



Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Ergonomie

Haptische Unterscheidbarkeit mechanischer Parameter bei rotatorischen Bedienelementen

Manuel Ludwig Kühner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb (i. R.)
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Die Dissertation wurde am 27.05.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 07.02.2014 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kraftfahrzeugtechnik und Mechatronik (IKM) der Hochschule Heilbronn unter der Betreuung von Herrn Prof. Dr. Jörg Wild.

Das Projekt erfolgte in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Ergonomie an der Technischen Universität München und der Audi AG in Ingolstadt. Die Herren Gerhard Mauter, Johann Schneider und Manfred Mittermeier aus dem Bereich Haptik und Bedienteilentwicklung waren hierbei meine Ansprechpartner bei der Audi AG.

Die wissenschaftliche Betreuung übernahmen mein Doktorvater Herr Univ.-Prof. Dr. Heiner Bubb, Herr Univ.-Prof. Dr. Tim C. Lüth als Zweitgutachter und der Ordinarius des Lehrstuhls für Ergonomie Herr Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler.

Zahlreiche studentische Projekte haben zu dieser Arbeit beigetragen. Insbesondere die Arbeiten von Stefan Hahl, Alexander Roloff, Jan Janke und Markus Mayer. Diese studentischen Arbeiten wurden vor allem im Bereich der Elektronikhardwareentwicklung durch den Laborbetriebsleiter Herrn Joachim Walter mitbetreut.

Über die Grundlagen der Psychophysik und deren Methoden konnte ich – neben meinem Doktorvater und Herrn Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler – mit den Herren Univ.-Prof. Dr. Hans Strasburger¹ und Dr. Hans-Joachim Maempel² diskutieren.

Allen genannten Personen danke ich für die intensive Betreuung und für die tolle Unterstützung!

Ingolstadt, Mai 2014

Manuel Kühner

¹ Ludwig-Maximilians-Universität München und Georg-August-Universität Göttingen

² Technische Universität Berlin

Inhalt

Danksagung	i
1 Einleitung und Gliederung der Arbeit	1
2 Zielsetzung und Stand der Forschung	3
2.1 Bedienelemente im Kraftfahrzeug	3
2.1.1 Klassifikation	4
2.1.2 Das Konzept des zentralen Bedienelements	4
2.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	5
2.2.1 Abgrenzung	5
2.2.2 Formulierung der Forschungsfragen	6
2.3 Relevante Forschungsarbeiten aus dem Bereich der rotatorischen Bedien- elemente	7
2.4 Zusammenstellung von Untersuchungen zu Schwellwerten des haptischen Systems	12
3 Grundlagen der haptischen Wahrnehmung	19
3.1 Definition	19
3.2 Sensoren der haptischen Wahrnehmung	20
3.3 Sonderstellung der Hand	23
4 Grundlagen der Statistik	25
4.1 Normalverteilung, statistische Kennwerte und verbundene Stichproben	25
4.2 Hypothesentest	27
4.2.1 Hypothesen	27
4.2.2 Richtige und falsche Entscheidungen	28
4.2.3 Standardisierte Effektgröße	29
4.3 Nichtparametrische und parametrische Hypothesentests	32
5 Grundlagen der Psychophysik	35
5.1 Klassische Psychophysik	35
5.1.1 Messproblematik	36
5.1.2 Schwellenkonzept	37
5.1.3 Weber'sches Gesetz	39
5.2 Die psychometrische Funktion	39
5.3 Übersicht und Auswahl der Methoden zur Schwellenbestimmung	41
5.3.1 Klassische Methoden	41
5.3.2 Antwortparadigmen	45
5.3.3 Moderne Methoden	47
5.3.4 Verwendete Methoden	50

6	Beschreibung des Versuchsaufbaus	51
6.1	Grundlagen	52
6.2	Wirkgefüge und prinzipielle Entwurfsmethodik	55
6.3	Hardware	57
6.4	Regelungskonzepte	59
6.4.1	Streckenmodell des rotatorischen Haptiksimulators	59
6.4.2	Impedanz-System	62
6.4.3	Admittanz-System	64
6.5	Verifikation	66
7	Experimente	71
7.1	Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters <i>Dämpfung</i>	73
7.1.1	Untersuchungsziele	73
7.1.2	Versuchsaufbau	74
7.1.3	Versuchsdesign und verwendete Methode zur Schwellwertbestimmung	75
7.1.4	Statistische Auswertung	77
7.1.4.1	Probandenkollektiv	77
7.1.4.2	Versuchsergebnisse	78
7.1.5	Interpretation und Zusammenfassung	88
7.2	Konstanzleistung bei der Betätigung translatorischer Bedienelemente	90
7.2.1	Untersuchungsziele	91
7.2.2	Versuchsaufbau	92
7.2.3	Versuchsdesign und verwendete Methode zur Schwellwertbestimmung	93
7.2.4	Statistische Auswertung	95
7.2.4.1	Probandenkollektiv	95
7.2.4.2	Versuchsergebnisse	96
7.2.5	Interpretation und Zusammenfassung	100
7.3	Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter <i>Massenträgheit</i> , <i>Dämpfung</i> und <i>Reibung</i>	102
7.3.1	Untersuchungsziele	103
7.3.2	Versuchsaufbau	103
7.3.3	Versuchsdesign und verwendete Methode zur Schwellwertbestimmung	104
7.3.4	Statistische Auswertung	107
7.3.4.1	Probandenkollektiv	108
7.3.4.2	Versuchsergebnisse	108
7.3.5	Interpretation und Zusammenfassung	117
7.3.5.1	Massenträgheitsmoment	117
7.3.5.2	Dämpfung	118
7.3.5.3	Reibung	119
7.3.5.4	Maskierung durch Rastung	120
7.3.5.5	Empfehlung für die Praxis	120
8	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	121
8.1	Zusammenfassung und Diskussion	121
8.2	Ausblick	124

Literatur	125
A Anhang zu den einzelnen Kapiteln	143
A.1 Anhang zu Kapitel 4	143
A.1.1 Beispiel zum binären Entscheidungskonzept	143
A.1.2 Innerhalb-Standardabweichung	155
A.1.3 Nonzentrale <i>t</i> -Verteilung	156
A.2 Anhang zu Kapitel 6	159
A.2.1 Ausführliche Herleitung des Streckenmodells	159
A.2.2 Implementierungsdetails	161
A.2.3 Alternative Impedanz-Steuerung	162
A.3 Anhang zu Kapitel 7	167
A.3.1 Anhang zu Kapitel 7.1	168
A.3.1.1 Bestimmung des Signifikanzniveaus zur Erreichung einer Teststärke von 80% für "große" Effekte	168
A.3.2 Anhang zu Kapitel 7.2	169
A.3.2.1 Bestimmung des Signifikanzniveaus zur Erreichung einer Teststärke von 80% für "große" Effekte	169
A.3.3 Anhang zu Kapitel 7.3	170
A.3.3.1 Einheitenumrechnung	170
A.3.3.2 Fragebogen zur Bestimmung der Händigkeit	171
A.3.3.3 Bestimmung des Signifikanzniveaus zur Erreichung einer Teststärke von 80% für "große" Effekte	173
A.3.3.4 Tabellen mit ausgewählten statistischen Kennwerten	174
B Datenblätter	179
B.1 Drehmomentsensor DRFL-I-0,2 (WINTEC GMBH)	179
B.2 Gleichstrommotor RE 40, 148867 (MAXON MOTOR AG)	183
B.3 Winkelsensor 2RMHF (SCANCON)	185

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zentrales Bedienelement (Audi, BWM und Mercedes-Benz)	5
	a MMI-Controller (Audi)	
	b iDrive-Controller (BMW)	
	c COMAND-Controller (Mercedes-Benz)	
2.2	Formkodiertes Bedienelement zur elektrischen Sitzverstellung	6
2.3	Darstellung einer als hochwertig wahrgenommenen Drehmoment-Charakteristik	8
2.4	Exemplarischer Verlauf der mechanischen Arbeit des Drehmomentverlaufs aus Abbildung 2.3	9
3.1	Mechanosensoren der Haut	22
3.2	Motorischer und sensorischer Homunkulus	24
	a Motorischer Homunkulus	
	b Sensorischer Homunkulus	
4.1	Verteilungsfunktion der Differenzen und der Stichprobenmittelwerte der Differenzen bei einem Experiment mit verbundenen Stichproben	27
4.2	Veranschaulichung der Irrtumswahrscheinlichkeiten α und β bei einem Effekt der Stärke $\epsilon = \mu_D$	30
4.3	Zusammenhang zwischen dem Betrag der standardisierten Effektstärke $ \delta'' $ und der Stichprobengröße n zweier abhängiger Stichproben mit dem Signifikanzniveau α als Parameter.	32
5.1	Beispiel zweier Paare von Empfindungsverteilungen, die sich unterschiedlich stark überlappen	36
5.2	Beispiel einer psychometrischen Funktion (Absolutschwelle)	40
5.3	Idealisierte psychometrische Funktionen eines Experiments nach der Kostanzmethode zur Unterschiedsschwellenbestimmung mit zwei Antwortkategorien	43
5.4	Idealisierte psychometrische Funktionen eines Experiments nach der Konstanzmethode zur Unterschiedsschwellenbestimmung mit drei Antwortkategorien	43
5.5	Idealisierte psychometrische Funktionen dreier Experimente mit verschiedenen Antwortparadigmen	47
5.6	Exemplarischer Verlauf bei einem Simple-Staircase-Verfahren	48
5.7	Exemplarischer Verlauf bei einem Transformed-Up/Down-Verfahren	49
6.1	Foto des verwendeten Versuchsaufbaus	51
6.2	Prinzip einer Impedanz-Regelung	54
6.3	Prinzip einer Admittanz-Regelung	54
6.4	Wirkgefüge bei der Ansteuerung des Versuchsaufbaus	56
6.5	Schematische Darstellung des rotatorischen Haptiksimulators	58

6.6	Ersatzschaltbilder für den Haptiksimulator	60
	a Elektrisches Ersatzschaltbild	
	b Mechanisches Ersatzschaltbild	
6.7	Blockschaltbild des verwendeten Impedanz-Systems	62
6.8	Vergleich zwischen der Signum- und der Tangens-Hyperbolicus-Funktion (Reibungsmodellierung)	63
6.9	Blockschaltbild des verwendeten Admittanz-Systems	64
6.10	Exemplarische Drehmoment-Drehwinkel-Messung	67
6.11	Exemplarische Messung der Eingangsgröße Nutzer-Drehmoment M_{Nutzer} und der Ausgangsgröße Winkelgeschwindigkeit ω_{ist}	69
6.12	Exemplarischer Soll-Ist-Vergleich für die Winkelgeschwindigkeit beim Admittanz-System	69
7.1	Signifikanzniveau α als Funktion der Stichprobengröße n bei einem zweiseitigen t -Test für verbundene Stichproben	71
7.2	Lane Change Test: Sitzbox und Screenshot	74
	a Sitzbox mit Lenkrad für den Lane Change Test	
	b Screenshot des Lane Change Tests	
7.3	Idealisierter Drehmomentverlauf der im Experiment verwendeten Rastung	76
7.4	Verwendete Griffarten in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser	78
7.5	Boxplots der ermittelten Wahrnehmungsschwellen	79
7.6	Boxplots der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit der Ablenkung	80
7.7	Boxplots der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser	81
7.8	Boxplots der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit von der Rastung	82
7.9	Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen	84
7.10	Boxplots der ermittelten Weber-Konstanten	84
7.11	Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Ablenkung	85
7.12	Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser	86
7.13	Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Rastung	87
7.14	Illusion zur Helligkeitskonstanz von ADELSON (1995)	91
	a Illusion zur Helligkeitskonstanz - Originaldarstellung	
	b Illusion zur Helligkeitskonstanz - Auflösung	
7.15	Beim Konstanzleistungsversuch verwendete Sitzkiste	92
	a Betätigung in horizontaler Einbaulage	
	b Betätigung in vertikaler Einbaulage	
7.16	Schematische Darstellung des translatorischen Haptiksimulators	93
7.17	Kraft-Weg-Verläufe der Charakteristiken A und B	94
	a Kraft-Weg-Verläufe A und B	
	b Skalierung am Beispiel von Charakteristik B	
7.18	Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen - gruppiert nach der Versuchsbedingung	96
7.19	Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen - gruppiert nach der Charakteristik des Kraft-Weg-Verlaufs	97

7.20	Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Einbaulage	98
7.21	Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Aufklärung über das Untersuchungsziel	99
7.22	Schematische Darstellung des rotatorischen Haptiksimulators	103
7.23	Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment	109
7.24	Boxplots der Differenzen der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment	110
7.25	Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung	112
7.26	Boxplots der Differenzen der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung	113
7.27	Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung	115
7.28	Boxplots der Differenzen der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung	116
A.1	Verteilung der Differenzen unter der Alternativhypothese	144
A.2	Verteilung der Differenzen unter der Nullhypothese	144
A.3	Verteilungen der Mittelwerte bei einem Stichprobenumfang von $n = 9$.	145
A.4	Verteilungen der Mittelwerte bei einem Stichprobenumfang von $n = 16$	145
A.5	Veranschaulichung des α - und β -Fehler bei einem Stichprobenumfang von $n = 9$ und einer mittleren Reaktionszeitdifferenz von 0,5 s	146
A.6	Veranschaulichung der Teststärke $1 - \alpha$ bei einem Stichprobenumfang von $n = 9$ und einer mittleren Reaktionszeitdifferenz von 0,5 s	147
A.7	Veranschaulichung des α - und β -Fehler bei einem Stichprobenumfang von $n = 16$ und einer mittleren Reaktionszeitdifferenz von 0,5 s	148
A.8	Indifferentbereich bei einer zu kleinen Stichprobe	149
A.9	Indifferentbereich bei einer zu großen Stichprobe	150
A.10	Veranschaulichung der Situation mit optimalem Stichprobenumfang . .	151
A.11	Veranschaulichung der Situation mit optimalem Stichprobenumfang (zweiseitig)	152
A.12	Bestimmung des optimalen Stichprobenumfangs (einseitig)	154
A.13	Bestimmung des optimalen Stichprobenumfangs (zweiseitig)	155
A.14	Nonzentrale und zentrale t -Verteilung	157
A.15	Regelparameter k_p und Grenzfrequenz f_g	162
	a Regelparameter k_p	
	b Grenzfrequenz f_g	
A.16	Technologieschema für das Prinzip der virtuellen Masse (einfach)	163
A.17	Technologieschema für das Prinzip der virtuellen Masse (komplex) . . .	163
A.18	Blockschaltbild für das Prinzip der virtuellen Masse	164
A.19	Berechnungsmodell aus SWINDELLS (2007) bzw. SWINDELLS, MACLEAN und BOOTH (2009)	165
A.20	Bestimmung des Signifikanzniveaus (G*POWER-Screenshot) für Experiment 1	168
A.21	Bestimmung des Signifikanzniveaus (G*POWER-Screenshot) für Experiment 2	169

A.22 Bestimmung des Signifikanzniveaus (G*POWER-Screenshot) für Experiment 3	173
--	-----

Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassung von Untersuchungen aus dem Bereich der haptischen Wahrnehmung	13
3.1	Klassifikation der Mechanosensoren der unbehaarten Haut nach ihrer funktionalen Charakteristik	21
3.2	Die vier Mechanosensoren der unbehaarten Haut	21
4.1	Statistische Kenngrößen normalverteilter Stichproben und Populationen	26
4.2	Richtige und falsche Entscheidungen beim binären Entscheidungskonzept von Neyman und Pearson	29
4.3	Bezeichnungen und Zusammenhänge für Cohens δ sowie deren Schätzer und Konvention zur Beurteilung der Effektgröße in Abhängigkeit von der Stichprobenart	31
4.4	Voraussetzungen für drei ausgewählte Hypothesentests	33
5.1	Terminologie und Definitionen im Zusammenhang mit dem Schwellenkonzept der Psychophysik	37
5.2	Hypothetische Versuchsergebnisse zweier Experimente nach der Grenz- methode	44
	a Absolutschwelle	
	b Unterschiedsschwelle	
6.1	Beschreibung der wesentlichen Hardware-Komponenten	58
6.2	Variablen, Parameter und Hilfsgrößen für die Streckenmodellierung . .	60
7.1	Parameter für das verwendete Staircase-Verfahren	77
7.2	Statistische Kennwerte des Probandenkollektivs	77
7.3	Gewählte Griffvarianten in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser	78
7.4	Statistische Kennwerte der Wahrnehmungsschwellen	79
7.5	Statistische Kennwerte der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit von der Ablenkung	80
7.6	Hypothesentests für die Differenzen der Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit von der Ablenkung	80
7.7	Statistische Kennwerte der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser	81
7.8	Hypothesentests für die Differenzen der Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser	81
7.9	Statistische Kennwerte der Verhältnisse der Wahrnehmungsschwellen .	82
7.10	Hypothesentests zu den Verhältnissen der Wahrnehmungsschwellen . .	82
7.11	Statistische Kennwerte der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit von der Rastung	83

7.12	Hypothesentests für die Differenzen der Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit von der Rastung	83
7.13	Statistische Kennwerte der Unterschiedsschwellen und Weber-Konstanten	85
7.14	Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Ablenkung	85
7.15	Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Ablenkung	86
7.16	Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser	86
7.17	Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser	87
7.18	Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen – Differenzen in Abhängigkeit von der Rastung	87
7.19	Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Rastung	88
7.20	Zusammenfassung der Ergebnisse der Hypothesentests	88
7.21	Zusammenfassung der ermittelten Schwellwerte	89
7.22	Statistische Kennwerte des Probandenkollektivs	96
7.23	Statistische Kennwerte der ermittelten Unterschiedsschwellen	97
7.24	Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Einbaulage	98
7.25	Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Einbaulage	99
7.26	Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Aufklärung über das Untersuchungsziel	100
7.27	Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Aufklärung über das Untersuchungsziel	100
7.28	Zusammenfassung der Ergebnisse der Hypothesentests	100
7.29	Zusammenfassung der ermittelten Unterschiedsschwellen	101
7.30	Ausprägungen S , M und L für die drei Parameter Massenträgheitsmoment J , Dämpfung d und Reibung M_{Reib}	104
7.31	Parameter für das verwendete Staircase-Verfahren	107
7.32	Statistische Kennwerte des Probandenkollektivs	108
7.33	p -Werte für paarweise zweiseitige t -Tests für verbundene Stichproben für die Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment	109
7.34	Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment	111
7.35	p -Werte für paarweise zweiseitige t -Tests für verbundene Stichproben für die Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung	112
7.36	Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung	114
7.37	p -Werte für paarweise zweiseitige t -Tests für verbundene Stichproben für die Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung	115
7.38	Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung	117
7.39	Wiederholung von Tabelle 7.33	118
7.40	Wiederholung von Tabelle 7.35	119
7.41	Wiederholung von Tabelle 7.37	120

A.1	Statistische Kennwerte der ermittelten prozentualen Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment	174
A.2	Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment	175
A.3	Statistische Kennwerte der ermittelten prozentualen Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung	175
A.4	Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung	176
A.5	Statistische Kennwerte der ermittelten prozentualen Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung	176
A.6	Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung	177

1 Einleitung und Gliederung der Arbeit

Bei der ergonomischen Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen geht es darum, die Technik an die Eigenschaften des Menschen anzupassen. Die Konzeption benutzerfreundlicher Gebrauchsgegenstände umfasst - neben der Berücksichtigung der Forderung nach Ästhetik - die Optimierung der Handhabbarkeit und des Komforts. Der subjektive Eindruck eines Gebrauchsgegenstands hängt neben gegenstandsunabhängigen Faktoren wie Stimmung oder Tagesform und der eigenen Vorstellung auch von den entsprechenden Eindrücken auf Sinnesorgane ab (BUBB, 2008).

Ergonomie

Die Eindrücke auf Sinnesorgane stellen aus Sicht der Systemergonomie eine Informationsaufnahme im informationstechnischen Modell des Menschen dar. Nach der Verarbeitung erfolgt die Informationsumsetzung letztendlich durch die oberen und unteren Extremitäten und durch die Sprache (BUBB & SCHMIDTKE, 1993). Dabei besteht bei den haptischen Sinnesorganen aufgrund der anatomischen Beschaffenheit eine besonders enge Verbindung zwischen Informationsaufnahme und -umsetzung.

Systemergonomie

Man unterscheidet - wie in Kapitel 2 näher erläutert - beim Führen eines Fahrzeugs zwischen sogenannten primären, sekundären und tertiären Aufgaben. Analog zu den Aufgaben werden auch die dazugehörigen Stellteile beziehungsweise Bedienelemente mit dieser dreiteiligen Unterscheidung bezeichnet. Für sekundäre und tertiäre Stellteile werden zumeist translatorische und rotatorische Bedienelemente¹, mit - im Vergleich zu primären Stellteilen - relativ geringem Kraftniveau verwendet.

sekundäre und tertiäre Stellteile

Der optische Sinneskanal ist im Wesentlichen durch die primären Fahraufgaben ausgelastet. Die Rückmeldung über die erfolgreiche Betätigung sekundärer und tertiärer Stellteile erfolgt daher in der Regel durch haptische und/oder akustische Signale. Dies ist besonders bei Funktionen von Bedeutung, bei denen die eigentliche Funktionsauslösung nicht direkt wahrnehmbar ist - Beispiele hierfür sind Nebelschlussleuchten oder Heckscheibenheizung. Direkt wahrnehmbar ist die eigentliche Funktionsauslösung etwa bei der Scheibenwischersteuerung oder der Lautstärkenregulierung.

haptische Rückmeldung

Verglichen mit der haptischen Rückmeldung ist die akustische Rückmeldung im Straßenverkehr als weniger zuverlässig zu betrachten. Die vorliegende Arbeit befasst sich hauptsächlich mit der Untersuchung grundlegender menschlicher Eigenschaften in Bezug auf die haptische Wahrnehmung von rotatorischen Bedienelementen, wie sie häufig in Kraftfahrzeugen zur Bedienung von sekundären und tertiären Fahraufgaben zum Einsatz kommen. Untersucht wird zum einen der Einfluss der kognitiven Belastung und der Einbaulage auf die haptische Wahrnehmung der Bedienelemente und zum anderen die Unterschiedsschwellen für die mechanischen Parameter Massenträgheits-

Schwerpunkt der Arbeit

¹ Umgangssprachlich *Schalter*, *Taster* und *(Dreh-)Knöpfe* genannt.

moment, viskose Reibung (kurz Dämpfung) und Coloumb'sche Reibung (kurz Reibung) in gegenseitiger Abhängigkeit voneinander.

Aufbau der Arbeit

Nach der Formulierung der Forschungsfragen und der Diskussion relevanter Arbeiten in Kapitel 2 erfolgt eine Auseinandersetzung mit den Grundlagen der haptischen Wahrnehmung in Kapitel 3. Die Basis der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit den Forschungsfragen sind Probandenversuche. Aufgrund der relativ großen Streuungen in den Ergebnissen, ist ohne ein grundlegendes Verständnis der verwendeten statistischen Verfahren die Interpretation der Ergebnisse nur schwer möglich. In Kapitel 4 werden daher die zum Verständnis notwendigen statistischen Grundlagen vermittelt. Bei den Experimenten in Kapitel 7 kommen sogenannte psychophysische Methoden zum Einsatz – die Grundlagen hierzu werden in Kapitel 5 erklärt. Nach der technischen Beschreibung des Versuchsaufbaus in Kapitel 6 beschreibt Kapitel 7 die Hintergründe, die Durchführung und die Ergebnisse der Experimente. Kapitel 8 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse ab.

2 Zielsetzung und Stand der Forschung

2.1 Bedienelemente im Kraftfahrzeug	3
2.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	5
2.3 Relevante Forschungsarbeiten aus dem Bereich der rotatorischen Bedienelemente	7
2.4 Zusammenstellung von Untersuchungen zu Schwellwerten des haptischen Systems	12

Manuelle Bedienelemente finden sich in fast allen Bereichen, in denen Menschen mit technischen Einrichtungen interagieren. Die vorliegende empirische Arbeit beschäftigt sich mit der ergonomieorientierten Technikgestaltung einer bestimmten Klasse von Bedienelementen – den rotatorischen Bedienelementen. Dabei wird der Aspekt der Bedienhaptik betrachtet – andere Aspekte wie Akustik und Oberflächenhaptik werden in den Versuchen nicht systematisch variiert, sondern konstant gehalten.

Bedienhaptik

Rotatorische Bedienelemente finden nicht nur in Kraftfahrzeugen eine breite Anwendung. In den folgenden Untersuchungen sind die Rahmenbedingungen dennoch an die Situation im Kraftfahrzeug angelehnt, um den nötigen Praxisbezug herzustellen. Die Erkenntnisse der Arbeit sind ungeachtet dessen prinzipiell auf andere Bereiche übertragbar.

Praxisbeispiel
Kraftfahrzeug

Im Folgenden wird daher ein kurzer Überblick über Bedienelemente im Fahrzeug gegeben. Nach der Formulierung der Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit erfolgt eine Diskussion relevanter Forschungsarbeiten. Abschließend wird eine Übersicht über die Untersuchungsergebnisse der relevanten Arbeiten zu Schwellwerten des haptischen Systems mit dem Schwerpunkt Fähigkeiten der Hand gegeben.

Gliederung

2.1 Bedienelemente im Kraftfahrzeug

Heutige Kraftfahrzeuge bieten dem Nutzer eine Vielzahl von Funktionen, wobei ein Großteil der Funktionen nicht direkt mit der Fahraufgabe in Verbindung stehen (REISINGER & WILD, 2008, S. 115). Die sich aus den Funktionen ergebenden und damit für das Fahren notwendigen Aufgaben unterteilt man gemäß BUBB (2001, S. 155–156) in drei Unteraufgaben:

- primäre,
- sekundäre und
- tertiäre Fahraufgaben

Dabei besteht die primäre Fahraufgabe aus dem eigentlichen Fahrprozess und beinhaltet demnach die Beeinflussung der Längs- und Querdynamik. Sekundäre Fahraufgaben umfassen indirekt mit der Fahraufgabe verbundene Aufgaben, die in Abhängigkeit von

primäre, sekundäre und tertiäre Fahraufgabe

den Verkehrs- und Umweltbedingungen anfallen. Beispiele hierfür sind die Betätigung der Hupe, des Lichtschalters oder des Blinkers. Die Bedienung neuerer Systeme aus dem Bereich der Fahrerassistenzsysteme wie Abstandsregeltempomat oder Stauassistent wird ebenfalls den sekundären Fahraufgaben zugeordnet. Dahingegen umfassen tertiäre Fahraufgaben die Bedienung von Systemen, die der Befriedigung von Komfort- und Infotainmentbedürfnissen dienen. Hierzu zählen beispielsweise die Bedienung des Navigationssystems und der Freisprecheinrichtung.

2.1.1 Klassifikation

Entsprechend den drei Fahraufgaben lassen sich die dazugehörigen Bedienelemente oder Stellteile in

- primäre,
- sekundäre und
- tertiäre Stellteile

unterteilen. Dabei zeichnen sich primäre Stellteile im Vergleich zu sekundären und tertiären Stellteilen durch ein in der Regel deutlich höheres Kraftniveau aus (BUBB, 2001, S. 164). Primäre Stellteile allgemein werden in BUBB (2001, Kapitel 10.4) diskutiert. WOLF (2009) untersucht ausführlich das Lenkgefühl. Das höhere Kraftniveau der primären Stellteile Lenkrad, Wählhebel, Kupplungs- und Bremspedal war zumindest in der Vergangenheit direkt an die jeweilige mechanische Funktion gekoppelt.

sekundäre
und tertiäre
Stellteile

Stellteile für sekundäre und tertiäre Fahraufgaben werden häufig als translatorische oder rotatorische Bedienelemente in Form von translatorischen Tastern oder Schaltern und Drehstellern ausgeführt und lösen in der Regel rein elektrische oder elektronische Funktionen aus. Üblich sind aber auch als translatorisch wahrgenommene, aber rotatorisch gelagerte Bedienelemente, wie zum Beispiel Lenkstockhebel oder Fensterheber sowie kombinierte Dreh-Drück-Steller. Allen gemeinsam ist, dass sekundäre und tertiäre Stellteile in der Regel mit den Fingern oder der Hand betätigt werden. ZEILINGER (2005); REISINGER und WILD (2008) sowie REISINGER (2009) diskutieren ausführlich die verschiedenen Arten sekundärer und tertiärer Stellteile.

2.1.2 Das Konzept des zentralen Bedienelements

Im Rahmen der Experimente in Kapitel 7 sind die Versuchsbedingungen an die Situation im Kraftfahrzeug angelehnt. Dabei erfolgt in zwei der drei Experimente eine Orientierung an einem zentralen Bedienelement in einer Ausprägung als Dreh-Drück-Steller in der Mittelkonsole. Dreh-Drück-Steller – teilweise mit Joystick-Funktion und/oder Toucheingabe-Fähigkeit – fungieren bei Automobilherstellern wie Audi, BMW, Citroën, Jaguar, Mercedes-Benz und Porsche zum Teil als zentrales Eingabegerät zur Navigation durch die teilweise komplexen Menüstrukturen (GLEICH, 2012, S. 118). Abbildung 2.1 zeigt exemplarisch zentrale Bedienelemente in Form von Dreh-Drück-Stellern dreier Premiumhersteller.



(a) MMI-Controller



(b) iDrive-Controller



(c) COMAND-Controller

Abbildung 2.1: Konzept des zentralen Bedienelements (ausgeführt als Dreh-Drück-Steller) verschiedener Premiumhersteller – iDrive- und COMAND-Controller mit zusätzlicher Joystick-Funktion. (a): MMI-Controller, Audi A3 (2013, 3. Generation), Quelle: Audi AG, Pressefoto, Fotonummer A3130004 (b): iDrive-Controller, BMW 7er-Reihe (2012, 5. Generation), Quelle: BMW AG, Pressefoto, Fotonummer P90094292 (c): COMAND-Controller, Mercedes-Benz S-Klasse (2013, W222), Quelle: Daimler AG, Pressefoto, Fotonummer 13C255_19

2.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der ergonomieorientierten Technikgestaltung rotatorischer Bedienelemente in einer Form wie sie häufig für sekundäre und tertiäre Fahraufgaben verwendet werden. Für eine ergonomieorientierte Technikgestaltung müssen technische Grenzwerte festgelegt werden, die sich aus den Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung ableiten lassen. Ziel ist es, die Auslegung dieser Klasse von Bedienelementen auf eine breitere und wissenschaftlich fundiertere Basis als bisher zu bringen. In der industriellen Praxis spielen in diesem Bereich oft noch Einzelmeinungen einzelner Mitarbeiter eine große Rolle, wie auch das Interview mit GRUNWALD (2013) bestätigt.

ergonomieorientierte Technikgestaltung

2.2.1 Abgrenzung

Die Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit Fragestellungen, die die Bedienhaptik rotatorischer Bedienelemente betreffen. Darunter wird im Folgenden die Wahrnehmung der beim Bedienvorgang durch das Bedienelement auf den Nutzer wirkenden Kräfte beziehungsweise Drehmomente verstanden. Die Kräfte sind im Allgemeinen zeit- und positionsabhängig. In einem der drei Experimente in Kapitel 7 werden zusätzlich translatorische Bedienelemente in Form von kurzhubigen Tastern untersucht, da dies in diesem Zusammenhang den allgemeineren Fall darstellt, siehe Kapitel 7.2.

Bedienhaptik

Die Bedienhaptik ist nur ein Aspekt, der bei der Wahrnehmung eines Bedienelements eine Rolle spielt. Prinzipiell kann man bei der Technikgestaltung von Bedienelementen mehrere Eigenschaften unterscheiden:

weitere Aspekte

2 Zielsetzung und Stand der Forschung

- Optik/Design
- Akustik
- Haptik
 - Formgebung, aber auch Formkodierung
 - Oberflächenhaptik
 - *Bedienhaptik* (auch Betätigungshaptik genannt)

“Klick-Geräusch”

Eng verbunden – aus technischer Sicht aber auch aus Sicht einer ganzheitlichen multi-modalen Wahrnehmung des Bedienvorgangs durch den Nutzer – mit der Bedienhaptik bei rastenden rotatorischen Bedienelementen ist die Akustik in Form eines typischerweise impulshaften “Klick-Geräuschs”. TREIBER (2011) und ANGUELOV (2009) setzen sich mit der Beschreibung und Evaluation des akustischen Feedbacks dieser speziellen Art von Geräusch auseinander.

Formkodierung

Ein Standardwerk zur Formkodierung von Eingabegeräten ist JENKINS (1947a) beziehungsweise JENKINS (1947b, 1947c, 1947d). Diskutiert wird das Thema unter anderem in BUBB (2001, Kapitel 10.3). Prominentes Beispiel ist die Formkodierung von Bedienelementen zur elektrischen Sitzverstellung in Kraftfahrzeugen, siehe Abbildung 2.2.



Abbildung 2.2: Formkodiertes Bedienelement zur elektrischen Sitzverstellung, Quelle: Daimler AG, Mercedes-Benz S-Klasse (2013, W222), Pressefoto, Fotonummer 13C302_06

2.2.2 Formulierung der Forschungsfragen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit gibt es drei Untersuchungsschwerpunkte, die in drei Experimenten in Kapitel 7 bearbeitet werden.

Experiment 1 Im ersten Experiment in Kapitel 7.1 geht es um die Frage, inwieweit die Untersuchungsergebnisse von Experimenten zur Schwellwertbestimmung unter Laborbedingungen auf die Praxis übertragbar sind. Hierzu wird ein Schwellwertexperiment für den Parameter viskose Reibung beziehungsweise Dämpfung an einem rotatorischen Bedienelement unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Hauptziel des Experiments ist es, den Einfluss der kognitiven Belastung auf ein Schwellwertexperiment abzuschätzen.

Das zweite Experiment beschäftigt sich mit der Frage, ob Ergebnisse aus Schwellwertexperimenten, die für eine bestimmte Einbaulage durchgeführt wurden, auf andere Einbausituationen übertragbar sind. Für rotatorische Bedienelemente gibt es zwar bereits eine erste Untersuchung, jedoch stellt die Betätigung eines translatorischen Bedienelements hier den allgemeineren Fall dar. Aus diesem Grund wird das Experiment in Kapitel 7.2 mit translatorischen Bedienelementen in zwei verschiedenen Einbaulagen durchgeführt. Hauptziel des Experiments ist es, herauszufinden, ob es im Bereich der Haptik eine sogenannte Konstanzleistung gibt. Die Fähigkeit des Wahrnehmungsapparats zur Konstanzleistung ist vor allem aus dem Bereich des Sehens – zum Beispiel Größen- und Helligkeitskonstanz – bekannt.

Experiment 2

Experimente zur Schwellwertbestimmung im Bereich der Haptikforschung betrachten zumeist isoliert einen einzelnen mechanischen Parameter ohne Variation verbleibender mechanischer Parameter. In Kapitel 7.3 wird daher untersucht, wie sich die Schwellwerte für die mechanischen Parameter Massenträgheit, Dämpfung und Reibung bei rotatorischen Bedienelementen gegenseitig beeinflussen. Hauptziel des dritten Experiments ist es, die Ausprägung sogenannter Maskierungseffekte abzuschätzen. Die untersuchten Parameterbereiche sind dabei im Hinblick auf einen möglichst hohen Praxisbezug gewählt.

Experiment 3

Bei den Experimenten werden erkennbare Unterschiede in Form von Wahrnehmungs- und/oder Unterschiedsschwellen ermittelt und die Ergebnisse werden einer statistischen Betrachtung unterzogen. Es bleibt aber anzumerken, dass es einen Unterschied zwischen erkennbaren und von Nutzern akzeptierten Unterschieden gibt.

2.3 Relevante Forschungsarbeiten aus dem Bereich der rotatorischen Bedienelemente

Nachfolgend werden relevante Arbeiten aus dem Bereich der rotatorischen Bedienelemente diskutiert. Interessant in Bezug auf translatorische Bedienelemente sind HATZFELD (2013); ANGUELOV (2009); REISINGER (2009, Kapitel 6); REISINGER und WILD (2008); WEIR, PESHKIN, COLGATE, RANKIN und JOHNSTON (2004); WEIR (2003); KOSAKA und WATANABE (1996); BÖRSCHLEIN (1994) sowie OSUMI, INUZUKA und ITO (1990).

translatorischer Bedienelemente

Rastende rotatorische Bedienelemente werden fast ausschließlich anhand quasi-statischer Drehmoment-Drehwinkel-Messungen charakterisiert, spezifiziert und interpretiert. REISINGER (2009, Kapitel 5.6) beschäftigt sich unter anderem mit der Frage, ob nicht eine andere Darstellungsform besser zur intuitiven Beurteilung der haptischen Eigenschaften geeignet ist. REISINGER (2009, Kapitel 5.6) kann anhand eines Experiments mit 26 Probanden zeigen, dass die Integraldarstellung eher dem inneren Modell des Menschen beim Bedienen rastender rotatorischer Bedienelemente entspricht. Die Integraldarstellung beschreibt die durch den Nutzer aufzubringende mechanische Arbeit.

Integraldarstellung

Darüber hinaus wird in einem weiteren Experiment eine Zuordnung von technischen Parametern des quasi-statischen Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs zu der subjektiven

Parametrisierung

2 Zielsetzung und Stand der Forschung

Wahrnehmung gesucht. REISINGER (2009, Kapitel 5.7) variiert dazu systematisch die Steigung der ansteigenden und absteigenden Flanke des Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs und untersucht, wie sich diese Variation auf die subjektiven Urteile von 30 Probanden auswirkt. Andere Parameter wie beispielsweise die Drehmomentamplitude (25 mNm) oder der Knopfdurchmesser (35,5 mm) bleiben gleich.

Beispiel Parametrisierung

Abbildung 2.3 zeigt einen nach REISINGER (2009, Kapitel 5.7) als hochwertig empfundenen Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf. Die steile Flanke im Bereich der stabilen Ruhelage vermittelt eine hohe Präzision (REISINGER, 2009, S. 101, 105), wohingegen die flache, abfallende Flanke insgesamt einen geringen Härteeindruck vermittelt (REISINGER, 2009, S. 94, 101, 105). Die steile Flanke hat dabei einen Anteil von 5% an der Gesamt-Periode und die fallende Flanke einen Anteil von 50%. Untersucht wurden Flankenanteile von 5% bis 95% in insgesamt fünf Stufen (REISINGER, 2009, S. 89).

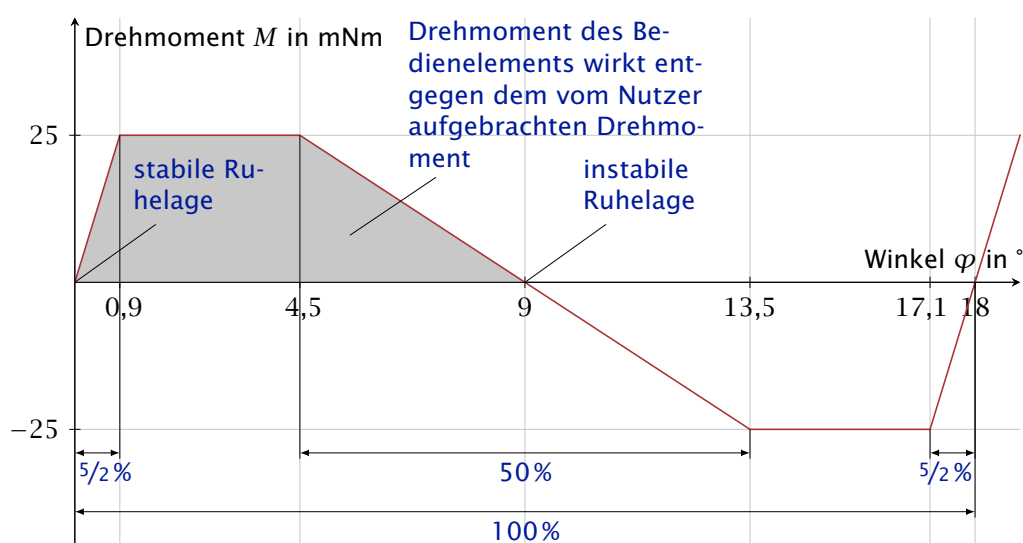


Abbildung 2.3: Darstellung eines Detents bzw. einer Rastung einer gemäß Reisinger (2009, Kapitel 5.7) als hochwertig wahrgenommenen Drehmoment-Charakteristik (idealisierte quasi-statische Drehmomentverlauf ohne Reibungshysterese, Knopfdurchmesser 35,5 mm). Die ansteigende Flanke hat einen Anteil von 5% an der Gesamt-Periode, wohingegen die fallende Flanke einen Anteil von 50% aufweist. Das durch das Bedienelement erzeugte Drehmoment wirkt im grau hinterlegten Bereich dem vom Nutzer aufgetragenen Drehmoment entgegen. Ab dem Überschreiten der instabilen Ruhelage wirkt das durch das Bedienelement erzeugte Drehmoment in Richtung des vom Nutzer aufgetragenen Drehmoments.

Beispiel Integraldarstellung

In Abbildung 2.4 ist der dazugehörige Verlauf der aufzuwendenden mechanischen Arbeit dargestellt. In der Integraldarstellung sind sowohl die stabilen Ruhelagen als auch die instabile Ruhelage leicht zu identifizieren. Wenn beide Flanken einen Anteil von jeweils 5% an der Gesamt-Periode aufweisen (nahezu rechteckiger Verlauf), dann wird diese Drehmoment-Drehwinkel-Charakteristik subjektiv als "hart" bewertet (REISINGER, 2009, S. 94) – dies würde sich deutlich anhand der Integraldarstellung ablesen und vorhersagen lassen.

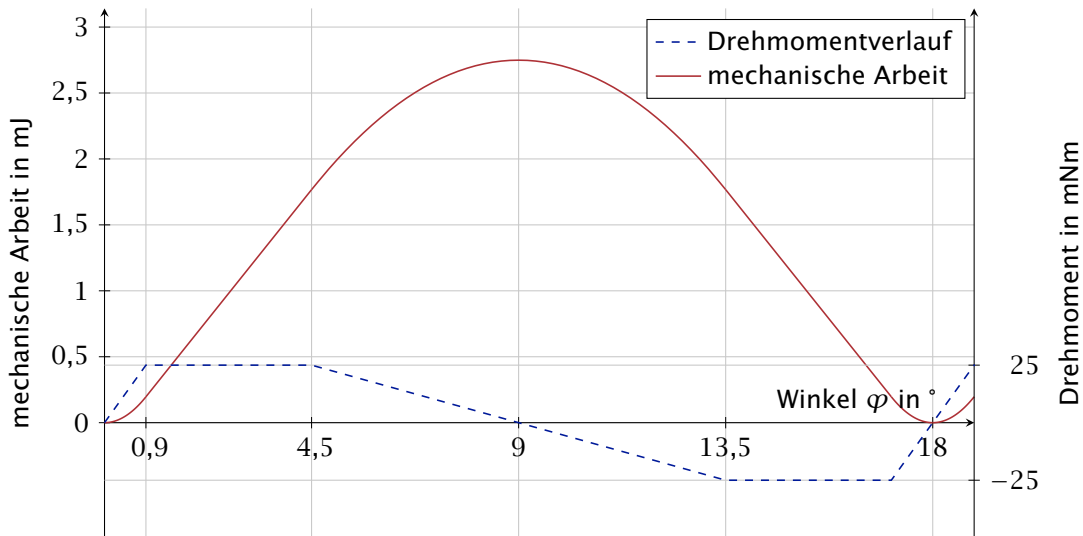


Abbildung 2.4: Das subjektive haptische Empfinden lässt sich nach Reisinger (2009, Kapitel 5.6) gut durch das Integral des Drehmomentverlaufs beschreiben. Das Diagramm zeigt exemplarisch den Verlauf der durch den Nutzer aufzubringenden mechanischen Arbeit des Drehmomentverlaufs aus Abbildung 2.3. Zur besseren Unterscheidung zwischen Drehmoment und Arbeit ist die Arbeit in Joule angegeben.

Anknüpfend an die Ergebnisse von REISINGER (2009, Kapitel 5.7) untersuchen PAULIG (2013) beziehungsweise PAULIG, SCHMIDT und LEMMER (2011) anhand einer Probandenstudie mit 43 Teilnehmern, inwieweit sich die Faktoren

weitere Parametrisierung

- Drehmomentamplitude,
- Reibungsanteil (Coloumb'sche Reibung) und
- Verlaufsform

auf das subjektive Empfinden von rotatorischen Bedienelementen auswirken. Bei der Verlaufsform wird wie bei REISINGER (2009, Kapitel 5.7) der Anteil der steigenden und fallenden Flanke an der Gesamt-Periode variiert. Allerdings ergibt die Summe der Flanken-Anteile stets 100%, was zu einem dreiecksförmigen oder sägezahnförmigen Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf führt. Die konkreten Werte der untersuchten Parameterbereiche der drei Faktoren werden nicht angegeben.

Eine aufwändige statistische Analyse führt zu dem Ergebnis, dass die Probanden eine "geringe" Drehmomentamplitude in Kombination mit einem "mittleren" oder "hohen" Reibungsanteil bei gleichzeitig "geringem" Anteil der steigenden Flanke an der Gesamt-Periode bevorzugen. Das Ergebnis in Bezug auf die Verlaufsform deckt sich mit dem Resultat der oben genannten Untersuchung von REISINGER (2009, Kapitel 5.7). Hervorzuheben ist, dass eine Minimierung der Coloumb'schen Reibung nicht zwangsläufig zu einem besseren Qualitätseindruck führt.

Ergebnis

Den größten relativen Einfluss der drei untersuchten Faktoren auf die subjektive Beurteilung hat dabei die Drehmomentamplitude (54,2%), gefolgt von der Verlaufsform (32,4%) und dem Reibungsanteil (13,3%).

Aufgrund der fehlenden quantitativen Angaben zu den untersuchten Parameterberei-

2 Zielsetzung und Stand der Forschung

chen der drei Faktoren fällt es allerdings schwer, aus den Ergebnissen von PAULIG, SCHMIDT und LEMMER (2011) konkrete Empfehlungen für die Praxis abzuleiten.

Tangenti-
alkraft vs.
Drehmoment

Das notwendige Drehmoment zum Überwinden des mechanischen Widerstands eines typischen rotatorischen Bedienelements wird letztendlich durch am Umfang wirkende Tangentialkräfte hervorgerufen. PAULIG (2013) beziehungsweise PAULIG, GOHLKE, SCHMIDT und LEMMER (2011) können in einem anderen Experiment mit 20 Probanden zeigen, dass letztendlich die wirksame Tangentialkraft und nicht das Drehmoment die entscheidende Größe bei der Beurteilung von quasi-statischen Drehmomentunterschieden ist. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die in der vorliegenden Arbeit gefundenen Schwellwertergebnisse aus Experiment 3 – siehe Kapitel 7.3 – prinzipiell auf andere Knopfdurchmesser und Parameterbereiche übertragbar sind, wenn eine Umrechnung auf die am Umfang wirksamen Größen erfolgt.

passive Be-
diennelemente

Mit der Gestaltung der haptischen Rückmeldung zentraler aktiver rotatorischer Bedienelemente beschäftigt sich HAMPEL (2011). Der Fokus der Arbeit liegt auf der Erarbeitung von Gestaltungsrichtlinien der haptischen Rückmeldung für aktive rastende Drehsteller. Konventionelle oder passive rotatorische Bedienelemente erzeugen die haptische – aber auch die akustische Rückmeldung – zumeist aus einer Kombination eines elastischen Elements (Feder) mit einer Rastscheibe. Das elastische Element dient zur Zwischenspeicherung der potentiellen Energie.

aktive Bedien-
elemente

Im Gegensatz dazu erzeugen aktive Bedienelemente die haptische Rückmeldung künstlich, beispielsweise durch einen Elektromotor, siehe auch ZEILINGER (2005, Kapitel 3.2). Im Bereich der Unterhaltungselektronik sind derartige Force-Feedback-Systeme schon lange etabliert. Aktive Bedienelemente kommen in der automobilen Praxis – nicht zuletzt aus Kostengründen – selten zum Einsatz. Das bekannteste Beispiel für einen aktiven Drehsteller ist der iDrive-Controller, wie er in der vierten Generation (E65) der BMW 7er-Reihe zum Einsatz kommt (HAMPEL, 2011, S. 47; DONATH, 2002). Ein Vorteil aktiver Bedienelemente ist, dass die haptische Rückmeldung etwa in Abhängigkeit von der aktuell bedienten Funktion variiert oder angepasst werden kann. Zum Beispiel kann das Ende einer Liste durch die Simulation eines mechanischen Anschlags dem Nutzer – nicht nur über den optischen und akustischen, sondern auch über den haptischen Sinneskanal vermittelt werden.

Vielzahl von
Experimenten

In einer Vielzahl von Experimenten mit im Mittel rund 50 Probanden untersucht HAMPEL (2011) – im Rahmen einer mehrteiligen Untersuchung mit unterschiedlichen Probandengruppen – unter anderem, wie sich die Parameter Drehmomentamplitude, Form des Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs und die Länge der Periode (Anzahl der Rastungen pro Umdrehung) auf die Stellgenauigkeit auswirken (HAMPEL, 2011, Kapitel 5.1). Die Probanden haben dabei die Aufgabe, ein rotatorisches Bedienelement mit einem Durchmesser von 39 mm (bei den restlichen Experimenten wird ein Durchmesser von 35 mm verwendet; HAMPEL, 2011, S. 58–59) um eine gewisse Anzahl von Rastungen zu bewegen. Die für eine hohe Stellgenauigkeit empfohlene Drehmomentamplitude von 60 mNm (HAMPEL, 2011, Kapitel 5.1.4) – bei einem Durchmesser von 39 mm – weicht stark von den in der Praxis üblichen Werten ab – üblicherweise ist die Drehmomentamplitude deutlich geringer. Bei der Mehrzahl der Experimente in HAMPEL (2011) erfolgt keine statistische Betrachtung der Versuchsergebnisse – somit wird auf eine weitere Diskussion der Ergebnisse verzichtet.

2.3 Relevante Forschungsarbeiten aus dem Bereich der rotatorischen Bedienelemente

Die Arbeit von ANGUELOV (2009) hat ebenfalls die subjektive Beurteilung von Bedienelementen zum Thema. Ziel der Arbeit ist unter anderem, die subjektive Beurteilung der haptischen Rückmeldung von translatorischen und rotatorischen Bedienelementen mit physikalischen Messgrößen zu verbinden. Darüber hinaus beschäftigt sich der Autor mit der akustischen Rückmeldung – auch in Kombination mit der haptischen Rückmeldung – von Bedienelementen.

weitere Parametrisierung

Hervorzuheben ist, dass ANGUELOV (2009) teilweise auch demografische Faktoren wie Alter und Geschlecht in der Auswertung berücksichtigt. So wird etwa gezeigt, dass jüngere Probanden Taster mit kürzeren Betätigungswegen bevorzugen, wohingegen ältere Probanden längere Betätigungswege favorisieren (60 Probanden, ANGUELOV, 2009, S. 101). Untersucht werden 37 Taster mit einem Gesamtweg von 0,28 mm bis 2,3 mm (ANGUELOV, 2009, Tabelle A.1 auf S. 160).

demografische Faktoren

Um den Zusammenhang zwischen den Faktoren

- maximales Drehmoment,
- Form des Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs,
- Länge der Periode (Anzahl der Rastungen pro Umdrehung) und
- Knopfdurchmesser

und der subjektiven Bewertung zu ermitteln, bewerten 60 Probanden insgesamt 19 prototypisch aufgebaute Drehsteller. Dabei haben nahezu alle Drehsteller einen sägezahnförmigen Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf (steiler Sägezahn), welcher bereits bei REISINGER (2009, Kapitel 5.7) als besonders hochwertig bewertet wird. Die Drehsteller decken einen Knopfdurchmesser-Bereich von 31,5 mm bis 82 mm ab und besitzen 15 bis 72 Rastungen pro Umdrehung. Anders als in den bisher genannten Arbeiten wird das Drehmoment nicht über die Amplitude, sondern über das maximal auftretende Drehmoment inklusive Reibungsanteil charakterisiert. Dabei umfasst der Wertebereich der untersuchten Drehsteller rund 21 mNm bis 59 mNm.

Parameterbereich

ANGUELOV (2009, Kapitel 4.4.2) empfiehlt aufgrund der Untersuchungsergebnisse, Drehsteller mit einem Knopfdurchmesser von 40 mm bis 50 mm und 25 bis 35 Rastungen pro Umdrehung zu gestalten. Das maximale Drehmoment sollte dabei in einem Bereich von 30 mNm bis 40 mNm liegen – wobei keine Aussagen über den Reibungsanteil gemacht werden.

„optimaler“ Drehsteller

BÖRSCHLEIN (1994) untersucht den Einfluss technisch beschreibbarer Parameter von acht kraftfahrzeugtypischen Bedienteilen wie Lenkstockhebel („Blinker- und Scheibenwischerhebel“), elektrische Fensterheber und nichtrastende Drehsteller. Dafür bewerten 66 Probanden – alle Mitarbeiter der BMW AG – die Bedienteile von insgesamt acht Fahrzeugen der Marken BMW, Mercedes-Benz, Mazda, Toyota, Cadillac, Honda und Volkswagen (BÖRSCHLEIN, 1994, Tabelle 2.2-2 auf S. 8). Die Bewertung erfolgt auf einer auf das jeweilige Bedienteil angepassten dreistufigen Skala hinsichtlich verschiedener Teilaspekte der Eigenschaften Material, Form und Betätigungsgefühl (BÖRSCHLEIN, 1994, S. 23). BUBB (2001, Kapitel 10.2) diskutiert die von BÖRSCHLEIN (1994) verwendete Untersuchungsmethode nach FANGER (1973) – die sogenannte „Fanger-Methode“.

Untersuchung realer Kfz-Bedienteile

Mit den wahrnehmbaren Variationen im Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf rotatori-

Drehmoment-Variationen

scher Bedienteile mit Knebel beschäftigen sich YANG, TAN, BUTTOLO, JOHNSTON und PIZLO (2003) sowie YANG, TAN, BUTTOLO und JOHNSTON (2004). In insgesamt drei Experimenten mit vier bis neun Probanden wird untersucht, welche Variationen im Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf eines Drehstellers mit Knebel wahrgenommen werden können. Als Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf kommen sowohl ein konstantes Drehmoment von 30 mNm als auch ein sinusförmiger Verlauf mit einer Amplitude von 50 mNm zum Einsatz.

Weiterführende Literatur

In den letzten Jahren ist ein deutlicher Anstieg an Veröffentlichungen im Bereich der Haptikforschung zu verzeichnen. Eine Übersicht über relevante Zeitschriften und Konferenzen bieten SADDIK, OROZCO, EID und CHA (2011, S. 20) sowie REISINGER und WILD (2008, Kapitel 4.5).

2.4 Zusammenstellung von Untersuchungen zu Schwellwerten des haptischen Systems

Schwellwert-Sammlungen

In mehreren Arbeiten gibt es Zusammenstellungen von Kenn- beziehungsweise Schwellwerten des haptischen Systems als Ausgangspunkt für eine eigene Recherche. Im Rahmen der Recherche zur vorliegenden Arbeit entstand ebenfalls eine Zusammenstellung, die teilweise auf den Sammlungen in KERN (2009, Kapitel 3.2.3)¹; SAMUR (2010, Kapitel 3.3); TAN, EBERMAN, SRINIVASAN und CHENG (1994) sowie BURDEA (1996, Kapitel 2) basiert.

Die oben genannten Sammlungen verwenden allerdings zum einen teilweise sekundäre als auch tertiäre Zitate und zum anderen erfolgen sie in der Regel auch bei umfangreichen Quellen ohne Seitenangabe. Darüber hinaus sind die zitierten Kennwerte in Einzelfällen nicht korrekt. In Tabelle 2.1 sind daher Kenn- beziehungsweise Schwellwerte des haptischen Systems mit Schwerpunkt auf der Hand zusammengetragen.

¹ Dies basiert wiederum auf DOERRER (2004, Kapitel 2.4).

2.4 Zusammenstellung von Untersuchungen zu Schwellwerten des haptischen Systems

Tabelle 2.1: Zusammenfassung von Untersuchungen aus dem Bereich der haptischen Wahrnehmung. Der Schwerpunkt liegt auf den Kennwerten für die Hand. Soweit möglich erfolgt zusätzlich die Angabe des Stichprobenumfangs n . Die Begriffe *Absolut-* und *Unterschiedsschwelle* sowie *Weber-Konstante* werden in Kapitel 5 erklärt.

Bezeichnung	Wert	Bemerkung
Kraft-Größen		
Kraft/Masse (Absolutschwelle, taktil)	0,54 mN (σ , $n = 1$) und 0,19 mN (φ , $n = 1$): WEINSTEIN (1962) zitiert in JONES und LEDERMAN (2006, S. 45)	Die Verformung der Haut der Fingerspitze erfolgt mit einer Nylonfaser – einem sog. Semmes-Weinstein-Monofilament.
Kraft/Masse (Weber-Konstante, taktil)	13% ($n = 18$): BRODIE und ROSS (1984)	Es wird ein Referenz-Gewicht von 50 g verwendet. Eine Übersicht über die Ergebnisse weiterer Studien findet sich in TAN u. a. (1995).
Kraft/Masse (Weber-Konstante, haptisch)	9% ($m_{\text{ref}} = 50 \text{ g}$, $n = 18$): BRODIE und ROSS (1984); 6–8% ($m_{\text{ref}} = 50 \text{ g}$, $n = 30$): BRODIE und ROSS (1985); 7% ($F_{\text{ref}} = 2,5\text{--}10 \text{ N}$, $n = 3$): PANG u. a. (1991); m_{ref} und F_{ref} bezeichnen die Referenzgrößen (Standardreiz, Masse/Kraft).	Bei der Weber-Konstanten von 6% waren die Probanden aufgefordert das Gewicht zu “schütteln” (sonst 8%). Beim Experiment von PANG u. a. (1991) drückten die Probanden eine translatorische Greifvorrichtung zwischen Daumen und Zeigefinger zusammen – für weitere Quellen siehe z. B. BRODIE und ROSS (1984).
Drehmoment (Weber-Konstante)	12,7% ($n = 3$): JANDURA und SRINIVASAN (1994); 7,8–10,1% ($n = 20$): PAULIG, GOHLKE u. a. (2011); 9–14% ($n = 50$): HAMPEL (2011, Kapitel 5.3); 20% ($n = 26$): REISINGER (2009, S. 81)	Bedienen eines drehsteller-ähnlichen Haptiksimulators, Drehmoment-Niveaus im Bereich von ca. 10 mNm bis 150 mNm. Mit Ausnahme von JANDURA und SRINIVASAN (1994) und PAULIG, GOHLKE u. a. (2011) wurde in allen Untersuchungen eine Rastung verwendet.

Fortsetzung nächste Seite...

Tabelle 2.1: (fortgesetzt)

Bezeichnung	Wert	Bemerkung
Druck (Weber-Konstante, taktil)	18,8% ($A_1 = 1,27 \text{ cm}^2$, $n = 2-3$) und 4,4% ($A_2 = 5,06 \text{ cm}^2$, $n = 2-3$): TAN u. a. (1994, S. 355); Es wurde an der Oberseite des Handgelenks getestet.	Die starke Abhängigkeit von der Weber-Konstanten von der (kreisförmigen) Kontaktfläche A nimmt deutlich ab, wenn die Unterschiedschwelle auf den Umfang bezogen wird (N/cm), siehe Quelle für Details. Die Referenz-Kräfte betragen $F_{A_1} = 2,2 \text{ N}$ und $F_{A_2} = 8,9 \text{ N}$. Damit ergibt sich der Referenz-Druck zu ca. 1,7-1,8 N/cm^2 .
Weg-Größen		
Zweipunktschwelle (Absolutschwelle, taktil)	2,5 mm (Fingerspitze, $n = ?$): SHERRICK und CRAIG (1982) zitiert in BURDEA (1996, S. 17); 11 mm (Handfläche, $n = ?$): TUBIANA (1984) zitiert in SHIMOGA (1993, S. 274); zum Vergleich: 67 mm (Oberschenkel, $n = ?$): SEOW (1988) zitiert in BURDEA (1996, S. 18)	Die Zweipunktschwelle wird auch <i>simultane Raumschwelle</i> genannt. Bei höherer Hauttemperatur sinkt die Zweipunktschwelle - mit zunehmendem Alter erhöht sie sich (BURDEA, 1996, S. 18).
Oberflächenerhebungen (Absolutschwelle, taktil/pas-siv)	2 μm (einzelne punktförmige Erhebung mit Durchmesser $D = 550 \mu\text{m}$, $n = ?$): LAMOTTE u. a. (1983) zitiert in LAMOTTE und SRINIVASAN (1991); 0,06 μm (Streifenmuster, Breite ca. $45 \mu\text{m}$, Mitte-Mitte-Abstand ca. $105 \mu\text{m}$, $n = 5$): LAMOTTE und SRINIVASAN (1991); 0,16 μm (Punktmatrix, $D = ?$, Raster $100 \mu\text{m}$, $n = 3$): LAMOTTE und SRINIVASAN (1991)	In jedem der drei Experimente wird eine Glasplatte mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/s über die Haut der Fingerbeere gezogen. Die Anpresskraft beträgt ca. $0,2 \text{ N}$. Die Experimente mit den periodischen Mustern (Streifen/Punkte) werden an der Fingerbeere des Mittelfingers der rechten Hand durchgeführt.

Fortsetzung nächste Seite...

Tabelle 2.1: (fortgesetzt)

Bezeichnung	Wert	Bemerkung
Weg/Fingerspannweite (Unterschiedsschwelle, haptisch)	1 mm ($x_{\text{ref}} = 10 \text{ mm}$, 1,7 mm ($x_{\text{ref}} = 40 \text{ mm}$ und 2,4 mm ($x_{\text{ref}} = 80 \text{ mm}$, $n = 18$): DURLACH u. a. (1989, unter Verwendung von Gleichung 1); x_{ref} bezeichnet die Referenz-Länge (Standardreiz).	Das Weber'sche Gesetz wird laut DURLACH u. a. (1989) verletzt. Betrachtet wird die Spannweite zwischen Daumen und Zeigefinger.
Gelenkstellungen (Unterschiedsschwelle, Unterscheidbarkeit)	2,6° (PIP des Zeigefingers, $n = 3$ - geht aber nicht klar aus dem Text hervor): ALLEN und KLEPPNER (1992, Teil V, Abschnitt 2, Kapitel 1.7, 1, S. 305); 2,5°-2,7° (PIP des Zeigefingers, $n = 11$), 1,7°-2,7° (MCP des Zeigefingers, 3-4 Winkelstellungen "perfekt" unterscheidbar (MCP und PIP des Zeigefingers, $n = 11$): TAN u. a. (2007); 2° (Handgelenk, $n = 3$): TAN u. a. (1994, S. 356); 2° (Ellbogengelenk, $n = 3$): TAN u. a. (1994, S. 356); 0,8° (Schultergelenk, $n = 3$): TAN u. a. (1994, S. 356);	Die Unterschiedsschwelle für Gelenkstellungen wird größer, je weiter das Gelenk vom Körper entfernt ist. Abkürzungen: MCP - Fingergrundgelenk (engl. <i>metacarpophalangeal joint</i> , PIP - Fingermittelgelenk (engl. <i>proximal interphalangeal joint</i>)
Kombinierte Kraft-Weg-Größen		
Massenträgheit (Weber-Konstante)	21 % ($n = 3$): BEAUREGARD u. a. (1995)	Die Probanden mussten eine translatorische Greifvorrichtung zwischen Daumen und Zeigefinger zusammendrücken.
Massenträgheitsmoment (Weber-Konstante)	ca. 28-32 % (σ , Experiment 1, $I_{\text{ref}} \approx 43 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$, $n = 10$), ca. 20-28 % (σ , Experiment 2, ($I_{\text{ref}} \approx 46 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$, $n = 10$) und ca. 28-40 % (φ , Experiment 2, ($I_{\text{ref}} \approx 46 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$, $n = 10$): KREIFELDT und CHUANG (1979)	In dem zweiteiligen Experiment von KREIFELDT und CHUANG (1979) müssen die Probanden in Experiment 1 einen stiftartigen Gegenstand mittig zwischen Daumen und Zeigefinger greifen und periodisch um die Querachse bewegen.

Fortsetzung nächste Seite...

Tabelle 2.1: (fortgesetzt)

Bezeichnung	Wert	Bemerkung
	<p>ca. 10% $I_{\text{ref}} = 52-805 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$, $n = 12$): KNOWLES und SHERIDAN (1966, S. 215); 58% (σ, Experiment 1, $n = 12$, $I_{\text{ref}} = 4 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$), 95% ($\varphi$, Experiment 1, $n = 12$, $I_{\text{ref}} = 4 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$), 113% (Experiment 2, $n = 28$, $I_{\text{ref}} = 3,6 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$) und 113% (Experiment 3, $n = 20$, $I_{\text{ref}} = 5,01 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$): ROSS und BENSON (1986); I_{ref} bezeichnet das Referenz-Massenträgheitsmoment (Standardreiz)</p>	<p>In Experiment 2 bewegen die Probanden einen tennischlägerartigen Gegenstand mit der ganzen Hand periodisch um die Querachse. Beim Experiment von KNOWLES und SHERIDAN (1966) wird ein rotatorisches Bedienelement mit einem Durchmesser von etwa 32 mm (1,25 Zoll) verwendet – das Experiment wird in Kapitel 7.3 diskutiert. ROSS und BENSON (1986) verwenden Zylinder mit einem Gewicht von 60 g, einem Durchmesser von 30 mm und einer Höhe von 25 mm. In den drei Experimenten werden zwei unterschiedliche Rotationsachsen und Versuchsbedingungen untersucht.</p>
<p>Viskose Reibung (Weber-Konstante)</p>	<p>10-20% (lineare Armbewegung, bei verschiedenen Massen und Steifigkeiten, $n = 10$): RANK u. a. (2012, Abb. 2); ca. 34% (lineare Armbewegung, $d_{\text{ref}} = 32-1024 \text{ Ns/m}$, $n = 11$) und 26-83% (lineare Armbewegung, $d_{\text{ref}} = 2-1024 \text{ Ns/m}$, $n = 11$): JONES und HUNTER (1993, S. 349); ca. 30-100% (Flüssigkeiten erkennen, $d_{\text{ref}} = 199-16.060 \text{ mPas}$, $n = 8$): BERGMANN TIEST u. a. (2010); 13,6% (linear zwischen Daumen und Zeigefinger, $d_{\text{ref}} = 120 \text{ Ns/m}$, $n = 3$): BEAUREGARD u. a. (1995); d_{ref} bezeichnet die Referenz-Viskosität (Standardreiz).</p>	<p>Beim Experiment von BERGMANN TIEST u. a. (2010) haben die Probanden die Aufgabe, die Viskosität von Flüssigkeiten ($d_{\text{ref}} = 199-16.060 \text{ mPas}$) mithilfe einer hölzernen Spachtel zu bewerten.</p>

Fortsetzung nächste Seite...

Tabelle 2.1: (fortgesetzt)

Bezeichnung	Wert	Bemerkung
Coulomb'sche Reibung (Weber-Konstante)	ca. 10% (rotatorisch, $M_{\text{Reib,ref}} = 7-71 \text{ mNm}$, $n = 3-4$): KNOWLES und SHERIDAN (1966); $M_{\text{Reib,ref}}$ bezeichnet das Referenz-Reibmoment (Standardreiz).	Beim Experiment von KNOWLES und SHERIDAN (1966) wird ein rotatorisches Bedienelement mit einem Durchmesser von etwa 32 mm (1,25 Zoll) verwendet - das Experiment wird in Kapitel 7.3 diskutiert.
Steifigkeit/Federkonstante (obere Absolutschwelle)	15,3-41,5 kN/m, im Mittel 24,2 kN/m ($n = 3$): TAN u. a. (1994, S. 356)	In der Untersuchung von TAN u. a. (1994) tasten die Probanden mit verbundenen Augen und unter Verwendung verschiedener Gelenke (Finger-, Hand-, Ellbogen- und Schultergelenk) einen einseitig eingespannten Aluminiumbalken der Länge 100 cm ab. Die Probanden entfernen sich dabei so lange von der Einspannstelle, so lange sich der Balken noch starr anfühlt. Über die ermittelte Entfernung von der Einspannstelle wird indirekt die Steifigkeit berechnet.
Steifigkeit/Federkonstante (Weber-Konstante)	ca. 19-28% (lineare Armbewegung, $k_{\text{ref}} = \text{ca. } 1000 - 6260 \text{ N/m}$, $n = 10$): JONES und HUNTER (1990, S. 153); ca. 8-22% (zwischen Daumen und Zeigefinger, verschiedene Versuchsbedingungen, $1/k_{\text{ref}} = 4 \text{ mm/N}$, $n = 3$): TAN u. a. (1995); k_{ref} bezeichnet die Referenz-Steifigkeit (Standardreiz)	Es finden sich Untersuchungen zur Steifigkeit, aber auch zur Nachgiebigkeit (reziproke Steifigkeit). Die Ergebnisse von TAN u. a. (1995) unterstützen die These, dass bei der Wahrnehmung von Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit die verrichtete mechanische Arbeit - vgl. REISINGER (2009, Kapitel 5.5) - und/oder die erzeugte Kraft am Endpunkt der Bewegung die maßgebliche Größe ist. <hr/> Eine Übersicht über die Ergebnisse weiterer Studien findet sich in JONES und LEDERMAN (2006, S. 81-82) sowie in TAN u. a. (1995). Fortsetzung nächste Seite...

Tabelle 2.1: (fortgesetzt)

Bezeichnung	Wert	Bemerkung
Sonstiges		
Zeitliche Auflösung (Absolutschwelle, taktil)	10–12,5 ms (Finger, $n = 4$): GESCHEIDER (1966)	Zwei Impulse der <i>gleichen Stärke</i> müssen eine zeitliche Differenz von 10–12,5 ms aufweisen, um als separate Impulse wahrgenommen werden zu können. Nach Rücksprache mit der Autorin L. JONES ist die Angabe von 5 ms in JONES und LEDERMAN (2006, S. 56) und die dazugehörige Quellenangabe inkorrekt.
Mechanisches Ersatzmodell	-	Mit der Modellbildung des Greifvorgangs der Hand für verschiedene Greifarten beschäftigen sich unter anderem HASSER und CUTKOSKY (2002) sowie HAJIAN (1997). Mechanische Ersatzmodelle eignen sich beispielsweise für regelungstechnische Stabilitätsuntersuchungen beim Entwurf haptischer Geräte.

