR ET AL. 2015] Glohr, T.; Wahn, N.; Fritz, M.; Maier, T.: Haptics as an Aspect of the Perceived Quality of Control Devices in Trucks. In: 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, Vol. 3, 2015, S. 5535-5542.
- [GLOHR ET AL. 2017] Glohr, T.; Hasenberger, E.; Zimmermann, A.; Maier, T.; Krum, G.: Untersuchungen zur Betätigungsakustik als Aspekt der Wertigkeit von Bedienelementen im Fahrzeug. In: GfA e.V., Dortmund (Hrsg.): Sozio-technische Gestaltung des digitalen Wandels, Beitrag F.1.9, 2017.
- [GLOHR 2018] Glohr, T.: Untersuchungen zur markenspezifischen Betätigungshaptik und -akustik von Bedienelementen im Kraftfahrzeug. Universität Stuttgart, Dissertation, 2018.
- [GOLDSTEIN 2011] Goldstein, E. B.: Wahrnehmungspsychologie. 7. Auflage, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- [GÖTZ 2007] Götz, M.: Die Gestaltung von Bedienelementen unter dem Aspekt ihrer kommunikativen Funktion. Technische Universität München, Dissertation, 2007.
- [GROßMANN & BÖTTCHER 2020] Großmann, H.; Böttcher, C.: Pkw-Klimatisierung. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020.
- [GRUBISIC ET AL. 2015] Grubisic, I.; Kurz, B.; Brombach, J.; Zaoralkova, L.: Komfortdrehmomente bei Heizkörperthermostaten. In: GfA e.V., Dortmund (Hrsg.): Verantwortung für die Arbeit der Zukunft, Beitrag C.1.7, 2015.
- [GRUNWALD 2001] Grunwald, M.: Erkenntnistheoretische und historische Aspekte. In: Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.): Der bewegte Sinn, Basel: Birkhäuser Basel, 2001, S. 1-15.
- [GRUNWALD 2017] Grunwald, M.: Homo hapticus. München: Droemer, 2017.

- [GUENTHER & MALECHA 2018] Guenther, J.; Malecha, D.: Smarte, multifunktionelle Oberflächen - Realität oder Zukunftsvision? In: VDI Wissensforum; VDI-Jahrestagung Spritzgießen 2018 (Hrsg.): Spritzgießen 2018, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2018, S. 131-137.
- [GUTEKUNST 2023] Gutekunst Federn, Detailseite Zugfedern: RZ-024AKX, <https://www.federnshop.com/de/produkte/zugfedern/rz-024akx.html>, 25.10.2023.
- [HAGENDORF ET AL. 2011] Hagendorf, H.; Krummenacher, J.; Müller, H.-J.; Schubert, T.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. 1. Auflage, Berlin: Springer, 2011.
- [HAMPEL 2011] Hampel, T.: Untersuchungen und Gestaltungshinweise für adaptive multifunktionale Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung. Universität Stuttgart, Dissertation, 2011.
- [HATZFELD 2013] Hatzfeld, C.: Experimentelle Analyse der menschlichen Kraftwahrnehmung als ingenieurtechnische Entwurfsgrundlage für haptische Systeme. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2013.
- [HATZFELD & KERN 2023] Hatzfeld, C.; Kern, T. A.: Haptics as an Interaction Modality. In: Kern, T. A.; Hatzfeld, C.; Abbasimoshaei, A. (Hrsg.): Engineering Haptic Devices, Cham: Springer International Publishing, 2023, S. 35-109.
- [HEAD ACOUSTICS 2018a] HEAD acoustics: Psychoakustische Analysen I, <https://cdn.head-acoustics.com/fileadmin/data/de/Application-Notes/Psychoakustische-Analysen-I-02.2018.pdf>, 30.07.2023.
- [HEAD ACOUSTICS 2018b] HEAD acoustics: Psychoakustische Analysen II, https://global.head-acoustics.com/downloads/de/application_notes/Psychoakustische-Analysen_II_d.pdf, 22.07.2023.
- [HEAD ACOUSTICS 2020] HEAD acoustics: Datenblatt SQuadriga II, https://global.head-acoustics.com/downloads/de/squadriga/D3320_SQuadriga_II_g.pdf, 16.07.2023.
- [HEAD ACOUSTICS 2023a] HEAD acoustics: ArtemiS SUITE: Software-Plattform für Schall- und Schwingungsanalysen, <https://www.head-acoustics.com/de/produkte/analyse-software/artemis-suite>, 25.06.2023.
- [HEAD ACOUSTICS 2023b] HEAD acoustics: BHS II: Mobiles Headset für gehörriichtige Geräusch-aufnahmen, <https://www.head-acoustics.com/de/produkte/kunstkopf-binaurale-aufnahme/bhs-ii>, 25.06.2023.
- [HEAD ACOUSTICS 2023c] HEAD acoustics: SQala: Software for Jury Testing, <https://www.head-acoustics.com/products/jury-testing/sqala>, 01.07.2023.
- [HELD ET AL. 2007] Held, T.; Schrepp, M.; Fischer, P.: Skalierung von Designalternativen. In: Gross, T. (Hrsg.): Mensch & Computer Interaktion 2007, Oldenbourg Wissenschafts-Verlag, 2007, S. 9-18.
- [HÖCHSTETTER ET AL. 2015] Höchstetter, M.; Wackerbauer, M.; Verhey, J.; Gabbert, U.: Psychoakustische Prognose singular impulshafter Geräusche. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 117, Nr. 7-8, 2015, S. 80-85.
- [HUFENBACH ET AL. 2010] Hufenbach, W.; Prengel, S.; Dannemann, M.: Prüfstandsentwicklung zur Identifizierung des haptischen und akustischen Einflusses auf die Wertigkeit von Bedienelementen. In: DAGA. 2010, S. 863-864.

- [HUFENBACH ET AL. 2012] Hufenbach, W.; Dannemann, M.; Prengel, S.; J. Ehlig: Mechatronisches System zur Erzeugung von variablen Haptiken mit Schnittstelle zum Abspielen von Audiosignalen. In: DAGA. 2012, S. 367-368.
- [JANNY 2018] Janny, B.: Entwicklung von gestaltvariablen Bedienelementen zur Überwindung von Nutzungsbarrieren am Beispiel alternsgerechter Drehstellteile. Universität Stuttgart, Dissertation, 2018.
- [JOHANNSEN 1993] Johannsen, G.: Mensch-Maschine-Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993.
- [KIESSLING ET AL. 2023] Kiessling, J.; Tondera, M.; Maier, T.: Experiment zur digitalen Erfassung anthropometrischer Maße der Hand mittels maschineller Bilderkennung. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, 2023.
- [KOSAKA & WATANABE 1996] Kosaka, H.; Watanabe, K.: Reaction Forces of Switches and Push Feeling. In: SAE Technical Paper Series, 1996.
- [KRIST 1994] Krist, R.: Modellierung des Sitzkomforts. Katholische Universität Eichstätt, Dissertation, 1994.
- [KÜHNER ET AL. 2011] Kühner, M.; Wild, J.; Bubb, H.: Haptische Konstanzleistung bei Drucktastern, Vol. 2011, 2011.
- [KÜHNER 2013] Kühner, M.: Haptische Unterscheidbarkeit mechanischer Parameter bei rotatorischen Bedienelementen. Technische Universität München, Dissertation, 2013.
- [LIEB ET AL. 2008] Lieb, H.; Quattelbaum, B.; Schmitt, R.: Perceived quality as a key factor for strategic change in product development. In: IEEE Technology Management Council (Hrsg.): IEEE International Engineering Management Conference, 2008, Piscataway, NJ, 2008.
- [LUCE 2005] Luce, R. D.: Individual choice behavior. Mineola, NY: Dover Publications, 2005.
- [MANDEL 2019] Mandel, R.: Komfortmodell und Untersuchung zum Einfluss der Innenraumgeometrie auf die Wahrnehmung und Wirkung von Fahrzeugeigenschaften. Universität Stuttgart, Dissertation, 2019.
- [MASLOW 1943] Maslow, A.: A Theory of Human Motivation. In: Psychological Review, Vol. 1943, Nr. 50, 1943, S. 370-396.
- [MERCEDES-BENZ 2022] Der Luxus der Zukunft, <https://www.mercedes-benz.com/de/exklusiv/me-magazin/luxus-der-zukunft/>, 16.11.2022.
- [MEYER 2001] Meyer, S.: Produkthaptik. Gabler Edition Wissenschaft, Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2001.
- [MOSER & ZENNER 2020] Moser, T.; Zenner, H.-P.: Peripheres Auditorisches System. In: Brandes, R.; Lang, F.; Schmidt, R. F. (Hrsg.): Physiologie des Menschen, 32. Auflage, Berlin: Springer, 2020.
- [MYERS 2008] Myers, D. G.: Psychologie. 2 Auflage, Heidelberg: Springer, 2008.
- [NEUDÖRFER 1981] Neudörfer, A.: Anzeiger und Bedienteile. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981.
- [NEUWIRTH & BENESCH 2004] Neuwirth, W.; Benesch, M.: Motorische Leistungsserie. Mödling, 2004.

- [OSGOOD ET AL. 1957] Osgood, C. E.; Suci, G. J.; Tannenbaum, D. H.: The measurement of meaning. University of Illinois Press, 1957.
- [OSURAI ET AL. 1990] Osurai, Y.; Inuzuka, Y.; Ito, H.: Operability of Car Audio Controls. In: Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting, Vol. 34, Nr. 9, 1990, S. 618-622.
- [PAULIG ET AL. 2011] Paulig, J.; Schmidt, G.; Lemmer, K.: Wertigkeit haptisch erleben. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011.
- [POMIERSKY 2021] Pomiersky, P.: Erfassung und Berücksichtigung von Persönlichkeitsmerkmalen im Kontext der ergonomischen Fahrzeugauslegung. Universität Stuttgart, Dissertation, 2021.
- [PREUSCHOFF 2010] Preuschoff, A.: Projektmanagement. In: Gusig, L.; Kruse, A. (Hrsg.): Fahrzeugentwicklung im Automobilbau, 2010, S. 21-34.
- [RAFFASEDER 2010] Raffaseder, H.: Audiodesign. 2. Auflage, München: Hanser, 2010.
- [REISINGER 2008] Reisinger, J.: Haptische Konstanzleistung bei Drehstellern. In: Bubb, H. (Hrsg.): Ergonomie aktuell, Garching, 2008.
- [REISINGER 2009] Reisinger, J.: Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen. Technische Universität München, Dissertation, 2009.
- [REISINGER & WILD 2008] Reisinger, J.; Wild, J.: Haptische Bedienschnittstellen. In: Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug, Wiesbaden: Vieweg, 2008.
- [RICHTER 2008] Richter, S.: Haptische und haptisch-optische Wahrnehmung und Wertanmutung von Fahrzeuginterieurs. In: Schade, J.; Engeln, A. (Hrsg.): Fortschritte der Verkehrspsychologie, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008, S. 289-312.
- [RÜHMANN 1981] Rühmann, H.: Schnittstellen im Mensch-Maschine-Systemen. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 2. Auflage, München, Wien: Hanser, 1981, S. 351-376.
- [SACHS ET AL. 1994] Sachs, S.; Teichert, H.-J.; Rentzsch, M.: Ergonomische Gestaltung mobiler Maschinen. 1. Auflage, Landsberg am Lech: ecomed, 1994.
- [SAUERWEIN 2020] Sauerwein, E.: Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit. Wiesbaden: Springer, 2020.
- [SCHMID 2003] Schmid, M.: Benutzergerechte Gestaltung mechanischer Anzeiger mit Drehrichtungsincompatibilität zwischen Stell- und Wirkteil. Universität Stuttgart, Dissertation, 2003.
- [SCHMID & MAIER 2017] Schmid, M.; Maier, T.: Technisches Interface Design. Berlin, Heidelberg: Vieweg, 2017.
- [SCHMIDTKE 1981] Schmidtke, H.: Lehrbuch der Ergonomie. 2. Auflage, München, Wien: Hanser, 1981.
- [SCHMIDTKE 1989] Schmidtke, H.: Handbuch der Ergonomie. 2. Auflage, Koblenz, 1989.
- [SCHMIDTKE & JASTRZEBSKA-FRACZEK 2013] Schmidtke, H.; Jastrzebska-Fraczek, I.: Ergonomie. München: Hanser, 2013.

- [SCHMITT & NEUMANN 2013] Schmitt, R.; Neumann, A.: Sensorische Qualitätswahrnehmung von Drehschaltern objektivieren. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 115, Nr. 7-8, 2013, S. 616-622.
- [SCHUHFRIED 2023] Das Wiener Testsystem, <https://www.schuhfried.com/de/wiener-test-system/>, 01.09.2023.
- [SCHWALK 2020] Schwalk, M.: Entwicklung und Untersuchung vibrotaktiler Muster im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion. Universität Stuttgart, Dissertation, 2020.
- [SCHWEGLER & LUCIUS 2016] Schwegler, J. S.; Lucius, R.: Der Mensch. 6. Auflage, Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 2016.
- [SINAMBARI & SENTPALI 2020] Sinambari, G. R.; Sentpali, S.: Ingenieurakustik. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2020.
- [SONNLEITNER 2009] Sonnleitner, A.: Erkennbarkeit und Wertanmutung von Schaltern im PKW bei simulierten Taglichtbedingungen. Diplomarbeit, Karl-Franzens Universität Graz, 2009.
- [SPINGLER 2008] Spingler, M. R.: Die methodische Erfassung human wahrgenommener Qualitätsaspekte. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 110, Nr. 2, 2008, S. 104-111.
- [SPINGLER 2011] Spingler, M. R.: Metrological system for perceived quality parameters to establish transfer function to human perception. Dissertation, 2011.
- [THOMÉ 2010] Thomé, N.: Produktpositionierung am Beispiel der Emotionalisierung. In: Gusig, L.; Kruse, A. (Hrsg.): Fahrzeugentwicklung im Automobilbau, 2010, S. 40-49.
- [TIETZ 2001] Tietz, W.: Haptische Auslegung der Fahrzeuginnenausstattung bei AUDI. In: Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.): Der bewegte Sinn, Basel: Birkhäuser, 2001.
- [TONDERA ET AL. 2021a] Tondera, M.; Reichelt, F.; Schmid, M.; Maier, T.: Methodischer Ansatz zur Analyse haptischer Bedienelemente im Kraftfahrzeug. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, 2021, S. 502-512.
- [TONDERA ET AL. 2021b] Tondera, M.; Sebastian Fischer, M.; Kaiser, J.; Maier, T.: Study on the Perceived Quality of Hand-Operated Mechanical Controls in Passenger Cars Using the Example of Air Vents. Human Systems Engineering and Design (IHSED), 2021.
- [TONDERA ET AL. 2022] Tondera, M.; Reichelt, F.; Fischer, L.; Kern, F.; Kiessling, J.; Holder, D.; Maier, T.: Auditory perceived quality of manual-mechanical control elements in cars. In: Bargende, M.; Reuss, H.-C.; Wagner, A. (Hrsg.): 22. Int. Stuttgarter Symposium, Wiesbaden: Springer, 2022.
- [TREEDE & BAUMGÄRTNER 2020] Treede, R.-D.; Baumgärtner, U.: Das somatosensorische System. In: Brandes, R.; Lang, F.; Schmidt, R. F. (Hrsg.): Physiologie des Menschen, 32. Auflage, Berlin: Springer, 2020, S. 644-665.
- [TREIBER 2009] Treiber, A.: Akustische Bewertung von Drehstellern. Hochschule Heilbronn, 2009.
- [TREIBER 2011] Treiber, A. S.: Design and Benchmarking of Acoustic Feedback in Human Machine Interface. Slovak University of Technology, Bratislava, Dissertation, 2011.

- [TREIBER & GRUHLER 2008] Treiber, A.; Gruhler, G.: Psychoacoustic evaluation of rotary switches. In: 2008 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, IEEE, 2008, S. 17-20.
- [ULHERR & BENGLER 2018] Ulherr, A.; Bengler, K.: Bewertung von Sitzen. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Vol. 72, Nr. 2, 2018, S. 104-110.
- [VDI 2225-3 1998] Technisch-Wirtschaftliche Bewertung - Blatt 3. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- [VDI/VDE 2258 1987] Feinwerkelemente - Bedienelemente (mechanisch). Verein Deutscher Ingenieure e.V., Verband Deutscher Elektrotechniker e.V., Berlin: Beuth Verlag, 1987.
- [WEIR ET AL. 2003] Weir, D. W.; Peshkin, M. A.; Colgate, J. E.: Switch characterization and the haptic pro-file. In: 12th Haptic symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 2003.
- [WELLINGS ET AL. 2008] Wellings, T.; Williams, M. A.; Pitts, M.: Customer perception of switch-feel in luxury sports utility vehicles. In: Food Quality and Preference, Vol. 19, Nr. 8, 2008, S. 737-746.
- [WELLMANN 2008] Wellmann, K.: Anmutung. In: Friedrich, T. (Hrsg.): Wörterbuch Design, Birkhäuser Basel, 2008, S. 15.
- [WILLEMSSEN & RAO 2010] Willemssen, A. M.; Rao, M. D.: Characterization of sound quality of impulsive sounds using loudness based metric. In: Proceedings of 20th International Congress on Acoustics (ICA), 2010.
- [WINTERHOLLER 2019] Winterholler, J.: Haptische Informationsübertragung von Drehmomentverläufen im Kontext einer Haupt- und Nebenaufgabe. Universität Stuttgart, Dissertation, 2019.
- [ZEILINGER 2005] Zeilinger, S.: Aktive haptische Bedienelemente zur Interaktion mit Fahrerinformationssystemen. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2005.
- [ZHANG ET AL. 1996] Zhang, L.; Helander, M. G.; Drury, C. G.: Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. In: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol. 38, Nr. 3, 1996, S. 377-389.
- [ZHOU ET AL. 2014] Zhou, W.; Reisinger, J.; Peer, A.; Hirche, S.: Interaction-Based Dynamic Measurement of Haptic Characteristics of Control Elements. In: Auvray, M.; Duriez, C. (Hrsg.): Haptics: neuroscience, devices, modeling and applications, Vol. 8618, Berlin: Springer, 2014, S. 177-184.
- [ZWICKER 1982] Zwicker, E.: Psychoakustik. Berlin, Heidelberg: Springer, 1982.