3 Grundlagen der haptischen Wahrnehmung

3.1 Definition	19
3.2 Sensoren der haptischen Wahrnehmung	20
3.3 Sonderstellung der Hand.	23

3.1 Definition

Die Wahrnehmung haptischer Reize erfolgt über spezielle Sensoren, die jeweils ungleichmäßig auf der Körperoberfläche und im Körper selbst verteilt sind. In der Literatur finden sich bezüglich der Zuordnung der verschiedenen Sensoren zu bestimmten Wahrnehmungsqualitäten unterschiedliche Definitionen und Klassifizierungen – eine gute Übersicht hierzu findet sich in SENDLER (2008, S. 10–11) und GRUNWALD (2001).

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Definition der haptischen Wahrnehmung in Anlehnung an GRUNWALD (2009), die sich zunehmend in der psychologischen Fachliteratur durchsetzt (GRUNWALD, 2009, S. 2). Wesentlich hierbei ist eine Unterscheidung zwischen der taktilen und der haptischen Wahrnehmung.

taktile und haptische Wahrnehmung

Ist der Körper in Relation zum Reiz passiv, so spricht man von einem taktilen Reiz oder von einer taktilen Wahrnehmung. Demnach erzeugt beispielsweise eine Berührung der Haut oder eines Gelenks durch eine andere Person eine taktile Wahrnehmung. Im Englischen wird diese Wahrnehmungsqualität mit *passive touch* bezeichnet.

taktil

Im Normalfall ist der Körper in Relation zum Reiz aktiv. Die haptische Wahrnehmung ergibt sich dadurch, dass der Mensch die Reizstruktur durch aktive Bewegungen erkundet – dabei sind grundsätzlich alle Körperbewegungen möglich (GRUNWALD, 2009, S. 2–3). Die haptische Wahrnehmung beinhaltet demnach auch Informationen, die aufgrund der Eigenbewegung des Körpers generiert werden – daher ist es auch nicht sinnvoll, im Bereich der haptischen Wahrnehmung zwischen Motorik und Sensorik zu trennen (GRUNWALD, 2009, S. 2–3). Im Englischen wird diese Wahrnehmungsqualität mit *active touch* bezeichnet (SADDIK u. a., 2011, S. 3).

haptisch

Es ist anzumerken, dass bei der taktilen und haptischen Wahrnehmung zum Teil dieselben Sensoren beziehungsweise biologischen Elementareinheiten beteiligt sind. Die Unterscheidung zwischen den beiden Wahrnehmungsqualitäten ergibt sich lediglich aus der Stellung des Körpers in Relation zum Reiz.

3.2 Sensoren der haptischen Wahrnehmung

Rezeptoren bzw. Sensoren

Haptische Empfindungen werden durch – über den und im Körper verteilte – Sinnesorgane ermöglicht. Besondere Bedeutung kommt dabei den sogenannten Mechanorezeptoren beziehungsweise Mechanosensoren zu. Damit bezeichnet man Sinnesorgane, deren Aufgabe es ist, mechanische Reize wie Druck und Verformung verarbeiten zu können (BEYER & WEISS, 2001, S. 25). Es werden beide Bezeichnungen, Rezeptor und Sensor, in der Literatur verwendet – wobei offenbar die Mehrzahl der Autoren Rezeptor bevorzugt. Folgt man allerdings, wie in dieser Arbeit, HANDWERKER (2006, S. 182), so hat sich die Bedeutung des Begriffs Rezeptor in Biologie und Medizin mittlerweile gewandelt und bezeichnet heute vornehmlich “Molekülkomplexe an Zelloberflächen, an die spezifische Moleküle anbinden [...]”.

Vorkommen

Verschiedene Arten von Mechanosensoren finden sich unter anderem in der unbehaarten und behaarten Haut, in den Muskeln und Sehnen und im Bereich der Gelenke (Gelenkkapsel, Gelenkbänder). Zu den Mechanosensoren zählen zudem die Haarsinneszelle in der Hörschnecke und im Gleichgewichtsorgan. Neben den Mechanosensoren spielen auch die Temperatur- und Schmerzsensoren der Haut – auch Nozizeptoren, Nozirezeptoren oder Nozisenoren genannt – eine Rolle bei der haptischen Wahrnehmung.

Muskeln, Sehnen und Gelenke

Mechanosensoren in den Muskeln (Muskelspindeln), Sehnen (Golgi-Sehnenorgane) und im Bereich der Gelenke (Golgi-Sehnenorgane, Pacini- und Ruffini-Körperchen) tragen zur haptischen Wahrnehmung durch Stellungs- und Widerstandsinformationen bei (BEYER & WEISS, 2001, S. 27; JONES & LEDERMAN, 2006, S. 33-37). Neben den Mechanosensoren in den Muskeln und Sehnen scheint die Kraftwahrnehmung aber auch durch die Eigenaktivität des zentralen Nervensystems bei der Erzeugung von Muskelanspannungen beeinflusst zu werden (Reafferenzprinzip) – allerdings wird dieser Aspekt in der Literatur in diesem Zusammenhang nur selten aufgegriffen. Weiterführende Informationen hierzu finden sich in JONES und LEDERMAN (2006, S. 37).

behaarte und unbe- haarte Haut

Für die vorliegende Arbeit sind vor allem die Mechanosensoren der unbehaarten Haut von Bedeutung. Die Forschung konzentriert sich im Allgemeinen auf die Untersuchung der Mechanosensoren der unbehaarten Haut der Hand und des Fußes und weniger auf behaarte Haut oder die Haut des restlichen Körpers (TEMPLETON, 2012, S. 1,10). Über die Sinneszellen der behaarten Haut wird in VALLBO, OLAUSSON, WESSBERG und KAKUDA (1995) beziehungsweise JONES und LEDERMAN (2006, S. 31-33) sowie TEMPLETON (2012, Kapitel 1.2) ausführlich berichtet.

Klassifikation

Nach dem aktuellen Stand der Forschung werden mindestens vier verschiedene Mechanosensoren in der unbehaarten Haut unterschieden (GESCHEIDER, WRIGHT & VERRILLO, 2009, S. 15). Diese lassen sich unter anderem anhand der Größe ihres rezeptiven Felds und der Adaptionsgeschwindigkeit auf einen konstanten Reiz klassifizieren (BEYER & WEISS, 2001, S. 30-34). Um die Größe des rezeptiven Felds zu bestimmen, wird bei einem Humanexperiment das Aktionspotential einer einzelnen Nervenfasern mit Hilfe einer Mikroelektrode aufgezeichnet, während die Haut an verschiedenen Stellen verformt wird (GESCHEIDER u. a., 2009, S. 17). Tabelle 3.1 zeigt die in der Literatur gängigste Nomenklatur der vier verschiedenen Mechanosensoren der unbehaarten Haut. Die

Nomenklatur orientiert sich dabei ausschließlich an der funktionalen Charakteristik – Größe des rezeptiven Felds und Adaptionsgeschwindigkeit – der Mechanosensoren und nicht an histologischen Kriterien (BEYER & WEISS, 2001, S. 33).

Tabelle 3.1: Klassifikation der Mechanosensoren der unbehaarten Haut nach ihrer funktionalen Charakteristik (Jones & Lederman, 2006, S. 27; Beyer & Weiss, 2001, S. 33). Die Unterscheidung der Adaptionsgeschwindigkeit erfolgt durch die Abkürzungen FA (fast adapting) und SA (slow adapting). Ein kleines scharf abgegrenztes rezeptives Feld wird mit dem Suffix I und ein großes unscharfes rezeptives Feld wird mit dem Suffix II gekennzeichnet.

	<i>kleines rezeptives Feld</i>	<i>großes rezeptives Feld</i>
<i>schnell adaptierend</i>	FA I	FA II
<i>langsam adaptierend</i>	SA I	SA II

Wie in Tabelle 3.1 beschrieben, unterscheidet man *slow* (engl. *langsam*) und *fast* (engl. *schnell*) adaptierende Mechanosensoren. Daraus leiten sich die beiden Bezeichnungen FA- und SA-Sensoren ab. Manche Autoren verwenden *rapid* (engl. ebenfalls *schnell*) (RA-Sensoren) anstelle von *fast*.

Nach aktuellem Stand der Forschung lassen sich allerdings lediglich drei der vier Mechanosensoren der unbehaarten Haut biologischen Elementareinheiten zuordnen – Tabelle 3.2 zeigt eine Übersicht und nennt alternative Bezeichnungen. Die Existenz der Meissner-Körper- und Pacini-Körper (FA I und FA II) sowie der Merkel-Zellen (SA I) gilt als gesichert. In der behaarten Haut treten Merkel-Zellen in einer besonderen Form auf und werden als Pinkus-Iggo-Tastscheiben oder einfach nur Tastscheiben bezeichnet – sie bestehen aus bis zu 50 Merkel-Zellen (BEYER & WEISS, 2001, S. 29).

Zuordnung der Mechanosensoren

In der Literatur werden nahezu durchgängig die sogenannten Ruffini-Körper als die SA-II-Sensoren der unbehaarten Haut genannt. Folgt man allerdings GESCHIEDER u. a. (2009, S. 16–17) beziehungsweise DELLON (1981); PARÉ, BEHETS und CORNU (2003) sowie PARÉ, SMITH und RICE (2002), so handelt es sich dabei um einen Irrtum und Ruffini-Körper treten entweder hauptsächlich oder ausschließlich in behaarter Haut auf. Die Histologie der SA-II-Sensoren der unbehaarten Haut ist demnach bisher nicht bekannt. Die entsprechende Zeile in Tabelle 3.2 ist farblich hervorgehoben.

Literatur ist uneinheitlich

Tabelle 3.2: Die vier Mechanosensoren der unbehaarten Haut – Zuordnung zwischen der funktional motivierten Klassifizierung aus Tabelle 3.1 und der eigentlichen biologischen Elementareinheit (Sensor)

Charakteristik	Sensor	alternative Bezeichnungen
FA I schnell/kleines Feld	Meissner-Körperchen	Meissner-Tastkörperchen, Meissner'sches (Tast-)Körperchen
FA II schnell/großes Feld	Pacini-Körperchen	Vater-Pacini-Körperchen, Pacini-Korpuskel
SA I langsam/kleines Feld	Merkel-Zelle	Merkel-Körperchen, Pinkus-Iggo-Tastscheibe oder Tastscheibe (behaarte Haut – siehe Text)
SA II langsam/großes Feld	Ruffini-Körperchen bzw. unbekannt	Ruffini'sches Körperchen

3 Grundlagen der haptischen Wahrnehmung

Eine Illustration der vier Mechanosensoren der unbehaarten Haut und der hier nicht näher diskutierten Muskelspindeln ist in Abbildung 3.1 zu finden. In der Darstellung findet sich auch ein Ruffini-Körperchen, dessen Existenz, wie weiter oben diskutiert, in der unbehaarten Haut als nicht gesichert betrachtet werden muss.

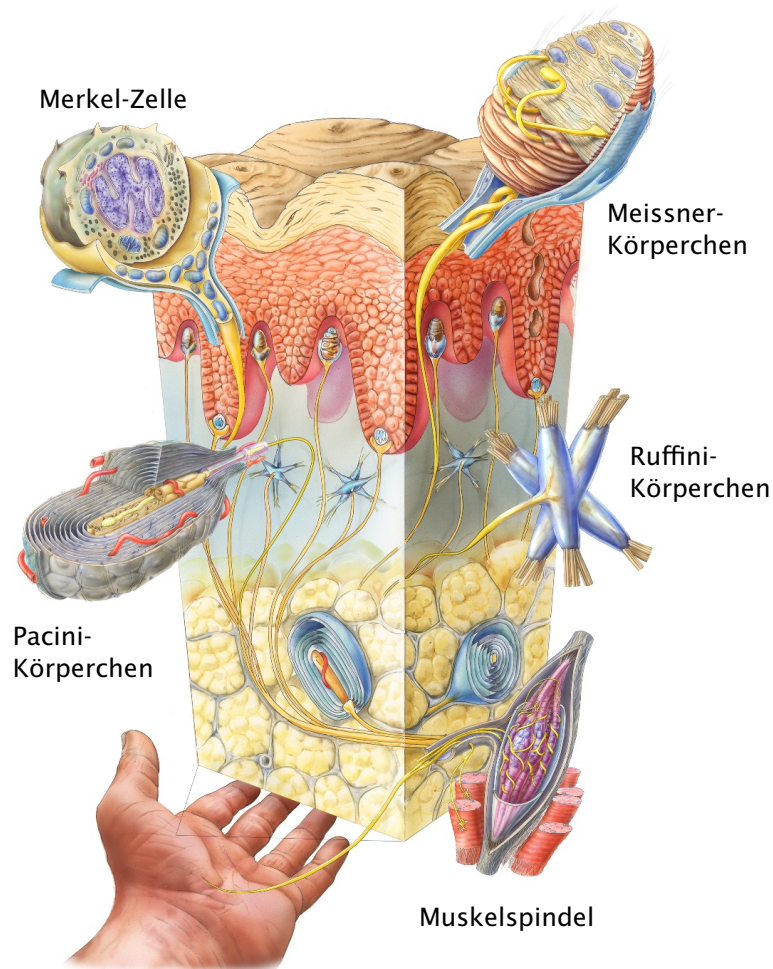


Abbildung 3.1: Mechanosensoren der unbehaarten Haut: Merkel-Zellen, Pacini-Körper, Meissner-Körper und Ruffini-Körper (Existenz strittig – siehe Text). Illustration: Julius Ecke, München, www.julius-ecke.de – mit freundlicher Genehmigung des Künstlers

Wahr-
nehmungs-
qualitäten

Die vier verschiedenen Mechanosensoren der unbehaarten Haut werden in der Literatur mit verschiedenen Wahrnehmungsqualitäten wie Hautspannung, Druck, Berührung und Vibration in Verbindung gebracht (BEYER & WEISS, 2001, S. 29). Die speziellen Eigenschaften der einzelnen Sensortypen werden in HATZFELD (2013, Kapitel 2); GESCHEIDER u. a. (2009); JONES und LEDERMAN (2006, z. B. Tabelle 4.1); GESCHEIDER, BOLANOWSKI und VERRILLO (2004); GRUNWALD (2008, Teil II) sowie BEYER und WEISS (2001) ausführlich diskutiert.

räumliche
und zeitliche
Summation

Das Antwortverhalten der verschiedenen Mechanosensoren ist prinzipiell eine Funktion

der Frequenz und der Amplitude (Maß der Verformung) der Hautstimulation. Es gibt aber noch weitere Einflussfaktoren – so berichten beispielsweise GESCHEIDER u. a. (2009, Kapitel 2 und 5) sowie GESCHEIDER u. a. (2004), dass das taktile Wahrnehmungssystem zum Teil zur räumlichen und zeitlichen Summation in der Lage ist. Das macht sich dadurch bemerkbar, dass die Wahrnehmungsschwelle für die Verformung der Haut bei gleicher Frequenz und Verformungsamplitude mit größer werdender Stimulationsfläche oder Stimulationsdauer niedriger ist.

Aber auch die Hauttemperatur kann einen wesentlichen Einfluss auf die Sensitivität der Mechanosensoren haben, wie BOLANOWSKI und VERRILLO (1982) (zitiert in GESCHEIDER u. a., 2009, S. 21) am Beispiel der Pacini-Körper zeigen. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Leistungsfähigkeit der haptischen Wahrnehmung ist das Alter. Die Arbeiten von GESCHEIDER, BOLANOWSKI, HALL und VERRILLO (1994); GESCHEIDER, BEILES, CHECKOSKY, BOLANOWSKI und VERRILLO (1994) sowie GESCHEIDER, EDWARDS, LACKNER, BOLANOWSKI und VERRILLO (1996) zeigen, dass die Wahrnehmungsschwellen der vier Mechanosensoren mit dem Alter ansteigen. Die Abnahme der Sensitivität betrifft vor allem die Pacini-Körper.

Hauttemperatur und Alter

Der Einfluss von Geschlecht¹, Nationalität und Beruf (Arbeiter/Angestellte) kann im Allgemeinen vernachlässigt werden, wie beispielsweise LINDSELL und GRIFFIN (2003) mithilfe einer europäischen Studie mit rund 1000 Probanden zeigen.

Geschlecht, Nationalität und Beruf

Es sei aber darauf hingewiesen, dass es trotz der Vielzahl der unterschiedlichen Sinnesorgane letztendlich eine Wahrnehmung gibt. Nicht nur KATZ äußerte sich kritisch über die atomistische Betrachtungsweise der Sinnespsychologie (KATZ, 1925, S. 7–16) und vermisst eine auf die komplexen und lebensnahen Erscheinungen gerichtete Arbeitsweise (KATZ, 1925, S. 8). Er sah beispielsweise die Gefahr, dass sich durch anatomische und histologische Erwägungen psychologische Sachverhalte suggerieren lassen, denen keine Realität zukommt. Etwas spöttisch bemerkte er zudem, dass die meisten Menschen sterben dürften, “ohne je die Reizung eines isolierten Druck- oder Wärmepunktes [...] erlebt zu haben” (KATZ, 1925, S. 11).

eine Wahrnehmung

3.3 Sonderstellung der Hand

In einem Teil der Großhirnrinde – dem somatosensorischen Kortex – der für die zentrale Verarbeitung vielfältiger Reize der Körperoberfläche, des Bewegungsapparates und aus den Eingeweiden zuständig ist, wird die Körperoberfläche somatotop abgebildet (HANDWERKER, 2006, S. 190). Somatotop bedeutet in diesem Zusammenhang, dass benachbarte Zonen des Körpers auch hier nebeneinander liegen. Man unterscheidet weiterhin einen primär motorischen und einen primär sensorischen Kortex.

motorischer und sensorischer Kortex

Die Abbildung der Körperhälften im primär motorischen und primär sensorischen Kortex ist stark verzerrt. In beiden Fällen sind vor allem Mund und Hände deutlich überrepräsentiert. Im Fall des primär sensorischen Kortex gehen ein hohes räumliches

¹ siehe auch VERRILLO (1979)

3 Grundlagen der haptischen Wahrnehmung

Auflösevermögen der jeweiligen Körperregion mit einer entsprechenden Größe der Repräsentation im Kortex einher (TREEDE, 2007, S. 305).

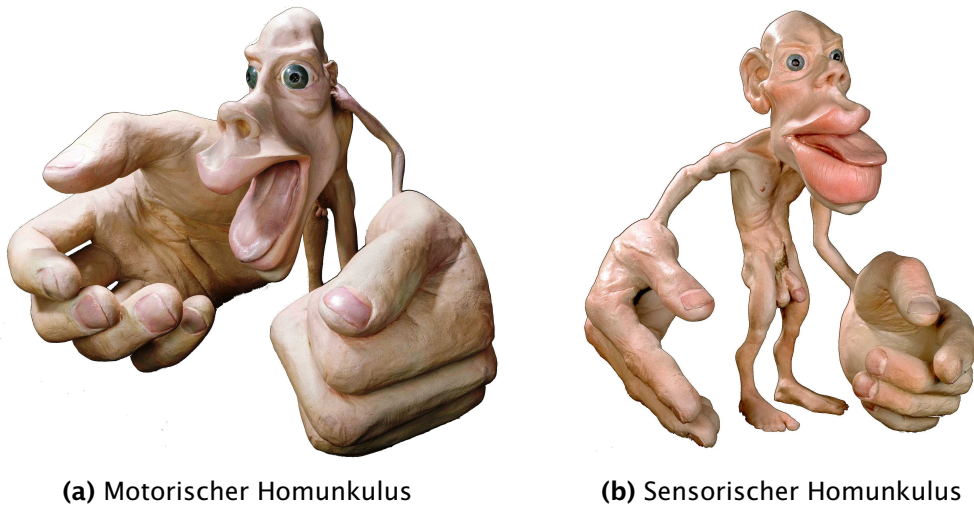


Abbildung 3.2: Motorischer und sensorischer Homunkulus; © The Natural History Museum, London (Image IDs: 001915 und 001914)

Homunkulus Auf Basis der Arbeit von PENFIELD und RASMUSSEN (1950) lassen sich die Verhältnisse im primär motorischen und primär sensorischen Kortex in Form des sogenannten motorischen und sensorischen (männlichen) Homunkulus illustrieren. Mittlerweile gibt es aber für bestimmte Körperregionen eine Neubewertung, siehe KELL, von KRIEGSTEIN, RÖSLER, KLEINSCHMIDT und LAUFS (2005). Abbildung 3.2 zeigt zwei Figuren aus dem naturhistorischen Museum in London. Die Figuren zeigen, wie der männliche Körper gemäß der Proportionen im motorischen und sensorischen Kortex aussehen würde.

4 Grundlagen der Statistik

4.1 Normalverteilung, statistische Kennwerte und verbundene Stichproben	25
4.2 Hypothesentest	27
4.3 Nichtparametrische und parametrische Hypothesentests	32

Bei Probandenversuchen treten – im Vergleich zu den exakten Wissenschaften – große Streuungen in den Ergebnissen auf. Um Gesetzmäßigkeiten von Zufällen zu unterscheiden, ist daher eine statistische Betrachtung der Versuchsergebnisse erforderlich.

Im Folgenden wird knapp auf die Grundzüge der relevanten statistischen Verfahren eingegangen. Für weiterführende Informationen sei auf die Standardwerke BORTZ und SCHUSTER (2010); FAHRMEIR, KÜNSTLER, PIGEOT und TUTZ (2010) sowie SACHS und HEDDERICH (2006), aber auch auf neue Werke wie EID, GOLLWITZER und SCHMITT (2010) oder FIELD (2009) verwiesen. Eine auf die vorliegende Arbeit angepasste Einführung findet sich bei KÜHNER, BUBB, BENGLER und WILD (2013).

4.1 Normalverteilung, statistische Kennwerte und verbundene Stichproben

Bei den weiter unten beschriebenen Hypothesentests geht man davon aus, dass man Parameter für ein bestimmtes Merkmal – beispielsweise die Wahrnehmungsgenauigkeit für eine haptische Größe – einer hypothetischen und im Normalfall fiktiven Population¹ bestimmt und anhand derer zu einer statistischen Aussage gelangt. Ist das Merkmal in der Population normalverteilt, so lässt es sich durch die zwei Parameter Mittelwert μ und Standardabweichung σ vollständig beschreiben. Populationsparameter werden mit griechischen Buchstaben gekennzeichnet.

Populationsparameter

Um die Verteilung des Merkmals der Population zu bestimmen, wird eine möglichst repräsentative Stichprobe der Größe n daraus gezogen. Ist diese Stichprobe normalverteilt, so lässt sie sich ebenfalls durch die zwei Parameter Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung s vollständig beschreiben. Stichprobenparameter werden mit lateinischen Buchstaben gekennzeichnet.

Stichprobenparameter

Werden die Populationsparameter aus Stichprobenparametern geschätzt, so wird dies durch ein “Dach” gekennzeichnet, beispielsweise $\hat{\mu}$ und $\hat{\sigma}$. Die Schätzung der Populationsparameter aus der Stichprobe stellt den Normalfall dar.

geschätzte Populationsparameter

Die Abweichungen des Stichprobenmittelwerts (empirischer Mittelwert) \bar{x} vom wahren Populationsmittelwert μ ist eine wichtige Kenngröße für die bereits erwähnten

Mittelwertverteilung

¹ auch *Grundgesamtheit* genannt

Hypothesentests. Das entsprechende Streuungsmaß ist der Standardfehler oder die Standardabweichung des Mittelwerts und wird mit $\sigma_{\bar{x}}$ beziehungsweise $s_{\bar{x}}$ oder $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ symbolisiert. Die Standardabweichung der Mittelwertverteilung ist \sqrt{n} -mal kleiner als die der Population.

zentraler
Grenzwertsatz

Der zentrale Grenzwertsatz besagt, dass sich die Mittelwertverteilung $\mu_{\bar{x}}$ aus Stichproben der Größe n mit zunehmendem Umfang einer Normalverteilung annähert und dies unabhängig von der tatsächlichen Verteilung des Merkmals in der Population. Als Faustformel gilt, dass ab einer Stichprobengröße von $n = 30$ die Mittelwertverteilung als annähernd normalverteilt betrachtet werden kann. Dies ist deshalb von Bedeutung, da bei vielen Fragestellungen Mittelwerte oder Mittelwertunterschiede eine Rolle spielen (siehe z. B. BORTZ & SCHUSTER, 2010, S. 82-88; EID u. a., 2010, S. 210).

Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der diskutierten Parameter und gibt deren mathematische Beziehungen an.

Tabelle 4.1: Statistische Kenngrößen normalverteilter Stichproben und Populationen

	Populationsparameter	Stichprobenparameter	Schätzung des Populationsparameters aus der Stichprobe
Mittelwert	μ	\bar{x}	$\hat{\mu} = \bar{x}$
Standardabweichung	σ	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$	$\hat{\sigma} = s\sqrt{\frac{n}{n-1}}$
Mittelwert des Stichprobenmittelwerts	$\mu_{\bar{x}}$	$\bar{x}_{\bar{x}} = \bar{x}$	$\hat{\mu}_{\bar{x}} = \bar{x}$
Standardabweichung des Mittelwerts oder Standardfehler	$\sigma_{\bar{x}}$	$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$	$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = \frac{s}{\sqrt{n-1}}$

verbundene
Stichproben

In der vorliegenden Arbeit werden die Experimente stets als sogenannte abhängige oder verbundene Stichproben durchgeführt². Dabei wiederholen die Probanden ein Experiment unter unterschiedlichen Bedingungen. Ziel der Untersuchungen ist es, herauszufinden, ob sich die Ergebnisse unter den verschiedenen Bedingungen bezogen auf den Mittelwert der Differenzen μ_D beziehungsweise $\hat{\mu}_D = \bar{x}_D$ unterscheiden. Der Mittelwert der Differenzen \bar{x}_D ergibt sich aus den Differenzen der Messwertpaare $x_{D,i}$ und dem Stichprobenumfang³ n zu

$$\hat{\mu}_D = \bar{x}_D = \frac{\sum_{i=1}^n x_{D,i}}{n} \tag{4.1}$$

$$\text{mit } x_{D,i} = x_{1,i} - x_{2,i} \tag{4.2}$$

² weitere Bezeichnungen: *Matched Samples*, *Matched Pairs*, *Repeated Measurements* oder *Messwiederholung*

³ Anzahl der Messwertpaare

Dabei beziehen sich die Indizes 1 und 2 auf zwei unterschiedliche Versuchsbedingungen und $x_{1,i}$ und $x_{2,i}$ kennzeichnen die entsprechenden Messwertpaare. Abbildung 4.1 zeigt den Zusammenhang zwischen der Verteilung des Merkmals (---) und der Verteilung des Mittelwerts des Merkmals (—), jeweils als Populationsparameter. Mit steigendem Stichprobenumfang n verringert sich die Streuung der Mittelwertverteilung (—). Die Schätzung des Mittelwerts gewinnt also an Genauigkeit.

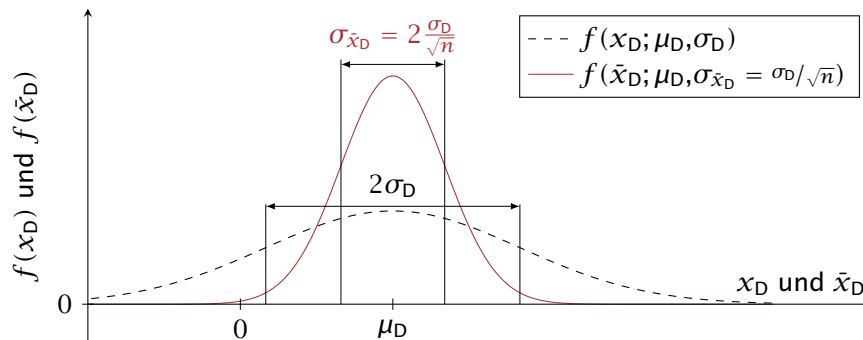


Abbildung 4.1: Exemplarische Darstellung der Verteilung der Differenzen x_D (---) bei einem Experiment mit verbundenen Stichproben ($n = 6$, Anzahl der Messwertpaare). Die Verteilung der Stichprobenmittelwerte der Differenzen \bar{x}_D (—) ist ebenfalls dargestellt. Der Populationsmittelwert ist μ_D und die Standardabweichung der Population beträgt σ_D .

4.2 Hypothesentest

Die Grundprinzipien der statistischen Hypothesenprüfung gehen auf FISHER (1925) sowie NEYMAN und PEARSON (1928a, 1928b)⁴ zurück – üblich ist heute das binäre Entscheidungskonzept von Neyman und Pearson (BORTZ & SCHUSTER, 2010, S. 97; EID u. a., 2010, S. 192, 196).

4.2.1 Hypothesen

Beim Testkonzept von Neyman und Pearson wird zwischen Null- und Alternativhypothese unterschieden. Das binäre Entscheidungskonzept besteht darin, dass man sich für eine der beiden Hypothesen entscheidet.

Null- und Alternativhypothese

Bei einer verbundenen Stichprobe lautet die Nullhypothese H_0 , dass sich beispielsweise der Mittelwert lediglich zufällig von null unterscheidet (4.3). Das bedeutet inhaltlich, dass sich die unterschiedlichen Bedingungen nicht systematisch auf das Versuchsergebnis auswirken.

Nullhypothese

Die Alternativhypothese H_1 hingegen besagt, dass sich der Mittelwert systematisch von null unterscheidet. Wird keine Aussage über die Richtung getroffen, so spricht man von einer ungerichteten Hypothese (4.4) ansonsten von einer gerichteten Hypothese (4.5).

Alternativhypothese

⁴ für weitere Quellenverweise siehe z. B. EID u. a. (2010, S. 196)

Inhaltlich bedeutet dies, dass sich das Versuchsergebnis in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Bedingungen systematisch unterscheidet.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ oder } \mu_D = 0 \quad (4.3)$$

$$H_1 \text{ ungerichtet: } \mu_1 \neq \mu_2 \text{ oder } \mu_D \neq 0 \quad (4.4)$$

$$H_1 \text{ gerichtet: } \mu_1 < \mu_2 \text{ bzw. } \mu_1 > \mu_2 \text{ oder } \mu_D < 0 \text{ bzw. } \mu_D > 0 \quad (4.5)$$

Alternativhypothesen Die in (4.4) und (4.5) formulierten Alternativhypothesen sind unspezifisch – sie machen keine Aussage über die konkrete Größe des Effekts. Spezifische Alternativhypothesen hingegen geben die (Mindest-)Größe des Effekts an. Bei einem Körpergrößenvergleich von Männern und Frauen könnte eine spezifische Alternativhypothese lauten, dass Männer im Durchschnitt mindestens 10 cm größer sind als Frauen (gerichtet) oder dass sich die Körpergrößen von Männern und Frauen im Durchschnitt um mindestens 10 cm unterscheiden (ungerichtet).

4.2.2 Richtige und falsche Entscheidungen

Statistische Aussagen sind immer an bestimmte Wahrscheinlichkeiten gekoppelt. Beim binären Entscheidungskonzept von Neyman und Pearson lassen sich bezogen auf die Null- und Alternativhypothese die in Tabelle 4.2 gezeigten vier Möglichkeiten unterscheiden.

Fehler erster Art Entscheidet man sich beispielsweise für die Alternativhypothese H_1 (systematischer Unterschied), obwohl in Wirklichkeit die Nullhypothese H_0 (zufälliger Unterschied) gilt, so begeht man einen sogenannten Fehler erster Art – auch α -Fehler oder Signifikanzniveau genannt. Die Wahrscheinlichkeit für den Fehler erster Art beträgt α , beispielsweise 5%. Ein Signifikanzniveau von 5% stellt in der Forschungspraxis einen üblichen Wert dar (BORTZ & SCHUSTER, 2010, S. 101; EID u. a., 2010, S. 241; und insbesondere COWLES & DAVIS, 1982).

Fehler zweiter Art Lehnt man die Alternativhypothese H_1 ab und behält die Nullhypothese H_0 bei, obwohl in Wirklichkeit ein systematischer Unterschied besteht, so begeht man einen sogenannten Fehler zweiter Art – auch β -Fehler genannt. Die Wahrscheinlichkeit für den Fehler zweiter Art beträgt β , beispielsweise 20%. Typischerweise wählt man $\beta = 4 \cdot \alpha$, siehe z. B., EID u. a. (2010, S. 241).

Teststärke Eine weitere wichtige Größe ist die Teststärke, sie ergibt sich zu $1 - \beta$. “Die Teststärke gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Signifikanztest zugunsten einer spezifischen Alternativhypothese entscheidet, falls diese gilt.” (BORTZ & SCHUSTER, 2010, S. 123). Beträgt die Teststärke bei einer spezifischen Alternativhypothese zum Beispiel 80%, so wird der postulierte Effekt der Alternativhypothese – falls er existiert – mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 80% entdeckt beziehungsweise führt zu einem signifikanten Ergebnis.

Tabelle 4.2: Richtige und falsche Entscheidungen beim binären Entscheidungskonzept von Neyman und Pearson (angelehnt an Eid, Gollwitzer & Schmitt, 2010, S. 196) – mit Angabe der Wahrscheinlichkeiten und gängiger Bezeichnungen

Statistische Entscheidung	Realität	
	H_0 ist wahr	H_1 ist wahr
H_0 wird verworfen;	(✗) <i>falsche</i> Entscheidung	(✓) <i>richtige</i> Entscheidung
H_1 wird beibehalten	Wahrscheinlichkeit: α Fehler erster Art, α -Fehler, Signifikanzniveau, Irrtumswahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit: $1 - \beta$ Teststärke, Power
H_0 wird beibehalten;	(✓) <i>richtige</i> Entscheidung	(✗) <i>falsche</i> Entscheidung
H_1 wird verworfen	Wahrscheinlichkeit: $1 - \alpha$	Wahrscheinlichkeit: β Fehler zweiter Art, β -Fehler

Das Signifikanzniveau α lässt sich a priori und ohne Kenntnis der tatsächlichen Verteilungsparameter definieren. Die Wahrscheinlichkeit β hängt hingegen – bei verbundenen Stichproben – von

Abhängigkeit der Parameter untereinander

- dem Signifikanzniveau α ,
- der Effektgröße ϵ_D ,
- der Standardabweichung σ_D ,
- der Art der Alternativhypothese (ungerichtet oder gerichtet) und
- dem Stichprobenumfang n

ab (siehe z. B. BORTZ & SCHUSTER, 2010, Kapitel 7.5; EID u. a., 2010, Kapitel 8.2 und 8.3). Abbildung 4.2 zeigt die Zusammenhänge bei einer verbundenen Stichprobe – dargestellt sind die Verteilungen unter der Null- und unter einer spezifischen, aber ungerichteten Alternativhypothese (zweiseitiger Test). Liegt der empirische Mittelwertunterschied (Effekt) außerhalb der kritischen Werte $\pm \bar{x}_{D,\alpha/2}$, so wird die Nullhypothese H_0 verworfen und die Alternativhypothese H_1 beibehalten. Die Wahrscheinlichkeit, die Nullhypothese fälschlicherweise verworfen zu haben – tatsächlich ist der Unterschied zufällig und die Nullhypothese gilt – beträgt α .

Liegt der empirische Mittelwertunterschied innerhalb der kritischen Werte $\pm \bar{x}_{D,\alpha/2}$, so wird die Nullhypothese H_0 beibehalten und die Alternativhypothese H_1 verworfen. Die Wahrscheinlichkeit, die Alternativhypothese fälschlicherweise verworfen zu haben – der Unterschied ist tatsächlich systematisch – beträgt β . Die Wahrscheinlichkeit β hängt aber wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, anders als die Wahrscheinlichkeit α , unter anderem vom postulierten Effekt $|\epsilon| = \mu_D$ ab.

4.2.3 Standardisierte Effektgröße

Vor allem bei noch jungen beziehungsweise wenig erforschten wissenschaftlichen Disziplinen gibt es wenig Vergleichsstudien, mit denen man im Vorfeld den zu erwar-

praktische Bedeutsamkeit

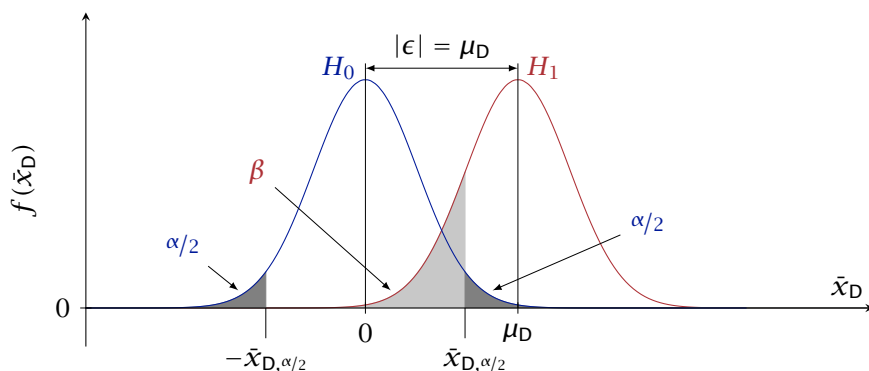


Abbildung 4.2: Veranschaulichung der Irrtumswahrscheinlichkeiten α und β bei einem Effekt der Stärke $|\epsilon| = \mu_D$. Dargestellt sind Verteilungen der Stichprobenmittelwerte bei einem Experiment mit verbundenen Stichproben unter der Null- und einer spezifischen aber ungerichteten Alternativhypothese (zweiseitiger Test). Die kritischen Werte für den α -Fehler sind $\pm \bar{x}_{D,\alpha/2}$. Liegt der empirisch ermittelte Effekt innerhalb der kritischen Werte, so wird die Nullhypothese H_0 beibehalten. **Hinweis:** Die Irrtumswahrscheinlichkeit β ändert sich nicht, wenn der Effekt ϵ das Vorzeichen wechselt – daher ist nur eine der zwei ($\epsilon = \mu_D, \mu_D > 0$) Alternativhypothesen dargestellt (Eid, Gollwitzer & Schmitt, 2010, S. 202).

tenden Effekt abschätzen kann. Zudem ist es oft nicht möglich, einen Grenzeffekt für eine praktische Bedeutsamkeit zu spezifizieren (siehe z. B. EID u. a., 2010, Kapitel 8.3; BORTZ & SCHUSTER, 2010, Kapitel 7.7). Bei sehr umfangreichen Stichproben können selbst minimale Effekte signifikant werden – dies ist aber bei Pilotstudien wie der vorliegenden Arbeit aufgrund der vergleichsweise geringen Stichprobenumfänge nicht der Fall.

Cohens δ Um die Vergleichbarkeit von Effekten über unterschiedliche Studien hinweg zu vereinfachen, hat J. COHEN (1962, 1988) (siehe auch J. COHEN, 1990, 1994) vorgeschlagen, den Effekt ϵ an der Standardabweichung σ zu standardisieren. Cohens δ ist daher dimensionslos und kann Werte von $-\infty$ bis $+\infty$ annehmen. Interpretiert werden kann Cohens δ wie die z -Werte bei der Standardnormalverteilung: Bei $\delta = 0,5$ beträgt die Differenz der Mittelwerte der Null- und Alternativhypothese eine halbe Standardabweichung. Daraus ergibt sich, dass mit zunehmendem δ die Überlappung der Verteilungen von Null- und Alternativhypothese abnimmt.

“große” und
“kleine” Effekte

Abhängig von der Stichprobenart ergeben sich unterschiedliche Bezeichnungen für die standardisierte Effektgröße und deren Schätzer. Zudem hat J. COHEN (1988) eine Konvention zur Beurteilung der Größe des Effekts vorgeschlagen. In Tabelle 4.3 sind die unterschiedlichen Bezeichnungen und Konventionen zusammengefasst.

Eine Vergleichbarkeit der Effektgröße abhängiger Stichproben δ'' mit der Effektgröße unabhängiger Stichproben δ' wird durch den Faktor $\sqrt{2}$ hergestellt⁵ (J. COHEN, 1988, S. 45; bzw. BORTZ & DÖRING, 2006, S. 629; oder BORTZ, 2005, S. 120, 139).

⁵ Eine Begründung für den Faktor $\sqrt{2}$ findet sich in J. COHEN (1988, S. 45 ff.) bzw. BORTZ und DÖRING (2006, S. 609) oder BORTZ (2005, S. 139). Erläuterungen über den Einfluss der Korrelation bzw. Kovarianz zwischen den Messwertpaare bei abhängigen Stichproben finden sich beispielsweise in EID u. a. (2010, S. 351-352, 355-357) oder BORTZ und DÖRING (2006, S. 609).

Tabelle 4.3: Bezeichnungen und Zusammenhänge für Cohens δ sowie deren Schätzer und Konvention zur Beurteilung der Effektgröße in Abhängigkeit von der Stichprobenart (angelehnt an die Nomenklatur in Eid, Gollwitzer & Schmitt, 2010). Anmerkung: σ_{inn} ($\hat{\sigma}_{\text{inn}}$) ist die (gepoolte) Innerhalb-Standardabweichung, Details siehe Anhang A.1.2.

	Populationsparameter	Schätzer		Konvention
		Standardabweichung bekannt	Standardabweichung unbekannt	
Einstichprobentest	$\delta = \frac{\mu - \mu_0}{\sigma}$	$d = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma}$	$d_2 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\hat{\sigma}}$	
“kleiner” Effekt:				$ \delta \approx 0,14$
“mittlerer” Effekt:				$ \delta \approx 0,35$
“großer” Effekt:				$ \delta \approx 0,57$
Zweistichprobentest (unabhängig)	$\delta' = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma_{\text{inn}}}$	$d' = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma_{\text{inn}}}$	$d'_2 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\hat{\sigma}_{\text{inn}}}$	
“kleiner” Effekt:				$ \delta' \approx 0,2$
“mittlerer” Effekt:				$ \delta' \approx 0,5$
“großer” Effekt:				$ \delta' \approx 0,8$
Zweistichprobentest (abhängig)	$\delta'' = \frac{\mu_D}{\sigma_D}$	$d'' = \frac{\bar{x}_D}{\sigma_D}$	$d''_2 = \frac{\bar{x}_D}{\hat{\sigma}_D}$	
“kleiner” Effekt:				$ \delta'' \approx 0,14$
“mittlerer” Effekt:				$ \delta'' \approx 0,35$
“großer” Effekt:				$ \delta'' \approx 0,57$

Sind drei der vier Parameter Signifikanzniveau α , Teststärke $1 - \beta$, Stichprobenumfang n und Effektgröße δ gegeben, so lässt sich der vierte bestimmen. Hierzu ist die Berechnung nonzentraler t -Verteilungen notwendig.⁶ In der Praxis verwendet man hierzu Computerprogramme wie zum Beispiel G*POWER (FAUL, ERDFELDER, LANG & BUCHER, 2007, 2009). Abbildung 4.3 zeigt in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n die Effektgröße, die mit einer Teststärke $1 - \beta$ von 80% entdeckt werden kann. Damit beispielsweise ein “großer” Effekt ($\delta'' = 0,57$) bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ (—) mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - \beta = 80\%$ bei einem zweiseitigen Test signifikant wird, ist bei einem zweiseitigen Test eine Stichprobengröße (aufgerundet) von $n = 27$ notwendig (tatsächliche Teststärke durch das Aufrunden $1 - \beta = 81,4\%$). Bei einem einseitigen Test ist eine Stichprobengröße von $n = 21$ notwendig.

Beispiel

⁶ Details siehe Anhang A.1.3

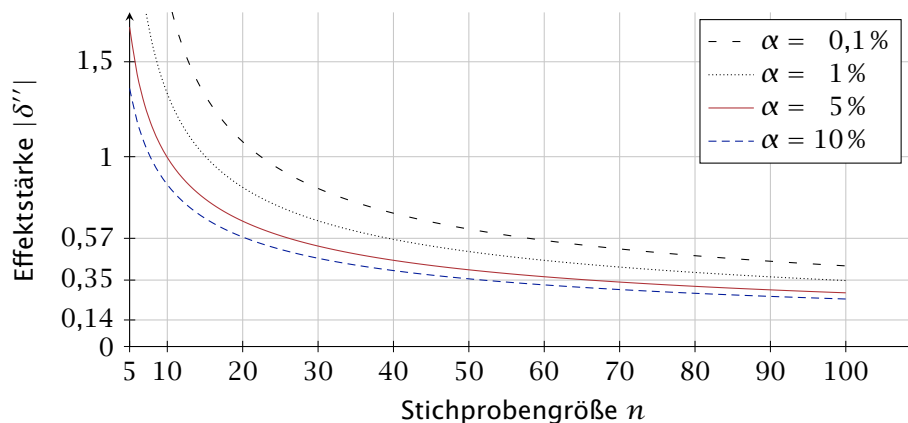


Abbildung 4.3: Zusammenhang zwischen dem Betrag der standardisierten Effektstärke $|\delta''|$ und der Stichprobengröße n zweier *abhängiger* Stichproben mit dem Signifikanzniveau α als Parameter (t -Test, zweiseitig, Teststärke $1 - \beta = 80\%$).

Die standardisierte Effektgröße nach J. COHEN setzt normalverteilte Stichproben voraus. Ist diese Annahme verletzt, so gelten die Werte nur näherungsweise.

In Anhang A.1.1 werden das Konzept des binären Entscheidungskonzepts und die Fehlerarten α und β anhand eines ausführlichen Beispiels erklärt.

4.3 Nichtparametrische und parametrische Hypothesentests

Um die zentrale Tendenz zweier Stichproben zu vergleichen, kommen in Abhängigkeit von bestimmten Voraussetzungen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Bei verbundenen Stichproben ist dies gleichbedeutend mit der Prüfung, ob in der Population die zentrale Tendenz aller Differenzen μ_D null beträgt (siehe z. B. EID u. a., 2010, S. 348). Die zentrale Tendenz ist im Fall von normalverteilten Merkmalen der arithmetische Mittelwert und im Fall von nichtnormalverteilten Merkmalen der Median. **Hinweis:** Alle nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf Hypothesentests für verbundene Stichproben.

Gauß-Test Ist die Population der Differenzen normalverteilt und ist die Standardabweichung als Populationsparameter σ_D bekannt, so wird der Einstichproben-Gauß-Test⁷ beziehungsweise der Gauß-Test für verbundene Stichproben⁸ verwendet – der Populationsmittelwert μ_D wird aus der Stichprobe geschätzt ($\hat{\mu}_D$).

t -Test Im Normalfall muss die Standardabweichung der Population σ_D ebenfalls aus der Stichprobe geschätzt werden ($\hat{\sigma}_D$). Dann verwendet man den Einstichproben- t -Test beziehungsweise den t -Test für verbundene Stichproben.⁹

⁷ wird auch Einstichproben-z-Test genannt

⁸ Der Einstichproben-Gauß-Test entspricht formal dem Gauß-Test für verbundene Stichproben.

⁹ Der Einstichproben- t -Test entspricht formal dem t -Test für verbundene Stichproben.

Sind die Merkmale in der Stichprobe nicht normalverteilt, so kommen sogenannte nicht-parametrische¹⁰ Verfahren zum Einsatz (DULLER, 2008; EID u. a., 2010, Kapitel 9.2.2, 10.2, 11.2 und 12.1.2; BORTZ & SCHUSTER, 2010, Kapitel 8.7). Das nichtparametrische Äquivalent für die zwei oben erwähnten parametrischen Hypothesentests für verbundene Stichproben ist der Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest¹¹.

nichtpara-
metrische
Tests

Die Annahmen oder Voraussetzungen der in diesem Abschnitt erwähnten Hypothesentests sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Voraussetzungen für drei ausgewählte Hypothesentests – die Angaben gelten für verbundene Stichproben.

Test	Annahmen
alle	<ul style="list-style-type: none"> • stetige Verteilung • mindestens intervallskalierte Daten (also kardinal oder metrisch skaliert) • Unabhängigkeit der Stichprobenpaare
Gauß- oder z-Test	<ul style="list-style-type: none"> • Normalverteilung • Standardabweichung der Population bekannt
t-Test	<ul style="list-style-type: none"> • Normalverteilung
Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest	<ul style="list-style-type: none"> • Verteilung symmetrisch zur zentralen Tendenz (Median)

Die Überprüfung, ob eine Stichprobe normalverteilt ist, erfolgt mit dem Shapiro-Wilk-Test, er ist der Test mit der höchsten Güte (DULLER, 2008, S. 121). Problematisch bei den sogenannten Verteilungsanpassungstests ist die Formulierung einer spezifischen Alternativhypothese zur Bestimmung der Teststärke (FIELD, 2009, Kapitel 5.4 und 5.5; EID u. a., 2010, Kapitel 10.6.1; für Hinweise zu grafischen Hilfsmitteln siehe FIELD, 2009, S. 134).

Test auf Nor-
malverteilung

¹⁰ auch *verteilungsfrei* oder *nonparametrisch* genannt

¹¹ weitere Bezeichnung: *Wilcoxon-Test für Paardifferenzen*

5 Grundlagen der Psychophysik

5.1 Klassische Psychophysik.	35
5.2 Die psychometrische Funktion	39
5.3 Übersicht und Auswahl der Methoden zur Schwellenbestimmung	41

Die Fragestellung dieser Arbeit fällt in das Gebiet der Psychophysik. Gegenstand der Psychophysik sind die quantitativen Beziehungen zwischen den objektiven äußeren Reizen (Reizgröße R) und der subjektiven Wahrnehmung (Empfinden E). Es werden also Gesetze der Form

Gegenstand der Psychophysik

$$E = f(R) \tag{5.1}$$

gesucht. Die Empfindung E ist dimensionslos, daher wird der Reiz R normalerweise auf eine Konstante mit der gleichen Dimension, also zum Beispiel R/R_0 , bezogen. Beim Hören würde man demnach den Schalldruck als Reiz und die empfundene Lautstärke als Empfindung bezeichnen. Begründet wurde die Psychophysik als Teilgebiet der (heutigen) Sinnespsychologie und -physiologie durch FECHNER (1860).

Beispiel: Schall

Um die in den Versuchen verwendeten Methoden besser einordnen zu können, wird im Folgenden kurz auf die klassische Psychophysik im Allgemeinen, die psychometrische Funktion und auf die klassischen und modernen Methoden der Psychophysik eingegangen.

5.1 Klassische Psychophysik

In der klassischen Psychophysik wird nach dem Zusammenhang zwischen den physikalischen Merkmalen von Reizen, beispielsweise Reizintensität oder -dauer, und dem Erleben beziehungsweise der Wahrnehmungsleistungen gefragt. FECHNER (1860) bezeichnet dies als äußere Psychophysik.

äußere (klassische) Psychophysik

Mit den Zusammenhängen zwischen dem Erleben und den unmittelbaren neurobiologischen Vorgängen beschäftigt sich – ebenfalls nach FECHNER (1860) – die innere Psychophysik (z. B. HAGENDORF, KRUMMENACHER, MÜLLER & SCHUBERT, 2011, Kapitel 4).

innere Psychophysik

Im Weiteren wird auf die – im Rahmen dieser Arbeit relevante – klassische Psychophysik näher eingegangen. Dazu werden, neben der Problematik bei Messungen am Menschen, das Schwellenkonzept der Psychophysik und das Weber'sche Gesetz kurz angesprochen.

5.1.1 Messproblematik

Die Messung am Menschen beziehungsweise an Versuchspersonen beruht auf deren subjektivem Urteil und auf Berichten über ihr Wahrnehmungserleben (z. B. SIXTL, 1982, S. 65; oder HAGENDORF u. a., 2011, S. 43).

Es ist im Allgemeinen davon auszugehen, dass zwischen der Reizgröße und den Urteilen der Versuchspersonen ein – im mathematischen Sinne – monotoner Zusammenhang besteht; Beispiel: Je höher die Lufttemperatur desto größer die empfundene Wärme. Allerdings bewirken physikalische Reize eine eigene Wahrnehmung, welche die Eigenschaften der sie auslösenden Reize keineswegs korrekt wiedergeben muss.

derselbe Reiz
– gleiche Be-
dingungen

Ein und derselbe Reiz kann unter gleichen Bedingungen unterschiedliche Empfindungen hervorrufen. Aus Abbildung 5.1 ergibt sich anschaulich, dass mit größer werdendem “Überlappungsbereich” die Fähigkeit, zwei Reize zu unterscheiden, abnimmt. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass die bioelektrischen Potenziale peripherer Nerven bei gleicher Reizstärke nicht immer exakt gleich ausfallen, sondern um einen Modalwert streuen.

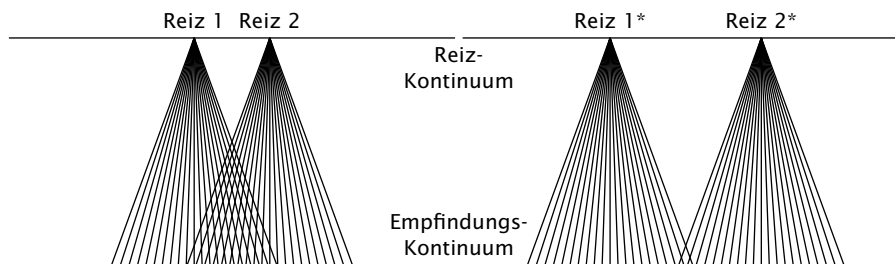


Abbildung 5.1: Beispiel zweier Paare von Empfindungsverteilungen, die sich unterschiedlich stark überlappen: Je größer der Überlappungsbereich desto geringer die Urteilssicherheit bezüglich der Unterschiedlichkeit der Reize 1 und 2 bzw. 1* und 2*, nach Sixtl (1982, Abb. 3.1, S. 66).

derselbe Reiz – unter-
schiedliche
Bedingungen

Unter unterschiedlichen Bedingungen können gleiche Reize auch zu unterschiedlichen Empfindungen führen. So spielen zum Beispiel bei der Wahrnehmung der Lufttemperatur auch andere Faktoren wie Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und Luftbewegung eine Rolle – Stichwort “gefühlte Temperatur”. Aber auch abstraktere Faktoren, welche nicht direkt mit dem entsprechenden Empfinden in Zusammenhang stehen, können einen Einfluss haben – beispielsweise die “Tagesform”. Bei der Wahrnehmung der Lufttemperatur kann beispielsweise auch das Ambiente einen Einfluss haben. Die gleiche Kombination aus Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -bewegung kann in einer Kirche, einem Wirtshaus oder einem freien Platz ein unterschiedliches Temperaturempfinden auslösen.

Aus den oben genannten Gründen erfolgt in der Psychophysik in der Regel eine statistische Betrachtung der Versuchsergebnisse.

5.1.2 Schwellenkonzept

Von zentraler Bedeutung ist der Begriff der Schwelle. Es werden zumindest zwei¹ Arten von Schwellen unterschieden: Absolut- und Unterschiedsschwelle (z. B. BAIRD & NOMA, 1978; oder GESCHEIDER, 1997). Die Absolutschwelle *DT* (engl. *Detection Threshold*) ist die kleinste Reizintensität, die nötig ist, damit eine Person einen Reiz in 50% der Fälle entdeckt (Reiz-Detektion). Die Unterschiedsschwelle *JND* (engl. *Just Noticeable Difference*) ist die kleinste Differenz zwischen zwei Reizen, die einer Person in 50% der Fälle ihre Unterscheidung erlaubt (Reiz-Diskrimination).

Absolutschwelle

Unterschiedsschwelle

Im Rahmen dieser Arbeit wird das 50%-Kriterium zur Definition der Schwellen verwendet – es sind aber auch andere Definitionen möglich. So lässt sich auch die Standardabweichung der zu Grunde liegenden psychometrischen Funktion – siehe weiter unten – zur Definition der Schwellen heranziehen (HARVEY, 2011).

50%-Kriterium

Bei Schwellwertangaben sind immer auch die Versuchsbedingungen zu nennen. So können beispielsweise die Schwellen für Vibration unter anderem von der Größe der Kontaktfläche und -kraft abhängen (z. B. VERRILLO, 1963; VERRILLO, 1966; WHITEHOUSE & GRIFFIN, 2002).

Schwellwertangaben kritisch betrachten

Es gibt in der Literatur keine einheitliche Terminologie in diesem Bereich. Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht über gebräuchliche Begriffe und Definitionen.

Tabelle 5.1: Terminologie und Definitionen im Zusammenhang mit dem Schwellenkonzept der Psychophysik – gängige Abkürzungen sind in Klammern angegeben

	allgemeiner Schwellenbegriff	geringste wahrnehmbare Reizintensität	geringster wahrnehmbarer Reizintensitätszuwachs
deutsch	<ul style="list-style-type: none"> • Schwelle • Sinnesschwelle • Wahrnehmungsschwelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Absolutschwelle • absolute Schwelle • Reizschwelle • Reizlimen (RL) • Wahrnehmungsschwelle • absolute Wahrnehmungsschwelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterschiedsschwelle • Differenzlimen (DL) • Differenzschwelle • differenzielle Wahrnehmbarkeitsschwelle • eben merklicher Unterschied (emU)

Fortsetzung nächste Seite...

¹ Beim Geruchssinn werden drei Schwellen unterschieden: Absolut-, Erkennungs- und Unterschiedsschwelle. Die Unterscheidung zwischen Absolut- und Erkennungsschwelle erfolgt, weil ein Duft bei geringer Konzentration zunächst unspezifisch wahrgenommen wird. Erst bei höherer Konzentration wird er identifiziert beziehungsweise erkannt (BIRBAUMER & SCHMIDT, 2006, S. 448). Auch beim Sehen wird diese Unterscheidung getroffen (z. B. STRASBURGER, RENTSCHLER & JÜTTNER, 2011).

	Tabelle 5.1: (fortgesetzt)		
	allgemeiner Schwellenbegriff	geringste wahrnehmbare Reizintensität	geringster wahrnehmbarer Reizintensitätszuwachs
englisch	<ul style="list-style-type: none"> • Threshold • Sensory Threshold • Limen 	<ul style="list-style-type: none"> • Absolute Threshold • Detection Threshold (DT) • Stimulus Threshold • Perception Threshold • Sensing Threshold • Perceptibility Threshold • Threshold of Perception 	<ul style="list-style-type: none"> • Difference Threshold • Difference Limen (DL) • Just Noticeable Difference (JND) • Stimulus JND
mögliche Definition(en)	<ul style="list-style-type: none"> • “Eine Wahrnehmungsschwelle markiert den Übergang von einer perceptiven Erfahrung zu einer anderen als Resultat einer minimalen Änderung des physikalischen Reizes.” (HAGENDORF u. a., 2011, S. 43) 	<ul style="list-style-type: none"> • “Die Absolutschwelle bezeichnet die geringste Intensität eines Reizes, die zu einer berichtbaren Wahrnehmung beim Beobachter führt.” (HAGENDORF u. a., 2011, S. 44) • “[...] was eine absolute Schwelle ist, d. h. die minimale Stimulation, die notwendig ist, um ein bestimmtes Licht, einen bestimmten Schall, Druck, Geschmack oder Geruch in mindestens 50% aller Fälle wahrzunehmen.” (MYERS, 2008, S. 216) 	<ul style="list-style-type: none"> • “Die Unterschiedsschwelle markiert die Intensität, die nötig ist, um einen Reiz von einem anderen zu unterscheiden.” (HAGENDORF u. a., 2011, S. 44) • “Die Unterschiedsschwelle ist der <i>eben noch merkbliche Unterschied</i>, den ein Mensch in der Hälfte aller Fälle zwischen zwei Reizen ausmachen kann.” (MYERS, 2008, S. 219) • “[...] JND is equivalent to one standard deviation of the Gaussian distribution underlying the psychometric function.” (HARVEY, 2011)

Information Transfer

Absolut- und Unterschiedsschwelle sind psychophysische Kennzahlen, um Angaben darüber zu machen, wie gut Reize einer bestimmten Sinnesmodalität erkannt beziehungsweise unterschieden werden können. Mit dem (statischen) Informationstransfer *IT* (angegeben in Bit, engl. *Information Transfer*) hat sich im Bereich der Haptik-Forschung eine weitere Kennzahl etabliert. Sie erlaubt Aussagen darüber, wie gut Reize (absolut) identifiziert werden können. Es geht dabei – im Gegensatz zu den Schwellwertexperimenten – darum, Reize bestimmten Kategorien zuzuordnen, ohne dabei einen direkten Vergleichsreiz zu haben. Der Informationstransfer *IT* kann ein Maß dafür sein, wie viel Information zwischen einer haptischen Benutzerschnittstelle und

dem Nutzer übertragen werden kann (TAN, 1996, 1997; TAN, REED & DURLACH, 2010; SAMUR, 2010). CHOLEWIAK, TAN und EBERT (2008) konnten beispielsweise zeigen, dass Probanden 2 bis 3 unterschiedliche Kraftniveaus – in einem Bereich von 0,1 N bis 5 N – korrekt identifizieren können.

5.1.3 Weber'sches Gesetz

WEBER (1834) beschäftigte sich unter anderem damit, die Unterschiedsschwellen bei der Wahrnehmung von Gewichten zu bestimmen. Dazu mussten die Probanden in jede Hand gleichzeitig je ein Gewicht nehmen und beide Gewichte vergleichen. Ein Gewicht blieb dabei unverändert (Konstantreiz² R), während das andere variiert wurde (Vergleichsreiz³ $R + \Delta R$). WEBER stellte fest, dass die so ermittelten Unterschiedsschwellen JND in einem festen Verhältnis k zum Konstantreiz R stehen. Dieser Zusammenhang wird als Weber'sches Gesetz (5.2) bezeichnet. Das heißt, je größer der Konstantreiz ist, desto größer muss der betragsmäßige Unterschied ΔR zum Vergleichsreiz sein, damit ein Proband ihn als unterschiedlich wahrnimmt (z. B. BAIRD & NOMA, 1978; SIXTL, 1982; GESCHIEDER, 1997; HAGENDORF u. a., 2011).

$$\frac{\Delta R_{JND}}{R} = \frac{JND}{R} = k = \text{konstant} \quad (5.2)$$

Die Konstante k wird als Weber-Konstante⁴ bezeichnet und kann als verallgemeinerte – da dimensionslose – Unterschiedsschwelle aufgefasst werden. Das Weber'sche Gesetz ist selbstverständlich lediglich eine Näherung und gilt im Allgemeinen nur für "mittlere" Reizintensitäten. Die Weber-Konstante ist reizspezifisch und abhängig von den Versuchsbedingungen⁵. Beim Gewichtsexperiment von WEBER (1834) ergab sie sich beispielsweise zu $1/30$ bis $1/15$: "Unter den günstigsten Umständen nimmt man eine zwischen Gewichten Statt findende [sic] Gewichtsverschiedenheit noch dann wahr, wenn der Unterschied auch nur $1/30$ oder $1/15$ des einen Gewichts beträgt [...]" (WEBER, 1835, S. 156).

Weber-Konstante

5.2 Die psychometrische Funktion

Der Zusammenhang zwischen den Antworten oder der Wahrnehmung einer Person und dem physikalischen Reiz lässt sich durch eine sogenannte psychometrische Funktion beschreiben (z. B. HAGENDORF u. a., 2011, S. 44) – eingeführt wurde der Begriff von URBAN (1908, S. 107). Die psychometrische Funktion bildet die Grundlage für eine Vielzahl von Methoden zur Schwellwertbestimmung – sie ist eine stetige eindimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung und modelliert die Wahrnehmung als stationären stochastischen Prozess.

² weitere Bezeichnungen: *Standard-, Referenz- oder Basisreiz*

³ weitere Bezeichnung: *Testreiz*

⁴ weitere Bezeichnungen: *Weber-Bruch* oder *Weber-Quotient*

⁵ Beispiele: a) Reizepräsentation gleichzeitig/nacheinander b) zeitliche Einschränkungen

Trägt man den Anteil positiver Antworten $\Psi(x)$ bei einem hypothetischen Absolutschwellenexperiment gegen die Reizgröße x auf, so ergibt sich prinzipiell der in Abbildung 5.2 dargestellte Verlauf. Der Wertebereich einer psychometrischen Funktion muss nicht zwangsläufig 0 bis 1 umfassen. Man unterscheidet zwei Parameter, die den Wertebereich einschränken können: die Ratewahrscheinlichkeit γ und die Lapsus-Rate λ .

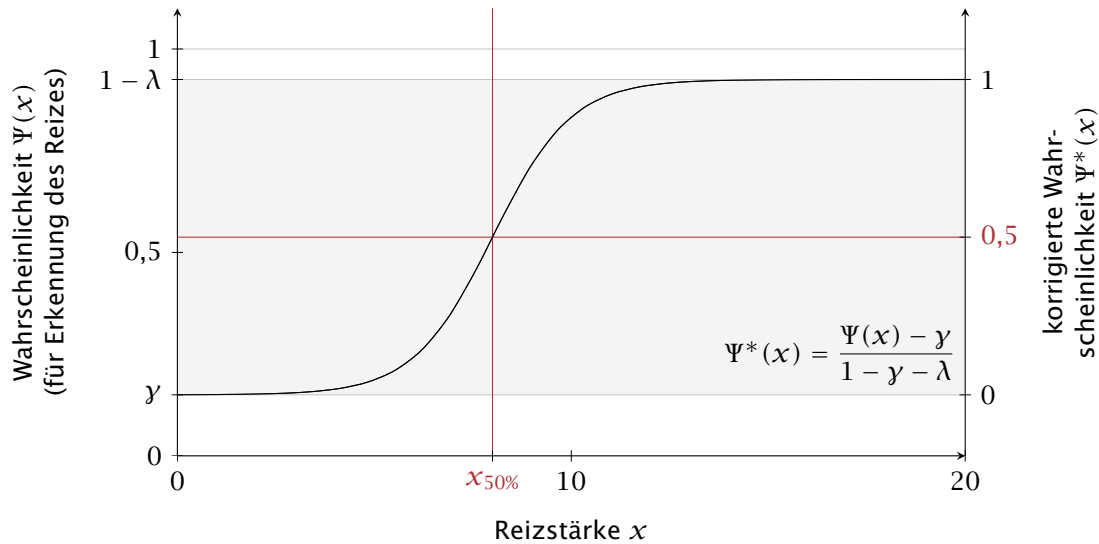


Abbildung 5.2: Beispiel einer psychometrischen Funktion eines Experiments zur Bestimmung der Absolutschwelle mit der Ratewahrscheinlichkeit γ und der Lapsus-Rate λ . Die Absolutschwelle $x_{50\%}$ gemäß dem 50%-Kriterium liegt bei $x(\Psi^* = 0,5) = x_{50\%} = 8$.

γ und λ Die Ratewahrscheinlichkeit γ modelliert das vermeintliche Erkennen des Reizes durch Raten⁶. Die Lapsus-Rate λ hingegen modelliert ein Nichterkennen des Reizes im eigentlich überschwelligen Bereich⁷. Allerdings ist die Lapsus-Rate normalerweise vernachlässigbar und wird von den folgenden Betrachtungen ausgeschlossen (z. B. STRASBURGER, 2001a, 2001b; WICHMANN & HILL, 2001).

sensorische Leistung $\Psi^*(x)$ beschreibt näherungsweise die eigentliche sensorische Leistung⁸, während $\Psi(x)$ die beobachtete Wahrscheinlichkeit beschreibt. Der Zusammenhang zwischen $\Psi^*(x)$ und $\Psi(x)$ ergibt sich allgemein zu

$$\Psi(x; \alpha, \beta, \gamma, \lambda) = \gamma + (1 - \gamma - \lambda) \cdot \Psi^*(x; \alpha, \beta). \quad (5.3)$$

Dabei sind α und β zunächst nicht näher spezifizierte Parameter zur Charakterisierung der Lage und Steigung der psychometrischen Funktion (z. B. KINGDOM & PRINS, 2010b, Kapitel 4.3, insbesondere Abbildung 4.8).

⁶ weitere Bezeichnungen: Rate korrekter Zuweisungen im unterschwelligen Bereich oder Rauschen

⁷ weitere Bezeichnungen: Rate falscher Zuweisungen im überschwelligen Bereich oder beobachtete Verpässer

⁸ siehe Kriterien-Problem auf Seite 45

Psychometrische Funktionen haben im Allgemeinen einen S-förmigen Verlauf. Das muss nicht immer so sein – es hängt letztendlich von den jeweiligen Versuchsbedingungen und dem Versuchsdesign ab. Zur analytischen Beschreibung eines S-förmigen Verlaufs eignen sich Sigmoidfunktionen wie beispielsweise die logistische Funktion

analytische
Beschreibung

$$\Psi^*(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{1 + e^{-\beta(x-\alpha)}} \quad (5.4)$$

oder die kumulative Normalverteilung

$$\Psi^*(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\left(\frac{\beta^2}{2}(\hat{x}-\alpha)^2\right)} d\hat{x}. \quad (5.5)$$

Beide Funktionen⁹ lassen sich durch den Lageparameter α und den Steigungsparameter β charakterisieren. Im Fall der kumulativen Normalverteilung entspricht die Standardabweichung σ dem Kehrwert des Steigungsparameters β . Für weiterführende Informationen siehe beispielsweise KINGDOM und PRINS (2010b, S. 81–85) und KLEIN und MACMILLAN (2001). Die Parameter α und β der psychometrischen Funktionen sind nicht mit den Fehlerwahrscheinlichkeiten aus der Statistik zu verwechseln.

α und β

5.3 Übersicht und Auswahl der Methoden zur Schwellenbestimmung

Die in den Experimenten verwendeten Methoden zur Schwellenbestimmung gehören zu den sogenannten modernen beziehungsweise adaptiven Methoden der Psychophysik. Nach einer knappen Darstellung der klassischen Methoden wird daher auf die Grundlagen der modernen Methoden eingegangen. Zu den modernen Methoden gehört auch die Verwendung bestimmter Antwort-Paradigmen – die notwendigen Grundlagen hierzu werden ebenfalls erklärt. Für weiterführende Informationen sei auf Standardwerke wie zum Beispiel GESCHEIDER (1997), MACMILLAN und CREELMAN (2004), FALMAGNE (1986) sowie KLING und RIGGS (1972) verwiesen – eine kompakte Einführung findet sich beispielsweise in KÜHNER, BUBB, BENGLER und WILD (2012).

5.3.1 Klassische Methoden

Die drei klassischen Methoden zur Schwellenbestimmung gehen auf FECHNER (1860) zurück:

- Methode der richtigen und falschen Fälle,

⁹ Die in (5.4) und (5.5) verwendeten Formulierungen beschreiben die um die Ratewahrscheinlichkeit y und die Lapsus-Rate λ korrigierten psychometrischen Funktionen, siehe (5.3) und Abbildung 5.2.