Anhang

A1 Probandeninstruktionen – Versuchsreihe 1 bis 3

VR1, VR2, VR3 – Instruktionen
Instruktion – Sitz Stellen Sie sich den Sitz in eine für Sie komfortable Position ein, in der Sie alle Bedienelemente gut erreichen können – also Pedale, Lenkrad und Luftdüse.
Instruktion – Betätigung VR1 – Teil 1 Betätigen Sie das präsentierte Bedienelement mit einem 3-Finger Zufassungsgriff. Verwenden Sie bitte immer den Griff ganz links. Nachfolgend wird immer zunächst das Schieben (links-rechts) geprüft, anschließend das Schwenken (oben-unten). Sie können die Betätigung beliebig oft – auch während der Beantwortung des Fragebogens - wiederholen. Bei der Bewertung kommt es allein auf Ihre Einschätzung an.
Instruktion – Betätigung VR1 – Teil 2 Betätigen Sie das präsentierte Bedienelement mit einem 3-Finger Zufassungsgriff. Sie können die Betätigung beliebig oft – auch während der Beantwortung des Fragebogens - wiederholen. Bitte bewerten Sie ausschließlich den taktilen Eindruck der Oberfläche. Vermeiden Sie dabei, sich von visuellen Eindrücken beeinflussen zu lassen. Bei der Bewertung kommt es allein auf Ihre Einschätzung an.
Instruktion – Betätigung VR2 Betätigen Sie das präsentierte Bedienelement in der Bewegungsart Drehen. Verwenden Sie dabei bitte einen 3-Finger Zufassungsgriff. Sie können die Betätigung beliebig oft – auch während der Beantwortung des Fragebogens - wiederholen. Bei der Bewertung kommt es allein auf Ihre Einschätzung an.
Instruktion – Betätigung VR3 – Teil 1 Betätigen Sie das präsentierte Bedienelement mit einem 3-Finger Zufassungsgriff. Verwenden Sie bitte immer den Griff ganz links. Nachfolgend wird immer das Schieben (links-rechts) geprüft. Sie können die Betätigung beliebig oft – auch während der Beantwortung des Fragebogens - wiederholen. Bei der Bewertung kommt es allein auf Ihre Einschätzung an.
Instruktion – Betätigung VR3 – Teil 2 Betätigen Sie das präsentierte Bedienelement, den Taster, mit einem 1-Finger Kontaktgriff. Sie können die Betätigung beliebig oft – auch während der Beantwortung des Fragebogens - wiederholen. Bei der Bewertung kommt es allein auf Ihre Einschätzung an.

Tabelle A.1.1: Instruktionen vor Versuchsstart

A2 Fragebogen zur Demografie und Psychografie – Versuchsreihe 1 bis 3

VR1, VR2, VR3 – Demografie	
Um die Zusammensetzung der Stichprobe später genauer charakterisieren zu können, bitten wir Sie um einige Angaben.	
Alle Ihre Angaben werden selbstverständlich vertraulich behandelt.	
1. Alter	_____ Jahre
2. Geschlecht	☐ weiblich ☐ männlich
3. Händigkeit	Welche Hand bevorzugen Sie bei alltäglichen Verrichtungen? ☐ links ☐ rechts ☐ beidhändig
4. Körpergröße	_____ cm
5. Körpergewicht	_____ kg
6. Abschluss	Welchen Abschluss besitzen Sie? _____
7. Beruf	Welchen Beruf üben Sie zur Zeit aus? _____
8. Fahrerlaubnis	Seit wieviel Jahren sind Sie im Besitz Ihres Führerscheins? _____ Jahre
9. Fahrzeugbesitz	Besitzen Sie ein Fahrzeug? ☐ ja ☐ nein
10. Nutzungshäufigkeit	Wie oft nutzen Sie als Fahrer ein Fahrzeug in der Woche? _____ Tage
11. Fahrzeug	Welches Fahrzeug haben Sie in den vergangenen 6 Monaten am häufigsten genutzt? _____ (Marke und Modell)
12. Familiäre Erfahrung	Welches Fahrzeug wurde bei Ihnen zuhause (im Elternhaus) am längsten gefahren? _____ (Marke und Modell)
13. Hobby	Üben Sie ein Hobby aus, welches manuelle Feinmotorik abverlangt? ☐ ja ☐ nein falls ja, welches? _____
14. Musikinstrument	Spielen Sie ein Musikinstrument? ☐ ja ☐ nein falls ja, welches? _____

Tabelle A.2.1: Fragebogen demografische und versuchsspezifische Daten

VR1, VR2, VR3 – Psychografie					
Der folgende Fragebogen enthält 15 Aussagen, mit denen Ihre Fahrzeugnutzung beschrieben werden könnte. Es gibt bei diesem Fragebogen keine richtigen oder falschen Antworten. Sie erfüllen den Zweck der Befragung am besten, indem Sie die Fragen so wahrheitsgemäß wie möglich beantworten. Alle Ihre Angaben werden selbstverständlich vertraulich behandelt.					
Aussage					
1.	Ich fahre in der Regel gerne schnell und sportlich.				
2.	Ich liebe es, dynamisch durch Kurven zu fahren.				
3.	Autofahren macht mir Spaß.				
4.	Ich vertreibe mir gerne die Zeit mit dem Multimediasystem des Autos.				
5.	Ich möchte durch das Multimediasystem des Autos unterhalten werden.				
6.	Das Display des Multimediasystems des Autos sollte möglichst groß sein.				
7.	Ich bevorzuge eine leichtgängige Lenkung, bei der kein großer Kraftaufwand benötigt wird.				
8.	Ein Auto muss gemütlich und bequem sein, damit ich mich während der Fahrt entspannen und erholen kann.				
9.	Mein Auto sollte mich entlasten und unterstützen, wo immer es geht.				
10.	Wenn ich in ein Auto steige, will ich sofort losfahren. Für Einstellung von Sitz und Lenkrad habe ich keine Zeit.				
11.	Schwierig einzustellende Verstellmechanismen nutze ich nicht.				
12.	Ich nutze höchstens die Basisfunktionen der Verstellmöglichkeiten im Auto.				
13.	Ich fühle mich während des Autofahrens regelmäßig müde und schläfrig.				
14.	Es fällt mir schwer eine passende Sitzposition, bei der mich nichts drückt oder kneift, zu finden.				
15.	Ich reagiere sehr empfindlich auf Veränderungen meiner Umgebung (Temperatur, Licht, Gerüche, Lärm).				
Antwortformat					
	starke Ablehnung	Ablehnung	Neutral	Zustimmung	starke Zustimmung
	☐	☐	☐	☐	☐

Tabelle A.2.2: Fragebogen Psychografie nach [POMIERSKY 2021]