- Methode der eben merklichen Unterschiede
- Methode der mittleren Fehler

Gebräuchlich sind heute die Bezeichnungen

- Konstantreiz- oder Konstanzmethode,
- Grenzverfahren und
- Herstellungsverfahren.

**Konstanz-
methode** Für die weiteren Ausführungen sind die Konstanzmethode und das Grenzverfahren von Bedeutung. Bei der Konstanzmethode werden einem Probanden zuvor festgelegte Reize (Absolutschwelle) oder Reizpaare (Unterschiedsschwelle, Konstantreiz R und Vergleichsreiz $R + \Delta R$) in zufälliger Abfolge mehrmals präsentiert. Der Proband muss dabei die Reize oder Reizpaare beurteilen beziehungsweise klassifizieren. Je nach Klassifizierungsmöglichkeit ergeben sich unterschiedliche psychometrische Funktionen, die nicht immer S-förmig verlaufen müssen. Mögliche Klassifizierungsmöglichkeiten sind

1. Reiz vorhanden/nicht vorhanden,
2. größer/kleiner,
3. größer/gleich (z. B. ENGEN, 1972, S. 29; oder ULRICH & MILLER, 2004) oder
4. größer/gleich/kleiner (z. B. KLING & RIGGS, 1972, Abbildung 2.7).

Die Möglichkeiten 2–4 sind geeignet, um Unterschiedsschwellen zu ermitteln. Möglichkeit 1 eignet sich, um Absolutschwellen zu bestimmen.

**Absolut-
schwelle** Bei einem Experiment zur Bestimmung einer Absolutschwelle könnte die Aufgabe für den Probanden darin bestehen, dem Versuchsleiter mitzuteilen, ob er innerhalb eines bestimmten Zeitfenster einen Reiz wahrgenommen hat oder nicht. Abbildung 5.2 zeigt eines der möglichen Ergebnisse eines solchen Experiments. Die Absolutschwelle gemäß dem 50%-Kriterium ist gekennzeichnet.

**Unterschieds-
schwelle** Zur Ermittlung einer Unterschiedsschwelle werden dem Probanden Reizpaare (Konstantreiz R und Vergleichsreiz $R + \Delta R$) präsentiert. Die Reizpräsentation erfolgt entweder in räumlicher oder zeitlicher Nähe. Der Proband hat dann zum Beispiel die Aufgabe, zu urteilen, ob der Vergleichsreiz $R + \Delta R$ größer oder kleiner als der Konstantreiz R ist (Klassifizierungsmöglichkeit 2). Abbildung 5.3 zeigt das entsprechend idealisierte Versuchsergebnis. In diesem Fall kann man die obere beziehungsweise untere Unterschiedsschwelle bei einer Wahrscheinlichkeit von 75 % beziehungsweise 25 % ablesen.

5.3 Übersicht und Auswahl der Methoden zur Schwellenbestimmung

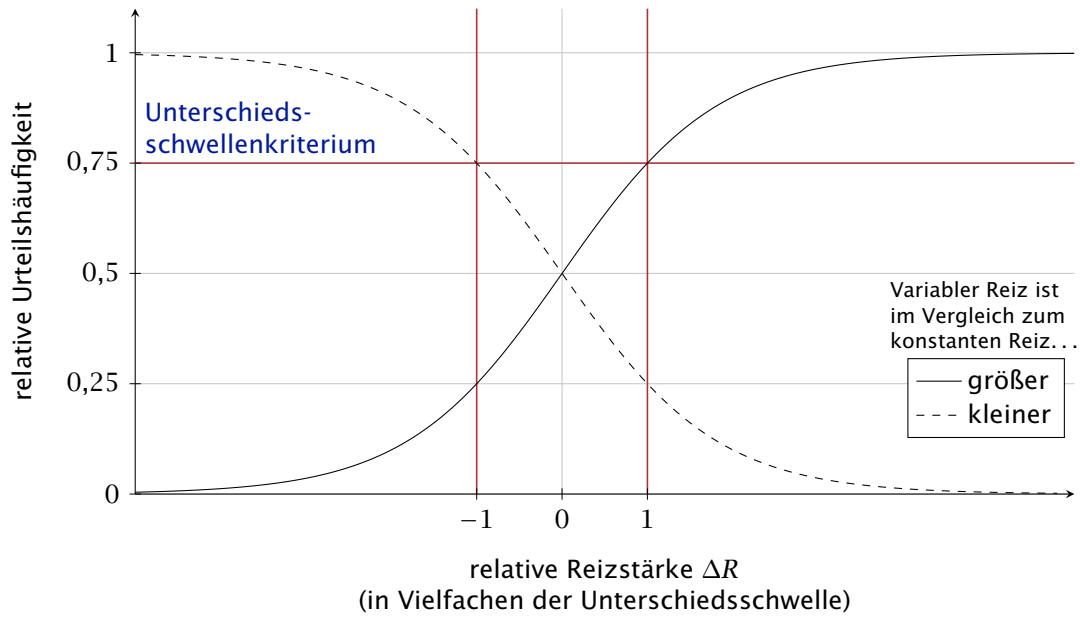


Abbildung 5.3: Idealisierte psychometrische Funktionen eines Experiments nach der Konstanzmethode zur Unterschiedsschwellenbestimmung mit zwei Antwortkategorien (größer/kleiner).

Abbildung 5.4 zeigt das Ergebnis bei drei Antwortkategorien (größer/gleich/kleiner). Hier stellt eine Wahrscheinlichkeit von 50% das Unterschiedsschwellen-Kriterium dar.

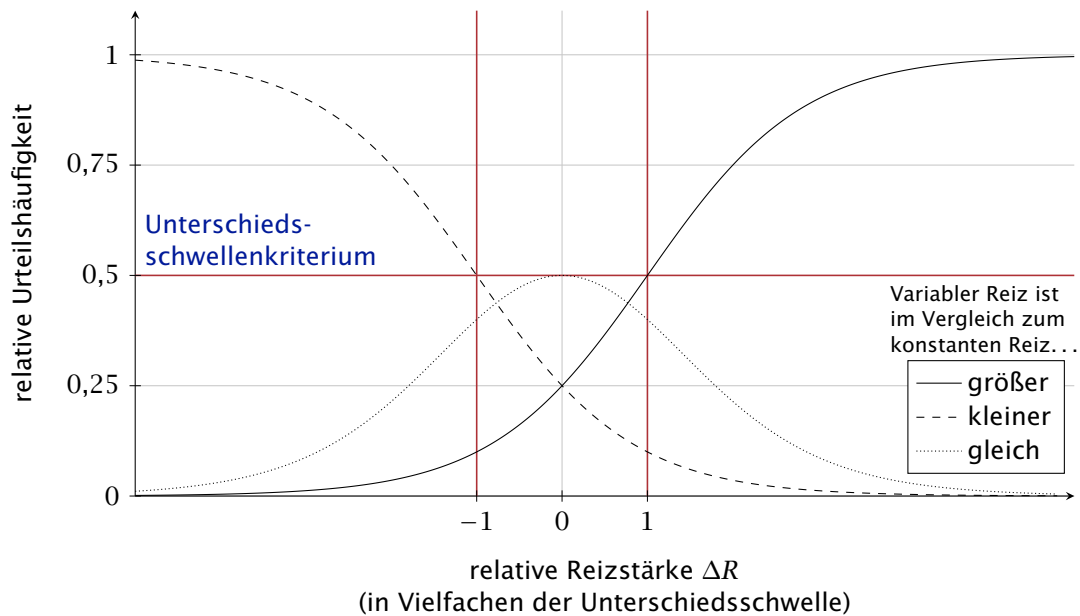


Abbildung 5.4: Idealisierte psychometrische Funktionen eines Experiments nach der Konstanzmethode zur Unterschiedsschwellenbestimmung mit drei Antwortkategorien (größer/gleich/kleiner)

5 Grundlagen der Psychophysik

Grenzverfahren Das Grenzverfahren ermittelt – im Gegensatz zur Konstanzmethode – nicht die gesamte psychometrische Funktion, sondern es werden direkt die Schwellen bestimmt. Einem Probanden werden in mehreren Durchgängen auf- und absteigende Reize (Absolutschwelle) oder Reizpaare (Unterschiedsschwelle) dargeboten. Die jeweiligen Anfangsintensitäten werden meistens variiert.

Absolutschwelle Bei einem Experiment zur Bestimmung einer Absolutschwelle wird der Proband gefragt, ob er den Reiz x wahrnimmt oder nicht. Bei einer Veränderung der Antwort, also bei einem Ja/Nein-Wechsel, wird der jeweilige Durchgang beendet, siehe Tabelle 5.3a. Die Ermittlung der Absolutschwelle erfolgt durch Mittelung der Reizstärken an den Ja/Nein-Grenzen.

Tabelle 5.2: Hypothetische Versuchsergebnisse zweier Experimente nach der Grenzverfahren zur Ermittlung der Absolutschwelle (a) und Unterschiedsschwelle (b) mit jeweils sechs Durchgängen. Ausgewertet werden die Reizstärken x bzw. relativen Reizstärken Δx an den Übergangspunkten.

(a) Durch Mittelung der Reizstärken an den Übergangspunkten ergibt sich die Absolutschwelle zu $5\frac{1}{3}$. ✓ markiert ein Erkennen und ✗ ein Nichterkennen des Reizes.

x	① _↓	② _↑	③ _↓	④ _↑	⑤ _↓	⑥ _↑
12					✓	
11					✓	
10	✓				✓	
9	✓		✓		✓	
8	✓		✓		✓	
7	✓		✓		✓	
6	✓		✓	✓	✗	
5	✗	✓	✗	✗		✓
4		✗		✗		✗
3		✗		✗		✗
2		✗		✗		✗
1		✗				✗
0		✗				
✓/✗	5,5	4,5	5,5	5,5	6,5	4,5

(b) Durch Mittelung der Reizstärken an den Übergangspunkten ergeben sich die obere Unterschiedsschwelle $\Delta\bar{R}_{\text{JND,o}}$ zu $2\frac{1}{3}$ und die untere Unterschiedsschwelle $\Delta\bar{R}_{\text{JND,u}}$ zu 2,5.

Δx	① _↓	② _↑	③ _↓	④ _↑	⑤ _↓	⑥ _↑
6	>					
5	>				>	
4	>		>		>	
3	>		>	>	=	
2	=	>	=	=	=	>
1	=	=	=	=	=	=
0	=	=	=	=	=	=
-1	=	=	=	=	=	=
-2	<	=	=	=	<	=
-3		<	<	=		=
-4		<		<		<
-5		<		<		<
-6		<				
$\Delta R_{\text{JND,o}}$	2,5	1,5	2,5	2,5	3,5	1,5
$ \Delta R_{\text{JND,u}} $	1,5	2,5	2,5	3,5	1,5	3,5

Unterschiedsschwelle Zur Ermittlung einer Unterschiedsschwelle werden dem Probanden – wie bei der Konstanzmethode – Reizpaare (Konstantreiz R und Vergleichsreiz $R + \Delta R$) präsentiert. Der Vergleichsreiz ist dabei anfangs entweder intensiver (absteigende Durchgänge) oder schwächer (aufsteigende Durchgänge) als der Konstantreiz. Der Proband muss den Vergleichsreiz relativ zum Konstantreiz beurteilen (größer/gleich/kleiner). Somit ergeben sich pro Durchlauf zwei Antwort-Wechsel (Übergangspunkte). Die obere und untere Unterschiedsschwelle ergibt sich durch Mittelung der Reizintensitäten an den Übergangspunkten. Tabelle 5.3b zeigt exemplarisch das Ergebnis eines solchen Experiments.

Die klassischen Methoden weisen einige Nachteile auf. Allen ist gemeinsam, dass sie relativ ineffizient sind, da viel Information fern der eigentlichen Schwellwerte gesammelt wird (z. B. FALMAGNE, 1986, S. 1-24). Das Grenz- und das hier nicht diskutierte Herstellungsverfahren sind zudem für den Probanden sehr einfach zu durchschauen und gelten als ungenau. Die einfache Durchschaubarkeit kann zu sogenannten Habituations- und Antizipationsfehlern führen (z. B. GESCHEIDER, 1997, S. 56). Kritik

Eine weitere Eigenschaft der bisher diskutierten Methode ist, dass es zu einer Vermischung von sensorischen und kognitiven Entscheidungsprozessen bei der Urteilsfindung kommt – dem sogenannten Kriterienproblem. Bei einem Experiment zur Ermittlung einer Absolutschwelle können beispielsweise zwei Probanden das gleiche sensorische “interne Empfinden” haben und es dennoch unterschiedlich beurteilen. Ein vorsichtiger Proband mit einem strengen Kriterium “entdeckt” den Reiz erst, wenn er sich sehr sicher ist, während ein weniger gewissenhafter Proband mit einem laxen Kriterium bereits bei einer relativ großen Unsicherheit den Reiz “entdeckt”. Je nach Untersuchungsziel ist diese Vermischung erwünscht oder nicht. Kriterienproblem

Um dem Kriterienproblem zu entgegnen, werden im Rahmen dieser Arbeit die Versuchsbedingungen für alle Probanden möglichst konstant gehalten. Zudem werden teilweise sogenannte Zwangswahlverfahren oder Forced-Choice-Methoden eingesetzt – diese minimieren ebenfalls die Störeinflüsse durch das Kriterienproblem (z. B. EHRENSTEIN & EHRENSTEIN, 1999, S. 1219) und werden im nächsten Kapitel kurz diskutiert.

5.3.2 Antwortparadigmen

In den bisher diskutierten Beispielen zu den klassischen Methoden musste der Proband sich entscheiden, ob ein Reiz oder Reizunterschied subjektiv spürbar (größer/kleiner/gleich) war oder nicht (Ja/Nein) – es gab keine objektiv richtigen oder falschen Antworten (z. B. EHRENSTEIN & EHRENSTEIN, 1999, S. 1219). Bei einem Experiment zur Ermittlung einer Absolutschwelle, beispielsweise mit dem Ja/Nein-Paradigma ist objektiv betrachtet in jeder Darbietung ein Reiz $R \geq 0$ vorhanden. Wenn die subjektive Antwort des Probanden ausgewertet wird, dann spricht man von einem sogenannten Ja/Nein-Paradigma. Ja/Nein-Paradigma

Im Gegensatz dazu ist ein Proband bei Zwangswahlverfahren oder Forced-Choice-Methoden¹⁰ zu einer Auswahl aus mehreren Alternativen gezwungen – unabhängig davon, ob er einen Reiz oder Reizunterschied erkannt hat oder nicht. Dabei enthält immer nur eine Alternative den sogenannten Zielreiz – die Ratewahrscheinlichkeit γ ist somit im Gegensatz zu Experimenten mit dem Ja/Nein-Paradigma a priori bekannt. Wenn der Proband subjektiv keinen Reiz oder Reizunterschied spürt, dann muss er raten. Forced-Choice-Paradigma

Durch Zwangswahlverfahren ermittelte Schwellwerte sind in der Regel etwas geringer als durch zwanglose Verfahren ermittelte Schwellwerte (z. B. MORIOKA & GRIFFIN, 2002, S. 83). Nachteilig ist, dass sich durch Erhöhung der Anzahl der dargebotenen Alternativen Eigenschaften

¹⁰Zu den Ursprüngen der Forced-Choice-Methoden siehe EHRENSTEIN und EHRENSTEIN (1999, S. 1219) und MACMILLAN und CREELMAN (2004) bzw. WICKENS (2001).

ven die Versuchsdauer erhöht. Nach der Erfahrung des Autors empfinden Probanden Experimente mit dem Forced-Choice-Paradigma zudem oft als anstrengender, da sie sich auch bei großer Unsicherheit entscheiden müssen (vgl. auch KAERNBACH, 2001).

Terminologie Die Alternativen werden dem Probanden entweder gleichzeitig an unterschiedlichen Orten oder nacheinander am gleichen Ort dargeboten. Beide Varianten werden in der englischsprachigen Literatur *Forced-Choice Tasks/Methods* oder auch *Alternative Forced-Choice Tasks/Methods (AFC)* bezeichnet. Möchte man besonders darauf hinweisen, dass die Alternativen gleichzeitig, aber an unterschiedlichen Orten präsentiert wurden, dann spricht man von (*Spatial*) *Alternative Forced-Choice Tasks/Methods (AFC)* - im anderen Fall (zeitlich nacheinander) von (*Temporal*) *Interval Forced-Choice Tasks/Methods (IFC)*.

Beispiel Das verwendete Antwort-Paradigma (Ja/Nein oder Forced Choice) ist unabhängig von der verwendeten Methode zur Schwellenbestimmung. Bei einem Konstanzleistungs-Experiment zur Ermittlung einer Absolutschwelle nach dem Forced-Choice-Paradigma werden dem Probanden beispielsweise innerhalb drei klar definierter Intervalle Reize präsentiert (3-IFC). Eines der drei Intervalle enthält stets den Zielreiz $x > 0$, die beiden anderen enthalten den Nullreiz $x = 0$. Der Proband hat die Aufgabe, das den Reiz enthaltende Intervall zu identifizieren. Die Intensität des Zielreizes wird - wie bei der klassischen Variante - variiert. Die Ratewahrscheinlichkeit γ ist in diesem Fall a priori bekannt und beträgt $1/3$, da bei jeder Darbietung eines der drei Intervalle den Zielreiz enthält. Abbildung 5.5 zeigt das Ergebnis für dieses Beispiel und darüber hinaus das Ergebnis für ein 2-AFC- und ein Ja/Nein-Paradigma - aufgetragen ist die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Antwort $\Psi(x)$ in Abhängigkeit von der Reizstärke x . Die Absolutschwelle kann man in diesem Fall bei einer Wahrscheinlichkeit von $2/3$ (ratekorrigiert 50%) ablesen.

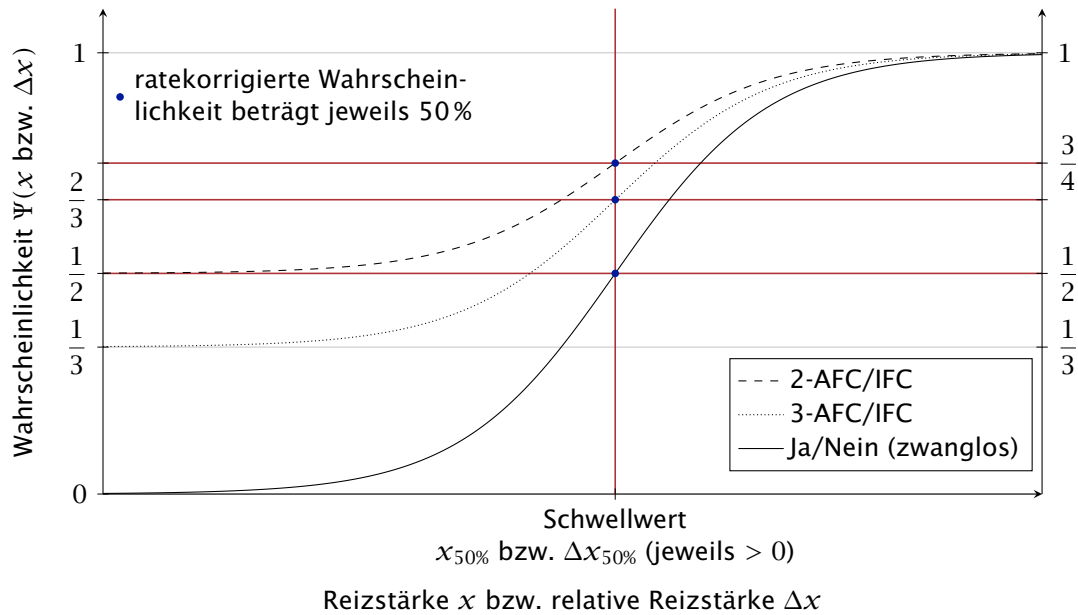


Abbildung 5.5: Idealisierte psychometrische Funktionen dreier Experimente mit verschiedenen Antwortparadigmen. Der Schwellwert $x_{50\%}$ bzw. $\Delta x_{50\%}$ nach dem 50%-Kriterium der ratekorrigierten Wahrscheinlichkeit ist gekennzeichnet. Bei einem Experiment zur Ermittlung einer Unterschiedsschwelle ist der Vergleichsreiz bei dieser Klasse von psychometrischen Funktionen stets größer/gleich als der Konstantreiz.

5.3.3 Moderne Methoden

Der Einsatz von adaptiven Methoden, einer modernen Variante der Grenzmethode, erlaubt eine genaue und dennoch effiziente Schwellenbestimmung. Die Grundidee ist einfach: Erkennt der Proband einen Reiz oder einen Reizunterschied, so wird die Reizintensität bei der nächsten Darbietung verringert, wohingegen sie bei einem Nichterkennen erhöht wird. Dadurch werden dem Probanden nur Reizintensitäten präsentiert, die sich in der Nähe der gesuchten Schwelle befinden.

adaptive Methoden

Das auf dieser Grundidee basierende Simple-Staircase- oder Up/Down-Verfahren (von BÉKÉSY, 1947; DIXON & MOOD, 1948; bzw. KINGDOM & PRINS, 2010b, Kapitel 5.2.1) ist das älteste und bekannteste adaptive Verfahren und konvergiert idealisiert bei einem Schwellwert gemäß dem 50%-Kriterium. Abbildung 5.6 zeigt einen exemplarischen Verlauf und veranschaulicht wichtige Versuchsparameter. Der Schwellwert ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der Reizstärken an den Umkehrpunkten (vgl. SINCOCK, 2008, S. 9).

Simple Staircase

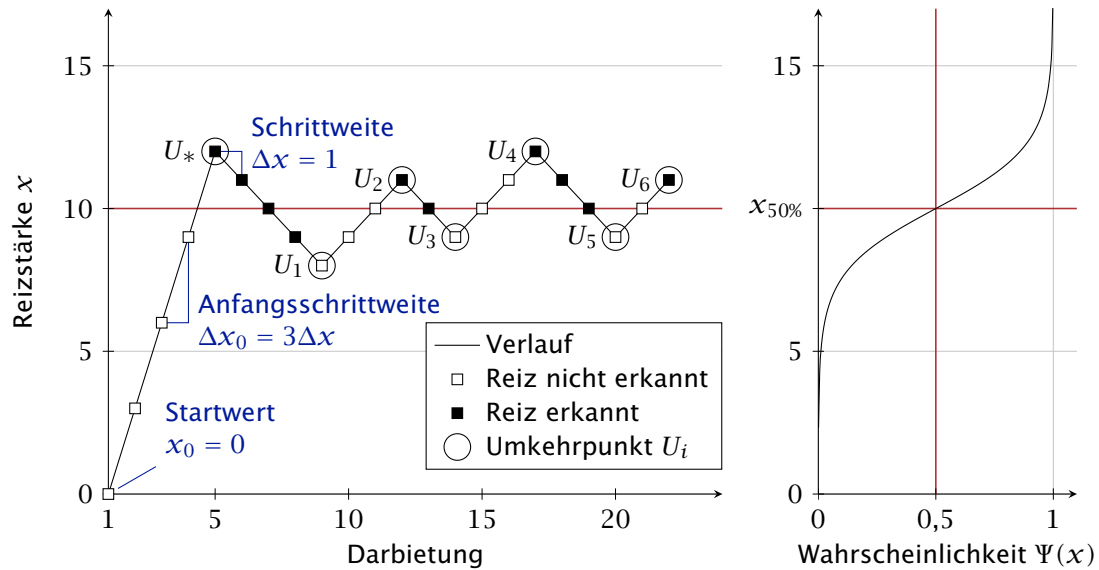


Abbildung 5.6: Links: Exemplarischer Verlauf bei einem Simple-Staircase-Verfahren – der erste Umkehrpunkt U_* wird häufig von der Schwellwertberechnung ausgeschlossen. Der Schwellwert ergibt sich daher aus dem arithmetischen Mittel der Reizstärken an den verbleibenden sechs Umkehrpunkten \bar{x}_{U_i} . Das Verfahren konvergiert bei der Reizstärke $x_{50\%} = 10$ (Erkennungswahrscheinlichkeit 50%). **Rechts:** Hypothetisch zugrunde liegende psychometrische Funktion.

Klassifizierung Im Laufe der Zeit wurden viele unterschiedliche adaptive Methoden entwickelt.¹¹ Sie unterscheiden sich vor allem durch die Regeln zur Anpassung der Reizstärke. Es gibt sogenannte parametrische und nichtparametrische Verfahren. Bei den parametrischen Verfahren muss im Vorfeld die zugrunde liegende psychometrische Funktion bekannt sein. Im Gegensatz dazu setzen die im Folgenden diskutierten nichtparametrischen Verfahren im Wesentlichen lediglich die Monotonie und Zeitunabhängigkeit der psychometrischen Funktion voraus (vgl. LEVITT, 1971, S. 448; HARVEY, 1986; TREUTWEIN, 1995; GRASSI & SORANZO, 2009; KINGDOM & PRINS, 2010b, S. 127; bzw. CIBA, 2008, S. 39).

Transformed-Up/Down In Verbindung mit einem Forced-Choice-Paradigma ist das Konvergenzniveau des Simple-Staircase-Verfahrens von 50% zumeist unerwünscht. Mit dem Transformed-Up/Down-Verfahren (WETHERILL & LEVITT, 1965; LEVITT, 1971; bzw. KINGDOM & PRINS, 2010b, Kapitel 5.2.2) lassen sich weitere – aber keine beliebigen – Konvergenzniveaus erzielen. Bei der 1-Up/2-Down-Regel beispielsweise konvergiert das Staircase-Verfahren bei einer Wahrscheinlichkeit von $\sqrt{1/2} = 70,7\%$. Im Gegensatz zum Simple-Staircase-Verfahren erfolgt hierbei eine Reizstärkenanpassung erst, nachdem der Reiz zweimal in Folge erkannt wurde. In Kombination mit einem Forced-Choice-Paradigma mit drei Alternativen (3-AFC/IFC) ergibt sich somit ein ratekorrigiertes Konvergenzniveau von rund 56%, was für die Praxis nahe genug am idealen 50%-Niveau liegt, siehe Abbildung 5.7.

weitere Verfahren Andere nichtparametrische Verfahren mit zum Teil beliebig wählbaren Konvergenz-

¹¹Überblick in , TREUTWEIN (1995), KLEIN und MACMILLAN (2001), KINGDOM und PRINS (2010b), BUUS (2002), GELFAND (2009)

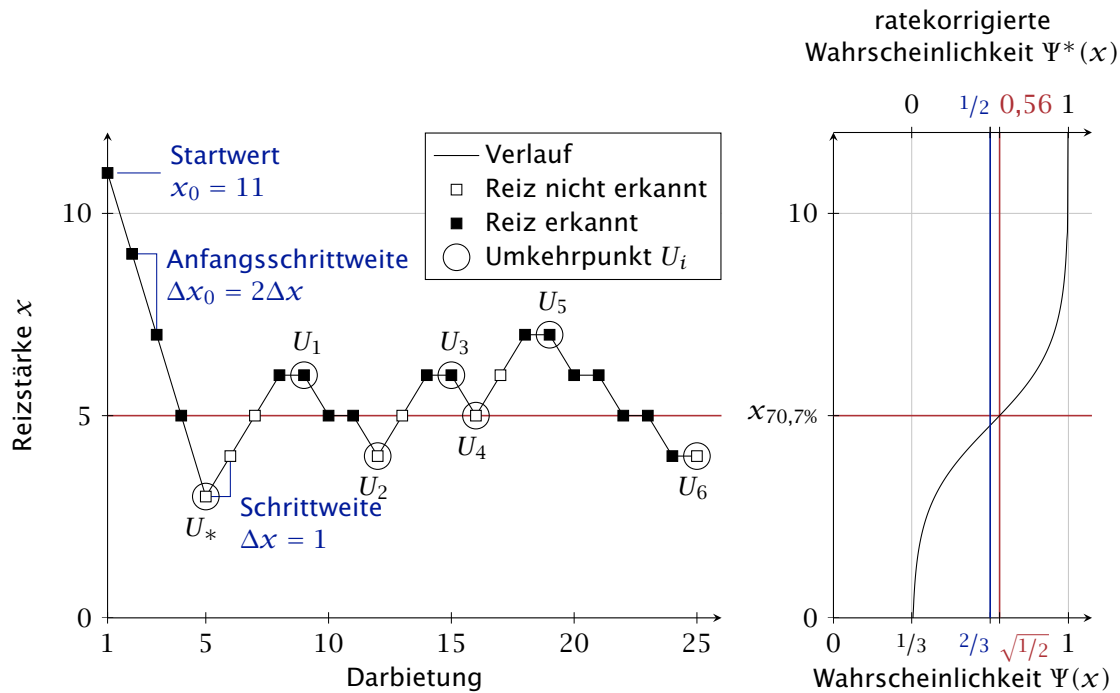


Abbildung 5.7: Links: Exemplarischer Verlauf bei einem Transformed-Up/Down-Verfahren in Kombination mit einem Forced-Choice-Paradigma mit drei Alternativen (3-AFC/IFC). Um die gesuchte Reizstärke schnell zu erreichen, wird häufig bis zum ersten Umkehrpunkt die 1-Up/1-Down-Regel verwendet. **Rechts:** Hypothetisch zugrunde liegende psychometrische Funktion.

niveaus finden allerdings bislang kaum Verwendung (z. B. GARCÍA-PÉREZ, 1998; bzw. KINGDOM & PRINS, 2010b, Kapitel 5.2.4; KAERNBACH, 1991; bzw. KINGDOM & PRINS, 2010b, Kapitel 5.2.3; KINGDOM & PRINS, 2010b, Kapitel 5.4, (Psi-Methode); GARCÍA-PÉREZ, 2001; KAERNBACH, 2001; GARCÍA-PÉREZ, 2009; vgl. auch TREUTWEIN, 1995).

In der Literatur findet sich eine Vielzahl teilweiser widersprüchlicher Untersuchungen¹², in welchen verschiedene adaptive Verfahren und Antwortparadigmen miteinander aber auch mit den klassischen Methoden verglichen werden. GELFAND fasst die Untersuchungsergebnisse wie folgt zusammen: Evaluation

Many studies have compared the various adaptive methods and between adaptive and more traditional approaches [...]. Generally speaking, thresholds obtained with the various adaptive approaches tend to be relatively close to each other. [...] However, it does appear that somewhat better performance is obtained with forced choice compared to nonforced choice paradigms [...]. (GELFAND, 2009, S. 155)

Die Vergleiche erfolgen meist durch rechnergestützte Simulationen mit "virtuellen

¹² z. B. SHELTON, PICARDI und GREEN, 1982, (Experiment); HESSE, 1986, (Experiment); MADIGAN und WILLIAMS, 1987, (Simulation + Experiment); KOLLMEIER, GILKEY und SIEBEN, 1988, (Simulation + Experiment); GARCÍA-PÉREZ, 1998, (Simulation); SCHLAUCH und ROSE, 1990, (Simulation); RAMMSAYER und SACHSSE, 1990, (Experiment); OTTO, 2008, (Simulation); bzw. OTTO und WEINZIERL, 2009, (Simulation); MORIOKA und GRIFFIN, 2002, (Experiment); GARCÍA-PÉREZ, 2002, (Simulation); MARVIT, FLORENTINE und BUUS, 2003, (Experiment); AMITAY, IRWIN, HAWKEY, COWAN und MOORE, 2006, (Experiment); SINCOCK, 2008, (Experiment).

Probanden" und seltener durch Probandenexperimente (z. B. MACMILLAN & CREELMAN, 2004, S. 290) und stammen fast ausschließlich aus dem Bereich der auditiven und visuellen Psychophysik. Neben MORIOKA und GRIFFIN (2002) ist dem Autor keine andere vergleichende Untersuchung aus dem Bereich der Haptikforschung bekannt.

Einfluss der
Zielwahr-
scheinlichkeit

Allerdings gibt es im Hinblick auf die Anzahl der Alternativen bei Forced-Choice-Paradigmen in Verbindung mit den möglichen Zielwahrscheinlichkeiten der verschiedenen Verfahren einen Konsens. Es lässt sich zeigen, dass Zielwahrscheinlichkeiten unterhalb des Wendepunkts der psychometrischen Funktion ungünstige statistische Eigenschaften aufweisen (z. B. GREEN, 1990a; bzw. (Erratum) GREEN, 1990b). Insbesondere ein Forced-Choice-Paradigma mit zwei Alternativen (2-AFC) ist durch die starke Beschneidung des Wertebereichs der psychometrischen Funktion ungünstig (z. B. MCKEE, KLEIN & TELLER, 1985; für eine Übersicht siehe LEEK, 2001, S. 1290-1291; oder MACMILLAN & CREELMAN, 2004, S. 292-293) – empfehlenswert sind drei bis vier Alternativen – allerdings verlängert sich mit der Anzahl der Alternativen auch die Versuchsdauer.

5.3.4 Verwendete Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit kommen ausschließlich allgemein gebräuchliche nichtparametrische Verfahren – konkret das Simple-Staircase- und das Transformed-Up/Down-Verfahren – zum Einsatz. Diese setzen sehr wenige Annahmen voraus, sind robust und konvergieren schnell (z. B. BUUS, 2002, S. 199). Für die parametrischen Verfahren hingegen gibt es über die notwendigen Annahmen für den Bereich der Haptik zu wenig Vorwissen (vgl. MACMILLAN & CREELMAN, 2004, S. 291).

Je nach Fragestellung und den technischen Gegebenheiten wird das Ja/Nein- oder das Forced-Choice-Antwortparadigma verwendet. Zudem wird – wie bereits auf Seite 45 erwähnt – darauf geachtet, die Versuchsbedingungen möglichst konstant zu halten, um dem Kriterien-Problem zu entgegenen.

Für die konkrete Implementierung der Algorithmen für die adaptiven Methoden wird zum Teil auf die Software-Bibliothek von KINGDOM und PRINS (2010a) zurückgegriffen¹³.

¹³Für einen Überblick über Psychophysik-Software siehe STRASBURGER (1995/2012), Schwerpunkt ist die visuelle Psychophysik.

6 Beschreibung des Versuchsaufbaus

6.1 Grundlagen	52
6.2 Wirkgefüge und prinzipielle Entwurfsmethodik	55
6.3 Hardware	57
6.4 Regelungskonzepte	59
6.5 Verifikation	66

Es wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dem einachsige rotatorische Bedienelemente variabel nachgebildet werden können, siehe Abbildung 6.1. Der Aufbau ist eine Weiterentwicklung des bei REISINGER, WILD, MAUTER und BUBB (2005) beschriebenen Systems. Im Folgenden wird zunächst auf die Grundlagen eingegangen. Anschließend werden der Versuchsaufbau selbst, verwendete Regelungskonzepte und die Verifikation beschrieben.

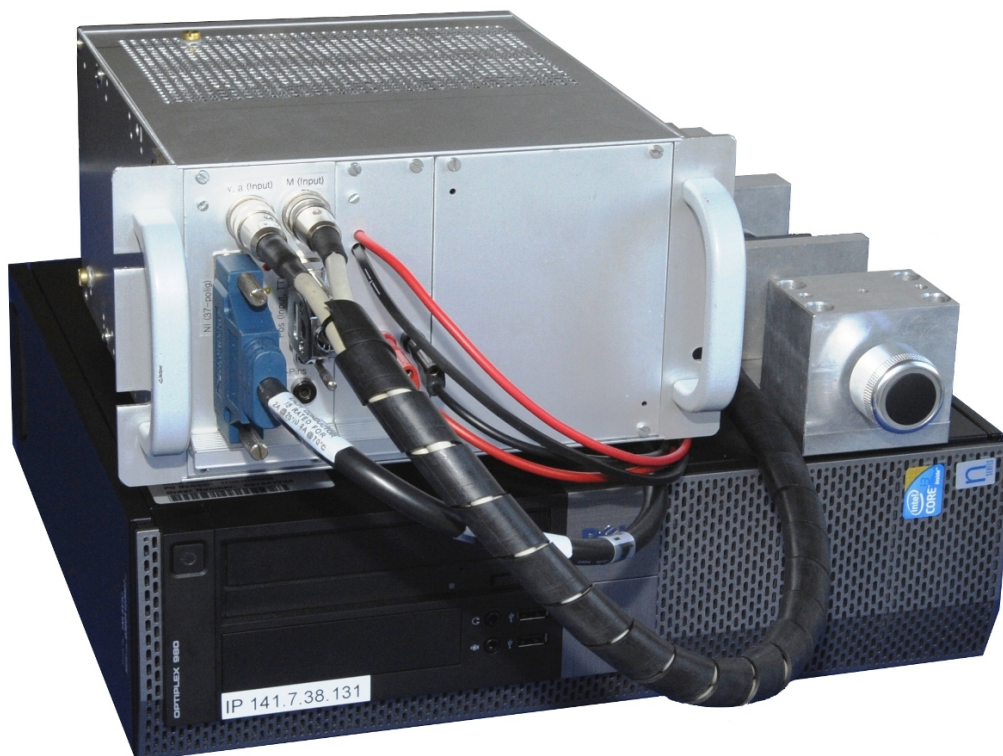


Abbildung 6.1: Für die Experimente verwendeter Versuchsaufbau bestehend aus Elektronikteil (links oben), rotatorischem Haptiksimulator (rechts oben) und PC mit einem Echtzeitbetriebssystem (unten)

6.1 Grundlagen

haptisches Display bzw. Haptiksimulator

Bei dem Versuchsaufbau handelt es sich um ein haptisches Gerät, genauer um ein sogenanntes haptisches Display mit einem rotatorischen Freiheitsgrad. “Ein **Haptisches Display** ist ein haptisches Gerät, das eine haptische Interaktion ermöglicht und bei dem die haptisch übermittelten Informationen einer Änderung unterliegen [...]” (KERN, 2009, S. 28). Im Rahmen dieser Arbeit wird der geläufigere Begriff *Haptiksimulator* verwendet.

Haptische Geräte beinhalten immer einen Austausch von mechanischer Energie zwischen Gerät und Mensch – dieser Gesichtspunkt wird durch den Begriff *Display* allerdings nicht zum Ausdruck gebracht (siehe z. B. HAYWARD & ASTLEY, 1996; HAYWARD u. a., 2004).

Eine gute und praxisnahe Einführung in den Bereich der Entwicklung haptischer Geräte findet sich beispielsweise in dem zweiteiligen Tutorial von HAYWARD und MACLEAN. Der erste Teil (HAYWARD & MACLEAN, 2007) beschäftigt sich mit Fragen der Hardware und Regelung, wohingegen im zweiten Teil (MACLEAN & HAYWARD, 2008) auf Fragen des Interaktions-Designs eingegangen wird.

weiterführende Literatur

Vor allem bei komplexeren haptischen Geräten mit mehreren Freiheitsgraden finden viele Methoden aus dem Bereich der Robotik Anwendung. Exemplarisch seien die Themengebiete (inverse) Kinematik und modellbasierte Regelung genannt. Einen umfassenden Überblick über dieses Forschungsgebiet bietet das *Springer Handbook of Robotics* (SICILIANO & KHATIB, 2008) – hierbei sind insbesondere Kapitel 7 (*Force Control*) und 30 (*Haptics*) interessant. Eine breit gefächerte Einführung in haptikrelevante Technologien bieten KERN (2009) und LIN und OTADUY (2008). ÜBERLE (2006) bietet einen Leitfaden zur Regelung haptischer Geräte mit hohen Kräften und großem Arbeitsraum.

ISO-Norm

In diesem Zusammenhang ist auch die Norm Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion, [DIN EN ISO 9241-910] zu nennen. Sie enthält unter anderem

- Begriffsdefinitionen,
- Informationen zur haptischen Wahrnehmung des Menschen und
- Hinweise zur technischen Gestaltung von taktilen und haptischen Interaktionen.

Grundformen der Systemstruktur

In der Literatur werden zwei unterschiedliche Systemgrundstrukturen bei haptischen Geräten unterschieden (z. B. KERN & MECKEL, 2009, S. 97-106):

- Impedanz- und
- Admittanz-Systeme.

Eine mechanische Impedanz Z ist als das Verhältnis aus Kraft F und Geschwindigkeit v an einem mechanischen Bauteil definiert (BALLAS, PFEIFER & WERTHSCHÜTZKY, 2009, Kapitel 4). Dies gilt analog für rotatorische Systeme. Eine hohe Impedanz bedeutet also, dass ein Bauteil der Bewegung einen hohen Widerstand entgegen setzt.

Bei zeitinvarianten und linearen mechanischen Bauelementen oder Systemen mit konzentrierten Parametern wird die mechanische Impedanz üblicherweise im Laplace-Bereich als komplexer Widerstand beschrieben. Es ist aber auch – z. B. bei nichtlinearen Elementen – eine Beschreibung im Zeitbereich möglich.

Die komplexen Impedanzen $\underline{Z}(s)$ der idealisierten mechanischen Bauelemente Masse, Dämpfer und Feder ergeben sich zu

$$\text{ideale Masse } m: \quad \underline{Z}_m(s) = \frac{F(s)}{\underline{v}(s)} = sm \quad (6.1)$$

$$\text{idealer Dämpfer } d: \quad \underline{Z}_d(s) = \frac{F(s)}{\underline{v}(s)} = d \quad (6.2)$$

$$\text{ideale Feder } c: \quad \underline{Z}_c(s) = \frac{F(s)}{\underline{v}(s)} = \frac{c}{s} \quad (6.3)$$

Der Reziprokwert einer Impedanz wird als Admittanz oder komplexer Leitwert bezeichnet. Als Größensymbol dient zumeist Y .

Die zuvor genannten Systemgrundstrukturen haptischer Systeme – also Impedanz- und Admittanz-Systeme – gibt es sowohl in gesteuerter als auch geregelter Form. Es sind aber auch Kombinationen möglich, also beispielsweise eine (Vor-)Steuerung mit Folgefehlerregelung oder andere Regelungskonzepte.

Impedanz- und Admittanz-Regelstrategien beziehungsweise Impedanz- und Admittanz-Steuerstrategien “werden verwendet, um ein mechanisches System zu simulieren, dessen Verhalten von dem des tatsächlich vorhandenen Systems abweicht.” (VALLERY, 2010, S. 3). Das simulierte System ist häufig ein lineares Masse-Dämpfer-Feder-System. Nichtlineare Systembeschreibungen oder andere kinematische Strukturen sind ebenfalls möglich.

Bei Impedanz-Systemen wird eine Kraft¹ (Ausgang) in Abhängigkeit von einer Position (Eingang) oder deren zeitlichen Ableitungen erzeugt. Der Zusammenhang zwischen Kraft und Position beziehungsweise Ausgang und Eingang wird durch das gewünschte mechanische Verhalten bestimmt. In Abbildung 6.2 ist ein einfaches Impedanz-System für den geregelten Fall dargestellt. Darin beschreibt das virtuelle Modell das gewünschte Verhalten des Systems, das nachgebildet werden soll.

Impedanz-
Systeme

¹ Die Beschreibung gilt analog für rotatorische Systeme.

6 Beschreibung des Versuchsaufbaus

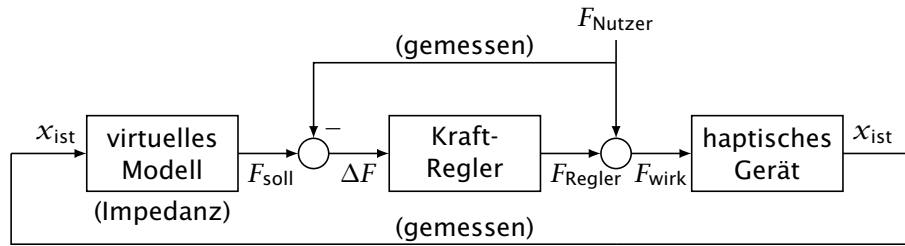


Abbildung 6.2: Prinzip einer Impedanz-Regelung – der Impedanz-Regler (virtuelles Modell + Kraft-Regler) erhält als Eingang die Position x_{ist} des haptischen Gerätes und regelt die Kraft F_{soll} ein.

Admittanz-Systeme

Bei Admittanz-Systemen hingegen werden eine Position (Ausgang) oder deren zeitliche Ableitungen in Abhängigkeit von einer Kraft (Eingang) erzeugt. Auch hierbei bestimmt das gewünschte mechanische Verhalten den Zusammenhang zwischen Position und Kraft beziehungsweise Ausgang und Eingang. In Abbildung 6.3 ist ein einfaches Admittanz-System, ebenfalls für den geregelten Fall, dargestellt.

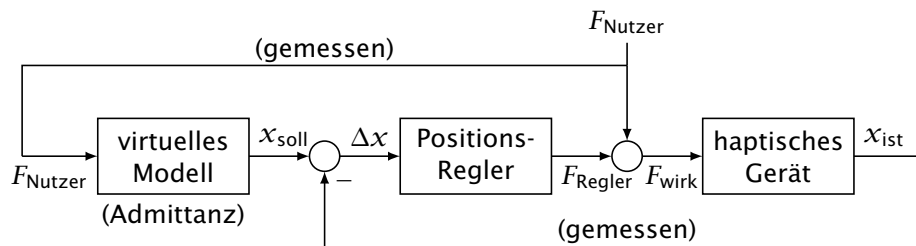


Abbildung 6.3: Prinzip einer Admittanz-Regelung – der Admittanz-Regler (virtuelles Modell + Positions-Regler) erhält als Eingang die vom Nutzer ausgeübte Kraft F_{Nutzer} . Daraus berechnet sich die Bewegung x_{soll} des virtuellen Modells (Admittanz). Anstatt der Position x kann auch die Geschwindigkeit \dot{x} geregelt werden.

Lage des Kraftsensors

Damit die Kraft des Nutzers F_{Nutzer} unverfälscht gemessen werden kann, sollte die Platzierung des Kraftsensors so nahe wie möglich am Griffstück des haptischen Gerätes erfolgen. Träge Massen die sich zwischen Kraftsensor² und Nutzer befinden sind nicht durch eine reine Regelung kompensierbar (VALLERY, 2010, S. 6). Dies gilt beispielsweise auch für (Lager-)Reibungskräfte.

Der Einfluss des Nutzers ist in Abbildung 6.2 und 6.3 vereinfacht als Störung dargestellt. In Wirklichkeit ist der Nutzer in beiden Fällen ebenfalls Bestandteil des Systems – über ihn wird der Regelkreis geschlossen.

Anforderungen an den Versuchsaufbau

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Nachbildung eines rotatorischen Bedienelements mit variablen beziehungsweise programmierbaren mechanischen Eigenschaften. Damit sind die vom Nutzer wahrgenommenen mechanischen Eigenschaften gemeint. Insbesondere sollen

² Je nach mechanischem Aufbau des Kraftsensors können auch träge Massen des Sensors selbst nicht kompensierbar sein. Dies trifft auf alle träge Massen zu, die sich nach der eigentlichen sensorinternen Messstelle befinden.

- der quasi-statische Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf (z. B. eine Rastung oder Federzentrierung),
- das Massenträgheitsmoment,
- die Coulomb'sche Reibung (kurz Reibung) und
- die viskose Reibung (kurz Dämpfung)

systematisch variiert werden können. In Abhängigkeit von den zu simulierenden mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich Impedanz- und Admittanz-Systeme hinsichtlich ihrer Eignung. Darüber hinaus gibt es noch weitere Einflussparameter, auf die in der bisher genannten Literatur ausführlich eingegangen wird. In den Experimenten – Kapitel 7 – kommen daher zwei unterschiedliche Regel- und Steuerstrategien zum Einsatz, die beide in Kapitel 6.4 beschrieben werden.

Eignung der verschiedenen Ansteuerkonzepte

Aus der Literatur ist dem Autor ein Haptiksimulator mit vergleichbaren Eigenschaften bekannt. SWINDELLS (2007) verwendet eine kostengünstige Admittanz-Steuerung, Details siehe Anhang A.2.3. Allerdings ist die damit realisierbare Güte des variablen Massenträgheitsmoments für die vorliegende Arbeit ungenügend:

vergleichbarer Haptiksimulator

Subjectively, the detents and damping had low amounts of perceived instability [...]. At high inertia settings, the spring constant for the virtual mass, K_{vm} , could be felt when making rapid motions with the knob. Also, the inertia rendering introduced a “perceived instability” that felt like a rough texture of a few mNm in magnitude [...]. (SWINDELLS, 2007, S. 81)

6.2 Wirkgefüge und prinzipielle Entwurfsmethodik

Das Wirkgefüge bei der Ansteuerung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Die abgebildete Struktur entspricht der des sogenannten Software in the Loop (SiL). “Von SiL spricht man, wenn der entwickelte Regelungs- und Steuerungsalgorithmus auf einem Entwicklungsrechner ausgeführt wird und mit dem realen Prozess oder Teilen davon verbunden ist” (ABEL & BOLLIG, 2006, S. 9).

Software in the Loop

Software in the Loop ist eine Variante des sogenannten Rapid Control Prototyping (RCP), einem integrierten Entwicklungsprozess im Bereich der Regelungs- und Steuerungstechnik (ABEL & BOLLIG, 2006).

Rapid Control Prototyping

6 Beschreibung des Versuchsaufbaus

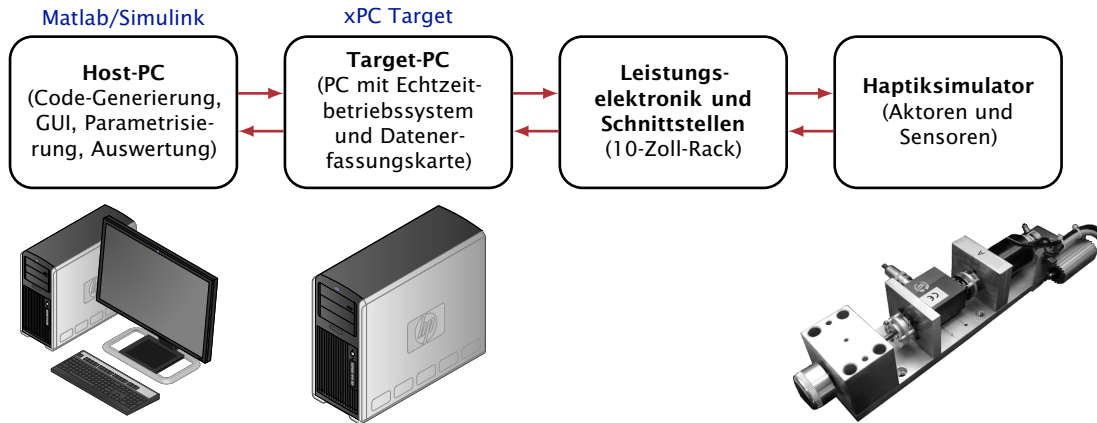


Abbildung 6.4: Wirkgefüge bei der Ansteuerung des Versuchsaufbaus

Beim RCP werden die klassischen System-Entwurfs-Methoden des bekannten V-Modells, wie

- Systemdesign,
- Modellierung,
- Simulation,
- Reglerentwicklung,
- Implementierung und
- Test von Teilsystemen und des Gesamtsystems,

durch Kombination und Integration zu einem neuen Vorgehen miteinander verbunden. Wichtige Voraussetzung für dieses Vorgehen ist der Einsatz einer durchgängigen Werkzeugkette. Einer der wesentlichen Vorteile hierbei ist, dass die Schnittstellenproblematik zum großen Teil durch den Software-Anbieter gelöst wird (ABEL & BOLLIG, 2006, S. 4-10).

Anhand von Abbildung 6.4 werden die einzelnen Komponenten und Softwareprodukte kurz erläutert:

Host-PC Bei dem Host-PC handelt es sich um einen handelsüblichen PC mit einem konventionellen MICROSOFT-WINDOWS-Betriebssystem. Als Entwicklungs-Software dient das Rechnerwerkzeug MATLAB und seine grafische Simulationserweiterung SIMULINK.

Mithilfe der MATLAB-Erweiterung REAL-TIME WORKSHOP³ werden SIMULINK-Modelle automatisiert in ausführbaren Code für die jeweilige Zielhardware überführt.

Alle genannten Softwareprodukte – MATLAB, SIMULINK und REAL-TIME WORKSHOP – stammen von dem Hersteller THE MATHWORKS.

Target-PC Die Zielhardware ist in diesem Fall ein handelsüblicher PC – das sogenann-

³ seit Version R2011a SIMULINK CODER genannt

te Target. Als Betriebssystem kommt das Echtzeitbetriebssystem XPC TARGET, ebenfalls von THE MATHWORKS, zum Einsatz.

Auf dem Target-PC wird das auf dem Host-PC entworfene SIMULINK-Modell mit einer festen Abtastrate ausgeführt. Als Hardwareschnittstelle wird eine Datenerfassungskarte der Firma NATIONAL INSTRUMENTS verwendet.

Externe beziehungsweise manuelle Eingriffe in den Programmablauf – beispielsweise die Manipulation von Parametern – erfolgten durch den Host-PC über eine TCP/IP-Verbindung.

Leistungselektronik, Schnittstellen und Haptiksimulator Die Datenerfassungskarte ist mit einem 10-Zoll-Rack verbunden. In dem Rack befinden sich die Leistungselektronik für den Aktor sowie die Sensor- und Aktor-Schnittstellen zum Haptiksimulator.

6.3 Hardware

Abbildung 6.5 zeigt eine schematische Darstellung des Haptiksimulators in zwei Varianten, bei dem die wichtigsten Komponenten beschriftet sind.

Bei Variante 1 befindet sich zwischen Kappe und Drehmomentsensor eine zusätzliche Welle inklusive Lagerbock und Federscheibenkupplung. Wie bereits auf Seite 54 bemerkt, ist es aus regelungstechnischer Sicht von besonderer Bedeutung, dass zwischen dem Drehmomentsensor und der Kappe möglichst wenig Trägheits- und Reibungskräfte auftreten. Dies gilt insbesondere für Systeme, bei denen die Massenträgheit variabel und/oder minimal sein soll.

Variante 1

Bei den Versuchen mit variabler Massenträgheit kommt daher eine zweite Variante des Haptiksimulators zum Einsatz. Bei der zweiten Variante befindet sich die Kappe direkt auf dem Drehmomentsensor. Somit entfallen die vordere der beiden Federscheibenkupplungen und der Lagerbock. Dadurch befinden sich gegenüber Variante 1 zwischen Drehmomentsensor und Kappe deutlich weniger nicht kompensierbare Trägheits- und Reibungskräfte. Allerdings ist in dieser Variante der teure Drehmomentsensor weniger gut geschützt.

Variante 2

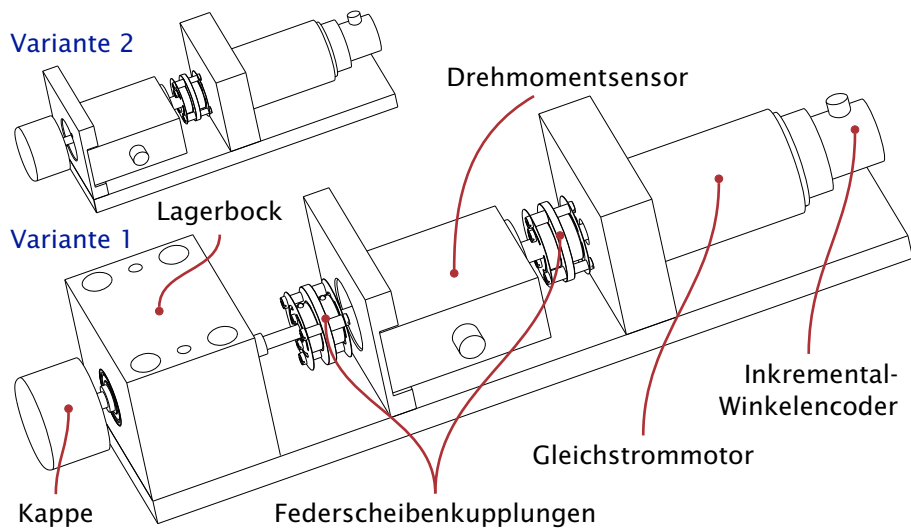


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung des rotatorischen Haptiksimulators

Die wichtigsten Hardware-Komponenten sind in Tabelle 6.1 beschrieben. Konkrete mechanische Parameter wie Massenträgheitsmomente und Reibungen werden bei den jeweiligen Experimenten gesondert aufgeführt, siehe Kapitel 7.

Tabelle 6.1: Beschreibung der wesentlichen Hardware-Komponenten

Bezeichnung	Hersteller/Typ	Bemerkung
Target-PC	DELL, Optiplex 980-Reihe	Die Abtast- oder Samplingrate f_{Sample} beträgt 20 kHz.
Datenerfassungskarte	NATIONAL INSTRUMENTS, NI PCI-6221 (37-Pin-Variante), 779418-01	Die analogen Eingänge haben eine Auflösung von 16 bit (bei $\pm 10\text{V}$).
Leistungselektronik	Die Leistungselektronik wurde im Labor für Mechatronik an der Hochschule Heilbronn unter der Verantwortung von Herrn Joachim WALTER entwickelt.	Vierquadrantensteller für Gleichstrommotoren (H-Brücke), angesteuert durch ein PWM-Signal mit einer Trägerfrequenz f_{PWM} von 20 kHz.
Gleichstrommotor	MAXON MOTOR AG, RE 40, 148877	Die Spulenwicklung liegt in Reihe mit einem Vorwiderstand R_{vor} von $4,7\ \Omega$.
Inkremental-Winkelencoder	SCANCON, 2RMHF	Nach der Vierfach-Auswertung durch die Datenerfassungskarte ergibt sich eine Winkelauflösung von $0,012^\circ$, Datenblatt siehe Anhang B.3.

Fortsetzung nächste Seite...

Tabelle 6.1: (fortgesetzt)

Bezeichnung	Hersteller/Typ	Bemerkung
Drehmomentsensor	WINTEC GMBH, DRFL-I-0,2	Der Messbereich beträgt ± 200 mNm (bei ± 10 V). Fehler für Nichtlinearität und Hysterese jeweils $< 0,1\%$, Datenblatt siehe Anhang B.1.

6.4 Regelungskonzepte

Für die Ansteuerung des Haptiksimulators kommen – in Abhängigkeit vom zu simulierenden mechanischen Verhalten – zwei unterschiedliche Regelungs- und Steuerungskonzepte zum Einsatz. Zunächst wird das für den Entwurf der Konzepte benötigte Streckenmodell beschrieben.

6.4.1 Streckenmodell des rotatorischen Haptiksimulators

Bei dem Haptiksimulator handelt es sich um einen bürstenbehafteten Gleichstrommotor – Datenblatt siehe Anhang B.2 – mit zusätzlichen Masseträgheiten und reibungsbehafteten Lagerstellen. Die Modellierung erfolgt mit Hilfe des Maschensatzes für den Ankerkreis (6.4), der ersten (6.5) und zweiten (6.6) Fundamentalgleichung des Gleichstrommotors und des Drallsatzes (6.7):

Grundgleichungen

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + u_{\text{ind}}(t) \quad (6.4)$$

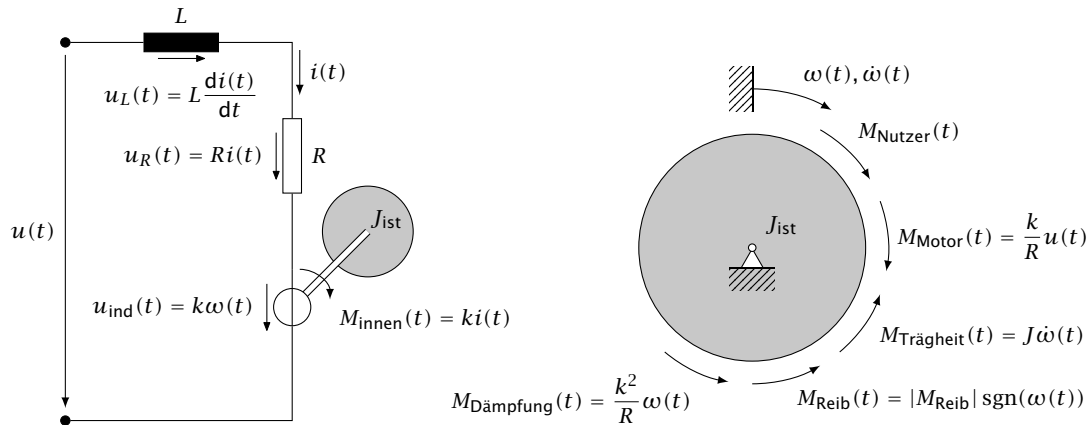
$$u_{\text{ind}}(t) = k \cdot \omega(t) \quad (6.5)$$

$$M_{\text{innen}}(t) = k \cdot i(t) \stackrel{L=0}{=} \frac{k}{R} \cdot u(t) - \frac{k^2}{R} \cdot \omega(t) \quad (6.6)$$

$$\rightarrow J_{\text{ist}} \cdot \dot{\omega}(t) \stackrel{L=0}{=} M_{\text{Nutzer}}(t) + \frac{k}{R} \cdot u(t) - \frac{k^2}{R} \cdot \omega(t) - |M_{\text{Reib}}| \cdot \text{sgn}(\omega(t)) \quad (6.7)$$

Eine ausführliche Schritt-für-Schritt-Herleitung des Streckenmodells ist in Anhang A.2.1 zu finden. Abbildung 6.6 veranschaulicht die Zusammenhänge anhand zweier Ersatzschaltbilder. Die verwendeten Größen sind in Tabelle 6.2 aufgeführt.

6 Beschreibung des Versuchsaufbaus



(a) Elektrisches Ersatzschaltbild für den Gleichstrommotor des Haptiksimulators

(b) Mechanisches Ersatzschaltbild für den Haptiksimulator, dabei ist $M_{\text{Trägheit}}(t)$ die d'Alembert'sche Trägheitskraft

Abbildung 6.6: Elektrisches und mechanisches Ersatzschaltbild des rotatorischen Haptiksimulators – die Kopplung zwischen dem elektrischen und dem mechanischen Modell wird durch das innere Motormoment $M_{\text{innen}}(t) = k \cdot i(t) = M_{\text{Motor}}(t) - M_{\text{Dämpfung}}(t)$ (unter Vernachlässigung der Induktivität L) hergestellt.

Tabelle 6.2: Variablen, Parameter und Hilfsgrößen für die Streckenmodellierung

Bezeichnung	Symbol	Bemerkung
Klemmenspannung	$u(t)$	-
Ohm'scher Gesamtwiderstand	R	inklusive Wicklungs-, Bürsten, Bürstenübergangs- und Vorwiderstand (siehe Tabelle 6.1)
Strom	$i(t)$	-
Induktivität	L	-
induzierte Spannung	$u_{\text{ind}}(t)$	-
Motorkonstante	k	Drehmomentkonstante in Nm/A oder in SI-Einheiten $\text{m}^2 \text{kg/s}^2 \text{A}$
Position, Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung	$\varphi(t), \omega(t),$ und $\dot{\omega}(t)$	Zeitliche Ableitungen werden durch einen Punkt (z. B. $\dot{\omega}(t)$) gekennzeichnet.
inneres Motormoment	$M_{\text{innen}}(t)$	theoretisches Motormoment ohne Berücksichtigung innerer Reibungen etc.
Massenträgheitsmoment des Haptiksimulators	J_{ist}	Summe aller rotierenden Komponenten
vom Nutzer aufgebrachtes Drehmoment	$M_{\text{Nutzer}}(t)$	-
durch Spannung erzeugtes Drehmoment	$M_{\text{Motor}}(t)$	-
Betrag der Gleitreibung	$ M_{\text{Reib}} $	wurde experimentell bestimmt

Fortsetzung nächste Seite...

Tabelle 6.2: (fortgesetzt)

Bezeichnung	Symbol	Bemerkung
Gleitreibungsmoment	$M_{\text{Reib}}(t)$	nur von Drehrichtung abhängig
winkelgeschwindigkeitsproportionales Drehmoment	$M_{\text{Dämpfung}}(t)$	-
Parameter der Motoreigendämpfung	d_{ist}	$d_{\text{ist}} = k^2/R$, wird durch die (Gegen-)Induktion hervorgerufen
wirksames Drehmoment	$M_{\text{wirk}}(t)$	$M_{\text{Motor}} + M_{\text{Nutzer}}$

Die Gleichungen 6.4–6.7 beinhalten dabei drei Vereinfachungen:

getroffene Vereinfachungen

1. Die Spannung $u(t)$ ist in der Realität pulsweitenmoduliert – sie wird aber als analoge Gleichspannung modelliert. Die Trägerfrequenz der Pulsweitenmodulation beträgt 20 kHz, siehe auch Tabelle 6.1.
2. Die Modellierung der Lager- und Bürstenreibung $M_{\text{Reib}}(t)$ erfolgt durch eine immer gegen die Drehrichtung gerichtete konstante Gleitreibung. Komplexere Reibmodelle finden sich beispielsweise in HAYWARD und ARMSTRONG (2000) oder ÜBERLE (2006, Kapitel 4).
3. Des Weiteren wird die elektrische Zeitkonstante

$$T_{\text{el}} = \frac{L}{R} \tag{6.8}$$

gegenüber der wesentlich größeren mechanischen Zeitkonstanten

$$T_{\text{mech}} = \frac{J_{\text{ist}} \cdot R}{k^2}, \text{ mit } \frac{T_{\text{mech}}}{T_{\text{el}}} \gg 100 \tag{6.9}$$

vernachlässigt. Hierzu wird $L = 0$ in (6.4) gesetzt. Das Verhältnis der beiden Zeitkonstanten (6.9) trifft auf beide Hardwarevarianten – siehe Kapitel 6.3 – des Haptiksimulators zu.

Umgestellt und durch weitere Hilfsgrößen vereinfacht ergibt sich aus (6.7) das Streckenmodell des Haptiksimulators zu

Streckenmodell des Haptiksimulators

$$\underbrace{J_{\text{ist}} \cdot \dot{\omega}(t) + \frac{k^2}{R} \cdot \omega(t)}_{\text{linear}} + \underbrace{|M_{\text{Reib}}| \cdot \text{sgn}(\omega(t))}_{\text{nichtlinear}} = \underbrace{M_{\text{Nutzer}}(t) + \frac{k}{R} \cdot u(t)}_{M_{\text{Motor}}(t)} = M_{\text{wirk}}(t) \tag{6.10}$$

$$J_{\text{ist}} \cdot \dot{\omega}(t) + d_{\text{ist}} \cdot \omega(t) + |M_{\text{Reib}}| \cdot \text{sgn}(\omega(t)) = M_{\text{wirk}}(t) . \tag{6.11}$$

Das durch die induzierte Spannung $u_{\text{ind}}(t)$ indirekt erzeugte Drehmoment kann als winkelgeschwindigkeitsproportionale Dämpfung mit der Proportionalitätskonstanten $d_{\text{ist}} = k^2/R$ beschrieben werden. Für den linearen Anteil des Modells lässt sich die

Übertragungsfunktion des linearen Teils

6 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Übertragungsfunktion für den Zusammenhang zwischen dem wirksamen Moment und der Motordrehzahl

$$G_{\text{Simulator}}(s) = \frac{\omega(s)}{M_{\text{wirk}}(s)} = \frac{1}{J_{\text{ist}} \cdot s + d_{\text{ist}}} = \frac{R}{k^2} \cdot \frac{1}{T_{\text{mech}} \cdot s + 1} \quad (6.12)$$

formulieren. Für den Zusammenhang zwischen Klemmenspannung $u(t)$ und Motormoment $M_{\text{Motor}}(t)$ ergibt sich die Übertragungsfunktion $G_{\text{Motor}}(s)$ zu

$$G_{\text{Motor}}(s) = \frac{M_{\text{Motor}}(s)}{u(s)} = \frac{k}{R}. \quad (6.13)$$

Mit diesen Übertragungsfunktionen lassen sich etwa Stabilitäts- oder Endwertbetrachtungen durchführen.

6.4.2 Impedanz-System

Die Impedanz-Struktur wird verwendet, wenn bei der Nachbildung eines rotatorischen Bedienelements die mechanischen Eigenschaften

- quasi-statischer Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf (z. B. eine Rastung),
- Coulomb'sche Reibung und
- viskose Reibung (Dämpfung)

variiert werden. In Abbildung 6.7 ist das Blockschaltbild der Impedanz-Struktur dargestellt. Die Struktur ist dabei an die Struktur einer modellbasierten Steuerung angelehnt.

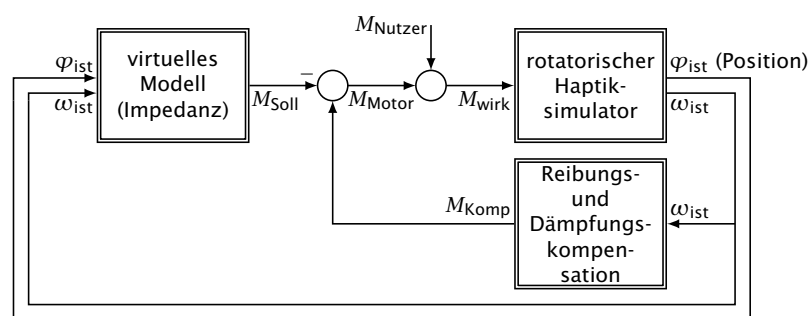


Abbildung 6.7: Blockschaltbild des verwendeten Steuerungskonzeptes im Fall des Impedanz-Systems – doppelte Rahmen kennzeichnen nichtlineare Blöcke.