A3 Messdiagramme – Versuchsreihe 1 bis 3

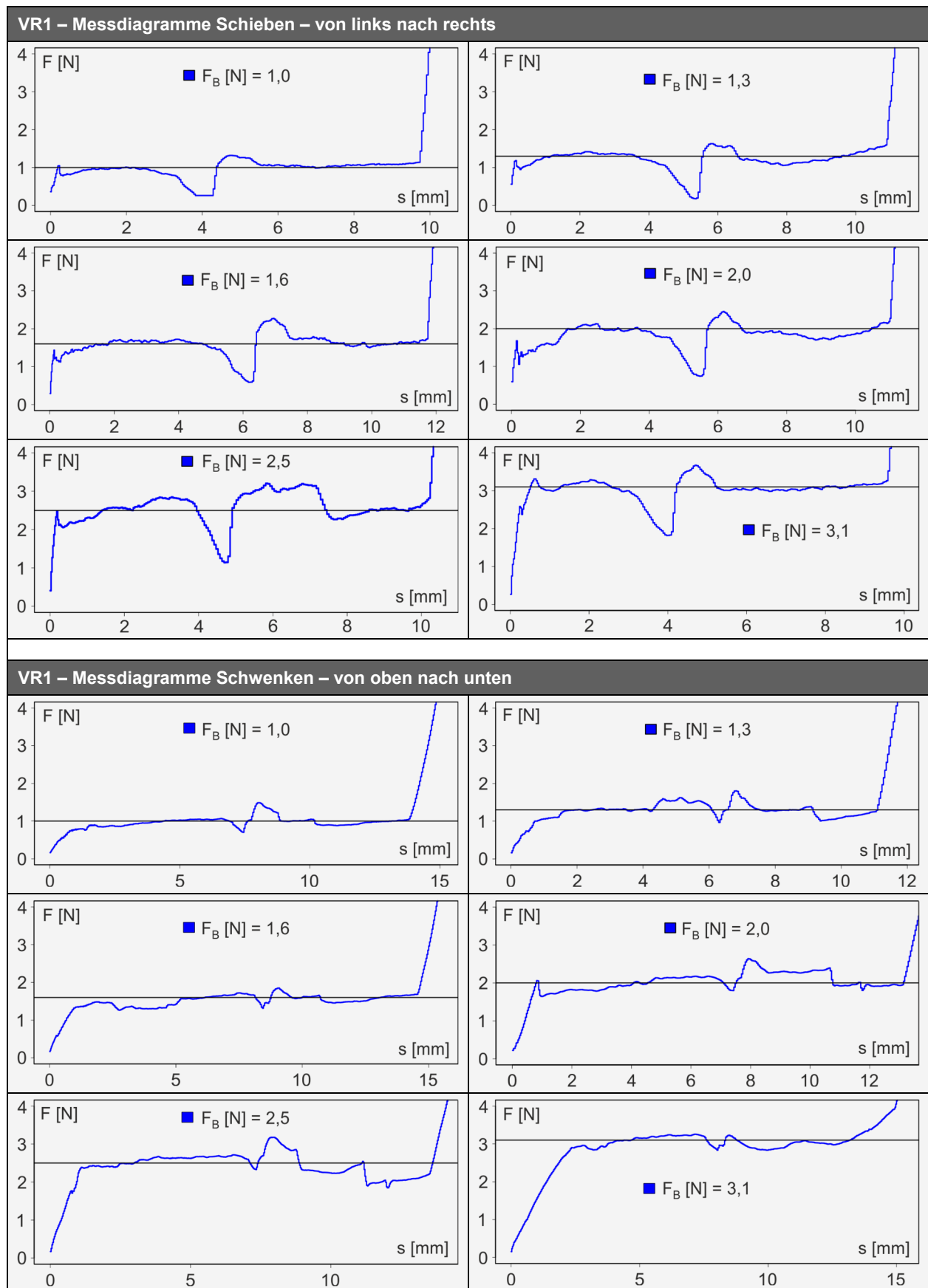


Tabelle A.3.1: Messdiagramme bezüglich Schieben und Schwenken – VR1

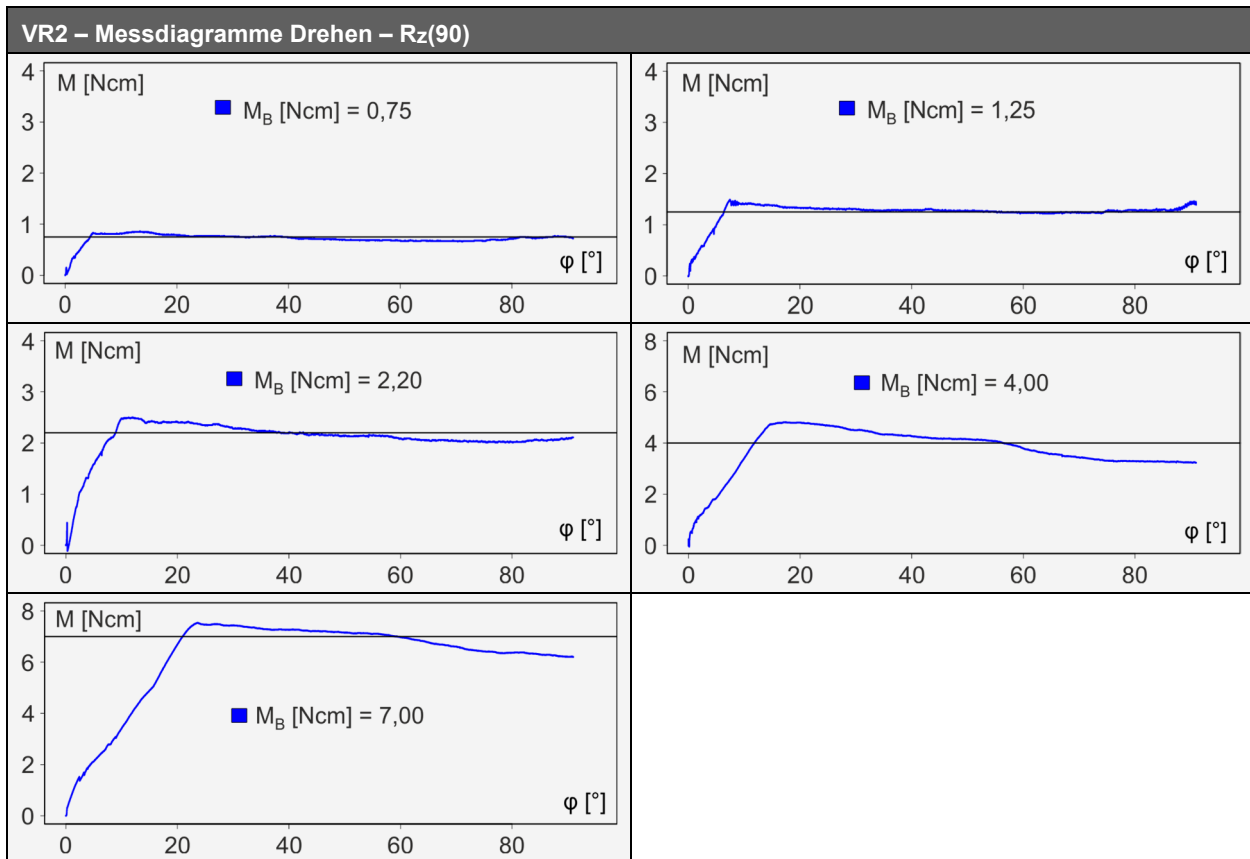


Tabelle A.3.2: Messdiagramme bezüglich Drehen – VR2

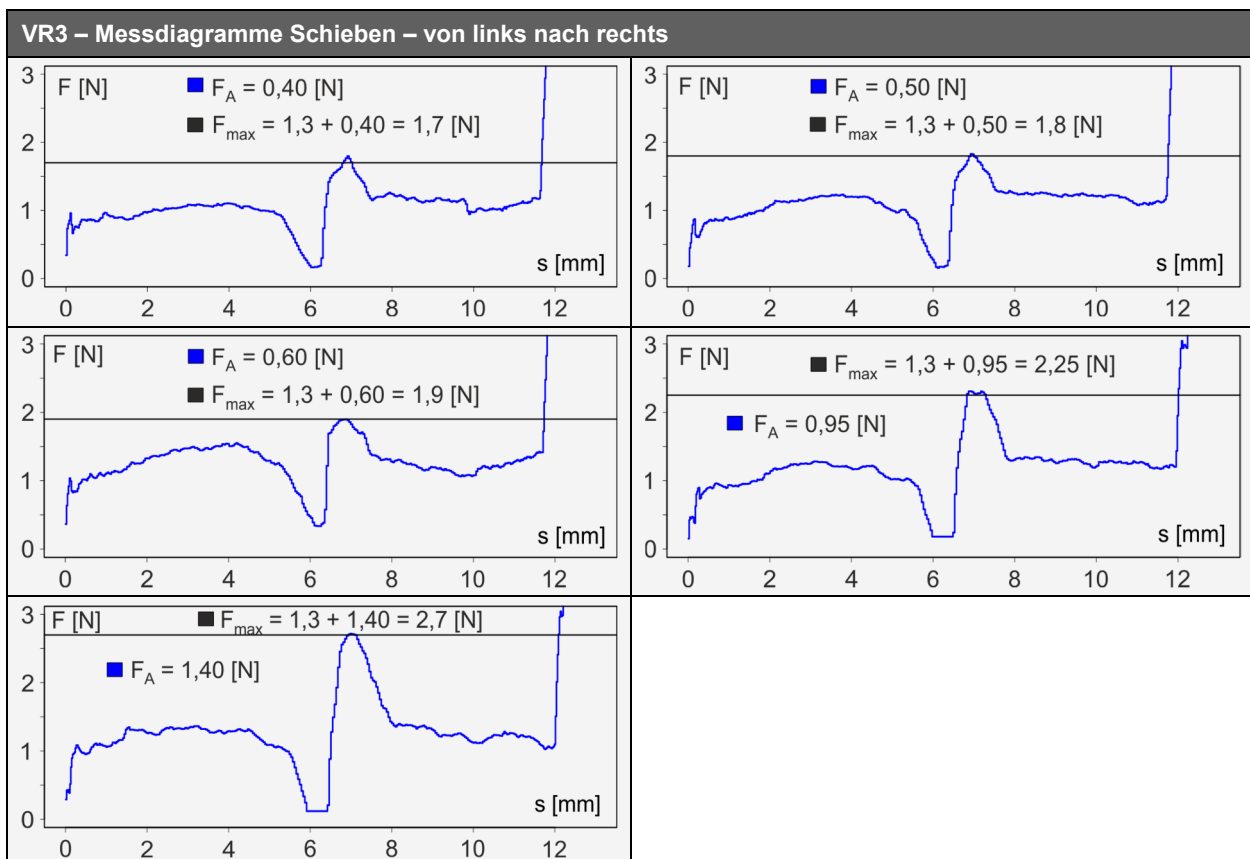


Tabelle A.3.3: Messdiagramme bezüglich Schieben (Ausrastkraft) – VR3

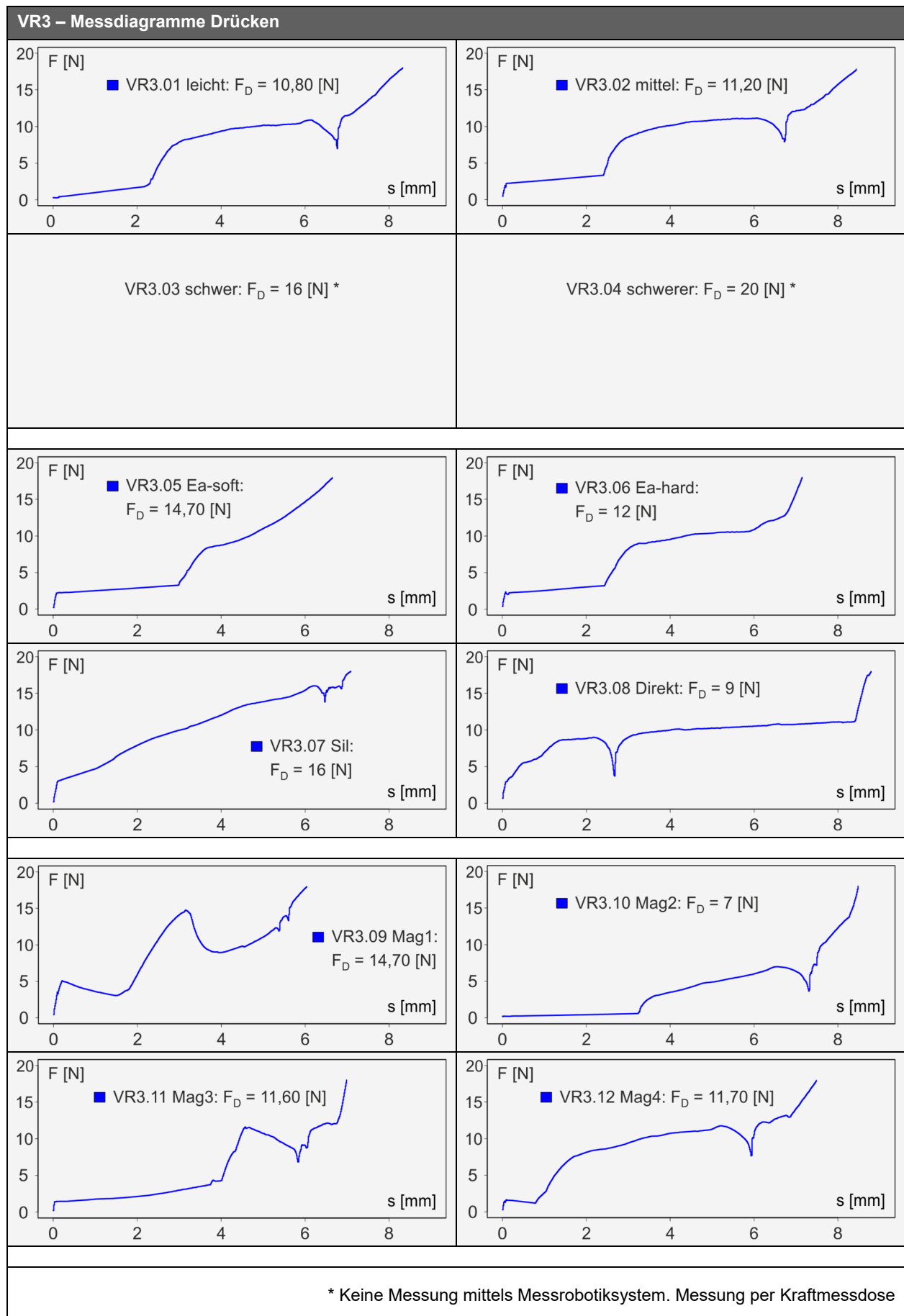


Tabelle A.3.4: Messdiagramme bezüglich Drücken – VR3

A4 Inferenzstatistische Daten – Versuchsreihe 1 bis 3

VR1 - Paarweise Vergleiche zur Ergonomie beim Schieben					
$n = 30$	$F_B = 1,0 \text{ N}$	$F_B = 1,3 \text{ N}$	$F_B = 1,6 \text{ N}$	$F_B = 2,0 \text{ N}$	$F_B = 2,5 \text{ N}$
$F_B = 1,3 \text{ N}$	$z = -0,82;$ $p = 1,00$	-	-	-	-
$F_B = 1,6 \text{ N}$	$z = 0,17;$ $p = 1,00$	$z = 0,98;$ $p = 0,627$	-	-	-
$F_B = 2,0 \text{ N}$	$z = -0,03;$ $p = 1,00$	$z = 0,78;$ $p = 1,00$	$z = -0,20;$ $p = 1,00$	-	-
$F_B = 2,5 \text{ N}$	$z = 0,62;$ $p = 1,00$	$z = 1,43;$ $p = 0,045 *$	$z = 0,45;$ $p = 1,00$	$z = 0,65;$ $p = 1,00$	-
$F_B = 3,1 \text{ N}$	$z = 2,17;$ $p < 0,001 ***$	$z = 2,98;$ $p < 0,001 ***$	$z = 2,00;$ $p = 0,001 **$	$z = 2,20;$ $p < 0,001 ***$	$z = 1,55;$ $p = 0,020 *$
VR1 - Paarweise Vergleiche zur Ergonomie beim Schwenken					
$n = 30$	$F_B = 1,0 \text{ N}$	$F_B = 1,3 \text{ N}$	$F_B = 1,6 \text{ N}$	$F_B = 2,0 \text{ N}$	$F_B = 2,5 \text{ N}$
$F_B = 1,3 \text{ N}$	$z = 0,12;$ $p = 1,00$	-	-	-	-
$F_B = 1,6 \text{ N}$	$z = 1,00;$ $p = 0,58$	$z = 0,88;$ $p = 1,00$	-	-	-
$F_B = 2,0 \text{ N}$	$z = 1,00;$ $p = 0,58$	$z = 0,88;$ $p = 1,00$	$z = 0,00;$ $p = 1,00$	-	-
$F_B = 2,5 \text{ N}$	$z = 1,42;$ $p = 0,050$	$z = 1,30;$ $p = 0,107$	$z = 0,42;$ $p = 1,00$	$z = 0,42;$ $p = 1,00$	-
$F_B = 3,1 \text{ N}$	$z = 2,47;$ $p < 0,001 ***$	$z = 2,35;$ $p < 0,001 ***$	$z = 1,47;$ $p = 0,036 *$	$z = 1,47;$ $p = 0,036 *$	$z = 1,05;$ $p = 0,446$
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant					

Tabelle A.4.1: Paarweise Vergleiche zur Ergonomie – VR1

VR1 - Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit bei Material-Oberflächen von Griffen						