Grundstruktur und Kompensation

Es handelt sich um eine Steuerung, bei der die Trajektorie des Soll-Drehmoments durch die virtuelle Impedanz generiert wird. Die durch Coulomb'sche Reibung $M_{\text{Reib}}(t)$ und Dämpfung d_{ist} bedingten systemeigenen Drehmomente – siehe (6.11) – werden durch Aufschalten von $M_{\text{komp}}(t)$ kompensiert. Die statische Kennlinie des Kompensationsglieds lautet

$$\tilde{d}_{\text{ist}} \cdot \omega_{\text{ist}}(t) + \left| \tilde{M}_{\text{Reib}} \right| \cdot \tanh(\gamma \cdot \omega_{\text{ist}}(t)) = M_{\text{Komp}}(t). \quad (6.14)$$

Größen mit Tilde sind geschätzte Größen⁴. Die Signum-Funktion aus (6.11) wird bei der Kompensation der Coulomb'schen Reibung durch die Tangens-Hyperbolicus-Funktion angenähert, siehe Abbildung 6.8. Die Tangens-Hyperbolicus-Funktion besitzt im Bereich des Nulldurchgangs einen stetigen Übergang, was sich positiv auf das Verhalten der Kompensationsrückführung auswirkt. Durch den Parameter $\gamma \in \mathbb{R}^+$ lässt sich die Güte der Approximation beeinflussen.⁵

Approximation der Signum-Funktion

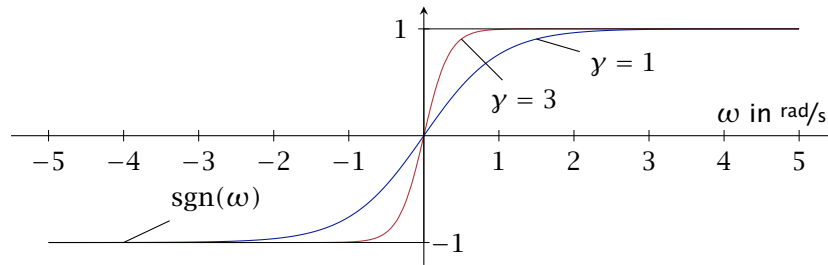


Abbildung 6.8: Vergleich zwischen der Signum- und der Tangens-Hyperbolicus-Funktion – mit größer werdendem γ in $\tanh(\gamma \cdot \omega)$ nähert sich die Tangens-Hyperbolicus-Funktion an die Signum-Funktion an. Nach der Erfahrung des Autors stellt eine Winkelgeschwindigkeit von 2–3 rad/s eine normale bis langsame Betätigungsgeschwindigkeit dar – hohe Werte liegen bei 10–20 rad/s.

Das virtuelle Modell, wird durch die Differentialgleichung

Soll-Impedanz

$$d_{\text{soll}} \cdot \dot{\varphi}_{\text{ist}}(t) + \left| M_{\text{Reib}}^{\text{soll}} \right| \cdot \tanh(\lambda \cdot \dot{\varphi}_{\text{ist}}(t)) + M_{\text{Rast}}^{\text{soll}}(\varphi_{\text{ist}}(t)) = M_{\text{soll}}(t) \quad (6.15)$$

beschrieben. Dabei werden die Soll-Parameter für die gewünschte Dämpfung beziehungsweise Coulomb'sche Reibung durch d_{soll} und $M_{\text{Reib}}^{\text{soll}}$ symbolisiert. $M_{\text{Rast}}^{\text{soll}}(\varphi_{\text{ist}}(t))$ symbolisiert ein einstellbares Rastmoment. Bezogen auf die Tangens-Hyperbolicus-Funktion gelten die gleichen Überlegungen wie zuvor.

Unter der Annahme einer idealen Kompensation, also mit $\tilde{d}_{\text{ist}} = d_{\text{ist}}$ und $\tilde{M}_{\text{Reib}} = M_{\text{Reib}}$, ergibt sich die Differentialgleichung für das Gesamtsystem mit dem Nutzermoment M_{Nutzer} als Eingang und der Position φ_{ist} als Ausgang zu

Gleichung für das Gesamtsystem

$$J_{\text{ist}} \cdot \ddot{\varphi}_{\text{ist}}(t) + \underbrace{d_{\text{soll}} \cdot \dot{\varphi}_{\text{ist}}(t) + \left| M_{\text{Reib}}^{\text{soll}} \right| \cdot \tanh(\lambda \cdot \dot{\varphi}_{\text{ist}}(t)) + M_{\text{Rast}}^{\text{soll}}(\varphi_{\text{ist}}(t))}_{\text{Soll-Impedanz, siehe (6.15)}} = M_{\text{Nutzer}}(t). \quad (6.16)$$

Das System verhält sich also – bis auf das Massenträgheitsmoment – so, als ob es die gewünschte Soll-Impedanz besäße. Das systemeigene Massenträgheitsmoment bleibt

⁴ Die Parameter sind entweder experimentell überprüfte Herstellerangaben oder Messwerte.

⁵ Typische Werte für γ liegen zwischen 2 und 5. Bei zu hohen Werten kommt es während der Nutzer-Interaktion zu unerwünschten Vibrationen beziehungsweise Instabilitäten.

6 Beschreibung des Versuchsaufbaus

dabei unverändert. Bei einer linearen Soll-Impedanz mit den Parametern d_{soll} und c_{soll} ergibt sich die Gesamtübertragungsfunktion zu

$$G_{\text{Gesamt}}(s) = \frac{\varphi_{\text{ist}}(s)}{M_{\text{Nutzer}}(s)} = \frac{\omega_{\text{ist}}(s)}{M_{\text{Nutzer}}(s)} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{J_{\text{ist}} \cdot s + d_{\text{soll}} + \frac{c_{\text{soll}}}{s}} \cdot \frac{1}{s}. \quad (6.17)$$

Dabei beschreibt c_{soll} die Steifigkeit einer linearen Feder. Die Übertragungsfunktion kann für theoretische Stabilitätsbetrachtungen im Bereich der Ruhelage verwendet werden.

Anmerkung 1 Die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{\text{ist}}(t)$ wird durch Differentiation und Tiefpassfilterung des Positionssignals $\varphi_{\text{ist}}(t)$ ermittelt. Es wäre aber auch eine Rekonstruktion durch einen Ausgangsbeobachter möglich.

Anmerkung 2 Die zur Erzeugung des Motormoments $M_{\text{Motor}} = f(u(t))$ benötigte Stellgröße, Spannung $u(t)$, wird über die Inverse der Übertragungsfunktion (6.13) berechnet, sie ergibt sich zu

$$G_{\text{Motor}}^{-1}(s) = \frac{u(s)}{M_{\text{Motor}}(s)} = \frac{R}{k}. \quad (6.18)$$

6.4.3 Admittanz-System

Die Admittanz-Struktur wird verwendet, wenn bei der Nachbildung eines rotatorischen Bedienelements die mechanischen Eigenschaften

- Massenträgheitsmoment,
- Coulomb'sche Reibung und
- viskose Reibung (Dämpfung)

variiert werden. In Abbildung 6.9 ist das Blockschaltbild dargestellt.

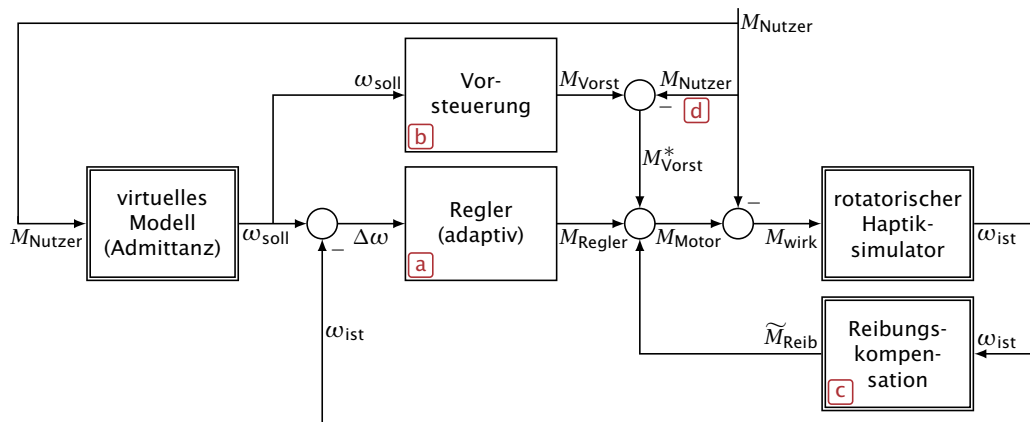


Abbildung 6.9: Blockschaltbild des verwendeten Regelungskonzepts im Fall des Admittanz-Systems

Es werden unterschiedliche Strategien kombiniert: Es handelt sich primär um eine Folgeregelung **a**) mit modellgestützter Vorsteuerung **b**). Darüber hinaus erfolgt eine Linearisierung der Strecke durch die Reibungskompensation **c**) und eine Störgrößen-aufschaltung **d**).

Der (Folge-)Regler ist ein proportional wirkender Regler mit dem variabel einstellbaren Reglerparameter k_p . Der Reglerparameter wird in Abhängigkeit vom gewünschten Massenträgheitsmoment J_{soll} geändert. In Experimenten hat sich dieser Parameter als besonders kritisch für die Stabilität heraus gestellt. Die Adaptionsregel – Details sind in Anhang A.2.2 beschrieben – für k_p wurde experimentell ermittelt und hat die Form Regler

$$k_p(J_{\text{soll}}) = k_0 + \ln\left(\frac{J_{\text{soll}}}{\text{kgm}^2}\right) \cdot \frac{\text{Nms}}{\text{rad}}. \quad (6.19)$$

Vorsteuerungen werden verwendet, um bei einer Regelung das Führungsverhalten einzustellen. Dazu wird in Abhängigkeit vom Sollwert eine Stellgröße bestimmt, die unabhängig vom Istwert direkt auf die geregelte Strecke geführt wird (z. B. SCHRÖDER, 2009, S. 126). Die Vorsteuerung ist hier modellbasiert – sie ist das inverse statische Streckenmodell des Haptiksimulators (6.12) und ergibt sich zu Vorsteuerung

$$G_{\text{Simulator}}^{-1}(s=0) = \frac{M_{\text{Vorst}}(s)}{\omega_{\text{soll}}(s)} = \frac{k^2}{R}. \quad (6.20)$$

Der nichtlineare Anteil der Strecke (6.11) wird durch Aufschalten der geschätzten Reibung kompensiert, siehe (6.21) und Anmerkungen zu (6.14). Dies ist vergleichbar mit der sogenannten exakten Linearisierung – dabei wird durch eine geeignete Transformation – in diesem Fall einer nichtlinearen Zustandsrückführung – ein lineares System erzeugt (z. B. JANSCHKE, 2010, S. 155). Reibungs-kompensation

$$\tilde{M}_{\text{Reib}}(\omega_{\text{ist}}(t)) = \left| \tilde{M}_{\text{Reib}} \right| \cdot \tanh(\gamma \cdot \omega_{\text{ist}}(t)). \quad (6.21)$$

Eine Störgrößen-aufschaltung ist mit einer Vorsteuerung vergleichbar und dient dazu, Störgrößen, die am Eingang der Strecke auftreten, schneller auszuregeln (z. B. SCHRÖDER, 2009, S. 116). Die Störgrößen-aufschaltung besteht in diesem Fall aus der negativen Aufschaltung des gemessenen Nutzermoments M_{Nutzer} . Störgrößen-aufschaltung

Die Trajektoriengenerierung der Soll-Winkelgeschwindigkeit $\omega_{\text{soll}}(t)$ erfolgt, analog zum Impedanz-System, durch ein virtuelles Admittanz-Modell, welches durch die Differentialgleichung Soll-Admittanz

$$J_{\text{soll}} \cdot \dot{\omega}_{\text{soll}}(t) + d_{\text{soll}} \cdot \omega_{\text{soll}}(t) + \left| M_{\text{Reib}}^{\text{soll}} \right| \cdot \tanh(\lambda \cdot \omega_{\text{soll}}(t)) = M_{\text{Nutzer}}(t) \quad (6.22)$$

beziehungsweise

$$\dot{\omega}_{\text{soll}}(t) = \frac{1}{J_{\text{soll}}} \cdot \left[M_{\text{Nutzer}}(t) - d_{\text{soll}} \cdot \omega_{\text{soll}}(t) - \left| M_{\text{Reib}}^{\text{soll}} \right| \cdot \tanh(\lambda \cdot \omega_{\text{soll}}(t)) \right] \quad (6.23)$$

beschrieben wird.

Aufgabe
des Reglers

Das Regelkonzept beim Admittanz-System beinhaltet mehrere modellbasierte Bestandteile – der Regler hat daher im Wesentlichen die Aufgabe, Ungenauigkeiten der Modellierung auszugleichen.

Anmerkung 1 Die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{\text{ist}}(t)$ wird wie beim Impedanz-System durch Differentiation und Tiefpassfilterung des Positionssignals $\varphi_{\text{ist}}(t)$ ermittelt. Die Grenzfrequenz f_g des Tiefpassfilters wird, wie der Regelparameter k_p , adaptiert. Das Adaptionsgesetz⁶ – Details sind in Anhang A.2.2 beschrieben – hat die Form

$$f_g = f_0 - \ln\left(\frac{J_{\text{soll}}}{\text{kgm}^2}\right) \cdot \text{Hz}. \quad (6.24)$$

Anmerkung 2 Zur Vermeidung von Stellgrößensprüngen wird das Drehmoment M_{Vorst}^* , siehe Abbildung 6.9, ebenfalls tiefpassgefiltert. Das Filter hat eine feste Grenzfrequenz von 30 Hz.

6.5 Verifikation

Neben der Bewertung durch Haptikexperten wird durch unterschiedliche Verifikationsmethoden die Einhaltung der Soll-Parameter sichergestellt. Dabei wird überprüft, ob das System einem Nutzer gegenüber die geforderten mechanischen Eigenschaften realitätsnah darstellt.

Rastung und
Coloumb'sche
Reibung

Die Einhaltung der Vorgaben für den

- Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf in Kombination mit
- Coloumb'scher Reibung

werden auf einem Haptik-Prüfstand⁷ für Bedienelemente vermessen. Für die Messung wird der Haptiksimulator durch einen Antrieb mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit von $45^\circ/\text{s}$ “bedient”. Gleichzeitig wird das dazu erforderliche Drehmoment erfasst.

⁶ Die Werte für f_g betragen für die in den Versuchen verwendeten Soll-Massenträgheitsmomente typischerweise 40 Hz bis 100 Hz.

⁷ Bei dem Haptik-Prüfstand handelt es sich um einen Präzisions-Kraft-Weg- und Drehmoment-Drehwinkel-Prüfstand, der am Haptiklabor der Hochschule Heilbronn unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg WILD entwickelt wurde.

In Abbildung 6.10 ist eine exemplarische Messung zu sehen. Die Soll-Vorgabe für den Spitze-Spitze-Wert der sägezahnförmigen Rastung beträgt 40 mNm und für den Reibungs-Offset 5 mNm.

Haptik-
Prüfstand

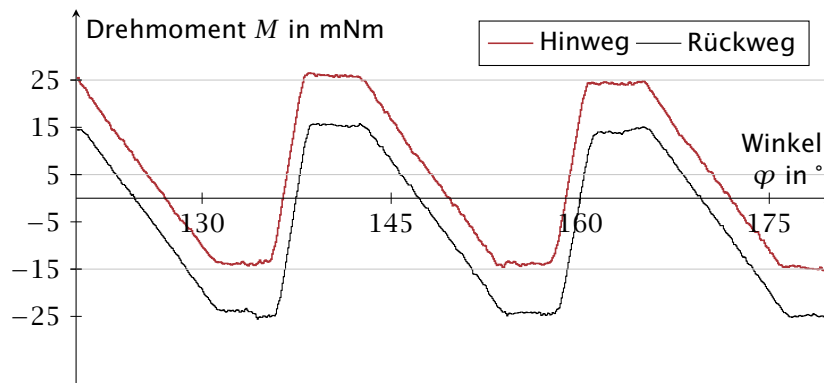


Abbildung 6.10: Exemplarische Drehmoment-Drehwinkel-Messung bei einer Winkelauflösung von $0,09^\circ$. Die drei horizontalen Hilfslinien markieren die Sollwerte (Reibungs-Offset \pm Amplitude) für den Hinweg.

Zur Sicherstellung der Einhaltung der Parameter

experimentelle
Identifikation

- Massenträgheitsmoment,
- Coulomb'sche Reibung und
- viskose Reibung⁸ (Dämpfung)

wird das Verfahren der sogenannten experimentellen Identifikation eingesetzt. Eine experimentelle Identifikation ist ein Parameterschätzverfahren für dynamische Systeme. Damit lassen sich die effektiven Parameter eines realen Systems - innerhalb eines mathematischen Modells - rekonstruieren. Grundlage dieser Verfahren sind die äquidistant abgetasteten Signalwerte der Ein- und Ausgangsgrößen (z. B. LUTZ & WENDT, 2010, Kapitel 9.5.6).

Das Vorgehen gliedert sich wie folgt:

1. Erfassen der Eingangsgröße Nutzer-Drehmoment $M_{\text{Nutzer}}(t)$ und der Ausgangsgröße Winkelgeschwindigkeit $\omega_{\text{ist}}(t)$ zu den Zeitpunkten $t = k \cdot T, k = 0, 1, 2, \dots$ mit der Abtastzeit T bei einer typischen Bedienung des Haptiksensors. Das Soll-Verhalten wird dabei durch die Soll-Admittanz (6.22) mit den Parametern
 - J_{soll} ,
 - d_{soll} und
 - $|M_{\text{Reib}}^{\text{soll}}|$
 beschrieben. Die Abtastzeit T beträgt 1 ms.
2. Ein Simulationsmodell mit der gleichen Struktur wie das Soll-Verhalten, aber den gesuchten wirksamen Parametern (6.25), wird dem aufgezeichneten Eingangssi-

⁸ Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der wirksamen Dämpfung ist in KÜHNER und WILD (2010) beschrieben.

gnal M_{Nutzer} parallel geschaltet:

$$J_{\text{wirk}} \cdot \dot{\omega}_{\text{Modell}}(t) + d_{\text{wirk}} \cdot \omega_{\text{Modell}} + \left| M_{\text{Reib}}^{\text{wirk}} \right| \cdot \tanh(\lambda \cdot \omega_{\text{Modell}}(t)) = M_{\text{Nutzer}}(t) \quad (6.25)$$

Der Ausgang des Systems ist die Winkelgeschwindigkeit ω_{Modell} .

3. Variation der Modell-Parameter

- J_{Modell} ,
- d_{Modell} und
- $\left| M_{\text{Reib}}^{\text{Modell}} \right|$

unter Maßgabe der Minimierung der Summe des quadrierten Ausgangsfehlers

$$\min \sum_k [\omega_{\text{ist}}(kT) - \omega_{\text{Modell}}(kT)]^2. \quad (6.26)$$

Zur Lösung dieses Optimierungsproblems wird die MATLAB-Funktion `nlinfit`⁹ aus der Statistik-Toolbox verwendet.

Beispiel Abbildung 6.11 zeigt eine Aufzeichnung der Eingangsgröße Nutzer-Drehmoment $M_{\text{Nutzer}}(t)$ und der Ausgangsgröße Winkelgeschwindigkeit $\omega_{\text{ist}}(t)$ über einen Zeitraum von rund 20 s.

Der Haptiksimulator wurde dabei mit verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten manuell betätigt¹⁰. Die Soll-Parameter¹¹ betragen

$$J_{\text{soll}} = 15 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2, \quad (6.27)$$

$$d_{\text{soll}} = 0,5 \text{ mNms und} \quad (6.28)$$

$$\left| M_{\text{Reib}}^{\text{soll}} \right| = 10 \text{ mNm}. \quad (6.29)$$

Dies sind typische Werte für die in den Versuchen verwendeten Soll-Parameter.

⁹ nichtlineare Regression, verwendet den Levenberg-Marquardt-Algorithmus

¹⁰ Da es sich um ein System erster Ordnung handelt (Eingang: *Drehmoment*, Ausgang: *Winkelgeschwindigkeit*), muss die Anregung mindestens die gleiche Ordnung haben (eine ausreichende Anregung, die sogenannte *Persistent Excitation*, siehe z. B. SCHRÖDER (2010)). Bei einer Anregung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit (Anregung nullter Ordnung) wäre es aufgrund der fehlenden Beschleunigungs-komponente nicht möglich, das wirksame Massenträgheitsmoment zu bestimmen.

¹¹ Der Nutzer spürt J_{soll} und zusätzlich die Massenträgheitsmomente zwischen ihm und der Drehmoment-Messstelle.

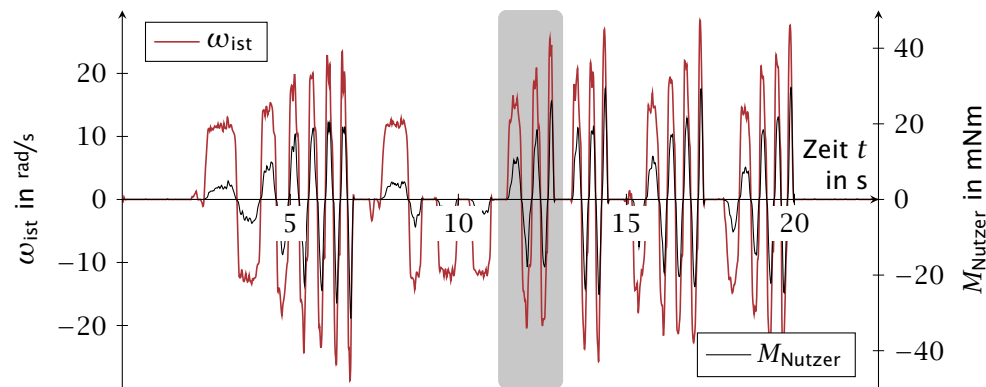


Abbildung 6.11: Exemplarische Messung der Eingangsgröße Nutzer-Drehmoment M_{Nutzer} und der Ausgangsgröße Winkelgeschwindigkeit ω_{ist} für das in Abbildung 6.9 abgebildete Admittanz-System. Die zugrunde liegenden Soll-Parameter sind dem Fließtext zu entnehmen.

Für das in Abbildung 6.11 grau markierte Zeitfenster ist in Abbildung 6.12 der Verlauf der durch die Soll-Admittanz, siehe Abbildung 6.9, berechneten Soll-Winkelgeschwindigkeit ω_{soll} und der am Haptiksimulator gemessenen Ist-Winkelgeschwindigkeit ω_{ist} dargestellt. Soll-Ist-Vergleich

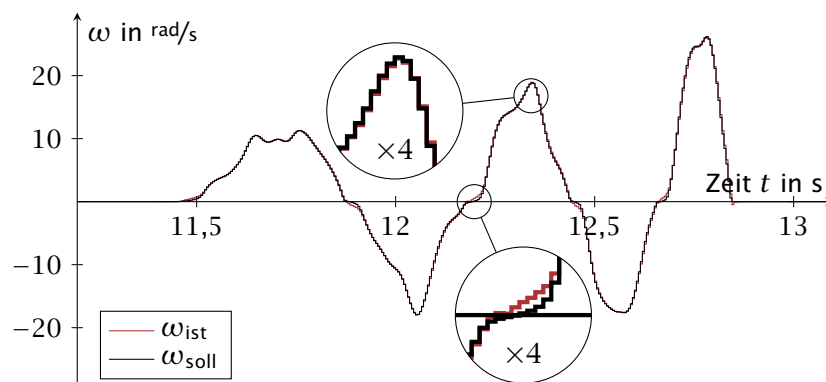


Abbildung 6.12: Exemplarischer Verlauf der Soll-Winkelgeschwindigkeit ω_{soll} und der Ist-Winkelgeschwindigkeit ω_{ist} für das in Abbildung 6.11 grau markierte Zeitfenster.

Wie bereits in Tabelle 6.1 erwähnt, beträgt die Abtastrate bei der Regelung 20 kHz. Für die Identifikation werden die Daten mit einer Abtastrate von 1 kHz aufgezeichnet. Zur Reduzierung der Grafikkomplexität beträgt die Abtastrate der Daten in Abbildung 6.11 40 Hz und für die Daten in Abbildung 6.12 200 Hz. Abtastraten

Die gute Übereinstimmung zwischen Soll- und Ist-Verlauf wird durch die Identifikation bestätigt. Die ermittelten wirksamen Parameter inklusive 95%-Konfidenzintervall¹² betragen in diesem Beispiel

¹²berechnet mit der MATLAB-Funktion `nlparci`

$$J_{\text{wirk}} = (15,3 \pm 0,1) \times 10^{-6} \text{ kgm}^2 [2,3\%], \quad (6.30)$$

$$d_{\text{wirk}} = (0,500 \pm 0,001) \text{ mNms} [0,2\%] \text{ und} \quad (6.31)$$

$$\left| M_{\text{Reib}}^{\text{wirk}} \right| = (9,963 \pm 0,002) \text{ mNm} [< 0,1\%]. \quad (6.32)$$

Der Betrag der prozentualen Abweichung von den Soll-Werten ist in eckigen Klammern angegeben.

Bei der Ermittlung von Unterschiedsschwellen ist es vor allem wichtig, dass die Abweichung vom Soll-Wert stabil ist – der absolute Wert spielt eine untergeordnete Rolle. Das heißt, die Streuung der Abweichungen muss klein sein. In dem für die Versuche interessanten Parameterbereich ist dies gewährleistet.

7 Experimente

- 7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung* 73
- 7.2 Konstanzleistung bei der Betätigung translatorischer Bedienelemente 90
- 7.3 Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter *Massenträgheit, Dämpfung und Reibung* 102

Im Folgenden werden drei Experimente beschrieben und deren Ergebnisse diskutiert. Teile der ersten zwei Experimente sind bereits in KÜHNER, WILD, BUBB, BENGLER und SCHNEIDER (2011) sowie KÜHNER, WILD und BUBB (2011) beschrieben – werden in der vorliegenden Arbeit aber ausführlicher und unter vergleichbaren statistischen Maßstäben betrachtet.

Da sich die Anzahl der Probanden unterscheidet, ergibt sich bei konstantem Signifikanzniveau entweder eine jeweils unterschiedliche Teststärke $1 - \beta$ oder eine unterschiedliche damit verbundene Effektgröße δ'' , siehe Kapitel 4.

unterschiedliche Probandenzahl

Um die Ergebnisse der drei Experimente nach den gleichen statistischen Maßstäben zu beurteilen, wird eine einheitliche Teststärke von $1 - \beta = 80\%$ für einen “großen” Effekt vereinbart. Ein “großer” Effekt ist nach der in Tabelle 4.3 genannten Konvention eine Mittelwertdifferenz von 0,57 (Standardabweichungen).

einheitliche statistische Beurteilung

Um die Teststärke und die damit verbundene Effektgröße konstant zu halten, wird je nach Probandenzahl das Signifikanzniveau angepasst, siehe Abbildung 7.1. Alle Hypothesentests werden zweiseitig durchgeführt.

α anpassen

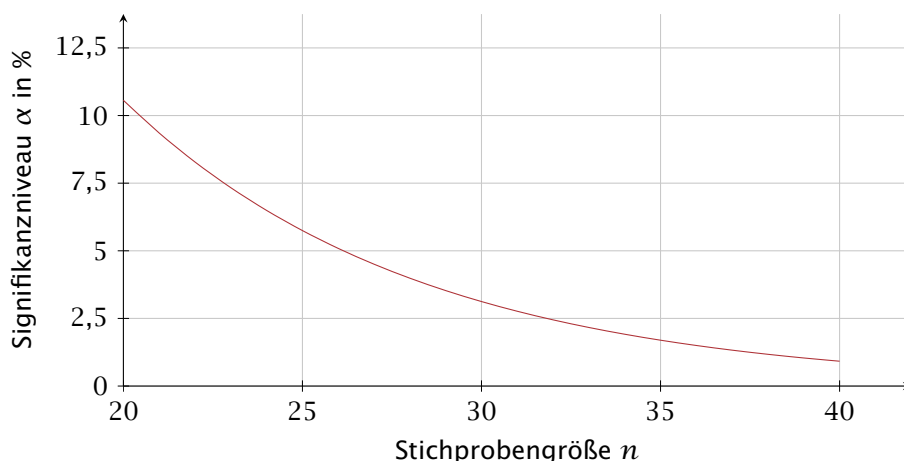


Abbildung 7.1: Signifikanzniveau α als Funktion der Stichprobengröße n bei einem zweiseitigen t -Test für verbundene Stichproben – konstante Parameter: Effektgröße $\delta'' = 0,57$ und Teststärke $1 - \beta = 80\%$.

Die Wahrscheinlichkeit für ein signifikantes Ergebnis bei einem tatsächlich vorhandenen

Interpretationshilfe

Effekt der Größe $\delta'' = 0,57$ beträgt somit für alle Untersuchungen $1 - \beta = 80\%$. Ist der tatsächlich vorhandene Effekt größer, so steigt die Teststärke. Fällt ein Ergebnis nicht signifikant aus, so beträgt die Wahrscheinlichkeit, die Alternativhypothese H_1 fälschlicherweise zugunsten der Nullhypothese H_0 zu verwerfen, folglich $\beta = 20\%$. Bei kleineren tatsächlich vorhandenen Effekten steigt diese Fehlerwahrscheinlichkeit.

Die Aussagen beziehen sich auf normalverteilte Mittelwertdifferenzen – sind die Differenzen nicht normalverteilt, so gelten sie nur näherungsweise.

Nullhypothese
nicht belegbar

Im Allgemeinen kann ein nichtsignifikantes Ergebnis die Nullhypothese nicht belegen. Man kann aber beispielsweise sagen, dass ein Ergebnis gut mit der Nullhypothese vereinbar ist (BORTZ & SCHUSTER, 2010, Kapitel 7.4.4).

7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung*

Experimente zur Schwellwertbestimmung finden in der Regel unter Laborbedingungen statt. Dabei ist das Schwellwertexperiment die einzige Aufgabe des Probanden. Das Versuchsdesign dieses Experiments zielt unter anderem darauf ab, die Übertragbarkeit derart gewonnener Schwellwerte auf die Praxis abzuschätzen.

7.1.1 Untersuchungsziele

Hauptziel dieses Experiments ist es, herauszufinden, ob unter Laborbedingungen ermittelte Schwellwerte auf das haptische Empfinden in alltäglichen Situationen übertragbar sind.

Labor vs. Alltag

Im Alltag liegt die Aufmerksamkeit in der Regel nicht primär auf der haptischen Rückmeldung von Bedienelementen. Die Bedienung erfolgt in einem bestimmten Kontext und ist zweckorientiert. In diesem Experiment soll der Aufmerksamkeitszustand beim "normalen" Führen eines Kraftfahrzeugs erzeugt werden, damit die Probanden vom Schwellwertexperiment abgelenkt werden. Die unter diesen Umständen ermittelten Schwellwerte werden dann mit Schwellwerten verglichen, bei deren Ermittlung die Aufmerksamkeit der Probanden ausschließlich auf dem Schwellwertexperiment liegt.

Aufmerksamkeit

Um eine fahraufgabenähnliche Situation für die Probanden zu erzeugen, wird auf den in der ISO 26022:2010-09¹ beschriebenen Lane Change Test (LCT) zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um eine standardisierte Fahraufgabe (Spurwechsel), die an einem handelsüblichen PC durchgeführt werden kann, siehe Abbildung 7.2b. Im Allgemeinen wird der Lane Change Test dazu verwendet, das Maß der Ablenkung durch eine Zweit- aufgabe – beispielsweise das Bedienen eines Navigationsgerätes – beim Führen eines Fahrzeugs zu bestimmen.

Lane Change Test (LCT)

Die Schwellwertermittlung erfolgt für den Parameter viskose Reibung beziehungsweise Dämpfung bei rotatorischen Bedienelementen. Im Rahmen dieses Kapitels bezeichnet die Dämpfung d die für das geschwindigkeits-proportionale (Gegen-)Drehmoment $M_{\text{Dämpfung}}$ verantwortliche Proportionalitätskonstante mit der Dimension Nms, siehe (7.1).

Dämpfung

$$M_{\text{Dämpfung}}(t) = d \cdot \omega(t) \quad (7.1)$$

Neben der Bestimmung des Einflusses der Ablenkung werden die Parameter Knopfdurchmesser und Überlagerung einer Rastung systematisch variiert:

¹ Road vehicles – Ergonomic aspects of transport information and control systems – Simulated lane change test to assess in-vehicle secondary task demand

- Knopfdurchmesser
 - $D_1 = 20 \text{ mm}$
 - $D_2 = 36 \text{ mm}$
 - Durchmesser Verhältnis $D_2/D_1 = 1,8$
- Ablenkung
 - Schwellwertexperiment als alleinige Aufgabe
 - Schwellwertexperiment als Zweitaufgabe (LCT)
- Überlagerung einer Rastung
 - ohne Rastung
 - mit Rastung (R)

Knopfdurchmesser Die Haut der Fingerbeeren erfährt letztendlich eine Tangentialkraft und übt nur indirekt ein Drehmoment aus, daher wird erwartet, dass sich der Knopfdurchmesser auf die Schwellwerte auswirkt.

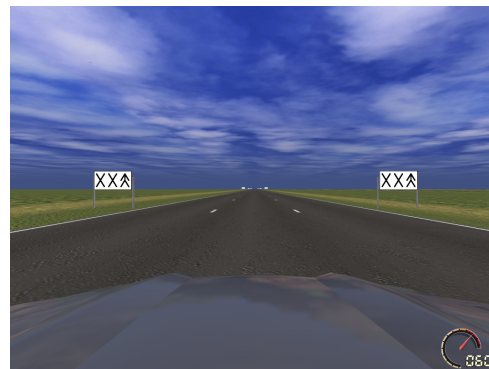
überlagerte Rastung Zudem wird erwartet, dass sich ein überlagertes positionsabhängiges Drehmoment in Form einer Rastung ebenfalls auf die Schwellwerte auswirkt.

7.1.2 Versuchsaufbau

Für den Versuch kommt eine sogenannte Sitzbox – siehe Abbildung 7.2a – zum Einsatz, für Details siehe REISINGER (2009, Kapitel 5.6.2 und Anhang D.1). Als Eingabegerät für den Lane Change Test wird ein Lenkrad mit Pedalerie aus dem PC-Spiele-Bereich² verwendet. Die Fahraufgabe wird auf einem 21,5-Zoll-Monitor dargestellt.



(a) Sitzbox mit Lenkrad für den LCT – nicht abgebildet ist der Monitor für die Fahraufgabe, die Kopfhörer und das Eingabegerät für die Schwellwertexperimente.



(b) Der Fahrer hat in dieser Situation des LCT die Aufgabe, auf die rechte Spur zu wechseln.

Abbildung 7.2: Foto der im Versuch verwendeten Sitzbox (a) und Screenshot der standardisierten Fahraufgabe durch den Lane Change Test (LCT) (b).

Haptiksimulator Beim haptischen Display handelt es sich um Variante 1 des rotatorischen Haptiksimula-

² MOMO RACING FORCE FEEDBACK WHEEL von der Firma LOGITECH

7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung*

tors wie er in Kapitel 6.3 beschrieben wird, siehe auch Abbildung 6.5. Die Ansteuerung erfolgt gemäß dem in Kapitel 6.4.2 beschriebenen Ansatz.

Das für den Probanden wirksame Massenträgheitsmoment $J_{\text{ist}} = 28 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$ und der Betrag der Coloumb'schen Gleitreibung $|M_{\text{Reib}}| = 3\text{--}5 \text{ mNm}$ wird während der Versuche nicht variiert.

konstante
mechanische
Parameter

7.1.3 Versuchsdesign und verwendete Methode zur Schwellwertbestimmung

Der Versuchsablauf für das Schwellwertexperiment für den Parameter Dämpfung gliedert sich prinzipiell in vier Teile:

1. LCT-Training ($\approx 10 \text{ min}$)
2. Instruktion für die Schwellwertexperimente ($\approx 5 \text{ min}$)
3. Block 1
 - a) Gruppe A: Schwellwertexperimente ohne LCT ($\approx 20 \text{ min}$)
 - b) Gruppe B: Schwellwertexperimente mit LCT ($\approx 30 \text{ min}$)
4. Block 2
 - a) Gruppe A: Schwellwertexperimente mit LCT ($\approx 30 \text{ min}$)
 - b) Gruppe B: Schwellwertexperimente ohne LCT ($\approx 20 \text{ min}$)

Schwellwertexperimente mit Rastung werden nur in Verbindung mit dem LCT durchgeführt, da ansonsten die Versuchsdauer weit über einer Stunde liegen würde. Das ist der Grund für die unterschiedliche Dauer der Schwellwertexperimente mit und ohne LCT.

Rastung nur
bei LCT

Die Probanden müssen sich zu Beginn der Experimente entscheiden, mit wie vielen Fingern sie die jeweils unterschiedlichen Knopfdurchmesser greifen möchten. Diese Entscheidung gilt dann für alle Schwellwertexperimente.

Griffvariante

Die Probanden werden darüber hinaus angehalten, eine für sie übliche Betätigungsgeschwindigkeit zu verwenden.

Damit bei den Experimenten ohne LCT die Ablenkung minimiert wird, bekommen die Probanden Musik ihrer Wahl über Kopfhörer vorgespielt. Der Haptiksimulator selbst erzeugt kein "Klick-Geräusch".

Musik über
Kopfhörer

Insgesamt ergeben sich zwölf unterschiedliche Versuchsbedingungen – jeweils sechs für die Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellenexperimente, siehe auch Tabelle 7.1. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird auf eine Kurzschreibweise zurückgegriffen, um die verschiedenen Versuchsbedingungen zu kennzeichnen. Sie setzt sich aus dem Knopfdurchmesser (D1/D2), der Überlagerung einer Rastung (R/-) und der Ablenkungsbedingung (LCT/-) zusammen.

2 × 6 Ver-
suchsbedin-
gungen

Um Transfereffekte zu minimieren, absolviert die Hälfte der Probanden zuerst die Schwellwertexperimente ohne LCT und die andere Hälfte die Schwellwertexperimente

Transfer-
effekte mini-
mieren

mit LCT – zudem wird die Reihenfolge der Knopfdurchmesser variiert – es erfolgt aber stets zunächst die Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen. Eine vollständige Permutation ist aufgrund der dafür nötigen Probandenanzahl von $n_{\text{vollst}} = 12! \gg 10^6$ nicht möglich.

Rastung Als Rastung kommt ein sägezahnförmiger Drehmomentverlauf mit einem maximalen Drehmoment von 25 mNm und einer Periode von 18° (20 Rastungen pro Umdrehung) zum Einsatz. Die Rastung weist hinsichtlich ihrer haptischen Eigenschaften eine als hochwertig bewertete Charakteristik auf (REISINGER, 2009, S. 105). Abbildung 7.3 zeigt eine idealisierte Darstellung des Drehmomentverlaufs. Diesem überlagert sich neben Trägheitseffekten noch das Drehmoment durch die systematisch variierte Dämpfung und die richtungsabhängige Coulomb'sche Reibung des Versuchsaufbaus von 3–5 mNm, siehe Kapitel 7.1.2.

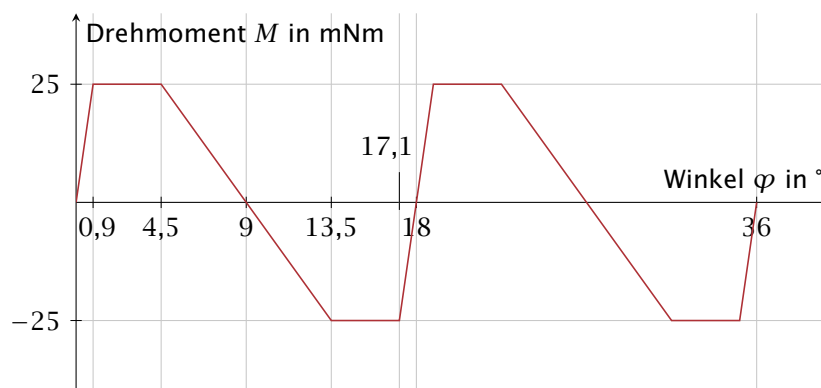


Abbildung 7.3: Idealisierter Drehmomentverlauf der im Experiment verwendeten Rastung

Verfahren zur Schwellwertbestimmung Zur Schwellwertbestimmung kommt das Simple-Staircase-Verfahren in Kombination mit dem Ja/Nein-Paradigma zum Einsatz, siehe Kapitel 5. Die Schwellwerte werden durch Mittelung an sechs Umkehrpunkten berechnet. Zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen erfolgt die Annäherung von oben – bei der Ermittlung der Unterschiedsschwellen von unten.

Konstantreiz R Zur Ermittlung der Unterschiedsschwellen wird der Konstantreiz R zu 2 mNms gewählt. Dies entspricht einer deutlich wahrnehmbaren Dämpfung – in etwa vergleichbar mit dem Rotieren eines Bleistifts in flüssigem Honig.

Parameter in Vorversuch bestimmt In Tabelle 7.1 sind die konkreten Parameter des Staircase-Verfahrens aufgelistet. Die Werte wurden mithilfe eines Vorversuchs bestimmt.

7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung*

Tabelle 7.1: Parameter für das verwendete Staircase-Verfahren – alle Angaben in mNms. Die Parameter x_0 , Δx_0 und Δx sind in Abbildung 5.6 veranschaulicht. Die verwendete Kurzschreibweise – z. B. D2.LCT – ist auf Seite 75 beschrieben.

	Startwert x_0	Anfangs- schrittweite Δx_0	Schrittweite Δx	Konstantreiz R
Wahrnehmungsschwelle				
D2	0,84	$4\Delta x$	0,03	0
D2.LCT	0,72	$4\Delta x$	0,03	0
D2.R.LCT	1,08	$4\Delta x$	0,03	0
D1	0,72	$4\Delta x$	0,03	0
D1.LCT	0,72	$4\Delta x$	0,03	0
D1.R.LCT	0,96	$4\Delta x$	0,03	0
Unterschiedsschwelle				
D2	0,80	$4\Delta x$	0,05	2
D2.LCT	0,80	$4\Delta x$	0,05	2
D2.R.LCT	0,40	$4\Delta x$	0,05	2
D1	0,80	$4\Delta x$	0,05	2
D1.LCT	0,80	$4\Delta x$	0,05	2
D1.R.LCT	0,60	$4\Delta x$	0,05	2

7.1.4 Statistische Auswertung

Es folgt die Beschreibung des Probandenkollektivs und anschließend die statistische Auswertung in deskriptiver und inferenzstatistischer Form. Der Stichprobenumfang beträgt $n = 26$. Dadurch ergibt sich das Signifikanzniveau $\alpha_{n=26}$ für dieses Experiment zu 5%, siehe auch Abbildung 7.1 und Abbildung A.20 in Anhang A.3.2.

Signifikanz-
niveau

7.1.4.1 Probandenkollektiv

Bei der Stichprobe handelt es sich um eine sogenannte Klumpenstichprobe (BORTZ & SCHUSTER, 2010, S. 81; EID u. a., 2010, Kapitel 9.3.2), die 26 Teilnehmer stammen dabei vornehmlich aus dem Hochschul Umfeld. Ausgewählte statistische Kennwerte des Probandenkollektivs sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst. In Bezug auf das Alter werden das 0,25-Quantil und das 0,75-Quantil dabei mit $Q_{0,25}$ und $Q_{0,75}$ symbolisiert.

Stichprobenart

Tabelle 7.2: Statistische Kennwerte des Probandenkollektivs (Stichprobenumfang $n = 26$)

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Alter in Jahren	23	25	25,5	36,5	67	31,2	11,1
Geschlecht	15% weiblich bzw. 85% männlich						
Händigkeit	96% rechts bzw. 4% links						

7.1.4.2 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse in grafischer und tabellarischer Form beschrieben. Die inhaltliche Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 7.1.5.

Die Verteilung der von den Probanden in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser gewählten Griffvariante sind in Abbildung 7.4 und 7.3 aufgeschlüsselt.

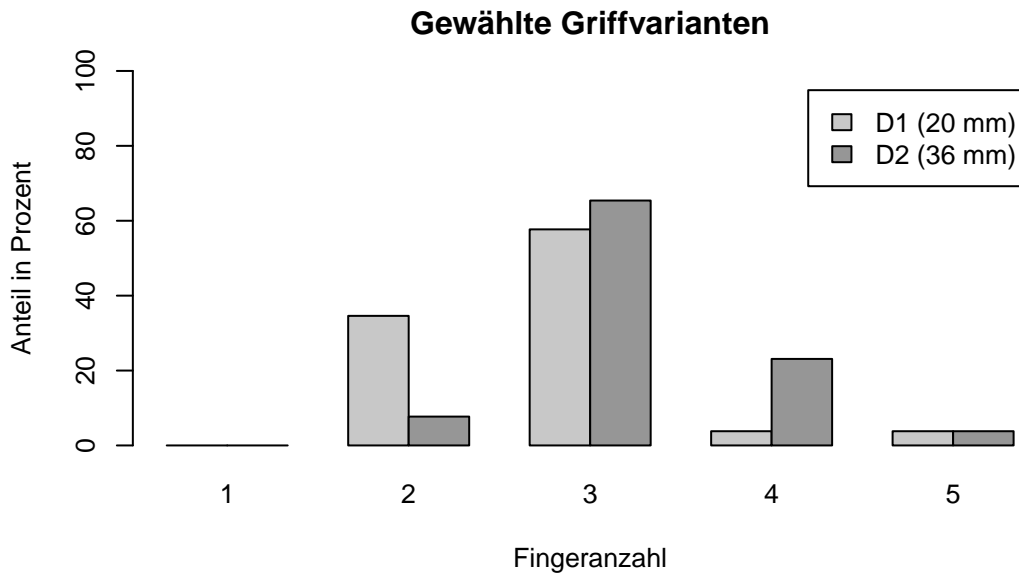


Abbildung 7.4: Verwendete Griffarten in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser (D_1 und D_2)

Tabelle 7.3: Verteilung der gewählten Griffvarianten (Anzahl der Finger) in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser – alle Angaben in %

	1	2	3	4	5
D_1 (20 mm)	0	34,6	57,7	3,8	3,8
D_2 (36 mm)	0	7,7	65,4	23,1	3,8

Wahrnehmungsschwellen

Abbildung 7.5 zeigt die Ergebnisse der Experimente zur Bestimmung der Wahrnehmungsschwellen unter den verschiedenen Versuchsbedingungen. Dabei wird die auf Seite 75 eingeführte Kurzschreibweise verwendet.

Die grafische Darstellung erfolgt in Form sogenannter Boxplots³ gemäß der in BORTZ und SCHUSTER (2010, S. 44-45) beziehungsweise TUKEY (1977) genannten Konventionen.

³ auch *Box-Whisker-Plot* (engl. *box-and-whisker plot* oder *box plot*) oder *Kastengrafik* genannt

7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung*

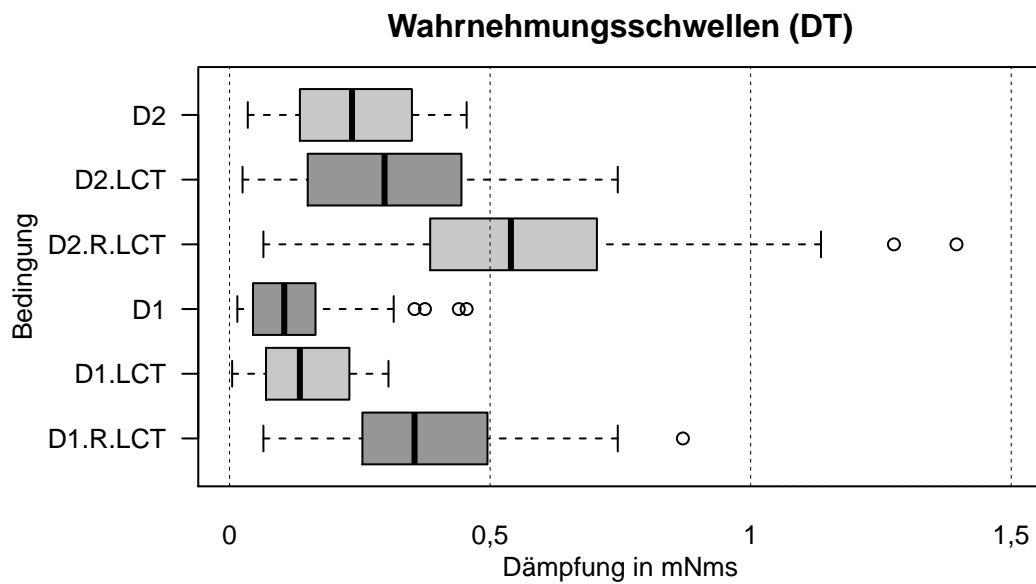


Abbildung 7.5: Boxplots der ermittelten Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) unter den verschiedenen Versuchsbedingungen: D1/D1 – Knopfdurchmesser | R – mit Rastung, ansonsten ohne | LCT – mit Lane Change Test, ansonsten ohne

Ausgewählte statistische Kennwerte der in Abbildung 7.5 dargestellten Ergebnisse sind Tabelle 7.4 zu entnehmen.

Tabelle 7.4: Statistische Kennwerte der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) – alle Angaben in mNms

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
D2	0,035	0,135	0,235	0,350	0,455	0,245	0,128
D2.LCT	0,025	0,161	0,298	0,439	0,745	0,312	0,184
D2.R.LCT	0,065	0,386	0,540	0,703	1,395	0,598	0,349
D1	0,015	0,046	0,105	0,164	0,455	0,148	0,135
D1.LCT	0,005	0,070	0,135	0,225	0,305	0,149	0,087
D1.R.LCT	0,065	0,255	0,355	0,495	0,870	0,386	0,216

Da es sich um eine verbundene Stichprobe handelt, erfolgt die inferenzstatistische Auswertung der Ergebnisse anhand der probandenindividuellen Differenzen der relevanten Versuchsbedingungs-paare. Die Wahl des entsprechenden Hypothesentests – t -Test oder Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest – erfolgt in Abhängigkeit von einem Anpassungstest auf Normalverteilung. Als Anpassungstest wird der in Kapitel 4 auf Seite 33 genannte Shapiro-Wilk-Test verwendet ($\alpha = 5\%$).

inferenz-
statistische
Auswertung
der Differen-
zen

Um den Einfluss der Ablenkung auf die Wahrnehmungsschwelle zu bestimmen, werden die Differenzen der Wahrnehmungsschwellen mit und ohne LCT betrachtet, siehe Abbildung 7.6 und Tabelle 7.5.

Ablenkung

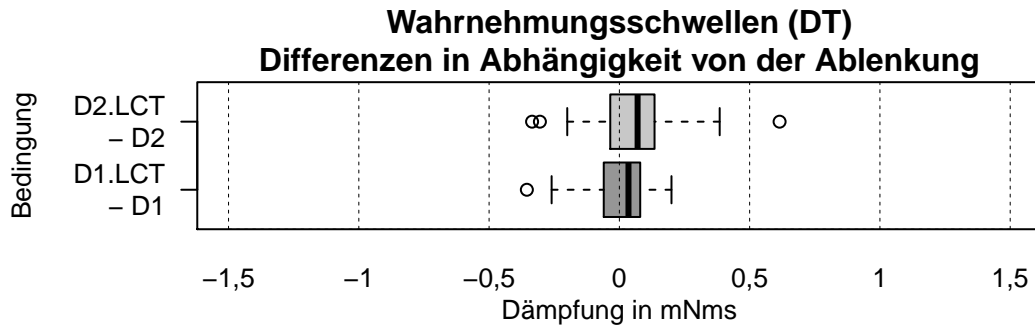


Abbildung 7.6: Boxplots der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) für die zwei Knopfdurchmesser D_1 und D_2 in Abhängigkeit von der Ablenkung (mit/ohne LCT)

Tabelle 7.5: Statistische Kennwerte zu den Differenzen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit von der Ablenkung (mit/ohne LCT) – alle Angaben in mNms

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
D2.LCT – D2	-0,335	-0,035	0,070	0,135	0,615	0,069	0,205
D1.LCT – D1	-0,355	-0,056	0,035	0,080	0,200	<0,001	0,145

LCT nicht
signifikant

Die inferenzstatistische Auswertung der Differenzen ergibt hinsichtlich der Ablenkung durch den LCT für beide Durchmesser kein signifikantes Ergebnis, siehe Tabelle 7.6.

In Tabelle 7.6 wird mithilfe des Shapiro-Wilk-Test ausgehend von der Stichprobe überprüft, ob die Grundgesamtheit normalverteilt ist. Ist das Ergebnis auf dem 5%-Niveau signifikant, so erfolgt der Test auf Gleichheit des Medians durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest. Kann hingegen von einer Normalverteilung der Grundgesamtheit ausgegangen werden, so wird die Mittelwertgleichheit mit dem t -Test überprüft.

Tabelle 7.6: Hypothesentests für die Differenzen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit von der Ablenkung – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein t -Test oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (p -Wert)	t -Test (p -Wert)	Wilcoxon-Test (p -Wert)
D2.LCT – D2	55,83 %	10,63 %	-
D1.LCT – D1	8,58 %	98,93 %	-

Knopfdurch-
messer

Der Einfluss des Knopfdurchmessers auf die Wahrnehmungsschwellen wird untersucht, indem die Differenzen der Wahrnehmungsschwellen für die Durchmesser D_1 und D_2 betrachtet werden, siehe Abbildung 7.7 und Tabelle 7.7. Die Betrachtung erfolgt für die verbleibenden drei Versuchsbedingungs-paare.

7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung*

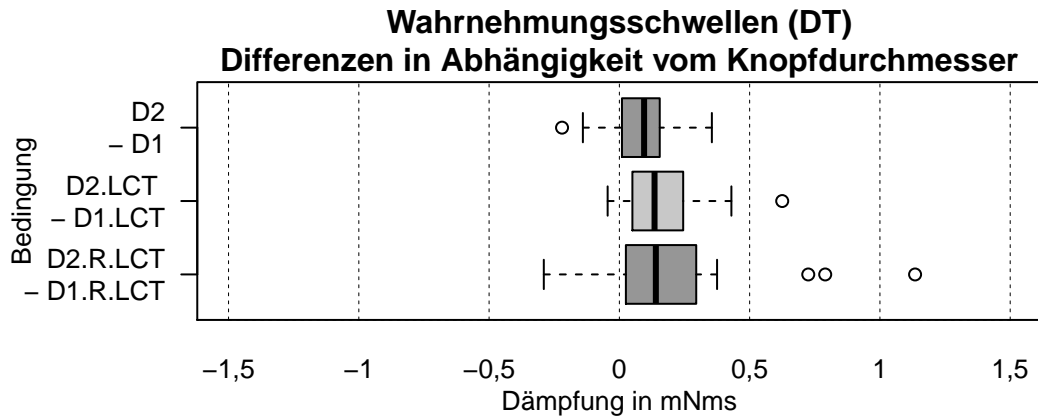


Abbildung 7.7: Boxplots der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) für die Bedingungen mit/ohne LCT und mit/ohne Rastung (jeweils mit LCT) in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser (D_1 und D_2)

Tabelle 7.7: Statistische Kennwerte der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser – alle Angaben in mNm

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
D2 – D1	-0,220	0,010	0,095	0,155	0,355	0,094	0,140
D2.LCT – D1.LCT	-0,045	0,056	0,135	0,238	0,625	0,163	0,162
D2.R.LCT – D1.R.LCT	-0,290	0,025	0,140	0,295	1,135	0,214	0,301

Die inferenzstatistische Auswertung der Differenzen ergibt für die drei Versuchsbedingungspaare ein signifikantes Ergebnis, siehe Tabelle 7.8. Dabei wird für die Differenz D2.R.LCT – D1.R.LCT (also mit Rastung und LCT) der nichtparametrische Hypothesentest verwendet, da der Anpassungstest auf einem 5%-Niveau signifikant ausfällt.

Knopfdurchmesser signifikant

Tabelle 7.8: Hypothesentests für die Differenzen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (<i>p</i> -Wert)	<i>t</i> -Test (<i>p</i> -Wert)	Wilcoxon-Test (<i>p</i> -Wert)
D2 – D1	80,44 %	0,3 %	-
D2.LCT – D1.LCT	5,26 %	<0,1 %	-
D2.R.LCT – D1.R.LCT	0,48 %	-	<0,1 %

Der Knopfdurchmesser hat einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsschwellen. Nachfolgend wird daher überprüft, ob das Verhältnis der Wahrnehmungsschwellen dem Durchmesser Verhältnis $D_2/D_1 = 1,8$ entspricht. Tabelle 7.9 zeigt die statistischen Kennwerte der Verteilungen der Verhältnisse der Wahrnehmungsschwellen.

Verhältnis

Tabelle 7.9: Statistische Kennwerte der Verhältnisse der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) – das Verhältnis der Knopfdurchmesser beträgt $D_2/D_1 = 1,8$

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
D_2/D_1	0,23	1,08	1,86	3,54	17,33	3,46	4,06
$D_{2.LCT}/D_{1.LCT}$	0,36	1,43	1,83	3,38	29,00	3,46	5,49
$D_{2.RLCT}/D_{1.RLCT}$	0,18	1,23	1,39	2,16	9,11	1,91	1,71

Verhältnis nicht signifikant von 1,8 verschieden

Die inferenzstatistische Auswertung unterscheidet sich von den bisherigen, da in diesem Fall keine Differenzen betrachtet werden. Es handelt sich formal um einen Einstichprobentest, bei dem ein Vergleich der zentralen Tendenz (Mittelwert oder Median) mit einem fixen Wert erfolgt (z. B. EID u. a., 2010, S. 273–282). Wie Tabelle 7.10 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die empirisch ermittelten Verhältnisse der Wahrnehmungsschwellen nicht signifikant vom Verhältnis der Knopfdurchmesser $D_2/D_1 = 1,8$. Da die Verteilungen in allen drei Fälle signifikant von einer Normalverteilung abweichen, wird der nichtparametrische Hypothesentest verwendet.

Tabelle 7.10: Hypothesentests zu den Verhältnissen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) – das Verhältnis der Knopfdurchmesser beträgt 1,8. In Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt. Getestet wird, ob sich die zentrale Tendenz der Verteilungen (Mittelwert oder Median) von dem fixen Wert 1,8 unterscheidet.

	Shapiro-Wilk-Test (p-Wert)	t-Test (p-Wert)	Wilcoxon-Test (p-Wert)
$D_2/D_1 = 1,8$	<0,1 %	-	22,00 %
$D_{2.LCT}/D_{1.LCT} = 1,8$	<0,1 %	-	24,72 %
$D_{2.RLCT}/D_{1.RLCT} = 1,8$	<0,1 %	-	28,72 %

Rastung Der Einfluss der Rastung wird durch Differenzbildung der entsprechenden Versuchsbedingungen untersucht. Die Versuchsbedingung Rastung (R) kommt nur in Verbindung mit dem LCT vor. Die Differenzen sind in Abbildung 7.8 und Tabelle 7.11 dargestellt.

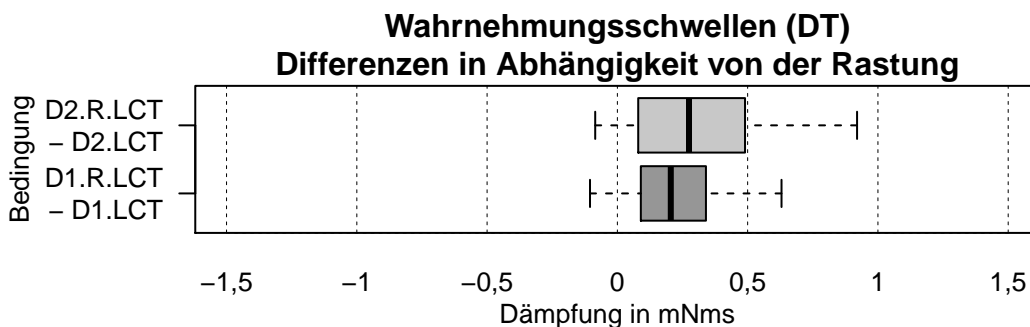


Abbildung 7.8: Boxplots der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) für die zwei Knopfdurchmesser D_1 und D_2 in Abhängigkeit von der Rastung (jeweils mit LCT)

7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung*

Tabelle 7.11: Statistische Kennwerte der Differenzen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit von der Rastung – alle Werte in mNms

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
D2.R.LCT – D2.LCT	-0,085	0,081	0,275	0,480	0,920	0,286	0,267
D1.R.LCT – D1.LCT	-0,105	0,090	0,205	0,340	0,630	0,234	0,198

Wie Tabelle 7.12 zu entnehmen ist, ergibt die inferenzstatistische Auswertung der Differenzen, dass die Rastung einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle hat.

Rastung signifikant

Tabelle 7.12: Hypothesentests für die Differenzen der Wahrnehmungsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit von der Rastung – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (<i>p</i> -Wert)	<i>t</i> -Test (<i>p</i> -Wert)	Wilcoxon-Test (<i>p</i> -Wert)
D2.R.LCT – D2.LCT	18,10%	<0,1%	-
D1.R.LCT – D1.LCT	60,46%	<0,1%	-

Die Betrachtung der Ergebnisse für die Unterschiedsschwellenexperimente erfolgt analog der Betrachtung für die Wahrnehmungsschwellenexperimente.

Unterschiedsschwellen

Abbildung 7.9 zeigt die Ergebnisse der Experimente zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen unter den verschiedenen Versuchsbedingungen. Alternativ lassen sich bei Experimenten zur Bestimmung von Unterschiedsschwellen auch die Weber-Konstanten angeben, siehe Abbildung 7.10 und Kapitel 5.1.3.

JND und *k* (Weber-Konstante)

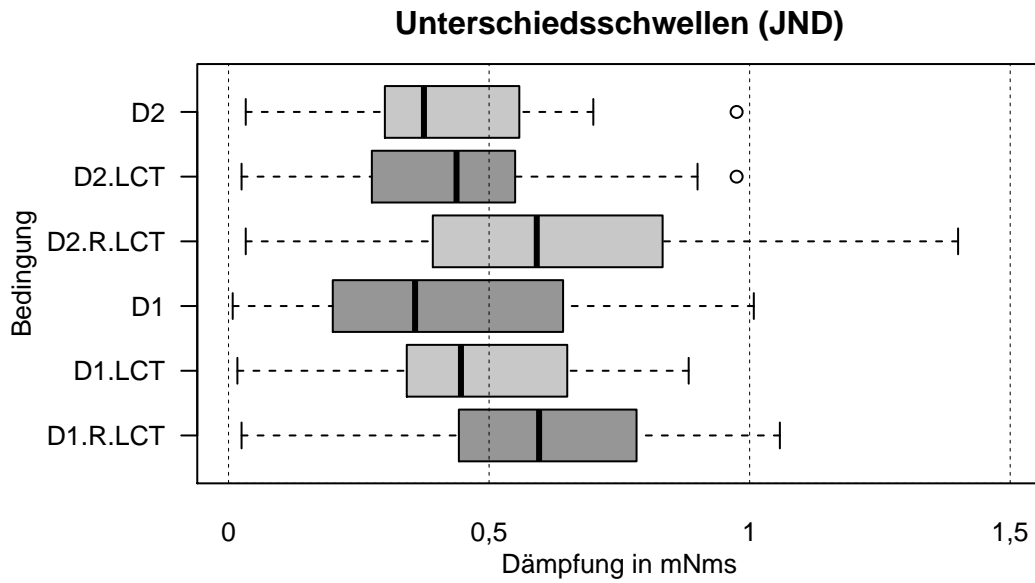


Abbildung 7.9: Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen (Dämpfung, Konstantreiz $R = 2$ mNms) unter den verschiedenen Versuchsbedingungen: D1/D2 – Knopfdurchmesser | R – mit Rastung, ansonsten ohne | LCT – mit Lane Change Test, ansonsten ohne

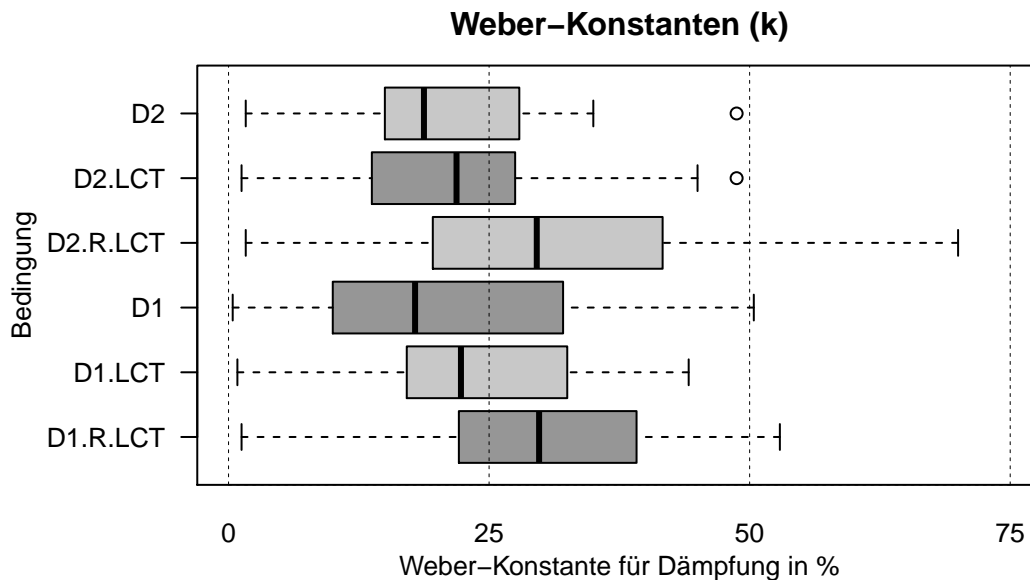


Abbildung 7.10: Boxplots der ermittelten Weber-Konstanten (Dämpfung, Konstantreiz $R = 2$ mNms) unter den verschiedenen Versuchsbedingungen: D1/D2 – Knopfdurchmesser | R – mit Rastung, ansonsten ohne | LCT – mit Lane Change Test, ansonsten ohne

Ausgewählte statistische Kennwerte der in Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10 dargestellten Ergebnisse sind Tabelle 7.13 zu entnehmen.

7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung*

Tabelle 7.13: Statistische Kennwerte der Unterschiedsschwellen bzw. Weber-Konstanten (Dämpfung, Konstantreiz $R = 2$ mNm) – Angaben in mNm

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
D2	0,033 1,65%	0,300 15,00%	0,375 18,75%	0,558 27,90%	0,975 48,75%	0,418 20,91%	0,219 10,96%
D2.LCT	0,025 1,25%	0,279 13,96%	0,438 21,88%	0,548 27,40%	0,975 48,75%	0,440 22,00%	0,233 11,63%
D2.R.LCT	0,033 1,65%	0,400 20,01%	0,592 29,58%	0,821 41,03%	1,400 70,00%	0,620 30,98%	0,347 17,36%
D1	0,008 0,40%	0,200 10,00%	0,358 17,90%	0,617 30,85%	1,008 50,40%	0,396 19,79%	0,279 13,95%
D1.LCT	0,017 0,85%	0,342 17,10%	0,446 22,30%	0,631 31,56%	0,883 44,15%	0,457 22,84%	0,214 10,72%
D1.R.LCT	0,025 1,25%	0,444 22,20%	0,596 29,80%	0,762 38,11%	1,058 52,90%	0,577 28,86%	0,291 14,57%

Um den Einfluss der Ablenkung durch den LCT auf die Unterschiedsschwellen zu bestimmen, werden die Differenzen der Unterschiedsschwellen für die Versuchsbedingungen mit und ohne LCT betrachtet, siehe Abbildung 7.11 und Tabelle 7.14.

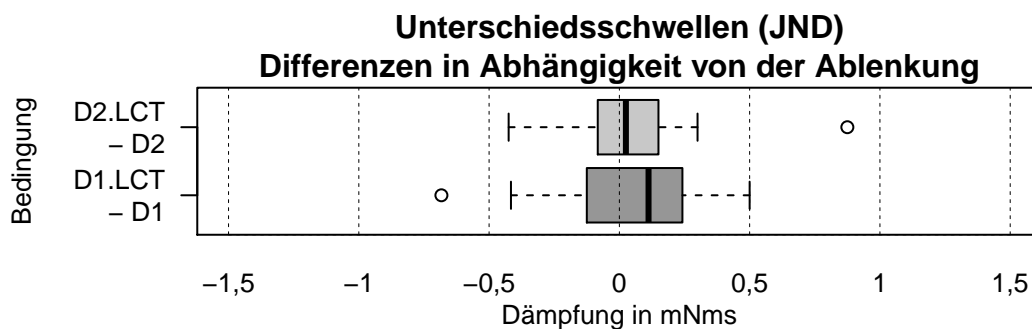


Abbildung 7.11: Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen (Dämpfung, Konstantreiz $R = 2$ mNm) für die zwei Knopfdurchmesser D_1 und D_2 in Abhängigkeit von der Ablenkung (mit/ohne LCT)

Tabelle 7.14: Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit von der Ablenkung (mit/ohne LCT) – alle Angaben in mNm

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
D2.LCT – D2	-0,425	-0,083	0,025	0,150	0,875	0,029	0,253
D1.LCT – D1	-0,683	-0,123	0,112	0,240	0,500	0,061	0,287

Wie zuvor bei den Wahrnehmungsschwellen, erweist sich der LCT bei der inferenzstatistischen Auswertung als nicht signifikant, siehe Tabelle 7.15. Für die Differenz des Knopfdurchmessers D_2 wird dabei der nichtparametrische Hypothesentest verwendet.

LCT nicht signifikant

Tabelle 7.15: Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit von der Ablenkung – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (<i>p</i> -Wert)	<i>t</i> -Test (<i>p</i> -Wert)	Wilcoxon-Test (<i>p</i> -Wert)
D2.LCT – D2	1,45 %	–	63,77 %
D1.LCT – D1	47,07 %	28,96 %	–

Knopfdurchmesser Der Einfluss des Knopfdurchmessers auf die Unterschiedsschwelle wird anhand der Differenzen der Unterschiedsschwellen für die Durchmesser D_1 und D_2 untersucht, siehe Abbildung 7.12 und Tabelle 7.16.

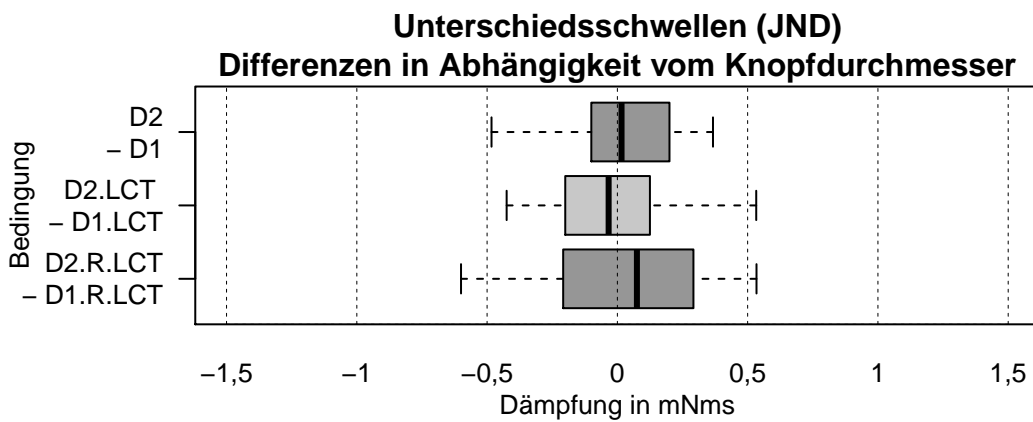


Abbildung 7.12: Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen (Dämpfung, Konstantreiz $R = 2$ mNms) für die Bedingungen mit/ohne LCT und mit/ohne Rastung (jeweils mit LCT) in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser (D_1 und D_2)

Tabelle 7.16: Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser – alle Angaben in mNms

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
D2 – D1	-0,483	-0,100	0,016	0,200	0,367	0,016	0,210
D2.LCT – D1.LCT	-0,425	-0,194	-0,034	0,121	0,533	-0,017	0,233
D2.R.LCT – D1.R.LCT	-0,600	-0,198	0,075	0,273	0,534	0,042	0,287

Knopfdurchmesser nicht signifikant Im Gegensatz zum Ergebnis bei den Wahrnehmungsschwellen ergibt die inferenzstatistische Auswertung, dass kein signifikanter Einfluss des Knopfdurchmessers auf die Unterschiedsschwellen besteht. Tabelle 7.17 zeigt das Ergebnis der inferenzstatistischen Betrachtung.

7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung*

Tabelle 7.17: Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit vom Knopfdurchmesser – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (<i>p</i> -Wert)	<i>t</i> -Test (<i>p</i> -Wert)	Wilcoxon-Test (<i>p</i> -Wert)
D2 – D1	69,37%	71,30%	-
D2.LCT – D1.LCT	91,92%	71,88%	-
D2.R.LCT – D1.R.LCT	68,19%	45,86%	-

Um den Einfluss der Rastung auf die Unterschiedsschwellen zu ermitteln, werden die Differenzen für die entsprechenden Versuchsbedingungen untersucht. Wie zuvor bei den Wahrnehmungsschwellen, tritt die Versuchsbedingung Rastung (R) nur in Verbindung mit erhöhter kognitiver Last (LCT) auf. Die Differenzen sind in Abbildung 7.13 und Tabelle 7.18 dargestellt.

Rastung

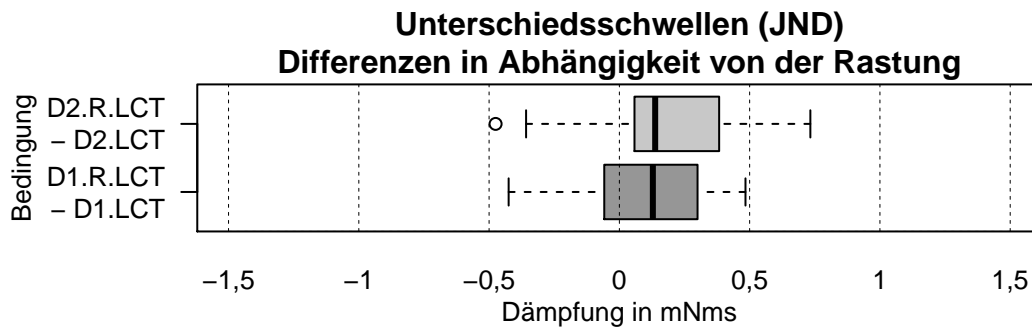


Abbildung 7.13: Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen (Dämpfung, Konstantreiz $R = 2$ mNm) für die zwei Knopfdurchmesser D_1 und D_2 in Abhängigkeit von der Rastung (jeweils mit LCT)

Tabelle 7.18: Statistische Kennwerte zu den Differenzen der Unterschiedsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit von der Rastung – alle Angaben in mNm

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
D2.R.LCT – D2.LCT	-0,475	0,058	0,138	0,362	0,733	0,180	0,296
D1.R.LCT – D1.LCT	-0,425	-0,031	0,129	0,288	0,484	0,121	0,227

Die Rastung hat – wie zuvor bei den Wahrnehmungsschwellen – einen signifikanten Einfluss auf die Unterschiedsschwellen. Das Ergebnis der inferenzstatistischen Auswertung ist Tabelle 7.19 zu entnehmen.

Rastung signifikant

Tabelle 7.19: Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen (Dämpfung) in Abhängigkeit von der Rastung – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (<i>p</i> -Wert)	<i>t</i> -Test (<i>p</i> -Wert)	Wilcoxon-Test (<i>p</i> -Wert)
D2.R.LCT – D2.LCT	33,93 %	0,48 %	-
D1.R.LCT – D1.LCT	67,84 %	1,21 %	-

7.1.5 Interpretation und Zusammenfassung

Nach einer kurzen Diskussion der gewählten Griffvarianten werden zunächst die Ergebnisse der inferenzstatistischen Auswertung besprochen. Danach erfolgt eine Betrachtung der ermittelten Schwellwerte unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer Autoren.

Fingeranzahl Wie zu erwarten, steigt die Anzahl der verwendeten Finger mit dem Knopfdurchmesser. Bei beiden verwendeten Durchmessern $D_1 = 20\text{ mm}$ und $D_2 = 36\text{ mm}$ nutzen mehr als 50 % der Probanden 3 Finger.

Signifikanzniveau Für die inferenzstatistische Auswertung wird – wie auf Seite 77 beschrieben – das Signifikanzniveau α zu 5 % gewählt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Hypothesentests ist in Tabelle 7.20 aufgeführt.

Tabelle 7.20: Zusammenfassung der inferenzstatistischen Auswertung (ohne Durchmesserungsverhältnisbetrachtung, siehe Text) mit entsprechenden Verweisen auf die Details. Das Signifikanzniveau α beträgt 5 %.

	signifikanter Einfluss	Tabelle	Verweis(e) Abbildung
Wahrnehmungsschwelle			
kognitive Last	nein	7.5 und 7.6	7.6
Knopfdurchmesser	ja	7.7 und 7.8	7.7
Rastung	ja	7.11 und 7.12	7.8
Unterschiedsschwelle			
kognitive Last	nein	7.14 und 7.15	7.11
Knopfdurchmesser	nein	7.16 und 7.17	7.12
Rastung	ja	7.18 und 7.19	7.13

LCT Für beide Schwellwertarten – Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwelle – gilt, dass die Belastung durch den LCT keinen “großen” Effekt⁴ auf die ermittelten Schwellwerte hat. Das spricht für eine gute Übertragbarkeit der unter Laborbedingungen ermittelten Schwellwerte auf die Praxis.

⁴ “großer” Effekt: $|\delta''| \approx 0,57$ (Standardabweichungen)

7.1 Ausgewählte Einflussfaktoren auf Schwellwerte bei rotatorischen Bedienelementen am Beispiel des Parameters *Dämpfung*

Der Knopfdurchmesser wirkt sich deutlich auf die ermittelten Wahrnehmungsschwellen aus. Die Wahrnehmungsschwelle verhält sich dabei proportional zum Durchmesser-Verhältnis, siehe Tabelle 7.9 und Tabelle 7.10. Allerdings weisen die Verhältnisse der Wahrnehmungsschwellen eine vergleichsweise hohe Variabilität auf. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass die zur Erzeugung des Drehmoments aufzubringende Tangentialkraft an den Fingerbeeren die maßgebliche Größe ist.

Knopfdurchmesser (*DT*)

Auf die ermittelten Unterschiedsschwellen hat der Knopfdurchmesser keinen "großen" Effekt. Dieses Ergebnis ist erwartungskonform mit dem Weber'schen Gesetz (5.2).

Knopfdurchmesser (*JND*)

Die in den Versuchen verwendete Rastung hat auf beide Schwellwertarten einen "großen" Effekt. Das deutet darauf hin, dass die Rastung einen Maskierungseffekt bezogen auf die Dämpfung hat. Verallgemeinert bedeutet das, dass das Vorhandensein einer Rastung die Sensibilität für den Parameter Dämpfung herabsetzt.

Rastung

Tabelle 7.21 zeigt eine Übersicht der ermittelten Schwellwerte. Als Streuungsmaß wird der Interquartilsabstand⁵

empirische Schwellwerte

$$IQR = Q_{0,75} - Q_{0,25} \quad (7.2)$$

angegeben. Im Gegensatz zur Standardabweichung ist der Interquartilsabstand robust gegenüber Ausreißern (BORTZ & SCHUSTER, 2010, S. 32).

Tabelle 7.21: Zusammenfassung der ermittelten Schwellwerte für den Parameter Dämpfung in Abhängigkeit von den verschiedenen Versuchsbedingungen. Für alle Versuchsbedingungen gilt ein Massenträgheitsmoment von $J_{\text{ist}} = 28 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$ und ein Betrag für die Coloumb'sche Gleitreibung von $|M_{\text{Reib}}| = 3\text{-}5 \text{ mNm}$. Für die Knopfdurchmesser gilt $D_1 = 20 \text{ mm}$ und $D_2 = 36 \text{ mm}$.

	Median	IQR $Q_{0,75} - Q_{0,25}$	Verweis Tabelle	Verweis Abbildung
Wahrnehmungsschwelle - Angaben in mNms				
D2	0,235	0,215	7.4	7.5
D2.LCT	0,298	0,278	7.4	7.5
D2.R.LCT	0,540	0,316	7.4	7.5
D1	0,105	0,118	7.4	7.5
D1.LCT	0,135	0,155	7.4	7.5
D1.R.LCT	0,355	0,240	7.4	7.5
Unterschiedsschwelle - Angaben in % (Weber-Konstante), Konstantreiz $R = 2 \text{ mNms}$				
D2	18,75	12,90	7.13	7.10
D2.LCT	21,88	13,44	7.13	7.10
D2.R.LCT	29,58	21,01	7.13	7.10
D1	17,90	20,85	7.13	7.10
D1.LCT	22,30	14,46	7.13	7.10
D1.R.LCT	29,80	15,91	7.13	7.10

⁵ engl. *interquartile range*, auch *Interquartilbereich* genannt

Wahrnehmungsschwelle Die empirisch ermittelten Wahrnehmungsschwellen für Dämpfung reichen je nach Versuchsbedingung von $DT_{\min} = DT_{D1} = 0,105 \text{ mNms}$ bis $DT_{\max} = DT_{D2.R.LCT} = 0,540 \text{ mNms}$. Dabei deutet die inferenzstatistische Analyse darauf hin, dass letztendlich die Tangentialkraft an den Fingerbeeren die entscheidende Größe ist. Das heißt, dass die Wahrnehmungsschwelle mit dem Durchmesser skaliert.

Unterschiedsschwelle Die Unterschiedsschwellen unterscheiden sich nur bei den Versuchsbedingungen mit und ohne Rastung. Für die Versuchsbedingungen ohne Rastung beträgt die Weber-Konstante ungefähr 20%. Bei Überlagerung durch die im Experiment verwendete Rastung erhöht sich die Weber-Konstante k auf rund 30%.

7.2 Konstanzleistung bei der Betätigung translatorischer Bedienelemente

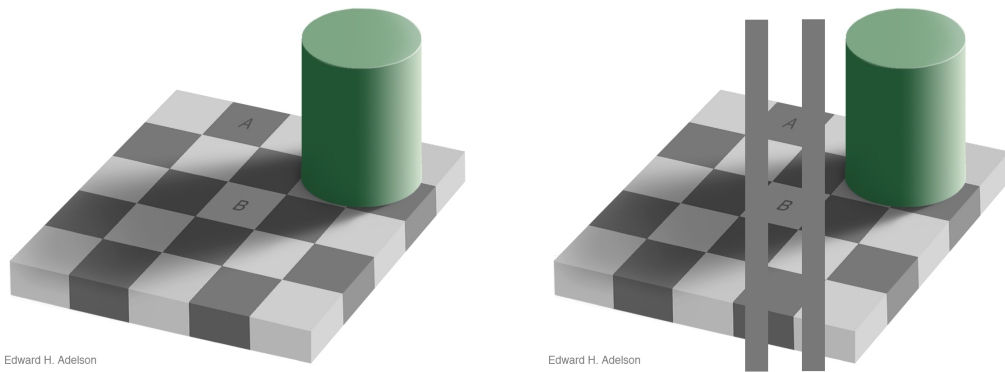
Untersuchungen zur Ermittlung von Schwellwerten für Bedienelemente werden in der Regel für eine bestimmte Einbausituation durchgeführt (z. B. TAN, YANG, PIZLO, BUTTOLO & JOHNSTON, 2008; DOERRER, 2004, Kapitel 5). Das Ziel dieser Untersuchung ist es, abzuschätzen, ob die Ergebnisse auf andere Einbausituationen übertragbar sind.

Beispiel Vergleicht man die erforderlichen Kräfte beim Betätigen desselben Bedienelements in unterschiedlichen Einbaulagen, so ist beispielsweise bei einer vertikalen Anordnung – also überkopf – im Vergleich zu einer horizontalen Anordnung – also frontal – ein höherer Kraftaufwand nötig, da in vertikaler Einbaulage der Arm mit angehoben werden muss.

Konstanzleistung Wenn der Wahrnehmungsapparat in der Lage ist, die tatsächlichen Objekteigenschaften – hier die Betätigungscharakteristik des Bedienelements – trotz sich ändernder physikalisch objektiver Bedingungen als konstant zu erkennen, so spricht man von einer sogenannten Konstanzleistung (SCHMIDTKE, 1993, S. 70–71; BUBB, 2001, S. 158; HAGENDORF u. a., 2011, S. 18–19). Bekannt sind vor allem Konstanzleistungen aus dem Bereich des Sehens. Exemplarisch seien dabei die

- Größen-,
- Farb-,
- Helligkeits- und
- Formkonstanz

Beispiel genannt. Eindrucksvoll wird das Phänomen der Helligkeitskonstanz in Abbildung 7.14a anhand einer Täuschung von ADELSON (1995) demonstriert: Die Felder A und B weisen physikalisch dieselbe Helligkeit auf – trotzdem wirkt Feld A deutlich dunkler. Das liegt daran, dass das Wahrnehmungssystem neben der reinen Leuchtdichte noch weitere Faktoren wie zum Beispiel Schattenwurf und das Kontrastverhältnis in die Helligkeitsbeurteilung mit einbezieht. In Abbildung 7.14b wird die Illusion aufgehoben.



(a) Illusion zur Helligkeitskonstanz – Originaldarstellung

(b) Illusion zur Helligkeitskonstanz – Auflösung

Abbildung 7.14: Illusion zur Helligkeitskonstanz von Adelson (1995) – Felder A und B haben den gleichen Grauton, aber Feld A erscheint dunkler (a). In (b) wird die Illusion durch zwei Balken mit dem gleichen Grauton – zumindest teilweise – aufgehoben. Eine Erklärung für die Illusion findet sich unter <http://persci.mit.edu/gallery/checkershadow/description>. Quelle: <http://persci.mit.edu/gallery/checkershadow> (Zugriff am 09.10.2012)

7.2.1 Untersuchungsziele

Für rotatorische Bedienelemente hat REISINGER (2008) bereits eine Untersuchung für zwei Einbausituationen – frontal und überkopf – durchgeführt. Die Ergebnisse deuten auf das Vorhandensein der sogenannten haptischen Konstanzleistung hin, siehe auch REISINGER (2009, S. 216).

rotatorische
Bedienelemente

Hauptziel dieses Experiments ist es, analog zu REISINGER (2008), die Konstanzleistung für translatorische Bedienelemente zu untersuchen. Dies ist im Vergleich zu REISINGER (2008) der allgemeinere Fall, da bei translatorischen Bedienelementen – im Fall einer Überkopfbedienung – die Betätigungsrichtung und die Schwerkraftrichtung parallel verlaufen. Am Erreichen und an der Betätigung des Bedienelements sind somit die gleichen Muskeln beteiligt.

translatorische
Bedienelemente

Die Hypothese lautete dabei, dass sich bei Vorhandensein einer haptischen Konstanzleistung, die Unterschiedsschwellen für die Betätigungskraft für dieselbe (horizontal, H) und zwei verschiedene (horizontal/vertikal, H/V) Einbaulagen nicht unterscheiden. Ansonsten würde sich ein Bedienelement in der Überkopfposition bei gleichem Kraft-Weg-Verlauf im Vergleich mit einem Bedienelement in horizontaler Einbaulage schwerer (einseitige Hypothese) oder unterschiedlich (zweiseitige Hypothese) anfühlen.

Hypothese

Zusätzlich wird untersucht, ob sich das Wissen über das Untersuchungsziel auf das Ergebnis auswirkt. Dies wird erreicht, indem die Probanden nicht gleich zu Beginn, sondern erst nach dem ersten von drei Teilen des Experiments über das Untersuchungsziel aufgeklärt werden.

Aufklärung
über das
Untersuchungs-
ziel

7.2.2 Versuchsaufbau

Die Probanden führen den Versuch in einer Sitzkiste mit zwei translatorischen Haptiksimulatoren durch, siehe Abbildung 7.15. Die Sitzkiste bildet die Situation in einem Kraftfahrzeug nach. Einer der beiden Simulatoren befindet sich in der horizontalen Einbaulage – der zweite Simulator befindet sich in der vertikalen Einbaulage.



(a) Betätigung in horizontaler Einbaulage (H)



(b) Betätigung in vertikaler Einbaulage (V)

Abbildung 7.15: Die Betätigung erfolgt entweder in horizontaler (a) oder vertikaler (b) Einbaulage. In der horizontalen Einbaulage (a) haben die Probanden die Möglichkeit, die rechte Hand auf dem rechten Knie abzustützen. Die Sitzkiste bildet die Situation in einem Kraftfahrzeug nach (Amateurbrett und Dachhimmel).

Haptik-simulator Bei den beiden translatorischen Haptiksimulatoren handelt es sich um modifizierte Tauchspulen- beziehungsweise Doppelmembran-Lautsprecher-Systeme der Firma EHMANN & PARTNER GMBH⁶, die um einen Kraft- und Wegsensor erweitert wurden, siehe Abbildung 7.16. Eine detaillierte Beschreibung des Simulators findet sich in FECHLER (2012). Die Ansteuerung erfolgt prinzipiell gemäß dem in Kapitel 6.4.2 beschriebenen Ansatz⁷, für Details siehe JANKE (2010a, 2010b). Die für den Probanden wirksame Masse beträgt ungefähr 300 g.

⁶ EHMANN & PARTNER GmbH, Bernbrunner Str. 54, D-74831 Gundelsheim-Höchstberg, <http://www.ehmann-partner.de>

⁷ Der Ansatz wurde allerdings noch um einen proportional wirkenden Kraftregler erweitert.

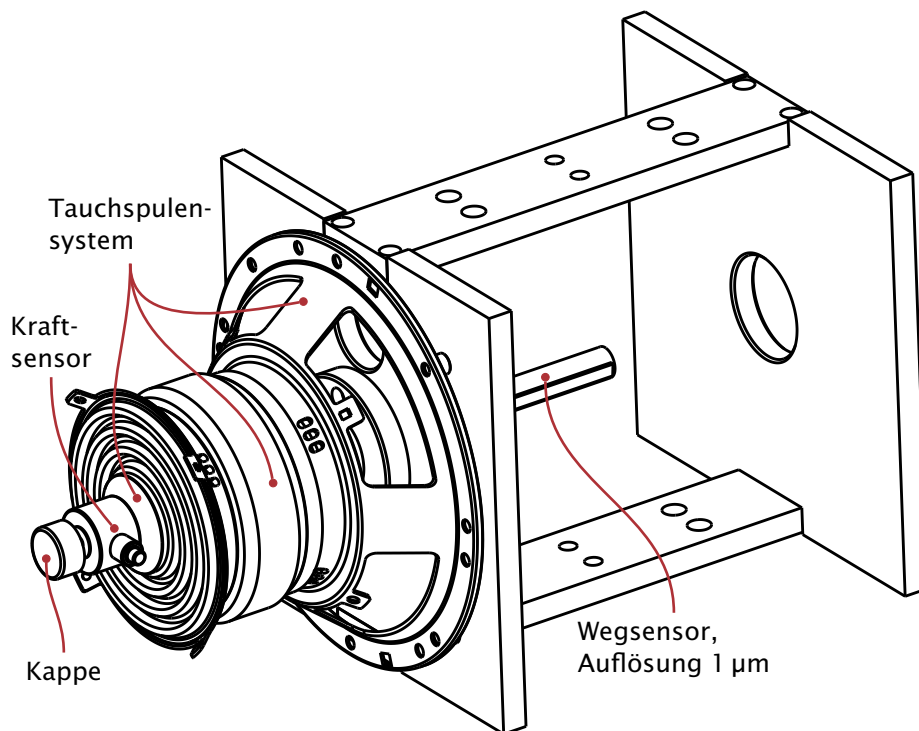
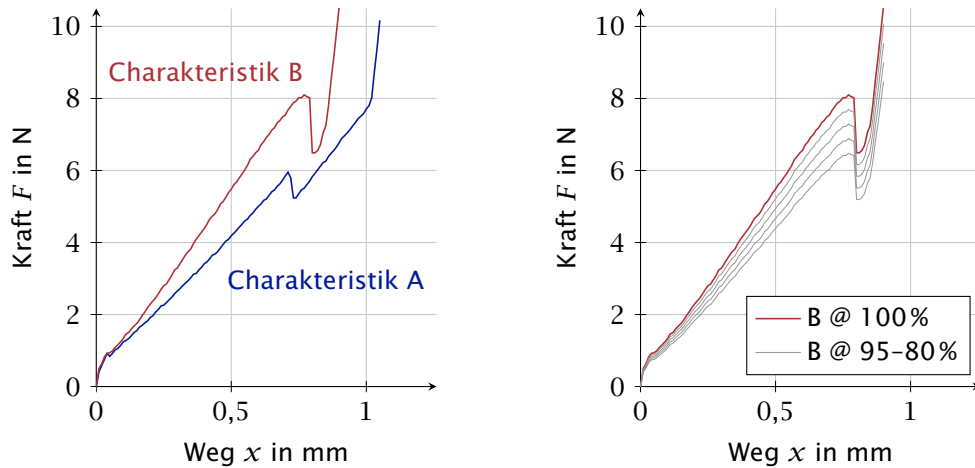


Abbildung 7.16: Schematische Darstellung des translatorischen Haptiksimulators

Das System ist in der Lage frei programmierbare quasi-statische Kraft-Weg-Verläufe wiederzugeben. Die Verifikation erfolgt dabei mit dem bereits in Kapitel 6.5 erwähnten Haptik-Prüfstand.

7.2.3 Versuchsdesign und verwendete Methode zur Schwellwertbestimmung

Für die Untersuchung werden zwei Kraft-Weg-Verläufe verwendet, die auf der Vermessung realer Bedienelemente basieren. Diese werden im Folgenden Charakteristik A und B genannt, siehe Abbildung 7.17a. Der Schwellpunkt liegen dabei subjektiv auf einem "mittleren" (A) beziehungsweise "hohen" (B) Kraftniveau.



(a) Kraft-Weg-Verläufe der Charakteristiken A und B

(b) Skalierung der Kraft-Weg-Verläufe am Beispiel von Charakteristik B

Abbildung 7.17: Messungen der für die Untersuchungen verwendeten Kraft-Weg-Verläufe (a) und Veranschaulichung der Skalierung am Beispiel der Charakteristik B (b). Es ist jeweils nur der Hinweg dargestellt – der Rückweg hat aufgrund der Reibungshysterese ein um etwa 1 N reduziertes Kraftniveau.

Im Verlauf der Experimente erfolgt eine Skalierung der Kraft-Weg-Verläufe in 5%-Schritten, siehe Abbildung 7.17b.

Der Versuch mit einer Gesamtdauer von circa 30 min gliedert sich in drei Teile beziehungsweise Bedingungen:

Bedingung H/V(I) Unterschiedsschwellerermittlung für zwei Einbausituationen (horizontal/vertikal, H/V). Dabei wird das Kraftniveau für die vertikale Einbaulage variiert – die Skalierung für die horizontale Einbaulage liegt bei konstant 100%. Der Proband ist noch nicht über das Untersuchungsziel informiert. Es wird lediglich gefragt, ob sich die Bedienelemente gleich anfühlen.

Bedingung H Unterschiedsschwellerermittlung für die horizontale Einbausituation (H) – der Proband wird zuvor über das Untersuchungsziel informiert.

Bedingung H/V(II) Erneute Ermittlung der Unterschiedsschwellen für zwei Einbausituationen, siehe Bedingung H/V(I). Der Proband ist jetzt über das Untersuchungsziel informiert.

Kurzschreibweise Im Folgenden werden die drei Bedingungen durch die Kurzschreibweise H/V(I), H und H/V(II) unterschieden. Jede Bedingung wurde mit beiden Charakteristiken – A und B – durchgeführt, somit ergeben sich insgesamt sechs Kombinationen:

- H/V(I).A und H/V(I).B
- H.A und H.B
- H/V(II).A und H/V(II).B

Rauschen über Kopfhörer Die translatorischen Haptiksimitatoren arbeiten nicht geräuschlos – um eine Beein-

flussung der Probanden durch die Geräuschemissionen auszuschließen, bekommen sie über Kopfhörer ein Rauschen vorgespielt.

Des Weiteren gelten für die Probanden folgende Vorgaben:

- Für die Experimente wird stets der Zeigefinger der rechten Hand verwendet.
- Bei der Betätigung in horizontaler Einbaulage dürfen die Probanden ihre Hand auf dem rechten Knie abstützen – von dieser Möglichkeit machen alle Probanden Gebrauch.
- Nach maximal vier Vergleichen müssen sich die Probanden für “gleich” oder “ungleich” entscheiden – im Zweifelsfall für “gleich”.

Die Reihenfolge der Charakteristiken A und B innerhalb der drei Versuchsbedingungen H/V(I), H und H/V(II) ist randomisiert.

Transfer-
effekte mini-
mieren

Zur Schwellwertbestimmung kommt – wie beim Experiment zuvor – das Simple-Staircase-Verfahren in Kombination mit dem Ja/Nein-Paradigma zum Einsatz, siehe Kapitel 5. Die Schwellwerte werden durch Mittelung an sechs Umkehrpunkten berechnet. Die Annäherung an den Konstantreiz (Skalierung 100%) erfolgt von unten.

Verfahren zur
Schwellwertbe-
stimmung

Die Parameter für das Staircase-Verfahren sind für alle Versuchsbedingungen identisch und wurden mithilfe eines Vorversuchs bestimmt. Der Startwert x_0 liegt bei einer Skalierung von 60% und die Anpassung des Kraftniveaus erfolgt in 5%-Schritten, siehe Abbildung 7.17b. Der Konstantreiz R entspricht dabei einer Skalierung von 100%.

Parameter in
Vorversuch
ermittelt

7.2.4 Statistische Auswertung

Es folgt die Beschreibung des Probandenkollektivs und anschließend die statistische Auswertung in deskriptiver und inferenzstatistischer Form. Der Stichprobenumfang beträgt $n = 21$. Dadurch ergibt sich das Signifikanzniveau $\alpha_{n=21}$ für dieses Experiment zu 9%, siehe auch Abbildung 7.1 und Abbildung A.21 in Anhang A.3.2.

Signifikanz-
niveau

7.2.4.1 Probandenkollektiv

Bei der Stichprobe handelt es sich – wie beim ersten Experiment in Kapitel 7.1 – um eine Klumpenstichprobe, wobei die Probanden wieder vornehmlich aus dem Hochschulumfeld stammen. Ausgewählte statistische Kennwerte der 21 Probanden sind Tabelle 7.22 zu entnehmen.

Stichprobenart

Tabelle 7.22: Statistische Kennwerte des Probandenkollektivs (Stichprobenumfang $n = 21$)

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Alter in Jahren	17	24	25	28	30	25,4	4,5
Geschlecht	19% weiblich bzw. 81% männlich						
Händigkeit	90% rechts bzw. 10% links						

7.2.4.2 Versuchsergebnisse

Die ermittelten Unterschiedsschwellen für die sechs Einzelerperimente lassen sich in unterschiedlicher Form gruppieren. In Abbildung 7.18 sind die Schwellwerte nach den drei Versuchsbedingungen H/V(I), H und H/V(II) gruppiert. Abbildung 7.19 zeigt eine Gruppierung nach den zwei verwendeten Kraft-Weg-Verlaufs-Charakteristiken A und B.

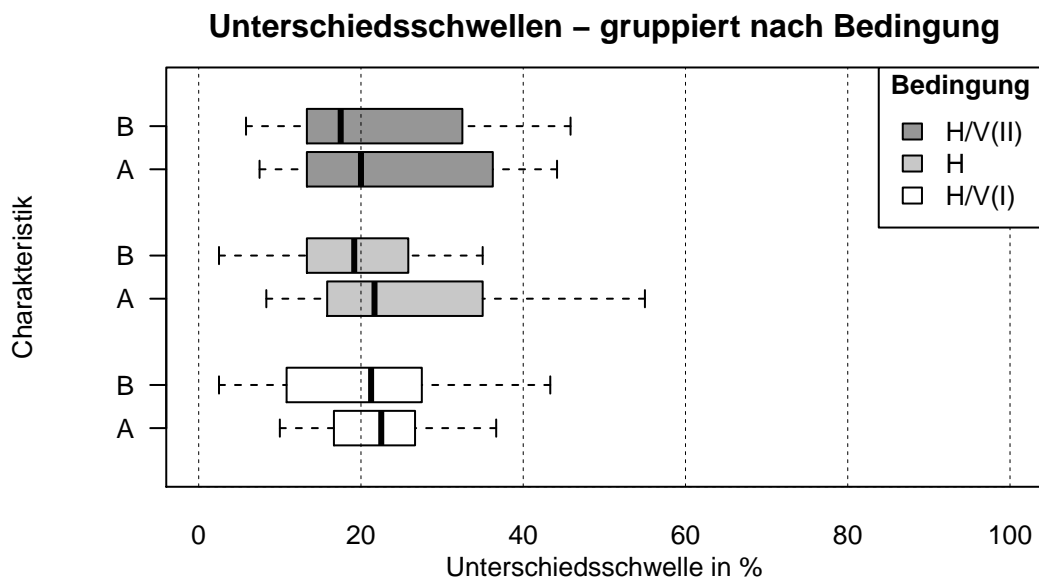


Abbildung 7.18: Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen – gruppiert nach der Versuchsbedingung

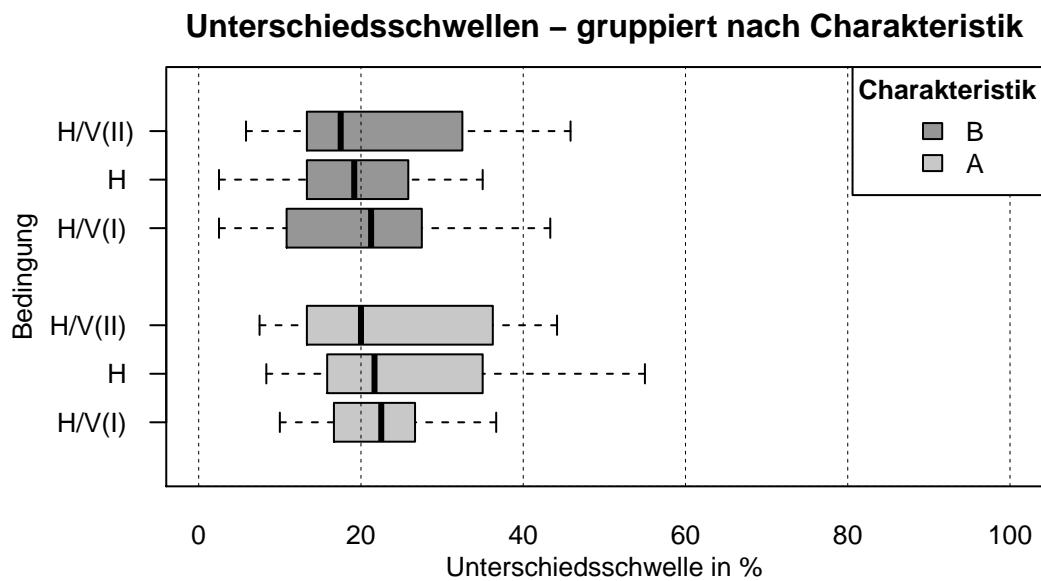


Abbildung 7.19: Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen – gruppiert nach der Charakteristik des Kraft-Weg-Verlaufs

Die statistischen Kennwerte der ermittelten Unterschiedsschwellen sind in Tabelle 7.23 zusammengefasst. Die Anordnung der Werte in der Tabelle entspricht der Anordnung der Boxplots in Abbildung 7.19.

Tabelle 7.23: Statistische Kennwerte der ermittelten Unterschiedsschwellen – der Konstantreiz R entspricht einer Kraftskalierung von 100%, siehe Abbildung 7.17b.

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Charakteristik B							
H/V(II)	5,83	13,33	17,50	32,50	45,83	21,93	11,81
H	2,50	13,33	19,17	25,83	35,00	20,12	9,07
H/V(I)	2,50	11,25	21,25	27,08	43,33	20,29	10,68
Charakteristik A							
H/V(II)	7,50	13,33	20,00	36,25	44,17	23,37	11,73
H	8,33	15,83	21,67	35,00	55,00	25,00	12,23
H/V(I)	10,00	17,50	22,50	25,83	36,67	22,67	7,59

Zur Untersuchung des Einflusses der Einbaulage werden die Differenzen der entsprechenden Unterschiedsschwellen statistisch ausgewertet, siehe Abbildung 7.20 und Tabelle 7.24. Einbaulage

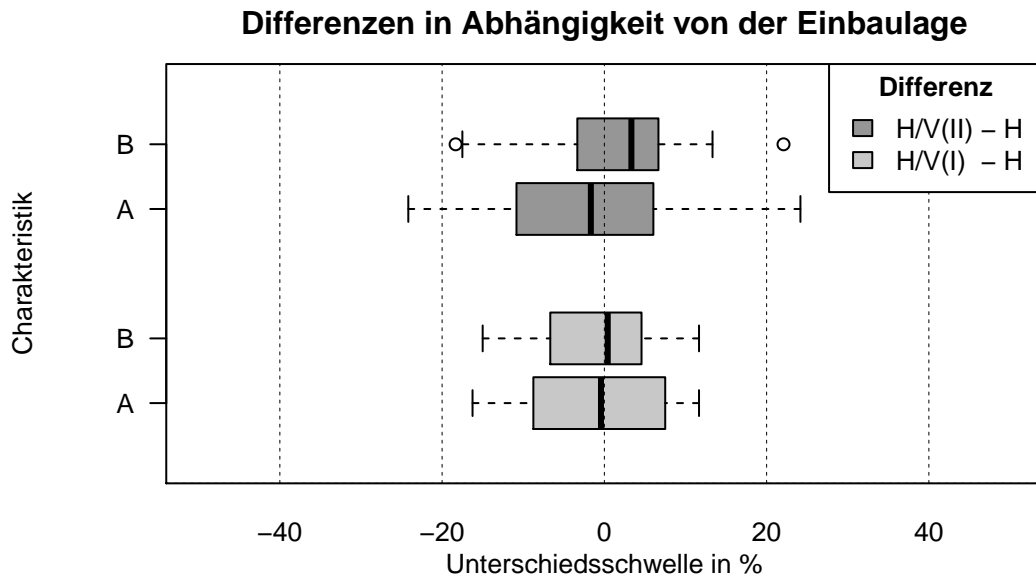


Abbildung 7.20: Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Einbaulage

Tabelle 7.24: Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Einbaulage

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Differenz H/V(II) – H							
B	-18,33	-3,33	3,33	6,67	22,08	1,82	9,67
A	-24,17	-10,83	-1,67	6,04	24,18	-1,63	12,97
Differenz H/V(I) – H							
B	-15,00	-6,67	0,42	4,38	11,67	-0,29	7,23
A	-16,25	-8,13	-0,42	7,08	11,67	-0,83	8,95

Einbaulage nicht signifikant

Um zu entscheiden, ob sich die Differenzen signifikant von null unterscheiden, werden sie inferenzstatistisch ausgewertet. Tabelle 7.25 zeigt die Ergebnisse der inferenzstatistischen Untersuchung. Dabei zeigt sich, dass die Einbaulage keinen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Unterschiedsschwellen hat.

Wie im Experiment zuvor, wird entweder ein parametrischer t -Test oder ein nichtparametrischer Wilcoxon-Test zur statistische Analyse herangezogen. Die Wahl erfolgt in Abhängigkeit von dem Ergebnis eines Tests auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test, $\alpha = 5\%$).

Tabelle 7.25: Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Einbaulage – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (p-Wert)	t-Test (p-Wert)	Wilcoxon-Test (p-Wert)
Differenz H/V(II) – H			
B	66,61 %	39,96 %	-
A	85,07 %	57,03 %	-
Differenz H/V(I) – H			
B	75,16 %	85,87 %	-
A	16,59 %	68,17 %	-

Die Ermittlung der Unterschiedsschwellen für die H/V-Bedienung erfolgte zweimal: einmal ohne Aufklärung über das Untersuchungsziel und einmal mit. Um zu überprüfen, ob die Aufklärung einen Einfluss auf die Unterschiedsschwelle hat, werden die entsprechenden Differenzen betrachtet. Abbildung 7.21 und Tabelle 7.26 zeigen die Differenzen in deskriptiver Form.

Aufklärung
über das Un-
tersuchungs-
ziel

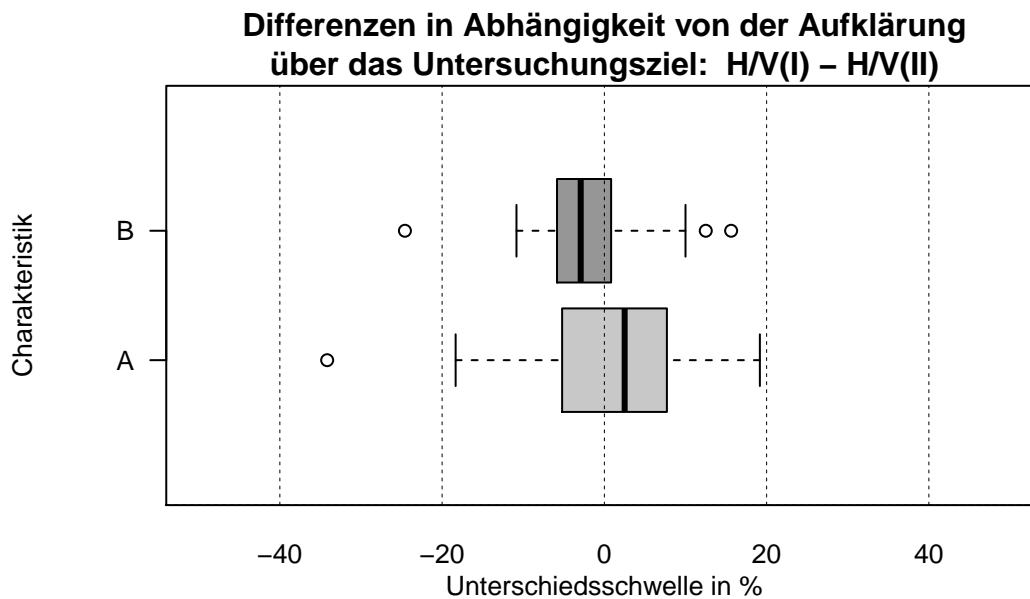


Abbildung 7.21: Boxplots der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Aufklärung über das Untersuchungsziel

Tabelle 7.26: Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Aufklärung über das Untersuchungsziel

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Differenz H/V(I) – H/V(II)							
B	-24,58	-5,83	-2,92	0,42	15,63	-2,16	8,92
A	-34,17	-5,10	2,50	7,40	19,17	0,01	12,02

Aufklärung
nicht si-
gnifikant

Die inferenzstatistische Auswertung der Differenzen ergibt, dass sich die Aufklärung über das Untersuchungsziel nicht signifikant auf die Schwellwerte auswirkt. Tabelle 7.27 zeigt die Ergebnisse der Hypothesentests.

Tabelle 7.27: Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Aufklärung über das Untersuchungsziel – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (<i>p</i> -Wert)	<i>t</i> -Test (<i>p</i> -Wert)	Wilcoxon-Test (<i>p</i> -Wert)
Differenz H/V(I) – H/V(II)			
B	21,45 %	29,32 %	-
A	12,13 %	99,82 %	-

7.2.5 Interpretation und Zusammenfassung

Signifikanz-
niveau

Für die inferenzstatistische Auswertung wird – wie auf Seite 95 beschrieben – das Signifikanzniveau α zu 9% gewählt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Hypothesentests ist in Tabelle 7.28 aufgeführt.

Tabelle 7.28: Zusammenfassung der interferenzstatistischen Auswertung mit entsprechenden Verweisen auf die Details. Das Signifikanzniveau α beträgt 9%.

	signifikanter Einfluss	Tabelle	Verweis(e) Abbildung
Einbaulage (gilt für Bedingung H/V(I) und H/V(II))			
Charakteristik B	nein	7.24 und 7.25	7.20
Charakteristik A	nein	7.24 und 7.25	7.20
Aufklärung über das Untersuchungsziel			
Charakteristik B	nein	7.26 und 7.27	7.21
Charakteristik A	nein	7.26 und 7.27	7.21

Die ermittelten Unterschiedsschwellen weisen keine signifikante Abhängigkeit von der Einbaulage auf. Das deutet darauf hin, dass die Probanden in der Lage sind, die

eigentliche Objekteigenschaft Kraft-Weg-Charakteristik des Bedienelements von der zusätzlichen Belastung bei der Überkopf-Betätigung zu trennen.

Die Ergebnisse sprechen insgesamt dafür, dass unser Organismus auch bei der haptischen Wahrnehmung von Bedienelementen die Fähigkeit zur Konstanzleistung hat. Somit sind Schwellwerte, die für eine bestimmte Einbaulage ermittelt werden, allgemein auch auf andere Einbaulagen übertragbar.

Konstanzleistung

Die Übertragbarkeit der Schwellwerte auf andere Einbaulagen ist aber nicht mit einer Übertragbarkeit des Komfortempfindens gleichzusetzen (REISINGER, 2009, S. 216). So legen Fahrzeughersteller erfahrungsgemäß Taster im Dachhimmel etwas schwächer aus (REISINGER, 2008, S. 44).

Schwellwert ≠ Komfort

Ob die Probanden über das Untersuchungsziel informiert waren oder nicht, hat keinen "großen" Einfluss auf die ermittelten Schwellwerte. Dieses Ergebnis deckt sich ebenfalls mit den Ausführungen zur Konstanzleistung.

Der Median aller ermittelten Unterschiedsschwellen ergibt sich zu rund 21%. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 7.29

Tabelle 7.29: Zusammenfassung der ermittelten Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von den verschiedenen Versuchsbedingungen.

	Median	IQR <i>Q_{0,75} – Q_{0,25}</i>	Verweis(e)	
			Tabelle	Abbildung
Charakteristik B				
H/V(II)	17,50	19,17	7.23	7.18 und 7.19
H	19,17	12,50	7.23	7.18 und 7.19
H/V(I)	21,25	15,83	7.23	7.18 und 7.19
Charakteristik A				
H/V(II)	20,00	22,92	7.23	7.18 und 7.19
H	21,67	19,17	7.23	7.18 und 7.19
H/V(I)	22,50	8,33	7.23	7.18 und 7.19
Zusammenfassung aller Werte				
alle	21,46	16,67	–	–

7.3 Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter *Massenträgheit, Dämpfung und Reibung*

Bei Experimenten zur Bestimmung der Schwellwerte für mechanische Parameter wird der jeweilige Parameter üblicherweise ohne Variation der verbleibenden Parameter untersucht. Das heißt, dass beispielsweise bei einem Experiment zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle für den Parameter viskose Reibung, der Einfluss der Parameter Coloumb'sche Reibung und Massenträgheitsmoment (Rotation) beziehungsweise Masse (Translation) auf die Schwellwerte nicht systematisch untersucht wird.

Beispiele, mit Angabe der Probandenzahl n , für isolierte Unterschiedsschwellermittlungen für die mechanischen Parameter Massenträgheit, viskose und Coloumb'sche Reibung sowie Steifigkeit (Federkonstante) sind BEAUREGARD u. a. (1995, $n = 3$); JONES und HUNTER (1993, $n = 11$); TAN u. a. (1994, $n = 3$); BERGMANN TIEST u. a. (2010, $n = 8$) sowie KNOWLES und SHERIDAN (1966, Trägheit: $n = 12$, Reibung: $n = 3-4$). Dabei betrachten lediglich KNOWLES und SHERIDAN (1966) typische Bedienelemente. In BERGMANN TIEST u. a. (2010) etwa geht es um den Parameter viskose Reibung bei viskosen Flüssigkeiten.

Mit der Unterschiedsschwelle für den Parameter Massenträgheitsmoment bei rotatorischen Bedienelementen befasst sich nach Kenntnisstand des Autors nur die oben erwähnte Arbeit von KNOWLES und SHERIDAN (1966). In der Arbeit wird auch die Unterschiedsschwelle separat für den Parameter Coloumb'sche Reibung ermittelt. Der verwendete Knopfdurchmesser beträgt rund 32 mm (1,25 Zoll).

Werte für J
und M_{Reib}
zu hoch

Allerdings liegen die verwendeten Werte für das Massenträgheitsmoment und die Coloumb'sche Reibung weit oberhalb des für Bedienelemente dieser Größe sinnvollen Bereichs und belaufen sich auf $[7,3 \quad 14,6 \quad 35 \quad 113,9] \times 10^{-3} \text{oz}_F \text{ in s}^2$ (Kraft-Unze Zoll Quadratsekunde) für das Massenträgheitsmoment und $[1 \quad 2,7 \quad 10] \text{oz}_F \text{ in}$ (Kraft-Unze Zoll) für die Coloumb'sche Reibung. In das metrische System übertragen ergibt sich $[52 \quad 103 \quad 247 \quad 805] \times 10^{-6} \text{kgm}^2$ für das Massenträgheitsmoment und $[7 \quad 19 \quad 71] \text{mNm}$ für die Coloumb'sche Reibung (Details zur Umrechnung sind Anhang A.3.3.1 zu entnehmen). Wie im weiteren Verlauf gezeigt wird, sind diese Werte aus praktischer Sicht deutlich zu hoch.

Maskierungs-
effekt

Dem Autor ist nur eine Arbeit bekannt, in der der Einfluss anderer Parameter auf die Unterschiedsschwelle eines bestimmten Parameters untersucht wird. RANK u. a. (2012, $n = 8$) untersuchen den Einfluss der Parameter Masse und Steifigkeit (Federkonstante) auf die Unterschiedsschwelle für den Parameter viskose Reibung. Dabei zeigt sich, dass sich sowohl der Parameter Masse als auch der Parameter Steifigkeit auf die ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter viskose Reibung auswirken: Mit höherer Masse oder Steifigkeit steigt auch die Unterschiedsschwelle für viskose Reibung - es tritt ein sogenannter Maskierungseffekt auf.

7.3.1 Untersuchungsziele

Das Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung der Unterschiedsschwellen – unter Ermittlung der gegenseitigen Einflussnahme (Maskierungseffekte) – für die mechanischen Parameter J , d und M_{Reib}

- Massenträgheitsmoment J ,
- viskose Reibung d (kurz Dämpfung) und
- Coloumb'sche Reibung M_{Reib} (kurz Reibung).

Die Parameter werden dabei – soweit technisch möglich – in einem für rotatorische Bedienelemente im automobilen Umfeld sinnvollen Bereich variiert.

7.3.2 Versuchsaufbau

Für den Versuch kommt die bereits in Kapitel 7.1.2 beschriebene Sitzbox zum Einsatz. Als haptisches Display wird Variante 2 des in Kapitel 6.3 beschriebenen rotatorischen Haptiksimmers verwendet, siehe auch Abbildung 7.22. Die Ansteuerung erfolgt gemäß dem in Kapitel 6.4.3 beschriebenen Ansatz.

Der Knopfdurchmesser D hat bleibt für alle Experimente konstant und beträgt 36 mm – ein in der Praxis üblicher Wert. Der Knopf hat eine Höhe h von 20 mm und ist wie zuvor aus Aluminium gefertigt und mit einer griffigen Rändelung versehen.

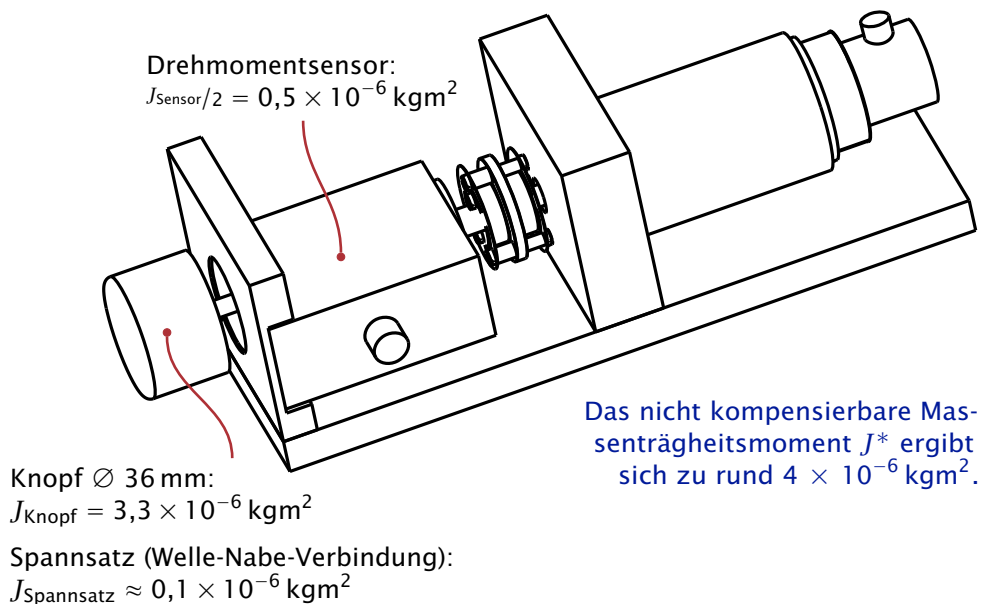


Abbildung 7.22: Schematische Darstellung des rotatorischen Haptiksimmers mit Augenmerk auf das nicht kompensierbare Massenträgheitsmoment $J^* = J_{\text{Sensor}/2} + J_{\text{Knopf}} + J_{\text{Spannsatz}}$

J^* Das sich bei Variante 2 ergebende nicht kompensierbare Massenträgheitsmoment J^* beträgt, wie in Abbildung 7.22 näher erläutert, rund $4 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$.

7.3.3 Versuchsdesign und verwendete Methode zur Schwellwertbestimmung

S, M und L Für die zwei Parameter Massenträgheitsmoment J und Reibung M_{Reib} werden je drei Ausprägungen definiert: eine "niedrige", "mittlere" und eine "hohe" Ausprägung. Diese Werte werden entsprechend mit S ("small"), M ("medium") und L ("large") gekennzeichnet. Um die Gesamtzahl der Experimente zu begrenzen, werden für den Parameter Dämpfung lediglich zwei Werte - S ("small") und M ("medium") - festgelegt.

33 Experimente Eine Unterschiedsschwellermittlung erfolgt für den jeweiligen Parameter, wenn er in der Ausprägung M ("medium") oder L ("large") auftritt. Die Ausprägung S ("small") ist als Konstantreiz zu gering. Dadurch ergeben sich insgesamt 33 Unterschiedsschwellen-Experimente. Die konkreten Werte für die drei Ausprägungen der drei Parameter sind Tabelle 7.30 zu entnehmen.

Tabelle 7.30: Ausprägungen S, M und L für die drei Parameter Massenträgheitsmoment J , Dämpfung d und Reibung M_{Reib} . Beim Massenträgheitsmoment addiert sich jeweils das nicht kompensierbare Massenträgheitsmoment $J^* = 4 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$.

	$\frac{J}{10^{-6} \times \text{kgm}^2}$	$\frac{d}{\text{mNms}}$	$\frac{M_{\text{Reib}}}{\text{mNm}}$
S	5+4	0,01	0,5
M	25+4	1	5
L	60+4	-	10

J anschaulich Die gewählten Werte für die Ausprägungen des Parameters Massenträgheitsmoment werden anschaulich, wenn man die effektive Dichte ρ eines Vollzylinders mit der gleichen Geometrie wie des im Experiment verwendete Knopfs ($D = 36 \text{ mm}$ und $h = 20 \text{ mm}$) berechnet und mit der Dichte anderer Werkstoffe vergleicht:

Ausprägung S $\rho_S = 2,7 \text{ g/cm}^3$ (\approx Aluminium)

Ausprägung M $\rho_M = 8,8 \text{ g/cm}^3$ (\approx Eisen)

Ausprägung L $\rho_L = 19,4 \text{ g/cm}^3$ (\approx Gold)

Dies zeigt auch, dass die bei KNOWLES und SHERIDAN (1966) verwendeten Massenträgheitsmomente von $[52 \ 103 \ 247 \ 805] \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$ zum Großteil unrealistisch hoch sind, sie verwenden einen Durchmesser D von rund 32 mm.

M_{Reib} anschaulich Für reale rotatorische Bedienelemente im Automobilbereich ist ein Reibmoment von 5 mNm (Ausprägung M) ein typischer Wert - ein Reibmoment von 0,5 mNm (Ausprägung S) kann als reibungsfrei bezeichnet werden und ist in der Praxis nicht zu realisieren.

7.3 Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter *Massenträgheit, Dämpfung und Reibung*

Ein Reibmoment von 10 mNm (Ausprägung L) kann hingegen als sehr hoch bezeichnet werden und führt in der Regel zu einer Minderung des Qualitätseindrucks.

Die Ausprägung S für den Parameter Dämpfung liegt deutlich unterhalb der in Kapitel 7.1 ermittelten Wahrnehmungsschwelle – dabei wurden allerdings die Parameter Massenträgheitsmoment und Reibung nicht variiert. Ausprägung M kann als für jeden wahrnehmbare aber nicht zu starke Dämpfung charakterisiert werden, siehe auch der in Kapitel 7.1 verwendeter Konstantreiz. Der Parameter Dämpfung wird bei realen Bedienelementen bisher nicht näher spezifiziert. In der Praxis weisen rotatorische Bedienelemente auch keine ausgeprägte Dämpfung aus. Die in Encoder eingebrachte Fettmenge dient hauptsächlich zur Erhöhung der Lebensdauer aber auch zur positiven Beeinflussung der Haptik. Problematisch bei einer ausgeprägten durch Fett hervorgerufenen Dämpfung ist die starke Temperaturabhängigkeit.

d anschaulich

Aufgrund des großen Versuchsumfangs von 33 Einzelexperimenten ist es nicht möglich, den gesamten Versuch in einer Sitzung durchzuführen. Die Probanden hatten daher die Möglichkeit den Gesamtumfang von rund drei Stunden auf drei bis sechs Sitzungen zu verteilen. Der Ablauf der ersten Sitzung gliedert sich wie folgt:

Aufteilung in mehrere Sitzungen

1. Demonstration der mechanischen Parameter anhand realer Bedienelemente
2. Demonstration der mechanischen Parameter am Haptiksimulator
3. Durchführung eines Testversuchs
4. Durchführung der Experimente

Bei den weiteren Sitzungen kann direkt mit den Experimenten begonnen werden. Folgende Hinweise zur Versuchsdurchführung befinden sich auf einer Hinweistafel die sich während der Versuche im Sichtfeld der Probanden befindet:

Hinweise

- Zwei-Finger-Griff verwenden
- Verwendung einer normalen Betätigungsgeschwindigkeit
- zügig entscheiden (spätestens nach 2 Vergleichen)
- bei Ermüdung sind kurze Pausen möglich
- Unterschiedliche Betätigungsgeschwindigkeiten sind hilfreich, um die Unterschiede besser fühlen zu können.

Bei dem Versuchsaufbau gibt es keine akustischen Emissionen und es ist den Probanden somit nicht möglich, Schlüsse auf die Parameter aus Geräuschen zu ziehen. Auf das Verwenden von Kopfhörern wird daher verzichtet.

kein Kopfhörer

Zur Ermittlung der Unterschiedsschwellen kommt das Transformed-1-Up/2-Down-Verfahren in Kombination mit einem 3-Intervall-Forced-Choice-Paradigma zum Einsatz, siehe Kapitel 5. Die Schwellwertermittlung erfolgt durch Mittelung der letzten vier von fünf Umkehrpunkten. Die Annäherung an den Konstantreiz erfolgt stets von oben.

Verfahren zur Schwellwertbestimmung

Eine Übersicht aller 33 Experimente zusammen mit den Staircase-Parametern findet sich in Tabelle 7.31. Die grau hinterlegten Zellen kennzeichnen den jeweils variierten Parameter (Konstantreiz). Bei Set 14 wird beispielsweise die Unterschiedsschwelle für den Parameter Dämpfung bei einem Konstantreiz von 1 mNms (Ausprägung M) ermittelt. Die Staircase-Parameter wurden durch einen Vorversuch ermittelt.

Parameter in Vorversuch bestimmt

7 Experimente

Transfer-
effekte mi-
nimieren

Die Reihenfolge der 33 Experimente wird probandenindividuell variiert, um Transfer-effekte zu minimieren. Eine vollständige Permutation ist aufgrund der dafür nötigen Probandenanzahl von $n_{\text{vollst.}} = 33! \gg 10^6$ nicht möglich.

Im weiteren Verlauf wird auf eine Kurzschreibweise zur Unterscheidung der 33 Experimente zurückgegriffen. Jedes Experiment besteht aus einem Set von Parametern mit der Reihenfolge J , d und M_{Reib} . Das Präfix wird durch eine laufende Nummer gebildet. Als Suffix dient eine Ziffer, die den Parameter kennzeichnet, der bei dem jeweiligen Set systematisch variiert wird. Das folgende Beispiel zeigt demnach Set 6:

$$\begin{array}{c} \text{2ter Parameter} \\ \text{Set 6} \quad (d) \text{ variabel} \\ \underbrace{06}_{J} \text{ - } \underbrace{\text{SML}}_d \text{ - } \underbrace{2}_{M_{\text{Reib}}} \\ \text{"small" } J, \text{ "medium" } d \text{ und "large" } M_{\text{Reib}} \end{array}$$

Beispiel Set 6

Bei Set 6 wird die Unterschiedsschwelle für den zweiten Parameter (Dämpfung d) ermittelt. Dabei hat der Konstantreiz für den Parameter d eine "mittlere" (M) Ausprägung. Die beiden verbleibenden Parameter J und M_{Reib} haben eine "niedrige" (S) beziehungsweise "hohe" (L) Ausprägung, siehe auch Tabelle 7.30.

Weber-
Konstante

Die ermittelten Unterschiedsschwellen werden zur besseren Interpretierbarkeit stets prozentual, also in Form von Weber-Konstanten, angegeben.

7.3 Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter *Massenträgheit, Dämpfung und Reibung*

Tabelle 7.31: Parameter für das verwendete Staircase-Verfahren. Die Parameter x_0 , Δx_0 und Δx sind in Abbildung 5.7 veranschaulicht. Die grau hinterlegten Zellen kennzeichnen den systematisch variierten Parameter.

Set/Kurzbez.	$\frac{J}{10^{-6} \times \text{kgm}^2}$	$\frac{d}{\text{mNms}}$	$\frac{M_{\text{Reib}}}{\text{mNm}}$	x_0	Δx_0	Δx
01_SSM_3	5 + 4	0,01	5	10	$3\Delta x$	0,25
02_SSL_3	5 + 4	0,01	10	15	$3\Delta x$	0,33
03_SMS_2	5 + 4	1	0,5	1,7	$3\Delta x$	0,03
04_SMM_2	5 + 4	1	5	1,7	$3\Delta x$	0,05
05_SMM_3	5 + 4	1	5	10	$3\Delta x$	0,25
06_SML_2	5 + 4	1	10	1,7	$3\Delta x$	0,05
07_SML_3	5 + 4	1	10	15	$3\Delta x$	0,33
08_MSS_1	25 + 4	0,01	0,5	60	$3\Delta x$	2,5
09_MSM_1	25 + 4	0,01	5	80	$3\Delta x$	2,5
10_MSM_3	25 + 4	0,01	5	10	$3\Delta x$	0,25
11_MSL_1	25 + 4	0,01	10	80	$3\Delta x$	2,5
12_MSL_3	25 + 4	0,01	10	15	$3\Delta x$	0,33
13_MMS_1	25 + 4	1	0,5	80	$3\Delta x$	2,5
14_MMS_2	25 + 4	1	0,5	1,7	$3\Delta x$	0,03
15_MMM_1	25 + 4	1	5	80	$3\Delta x$	2,5
16_MMM_2	25 + 4	1	5	1,7	$3\Delta x$	0,05
17_MMM_3	25 + 4	1	5	10	$3\Delta x$	0,25
18_MML_1	25 + 4	1	10	80	$3\Delta x$	2,5
19_MML_2	25 + 4	1	10	1,7	$3\Delta x$	0,05
20_MML_3	25 + 4	1	10	15	$3\Delta x$	0,33
21_LSS_1	60 + 4	0,01	0,5	120	$3\Delta x$	4
22_LSM_1	60 + 4	0,01	5	120	$3\Delta x$	4
23_LSM_3	60 + 4	0,01	5	10	$3\Delta x$	0,25
24_LSL_1	60 + 4	0,01	10	120	$3\Delta x$	4
25_LSL_3	60 + 4	0,01	10	15	$3\Delta x$	0,33
26_LMS_1	60 + 4	1	0,5	120	$3\Delta x$	4
27_LMS_2	60 + 4	1	0,5	1,7	$3\Delta x$	0,03
28_LMM_1	60 + 4	1	5	120	$3\Delta x$	4
29_LMM_2	60 + 4	1	5	1,7	$3\Delta x$	0,05
30_LMM_3	60 + 4	1	5	10	$3\Delta x$	0,25
31_LML_1	60 + 4	1	10	120	$3\Delta x$	4
32_LML_2	60 + 4	1	10	1,7	$3\Delta x$	0,05
33_LML_3	60 + 4	1	10	15	$3\Delta x$	0,33

7.3.4 Statistische Auswertung

Es folgt – wie bei den Experimenten zuvor – zunächst die Beschreibung des Probandenkollektivs und anschließend die statistische Auswertung in deskriptiver und inferenzstatistischer Form. Der Stichprobenumfang beträgt $n = 28$. Dadurch ergibt sich

Signifikanzniveau

das Signifikanzniveau $\alpha_{n=28}$ für dieses Experiment zu 4%, siehe auch Abbildung 7.1 und Abbildung A.22 in Anhang A.3.3.3.

7.3.4.1 Probandenkollektiv

Stichprobenart Bei der Stichprobe handelt es sich erneut um eine sogenannte Klumpenstichprobe (BORTZ & SCHUSTER, 2010, S. 81; EID u. a., 2010, Kapitel 9.3.2), die 28 Teilnehmer stammen dabei hauptsächlich aus dem Hochschulumfeld. Ausgewählte statistische Kennwerte des Probandenkollektivs sind in Tabelle 7.32 zusammengefasst.

Tabelle 7.32: Statistische Kennwerte des Probandenkollektivs (Stichprobenumfang $n = 28$)

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Alter in Jahren	17	23	25,5	29	68	28,18	18,3
Lateralisations-Index	-100	80	100	100	100	75,4	78,8
Geschlecht	25 % weiblich bzw. 75 % männlich						

Lateralisations-Index Die Händigkeit wird diesmal über einen Zehn-Punkte-Fragebogen erfasst – er findet sich in Anhang A.3.3.2. Das Ergebnis des Fragebogens ist der sogenannte Lateralisations- oder Seitigkeitsindex. Der Wertebereich des Lateralisationsindex beträgt –100 (vollständig links) bis 100 (vollständig rechts), für Details siehe OLDFIELD (1971) und M. S. COHEN (2008).

7.3.4.2 Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung der Versuchsergebnisse in deskriptiver und inferenzstatistischer Form. Dabei wird auf die in Kapitel 7.3.3 eingeführte Kurzschreibweise zurückgegriffen. Die Interpretation und Diskussion der Ergebnisse schließt sich in Kapitel 7.3.5 an.

Massenträgheitsmoment Die ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment sind in Abbildung 7.23 dargestellt. Ausgewählte statistische Kennwerte hierzu sind Tabelle A.1 in Anhang A.3.3.4 zu entnehmen.

Für einen schnellen Überblick über die statistischen Zusammenhänge der zwölf Verteilungen eignen sich paarweise Tests. In Abhängigkeit vom Shapiro-Wilk-Test (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird ein t -Test oder Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest durchgeführt⁸. Aus Sicht des Autors ist dabei eine α -Fehler-Korrektur (z. B. EID u. a., 2010, Kapitel 13.1.12; BORTZ, 2005, Kapitel 7.3.3; BORTZ & SCHUSTER, 2010, Kapitel 13.2) nicht notwendig. Die p -Werte der 66 Tests finden sich in Tabelle 7.33. Exemplarisch sind ein Paarvergleich aus Tabelle 7.33 und die entsprechenden Sets in Abbildung 7.23

⁸ jeweils zweiseitig; Alternative: Tukey-Test, siehe z. B. EID u. a. (2010)

7.3 Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter *Massenträgheit, Dämpfung und Reibung*

markiert: Der p -Wert für das Paar 11_MSL_01 und 13_MMS_01 ist 0%. Unter Berücksichtigung des festgelegten Signifikanzniveaus von $\alpha_{n=28} = 4\%$ besteht demnach zwischen diesem Paar ein signifikanter Unterschied.

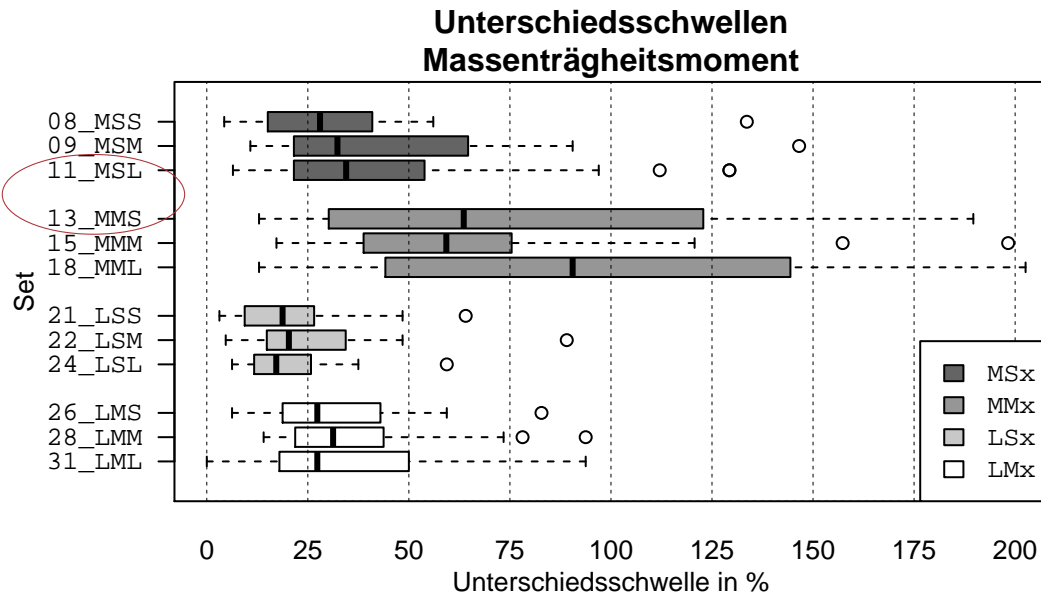


Abbildung 7.23: Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment

Die Unterschiedsschwellen in Abbildung 7.23 sind in vier Gruppen angeordnet. Die Gruppe MSx beispielsweise unterscheidet sich nur im dritten Parameter (Reibung). Die Dämpfung hat stets die Ausprägung S und der Konstantreiz für das Massenträgheitsmoment hat stets die Ausprägung M.

Tabelle 7.33: p -Werte der paarweisen Tests (t -Test oder Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest, **fett** ausgezeichnet) für die Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment, siehe auch Abbildung 7.23. p -Werte die über dem Signifikanzniveau $\alpha_{n=28} = 4\%$ liegen sind grau hinterlegt.

	Set 8	Set 9	Set 11	Set 13	Set 15	Set 18	Set 21	Set 22	Set 24	Set 26	Set 28
Set 9	1%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 11	1%	74%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 13	0%	0%	0%	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 15	0%	1%	1%	89%	-	-	-	-	-	-	-
Set 18	0%	0%	0%	6%	5%	-	-	-	-	-	-
Set 21	1%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-	-	-
Set 22	3%	0%	0%	0%	0%	0%	9%	-	-	-	-
Set 24	1%	0%	0%	0%	0%	0%	94%	5%	-	-	-
Set 26	96%	9%	3%	0%	0%	0%	1%	29%	1%	-	-
Set 28	34%	6%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	40%	-
Set 31	49%	74%	55%	0%	0%	0%	1%	2%	0%	37%	59%

Um Maskierungseffekte für den Parameter Massenträgheitsmoment durch die Para-

Maskierungseffekte

meter Dämpfung und Reibung aufzudecken, werden die Differenzen zum jeweiligen Referenz-Set betrachtet. Das Referenz-Set ist in diesem Fall das Set, das das Massenträgheitsmoment in "reiner" Form darstellt, also für die Parameter Dämpfung und Reibung die Ausprägung S aufweist.

Die Boxplots der Differenzen zum jeweiligen Referenz-Set sind in Abbildung 7.24 dargestellt. Die zwei Referenz-Sets, je eins für die Ausprägung M und L für den Parameter Massenträgheitsmoment, sind Set 8 und Set 21.