<i>n</i> = 30	MO-La	MO-Ku1	MO-Ku2	MO-Ku3	MO-PP	
MO-Ku1	<i>z</i> = 0,03; <i>p</i> = 1,00	-	-	-	-	
MO-Ku2	<i>z</i> = 1,25; <i>p</i> = 0,145	<i>z</i> = 1,22; <i>p</i> = 0,177	-	-	-	
MO-Ku3	<i>z</i> = 2,92; <i>p</i> < 0,001***	<i>z</i> = 2,88; <i>p</i> < 0,001***	<i>z</i> = 1,67; <i>p</i> = 0,008**	-	-	
MO-PP	<i>z</i> = 2,00; <i>p</i> = 0,001**	<i>z</i> = 1,97; <i>p</i> = 0,001**	<i>z</i> = 0,75; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = -0,92; <i>p</i> = 0,866	-	
MO-Alu	<i>z</i> = 1,40; <i>p</i> = 0,056	<i>z</i> = 1,37; <i>p</i> = 0,070	<i>z</i> = 0,15; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = -1,52; <i>p</i> = 0,025*	<i>z</i> = -0,60; <i>p</i> = 1,00	
VR1 - Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit bei Form-Oberflächen von Griffen						
<i>n</i> = 30	FO-Rq	FO-R1	FO-R2	FO-N1	FO-N2	FO-Go
FO-R1	<i>z</i> = 0,17; <i>p</i> = 1,00	-	-	-	-	-
FO-R2	<i>z</i> = -0,25; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = -0,42; <i>p</i> = 1,00	-	-	-	-
FO-N1	<i>z</i> = 0,47; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = 0,30; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = 0,72; <i>p</i> = 1,00	-	-	-
FO-N2	<i>z</i> = 1,38; <i>p</i> = 0,276	<i>z</i> = 1,22; <i>p</i> = 0,612	<i>z</i> = 1,63; <i>p</i> = 0,072	<i>z</i> = 0,92; <i>p</i> = 1,00	-	-
FO-Go	<i>z</i> = 0,38; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = 0,22; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = 0,63; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = -0,08; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = -1,00; <i>p</i> = 1,00	-
FO-Ra	<i>z</i> = -0,63; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = -0,80; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = -0,38; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = -1,10; <i>p</i> = 1,00	<i>z</i> = -2,02; <i>p</i> = 0,006**	<i>z</i> = -1,02; <i>p</i> = 1,00
* <i>p</i> < 0,05 signifikant; ** <i>p</i> < 0,01 hoch signifikant; *** <i>p</i> < 0,001 höchst signifikant						

Tabelle A.4.2: Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit von Oberflächen – VR1