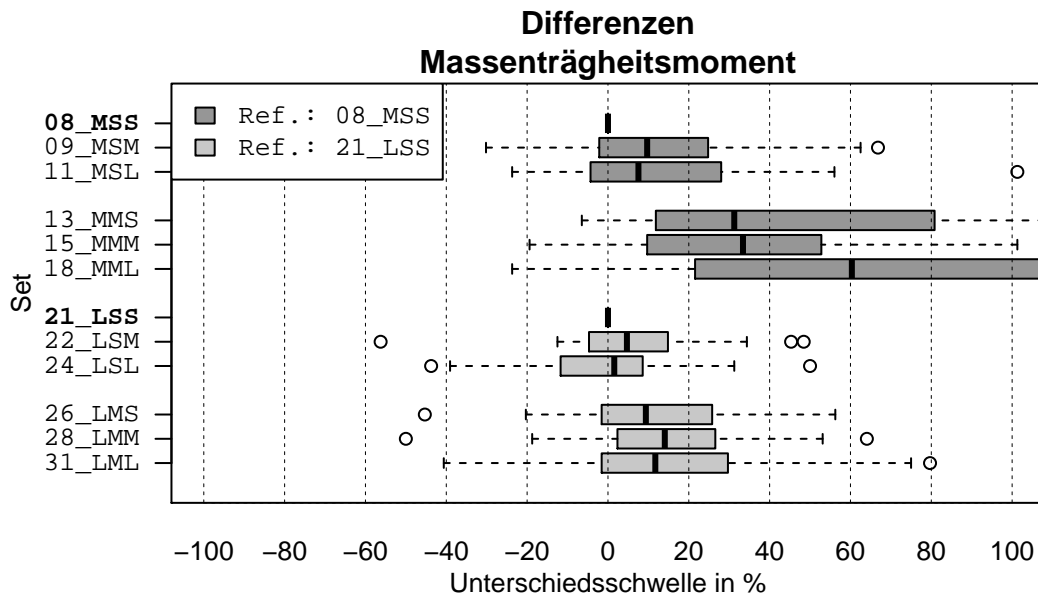


Abbildung 7.24: Boxplots der Differenzen der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment – die Differenzen sind auf das jeweilige Referenz-Set (Set 8 oder Set 21) bezogen

Ausgewählte statistische Kennwerte zu der Darstellung in Abbildung 7.24 finden sich in Tabelle A.2 in Anhang A.3.3.4. Die Ergebnisse der inferenzstatistischen Auswertung der Differenzen sind in Tabelle 7.34 zusammengefasst.⁹

Acht der zehn Differenzen sind signifikant von null verschieden. Lediglich bei einer "hohen" (L) Ausprägung des Massenträgheitsmoments bei gleichzeitiger "niedriger" (S) Ausprägung des Parameter Dämpfung wird keine signifikante Maskierung durch den Parameter Reibung festgestellt.

⁹ Die Informationen in Tabelle 7.34 sind eine Teilmenge der Informationen in Tabelle 7.33 in detaillierterer Form.

7.3 Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter *Massenträgheit, Dämpfung und Reibung*

Tabelle 7.34: Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (<i>p</i>-Wert)	<i>t</i>-Test (<i>p</i>-Wert)	Wilcoxon-Test (<i>p</i>-Wert)
Konstantreiz $R_J = M$ (medium)			
08_MSS (Referenz)	-	-	-
09_MSM – 08_MSS	8,96 %	1,40 %	-
11_MSL – 08_MSS	0,82 %	-	0,57 %
13_MMS – 08_MSS	0,05 %	-	0,00 %
15_MMM – 08_MSS	33,97 %	0,00 %	-
18_MML – 08_MSS	31,52 %	0,00 %	-
Konstantreiz $R_J = L$ (large)			
21_LSS (Referenz)	-	-	-
22_LSM – 21_LSS	1,60 %	-	8,62 %
24_LSL – 21_LSS	47,98 %	93,94 %	-
26_LMS – 21_LSS	77,81 %	1,14 %	-
28_LMM – 21_LSS	27,43 %	0,15 %	-
31_LML – 21_LSS	23,66 %	0,53 %	-

7 Experimente

Dämpfung Die ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung sind in Abbildung 7.25 dargestellt. Ausgewählte statistische Kennwerte hierzu finden sich in Tabelle A.3 in Anhang A.3.3.4.

Einen schnellen Überblick über die statistischen Zusammenhänge der neun Verteilungen gibt Tabelle 7.35 – wie zuvor – in Form von 36 paarweisen Tests.

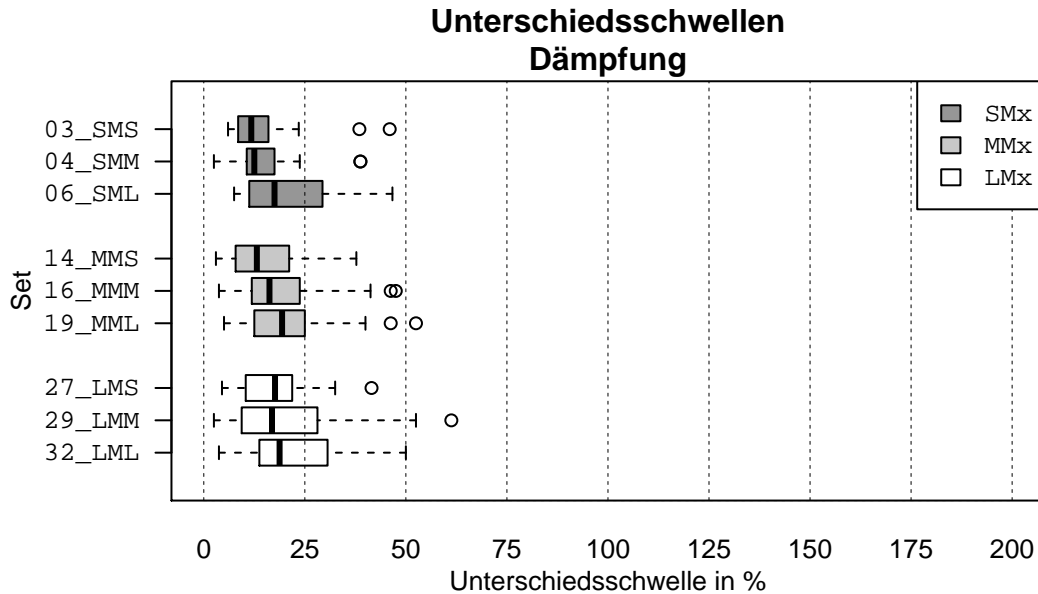


Abbildung 7.25: Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung

28 der 36 p -Werte in Tabelle 7.35 liegen über dem Signifikanzniveau $\alpha_{n=28} = 4\%$ und sind entsprechend grau hinterlegt.

Tabelle 7.35: p -Werte der paarweisen Tests (t -Test oder Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest, **fett** ausgezeichnet) für die Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung, siehe auch Abbildung 7.25. p -Werte, die über dem Signifikanzniveau $\alpha_{n=28} = 4\%$ liegen, sind grau hinterlegt. Hinweis: Der p -Wert der Paarung 29/4 ist – im Gegensatz zu Paarung 19/4 – grau hinterlegt, da abgerundet wird.

	Set 3	Set 4	Set 6	Set 14	Set 16	Set 19	Set 27	Set 29
Set 4	62%	-	-	-	-	-	-	-
Set 6	0%	1%	-	-	-	-	-	-
Set 14	53%	90%	1%	-	-	-	-	-
Set 16	11%	9%	85%	5%	-	-	-	-
Set 19	2%	4%	82%	3%	55%	-	-	-
Set 27	10%	24%	12%	37%	45%	20%	-	-
Set 29	6%	4%	78%	8%	61%	100%	21%	-
Set 32	1%	1%	69%	2%	6%	38%	6%	46%

Maskierungseffekte Um Maskierungseffekte für den Parameter Dämpfung durch die Parameter Massenträgheitsmoment und Reibung aufzudecken, werden die Differenzen zum Referenz-Set betrachtet. Das Referenz-Set ist das Set, das die Dämpfung in “reiner” Form darstellt,

7.3 Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter *Massenträgheit, Dämpfung und Reibung*

also für die Parameter Massenträgheitsmoment und Reibung die Ausprägung S aufweist.

Die Boxplots der Differenzen bezogen auf das Referenz-Set Set 3 sind in Abbildung 7.26 dargestellt.

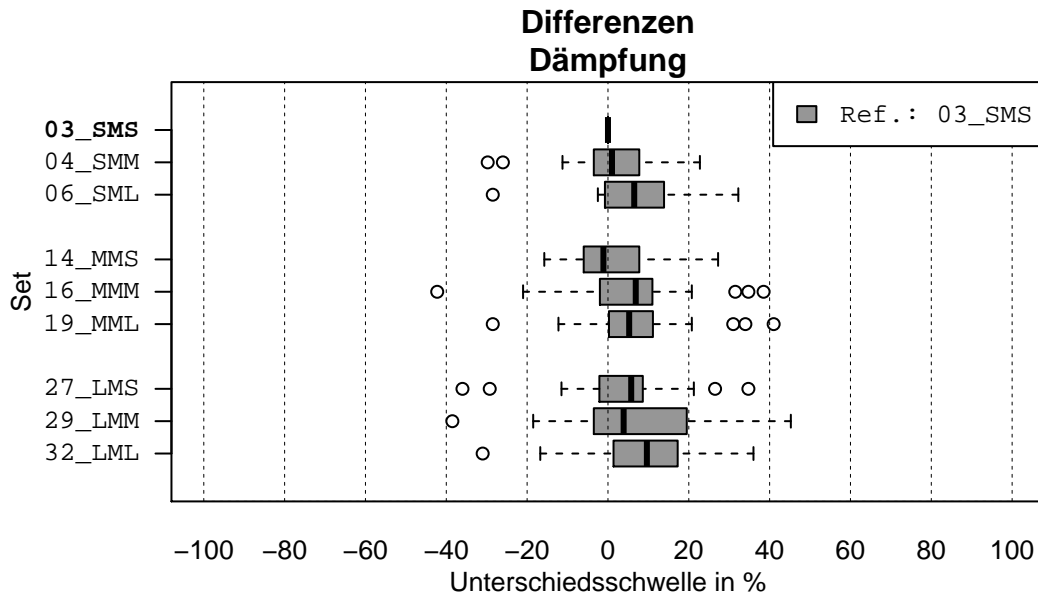


Abbildung 7.26: Boxplots der Differenzen der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung – die Differenzen sind auf das Referenz-Set (Set 8) bezogen.

Ausgewählte statistische Kennwerte zu der Darstellung in Abbildung 7.26 finden sich in Tabelle A.4 in Anhang A.3.3.4. Die Ergebnisse der inferenzstatistischen Auswertung der Differenzen sind in Tabelle 7.36 zusammengefasst.

Tabelle 7.36: Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (<i>p</i> -Wert)	<i>t</i> -Test (<i>p</i> -Wert)	Wilcoxon-Test (<i>p</i> -Wert)
Konstantreiz $R_d = M$ (medium)			
03_SMS (Referenz)	-	-	-
04_SMM – 03_SMS	9,00%	62,15%	-
06_SML – 03_SMS	4,78%	-	0,30%
14_MMS – 03_SMS	31,90%	53,09%	-
16_MMM – 03_SMS	7,33%	11,09%	-
19_MML – 03_SMS	5,11%	1,71%	-
27_LMS – 03_SMS	3,64%	-	9,73%
29_LMM – 03_SMS	87,70%	6,47%	-
32_LML – 03_SMS	66,05%	0,50%	-

Drei der acht Differenzen sind signifikant von null verschieden ($\alpha_{n=28} = 4\%$). Eine Maskierung tritt nur in Verbindung mit erhöhter Reibung und unabhängig von der Ausprägung des Massenträgheitsmoments auf, siehe Differenzen Set 6/3, 19/3 und 32/3.

Reibung Die ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung sind in Abbildung 7.27 dargestellt – für ausgewählte statistische Kennwerte siehe Tabelle A.5 in Anhang A.3.3.4.

Einen schnellen Überblick über die statistischen Zusammenhänge der zwölf Verteilungen findet sich in Tabelle 7.37 in Form von 66 paarweisen Tests.

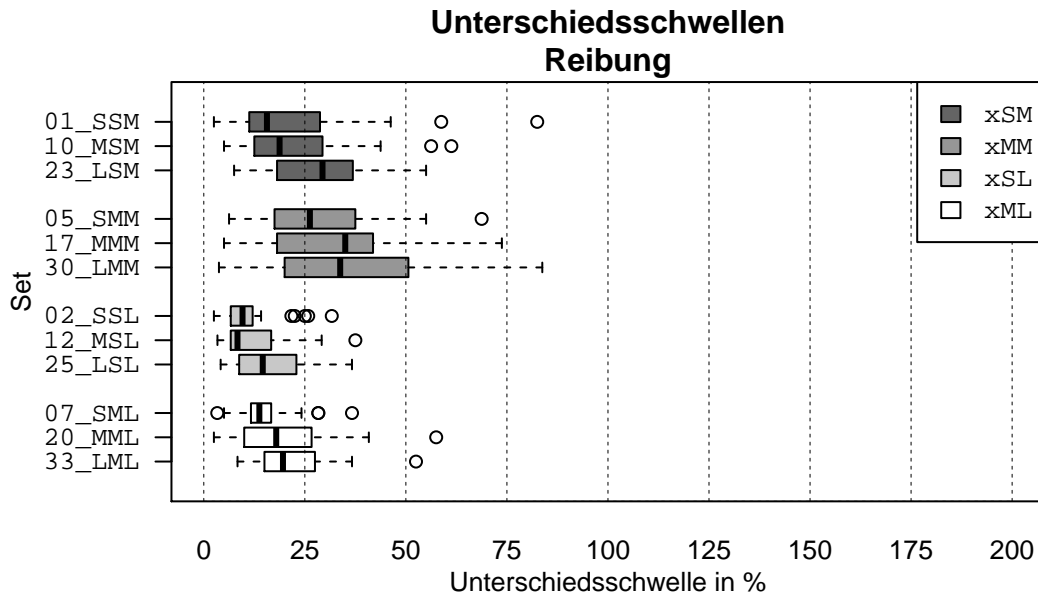


Abbildung 7.27: Boxplots der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung

Innerhalb der Gruppen xSM, xMM und xSL gibt es kaum signifikante Unterschiede. Dies erkennt man - neben der Darstellung der Verteilungen in Abbildung 7.27 - an den grau hinterlegten p -Werten in den Feldern in der Diagonale in Tabelle 7.37.

Tabelle 7.37: p -Werte der paarweisen Tests (t -Test oder Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest, **fett** ausgezeichnet) für die Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung, siehe auch Abbildung 7.27. p -Werte die über dem Signifikanzniveau $\alpha_{n=28} = 4\%$ liegen sind grau hinterlegt.

	Set 1	Set 10	Set 23	Set 5	Set 17	Set 30	Set 2	Set 12	Set 25	Set 7	Set 20
Set 10	55%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 23	1%	7%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 5	3%	7%	80%	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 17	0%	2%	34%	25%	-	-	-	-	-	-	-
Set 30	0%	0%	10%	3%	30%	-	-	-	-	-	-
Set 2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-	-	-
Set 12	0%	0%	0%	0%	0%	0%	51%	-	-	-	-
Set 25	25%	5%	0%	0%	0%	0%	1%	8%	-	-	-
Set 7	2%	3%	0%	0%	0%	0%	6%	31%	38%	-	-
Set 20	18%	34%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	19%	3%	-
Set 33	64%	63%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	13%

Um Maskierungseffekte für den Parameter Reibung durch die Parameter Massenträgheitsmoment und Dämpfung aufzudecken, werden die Differenzen zum jeweiligen Referenz-Set betrachtet. Das Referenz-Set ist in diesem Fall das Set, das die Reibung in "reiner" Form darstellt, also für die Parameter Massenträgheitsmoment und Dämpfung die Ausprägung S aufweist.

Maskierungseffekte

Die Boxplots der Differenzen zum jeweiligen Referenz-Set sind in Abbildung 7.28

dargestellt. Die zwei Referenz-Sets, je eins für die Ausprägung M und L für den Parameter Reibung, sind Set 1 und Set 2.

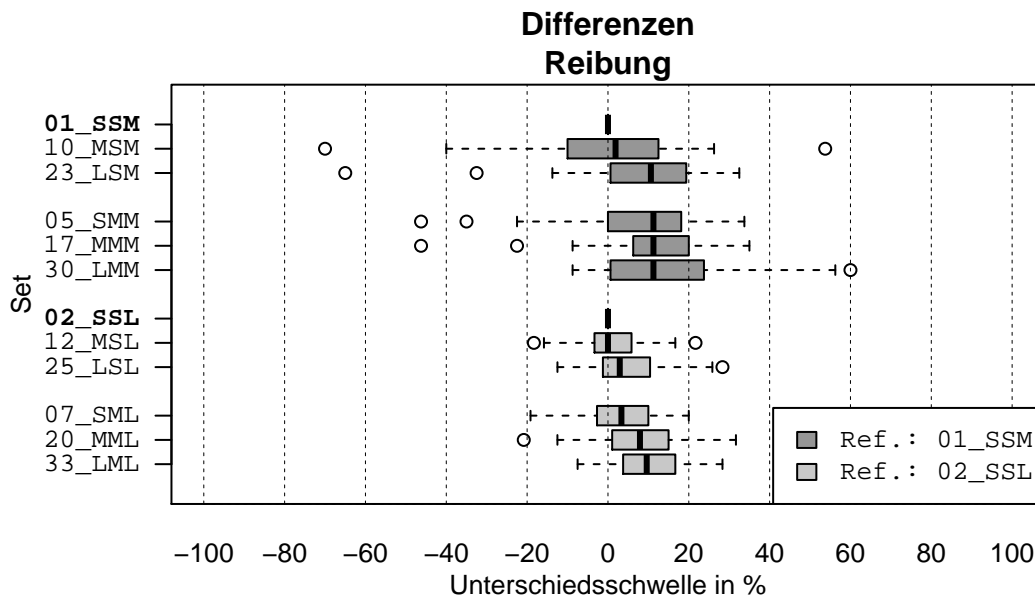


Abbildung 7.28: Boxplots der Differenzen der ermittelten Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung – die Differenzen sind auf das jeweilige Referenz-Set (Set 1 oder Set 2) bezogen.

Ausgewählte statistische Kennwerte zu der Darstellung in Abbildung 7.28 finden sich in Tabelle A.6 in Anhang A.3.3.4. Die Ergebnisse der inferenzstatistischen Auswertung der Differenzen sind in Tabelle 7.38 zusammengefasst.

Signifikante Maskierungseffekte durch die Parameter Massenträgheitsmoment und Dämpfung für den Parameter Reibung sind praktisch immer festzustellen. Lediglich ein "mittleres" Massenträgheitsmoment in Verbindung mit einer "niedrigen" Dämpfung führen zu keiner Maskierung, siehe Differenz Set 10/1 und 12/2. Auch eine "mittlere" Dämpfung in Verbindung mit einem "niedrigen" Massenträgheitsmoment führt im Fall des "hohen" Konstantreizes zu keiner signifikanten Maskierung, siehe Differenz Set 7/2.

7.3 Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter *Massenträgheit, Dämpfung und Reibung*

Tabelle 7.38: Hypothesentests für die Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung – in Abhängigkeit vom *Shapiro-Wilk-Test* (Test auf Normalverteilung, $\alpha = 5\%$) wird entweder ein *t-Test* oder ein *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* – jeweils zweiseitig – durchgeführt.

	Shapiro-Wilk-Test (<i>p</i> -Wert)	<i>t</i> -Test (<i>p</i> -Wert)	Wilcoxon-Test (<i>p</i> -Wert)
Konstantreiz $R_{M_{\text{Reib}}} = M$ (medium)			
01_SSM (Referenz)	-	-	-
10_MSM – 01_SSM	3,26 %	-	55,38 %
23_LSM – 01_SSM	0,04 %	-	1,05 %
05_SMM – 01_SSM	0,39 %	-	2,88 %
17_MMM – 01_SSM	0,33 %	-	0,15 %
30_LMM – 01_SSM	2,40 %	-	0,02 %
Konstantreiz $R_{M_{\text{Reib}}} = L$ (large)			
02_SSL (Referenz)	-	-	-
12_MSL – 02_SSL	35,54 %	51,02 %	-
25_LSL – 02_SSL	9,08 %	1,48 %	-
07_SML – 02_SSL	63,22 %	6,44 %	-
20_MML – 02_SSL	92,89 %	0,18 %	-
33_LML – 02_SSL	69,23 %	-	0,00 %

7.3.5 Interpretation und Zusammenfassung

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt jeweils getrennt für die drei untersuchten Parameter Massenträgheitsmoment, Dämpfung und Reibung.

7.3.5.1 Massenträgheitsmoment

Der Parameter Massenträgheitsmoment wird bei “mittlerer” und “hoher” Ausprägung grundsätzlich durch die Parameter Dämpfung und Reibung maskiert, siehe Markierung a in Tabelle 7.39. Das heißt, dass eine Variation beim Parameter Massenträgheit prinzipiell durch eine erhöhte (konstante) Reibung und/oder Dämpfung “verdeckt” werden kann. Eine Ausnahme bildet der Parameter Reibung in Kombination mit einem “hohen” Massenträgheitsmoment und einer “niedrigen” Dämpfung, siehe Markierung b.

Maskierung

Die Differenzierungsfähigkeit der Probanden für den Parameter Massenträgheitsmoment nimmt ab, sobald er in Verbindung mit einer ausgeprägter Reibung und/oder Dämpfung auftritt. Dabei hat der Parameter Dämpfung, im Rahmen der in der Untersuchung verwendeten Ausprägungen, eine stärkere maskierende Wirkung: Reibung alleine hat bei einer “niedrigen” Ausprägung des Parameters Dämpfung keine signifikante maskierende Wirkung auf ein “hohes” Massenträgheitsmoment.

Zusammenfassung

7 Experimente

Unterschiedsschwelle Die prozentuale Unterschiedsschwelle oder Weber-Konstante für den Parameter Massenträgheitsmoment beträgt rund 15 % bis 30 % (Median). Allerdings erhöht sie sich bei einer starken Maskierung durch die Parameter Dämpfung und Reibung bis auf rund 90 %, siehe Abbildung 7.23 und Tabelle A.1 in Anhang A.3.3.4. Insgesamt ist dabei eine deutliche Abhängigkeit von der Größe des Konstantreizes zu beobachten, siehe nächster Absatz.

Weber'sches Gesetz Im untersuchten Parameterbereich gilt das Weber'sche Gesetz nicht – die Weber-Konstante oder prozentuale Unterschiedsschwelle unterscheidet sich signifikant in Abhängigkeit vom Konstantreiz, siehe Markierung c¹⁰. Das Weber'sche Gesetz gilt im Allgemeinen für "mittlere" Reizintensitäten – für "niedrige" Reizintensitäten nimmt die Weber-Konstante höhere Werte an. In Relation zum Bezugsreiz sind demnach deutlich höhere relative Reizzunahmen notwendig als im Bereich höherer Massenträgheitsmomente. Im Rahmen der Untersuchung sinkt die Weber-Konstante mit zunehmendem Konstantreiz für den Parameter Massenträgheitsmoment, siehe beispielsweise Paarung 8/21. Das deutet darauf hin, dass zumindest die Ausprägung M im Kontext des Weber'schen Gesetzes keine "mittlere" sondern eine "niedrige" Reizintensität darstellt.

Tabelle 7.39: Wiederholung von Tabelle 7.33 auf Seite 109 – markiert sind die Paarungen, auf die im Text Bezug genommen wird.

	Set 8	Set 9	Set 11	Set 13	Set 15	Set 18	Set 21	Set 22	Set 24	Set 26	Set 28
Set 9	a (1%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 11	a (1%)	74%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 13	a (0%)	0%	0%	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 15	a (0%)	1%	1%	89%	-	-	-	-	-	-	-
Set 18	a (0%)	0%	0%	6%	5%	-	-	-	-	-	-
Set 21	c (1%)	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-	-	-
Set 22	3%	c (0%)	0%	0%	0%	0%	9% b	-	-	-	-
Set 24	1%	0%	c (0%)	0%	0%	0%	94% b	5%	-	-	-
Set 26	96%	9%	3%	c (0%)	0%	0%	a (1%)	29%	1%	-	-
Set 28	34%	6%	7%	0%	c (0%)	0%	a (0%)	0%	0%	40%	-
Set 31	49%	74%	55%	0%	0%	c (0%)	a (1%)	2%	0%	37%	59%

7.3.5.2 Dämpfung

Maskierung Der Parameter Dämpfung wird lediglich durch eine starke Reibung maskiert, siehe Markierung a in Tabelle 7.40. Eine "mittlere" Reibung hingegen hat keinen maskierenden Effekt auf den Parameter Dämpfung, siehe Markierung b. Der Parameter Massenträgheitsmoment hat in allen Ausprägungen keinen signifikanten maskierenden Effekt, siehe Markierung c. Variationen am Parameter Dämpfung werden demnach nicht durch ein erhöhtes Massenträgheitsmoment "verdeckt". Dies trifft ebenfalls auf den Parameter Reibung bei "mittlerer" Ausprägung zu.

Zusammenfassung Der Parameter Massenträgheitsmoment hat demnach in allen untersuchten Ausprägungen

¹⁰Die Paare mit der Markierung c unterscheiden sich jeweils nur in der Ausprägung des Konstantreizes für den Parameter Massenträgheitsmoment.

7.3 Unterschiedsschwellen und Maskierungseffekte für die Parameter *Massenträgheit, Dämpfung und Reibung*

gen keinen signifikanten maskierenden Einfluss auf den Parameter Dämpfung – dies trifft auch für den Parameter Reibung bis zur “mittleren” Ausprägung zu.

Die prozentuale Unterschiedsschwelle oder Weber-Konstante für den Parameter Dämpfung beträgt rund 10% bis 20% (Median), siehe Abbildung 7.25 und Tabelle A.3 in Anhang A.3.3.4.

Unterschiedsschwelle

Da der Parameter Dämpfung nur in “niedriger” und “mittlerer” Ausprägung untersucht wurde, lässt sich aus den Ergebnissen keine Schlussfolgerung bezüglich der Gültigkeit des Weber’schen Gesetzes treffen. Allerdings deuten die Ergebnisse¹¹ aus dem Experiment in Kapitel 7.1 darauf hin, dass die Weber-Konstante im betrachteten Bereich unabhängig von der Ausprägung des Konstantreizes ist und das Weber’sche Gesetz demnach gültig ist.

Weber'sches Gesetz

Tabelle 7.40: Wiederholung von Tabelle 7.35 auf Seite 112 – markiert sind die Paarungen, auf die im Text Bezug genommen wird.

	Set 3	Set 4	Set 6	Set 14	Set 16	Set 19	Set 27	Set 29
Set 4	b 62%	-	-	-	-	-	-	-
Set 6	0% a	1%	-	-	-	-	-	-
Set 14	53% c	90%	1%	-	-	-	-	-
Set 16	b 11%	9%	85%	5%	-	-	-	-
Set 19	2% a	4%	82%	3%	55%	-	-	-
Set 27	10% c	24%	12%	37%	45%	20%	-	-
Set 29	b 6%	4%	78%	8%	61%	100%	21%	-
Set 32	1% a	1%	69%	2%	6%	38%	6%	46%

7.3.5.3 Reibung

Der Parameter Reibung wird prinzipiell durch die Parameter Massenträgheitsmoment und Dämpfung maskiert, wobei der Maskierungseffekt durch das Massenträgheitsmoment alleine erst bei einer “hohen” Ausprägung auftritt, siehe Markierungen a und b in Tabelle 7.41.

Maskierung

Die Differenzierungsfähigkeit der Probanden für den Parameter Reibung wird besonders durch den Parameter Dämpfung herabgesetzt. Bei einer konstanten Winkelgeschwindigkeit sind Reibung und Dämpfung auch nicht zu unterscheiden. Der Parameter Massenträgheitsmoment hingegen hat erst bei einer “hohen” Ausprägung eine signifikante maskierende Wirkung.

Zusammenfassung

Die prozentuale Unterschiedsschwelle oder Weber-Konstante für den Parameter Reibung beträgt rund 10% bis 35% (Median), siehe Abbildung 7.27 und Tabelle A.5 in Anhang A.3.3.4. Insgesamt ist dabei eine deutliche Abhängigkeit von der Größe des Konstantreizes zu beobachten. Bei einer niedrigen Ausprägung des Parameters Reibung sind größere relative Änderungen notwendig als bei einer höheren Ausprägung.

Unterschiedsschwelle

¹¹Die Unterschiedsschwelle ist nicht signifikant abhängig vom verwendeten Knopfdurchmesser ($D_1 = 20$ mm und $D_2 = 36$ mm). Die in Kapitel 7.1 ermittelten Unterschiedsschwellen betragen 18% bis 22% (Median) bei einem doppelt so großen Konstantreiz ($R = 2$ mNms).

7 Experimente

Weber'sches Gesetz Im untersuchten Parameterbereich gilt das Weber'sche Gesetz nicht – die Weber-Konstante oder prozentuale Unterschiedsschwelle verändert sich signifikant in Abhängigkeit vom Konstantreiz, siehe Markierung c. Die Paare mit der Markierung c unterscheiden sich jeweils nur in der Ausprägung des Konstantreizes für den Parameter Reibung.

Tabelle 7.41: Wiederholung von Tabelle 7.37 auf Seite 115 – markiert sind die Paarungen, auf die im Text Bezug genommen wird.

	Set 1	Set 10	Set 23	Set 5	Set 17	Set 30	Set 2	Set 12	Set 25	Set 7	Set 20
Set 10	55% a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 23	1% b	7%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 5	3% b	7%	80%	-	-	-	-	-	-	-	-
Set 17	0% b	2%	34%	25%	-	-	-	-	-	-	-
Set 30	0% b	0%	10%	3%	30%	-	-	-	-	-	-
Set 2	0% c	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-	-	-
Set 12	0%	0% c	0%	0%	0%	0%	51% a	-	-	-	-
Set 25	25%	5%	0% c	0%	0%	0%	1% b	8%	-	-	-
Set 7	2%	3%	0%	0% c	0%	0%	6% b	31%	38%	-	-
Set 20	18%	34%	0%	1%	0% c	0%	0% b	0%	19%	3%	-
Set 33	64%	63%	1%	1%	0%	0% c	0% b	0%	1%	1%	13%

7.3.5.4 Maskierung durch Rastung

Rastung Im vorliegenden Experiment wurde eine zusätzlich vorhandene Rastung als Maskierungsmöglichkeit nicht untersucht. Die Ergebnisse aus dem Experiment in Kapitel 7.1 lassen aber den Schluss zu, dass eine Rastung grundsätzlich eine maskierende Wirkung für mechanische Parameter wie Massenträgheitsmoment, Dämpfung und Reibung hat.

7.3.5.5 Empfehlung für die Praxis

Für alle der drei Parameter Massenträgheitsmoment, Dämpfung und Reibung können Maskierungseffekte durch die jeweils verbleibenden zwei Parameter nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis stellt somit die Praxisrelevanz der Ergebnisse anderer Untersuchungen prinzipiell in Frage, bei denen nicht auf die gegenseitige Beeinflussung der Parameter Rücksicht genommen wird.

Allerdings ist festzuhalten, dass Maskierungseffekte erst bei Parameterpaarungen in praxisrelevanter Ausprägung auftreten, die zumindest für hochwertige rotatorische Bedienelemente im automobilen Umfeld unüblich sind. Somit ist in der Praxis nicht prinzipiell mit Maskierungseffekten bei rotatorischen Bedienelementen zu rechnen. Dies vereinfacht insgesamt den Aufwand bei der experimentellen Bestimmung von Unterschiedsschwellen für die untersuchten drei mechanischen Parameter Massenträgheitsmoment, Dämpfung und Reibung.

8 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Nach einer Zusammenfassung und Diskussion der erarbeiteten Erkenntnisse erfolgt ein Ausblick mit einer Empfehlung für weitere Untersuchungsgegenstände.

8.1 Zusammenfassung und Diskussion

Die vorliegende Arbeit beantwortet mit drei Experimenten mehrere Fragen in Bezug auf grundlegende menschliche Eigenschaften hinsichtlich der Unterscheidbarkeit mechanischer Parameter bei sekundären und tertiären Bedienelementen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der haptischen Rückmeldung von rotatorischen Bedienelementen.

3 Experimente

Bei den Experimenten werden Schwellwerte ermittelt – dafür kommen sogenannte moderne Methoden aus dem Bereich der Psychophysik zum Einsatz. Die gemeinsame Eigenschaft der verwendeten Methoden ist die adaptive Reizauswahl, die in Abhängigkeit von den vorherigen Antworten stattfindet und die Reizintensität in der Nähe der gesuchten Schwelle forciert.

verwendete Methoden

Das erste Experiment in Kapitel 7.1 beschäftigt sich hauptsächlich mit der Frage, inwieweit sich Ergebnisse aus Schwellwertexperimenten, die unter Laborbedingungen gewonnen werden, auf die Praxis übertragen lassen. Dazu wird ein Schwellwertexperiment zur Bestimmung von Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung bei rotatorischen Bedienelementen unter verschiedenen Ablenkungsbedingungen ermittelt.

Experiment 1

Die Ergebnisse zeigen, dass sich Schwellwerte von Experimenten, die unter Laborbedingungen gewonnen werden, gut auf die Praxis übertragen lassen. Das Experiment ergibt, dass sich die ermittelten Schwellwerte unter hoher Ablenkung nicht von denen bei geringer Ablenkung unterscheiden.

Haupterkennnis

Neben der Haupterkennnis liefert das erste Experiment weitere Ergebnisse. Zum einen gibt es Hinweise darauf, dass nicht das Drehmoment sondern die an den Fingerbeeren wirksame Tangentialkraft die wahrnehmungsrelevante Größe bei rotatorischen Bedienelementen ist. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Resultaten von PAULIG (2013) beziehungsweise PAULIG, GOHLKE u. a. (2011). Zum anderen zeigt das Versuchsergebnis erwartungskonform, dass eine Überlagerung einer Rastung einen maskierenden Effekt auf die Wahrnehmungsgenauigkeit des mechanischen Parameters Dämpfung hat. Der maskierende Effekt tritt in Form höherer Schwellwerte in Erscheinung.

weitere Erkenntnisse

Experiment 2 Im zweiten Experiment in Kapitel 7.2 wird der Einfluss der Einbaulage auf die Kraft-Schwellwerte translatorischer Bedienelemente untersucht. Eine Lageunabhängigkeit deutet auf das Vorhandensein einer sogenannten haptischen Konstanzleistung hin. Besteht diese, so lassen sich Versuchsergebnisse, die für bestimmte Einbaulagen gewonnen werden, prinzipiell auf andere Einbausituationen übertragen. Konstanzleistungen sind vor allem aus dem Bereich des Sehens – beispielsweise Größen- und Farbkonstanz – bekannt.

translatorische Bedienelemente Im Gegensatz zu rotatorischen Bedienelementen verlaufen etwa bei der Überkopfbedienung translatorischer Bedienelemente die Betätigungsrichtung und die Richtung des Schwerkraftvektors parallel. Die Untersuchung bezüglich der haptischen Konstanzleistung anhand translatorischer Bedienelemente stellt somit den allgemeineren Fall dar.

Haupterkennntnis Die Ergebnisse geben deutliche Hinweise auf das Vorhandensein einer haptischen Konstanzleistung. Demnach sind Schwellwerte, die für bestimmte Einbaulagen bestimmt werden, prinzipiell auf andere Einbaulagen übertragbar. REISINGER (2008) kommt mit einer anderen Untersuchungs- und Auswertemethode zu ähnlichen Ergebnissen. Das Untersuchungsergebnis lässt allerdings keine Rückschlüsse auf die Übertragbarkeit in Bezug auf das Komfortempfinden zu, wie auch REISINGER (2008, S. 44) anmerkt.

Experiment 3 Im dritten Experiment wird untersucht, inwieweit sich die mechanischen Parameter

- Massenträgheitsmoment,
- viskose Reibung (kurz Dämpfung) und
- Coulomb'sche Reibung (kurz Reibung)

bei rotatorischen Bedienelementen gegenseitig hinsichtlich der Wahrnehmungsgenauigkeit beeinflussen. Hintergrund des Experiments ist, dass bei Experimenten zur Schwellwertbestimmung üblicherweise nur der zu untersuchende Parameter variiert wird, während die verbleibenden Parameter konstant gehalten werden. Eine gegenseitige Einflussnahme der mechanischen Parameter in Form von sogenannten Maskierungseffekten wird dabei in der Regel nicht untersucht.

Haupterkennntnis Bei allen drei mechanischen Parametern können Maskierungseffekte durch die verbleibenden zwei Parameter nachgewiesen werden, so fällt es den Probanden beispielsweise schwerer eine Variation des Parameters Massenträgheitsmoment zu erkennen, wenn gleichzeitig eine deutliche Dämpfung wirksam ist. Dieses Ergebnis stellt die Praxisrelevanz der Ergebnisse anderer Untersuchungen prinzipiell in Frage, bei denen nicht auf die gegenseitige Beeinflussung der Parameter Rücksicht genommen wird.

Praxis Allerdings ist festzuhalten, dass die Maskierungseffekte erst bei Parameterpaarungen in praxisrelevanter Ausprägung auftreten, die zumindest für hochwertige rotatorische Bedienelemente im automobilen Umfeld unüblich sind. Somit ist in der Praxis nicht prinzipiell mit Maskierungseffekten zu rechnen, und Schwellwertexperimente zur Bestimmung von Unterschiedsschwellen können teilweise – unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Experiment 3 – ohne Variation der verbleibenden Parameter sinnvoll ausgewertet und verwertet werden.

Das Experiment hat zudem Werte für die Weber-Konstanten beziehungsweise prozentualen Unterschiedsschwellen der drei untersuchten mechanischen Parameter zum Ergebnis. Die ermittelten Weber-Konstanten sind jedoch im untersuchten Bereich – zumindest für die Parameter Massenträgheitsmoment und Reibung – nicht unabhängig vom Konstantreiz – somit gilt das Weber’sche-Gesetz nicht. Zusammenfassend lässt sich für den Parameter Massenträgheitsmoment eine Weber-Konstante von 15 % bis 30 %, für den Parameter Dämpfung von 10 % bis 20 % und für den Parameter Reibung von 10 % bis 35 % angeben. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Knopfdurchmesser wird auf PAULIG (2013) beziehungsweise PAULIG, GOHLKE u. a. (2011) verwiesen, siehe auch Kapitel 2.

weitere Erkenntnis

Das Versuchsdesign der drei Experimente orientiert sich dabei an den Bedingungen im automobilen Umfeld und dabei insbesondere an Verhältnissen bei sogenannten zentralen Bedienelementen. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse prinzipiell auf andere Bereiche übertragbar sind. Die Ergebnisse lassen sich insbesondere in den Bereichen Telerobotik¹ oder Telechirurgie² und allgemein in der Gestaltung virtueller Realitäten oder mechanischer Mensch-Maschine-Schnittstellen verwenden.

Übertragbarkeit auf andere Bereiche

Beispielsweise ist es bei der Auslegung von medizinischen Trainingssimulatoren für die Ausbildung von angehenden Ärzten oder auch zur Planung von chirurgischen Prozeduren wichtig zu wissen, bis zu welchem Grad und unter welchen Bedingungen Unterschiede in den jeweiligen mechanischen Parametern noch wahrnehmbar sind. Beispiele für medizinische Trainingssimulatoren sind FÄRBER, HUMMEL, GERLOFF und HANDELS (2009); GOKSEL, SAPCHUK und SALCUDEAN (2011); RIVA (2003); VLACHOS und PAPADOPOULOS (2003) sowie BASDOGAN, HO und SRINIVASAN (2001). Eine Übersicht über die Rolle der Haptik im Bereich medizinischer Trainingssimulatoren liefern COLES, MEGLAN und JOHN (2011).

Beispiele

Entgegen der gängigen Praxis, wird experimentübergreifend die Teststärke $1 - \beta$ für “große” Effekte (J. COHEN, 1988) auf einem Niveau von circa 80 % kontrolliert. Somit beträgt die Wahrscheinlichkeit, sich fälschlicherweise für die Nullhypothese zu entscheiden, für alle Experimente näherungsweise $\beta = 20\%$. Dadurch wird erreicht, dass die aus den Experimenten gezogenen Erkenntnisse in ihrer statistischen Aussagekraft hinsichtlich Teststärke und der damit verbundenen Effektgröße – trotz unterschiedlicher Stichprobenumfänge – vergleichbar sind. Vor allem in den ersten beiden Experimenten in Kapitel 7.1 und 7.2 ist dies von Bedeutung, denn der Nullhypothese lässt sich hier die “interessantere” Aussage zuordnen.

statistische Aussagekraft

¹ weitere Bezeichnungen: *Telepräsenz* und *Telemanipulation*

² weitere Bezeichnung: *Teleoperation*

8.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit untersucht unter anderem die Unterschiedsschwellen für die mechanischen Parameter

- Massenträgheitsmoment,
- viskose Reibung und
- Coulomb'sche Reibung

subjektive
Wahrnehmung

bei rotatorischen Bedienelementen. Interessant wäre es, die Zuordnung dieser technischen Parameter zu der subjektiven Wahrnehmung zu ermitteln. Sinnvoll wäre eine Kombination mit einer überlagerten Drehmoment-Drehwinkel-Charakteristik (Rastung). Für eine solche Untersuchung muss allerdings zunächst noch ein geeignetes technisches Konzept für einen Haptiksimulator gefunden werden. Die Kombination von Rastung und variablem Massenträgheitsmoment stellt in dieser Hinsicht – insbesondere bei sehr geringen wirksamen Massenträgheitsmomenten – eine Herausforderung dar. Die menschliche Wahrnehmung ist sehr geübt in der Beurteilung von Bedienelementen und deckt “Fehler” bei der künstlichen Nachbildung der haptischen Rückmeldung schnell auf.

mechanisch-
es Spiel

Das mechanische Spiel in der Ruhelage ist ein weiterer technischer Parameter, der sich potentiell auf die subjektive Wahrnehmung von rotatorischen Bedienelementen mit Rastung auswirkt. Zu diesem Aspekt sind dem Autor keine Untersuchungen bekannt. In der industriellen Praxis der Bedienteilentwicklung ist das mechanische Spiel bereits Gegenstand technischer Spezifikationen.

Akustik

Ebenfalls aus der industriellen Praxis bekannt ist, dass sich die Akustik – das “Klick-Geräusch” – entscheidend auf das haptische Empfinden von translatorischen und rotatorischen Bedienelemente, auswirkt. Auch wenn sich die technische Beschreibung des “Klick-Geräuschs” als schwierig darstellt (TREIBER, 2011) und die Parametrisierung in Kombination mit haptischen Kenngrößen die Komplexität weiter erhöht, so hat dieser Aspekt der multimodalen Wahrnehmung eine große praktische Bedeutung.

Überspezifi-
kationen
vermeiden

Bei Experimenten zur Bestimmung von Schwellwerten werden wahrnehmbare Unterschiede ermittelt. Interessant wäre eine Untersuchung hinsichtlich der von den Nutzern akzeptierten Unterschiede. Wie auch GRUNWALD (2013) beklagt, entscheiden in der industriellen Praxis oft einzelne Personen oder kleine Expertenteams über die technische Spezifikation von Bedienelementen. Diese Experten sind in ihrer Wahrnehmung hinsichtlich der jeweiligen technischen Parameter häufig sensibilisiert, was zu einer verzichtbar restriktiven Spezifikation führen kann. Eine Überspezifikation führt praktisch immer zu einer Kostenerhöhung.

künstlich
erzeugtes
haptisches
Feedback

Viele Fragen gibt es bezüglich der technischen Beschreibung sowie der subjektiven Beurteilung von künstlich erzeugtem haptischen Feedback. Angetrieben durch die Entwicklungen in der Unterhaltungselektronik gewinnen Eingabegeräte mit einem künstlich erzeugten haptischen Feedback auch im automobilen Umfeld an Bedeutung. Ist es das Ziel, das haptische Feedback konventioneller mechanischer Bedienelemente zu imitieren oder sollten die neuen Freiheitsgrade kreativer eingesetzt werden?

Literatur

- Abel, D. & Bollig, A. (2006). *Rapid Control Prototyping*. Springer. doi:10.1007/3-540-29525-9
- Adelson, E. H. (1995). Checkershadow Illusion. Internetangebot. Zugriff 9. Oktober 2012, unter <http://persci.mit.edu/gallery/checkershadow>
- Allen, J. & Kleppner, D. (1992). *Sensory Communication* (Research Laboratory for Electronics (RLE) Progress Report Nr. 135). Massachusetts Institute of Technology. HDL: 1721.1/57216
- Amitay, S., Irwin, A., Hawkey, D. J. C., Cowan, J. A. & Moore, D. R. (2006). A comparison of adaptive procedures for rapid and reliable threshold assessment and training in naive listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119, 1616–1625. doi:10.1121/1.2164988
- Anguelov, N. (2009). *Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und Bedienfeldern für den Kfz-Innenraum* (Dissertation, Technischen Universität Dresden). URN: urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-24037
- Baird, J. C. & Noma, E. J. (1978). *Fundamentals of scaling and psychophysics*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Ballas, R. G., Pfeifer, G. & Werthschützky, R. (2009). *Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik* (2. Auflage). Springer. doi:10.1007/978-3-540-89320-2
- Basdogan, C., Ho, C.-H. & Srinivasan, M. A. (2001). Virtual environments for medical training: graphical and haptic simulation of laparoscopic common bile duct exploration. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 6(3), 269–285. doi:10.1109/3516.951365
- Beauregard, G. L., Srinivasan, M. A. & Durlach, N. I. (1995). The manual resolution of viscosity and mass. In *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division* (Band 55, 2, S. 657–662). Zugriff 25. März 2013, unter http://touchlab.mit.edu/publications/1995_001.pdf
- von Békésy, G. (1947). A new Audiometer. *Acta otolaryng*, 35, 411–422.
- Bergmann Tiest, W. M., Vrijling, A. C. L. & Kappers, A. M. L. (2010). Haptic Perception of Viscosity. In A. M. L. Kappers, J. B. F. van Erp, W. M. Bergmann Tiest & F. C. T. van der Helm (Hrsg.), *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations: International Conference, EuroHaptics 2010, Amsterdam, July 8-10, 2010. Proceedings*

- dings, Part I* (Band 6191, S. 29–34). Lecture Notes in Computer Science. Berlin. doi:10.1007/978-3-642-14064-8_5
- Beyer, L. & Weiss, T. (2001). Elementareinheiten des somatosensorischen Systems als physiologische Basis der taktil-haptischen Wahrnehmung. In M. Grunwald & L. Beyer (Hrsg.), *Der Bewegte Sinn: Grundlagen Und Anwendungen Zur Haptischen Wahrnehmung* (Kap. 2). Basel: Birkhäuser. Zugriff 1. März 2013, unter http://haptiklabor.uni-leipzig.de/buch/der_bewegte_sinn_birkhaeuser_2001.html
- Birbaumer, N. & Schmidt, R. F. (2006). *Biologische Psychologie* (6. Auflage). Berlin: Springer. doi:10.1007/3-540-30350-2
- Bolanowski, S. J. & Verrillo, R. T. (1982). Temperature and criterion effects in a somatosensory subsystem: a neurophysiological and psychophysical study. *Journal of Neurophysiology*, 48(3), 836–855.
- Börschlein, E.-M. (1994). *Untersuchung zum haptischen Komforteindruck ausgewählter Handstellteile in verschiedenen Personenkraftwagen* (Masterthesis, Katholischen Universität Eichstätt).
- Bortz, J. (2005). *Statistik: für Human- und Sozialwissenschaftler* (6. Auflage). Berlin: Springer.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation: für Human- und Sozialwissenschaftler* (4. Auflage). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-540-33306-7
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7. Auflage). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-12770-0
- Brodie, E. E. & Ross, H. E. (1984). Sensorimotor mechanisms in weight discrimination. *Attention, Perception, & Psychophysics (vor 2009 Perception & Psychophysics)*, 35(5), 477–481. doi:10.3758/BF03207502
- Brodie, E. E. & Ross, H. E. (1985). Jiggling a lifted weight does aid discrimination. *The American journal of physiology*, 98(3), 469–471.
- Brouwer, I. (2004). *Cost-performance trade-offs in haptic hardware design* (Masterthesis, University of British Columbia). HDL: 2429/15399
- Bubb, H. (2001). Haptik im Kraftfahrzeug. In T. Jürgensohn & K.-P. Timpe (Hrsg.), *Kraftfahrzeugführung* (Kap. 10, S. 155–175). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-56721-6
- Bubb, H. (2008). Produktergonomie. Vorlesungsskript.
- Bubb, H. & Schmidtke, H. (1993). Systemergonomie. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie* (Kap. 5). Hanser.
- Burdea, G. (1996). *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. John Wiley & Sons Inc.
- Buus, S. (2002). Psychophysical Methods and Other Factors that Affect the Outcome of Psychoacoustic Measurements. In L. Tranebjærg, J. Christensen-Dalsgaard,

-
- T. Andersen & T. Poulsen (Hrsg.), *Proceedings of 19th Danavox Symposium Genetics and the Function of the Auditory System* (S. 183–225). Rotterdam/Niederlande. Kopenhagen/Dänemark: The Danavox Jubilee Foundation.
- Cholewiak, S. A., Tan, H. Z. & Ebert, D. S. (2008). Haptic identification of stiffness and force magnitude. In *Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (S. 87–91). Reno/Nevada/USA. Zugriff 5. Januar 2012, unter https://engineering.purdue.edu/~hongtan/pubs/PDFfiles/C84_SCholewiakTanEbert_HS2008.pdf
- Ciba, S. (2008). *Erstellung einer Softwarebibliothek für Hörversuche: Programmkonzept und zu implementierende Testverfahren* (Magisterarbeit, Institut für Sprache und Kommunikation an der Technische Universität Berlin).
- Cohen, J. (1962). The statistical power of abnormal-social psychological research: A review. *Journal of Abnormal Social Psychology*, 65(3), 145–153. doi:10.1037/0003-066X.45.12.1304
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2. Auflage). Hillsdale/New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cohen, J. (1990). Things I Have Learned (So Far). *American Psychologist*, 45(12), 1304–1312. doi:10.1037/0003-066X.45.12.1304
- Cohen, J. (1994). The Earth Is Round ($p < .05$). *American Psychologist*, 49(12), 997–1003. doi:10.1037/0003-066X.49.12.997
- Cohen, M. S. (2008). Handedness Questionnaire. Internetangebot. Zugriff 23. November 2012, unter <http://www.brainmapping.org/shared/Edinburgh.php>
- Coles, T. R., Meglan, D. & John, N. W. (2011). The Role of Haptics in Medical Training Simulators: A Survey of the State of the Art. *IEEE Transactions on Haptics*, 4(1), 51–66. doi:10.1109/TOH.2010.19
- Colgate, J. E., Stanley, M. C. & Brown, J. M. (1995). Issues in the Haptic Display of Tool Use. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 1995*, 5.–9. August 1995 (Band 3, S. 140–145). Pittsburgh/Pennsylvania/USA. doi:IROS.1995.525875
- Cowles, M. & Davis, C. (1982). On the origins of the 0.05 level of significance. *American Psychologist*, (37), 553–558.
- Dellon, A. L. (1981). *Evaluation of Sensibility and Re-education of Sensation in the Hand*. Williams und Wilkins.
- DIN EN ISO 9241-910:2011. (2011 November). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion. (2011 November). Norm. Beuth-Verlag.
- Dixon, W. J. & Mood, A. M. (1948). A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data. *Journal of the American Statistical Association*, 43(241), 109–126. Zugriff 9. Februar 2012, unter <http://www.jstor.org/stable/2280071>

- Doerrner, C. (2004). *Entwurf eines elektromechanischen Systems für flexibel konfigurierbare Eingabefelder mit haptischer Rückmeldung* (Dissertation, Technische Universität Darmstadt). doi:10.1.1.53.2686. URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-4351
- Donath, A. (2002). Immersion und Alps entwickeln taktilen Feedback für Autos. Zugriff 13. April 2013, unter <http://www.golem.de/0204/19438.html>
- Duller, C. (2008). *Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS und R: Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch* (1. Auflage). Heidelberg: Physica-Verlag HD. doi:10.1007/978-3-7908-2060-7
- Durlach, N. I., Delhorne, L. A., Wong, A., Ko, W. Y., Rabinowitz, W. M. & Hollerbach, J. (1989). Manual discrimination and identification of length by the finger-span method. *Attention, Perception, & Psychophysics* (vor 2009 *Perception & Psychophysics*), 46(1), 29–38. doi:10.3758/BF03208071
- Ehrenstein, W. H. & Ehrenstein, A. (1999). Psychophysical Methods. In U. Windhorst & H. Johansson (Hrsg.), *Modern Techniques in Neuroscience Research* (Kap. 43, S. 1211–1241). Springer. Zugriff 7. Februar 2012, unter <http://www.uni-leipzig.de/~isp/isp/history/texts/PSYPHY-M.PDF>
- Eid, M., Gollwitzer, M. & Schmitt, M. (2010). *Statistik und Forschungsmethoden*. Weinheim: Beltz.
- Engen, T. (1972) In J. W. Kling & L. A. Riggs (Hrsg.), *Woodworth & Schlosberg's Experimental Psychology: Band 1. Sensation and Perception* (3. Auflage, Bände 2). Holt Rinehart & Winston.
- Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I. & Tutz, G. (2010). *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse* (7. Auflage). Springer.
- Falmagne, J.-C. (1986). Psychophysical Measurement and Theory. In K. R. Boff, L. Kaufman & J. P. Thomas (Hrsg.), *Handbook of Perception and Human Performance: Band 1. Sensory Processes and Perception* (Kap. 1, Bände 2). Wiley-Interscience.
- Fanger, P. O. (1973). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Färber, M., Hummel, F., Gerloff, C. & Handels, H. (2009). Virtual Reality Simulator for the Training of Lumbar Punctures. *Methods of Information in Medicine*, 48(5), 493–501. doi:10.3414/ME0566
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G. & Bucher, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191. doi:10.3758/BF03193146
- Faul, F., Erdfelder, E., Bucher, A. & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149–1160. doi:10.3758/BRM.41.4.1149
- Fechler, R. (2012). *Untersuchungen zur Hubwahrnehmung bei Tastschaltern* (Masterprojekt, Hochschule Heilbronn).

-
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik* (Bände 2). Leipzig: Breitkopf & Härtel.
- Field, A. (2009). *Discovering Statistics Using SPSS* (3. Auflage). Sage. Zugriff 29. Juni 2012, unter <http://www.sagepub.com/booksProdDesc.nav?prodId=Book233183&>
- Fisher, R. A. (1925). *Statistical Methods for Research Workers*. Edinburgh: Oliver und Boyd.
- García-Pérez, M. A. (1998). Forced-choice staircases with fixed step sizes: asymptotic and small-sample properties. *Vision Research*, 38(12), 1861–1881. doi:10.1016/S0042-6989(97)00340-4
- García-Pérez, M. A. (2001). Yes-No Staircases with Fixed Step Sizes: Psychometric Properties and Optimal Setup. *Optometry & Vision Science*, 78(1), 56–64. doi:10.1016/S0042-6989(97)00340-4
- García-Pérez, M. A. (2002). Properties of some variants of adaptive staircases with fixed step sizes. *Spatial Vision*, 15(3), 303–321. doi:10.1163/15685680260174056
- García-Pérez, M. A. (2009). Denoising forced-choice detection data. *Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 63(1), 75–100. doi:10.1348/000711009X424057
- Gelfand, S. A. (2009). *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics* (5. Auflage). Informa Healthcare.
- Gescheider, G. A. (1966). Resolving of successive clicks by the ears and skin. *Journal of Experimental Psychology*, 71(3), 378–381. doi:10.1037/h0022950
- Gescheider, G. A. (1997). *Psychophysics: The Fundamentals* (3. Auflage). Lawrence Erlbaum Associates. Google Books: gAftxKQI1mAC
- Gescheider, G. A., Beiles, E. J., Checkosky, C. M., Bolanowski, S. J. & Verrillo, R. T. (1994). The Effects of Aging on Information-Processing Channels in the Sense of Touch: II. Temporal Summation in the P Channel. *Somatosensory and Motor Research*, 11(4), 359–365. doi:10.3109/08990229409028879
- Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J., Hall, K. E. & Verrillo, R. T. (1994). The Effects of Aging on Information-Processing Channels in the Sense of Touch: I. Absolute Sensitivity. *Somatosensory and Motor Research*, 11(4), 345–357. doi:10.3109/08990229409028878
- Gescheider, G. A., Edwards, R. R., Lackner, E. A., Bolanowski, S. J. & Verrillo, R. T. (1996). The Effects of Aging on Information-Processing Channels in the Sense of Touch: III. Differential Sensitivity to Changes in Stimulus Intensity. *Somatosensory and Motor Research*, 13(1), 73–80. doi:10.3109/08990229609028914
- Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J. & Verrillo, R. T. (2004). Some characteristics of tactile channels. *Behavioural Brain Research*, 148(1–2), 35–40. doi:10.1016/S0166-4328(03)00177-3

- Gescheider, G. A., Wright, J. H. & Verrillo, R. T. (2009). *Information-Processing Channels in the Tactile Sensory System: A Psychophysical and Physiological Analysis*. Taylor & Francis.
- Gleich, C. (2012). Finger weg, Augen geradeaus: Infotainment-Bedienkonzepte im Auto. *c't - Magazin für Computertechnik*, 14, 116-123. Zugriff 17. März 2013, unter http://www.heise.de/artikel-archiv/ct/2012/14/116_Finger-weg-Augen-geradeaus
- Goksel, O., Sapchuk, K. & Salcudean, S. E. (2011). Haptic Simulation of Needle and Probe Interaction with Tissue for Prostate, Brachytherapy Training. In *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE*, 21.-24. Juni 2011 (S. 7-12). Istanbul/Türkei. doi:10.1109/WHC.2011.5945453
- Grassi, M. & Soranzo, A. (2009). MLP: A MATLAB toolbox for rapid and reliable auditory threshold estimation. *Behavior Research Methods*, 41(1), 20-28. doi:10.3758/BRM.41.1.20
- Green, D. M. (1990a). Stimulus selection in adaptive psychophysical procedures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87(6), 2662-2674. doi:10.1121/1.399058
- Green, D. M. (1990b). Stimulus selection in adaptive psychophysical procedures (**Erratum**). *Journal of the Acoustical Society of America*, 88, 2486. doi:10.1121/1.400366
- Grunwald, M. (2001). Erkenntnistheoretische und historische Aspekte. In M. Grunwald & L. Beyer (Hrsg.), *Der Bewegte Sinn: Grundlagen Und Anwendungen Zur Haptischen Wahrnehmung* (Kap. 1). Basel: Birkhäuser. Zugriff 1. März 2013, unter http://haptiklabor.uni-leipzig.de/buch/der_bewegte_sinn_birkhaeuser_2001.html
- Grunwald, M. (Hrsg.). (2008). *Human Haptic Perception: Basics and Applications*. Basel: Birkhäuser. doi:10.1007/978-3-7643-7612-3
- Grunwald, M. (2009). Der Tastsinn im Griff der Technikwissenschaften? Herausforderungen und Grenzen aktueller Haptikforschung. *Internet-Zeitschrift des Leibniz-Instituts für interdisziplinäre Studien e. V. (LIFIS)*. Zugriff 1. Februar 2013, unter http://www.leibniz-institut.de/archiv/grunwald_martin_09_01_09.pdf
- Grunwald, M. (2013, 24. April). Haptik-Design im Auto: Touchscreens sind unmännlich. Zugriff 25. April 2013, unter <http://www.spiegel.de/auto/fahrkultur/interview-mit-martin-grunwald-ueber-haptik-design-im-auto-a-895416.html>
- Hagendorf, H., Krummenacher, J., Müller, H.-J. & Schubert, T. (2011). *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-12710-6
- Hajian, A. Z. (1997). *A Characterization of the Mechanical Impedance of Human Hands* (Dissertation, Harvard University). Zugriff 16. April 2013, unter <http://biorobotics.harvard.edu/pubs/ahthesis.pdf>
- Hampel, T. (2011). *Untersuchungen und Gestaltungshinweise für adaptive multifunktionale Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung* (Dissertation, Universität Stuttgart). URN: urn:nbn:de:bsz:93-opus-66142

-
- Handwerker, H. O. (2006). Allgemeine Sinnespsychologie. In R. F. Schmidt & H.-G. Schaible (Hrsg.), *Neuro- und Sinnesphysiologie* (Kap. 7). Berlin: Springer. doi:10.1007/3-540-29491-0
- Harvey, L. O. (1986). Efficient estimation of sensory thresholds. *Behavior Research Methods*, 18(6), 623–632. doi:10.3758/BF03201438
- Harvey, L. O. (2011). *Psychology of Perception - Psychology 4165 - Spring 2011 - Laboratory 1 - Noisy Representations*. Department of Psychology and Neuroscience/-University of Colorado at Boulder. Skriptum zu einem Laborversuch. Zugriff 29. Dezember 2011, unter http://psych.colorado.edu/~lharvey/P4165/P4165_2011_Spring/2011_Spring_pdf_Lab_Handouts/P4165_Lab1.pdf
- Hasser, C. J. & Cutkosky, M. R. (2002). System Identification of the Human Hand Grasping a Haptic Knob. In *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002*, 24.–25. März 2002 (S. 171–180). Orlando/Florida/USA. IEEE Computer Society. doi:10.1109/HAPTIC.2002.998957
- Hatzfeld, C. (2013). *Experimentelle Analyse der menschlichen Kraftwahrnehmung als ingenieurtechnische Entwurfsgrundlage für haptische Systeme* (Dissertation, Technische Universität Darmstadt). URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-33924
- Hayward, V. & Armstrong, B. (2000). A New Computational Model of Friction Applied to Haptic Rendering. In P. Corke & J. Trevelyan (Hrsg.), *Experimental Robotics VI* (Band 250, S. 403–412). Berlin: Springer. doi:10.1007/BFb0119418
- Hayward, V. & Astley, O. R. (1996). Performance Measures for Haptic Interfaces. In T. Kanade & R. Paul (Hrsg.), *Robotics Research: The 7th International Symposium* (S. 195–207). Springer.
- Hayward, V. & MacLean, K. E. (2007 Dezember). Do it yourself haptics: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14(4), 88–104. doi:10.1109/M-RA.2007.907921
- Hayward, V., Astley, O. R., Cruz-Hernandez, M., Cruz-Hernandez, M., Grant, D. & Robles-de-la-Torre, G. (2004). Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24(1), 16–29. doi:10.1108/02602280410515770
- Hedges, L. V. (1981). Distribution Theory for Glass's Estimator of Effect size and Related Estimators. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 6(2), 107–128. doi:10.3102/10769986006002107
- Hesse, A. (1986). Comparison of several psychophysical procedures with respect to threshold estimates, reproducibility and efficiency. *Acustica/Acta Acustica united with Acustica*, 59, 263–273.
- ISO 26022:2010-09. (2010 September). Road vehicles – Ergonomic aspects of transport information and control systems – Simulated lane change test to assess in-vehicle secondary task demand. (2010 September). Norm. Beuth-Verlag. Zugriff 26. August 2012, unter <http://www.beuth.de/de/norm/iso-26022/135010010>

- Jandura, L. & Srinivasan, M. A. (1994). Experiments on Human Performance in Torque Discrimination and Control. *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Dynamic Systems and Control*, 55(1), 369–375.
- Janke, J. (2010a). *Entwicklung und Implementierung einer Ansteuerstrategie für elektrodynamische Linearmotoren als haptische Simulatoren* (Studienarbeit, Hochschule Heilbronn).
- Janke, J. (2010b). *Probandenversuch: Vorbereitung und Durchführung eines Probandenvorversuches zur Ermittlung von Einflussfaktoren bei Untersuchungen mit dem translatorischen Haptiksimulator* (Laborarbeit, Hochschule Heilbronn).
- Janschek, K. (2010). *Systementwurf mechatronischer Systeme*. Springer. doi:10.1007/978-3-540-78877-5
- Jenkins, W. O. (1947a). The tactual discrimination of shapes for coding aircraft type controls. In P. M. Fitts (Hrsg.), *Psychological research on equipment design: Report No. 19* (Kap. 14, S. 199–205). Army Air Force.
- Jenkins, W. O. (1947b August). *Investigation of shapes for use in coding aircraft control knobs* (Memorandum Report Nr. TSEAA-694-4). United States Air Force (USAF), Headquarters Air Mobility Command (AMC), Engineering Division.
- Jenkins, W. O. (1947c August). *A follow-up investigation of shapes for use in coding aircraft control knobs* (Memorandum Report Nr. TSEAA-694-4A). United States Air Force (USAF), Headquarters Air Mobility Command (AMC), Engineering Division.
- Jenkins, W. O. (1947d September). *A further investigation of shapes for use in coding aircraft control knobs* (Memorandum Report Nr. TSEAA-694-4B). United States Air Force (USAF), Headquarters Air Mobility Command (AMC), Engineering Division.
- Jones, L. A. & Hunter, I. W. (1990). A perceptual analysis of stiffness. *Experimental Brain Research*, 79(1), 150–156. doi:10.1007/BF00228884
- Jones, L. A. & Hunter, I. W. (1993). A perceptual analysis of viscosity. *Experimental Brain Research*, 94(2), 343–351. doi:10.1007/BF00230304
- Jones, L. A. & Lederman, S. J. (2006). *Human Hand Function*. Oxford University Press.
- Kaernbach, C. (1991). Simple adaptive testing with the weighted up-down method. *Attention, Perception, & Psychophysics (vor 2009 Perception & Psychophysics)*, 49(3), 227–229. doi:10.3758/BF03214307
- Kaernbach, C. (2001). Adaptive threshold estimation with unforced-choice tasks. *Attention, Perception, & Psychophysics (vor 2009 Perception & Psychophysics)*, 63(8), 1377–1388. doi:10.3758/BF03194549
- Katz, D. (1925). *Der Aufbau der Tastwelt*. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth. Zugriff 3. März 2013, unter http://vordenker.de/dkatz/dkatz_tastwelt_vd.pdf
- Kell, C. A., von Kriegstein, K., Rösler, A., Kleinschmidt, A. & Laufs, H. (2005). The Sensory Cortical Representation of the Human Penis: Revisiting Somatotopy in the

-
- Male Homunculus. *The Journal of Neuroscience*, 25(25), 5984–5987. doi:10.1523/JNEUROSCI.0712-05.2005
- Kern, T. A. (Hrsg.). (2009). *Entwicklung haptischer Geräte: Ein Einstieg für Ingenieure*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-540-87644-1
- Kern, T. A. & Meckel, O. (2009). Strukturen haptischer Systeme. In T. A. Kern (Hrsg.), *Entwicklung haptischer Geräte: Ein Einstieg für Ingenieure* (Kap. 5). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-540-87644-1
- Kingdom, F. A. A. & Prins, N. (2010a). Palamedes: Matlab routines for analyzing psychophysical data. Zugriff 13. Februar 2012, unter <http://www.palamedestoolbox.org/>
- Kingdom, F. A. A. & Prins, N. (2010b). *Psychophysics: A Practical Introduction* (1. Auflage). Academic Press.
- Klein, S. A. & Macmillan, N. A. (Hrsg.). (2001 November). Attention, Perception, & Psychophysics (Sonderausgabe). *Special Issue: Psychometric functions and adaptive methods, New York*, 63.8, 1277–1455. Zugriff 30. Januar 2012, unter <http://www.springerlink.com/content/1943-3921/63/8/>
- Kling, J. W. & Riggs, L. A. (Hrsg.). (1972). *Woodworth & Schlosberg's Experimental Psychology: Band 1. Psychophysics: I. Discrimination and Detection* (3. Auflage, Bände 2). Holt Rinehart & Winston.
- Knowles, W. B. & Sheridan, T. B. (1966). The 'Feel' of Rotary Controls: Friction and Inertia. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 8(3), 209–215. doi:10.1177/001872086600800303
- Kollmeier, B., Gilkey, R. H. & Sieben, U. K. (1988). Adaptive staircase techniques in psychoacoustics: A comparison of human data and a mathematical model. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83(5), 1852–1862. doi:10.1121/1.396521
- Kosaka, H. & Watanabe, K. (1996). *Reaction Forces of Switches and Push Feeling* (Automotive Design Advancements in Human Factors, SAE Technical Paper Nr. 960945). Warrendale/Pennsylvania/USA: Society of Automotive Engineers. doi:10.4271/960945
- Kreifeldt, J. G. & Chuang, M.-C. (1979). Moment of inertia: Psychophysical study of an overlooked sensation. *Science*, 206(4418), 588–590. Zugriff 25. März 2013, unter <http://library.worldtracker.org/Science/Science%20Magazine/science%20magazine%201978-1979/>
- Kühner, M. & Wild, J. (2010). Implementierung einer aktiven Dämpfung bei einem Gleichstrommotor zur Untersuchung der haptischen Wahrnehmung von viskoser Reibung. In *Proceedings of Hefei-Heilbronn Workshop 2010 – Research and Education in Mechatronics*, 17.–18. Juni 2010. Heilbronn.
- Kühner, M., Wild, J. & Bubb, H. (2011). Haptische Konstanzleistung bei Drucktastern. *Ergonomie aktuell*, 12, 28–32. Zugriff 17. Januar 2012, unter <http://www.lfe.mw.tum.de/de/institute/newspaper>

- Kühner, M., Wild, J., Bubb, H., Bengler, K. & Schneider, J. (2011). Haptic Perception of Viscous Friction of Rotary Switches. In *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE*, 21.-24. Juni 2011 (S. 587-591). Istanbul/Türkei. doi:10.1109/WHC.2011.5945551
- Kühner, M., Bubb, H., Bengler, K. & Wild, J. (2012). Adaptive Verfahren in der Psychophysik: Effiziente Bestimmung von Absolut- und Unterschiedsschwellen. *Ergonomie aktuell*, 13, 26-30. Zugriff 10. März 2013, unter <http://www.lfe.mw.tum.de/de/institute/newspaper>
- Kühner, M., Bubb, H., Bengler, K. & Wild, J. (2013). Statistische Versuchsauswertung in der Anwendung: Eine Einführung in Theorie und Praxis. Vortragshandout, Lehrstuhlseminar vom 11.01.2013, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München. Zugriff 17. März 2013, unter [http://manuelkuehner.de/Downloads/Statistik.Kuehner.\(2013\)_2013-03-01.pdf](http://manuelkuehner.de/Downloads/Statistik.Kuehner.(2013)_2013-03-01.pdf)
- LaMotte, R. H. & Srinivasan, M. A. (1991). Surface microgeometry: Tactile perception and neural encoding. In O. Franzen & J. Westman (Hrsg.), *Information Processing in the Somatosensory System* (Kap. 4, S. 49-58). London: MacMillan. Zugriff 27. März 2013, unter http://www.rle.mit.edu/touchlab/publications/1991_001.pdf
- LaMotte, R. H., Whitehouse, G. M., Robinson, C. J. & Davis, F. (1983). A tactile stimulator for controlled movements of textured surfaces across the skin. *Journal of electrophysiological techniques (wurde von Brain Research Bulletin - ISSN 0361-9230 -übernommen)*, 10(1), 1-17.
- Leek, M. R. (2001). Adaptive procedures in psychophysical research. *Attention, Perception, & Psychophysics (Sonderausgabe)*, 63(8), 1279-1292. doi:10.3758/BF03194543
- Levitt, H. (1971). Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49, 467-477. doi:10.1121/1.1912375
- Lin, M. C. & Otaduy, M. A. (Hrsg.). (2008). *Haptic Rendering: Foundations, Algorithms, and Applications*. A K Peters.
- Lindsell, C. J. & Griffin, M. J. (2003). Normative vibrotactile thresholds measured at five European test centres. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 76(7), 517-528. doi:10.1007/s00420-003-0444-7
- Lutz, H. & Wendt, W. (2010). *Taschenbuch der Regelungstechnik* (8. Auflage). Verlag Harri Deutsch.
- MacLean, K. E. & Hayward, V. (2008 März). Do It Yourself Haptics: Part II. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 15(1), 104-119. doi:10.1109/M-RA.2007.914919
- Macmillan, N. A. & Creelman, C. D. (2004). *Detection Theory: A User's Guide* (2. Auflage). Routledge.
- Madigan, R. & Williams, D. (1987). Maximum-likelihood psychometric procedures in two-alternative forced-choice: Evaluation and recommendations. *Attention, Perception, & Psychophysics (vor 2009 Perception & Psychophysics)*, 42(3), 240-249. doi:10.3758/BF03203075

-
- Marvit, P., Florentine, M. & Buus, S. (2003). A comparison of psychophysical procedures for level-discrimination thresholds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113, 3348–3361. doi:10.1121/1.1570445
- McKee, S. P., Klein, S. A. & Teller, D. Y. (1985). Statistical properties of forced-choice psychometric functions: Implications of probit analysis. *Attention, Perception, & Psychophysics (vor 2009 Perception & Psychophysics)*, 37(4), 286–298. doi:10.3758/BF03211350
- Morioka, M. & Griffin, M. J. (2002). Dependence of vibrotactile thresholds on the psychophysical measurement method. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 75(1), 78–84. doi:10.1007/s004200100280
- Myers, D. G. (2008). *Psychologie* (2. Auflage) (M. Reiss, Übers.). Berlin: Springer. Google Books: DFNaiswz3eUC
- Neyman, J. & Pearson, E. S. (1928a). On the Use and Interpretation of Certain Test Criteria for Purposes of Statistical Inference: Part I. *Biometrika*, 20A(1/2), 175–240. doi:10.1093/biomet/20A.1-2.175
- Neyman, J. & Pearson, E. S. (1928b). On the Use and Interpretation of Certain Test Criteria for Purposes of Statistical Inference: Part II. *Biometrika*, 20A(3/4), 263–294. doi:10.1093/biomet/20A.3-4.263
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. doi:10.1016/0028-3932(71)90067-4
- Osumi, Y., Inuzuka, Y. & Ito, H. (1990). Operability of car audio controls. In M. E. Wiklund (Hrsg.), *Proceedings of the Human Factors Society 34th Annual Meeting: Countdown to the 21st Century* (S. 618–622). Orlando/Florida/USA. Santa Monica/Kalifornien/USA.
- Otto, S. (2008). *Vergleichende Simulation adaptiver, psychometrischer Verfahren zur Schätzung von Wahrnehmungsschwellen* (Magisterarbeit, Institut für Sprache und Kommunikation an der Technische Universität Berlin). Zugriff 12. Januar 2012, unter http://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/abschlussarbeiten/2008/OttoStefanie_MagA.pdf
- Otto, S. & Weinzierl, S. (2009). Comparative simulations of adaptive psychometric procedures. In A. S. of the Netherlands (NAG) & G. A. S. (DEGA) (Hrsg.), *Proceedings of the International Conference on Acoustics NAG/DAGA 2009* (S. 1276–1279). Rotterdam/Niederlande.
- Pang, X.-D., Tan, H. Z. & Durlach, N. I. (1991). Manual discrimination of force using active finger motion. *Attention, Perception, & Psychophysics (vor 2009 Perception & Psychophysics)*, 49(6), 531–540. doi:10.3758/BF03212187
- Paré, M., Smith, A. M. & Rice, F. L. (2002). Distribution and terminal arborizations of cutaneous mechanoreceptors in the glabrous finger pads of the monkey. *Journal of Comparative Neurology*, 445(4), 347–359. doi:10.1002/cne.10196

- Paré, M., Behets, C. & Cornu, O. (2003). Paucity of presumptive ruffini corpuscles in the index finger pad of humans. *Journal of Comparative Neurology*, 456(3), 260–266. doi:10.1002/cne.10519
- Paulig, J. (2013). *Grundlagen der haptischen Wahrnehmung bei Betätigung von Drehstellern (eingereichte Dissertation)* (Dissertation, Technische Universität Braunschweig).
- Paulig, J., Gohlke, F., Schmidt, G. & Lemmer, K. (2011). Grundlagen der haptischen Wahrnehmung bei Betätigung von Drehstellern. In S. Schmid, M. Elepfandt, J. Adenauer & A. Lichtenstein (Hrsg.), *Reflexionen und Visionen der Mensch-Maschine-Interaktion: Aus der Vergangenheit lernen, Zukunft gestalten*, 5.–7. Oktober 2011 (Band 33, S. 166–167). Fortschritt-Berichte. 9. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Berlin. VDI Verlag.
- Paulig, J., Schmidt, G. & Lemmer, K. (2011). Wertigkeit haptisch erleben: Umsetzung einer markenspezifischen Betätigungshaptik von Bedienelementen. In V. D. Ingenieure (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert: Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit*, 8.–9. November 2011 (Band 2134, S. 235–246). VDI-Berichte. Braunschweig. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Penfield, W. & Rasmussen, T. (1950). *The Cerebral Cortex of Man: A Clinical Study of Localization of Function*. New York: The Macmillan Comp.
- R Development Core Team. (2011). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Zugriff 27. Oktober 2012, unter <http://www.R-project.org/>
- Rammsayer, T. & Sachsse, S. (1990). Zur Anwendung Adaptiver Verfahren in psychophysischen Experimenten. *Psychologische Beiträge*, 32(3-4), 361–379.
- Rank, M., Schauß, T., Peer, A., Hirche, S. & Klatzky, R. L. (2012). Masking Effects for Damping JND. In P. Isokoski & J. Springare (Hrsg.), *Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication: International Conference, EuroHaptics 2012, Tampere, Finland, June 13-15, 2012 Proceedings, Part II* (Band 7283, S. 145–150). Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-31404-9_25
- Reisinger, J. (2008). Haptische Konstanzleistung bei Drucktastern. *Ergonomie aktuell*, 09, 40–44. Zugriff 9. Oktober 2012, unter <http://www.lfe.mw.tum.de/de/institute/newspaper>
- Reisinger, J. (2009). *Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen* (Dissertation, Technische Universität München). URN: urn:nbn:de:bvb:91-diss-20080622-654165-1-9
- Reisinger, J. & Wild, J. (2008). Haptische Bedienschnittstelle. In A. Meroth & B. Tolg (Hrsg.), *Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug: Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen*. Vieweg. doi:10.1007/978-3-8348-9430-4
- Reisinger, J., Wild, J., Mauter, G. & Bubb, H. (2005). Mechatronic tools in haptic research for automotive applications. In *6th International Workshop on Research and*

Education in Mechatronics2005 - Proceedings of REM2005, 30. Juni–1. Juli 2005 (S. 293–298).

- Riva, G. (2003). Applications of Virtual Environments in Medicine. *Methods of Information in Medicine*, 42(5), 524–534. Zugriff 5. Mai 2013, unter <http://www.schattauer.de/de/magazine/uebersicht/zeitschriften-a-z/methods/contents/archive>
- Ross, H. E. & Benson, A. J. (1986). The Weber fraction for moment of inertia. In B. Berglund, U. Berglund & R. Teghtsoonian (Hrsg.), *Fechner Day '86: Proceedings of the Second Annual Meeting of the International Society for Psychophysics* (S. 71–76). Cassis/Frankreich. Stockholm: International Society for Psychophysics (ISP).
- Sachs, L. & Hedderich, J. (2006). *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R* (12. Auflage). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-540-32161-3
- Saddik, A. E., Orozco, M., Eid, M. & Cha, J. (2011). *Haptics Technologies: Bringing Touch to Multimedia*. Springer.
- Samur, E. (2010). *Systematic Evaluation Methodology and Performance Metrics for HapticInterfaces* (Dissertation, School of Engineering (STI)/Insitute of Microengineering (IMT)/Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne (EPFL)). doi:10.5075/epfl-thesis-4648
- Schlauch, R. S. & Rose, R. M. (1990). Two-, three-, and four-interval forced-choice staircase procedures: Estimator bias and efficiency. *Journal of the Acoustical Society of America*, 88(2), 732–740. doi:10.1121/1.399776
- Schmidtke, H. (Hrsg.). (1993). *Ergonomie* (3. Auflage). Hanser.
- Schröder, D. (2009). *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-540-89613-5
- Schröder, D. (2010). *Intelligente Verfahren*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-11398-7
- Sendler, J. (2008). *Entwicklung und Gestaltung variabler Bedienelemente für ein Bedien- und Anzeigesystem im Fahrzeug* (Dissertation, Technische Universität Dresden Maschinenwesen). URN: urn:nbn:de:bsz:14-ds-1209102371614-58070
- Seow, K. (1988). Physiology of Touch, Grip and Gait. In J. G. Webster (Hrsg.), *Tactile Sensing for Robotics and Medicine* (S. 13–40). John Wiley & Sons Inc.
- Shelton, B. R., Picardi, M. C. & Green, D. M. (1982). Comparison of three adaptive psychophysical procedures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 71(6), 1527–1533. doi:10.1121/1.387806
- Sherrick, C. E. & Craig, J. C. (1982). The psychophysics of touch. In W. Schiff & E. Foulke (Hrsg.), *Tactual Perception: A Sourcebook* (S. 55–81). Cambridge University Press.

- Shimoga, K. B. (1993). A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation. II. Finger touch feedback. In *Virtual Reality Annual International Symposium* (S. 271–279). doi:10.1109/VRAIS.1993.380769
- Siciliano, B. & Khatib, O. (Hrsg.). (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer. doi:10.1007/978-3-540-30301-5
- Sincock, B. P. (2008). *Clinical applicability of adaptive speech testing: a comparison of the administration time, accuracy, efficiency and reliability of adaptive speech tests with conventional speech audiometry* (Masterthesis, University of Canterbury). HDL: 10092/2157
- Sixtl, F. (1982). *Messmethoden der Psychologie: Theoretische Grundlagen und Probleme* (2. Auflage). Beltz.
- Strasburger, H. (1995/2012). Software for visual psychophysics: an overview. Internetangebot. Zugriff 31. Januar 2012, unter http://www.hans.strasburger.de/psy_soft.html
- Strasburger, H. (2001a). Converting Between Measures of Slope of the Psychometric. *Attention, Perception, & Psychophysics (Sonderausgabe)*, 63(8), 1348–1355. doi:10.3758/BF03194547
- Strasburger, H. (2001b November). Invariance of the psychometric function for character recognition across the visual field. *Attention, Perception, & Psychophysics (Sonderausgabe)*, 63(8), 1356–1376. doi:10.3758/BF03194548
- Strasburger, H., Rentschler, I. & Jüttner, M. (2011). Peripheral vision and pattern recognition: A review. *Journal of Vision*, 11(5), 87–106. doi:10.1167/11.5.13
- Swindells, C. E. (2007). *Incorporating Affect into the Design of 1-D Rotary Physical Controls* (Dissertation, University of British Columbia). Zugriff 14. März 2012, unter <http://webhome.cs.uvic.ca/~colinedw/publications.htm>
- Swindells, C. E., MacLean, K. E. & Booth, K. S. (2009). Designing for Feel: Contrasts between Human and Automated Parametric Capture of Knob Physics. *IEEE Transactions on Haptics*, 2, 200–211. doi:10.1109/TOH.2009.23
- Tan, H. Z. (1996). *Information Transmission with a Multi-Finger Tactual Display* (Dissertation, Department of Electrical Engineering und Computer Science/Massachusetts Institute of Technology). Zugriff 2. Januar 2012, unter <https://engineering.purdue.edu/~hongtan/pubs/PhDThesis/>
- Tan, H. Z. (1997). Identification Of Sphere Size Using The PHANToM™: Towards A Set Of Building Blocks For Rendering Haptic Environment. In *In Proceedings of the Sixth (6th) International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (Band 61, S. 197–203). Dallas/Texas/USA. New York: American Society of Mechanical Engineers (ASME) Dynamic Systems und Control Division. Zugriff 2. Januar 2012, unter https://engineering.purdue.edu/~hongtan/pubs/PDFfiles/C22_Tan_ASME1997.pdf

-
- Tan, H. Z., Yang, S., Pizlo, Z., Buttolo, P. & Johnston, M. (2008). Manual Detection of Spatial and Temporal Torque Variation through a Rotary Switch. *IEEE Transactions on Haptics*, 1(2), 96–107. doi:10.1109/TOH.2008.15
- Tan, H. Z., Reed, C. M. & Durlach, N. I. (2010). Optimum Information Transfer Rates for Communication through Haptic and Other Sensory Modalities. *IEEE Transactions on Haptics*, 3(2), 98–108. doi:10.1109/TOH.2009.46
- Tan, H. Z., Eberman, B., Srinivasan, M. A. & Cheng, B. (1994). Human Factors For The Design Of Force-Reflecting Haptic Interfaces. In *Proceedings of the Third (3rd) International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, American Society of Mechanical Engineers Dynamic Systems and Control Division* (Band 55, 1, S. 353–359). Zugriff 25. März 2013, unter https://engineering.purdue.edu/~hongtan/pubs/PDFfiles/C15_Tan_ASME1994.pdf
- Tan, H. Z., Durlach, N. I., Beauregard, G. L. & Srinivasan, M. (1995). Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues. *Attention, Perception, & Psychophysics* (vor 2009 *Perception & Psychophysics*), 57(4), 495–510. doi:10.3758/BF03213075
- Tan, H. Z., Srinivasan, M. A., Reed, C. M. & Durlach, N. I. (2007). Discrimination and identification of finger joint-angle position using active motion. *ACM Transactions on Applied Perception*, 4(2). doi:10.1145/1265957.1265959
- Templeton, C. A. (2012). *Cutaneous sensitivity in unilateral trans-tibial amputees* (Masterthesis, University of Guelph). HDL: 10214/3856
- Treede, R.-D. (2007). Das somatosensorische System. In R. F. Schmidt & F. Lang (Hrsg.), *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie* (Kap. 14). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-540-32910-7
- Treiber, A. S. (2011). *Design and Benchmarking of Acoustic Feedback in Human Machine Interface* (Dissertation, Slovak University of Technology in Bratislava). Zugriff 7. April 2013, unter <http://www.ktl.elf.stuba.sk/~gregor/PhD/Alex.pdf>
- Treutwein, B. (1995). Adaptive Psychophysical Procedures. *Vision Research*, 35(17), 2503–2522. doi:10.1016/0042-6989(95)00016-S
- Tubiana, R. (1984). Architecture and functions of the hand. In R. Tubiana, J. M. Tomine & E. Mackin (Hrsg.), *Examination of the hand and upper limb*. Saunders (W.B.) Co Ltd.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Pearson.
- Überle, M.-W. (2006). *Design, Control, and Evaluation of a Family of Kinesthetic Haptic Interfaces* (Dissertation, Technische Universität München). URN: urn:nbn:de:bvb:91-diss20061106-1718313791
- Ulrich, R. & Miller, J. (2004 April). Threshold estimation in two-alternative forced-choice (2AFC) tasks: The Spearman-Kärber method. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 66(3), 517–533. doi:10.3758/BF03194898

- Urban, F. M. (1908). *The application of statistical methods to the problems of psychophysics* (L. Witmer, Hrsg.). Experimental Studies in Psychology and Pedagogy. Philadelphia: Psychological Clinic Press. Google Books: saKYVpMfqAUC
- Vallbo, A. B., Olausson, H., Wessberg, J. & Kakuda, N. (1995). Receptive field characteristics of tactile units with myelinated afferents in hairy skin of human subjects. *Journal of Physiology*, 483(3), 783–795. Zugriff 1. März 2013, unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1157818/>
- Vallery, H. (2010). *Haptische Regelung eines Rehabilitationsroboters*. Sensory-Motor Systems Lab/Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich. Skriptum zu einem Praktikumsversuch. Zugriff 28. September 2011, unter http://www.sms.mavt.ethz.ch/education/Praktikum_Reharobotik_SMS_WS10.pdf
- Verrillo, R. T. (1963). Effect of Contactor Area on the Vibrotactile Threshold. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35(12), 1962–1966. doi:10.1121/1.1918868
- Verrillo, R. T. (1966). Effect of spatial parameters on the vibrotactile threshold. *Journal of Experimental Psychology*, 71(4), 570–575. doi:10.1037/h0023009
- Verrillo, R. T. (1979). Comparison of vibrotactile threshold and suprathreshold responses in men and women. *Attention, Perception, & Psychophysics (vor 2009 Perception & Psychophysics)*, 26, 20–24. doi:10.3758/BF03199857
- Vlachos, K. & Papadopoulos, E. (2003). Design and implementation of a haptic device for training in urological operations. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(5), 801–809. doi:10.1109/TRA.2003.817064
- Weber, E. H. (1834). *De Pulsu, Resorptione, Auditu Et Tactu: Annotationes Anatomicae et Physiologicae*. Leipzig: Koehler.
- Weber, E. H. (1835). Ueber den Tastsinn. *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin*, 152–159. Zugriff 5. März 2012, unter <http://vlp.mpiwg-berlin.mpg.de/references?id=lit29424>
- Weinstein, S. (1962). Tactile sensitivity of the phalanges. *Perceptual and Motor Skills*, 14(3), 351–354. doi:10.2466/pms.1962.14.3.351
- Weir, D. W. (2003). *Switch Characterization and the Haptic Profile* (Masterthesis, Northwestern University). Zugriff 6. April 2013, unter <http://lims.mech.northwestern.edu/papers/weir03/WeirMasters.pdf>
- Weir, D., Peshkin, M., Colgate, J. E., Rankin, P. B. J. & Johnston, M. (2004). Switch Characterization and the Haptic Profile. In *12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS '04. Proceedings* (S. 186–193). doi:10.1109/HAPTIC.2004.1287195
- Weisstein, E. W. (2012). Noncentral Student's t-Distribution. Zugriff 12. August 2012, unter <http://mathworld.wolfram.com/NoncentralStudentst-Distribution.html>

-
- Wetherill, G. B. & Levitt, H. (1965). Sequential estimation of points on a psychometric function. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 18(1), 1-10. doi:10.1111/j.2044-8317.1965.tb00689.x
- Whitehouse, D. & Griffin, M. J. (2002). A comparison of vibrotactile thresholds obtained using different diagnostic equipment: the effect of contact conditions. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 75(1), 85-89. doi:10.1007/s004200100281
- Wichmann, F. A. & Hill, N. J. (2001 November). The psychometric function: I. Fitting, sampling, and goodness of fit. *Attention, Perception, & Psychophysics (Sonderausgabe)*, 63(8), 1348-1355. doi:10.3758/BF03194544
- Wickens, T. D. (2001). *Elementary Signal Detection Theory*. Oxford University Press.
- Wolf, H. (2009). *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen* (Dissertation, Technische Universität München). URN: urn:nbn:de:bvb:91-diss-20090312-737370-1-2
- Yang, S., Tan, H. Z., Buttolo, P., Johnston, M. & Pizlo, Z. (2003). Thresholds for Dynamic Changes in a Rotary Switch. In *Proceedings of EuroHaptics 2003*, 6.-9. Juli 2003 (S. 343-350). Dublin. Zugriff 23. März 2013, unter <http://www.eurohaptics.vision.ee.ethz.ch/2003/44.pdf>
- Yang, S., Tan, H. Z., Buttolo, P. & Johnston, M. (2004). Detection of Torque Vibrations Transmitted Through a Passively-Held Rotary Switch. In *Proceedings of EuroHaptics 2004*, 5.-7. Juni 2004 (S. 217-222). München. Zugriff 23. März 2013, unter <http://www.eurohaptics.vision.ee.ethz.ch/2004/50f.pdf>
- Zeilinger, S. (2005). *Aktive haptische Bedienelemente zur Interaktion mit Fahrerinformationssystemen* (Dissertation, Universität der Bundeswehr München). URN: urn:nbn:de:bvb:706-1235

A Anhang zu den einzelnen Kapiteln

A.1 Anhang zu Kapitel 4

A.1.1 Beispiel zum binären Entscheidungskonzept

Anhand eines fiktiven Beispiels für eine verbundene Stichprobe wird im Folgenden das binäre Entscheidungskonzept von Neyman und Pearson veranschaulicht.

Bei dem fiktiven Experiment handelt es sich um einen Reaktionstest. Die Probanden führen den Reaktionstest einmal nüchtern und einmal angetrunken durch. Die spezifische und gerichtete (einseitige) Hypothese lautet, dass die Probanden im angetrunkenen Zustand eine um mindestens 0,855 s höhere Reaktionszeit $t_{\text{Reaktion}}^{\text{D}}$ haben. Das hochgestellte "D" weist darauf hin, dass es sich um eine Differenz handelt. Probanden-individuell - mit i als Index - berechnet sich $t_{\text{Reaktion},i}^{\text{D}}$ demnach zu

$$t_{\text{Reaktion},i}^{\text{D}} = t_{\text{angetrunken},i} - t_{\text{nüchtern},i}. \quad (\text{A.1})$$

Damit ergeben sich die Null- und die Alternativhypothese zu

$$\text{Nullhypothese } H_0 : t_{\text{Reaktion}}^{\text{D}} = \mu_{\text{D}} = 0 \text{ s} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{Alternativhypothese } H_1 : t_{\text{Reaktion}}^{\text{D}} = \mu_{\text{D}} = 0,855 \text{ s}. \quad (\text{A.3})$$

Vereinfacht sei zunächst angenommen, dass die Standardabweichung $\sigma_{\text{Reaktion}}^{\text{D}} = \sigma_{\text{D}} = 1,5 \text{ s}$ bekannt ist und somit nicht aus den Stichprobenparametern geschätzt werden muss. Des Weiteren wird angenommen, dass die Verteilung der Differenzen normalverteilt ist.

Abbildung A.1 und Abbildung A.2 zeigen die Verteilung der Differenzen unter der Alternativ- und Nullhypothese bei den bisher getroffenen Vereinbarungen.

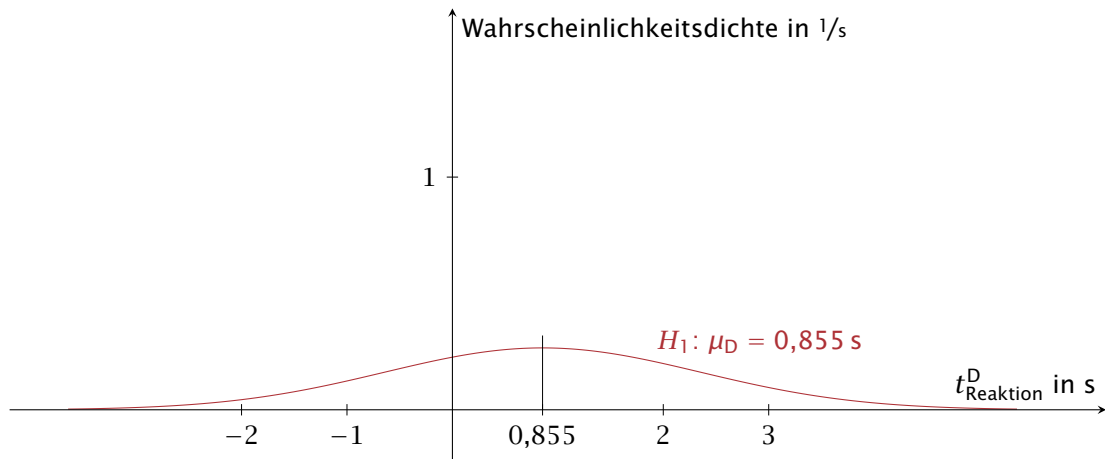


Abbildung A.1: Verteilung der Differenzen unter der Alternativhypothese: $\mu_D = 0,855 \text{ s}$ und $\sigma_D = 1,5 \text{ s}$.

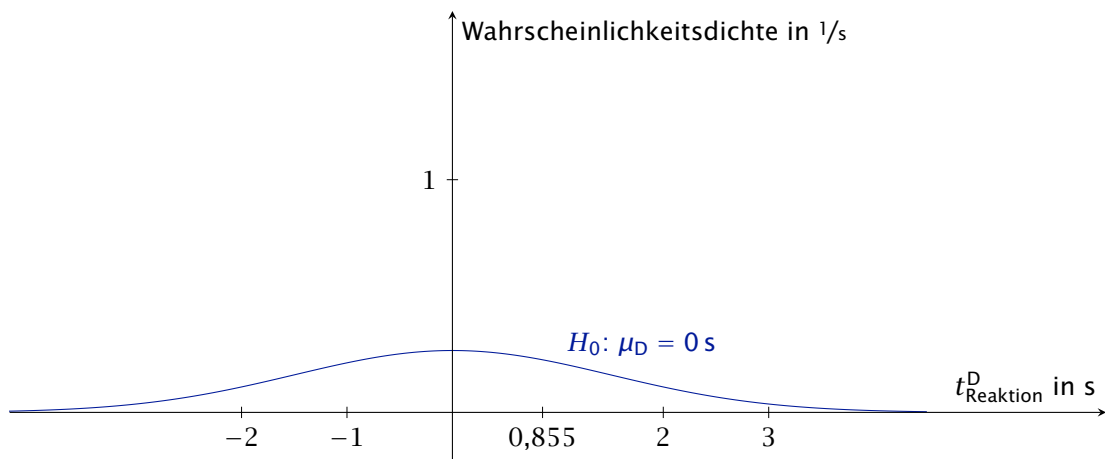


Abbildung A.2: Verteilung der Differenzen unter der Nullhypothese: $\mu_D = 0 \text{ s}$ und $\sigma_D = 1,5 \text{ s}$.

Die Standardabweichung der Verteilung der Mittelwerte der Differenzen hängt von der Größe der Stichprobe n ab. Bei normalverteilten Differenzen besteht zwischen der Standardabweichung der Population σ_D und der Standardabweichung des Mittelwerts σ_{μ_D} die Beziehung

$$\sigma_{\mu_D} = \frac{\sigma_D}{\sqrt{n}}. \quad (\text{A.4})$$

Anders formuliert lässt sich sagen, dass je größer die Stichprobe ist, desto genauer lässt sich die Lage des Mittelwerts bestimmen. Bei einer Stichprobe der Größe $n = 9$ ergibt sich die Standardabweichung des Mittelwerts σ_{μ_D} im Beispiel zu

$$\sigma_{\mu_D} = \frac{\sigma_D}{\sqrt{n}} = \frac{1,5 \text{ s}}{3} = 0,5 \text{ s}. \quad (\text{A.5})$$

Abbildung A.3 visualisiert die Zusammenhänge.

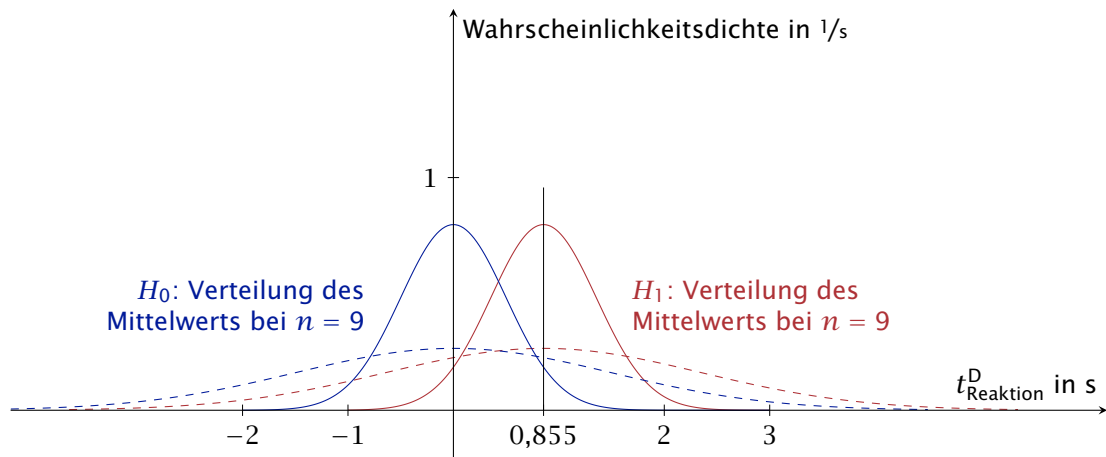


Abbildung A.3: Verteilungen der Mittelwerte bei einem Stichprobenumfang von $n = 9$

Beträgt der Stichprobenumfang $n = 16$ Probanden, so ergibt sich die Standardabweichung des Mittelwerts σ_{μ_D} im Beispiel zu

$$\sigma_{\mu_D} = \frac{\sigma_D}{\sqrt{n}} = \frac{1,5 \text{ s}}{4} = 0,375 \text{ s}. \quad (\text{A.6})$$

Abbildung A.4 visualisiert die Zusammenhänge.

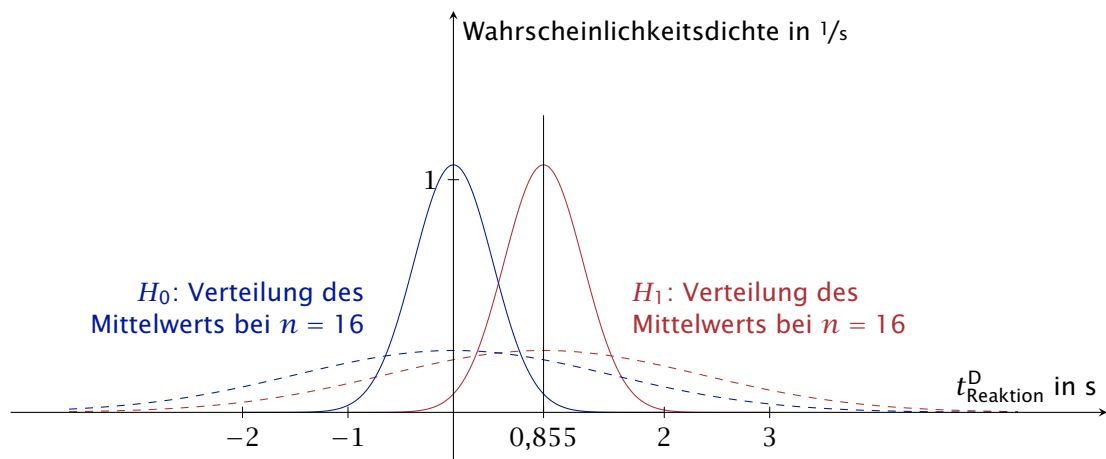


Abbildung A.4: Verteilungen der Mittelwerte bei einem Stichprobenumfang von $n = 16$

Bei dem fiktiven Experiment ergibt sich bei einer Stichprobengröße von $n = 9$ die Reaktionszeitdifferenz im Mittel zu $0,5 \text{ s}$. Nun stellt sich die Frage, ob beziehungsweise mit welchem Risiko die Null- oder Alternativhypothese angenommen beziehungsweise verworfen werden kann.

α -Fehler In Abbildung A.5 ist die Situation veranschaulicht. Nimmt man beispielsweise die Alternativhypothese an und verwirft somit die Nullhypothese, dann beträgt die Wahrscheinlichkeit, sich fälschlicherweise gegen die Nullhypothese entschieden zu haben $\alpha = 15,87\%$. Die dunkelgraue Fläche kennzeichnet diese Wahrscheinlichkeit.

Anders formuliert lässt sich sagen, dass es unter der Nullhypothese mit einer Wahrscheinlichkeit von $\alpha = 15,87\%$ Mittelwerte zu beobachten gibt, die 0,5 s oder größer sind.

β -Fehler Bei einer Annahme der Nullhypothese beträgt die Wahrscheinlichkeit, sich fälschlicherweise gegen die Alternativhypothese entschieden zu haben $\beta = 23,89\%$. Die hellgraue Fläche kennzeichnet diese Wahrscheinlichkeit.

Der β -Fehler ergibt sich, weil es bei einer "wahren" Reaktionszeitdifferenz von 0,855 s (H_1) mit einer Wahrscheinlichkeit von $\beta = 23,89\%$ zu Mittelwerten von 0,5 s oder weniger kommen kann.

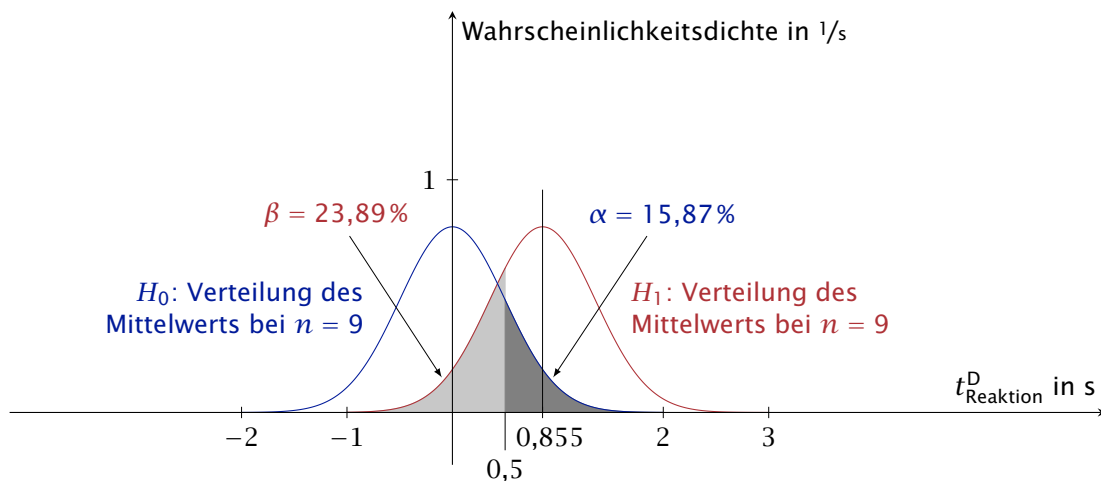


Abbildung A.5: Veranschaulichung des α - und β -Fehler bei einem Stichprobenumfang von $n = 9$ und einer mittleren Reaktionszeitdifferenz von 0,5 s

Teststärke $1 - \beta$ Anders ausgedrückt besteht bei einer "wahren" Reaktionszeitdifferenz von 0,855 s, einer Standardabweichung der Differenzen in der Population von 1,5 s und einem Stichprobenumfang von $n = 9$ eine Wahrscheinlichkeit von $1 - \beta = 76,11\%$, Differenzen mit einem Mittelwert von mindestens 0,5 s zu beobachten. Diese Wahrscheinlichkeit wird Teststärke oder Power bezeichnet. Die hellgraue Fläche in Abbildung A.6 kennzeichnet diese Wahrscheinlichkeit.

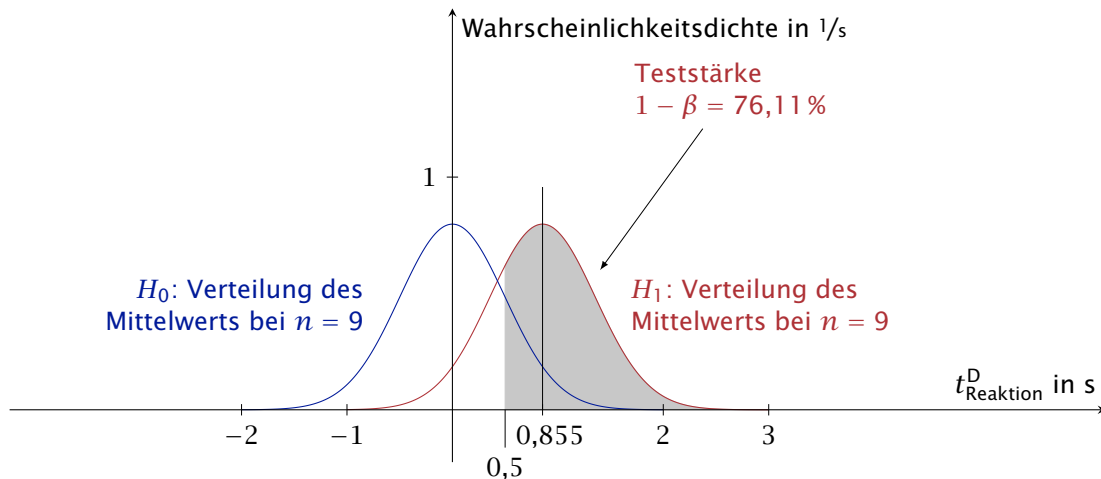


Abbildung A.6: Veranschaulichung der Teststärke $1 - \alpha$ bei einem Stichprobenumfang von $n = 9$ und einer mittleren Reaktionszeitdifferenz von $0,5$ s

Die Bestimmung der bisher genannten Wahrscheinlichkeiten erfolgt in der Regel mit Computerprogrammen, unter anderem deshalb, weil es für das Integral der Normalbeziehungsweise Gauß-Verteilung keine elementare Lösung gibt. In Listing A.1 sind die bisher benötigten Befehlsfolgen für das unter der GNU General Public License stehende Statistikprogramm R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011) aufgeführt.

Listing A.1: Befehlsfolgen in der Programmiersprache R zur Berechnung des α - und β -Fehlers bei $n = 9$

```
sd = 1.5 # Standardabweichung der Population
n = 9 # Stichprobenumfang
mu1 = 0.855 # Mittelwert H1
mu0 = 0 # Mittelwert H0
x = 0.5 # betrachtete Schwelle

# alpha-Fehler
1-pnorm(x, mu0, sd/sqrt(n))
>> 0.1586553

# beta-Fehler
pnorm(x, mu1, sd/sqrt(n))
>> 0.2388521
```

Die Verhältnisse bei einer größeren Stichprobe, $n = 16$, aber gleichem Mittelwert für die Differenzen, sind in Abbildung A.7 dargestellt. Man sieht, dass die Irrtumswahrscheinlichkeiten bei einer größeren Stichprobe - bei ansonsten gleichen Bedingungen - geringer ausfallen und dass die Teststärke steigt. $n = 16$

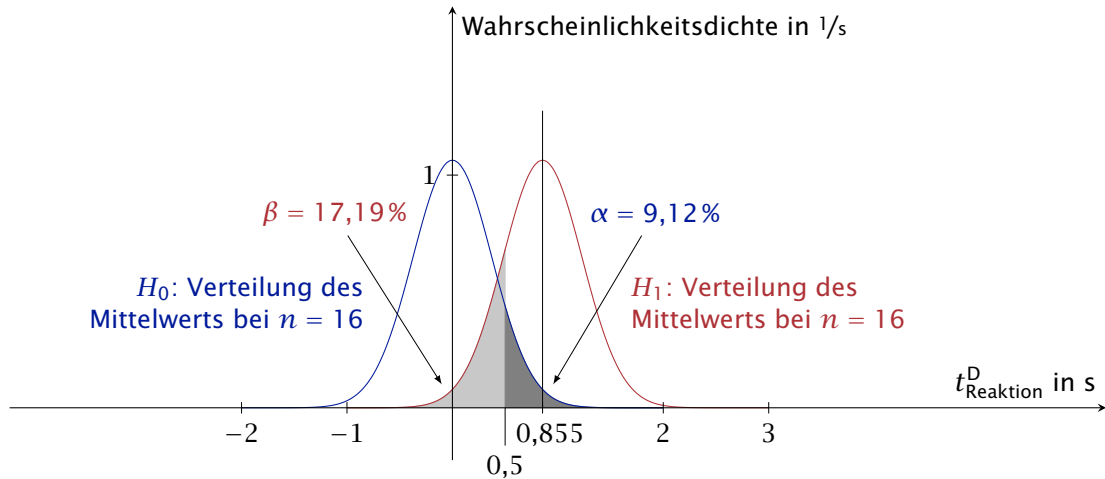


Abbildung A.7: Veranschaulichung des α - und β -Fehler bei einem Stichprobenumfang von $n = 16$ und einer mittleren Reaktionszeitdifferenz von $0,5$ s

Die Befehlsfolgen für die Berechnung des α - und β -Fehlers bei $n = 16$ sind in Listing A.2 zu finden.

Listing A.2: Befehlsfolgen in der Programmiersprache R zur Berechnung des α - und β -Fehlers bei $n = 16$

```
sd = 1.5 # Standardabweichung der Population
n = 16 # Stichprobenumfang
mu1 = 0.855 # Mittelwert H1
mu0 = 0 # Mittelwert H0
x = 0.5 # betrachtete Schwelle

# alpha-Fehler
1-pnorm(x, mu0, sd/sqrt(n))
>> 0.09121122

# beta-Fehler
pnorm(x, mu1, sd/sqrt(n))
>> 0.1719043
```

Festlegung der Irrtumswahrscheinlichkeiten

Bisher wurde der α - und β -Fehler berechnet. Normalerweise werden diese im Vorfeld eines Experiments festgelegt. Dabei gibt es je nach Disziplin und Fragestellung unterschiedliche Konventionen und Überlegungen. In vielen Bereichen wählt man $\alpha = 5\%$ und $\beta = 20\%$. Es sind aber auch andere Werte wie beispielsweise $\alpha = \beta = 5\%$ oder $\alpha = 0,1\%$ und $\beta = 1\%$ möglich.

n zu klein

Allerdings sind eindeutige Entscheidungen nur möglich, wenn die Werte für α , β , μ_D , σ_D und n in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Legt man beispielsweise beim Reaktionstestexperiment $\alpha = 5\%$, $\beta = 20\%$ und $n = 9$ fest, so ergibt sich die in Abbildung A.8 dargestellte Situation.

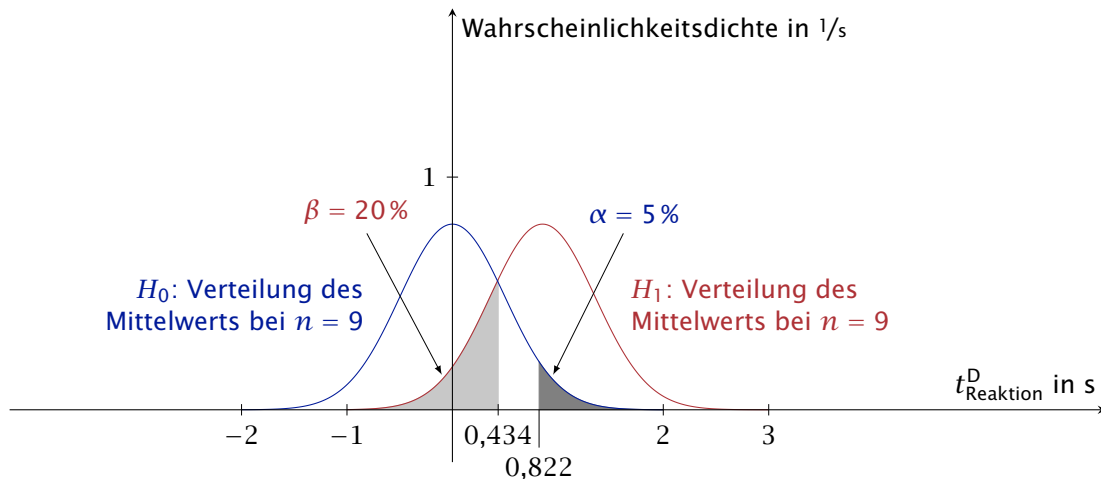


Abbildung A.8: Indifferentbereich bei einer zu *kleinen* Stichprobe, mit $\alpha = 5\%$ und $\beta = 20\%$

Es ist zu erkennen, dass es bei einer mittleren Differenz von 0,434 s bis 0,822 s keine eindeutige Zuordnung gibt – man nennt diesen Bereich auch Indifferentbereich (BORTZ, 2005, S. 122-123). Eine Differenz von beispielsweise 0,5 s ist mit jeweils unzulässig großen Irrtumswahrscheinlichkeiten verknüpft – man kann weder die Null- noch die Alternativhypothese ablehnen. Der Stichprobenumfang n ist zu klein.

Die mit den festgelegten Irrtumswahrscheinlichkeiten verbundenen Grenzwerte für die Mittelwerte werden kritische Werte genannt. Im Beispiel ist eine mittlere Differenz von 0,434 s der kritische Wert für den β -Fehler und eine mittlere Differenz von 0,822 s der kritische Wert für den α -Fehler.

Die Befehlsfolgen für die Berechnung der kritischen Werte bei $n = 9$ sind in Listing A.3 aufgeführt.

Listing A.3: Befehlsfolgen in der Programmiersprache R zur Berechnung der kritischen Werte bei vorgegebenem α - und β -Fehler ($n = 9$)

```
sd = 1.5 # Standardabweichung der Population
n = 9 # Stichprobenumfang
mu1 = 0.855 # Mittelwert H1
mu0 = 0 # Mittelwert H0
alpha = 0.05 # gewünschter alpha-Fehler
beta = 0.2 # gewünschter beta-Fehler

# kritischer x-Wert für H0 (alpha)
qnorm(alpha, mu0, sd/sqrt(n), lower.tail = F)
>> 0.8224268

# kritischer x-Wert für H1 (beta)
qnorm(beta, mu1, sd/sqrt(n), lower.tail = T)
>> 0.4341894
```

n zu groß Ist der Stichprobenumfang hingegen zu groß gewählt, so ergibt sich ein Indifferentbereich, in dem sowohl die Null- als auch die Alternativhypothese abgelehnt werden müssen/können. Für eine Stichprobengröße von $n = 36$ sind die Verhältnisse in Abbildung A.9 dargestellt.

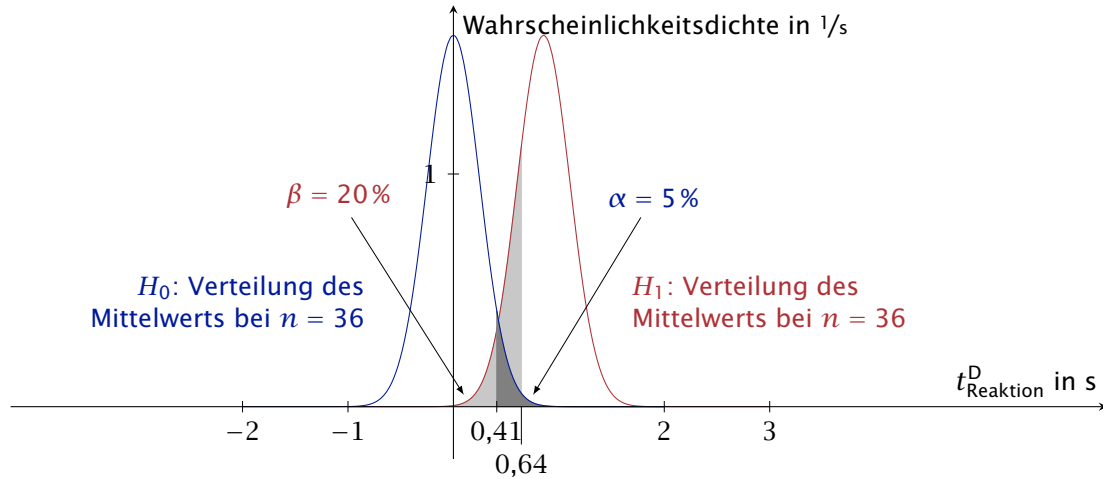


Abbildung A.9: Indifferentbereich bei einer zu *großen* Stichprobe, mit $\alpha = 5\%$ und $\beta = 20\%$

Die Befehlsfolgen für die Berechnung der kritischen Werte bei $n = 36$ sind in Listing A.4 zu finden.

Listing A.4: Befehlsfolgen in der Programmiersprache R zur Berechnung der kritischen Werte bei vorgegebenem α - und β -Fehler ($n = 36$)

```
sd = 1.5 # Standardabweichung der Population
n = 36 # Stichprobenumfang
mu1 = 0.855 # Mittelwert H1
mu0 = 0 # Mittelwert H0
alpha = 0.05 # gewünschter alpha-Fehler
beta = 0.2 # gewünschter beta-Fehler

# kritischer x-Wert für H0 (alpha)
qnorm(alpha, mu0, sd/sqrt(n), lower.tail = F)
>> 0.4112134

# kritischer x-Wert für H1 (beta)
qnorm(beta, mu1, sd/sqrt(n), lower.tail = T)
>> 0.6445947
```

n optimal Um zu einer eindeutigen Entscheidung gelangen zu können, müssen die beiden kritischen Werte zusammenfallen. Eindeutig bedeutet in diesem Kontext, dass die zuvor festgelegten Irrtumswahrscheinlichkeiten α und β bei einer Entscheidung nicht verletzt werden.

Im Beispiel ergibt sich der optimale Stichprobenumfang rein rechnerisch zu $n =$

19,02911. In Abbildung A.10 ist zu sehen, dass sich bei diesem Stichprobenumfang kein Indifferentbereich ergibt. Der gemeinsame kritische Wert für die mittlere Reaktionszeitdifferenz liegt bei 0,566 s.

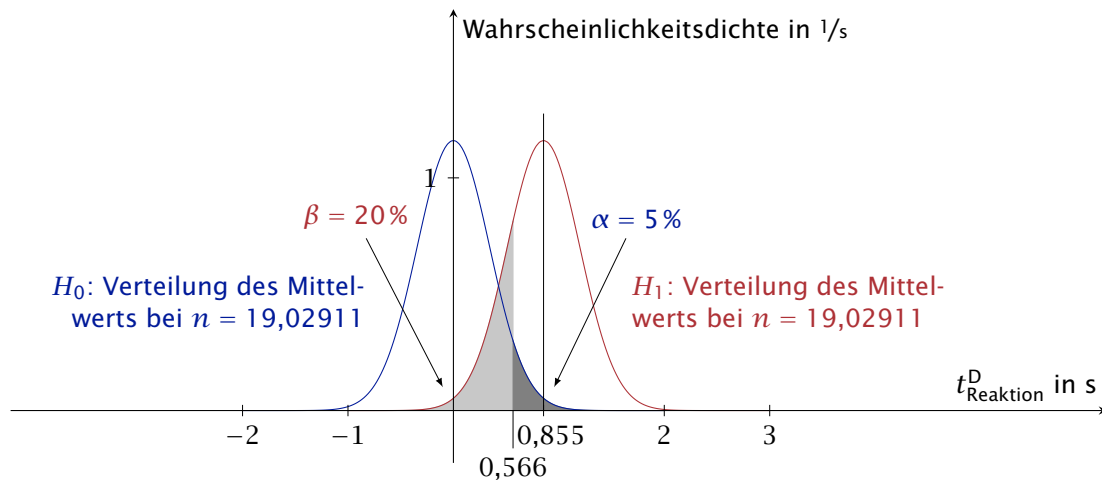


Abbildung A.10: Veranschaulichung der Situation mit optimalem Stichprobenumfang

Wird bei dem Experiment eine mittlere Reaktionszeitdifferenz von weniger als $0,566$ s ermittelt, so kann man die Alternativhypothese ablehnen. Die Wahrscheinlichkeit, die Alternativhypothese fälschlicherweise abzulehnt zu haben, beträgt dabei maximal $\beta = 20\%$.

Alternativhypothese ablehnen

Wird hingegen eine mittlere Reaktionszeitdifferenz von mehr als $0,566$ s ermittelt, so kann man die Nullhypothese ablehnen. Die Wahrscheinlichkeit, die Nullhypothese fälschlicherweise abzulehnt zu haben, beträgt dabei maximal $\alpha = 5\%$.

Nullhypothese ablehnen

Eine entsprechende spezifische, aber ungerichtete (zweiseitige) Hypothese würde lauten, dass sich die Reaktionszeiten um mindestens $0,855$ s unterscheiden. In diesem Fall ergibt sich der optimale Stichprobenumfang zu $n = 24,15783$. Dieser Fall ist in Abbildung A.10 dargestellt.

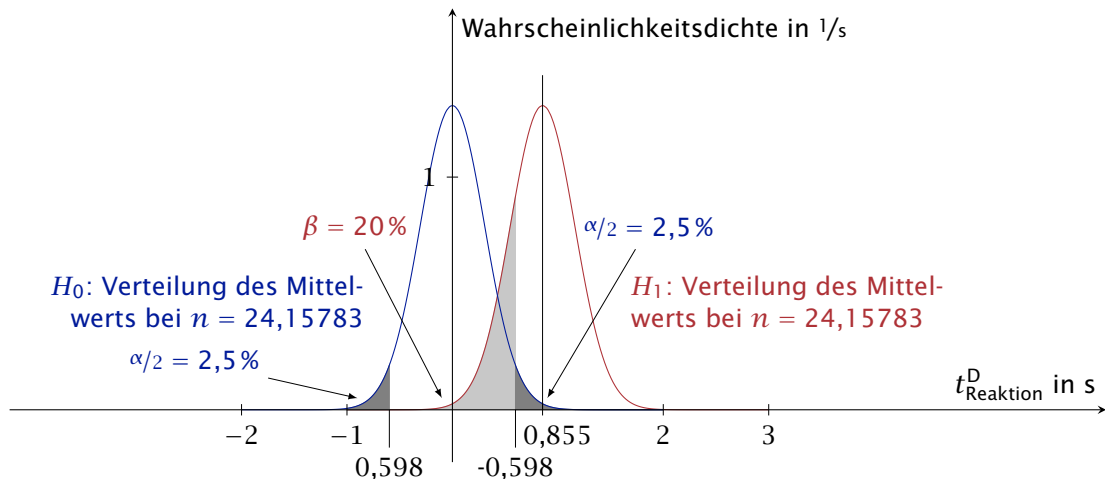


Abbildung A.11: Veranschaulichung der Situation mit optimalem Stichprobenumfang (zweiseitig)

Die Berechnung¹ des optimalen Stichprobenumfangs erfolgt durch

$$n_{\text{opt}} = \left(\frac{z_{(1-\alpha)} - z_{\beta}}{\delta''} \right)^2. \quad (\text{A.7})$$

Dabei wird auf die in Kapitel 4.2.3 eingeführte standardisierte Effektgröße δ'' zurückgegriffen. Sie ergibt sich im Beispiel zu

$$\delta'' = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma} = \frac{\mu_D}{\sigma} = \frac{0,855}{1,5} = 0,57. \quad (\text{A.8})$$

Ein Effekt von 0,57 (Standardabweichungen) ist nach der Konvention von J. COHEN (1988) ein "großer" Effekt. Die kritischen z-Werte – das Konzept der z-Werte wird unter anderem in BORTZ und SCHUSTER (2010, Kapitel 2.4.2) sowie EID u. a. (2010, Kapitel 6.5) erklärt – ergeben sich für $\alpha = 5\%$ und $\beta = 20\%$ zu

$$z_{(1-0,05)} = -1,644854 \text{ (einseitig)} \quad (\text{A.9})$$

$$z_{(1-0,05/2)} = -1,959964 \text{ (zweiseitig)} \quad (\text{A.10})$$

$$z_{0,2} = 0,8416212. \quad (\text{A.11})$$

Somit ergeben sich die optimalen Stichprobenumfänge zu

$$n_{\text{opt,einseitig}} = \left(\frac{-1,644854 - 0,8416212}{0,57} \right)^2 = 19,02911 \quad (\text{A.12})$$

$$n_{\text{opt,zweiseitig}} = \left(\frac{-1,959964 - 0,8416212}{0,57} \right)^2 = 24,15783. \quad (\text{A.13})$$

¹ siehe z. B. BORTZ und SCHUSTER (2010, Gleichung 7.5 auf S. 110)

Die R-Befehlsfolgen zur Berechnung der optimalen Stichprobenumfänge für die ein- und zweiseitige Betrachtung finden sich in Listing A.5.

Listing A.5: Befehlsfolgen in der Programmiersprache R zur Berechnung der optimalen Stichprobenumfänge

```
sd      = 1.5    # Standardabweichung der Population
mu1     = 0.855 # Mittelwert H1
mu0     = 0      # Mittelwert H0
beta    = 0.2   # gewünschter beta-Fehler

### einseitig ###
alpha = 0.05 # gewünschter alpha-Fehler

# optimaler Stichprobenumfang
n_opt = (qnorm(1-alpha)-qnorm(beta))^2/((mu1-mu0)/sd)^2
>> 19.02911

# kritischer Wert für H0 (alpha)
qnorm(alpha,mu0,sd/sqrt(n_opt),lower.tail = F)
>> 0.5655999

# kritischer Wert für H1 (beta)
# muss bei optimaler Stichprobengröße
# dem kritischen Wert für H0 (alpha) entsprechen
qnorm(beta,mu1,sd/sqrt(n_opt),lower.tail = T)
>> 0.5655999

### zweiseitig ###
alpha = 0.05/2 # alpha/2 da zweiseitig

# optimaler Stichprobenumfang
n_opt = (qnorm(1-alpha)-qnorm(beta))^2/((mu1-mu0)/sd)^2
>> 24.15783

# kritischer Wert für H0 (alpha)
qnorm(alpha,mu0,sd/sqrt(n_opt),lower.tail = F)
>> 0.5981504

# kritischer Wert für H1 (beta)
qnorm(beta,mu1,sd/sqrt(n_opt),lower.tail = T)
>> 0.5981504
```

In der Praxis ist die Populationsstandardabweichung in der Regel nicht bekannt und wird aus der Stichprobe geschätzt. Werden Mittelwert und Standardabweichung aus der Stichprobe geschätzt, dann muss anstelle der Gauß- beziehungsweise der Normalverteilung die sogenannte t -Verteilung für die Hypothesentests verwendet werden, siehe Kapitel A.1.3. Bei Verwendung der t -Verteilung ergeben sich geringfügig unterschiedliche optimale Stichprobenumfänge (stets aufgerundet):

- einseitig
 - Normalverteilung: $n_{\text{opt}} = 20$
 - t -Verteilung: $n_{\text{opt}} = 21$
- zweiseitig
 - Normalverteilung: $n_{\text{opt}} = 25$
 - t -Verteilung: $n_{\text{opt}} = 27$

Die für die Berechnung der optimalen Stichprobenumfänge im Fall der t -Verteilung nötigen Einstellungen ist für die Software G*POWER (FAUL u. a., 2007) in Abbildung A.12 beziehungsweise Abbildung A.13 dargestellt.

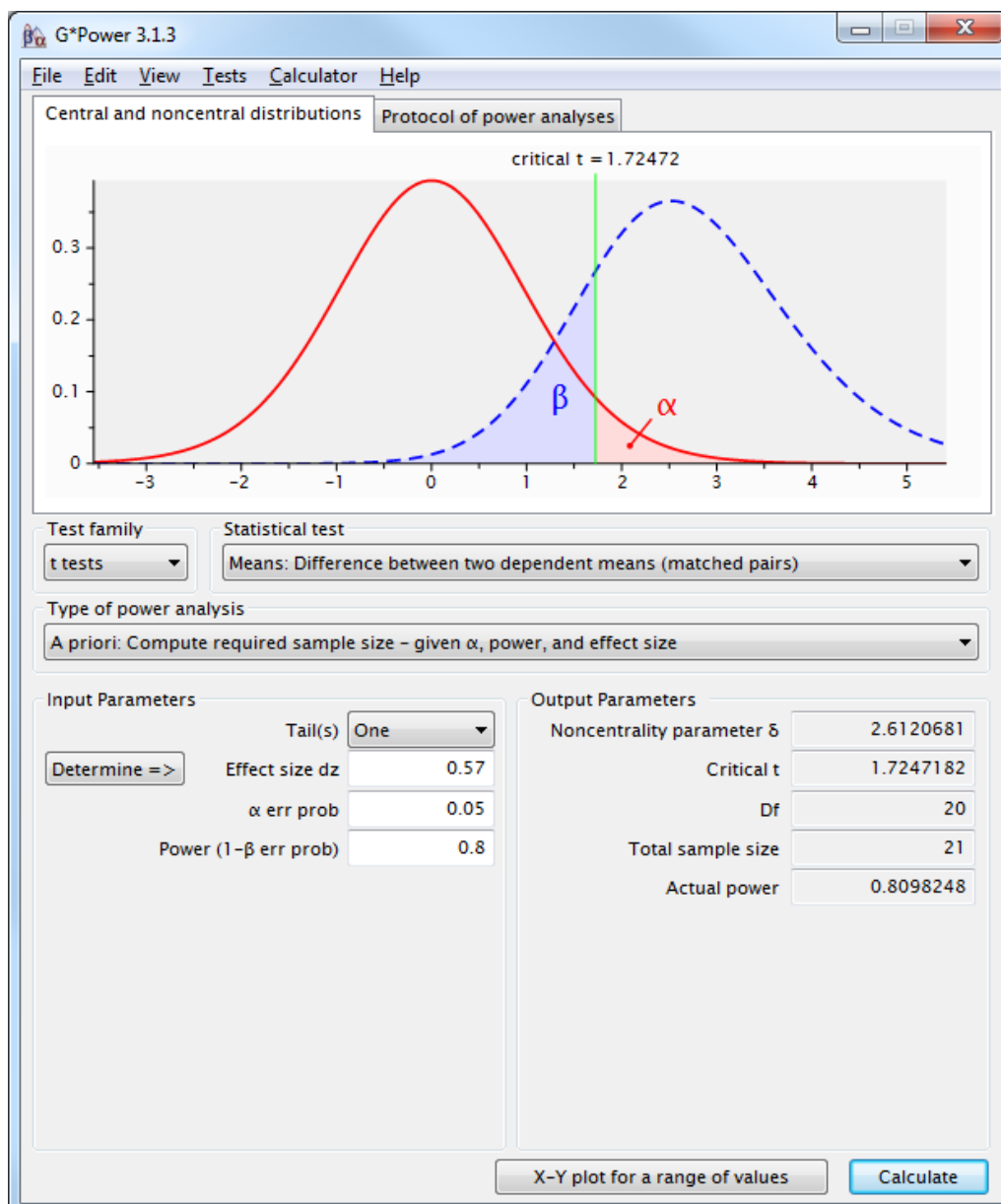


Abbildung A.12: Bestimmung des optimalen Stichprobenumfangs (einseitig) – Details siehe Text

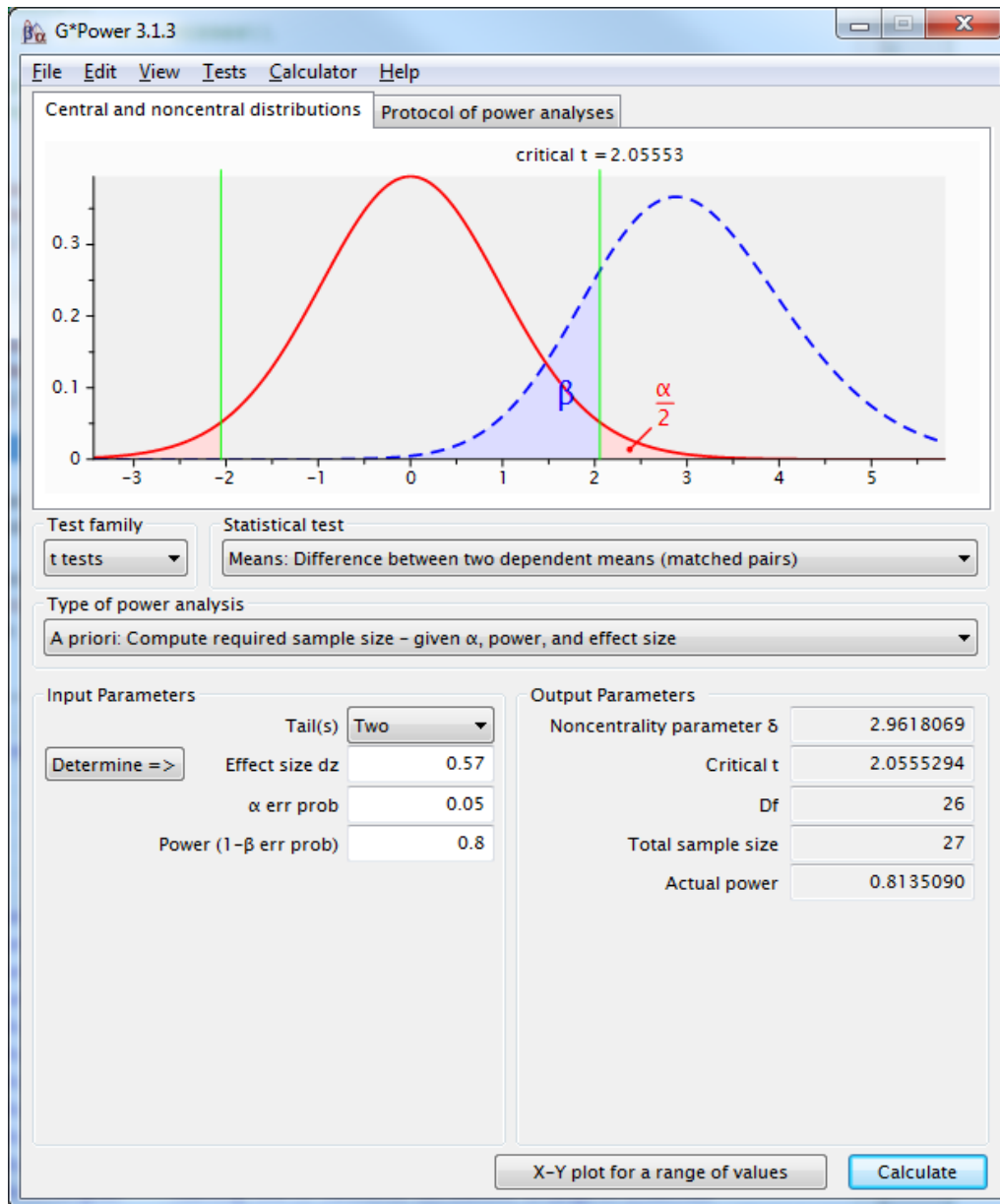


Abbildung A.13: Bestimmung des optimalen Stichprobenumfangs (zweiseitig) – Details siehe Text

A.1.2 Innerhalb-Standardabweichung

Der Schätzer für die Innerhalb-Standardabweichung $\sigma_{\text{inn}} = \sigma_1 = \sigma_2$ ist nach HEDGES (1981) (zitiert in EID u. a., 2010, S. 309) die gepoolte Innerhalb-Standardabweichung $\hat{\sigma}_{\text{inn}}$. Sie ergibt sich zu

$$\sigma_{\text{inn, geschätzt}} = \hat{\sigma}_{\text{inn}} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_1^2 \cdot (n_1 - 1) + \hat{\sigma}_2^2 \cdot (n_2 - 1)}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}}. \quad (\text{A.14})$$

A.1.3 Nonzentrale t -Verteilung

Zur Teststärkenbestimmung beim t -Test ist die Berechnung nonzentraler t -Verteilungen notwendig. Die Dichtefunktion der nonzentralen t -Verteilung kann unterschiedlich formuliert werden – in (A.15) wird sie mithilfe der Kummer'schen konfluenten hypergeometrischen Funktion erster Art ${}_1F_1$ und der Gamma-Funktion Γ in Abhängigkeit vom Nonzentralitätsparameter λ und der Anzahl der Freiheitsgrade df ausgedrückt (WEISSTEIN, 2012), siehe auch (EID u. a., 2010, Kapitel 8.6.2; und BORTZ & SCHUSTER, 2010, Kapitel 7.6 aber auch Softwarehinweis 7.2 und 8.1).

$$f(x; df, \lambda) = \frac{df^{df/2} \cdot \overbrace{\Gamma(df+1)}^{=df!} \cdot e^{-\lambda^2/2}}{2^{df} \cdot (df+x^2)^{df/2} \cdot \Gamma\left(\frac{df}{2}\right)} \cdot \left[\frac{\sqrt{2}\lambda x \cdot {}_1F_1\left(\frac{df}{2}+1; \frac{3}{2}; \frac{\lambda^2 \cdot x^2}{2 \cdot (df+x^2)}\right)}{(df+x^2) \cdot \Gamma\left(\frac{df+1}{2}\right)} + \frac{{}_1F_1\left(\frac{df+1}{2}; \frac{1}{2}; \frac{\lambda^2 \cdot x^2}{2 \cdot (df+x^2)}\right)}{\sqrt{df+x^2} \cdot \Gamma\left(\frac{df}{2}+1\right)} \right] \quad (\text{A.15})$$

Eine Implementierung von (A.15) für das gängige Computeralgebrasystem MuPAD, einer MATLAB-Erweiterung, findet sich in Listing A.6.

Listing A.6: MuPAD-Listing zur Definition einer nonzentralen t -Verteilung

```
f := (x, lambda, df) -> df^(df/2)*gamma(df+1)*
exp(-lambda^2/2)/(2^df*(df+x^2)^(df/2)*gamma(df/2))
*(sqrt(2)*lambda*x
*hypergeom([df/2+1], [3/2], lambda^2*x^2/(2*(df+x^2)))
/((df+x^2)*gamma((df+1)/2))
+ hypergeom([(df+1)/2], [1/2], lambda^2*x^2/(2*(df+x^2)))
/(sqrt(df+x^2)*gamma(df/2+1)));
```

Abbildung A.14 zeigt exemplarisch eine nonzentrale und eine zentrale t -Verteilung. Die Berechnung der Werte erfolgte mit dem Code in Listing A.6. Nonzentrale t -Verteilungen sind im Gegensatz zu zentralen t -Verteilungen nicht symmetrisch. **Hinweis:** Die Verteilungen in Abbildung 4.1 und 4.2 dienen nur zur Illustration und sind z -verteilt und daher auch im nichtzentralen Fall symmetrisch.