VR1 - Paarweise Vergleiche zur Ergonomie bei Material-Oberflächen von Griffen						
Für die Ergonomie bei Material-Oberflächen von Griffen werden keine Mehrfachvergleiche durchgeführt, da der Friedman-Test für verbundene Stichproben ergibt, dass keine signifikanten Unterschiede vorliegen: Chi-Quadrat (5) = 6,15; $p = 0,292$; $n = 30$						
VR1 - Paarweise Vergleiche zur Ergonomie bei Form-Oberflächen von Griffen						
$n = 30$	FO-Rq	FO-R1	FO-R2	FO-N1	FO-N2	FO-Go
FO-R1	$z = -0,78$; $p = 1,00$	-	-	-	-	-
FO-R2	$z = -0,22$; $p = 1,00$	$z = 0,567$; $p = 1,00$	-	-	-	-
FO-N1	$z = -0,95$; $p = 1,00$	$z = -0,17$; $p = 1,00$	$z = -0,73$; $p = 1,00$	-	-	-
FO-N2	$z = -0,60$; $p = 1,00$	$z = 0,18$; $p = 1,00$	$z = -0,38$; $p = 1,00$	$z = 0,35$; $p = 1,00$	-	-
FO-Go	$z = 0,10$; $p = 1,00$	$z = 0,88$; $p = 1,00$	$z = 0,32$; $p = 1,00$	$z = 1,05$; $p = 1,00$	$z = 0,70$; $p = 1,00$	-
FO-Ra	$z = -1,63$; $p = 0,072$	$z = -0,85$; $p = 1,00$	$z = -1,42$; $p = 0,233$	$z = -0,68$; $p = 1,00$	$z = -1,03$; $p = 1,00$	$z = -1,73$; $p = 0,040^*$
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant						

Tabelle A.4.3: Paarweise Vergleiche zur Ergonomie von Oberflächen – VR1

VR2 - Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Drehen				
Paarung <i>Ncm-mm</i> vs. <i>Ncm-mm</i>	Teststatistik		Paarung <i>Ncm-mm</i> vs. <i>Ncm-mm</i>	Teststatistik
0,75-14 vs. 7,00-9	$z = -0,62; p = 1,00$		4,00-9 vs. 4,00-14	$z = -0,55; p = 1,00$
0,75-14 vs. 4,00-9	$z = -1,20; p = 1,00$		4,00-9 vs. 7,00-11	$z = -0,57; p = 1,00$
0,75-14 vs. 4,00-14	$z = -1,75; p = 1,00$		4,00-9 vs. 0,75-9	$z = 0,85; p = 1,00$
0,75-14 vs. 7,00-11	$z = -1,77; p = 1,00$		4,00-9 vs. 0,75-11	$z = 0,85; p = 1,00$
0,75-14 vs. 0,75-9	$z = 2,05; p = 1,00$		4,00-9 vs. 1,25-14	$z = 1,00; p = 1,00$
0,75-14 vs. 0,75-11	$z = 2,05; p = 1,00$		4,00-9 vs. 7,00-14	$z = -1,32; p = 1,00$
0,75-14 vs. 1,25-14	$z = -2,20; p = 1,00$		4,00-9 vs. 4,00-11	$z = -1,52; p = 1,00$
0,75-14 vs. 7,00-14	$z = -2,52; p = 1,00$		4,00-9 vs. 1,25-9	$z = 1,58; p = 1,00$
0,75-14 vs. 4,00-11	$z = -2,72; p = 1,00$		4,00-9 vs. 1,25-11	$z = 2,20; p = 1,00$
0,75-14 vs. 1,25-9	$z = -2,78; p = 1,00$		4,00-9 vs. 2,20-9	$z = 2,42; p = 1,00$
0,75-14 vs. 1,25-11	$z = -3,42; p = 0,324$		4,00-9 vs. 2,20-14	$z = 2,50; p = 1,00$
0,75-14 vs. 2,20-9	$z = -3,62; p = 0,182$		4,00-9 vs. 2,20-11	$z = 3,17; p = 0,640$
0,75-14 vs. 2,20-14	$z = 3,70; p = 0,142$		4,00-14 vs. 7,00-11	$z = -0,02; p = 1,00$
0,75-14 vs. 2,20-11	$z = -4,37; p = 0,016^*$		4,00-14 vs. 0,75-11	$z = 0,30; p = 1,00$
7,00-9 vs. 4,00-9	$z = 0,58; p = 1,00$		4,00-14 vs. 0,75-9	$z = 0,30; p = 1,00$
7,00-9 vs. 4,00-14	$z = 1,13; p = 1,00$		4,00-14 vs. 1,25-14	$z = 0,45; p = 1,00$
7,00-9 vs. 7,00-11	$z = -1,15; p = 1,00$		4,00-14 vs. 7,00-14	$z = -0,77; p = 1,00$
7,00-9 vs. 0,75-11	$z = 1,43; p = 1,00$		4,00-14 vs. 4,00-11	$z = 0,97; p = 1,00$
7,00-9 vs. 0,75-9	$z = 1,43; p = 1,00$		4,00-14 vs. 1,25-9	$z = 1,03; p = 1,00$
7,00-9 vs. 1,25-14	$z = 1,58; p = 1,00$		4,00-14 vs. 1,25-11	$z = 1,67; p = 1,00$
7,00-9 vs. 7,00-14	$z = -1,90; p = 1,00$		4,00-14 vs. 2,20-9	$z = 1,87; p = 1,00$
7,00-9 vs. 4,00-11	$z = 2,10; p = 1,00$		4,00-14 vs. 2,20-14	$z = 1,95; p = 1,00$
7,00-9 vs. 1,25-9	$z = 2,17; p = 1,00$		4,00-14 vs. 2,20-11	$z = 2,62; p = 1,00$
7,00-9 vs. 1,25-11	$z = 2,80; p = 1,00$		7,00-11 vs. 0,75-9	$z = 0,28; p = 1,00$
7,00-9 vs. 2,20-9	$z = 3,00; p = 0,984$		7,00-11 vs. 0,75-11	$z = 0,28; p = 1,00$
7,00-9 vs. 2,20-14	$z = 3,08; p = 0,796$		7,00-11 vs. 1,25-14	$z = 0,43; p = 1,00$
7,00-9 vs. 2,20-11	$z = 3,75; p = 0,122$		7,00-11 vs. 7,00-14	$z = -0,75; p = 1,00$
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant				

Tabelle A.4.4: Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit – VR2 (Teil 1/2)

VR2 - Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Drehen			
Paarung <i>Ncm-mm</i> vs. <i>Ncm-mm</i>	Teststatistik		Paarung <i>Ncm-mm</i> vs. <i>Ncm-mm</i>
7,00-11 vs. 4,00-11	$z = 0,95; p = 1,00$		1,25-14 vs. 2,20-9
7,00-11 vs. 1,25-9	$z = 1,02; p = 1,00$		1,25-14 vs. 2,20-14
7,00-11 vs. 1,25-11	$z = 1,65; p = 1,00$		1,25-14 vs. 2,20-11
7,00-11 vs. 2,20-9	$z = 1,85; p = 1,00$		7,00-14 vs. 4,00-11
7,00-11 vs. 2,20-14	$z = 1,93; p = 1,00$		7,00-14 vs. 1,25-9
7,00-11 vs. 2,20-11	$z = 2,60; p = 1,00$		7,00-14 vs. 1,25-11
0,75-9 vs. 4,00-11	$z = -0,67; p = 1,00$		7,00-14 vs. 2,20-9
0,75-11 vs. 1,25-14	$z = -0,15; p = 1,00$		7,00-14 vs. 2,20-14
0,75-11 vs. 7,00-14	$z = -0,47; p = 1,00$		7,00-14 vs. 2,20-11
0,75-11 vs. 4,00-11	$z = -0,67; p = 1,00$		4,00-11 vs. 1,25-9
0,75-11 vs. 1,25-9	$z = -0,73; p = 1,00$		4,00-11 vs. 1,25-11
0,75-11 vs. 1,25-11	$z = -1,37; p = 1,00$		4,00-11 vs. 2,20-9
0,75-11 vs. 2,20-9	$z = -1,57; p = 1,00$		4,00-11 vs. 2,20-14
0,75-11 vs. 2,20-14	$z = -1,65; p = 1,00$		4,00-11 vs. 2,20-11
0,75-11 vs. 2,20-11	$z = -2,32; p = 1,00$		1,25-9 vs. 1,25-11
0,75-9 vs. 0,75-11	$z = 0,00; p = 1,00$		1,25-9 vs. 2,20-9
0,75-9 vs. 1,25-14	$z = -0,15; p = 1,00$		1,25-9 vs. 2,20-14
0,75-9 vs. 7,00-14	$z = -0,47; p = 1,00$		1,25-9 vs. 2,20-11
0,75-9 vs. 1,25-9	$z = -0,73; p = 1,00$		1,25-11 vs. 2,20-9
0,75-9 vs. 1,25-11	$z = -1,37; p = 1,00$		1,25-11 vs. 2,20-14
0,75-9 vs. 2,20-9	$z = -1,57; p = 1,00$		1,25-11 vs. 2,20-11
0,75-9 vs. 2,20-14	$z = -1,65; p = 1,00$		2,20-9 vs. 2,20-14
0,75-9 vs. 2,20-11	$z = -2,32; p = 1,00$		2,20-9 vs. 2,20-11
1,25-14 vs. 7,00-14	$z = -0,32; p = 1,00$		2,20-14 vs. 2,20-11
1,25-14 vs. 4,00-11	$z = -0,52; p = 1,00$		
1,25-14 vs. 1,25-9	$z = 0,58; p = 1,00$		
1,25-14 vs. 1,25-11	$z = 1,22; p = 1,00$		
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant			

Tabelle A.4.4: Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit – VR2 (Teil 2/2)

VR3 - Paarweise Vergleiche zur Ergonomie beim Schieben (Ausrastkraft)				
$n = 30$	$F_A = 0,40 \text{ N}$	$F_A = 0,50 \text{ N}$	$F_A = 0,60 \text{ N}$	$F_A = 0,95 \text{ N}$
$F_A = 0,50 \text{ N}$	$z = -0,07;$ $p = 1,00$	-	-	-
$F_A = 0,60 \text{ N}$	$z = 0,77;$ $p = 0,604$	$z = 0,83;$ $p = 0,412$	-	-
$F_A = 0,95 \text{ N}$	$z = 1,25;$ $p = 0,022 *$	$z = 1,32;$ $p = 0,013 *$	$z = 0,48;$ $p = 1,00$	-
$F_A = 1,40 \text{ N}$	$z = 1,38;$ $p = 0,007 **$	$z = 1,45;$ $p = 0,004 **$	$z = 0,62;$ $p = 1,00$	$z = 0,13;$ $p = 1,00$
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant				

Tabelle A.4.5: Paarweise Vergleiche zur Ergonomie beim Schieben – VR3

VR3 - Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Drücken				
Paarung	Teststatistik		Paarung	Teststatistik
Mag2 vs. schwerer	$z = 0,35; p = 1,00$		Ea-soft vs. Mag4	$z = -4,08; p = 0,001**$
Mag2 vs. Ea-soft	$z = 2,00; p = 1,00$		Ea-soft vs. Sil	$z = -4,53; p < 0,001***$
Mag2 vs. Ea-hard	$z = 2,05; p = 1,00$		Ea-hard vs. Mag1	$z = -0,90; p = 1,00$
Mag2 vs. Mag1	$z = 2,95; p = 0,101$		Ea-hard vs. schwer	$z = 2,18; p = 1,00$
Mag2 vs. schwer	$z = 4,23; p < 0,001***$		Ea-hard vs. Direkt	$z = -2,23; p = 1,00$
Mag2 vs. Direkt	$z = -4,28; p < 0,001***$		Ea-hard vs. Mag3	$z = -2,32; p = 0,847$
Mag2 vs. Mag3	$z = -4,37; p < 0,001***$		Ea-hard vs. leicht	$z = 2,88; p = 0,129$
Mag2 vs. leicht	$z = 4,93; p < 0,001***$		Ea-hard vs. mittel	$z = 3,77; p = 0,003**$
Mag2 vs. mittel	$z = 5,82; p < 0,001***$		Ea-hard vs. Mag4	$z = -4,03; p = 0,001**$
Mag2 vs. Mag4	$z = -6,08; p < 0,001***$		Ea-hard vs. Sil	$z = -4,48; p < 0,001***$
Mag2 vs. Sil	$z = -6,53; p < 0,001***$		Mag1 vs. schwer	$z = 1,28; p = 1,00$
schwerer vs. Ea-soft	$z = -1,65; p = 1,00$		Mag1 vs. Direkt	$z = -1,33; p = 1,00$
schwerer vs. Ea-hard	$z = -1,70; p = 1,00$		Mag1 vs. Mag3	$z = -1,42; p = 1,00$
schwerer vs. Mag1	$z = -2,60; p = 0,345$		Mag1 vs. leicht	$z = 1,98; p = 1,00$
schwerer vs. schwer	$z = 3,88; p = 0,002**$		Mag1 vs. mittel	$z = 2,87; p = 0,137$
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant				

Tabelle A.4.6: Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Drücken – VR3 (Teil 1/2)

VR3 - Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Drücken				
Paarung	Teststatistik		Paarung	Teststatistik
schwerer vs. direkt	$z = -3,93; p = 0,002^{**}$		Mag1 vs. Mag4	$z = -3,13; p = 0,050$
schwerer vs. Mag3	$z = -4,02; p = 0,001^{**}$		Mag1 vs. Sil	$z = -3,58; p = 0,008$
schwerer vs. leicht	$z = 4,58; p < 0,001^{***}$		schwer vs. Direkt	$z = -0,50; p = 1,00$
schwerer vs. mittel	$z = 5,47; p < 0,001^{***}$		schwer vs. Mag3	$z = -0,13; p = 1,00$
schwerer vs. Mag4	$z = -5,73; p < 0,001^{***}$		schwer vs. leicht	$z = 0,70; p = 1,00$
schwerer vs. Sil	$z = -6,18; p < 0,001^{***}$		schwer vs. mittel	$z = 1,58; p = 1,00$
Ea-soft vs. Ea-hard	$z = 0,05; p = 1,00$		schwer vs. Mag4	$z = -1,85; p = 1,00$
Ea-soft vs. Mag1	$z = -0,95; p = 1,00$		schwer vs. Sil	$z = -2,30; p = 0,890$
Ea-soft vs. schwer	$z = 2,23; p = 1,00$		Direkt vs. Mag3	$z = 0,08; p = 1,00$
Ea-soft vs. Direkt	$z = -2,28; p = 0,936$		Direkt vs. leicht	$z = 0,65; p = 1,00$
Ea-soft vs. Mag3	$z = -2,37; p = 0,727$		Direkt vs. mittel	$z = 1,53; p = 1,00$
Ea-soft vs. leicht	$z = 2,93; p = 0,107$		Direkt vs. Mag4	$z = 1,80; p = 1,00$
Ea-soft vs. mittel	$z = 3,82; p = 0,003^{**}$		Direkt vs. Sil	$z = 2,25; p = 1,00$
Mag3 vs. leicht	$z = 0,57; p = 1,00$		leicht vs. Mag4	$z = -1,15; p = 1,00$
Mag3 vs. mittel	$z = 1,45; p = 1,00$		leicht vs. Sil	$z = -1,60; p = 1,00$
Mag3 vs. Mag4	$z = -1,72; p = 1,00$	mittel vs. Mag4	$z = -0,27; p = 1,00$	
Mag3 vs. Sil	$z = -2,17; p = 1,00$	mittel vs. Sil	$z = -0,72; p = 1,00$	
leicht vs. mittel	$z = -0,88; p = 1,00$	Mag4 vs. Sil	$z = -0,45; p = 1,00$	
* $p < 0,05$ signifikant; ** $p < 0,01$ hoch signifikant; *** $p < 0,001$ höchst signifikant				

Tabelle A.4.6: Paarweise Vergleiche zur Wertigkeit beim Drücken – VR3 (Teil 2/2)

A5 Ergebnisse der subjektiven Beschreibung – Versuchsreihe 1 bis 3

VR1 - Subjektive Beschreibung beim Schieben					
$n = 30$	deutlich	gleitend	kratzig	schwergängig	sportlich
$F_B = 1,0 \text{ N}$	4,03	4,87	2,77	2,93	3,87
$F_B = 1,3 \text{ N}$	5,10	4,63	2,10	3,23	4,57
$F_B = 1,6 \text{ N}$	4,07	3,50	3,70	4,80	3,70
$F_B = 2,0 \text{ N}$	4,37	3,77	2,43	4,73	4,03
$F_B = 2,5 \text{ N}$	3,87	2,57	3,93	5,73	3,33
$F_B = 3,1 \text{ N}$	2,87	2,03	3,27	6,80	2,67
Arithmetisches Mittel (M)					
VR1 - Subjektive Beschreibung beim Schwenken					
$n = 30$	deutlich	gleitend	kratzig	schwergängig	sportlich
$F_B = 1,0 \text{ N}$	5,63	5,53	2,03	2,93	4,20
$F_B = 1,3 \text{ N}$	5,80	5,27	2,33	3,13	4,50
$F_B = 1,6 \text{ N}$	5,07	3,97	3,47	4,67	4,17
$F_B = 2,0 \text{ N}$	5,50	4,30	2,37	4,93	4,00
$F_B = 2,5 \text{ N}$	4,83	3,33	2,77	5,80	3,77
$F_B = 3,1 \text{ N}$	4,40	3,87	2,60	5,87	3,50
Arithmetisches Mittel (M)					

Tabelle A.5.1: Subjektive Beschreibungen beim Schieben und Schwenken – VR1

VR1 - Subjektive Beschreibungen von Griff-Oberflächen						
<i>n</i> = 30	fein - grob	glatt - rau	alltäglich - einmalig	dezent - auffällig	zweckdienlich - verspielt	altbacken - modern
MO-La	1,43	1,27	3,67	3,10	3,80	5,23
MO-Ku1	1,47	1,07	3,53	3,30	4,13	5,43
MO-Ku2	2,17	1,83	2,97	2,50	3,00	4,87
MO-Ku3	3,73	4,50	4,10	3,73	2,93	3,50
MO-PP	2,87	2,53	2,87	2,33	3,07	3,70
MO-Alu	3,47	3,60	4,47	3,33	3,13	4,23
FO-Rq	3,93	4,63	4,60	3,63	3,97	4,33
FO-R1	4,63	4,63	4,10	4,27	3,17	3,93
FO-R2	4,34	4,37	3,70	3,80	3,37	3,97
FO-N1	5,50	6,23	4,83	5,30	2,97	3,57
FO-N2	6,37	6,50	5,10	5,70	3,13	3,57
FO-Go	3,27	4,03	3,83	3,10	3,07	3,57
FO-Ra	3,53	5,37	3,70	3,70	2,83	4,17
Arithmetisches Mittel (<i>M</i>)						

Tabelle A.5.2: Subjektive Beschreibungen von Oberflächen – VR1

VR2 - Subjektive Beschreibungen beim Drehen						
<i>n</i> = 30	deutlich	gleitend	kratzig	schwergängig	sportlich	gedämpft
0,75 Ncm - 9 mm	3,67	5,07	3,37	1,70	3,47	3,07
2,20 Ncm - 9 mm	4,60	3,93	3,10	3,60	3,80	3,67
7,00 Ncm - 9 mm	3,47	2,80	2,87	6,17	3,10	5,00
0,75 Ncm - 14 mm	3,87	5,37	2,60	1,37	2,97	2,90
2,20 Ncm - 14 mm	4,63	4,53	2,60	2,70	2,90	4,03
7,00 Ncm - 14 mm	4,03	3,43	2,73	5,23	3,17	4,77
Arithmetisches Mittel (<i>M</i>)						

Tabelle A.5.3: Subjektive Beschreibungen beim Drehen – VR2

VR3 - Subjektive Beschreibungen beim Drücken							
<i>n</i> = 30	deutlich	gleitend	klickend	schwer- gängig	sportlich	klappernd	geführt
leicht	4,93	5,20	3,97	2,13	4,27	3,43	4,80
mittel	5,17	4,87	4,27	3,00	4,40	3,30	5,17
schwer	4,23	4,03	3,17	5,90	4,00	2,73	4,90
schwerer	2,67	3,17	1,70	6,50	2,90	2,10	4,40
Ea-soft	2,80	3,20	2,47	5,50	2,90	2,70	3,83
Ea-hard	2,73	3,53	2,33	5,53	2,70	2,77	4,33
Sil	4,83	5,47	2,73	3,67	4,10	2,17	5,33
Direkt	4,87	4,10	3,50	2,50	4,13	2,53	4,40
Mag1	4,83	2,87	5,83	3,90	4,43	4,37	4,50
Mag2	3,27	3,27	4,77	2,30	2,67	5,10	3,13
Mag3	5,67	3,90	5,33	3,30	4,57	3,50	4,40
Mag4	5,40	4,93	5,03	3,67	4,77	3,00	5,33
Arithmetisches Mittel (<i>M</i>)							

Tabelle A.5.4: Subjektive Beschreibungen beim Drücken – VR3

A6 Kenngrößen der Akustikuntersuchungen

	Fahr- zeug	SPL [dB(A)]	Lautheit DIN45631 [sone]	Schärfe DIN45631 [acum]	Peak- Frequenz FFT [Hz]	Rauigkeit [asper]	Impuls- haltigkeit [iu]	Schwan- kungs- stärke [vacil]	BTL
Öffnen - HSK	CC	67,65	11,12	1,33	973	0,028	1,54	0,0287	1,82
	C-SUV	63,53	10,00	1,10	258	0,027	1,22	0,0293	3,42
	SUV	73,18	13,35	1,05	275	0,051	2,33	0,0301	0
	S-Class	67,34	9,95	1,21	498	0,033	1,91	0,0208	2,76
Öffnen - MiKo-v	CC	72,00	18,55	1,10	621	0,034	0,84	0,0138	0
	C-SUV	56,45	4,87	1,19	703	0,017	1,03	0,0176	3,42
	SUV	69,44	13,94	1,50	1166	0,030	1,56	0,0175	0,63
	S-Class	52,68	5,98	1,60	123	0,018	0,36	0,0187	2,76
Öffnen - MiKo-h	CC	70,37	8,72	1,25	750	0,019	1,30	0,0173	1,09
	C-SUV	74,13	12,31	1,18	293	0,038	2,20	0,0307	2,52
	SUV	67,18	12,13	1,15	932	0,040	2,24	0,0209	0
	S-Class	70,41	10,56	1,18	814	0,037	1,85	0,0213	1,82
Öffnen - Tür	CC	82,77	24,22	1,02	316	0,088	2,14	0,0485	0
	C-SUV	74,01	12,14	0,92	193	0,206	5,39	0,0205	3,37
	SUV	81,92	20,94	0,95	164	0,044	2,09	0,0697	1,96
	S-Class	73,89	15,46	1,13	680	0,026	1,34	0,0661	2,29

Tabelle A.6.1: Technische und psychoakustische Kenngrößen der Betätigungsgeräusche beim Öffnen

	Fahrzeug	SPL [dB(A)]	Lautheit DIN45631 [sone]	Schärfe DIN45631 [acum]	Peak-Frequenz FFT [Hz]	Rauigkeit [asper]	Impulshaltigkeit [iu]	Schwankungsstärke [vacil]	BTL
Schließen - HSK	CC	84,64	28,56	0,81	1031	0,070	2,67	0,0222	2,28
	C-SUV	79,43	20,41	1,04	533	0,032	1,46	0,0329	1,30
	SUV	82,88	26,18	0,79	727	0,055	1,78	0,0170	0
	S-Class	83,28	22,90	0,93	1371	0,060	2,30	0,0186	2,28
Schließen - MiKo-v	CC	78,20	17,35	1,15	855	0,040	1,02	0,0183	0
	C-SUV	60,04	5,98	1,24	703	0,025	1,57	0,0140	3,75
	SUV	88,09	18,21	1,59	4078	0,030	0,95	0,0156	0
	S-Class	58,01	4,94	1,62	586	0,016	1,11	0,0153	2,48
Schließen - MiKo-h	CC	81,34	13,29	1,30	855	0,030	2,03	0,0303	1,21
	C-SUV	86,54	13,14	1,27	1312	0,042	2,76	0,0312	0
	SUV	83,69	13,41	1,16	943	0,044	2,52	0,0344	3,99
	S-Class	71,02	9,54	1,15	562	0,027	1,28	0,0325	6,48
Schließen - Tür	CC	91,73	31,97	0,82	229	0,281	6,91	0,0597	0
	C-SUV	86,38	19,71	0,75	65	0,264	7,99	0,0476	4,17
	SUV	94,82	31,44	0,65	574	0,181	5,50	0,0482	1,85
	S-Class	94,66	32,05	0,72	598	0,316	7,44	0,0239	1,19

Tabelle A.6.2: Technische und psychoakustische Kenngrößen der Betätigungsgeräusche beim Schließen

A7 Ergebnis der einfachen linearen Regression beim Schließen

Prädiktor	R ²	$F(df, df) = p$	b ₁	b ₀	b ₁ 95%-KI
Anzahl an Lautheits-Spitzen > 5 [sone]	0,1270	1,456(1, 10) = 0,2553	-0,6802	3,5113	[-1,9362; 0,5757]
Lautheit	0,1984	2,476(1, 10) = 0,1467	-0,1193	3,9089	[-0,2883; 0,0497]
Max. Lautheit	0,3225	4,759(1, 10) = 0,0541	-0,1030	4,9027	[-0,2083; 0,0022]
Schärfe	0,0010	0,0095(1, 10) = 0,9242	-0,2362	2,2573	[-5,6277; 5,1554]
Lautheit * Schärfe	0,3850	6,261(1, 10) = 0,0313	-0,1962	5,4336	[-0,3710; -0,0215]
Peak-Frequenz	0,0905	0,9945(1, 10) = 0,3422	-0,0006	2,6235	[-0,0019; 0,0007]
Rauhigkeit	0,0441	0,4616(1, 10) = 0,5123	-26,575	3,021	[-113,731; 60,581]
Impulshaltigkeit	0,0002	0,0019(1, 10) = 0,9663	0,0419	1,9059	[-2,1180; 2,2018]
Schwankungsstärke	0,0841	0,919(1, 10) = 0,3603	72,7759	0,2688	[-96,375; 241,927]

Tabelle A.7.1: Einfach lineare Regression mit den Signalparametern der Betätigungsgeräusche des Schließens als Prädiktor

Lebenslauf

Persönliche Angaben:

Name: Michael Tondera
Geburtsdatum, -ort: 14.04.1991 in München
Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung:

09/2002 – 05/2011 Asam-Gymnasium in München mit dem
Abschluss Allgemeine Hochschulreife
10/2012 – 09/2015 Studium der Psychologie an der
Technischen Universität Darmstadt
10/2016 – 03/2019 Studium Ergonomie - Human Factors Engineering an der
Technischen Universität München
06/2017 – 03/2018 HiWi-Tätigkeit am Lehrstuhl für Ergonomie (LfE) der
Technischen Universität München

Beruflicher Werdegang:

03/2020 – 02/2023 Doktorand in der Entwicklung Interieur-Cockpit,
bei der Mercedes-Benz AG in Sindelfingen
seit 03/2023 Projektingenieur bei der Regierung von Oberbayern
im Gewerbeaufsichtsamt, Dezernat Marktüberwachung



ISBN-13: 978-3-946924-25-8