Nonzentrale und zentrale t-Verteilung
mit $df = 10$ und $\lambda = 5$ bzw. 0

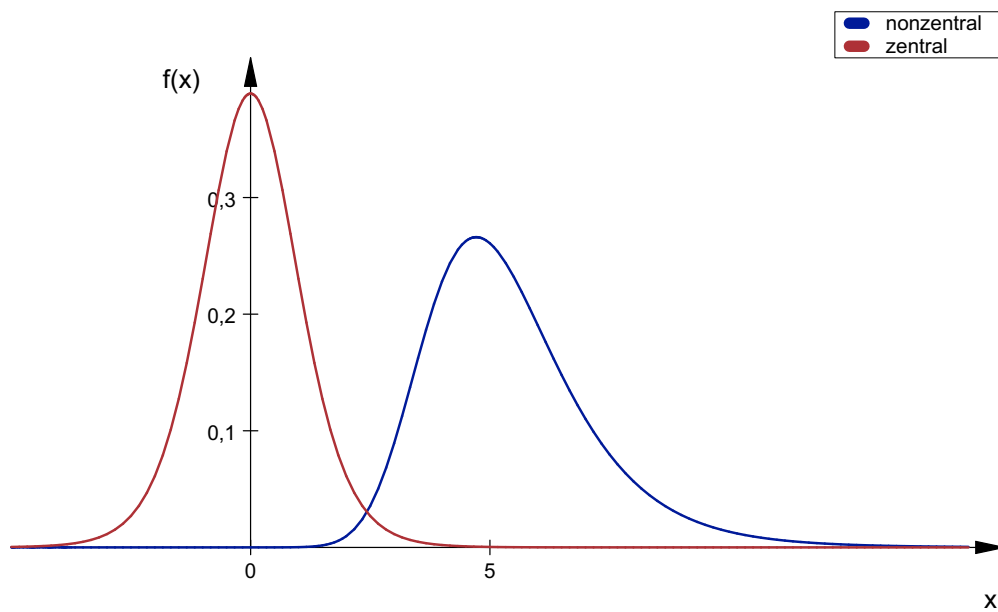


Abbildung A.14: Nonzentrale und zentrale t -Verteilung mit 10 Freiheitsgraden (df), der Nonzentralitätsparameter λ ist 5.

A.2 Anhang zu Kapitel 6

A.2.1 Ausführliche Herleitung des Streckenmodells

Um modellbasierte Ansätze bei der Steuerung und Regelung anwenden zu können, ist es notwendig, ein "ausreichend" genaues Streckenmodell zu haben. Beim rotatorischen Haptiksimulator handelt es sich im Wesentlichen um einen bürstenbehafteten Gleichstrommotor, Datenblatt siehe Anhang B.2.

Im Folgenden wird der Haptiksimulator ausgehend von den folgenden vier Beziehungen modelliert.

a) Maschensatz für den Ankerkreis

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + u_{\text{ind}}(t) \quad (\text{A.16})$$

- Klemmenspannung u (Stellgröße)
- wirksamer Ohm'scher $R \approx 6 \Omega$
- wirksame Induktivität $L \approx 0,3 \text{ mH}$
- Strom in der Motorwicklung i
- Induktionsspannung u_{ind} (Generatorwirkung, wird auch Gegenspannung oder Gegen-EMK - kurz für elektromotorische Kraft - genannt)

b) 1. Fundamentalgleichung des Gleichstrommotors

$$u_{\text{ind}}(t) = k \cdot \omega(t) \quad (\text{A.17})$$

- Motorkonstante $k \approx 60 \text{ mNm/A}$
- Winkelgeschwindigkeit in rad/s

c) 2. Fundamentalgleichung des Gleichstrommotors

$$M_{\text{innen}}(t) = k \cdot i(t) \quad (\text{A.18})$$

- inneres Motormoment M_{innen} - theoretisch erzeugtes Drehmoment ohne Berücksichtigung von Reibung etc.

d) Drallsatz

$$\sum M = J_{\text{ist}} \cdot \dot{\omega}(t) \quad (\text{A.19})$$

- Summe der Momente um die Drehachse $\sum M$
- wirksames Massenträgheitsmoment $J_{\text{ist}} \approx 30 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$ für beide Varianten in Abbildung 6.5
- Das wirksame Massenträgheitsmoment setzt sich aus allen Massenträgheitsmomenten auf der Rotorachse zusammen (z. B. Rotor, Drehmomentsensor, Verbindungswellen, Winkelsensor, Kupplungen, Knopf, ggf. Kugellagerinnenringe).
- Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}$

Der Maschensatz für den Ankerkreis (A.16) beschreibt eine Differentialgleichung (DGL) eines Tiefpasses erster Ordnung mit den Spannungen u und u_{ind} als Eingangsgrößen und dem Strom i als Ausgangsgröße. Die (elektrische) Zeitkonstante ergibt sich zu L/R . Diese Zeitkonstante ist im Vergleich zur mechanischen Zeitkonstante des Systems

$$T_{\text{mech}} = \frac{J_{\text{ist}} \cdot R}{k^2} \quad (\text{A.20})$$

vernachlässigbar klein. Somit lässt sich die DGL des Ankerkreises - unter Vernachlässigung der Induktivität L - in die rein algebraische Form

$$u(t) = R \cdot i(t) + u_{\text{ind}}(t) \quad (\text{A.21})$$

überführen.

Setzt man (A.21) und (A.17) in (A.18) ein, so ergibt sich das innere Moment zu

$$M_{\text{innen}}(t) = k \cdot i(t) = \underbrace{u(t) \frac{k}{R}}_{M_{\text{Motor}}} - \underbrace{\omega(t) \frac{k^2}{R}}_{M_{\text{Dämpfung}}} . \quad (\text{A.22})$$

Der Anteil des inneren Moments, das durch die Klemmenspannung u hervorgerufen wird, wird im Folgenden mit M_{Motor} bezeichnet. Der zweite Summand hat die Form einer mechanischen Dämpfung und wird daher mit $M_{\text{Dämpfung}}$ abgekürzt. Es handelt sich um eine mechanisch wirksame Dämpfung, die durch die (Gegen-)Induktion hervorgerufen wird.

Der Drallsatz (A.19) ergibt sich jetzt zu

$$\sum M = J_{\text{ist}} \cdot \dot{\omega}(t) = M_{\text{innen}} + M_{\text{außen}} . \quad (\text{A.23})$$

Wobei sich $M_{\text{außen}}$ aus dem vom Nutzer aufgebrauchten Drehmoment M_{Nutzer} und der Coloumb'schen Reibung

$$M_{\text{Coloumb}} = |M_{\text{Reib}}| \cdot \text{sgn}(\omega(t)) \quad (\text{A.24})$$

zusammensetzt². Dabei handelt es sich natürlich um ein vereinfachtes Reibmodell. Insgesamt ergibt sich der Drallsatz jetzt zu

$$\sum M = J_{\text{ist}} \cdot \dot{\omega}(t) = M_{\text{innen}} + M_{\text{außen}} \quad (\text{A.25})$$

$$= M_{\text{Motor}} - M_{\text{Dämpfung}} + M_{\text{Nutzer}} - M_{\text{Coloumb}} \quad (\text{A.26})$$

$$= u(t) \frac{k}{R} - \omega(t) \frac{k^2}{R} + M_{\text{Nutzer}} - |M_{\text{Reib}}| \cdot \text{sgn}(\omega(t)) . \quad (\text{A.27})$$

Das Streckenmodell (6.11) erhält man schließlich durch Sortieren der Ein- und Ausgangsgrößen und Einführen der Hilfsgrößen d_{ist} und M_{wirk} :

² Die viskose Reibung durch die Lagerung wird vernachlässigt.

$$J_{\text{ist}} \cdot \dot{\omega}(t) + \frac{\overset{d_{\text{ist}}}{k^2}}{R} \cdot \omega(t) + |M_{\text{Reib}}| \cdot \text{sgn}(\omega(t)) = M_{\text{Nutzer}}(t) + \underbrace{\frac{k}{R} \cdot u(t)}_{M_{\text{Motor}}(t)} \quad (\text{A.28})$$

$$J_{\text{ist}} \cdot \dot{\omega}(t) + d_{\text{ist}} \cdot \omega(t) + |M_{\text{Reib}}| \cdot \text{sgn}(\omega(t)) = M_{\text{wirk}}(t) \quad (\text{A.29})$$

Somit lässt sich der Haptiksimulator wie ein reibungsbehaftetes mechanisches System erster Ordnung – mit dem Drehmoment M_{wirk} als Eingangsgröße und der Winkelgeschwindigkeit ω als Ausgangsgröße – beschreiben.

A.2.2 Implementierungsdetails

Der Regelparameter k_p wird in Abhängigkeit vom Soll-Massenträgheitsmoment J_{soll} angepasst. Im Blockschaltbild in Abbildung 6.9 ist der Ausgang des Reglers ein Drehmoment. Bei der tatsächlichen Implementierung wird eine Spannung als Stellgröße verwendet – über Beziehung (6.13) lässt sich die Spannung u mit dem Drehmoment M_{Motor} verknüpfen.

Konkret ergibt sich die Adaptionregel für den Regelparameter k_p mit der Spannung u als Stellgröße zu

$$k_p^u(J_{\text{soll}}) = 0,5 \text{ Vs/rad} + 0,25 \text{ Vs/rad} \cdot \ln\left(\frac{J_{\text{soll}} \cdot 10^6}{\text{kgm}^2}\right) \quad (\text{A.30})$$

beziehungsweise mit dem Drehmoment M_{Motor} als Stellgröße zu

$$k_p^{M_{\text{Motor}}}(J_{\text{soll}}) = \frac{k}{R} \cdot 0,5 \text{ Vs/rad} + \frac{k}{R} \cdot 0,25 \text{ Vs/rad} \cdot \ln\left(\frac{J_{\text{soll}} \cdot 10^6}{\text{kgm}^2}\right). \quad (\text{A.31})$$

Für das vorliegende System ergeben sich die Parameter k und R zu $k = 60,3 \text{ mNm/A}$ und $R = 6 \Omega$. Somit ergibt sich die Adaptionregel für den Regelparameter k_p mit dem Drehmoment M_{Motor} als Stellgröße zu

$$k_p^{M_{\text{Motor}}}(J_{\text{soll}}) = 5 \text{ mNms/rad} + 2,5 \text{ mNms/rad} \cdot \ln\left(\frac{J_{\text{soll}} \cdot 10^6}{\text{kgm}^2}\right). \quad (\text{A.32})$$

Ein k_p von beispielsweise 5 mNms/rad bedeutet anschaulich, dass bei einer Drehzahldifferenz von 1 rad/s der Regler eine Stellgröße von 5 mNm ausgibt.

Das Verhältnis von k und R beträgt hier 10 mNm/V – das bedeutet, dass das Motormoment M_{Motor} pro Volt Spannungserhöhung theoretisch um 10 mNm zunimmt. Es handelt sich um eine stationäre Betrachtung ohne Berücksichtigung der elektrischen Zeitkonstante $T_{\text{el}} = L/R$ und der Gegeninduktionsspannung u_{ind} .

Auch für die Tiefpassfilterung des Positionssignals zur Bestimmung der Ist-Winkelgeschwindigkeit wird ein Adaptionsgesetz verwendet. Die Grenzfrequenz des Butterworth-Tiefpassfilters erster Ordnung wird – wie der Regelparameter k_p – in Abhängigkeit vom Soll-Massenträgheitsmoment J_{soll} angepasst. Konkret ergibt sich die Adaptionsregel für die Grenzfrequenz f_g in (6.24) zu

$$f_g = 100 \text{ Hz} - 12 \text{ Hz} \cdot \ln \left(\frac{J_{\text{soll}} \cdot 10^6}{\text{kgm}^2} \right). \quad (\text{A.33})$$

Abbildung A.15 zeigt die tatsächlich verwendete empirische Basis für die Adaptionregeln. Die Parameter wurden jeweils so lange verändert, bis die subjektiv beste haptische Qualität bei guter Regeltüte erreicht wurde.

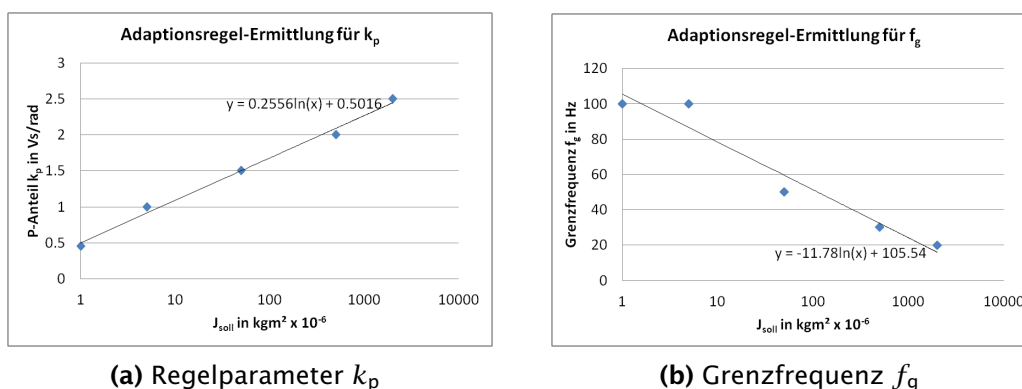


Abbildung A.15: Die Adaptionregeln für den Regelparаметer k_p und die Grenzfrequenz f_g wurden empirisch bestimmt. Es handelt sich bei den Darstellungen um Microsoft-Excel-2007-Diagramme.

A.2.3 Alternative Impedanz-Steuerung

SWINDELLS (2007) verwendet eine kostengünstige Impedanz-Steuerung, bei der neben einem Motor lediglich ein Positionssensor benötigt wird (siehe auch BROUWER, 2004, S. 28-30; SWINDELLS, MACLEAN & BOOTH, 2009; bzw. COLGATE, STANLEY & BROWN, 1995). Für ein variables Massenträgheitsmoment bei einem Impedanz-System ist normalerweise die Bestimmung der Beschleunigung aus dem typischerweise quantisierten Positionssignal notwendig. Dies ist aufgrund der notwendigen Filterung und der damit verbundenen Phasenverschiebung problematisch. SWINDELLS (2007) verwendet einen anderen Ansatz mit einer über Feder und Dämpfer virtuell gekoppelten Masse. Im Folgenden wird der Ansatz für den translatorischen Fall erläutert.

In Abbildung A.16 ist ein einfacher Haptiksimulator mit der Masse m_1 dargestellt. Die angreifenden Kräfte sind die Nutzerkraft F_N und die Motorkraft F_M . Für die weiteren Betrachtungen ist die Masse m_1 gegenüber der zu simulierenden Masse vernachlässigbar klein³.

³ Masse m_1 setzt sich typischerweise aus der Masse des Motors und des Griffstücks zusammen.

Um die Illusion einer variablen Masse zu erzeugen, muss die Motorkraft entsprechend der Bewegung $x_1(t)$ variiert werden.

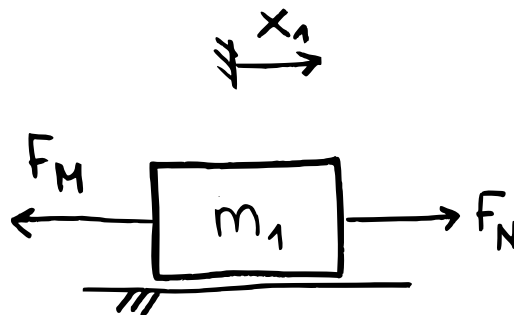


Abbildung A.16: Technologieschema für das Prinzip der virtuellen Masse – dabei symbolisiert m_1 die Masse des Haptiksimulators, x_1 seine Position, F_N die Kraft des Nutzers und F_M die Kraft des nicht dargestellten Antriebs.

Abbildung A.17 zeigt die Grundidee, wie sie unter anderem bei SWINDELLS (2007) umgesetzt wird. Die real vorhandene Masse m_1 wird mit einer virtuellen und variablen Masse m_2 über eine virtuelle Feder k und einen virtuellen Dämpfer d gekoppelt. Die Kopplungskräfte werden real durch die Motorkraft F_M erzeugt. Das gekoppelte System lässt sich durch (A.34) und (A.35) beschreiben.

$$\sum F_{m_1} = m_1 \cdot \ddot{x}_1 = F_N - (x_1 - x_2) \cdot k - (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \cdot d = F_N - F_M \quad (\text{A.34})$$

$$\sum F_{m_2} = m_2 \cdot \ddot{x}_2 = (x_1 - x_2) \cdot k + (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \cdot d = F_M \quad (\text{A.35})$$

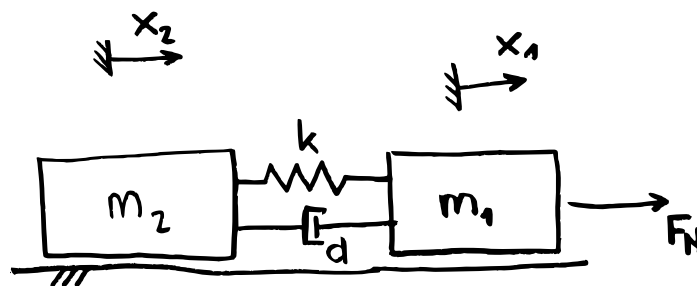


Abbildung A.17: Technologieschema für das Prinzip der virtuellen Masse – die beiden Massen m_1 und m_2 mit den Positionen x_1 beziehungsweise x_2 sind durch die Feder k und den Dämpfer d miteinander gekoppelt. Die Größen mit Index 2 und die Kopplungselemente sind nur virtuell und werden (mit-)simuliert.

Gleichung A.35 wird zur Berechnung der Motorkraft F_M in Echtzeit berechnet und erhält als Eingangsvariablen die Position x_1 und die Geschwindigkeit \dot{x}_1 des Haptiksimulators. Abbildung A.18 zeigt das entsprechende Blockschaltbild. Im Gegensatz zu dem üblichen Vorgehen muss lediglich die Geschwindigkeit \dot{x}_1 aus der gemessenen Position x_1 bestimmt werden. Auf eine Bestimmung der Beschleunigung \ddot{x}_1 kann verzichtet werden.

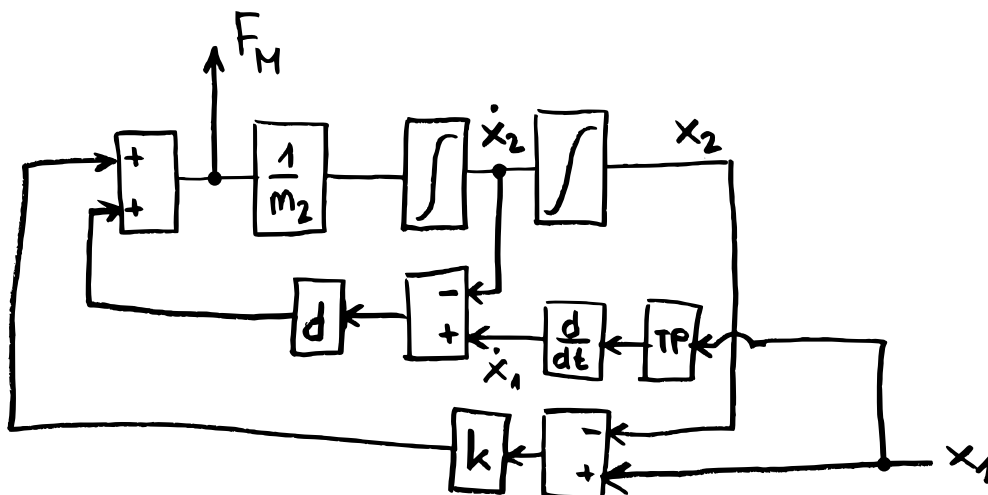


Abbildung A.18: Blockschaltbild für das Prinzip der virtuellen Masse – simuliert wird die Bewegungsgleichung der über die Feder k und den Dämpfer d an Masse m_1 gekoppelten Masse m_2 . Die Position x_1 des Haptiksimulators wird gemessen und die Geschwindigkeit \dot{x}_1 über eine Tiefpassfilterung (TP) und Differentiation bestimmt. Gesucht ist die Motorkraft F_M als Summe der Kopplungskräfte.

Die virtuellen Kopplungselemente k und d sind parasitär und eigentlich unerwünscht. Je starrer die Kopplung, desto besser ist demnach die Nachbildung der virtuellen Masse.

Abbildung A.19 zeigt das Blockschaltbild des in SWINDELLS (2007) beziehungsweise SWINDELLS u. a. (2009) verwendeten Berechnungsmodells. Nach Ansicht des Autors liegt bei dem Blockschaltbild ein Vorzeichenfehler vor. Das Vorzeichen des Drehmoment das in den $1/M_{acc}$ führt, sollte negiert werden.

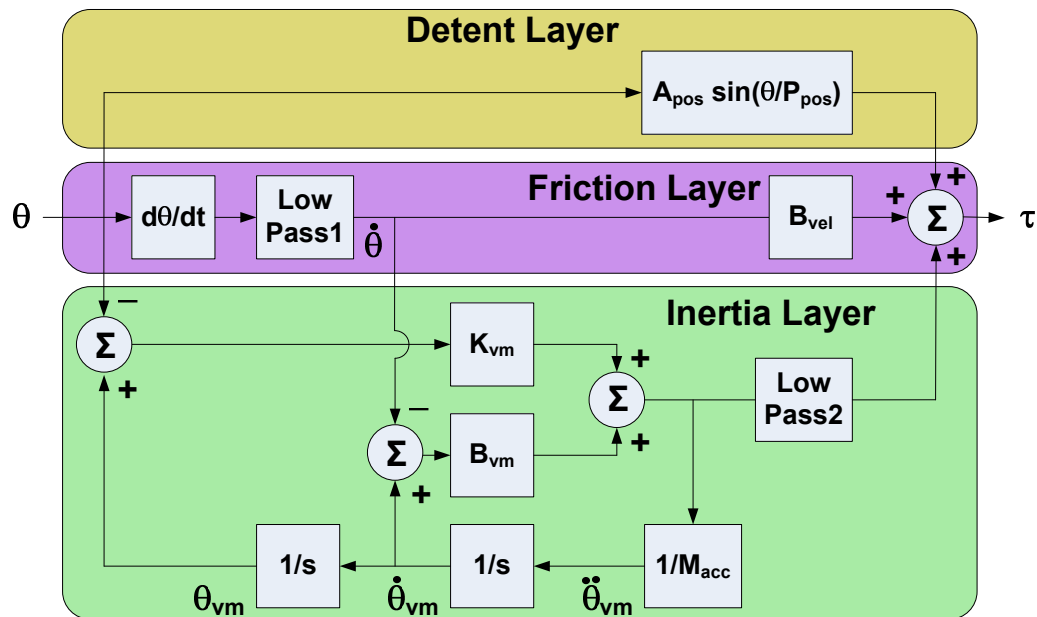


Abbildung A.19: Berechnungsmodell aus Swindells (2007, Abbildung 38 auf S. 79) bzw. Swindells, MacLean und Booth (2009, Abbildung 1) – die Berechnung der Drehmomente aufgrund des variablen Massenträgheitsmoments der virtuellen Masse M_{acc} befindet sich im grünen unteren Bereich. In Swindells, MacLean und Booth (2009, Abbildung 1) wird die Summe aller Drehmomente mit $-\tau$ anstatt mit τ bezeichnet, dies ist eine Fehlerkorrektur gegenüber der hier gezeigten Darstellung aus Swindells (2007, Abbildung 38 auf S. 79). Quelle: Swindells (2007, Abbildung 38 auf S. 79) – mit freundlicher Genehmigung des Autors.

A.3 Anhang zu Kapitel 7

A.3.1 Anhang zu Kapitel 7.1

A.3.1.1 Bestimmung des Signifikanzniveaus zur Erreichung einer Teststärke von 80% für "große" Effekte

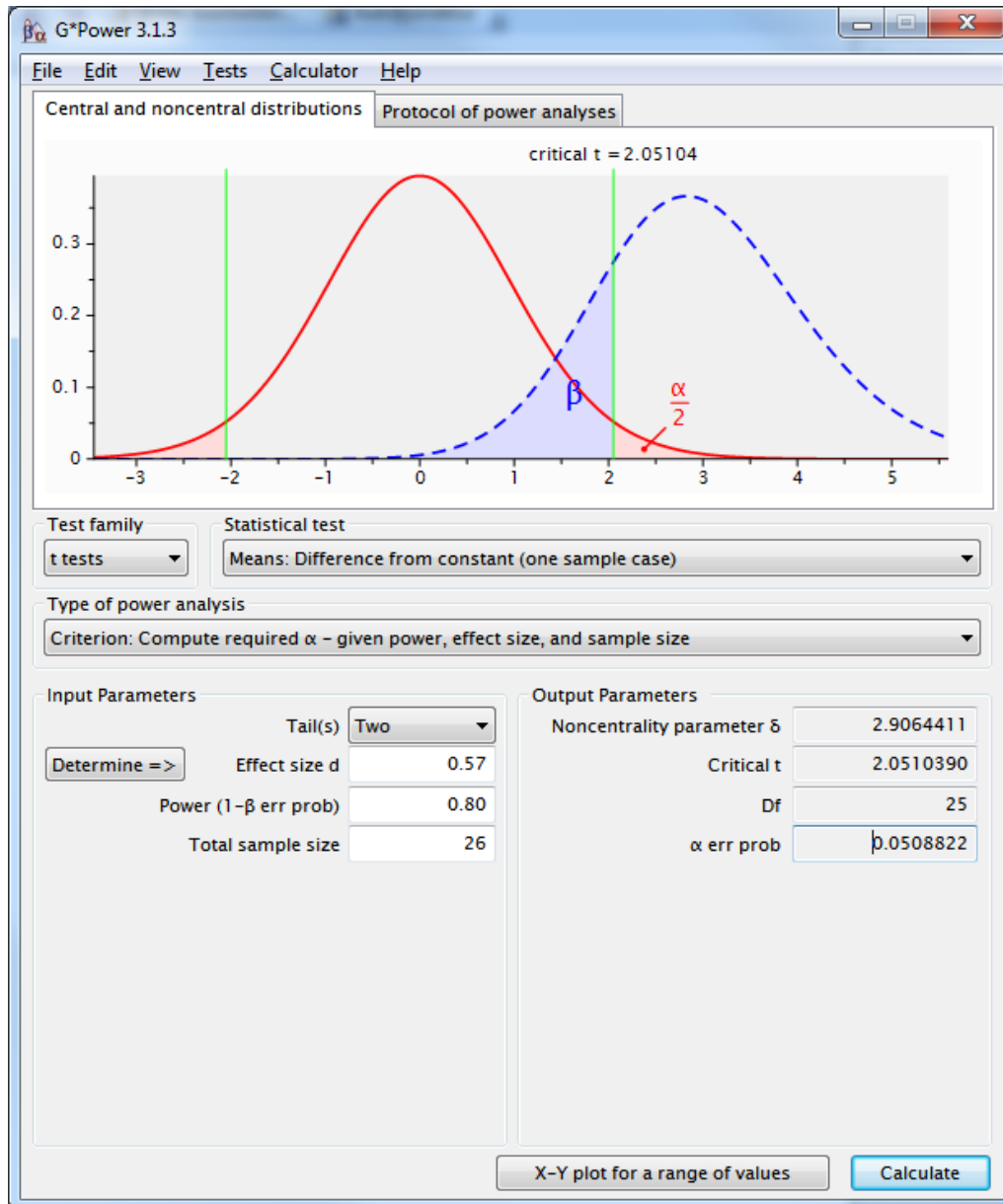


Abbildung A.20: Screenshot der Software G*Power – gezeigt werden die Parameter und das Ergebnis der Bestimmung des Signifikanzniveaus

A.3.2 Anhang zu Kapitel 7.2

A.3.2.1 Bestimmung des Signifikanzniveaus zur Erreichung einer Teststärke von 80% für "große" Effekte

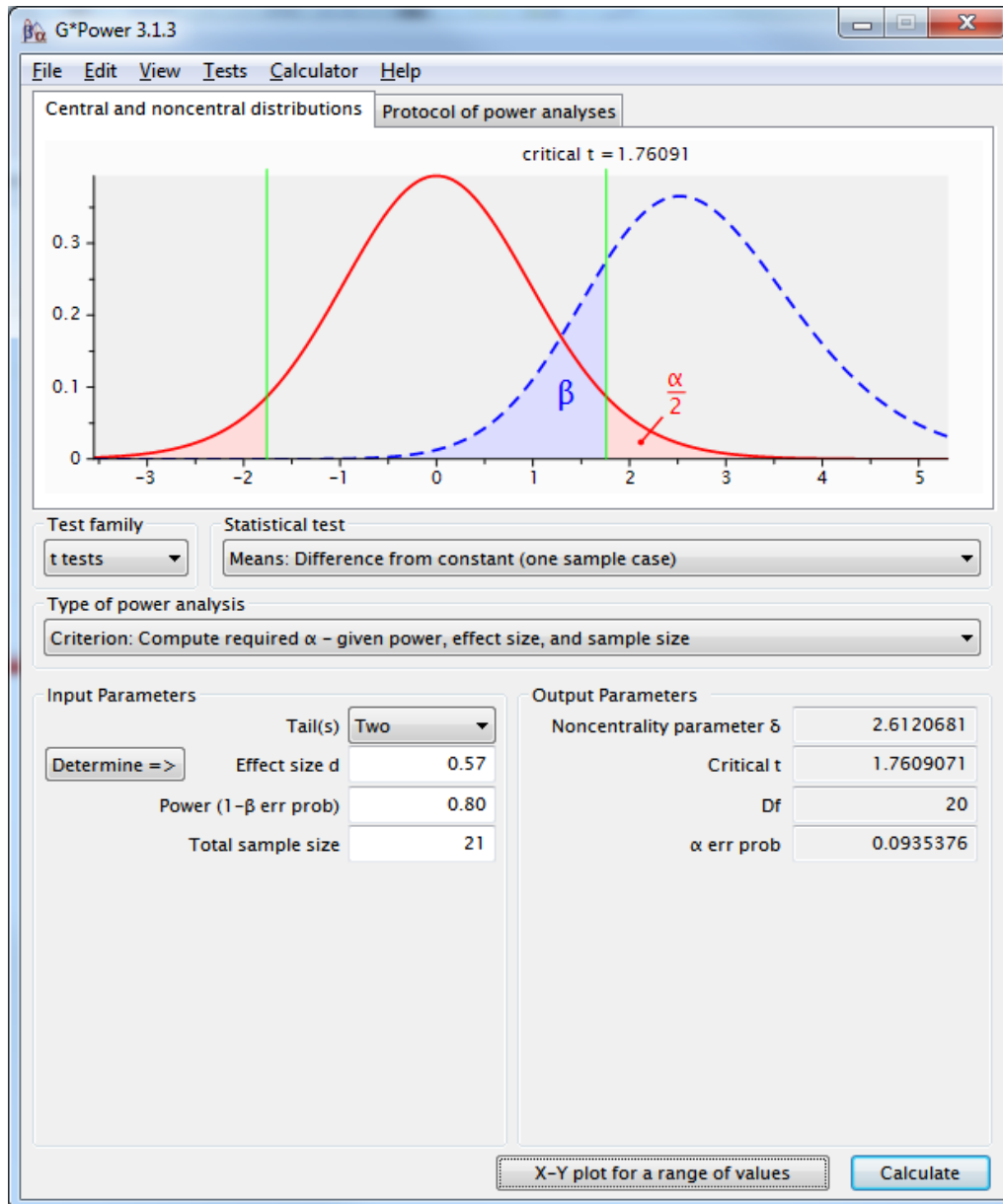


Abbildung A.21: Screenshot der Software G*Power – gezeigt werden die Parameter und das Ergebnis der Bestimmung des Signifikanzniveaus

A.3.3 Anhang zu Kapitel 7.3

A.3.3.1 Einheitenumrechnung

Die in KNOWLES und SHERIDAN (1966) genannten Werte für das Massenträgheitsmoment und die Coloumb'sche Reibung müssen für einen Vergleich vom angloamerikanischen in das metrische System umgerechnet werden.

Im Gegensatz zum metrischen System kann im angloamerikanischen System ein Drehmoment M als Produkt von *Masse* und *Länge* ausgedrückt werden. Im metrischen System wird ein Drehmoment durch das Produkt von *Kraft* und *Länge* formuliert. Damit sich beim Drallsatz $M = J \cdot \ddot{\phi}(t)$, mit J als Massenträgheitsmoment und ϕ als Winkel in rad, im angloamerikanischen System das Drehmoment korrekt ergibt, muss das Massenträgheitsmoment folglich die Dimension *Masse* mal *Länge* mal *Quadratsekunde* haben.

In KNOWLES und SHERIDAN (1966) werden $[7,3 \ 14,6 \ 35 \ 113,9] \times 10^{-3} \text{oz}_F \text{ in s}^2$ (Kraft-Unze Zoll Quadratsekunde) für das Massenträgheitsmoment und $[1 \ 2,7 \ 10] \text{oz}_F \text{ in}$ (Kraft-Unze Zoll) für die Coloumb'sche Reibung angegeben.

Die Umrechnung vom angloamerikanischen in das metrische System erfolgt daher ausgehend von

$$\text{metrisch: } M_{\text{metr}} = \text{Kraft} \cdot \text{Länge} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{Newton} \cdot \text{Meter} \quad (\text{A.36})$$

$$\text{angloamerikanisch: } M_{\text{anglo}} = \text{Masse} \cdot \text{Länge} = \text{oz}_F \cdot \text{in} = \text{Kraft-Unze} \cdot \text{Zoll} \quad (\text{A.37})$$

$$\rightarrow M_{\text{metr}} = M_{\text{anglo}} \cdot 0,028349523125 \text{ kg/oz}_F \cdot 0,0254 \text{ m/in} \cdot g \quad (\text{A.38})$$

$$\text{mit } g = 9,80665 \text{ m/s}^2 \quad (\text{A.39})$$

$$\rightarrow \frac{M_{\text{metr}}}{M_{\text{anglo}}} = 7,0616 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2 / \text{oz}_F \text{ in s}^2 \quad (\text{A.40})$$

$$= 7,0616 \times 10^{-3} \text{ Nm/in oz}_F \quad (\text{A.41})$$

und ergibt sich zu

$$\begin{aligned} & [7,3 \ 14,6 \ 35 \ 113,9] \times 10^{-3} \text{oz}_F \text{ in s}^2 \cdot \\ & \quad 7,0616 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2 / \text{oz}_F \text{ in s}^2 \\ & \quad = [52 \ 103 \ 247 \ 805] \times 10^{-6} \text{ kg m}^2 \quad (\text{A.42}) \end{aligned}$$

beziehungsweise

$$[1 \ 2,7 \ 10] \text{oz}_F \text{ in} \cdot 7,0616 \times 10^{-3} \text{ Nm/oz}_F \text{ in} = [7 \ 19 \ 71] \text{ mNm}. \quad (\text{A.43})$$

A.3.3.2 Fragebogen zur Bestimmung der Händigkeit

Fragebogen zur Bestimmung der Händigkeit

Welche Hand wird bevorzugt?

	Links (-10)	Keine Präferenz (0)	Rechts (+10)
1 Beim Schreiben	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 Beim Zeichnen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3 Beim Werfen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4 Beim Verwenden einer Schere	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5 Beim Zähneputzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6 Beim Verwenden eines Messers (ohne Gabel)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7 Beim Verwenden eines Löffels	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8 Beim Verwenden eines Besens (oberes Stielende)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9 Beim Anzünden eines Streichholzes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10 Beim Öffnen einer Box (Halten des Deckels)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Der Händigkeitindex LI (engl. *laterality index*) in Prozent berechnet sich zu

$$LI = \frac{\sum (\text{Rechts} + \text{Links})}{10}$$

Quellen

1. Handedness Questionnaire (2008) Mark S. Cohen <http://www.brainmapping.org/shared/Edinburgh.php>
2. Oldfield, R.C. *The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory*. *Neuropsychologia*. 9(1):97-113. 1971.

A.3.3.3 Bestimmung des Signifikanzniveaus zur Erreichung einer Teststärke von 80% für "große" Effekte

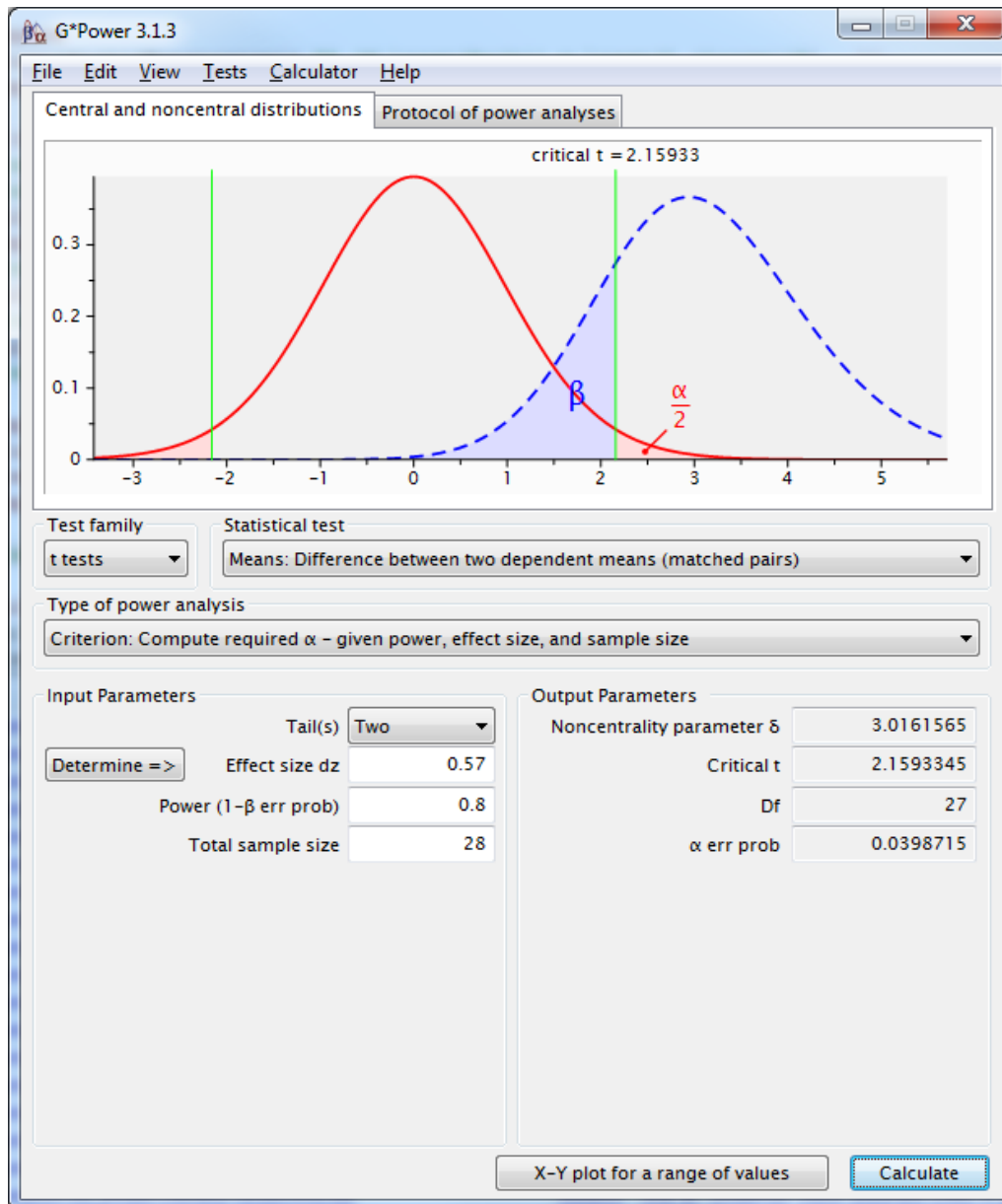


Abbildung A.22: Screenshot der Software G*Power – gezeigt werden die Parameter und das Ergebnis der Bestimmung des Signifikanzniveaus

A.3.3.4 Tabellen mit ausgewählten statistischen Kennwerten

Tabelle A.1: Statistische Kennwerte der ermittelten prozentualen Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment – alle Angaben in %

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Konstantreiz $R_J = M$ (medium)							
Dämpfung $d = S$ (small)							
08_MSS_1	4,31	15,09	28,02	40,95	133,62	24,37	31,25
09_MSM_1	10,78	21,55	32,33	62,50	146,55	31,78	44,18
11_MSL_1	6,47	21,55	34,48	53,88	129,31	34,76	45,87
Dämpfung $d = M$ (medium)							
13_MMS_1	12,93	31,25	63,58	116,38	189,66	53,58	77,12
15_MMM_1	17,24	40,95	59,27	73,28	198,28	41,56	66,58
18_MML_1	12,93	45,80	90,52	143,32	202,59	53,41	95,43
Konstantreiz $R_J = L$ (large)							
Dämpfung $d = S$ (small)							
21_LSS_1	3,12	9,38	18,75	26,56	64,06	14,33	20,26
22_LSM_1	4,69	14,84	20,31	34,38	89,06	17,10	25,46
24_LSL_1	6,25	12,11	17,19	25,39	59,38	11,60	19,98
Dämpfung $d = M$ (medium)							
26_LMS_1	6,25	18,75	27,34	42,58	82,81	18,40	31,14
28_LMM_1	14,06	21,88	31,25	41,41	93,75	20,22	35,44
31_LML_1	0,00	19,14	27,34	50,00	93,75	25,12	36,33

Tabelle A.2: Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Massenträgheitsmoment – alle Angaben in %

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Konstantreiz $R_J = M$ (medium)							
Dämpfung $d = S$ (small)							
08_MSS (Referenz)	-	-	-	-	-	-	-
09_MSM – 08_MSS	-30,17	-1,08	9,70	24,25	66,81	26,03	12,93
11_MSL – 08_MSS	-23,71	-4,31	7,54	28,02	101,29	26,62	14,62
Dämpfung $d = M$ (medium)							
13_MMS – 08_MSS	-6,47	12,39	31,25	68,43	140,09	48,02	45,87
15_MMM – 08_MSS	-19,40	11,31	33,41	52,26	127,16	33,69	35,33
18_MML – 08_MSS	-23,71	22,63	60,34	108,30	174,57	52,87	64,18
Konstantreiz $R_J = L$ (large)							
Dämpfung $d = S$ (small)							
21_LSS (Referenz)	-	-	-	-	-	-	-
22_LSM – 21_LSS	-56,25	-4,69	4,69	14,84	48,44	19,90	5,32
24_LSL – 21_LSS	-43,75	-11,33	1,56	8,20	50,00	19,25	-0,28
Dämpfung $d = M$ (medium)							
26_LMS – 21_LSS	-45,31	-1,56	9,38	24,61	56,25	21,20	10,88
28_LMM – 21_LSS	-50,00	2,73	14,06	25,78	64,06	22,69	15,18
31_LML – 21_LSS	-40,62	-1,56	11,72	28,12	79,69	28,06	16,07

Tabelle A.3: Statistische Kennwerte der ermittelten prozentualen Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung – alle Angaben in %

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Konstantreiz $R_d = M$ (medium)							
Massenträgheitsmoment $J = S$ (small)							
03_SMS_2	6,00	8,50	11,75	16,00	46,00	9,18	14,01
04_SMM_2	2,50	10,94	12,50	17,50	38,75	8,55	15,09
06_SML_2	7,50	11,25	17,50	29,38	46,67	12,21	21,36
Massenträgheitsmoment $J = M$ (medium)							
14_MMS_2	3,00	8,06	13,12	19,56	37,75	10,35	15,30
16_MMM_2	3,75	12,19	16,25	23,75	47,50	11,63	19,11
19_MML_2	5,00	12,50	19,37	25,00	52,50	11,13	20,67
Massenträgheitsmoment $J = L$ (large)							
27_LMS_2	4,50	10,56	17,62	21,56	41,50	8,44	17,26
29_LMM_2	2,50	9,69	16,88	27,81	61,25	14,54	20,67
32_LML_2	3,75	13,75	18,75	29,06	50,00	12,59	23,04

Tabelle A.4: Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Dämpfung – alle Angaben in %

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Konstantreiz $R_d = M$ (medium)							
Massenträgheitsmoment $J = S$ (small)							
03_SMS (Referenz)	-	-	-	-	-	-	-
04_SMM – 03_SMS	-29,75	-2,87	1,00	7,75	22,75	11,44	1,08
06_SML – 03_SMS	-28,50	-0,75	6,50	13,87	32,25	12,01	7,37
Massenträgheitsmoment $J = M$ (medium)							
14_MMS – 03_SMS	-15,75	-6,00	-1,12	7,38	27,25	10,79	1,29
16_MMM – 03_SMS	-42,25	-2,00	6,87	11,00	38,50	16,37	5,10
19_MML – 03_SMS	-28,50	0,87	5,25	10,31	41,00	13,87	6,66
Massenträgheitsmoment $J = L$ (large)							
27_LMS – 03_SMS	-36,00	-1,06	5,75	8,44	34,75	14,32	3,25
29_LMM – 03_SMS	-38,50	-3,50	3,87	19,00	45,25	18,30	6,66
32_LML – 03_SMS	-31,00	2,06	9,62	16,62	36,00	15,61	9,03

Tabelle A.5: Statistische Kennwerte der ermittelten prozentualen Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung – alle Angaben in %

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Konstantreiz $R_{M_{\text{Reib}}} = M$ (medium)							
Dämpfung $d = S$ (small)							
01_SSM_3	2,50	11,25	15,62	28,12	82,50	17,44	22,32
10_MSM_3	5,00	12,50	18,75	29,06	61,25	14,28	23,12
23_LSM_3	7,50	18,44	29,37	36,56	55,00	12,35	29,46
Dämpfung $d = M$ (medium)							
05_SMM_3	6,25	17,50	26,25	36,88	68,75	14,53	28,75
17_MMM_3	5,00	18,44	35,00	41,56	73,75	15,50	32,59
30_LMM_3	3,75	20,00	33,75	50,31	83,75	20,78	36,79
Konstantreiz $R_{M_{\text{Reib}}} = L$ (large)							
Dämpfung $d = S$ (small)							
02_SSL_3	2,50	6,67	9,59	11,88	31,67	7,32	11,40
12_MSL_3	3,38	6,67	8,34	15,84	37,50	8,90	12,44
25_LSL_3	4,17	8,96	14,59	22,29	36,67	9,60	16,49
Dämpfung $d = M$ (medium)							
07_SML_3	3,33	11,67	13,75	16,67	36,67	7,49	14,78
20_MML_3	2,50	10,00	17,92	26,67	57,50	12,59	19,66
33_LML_3	8,34	15,01	19,59	27,50	52,51	9,73	21,55

Tabelle A.6: Statistische Kennwerte der Differenzen der Unterschiedsschwellen für den Parameter Reibung – alle Angaben in %

	Min.	$Q_{0,25}$	Median	$Q_{0,75}$	Max.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Konstantreiz $R_{M_{\text{Reib}}} = M$ (medium)							
Dämpfung $d = S$ (small)							
01_SSM (Referenz)	-	-	-	-	-	-	-
10_MSM – 01_SSM	-70,00	-10,00	1,87	11,88	53,75	22,32	0,80
23_LSM – 01_SSM	-65,00	0,94	10,63	19,06	32,50	19,97	7,13
Dämpfung $d = M$ (medium)							
05_SMM – 01_SSM	-46,25	1,25	11,25	17,81	33,75	18,20	6,43
17_MMM – 01_SSM	-46,25	6,25	11,25	19,38	35,00	16,52	10,27
30_LMM – 01_SSM	-8,75	0,94	11,25	23,12	60,00	17,56	14,46
Konstantreiz $R_{M_{\text{Reib}}} = L$ (large)							
Dämpfung $d = S$ (small)							
02_SSL (Referenz)	-	-	-	-	-	-	-
12_MSL – 02_SSL	-18,33	-3,33	0,00	5,83	21,66	8,27	1,04
25_LSL – 02_SSL	-12,50	-1,04	2,92	8,96	28,33	10,34	5,09
Dämpfung $d = M$ (medium)							
07_SML – 02_SSL	-19,16	-2,60	3,33	10,00	20,00	9,27	3,38
20_MML – 02_SSL	-20,83	1,56	7,91	14,17	31,67	12,59	8,26
33_LML – 02_SSL	-7,51	3,96	9,59	16,67	28,33	9,83	10,15

B Datenblätter

B.1 Drehmomentsensor DRFL-I-0,2 (Wintec GmbH)

Drehmomentaufnehmer WHH-Serie-I bis VIII



Besondere Merkmale:

- wartungsfrei
- schleifringlose Signalübertragung
- eingebauter Messverstärker
- einfache Spannungsversorgung
- universell einsetzbar
- kompakte Abmessungen
- geringes Massenträgheitsmoment
- Drehzahlmessung (optional)
- Drehwinkelmessung (optional)

Kurzbeschreibung:

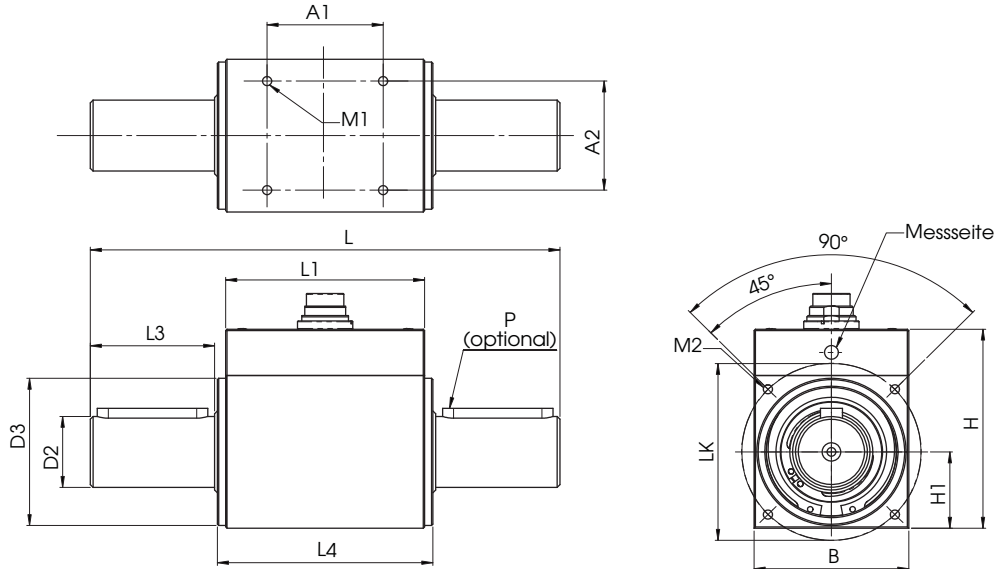
Der Aufnehmer eignet sich aufgrund der kompakten Abmessungen und vielfältiger Montagemöglichkeiten für den Einsatz im Labor und für die Industrieumgebung. Die berührungslose Übertragung von Speisespannung und Messsignal ermöglicht einen verschleißarmen und wartungsfreien Dauerbetrieb. Der integrierte Messverstärker

liefert ein analoges, galvanisch getrenntes Ausgangssignal von 0 bis ± 10 V bei einer Speisespannung von 12V DC. Die Standardversion wird mit glatten Wellenenden ohne Passfedern geliefert, verschiedene Typen (siehe Tabelle) sind als Sonderausführung mit Passfedernuten lieferbar.

Drehmomentaufnehmer

WHH-Serie-I bis VIII

Mechanische Abmessungen:



Typ	Serie-I	Serie-Ib	Serie-II	Serie-III	Serie-VI	Serie-VII	Serie-VIII	
Messbereich: [Nm]	0,05/0,1 0,2/0,5/ 1	2	1/2/5/10	5/10/20 30/50	50/100/150 200/300	500/1000 1300/1500	2000/3000 4000/5000	10000/ 15000/ 20000
Abmessungen:	Andere Messbereiche auf Anfrage							
L [mm]	89	95	110	145	170	270	320	355
B [mm]	28		36	42	56	88	105	168
H [mm]	48,5		54	58	73	104	121	185
H1 [mm]	14		18	21	28	44	52,5	84
D1 g6 [mm]	ø8	ø8	ø10	ø15	ø26	ø45	ø70	ø110
D2 g6 [mm]	ø5	ø6	ø10	ø15	ø26	ø45	ø70	ø110
D3 -0,1 [mm]	ø27		ø32	ø38	ø54	ø80	---	---
LK ±0,1 [mm]	ø32		ø38	ø46	ø65	ø98	---	---
L1	62		68	79	72	84	95	121
L2	10	14	18	30	45	85	110	115
L3	11	14	18	30	45	85	110	115
L4	66		72	83	78	90	---	---
A1	40		56	60	42	46	75	91
A2	22		24	32	40	70	85	138
M1	M3 x 5 tief	M3 x 6 tief	M3 x 6 tief	M4 x 8 tief	M6 x 12 tief	M8 x 16 tief	M10 x 16 tief	M10 x 16 tief
M2	M3 x 6 tief	M3 x 6 tief	M3 x 6 tief	M4 x 8 tief	M6 x 12 tief	---	---	---
P (DIN 6885) (optional)	---	2 x A3 x 3 x 14	2 x A5 x 5 x 25	2 x A8 x 7 x 40	4 x A14 x 9 x 80	4 x A20 x 12 x 100	---	---
Allgemeintoleranzen DIN 2768 - m								
Gewicht ca.: [g]	170	340	600	1300	4500	11500	33000	
n max.[1/min]	37000	26000	19000	13500	7900	6300	4000	

Drehmomentaufnehmer

WHH-Serie-I bis VIII

Technische Daten:

Speisespannung:	12V DC $\pm 10\%$	Option Drehzahl:	(n)
Stromaufnahme:	ca. 160mA	Drehzahl:	bis 10 000 min ⁻¹ *
Signalanstieg 10-90%	2ms	Ausgang:	Open- Kollektor
Grenzfrequenz -3dB	200Hz (optional 1kHz)	Interner Pull Up	10k Ω (5 V Pegel)
Spannungsausgang:	0 bis ± 10 V	Externer Pull Up	24 V max / 20mA
Innenwiderstand:	100 Ω	Impulse/Umdrehung:	60
Restwelligkeit:	< 100mVss	Option Drehwinkel:	(w)
Fehler für Nichtlinearität:	< 0,1%	Drehzahl:	bis 3 000 min ⁻¹ **
Fehler für Hysterese:	< 0,1%	Ausgang:	Open- Kollektor
Nullpunktabweichung:	$\leq \pm 100$ mV	Interner Pull Up	10k Ω (5 V Pegel)
max. Messfehler:	0,1% (bez. a. d. Endwert)	Externer Pull Up	24 V max / 20mA
Arbeitstemperaturbereich:	0-60°C	Impulse/Umdrehung:	360
Temperaturkomp. Bereich:	5-45°C	Auflösung:	1°
Temperaturfehler		Phasenversatz:	Kanal A 90° voreilend bei Rechtslauf der Antriebseite
Nullpunkt:	0,02%/K	Bei geeigneter	* 37.000 min ⁻¹
Empfindlichkeit:	0,01%/K	externer Beschaltung	** 15.000 min ⁻¹
Mechanische Überlastbarkeit:	100%		(bzw. Drehzahl max.)
Schutzart:	IP 40 nach DIN 40050		
Anschluss:	12pol.- Einbaustecker		

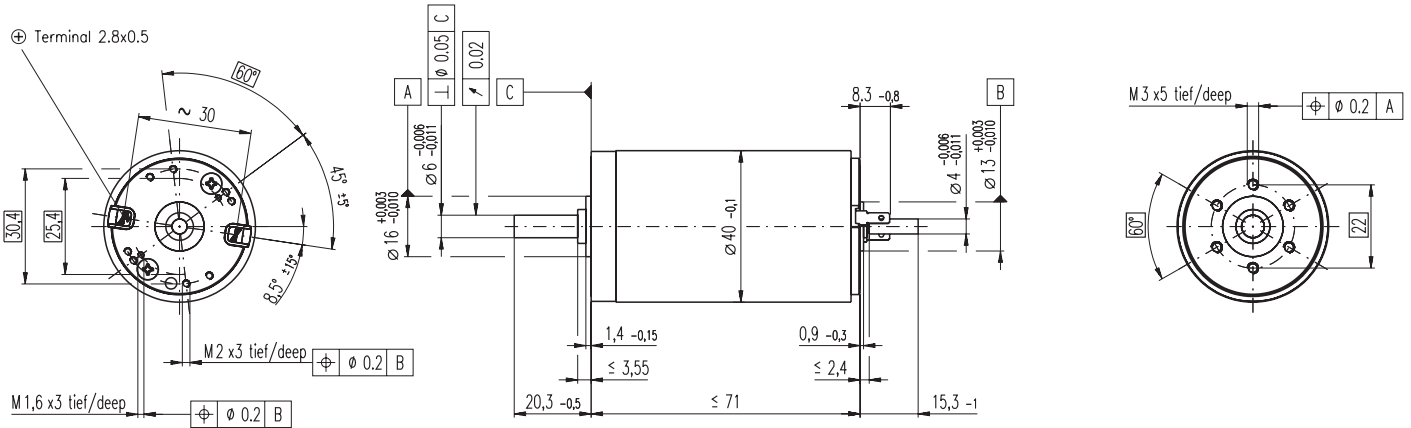
Die Werte für Axial- und Radiallast gelten für das nicht fixierte Gehäuse

Typ	Messbereich [Nm]	Federkonstante C [Nm/rad]	Massenträgheitsmoment J [g·cm ²]	Zulässige Axiallast [N]	Zulässige Radiallast [N]
Serie-I	0,05	20	10	105	2
	0,1	35	10	140	3
	0,2	35	10	140	3
	0,5	45	10	160	4
	1	90	10	210	7
	2	135	10	210	13
Serie-Ib	1	255	30	630	10
	2	255	30	630	10
	5	715	30	725	25
	10	1320	30	725	50
Serie-II	5	960	100	1200	15
	10	2115	100	1300	30
	20	3955	100	1300	60
	30	5340	105	1300	100
	50	6700	105	1300	155
Serie-III	50	17 x 10 ³	775	1800	125
	100	30 x 10 ³	785	1800	215
	150	45 x 10 ³	800	1800	340
	200	54 x 10 ³	810	1800	450
	300	67 x 10 ³	840	1800	650
Serie-VI	500	260 x 10 ³	9935	4150	650
	1000	387 x 10 ³	10140	4150	1275
	1300	429 x 10 ³	10285	4150	1650
	1500	449 x 10 ³	10380	4150	1700
Serie-VII	2000	1,45 x 10 ⁶	63 x 10 ³	4800	1950
	3000	1,85 x 10 ⁶	64 x 10 ³	4800	2930
	4000	2,10 x 10 ⁶	64 x 10 ³	4800	3880
	5000	2,30 x 10 ⁶	65 x 10 ³	4800	4000
Serie-VIII	10000	8,20 x 10 ⁶	440 x 10 ³	11800	8895
	15000	10,45 x 10 ⁶	448 x 10 ³	11800	9830
	20000	11,80 x 10 ⁶	546 x 10 ³	11800	9830

B.2 Gleichstrommotor RE 40, 148867 (Maxon Motor AG)

Bestellnummer 148867 (24V-Variante)

RE 40 Ø40 mm, Graphitbürsten, 150 Watt



M 1:2

- Lagerprogramm
- Standardprogramm
- Sonderprogramm (auf Anfrage)

Bestellnummern

148866 148867 148877 218008 218009 218010 218011 218012 218013 218014 218015

Motordaten		148866	148867	148877	218008	218009	218010	218011	218012	218013	218014	218015
Werte bei Nennspannung												
1 Nennspannung	V	12.0	24.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
2 Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹	6920	7580	7580	6420	5560	3330	2690	2130	1710	1420	987
3 Leerlaufstrom	mA	241	137	68.6	53.7	43.7	21.9	16.7	12.5	9.67	7.77	5.16
4 Nenndrehzahl	min ⁻¹	6370	6930	7000	5810	4920	2700	2050	1500	1080	774	339
5 Nennmoment (max. Dauerdrehmoment)	mNm	94.9	170	184	183	177	187	187	189	189	188	188
6 Nennstrom (max. Dauerbelastungsstrom)	A	6.00	5.77	3.12	2.62	2.20	1.38	1.12	0.898	0.721	0.593	0.413
7 Anhaltmoment	mNm	1680	2280	2500	1990	1580	995	796	641	512	415	289
8 Anlaufstrom	A	102	75.7	41.4	28.0	19.2	7.26	4.68	3.00	1.92	1.29	0.627
9 Max. Wirkungsgrad	%	88	91	92	91	91	89	88	87	86	85	83
Kenndaten												
10 Anschlusswiderstand	Ω	0.117	0.317	1.16	1.72	2.50	6.61	10.2	16.0	24.9	37.1	76.6
11 Anschlussinduktivität	mH	0.0245	0.0823	0.329	0.460	0.612	1.70	2.62	4.14	6.40	9.31	19.2
12 Drehmomentkonstante	mNm A ⁻¹	16.4	30.2	60.3	71.3	82.2	137	170	214	266	321	461
13 Drehzahlkonstante	min ⁻¹ V ⁻¹	581	317	158	134	116	69.7	56.2	44.7	35.9	29.8	20.7
14 Kennliniensteigung	min ⁻¹ mNm ⁻¹	4.15	3.33	3.04	3.23	3.53	3.36	3.39	3.35	3.37	3.44	3.45
15 Mechanische Anlaufzeitkonstante	ms	6.03	4.81	4.39	4.36	4.35	4.31	4.31	4.31	4.31	4.32	4.33
16 Rotorträgheitsmoment	gcm ²	139	138	138	129	118	123	121	123	122	120	120

Spezifikationen

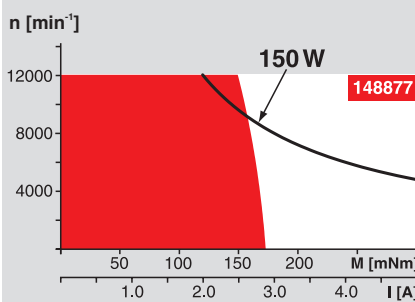
- Thermische Daten**
- 17 Therm. Widerstand Gehäuse-Luft 4.65 KW⁻¹
 - 18 Therm. Widerstand Wicklung-Gehäuse 1.93 KW⁻¹
 - 19 Therm. Zeitkonstante der Wicklung 41.6 s
 - 20 Therm. Zeitkonstante des Motors 1120 s
 - 21 Umgebungstemperatur -30 ... +100°C
 - 22 Max. Wicklungstemperatur +155°C
- Mechanische Daten (Kugellager)**
- 23 Grenzdrehzahl 12000 min⁻¹
 - 24 Axialspiel 0.05 - 0.15 mm
 - 25 Radialspiel 0.025 mm
 - 26 Max. axiale Belastung (dynamisch) 5.6 N
 - 27 Max. axiale Aufpresskraft (statisch) 110 N (statisch, Welle abgestützt) 1200 N
 - 28 Max. radiale Belastung, 5 mm ab Flansch 28 N

- Weitere Spezifikationen**
- 29 Polpaarzahl 1
 - 30 Anzahl Kollektorsegmente 13
 - 31 Motorgewicht 480 g

Motordaten gemäss Tabelle sind Nenndaten. Erläuterungen zu den Ziffern Seite 49.

- Option**
Vorgespannte Kugellager

Betriebsbereiche

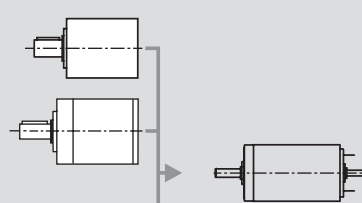


Legende

- Dauerbetriebsbereich**
Unter Berücksichtigung der angegebenen thermischen Widerstände (Ziffer 17 und 18) und einer Umgebungstemperatur von 25°C wird bei dauernder Belastung die maximal zulässige Rotortemperatur erreicht = thermische Grenze.
- Kurzzeitbetrieb**
Der Motor darf kurzzeitig und wiederkehrend überlastet werden.
- Typenleistung**

maxon-Baukastensystem

- Planetengetriebe**
Ø42 mm
3 - 15 Nm
Seite 244
- Planetengetriebe**
Ø52 mm
4 - 30 Nm
Seite 247



- Empfohlene Elektronik:**
- ADS 50/5 Seite 276
 - ADS 50/10 277
 - ADS_E 50/5 277
 - ADS_E 50/10 277
 - EPOS 24/5 294
 - EPOS2 50/5 295
 - EPOS 70/10 295
 - EPOS P 24/5 297
 - Hinweise** 18

Übersicht Seite 16 - 21

- Encoder MR**
256 - 1024 Imp.,
3 Kanal
Seite 259
- Encoder HED_ 5540**
500 Imp.,
3 Kanal
Seite 262 / 264
- Bremse AB 28**
Ø45 mm
24 VDC, 0.4 Nm
Seite 308
- Industrie-Version Encoder HEDL 9140**
Seite 267
- Bremse AB 28**
Seite 309

B.3 Winkelsensor 2RMHF (Scancon)



24 mm diameter - up to 7500 pulses/turn
up to 30000 counts



Also as Absolute SSI - Section 14 page 1 to 2

CHARACTERISTICS

ENCODER TYPE	Hollow shaft encoder (blind end)
SMD - TECHNOLOGY	Strong compact electronics
HIGH IP-RATING	Std. IP 64 (option; Ribbon cable + IDC connector = IP50)
LOW CURRENT CONSUMPTION	To be connected directly to PLC'S and counters
SHORT CIRCUIT PROTECTION	Thermal shut down at 155°C
WIDE SUPPLY RANGE	Min. 4,5V to max 30V
STRONG CONSTRUCTION	Based on 2 precision ball bearings, for industrial environments

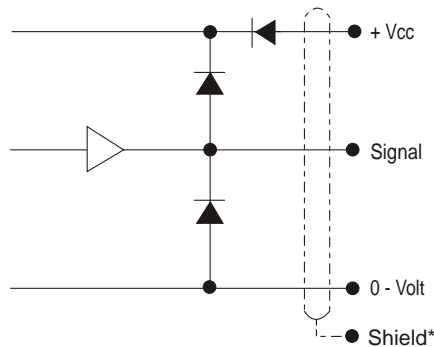
ELECTRICAL SPECIFICATIONS

	At +25°C
Output	Totempole
Output waveform	Incremental (A, B)
Zero or index pulse	(Z) one pr./rev.
Supply-voltage (Vin)	Min 4,5V to Max. 30V * Reverse polarity protection
Current (no load)	35mA
Max. load pr. output	20mA (Short circuit protected)*
V out low	Max. 500 mV @ I = 10 mA
Operating temp.	-40°C to +85° C
Storage temp.	-40° C to +85°C
Max. pulse frequency	200 kHz *
V out high	Min. (Vin -0,6) @ I = -10mA Min. (Vin -1,3) @ I = -25mA
Cable data	5(0,14 mm ²) or 8-leads(0,05mm ²) shielded
Output signals	Standard, Inverted Differential (RS-422A compatible)
Certified acc. to	EN 50081-1 and EN 50082-2
	* = It is not recommended to combine max value for all 3 parameters

MECHANICAL SPECIFICATIONS

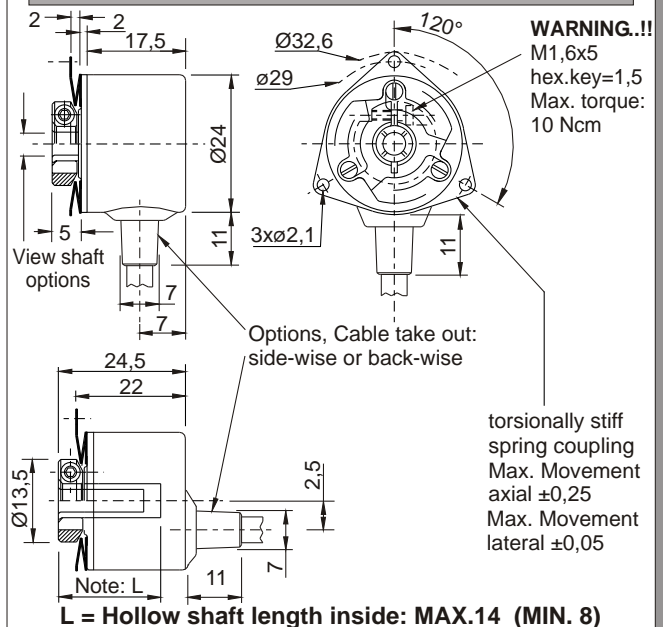
Weight	About 35 g (+cable = 0,040 Kg/meter)
Materials: Housing	Electroplated steel and brass
Shaft	Brass
Bearings	Lifetime lubricated ball-bearings
Fix. clamp	Brass
H.-Shaft dimensions	View Ordering Code, next page
H.-Shaft loads	Axial max. 20 N Radial max. 20 N
Max. rev.	12,000 rev./min.
IP-rating	IP 64
Start torque	<0,005 Nm at 25°C
Mass moment of inertia	1,0 gcm ²
Max. shock	100 G/11 ms.
Bump	10 G - 16 ms (1000 x 3axis)
Vibration	(10 - 2000 Hz)/10 G

OUTPUT CIRCUIT



* Shield connected to housing

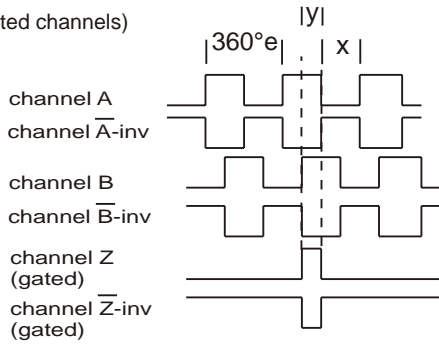
MECHANICAL DIMENSIONS



OUTPUT WAVEFORM

Rotation: Clockwise (cw) from shaftside

(inv = inverted channels)



$X = 180^\circ e \pm 36^\circ e$ and $Y = 90^\circ e \pm 18^\circ e$
Z puls: Gated with A and B (standard)

Options: TTL or HTL compatible. Open Collector NPN or PNP
Gated Z-puls or none-gated Z-puls.
View more Output options in section 16 - page 1 to 2

CONNECTIONS

Color code	Standard	Color code	Differential
Green	Ch A	Pink	Ch A
Yellow	Ch B	Grey	Ch A inv
Grey	Ch Z	Green	Ch B
Brown	Vcc	Yellow	Ch B inv
White	0-Volt	White	Ch Z
		Brown	Ch Z inv
		Red	Vcc
		Blue	0-Volt

PULSES/REV.

4	30	100	250	600	2048
10	36	125	256	1000	2500
11	50	128	300	1024	3000
12	60	150	360	1250	3600
15	75	180	400	2000	5000
25	90	200	500	2500	7500

ORDERING CODES

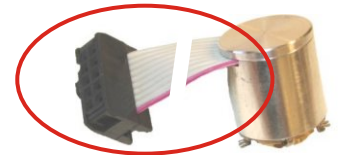
	Options	Order code
Pulses pr.rev.:	No. of pulses	XXXX
Output signal:	Normal (TP-Standard) 3 channel = A, B, Z	N
	TP-Differential, 6 channel A, B, Z and A-inv, B-inv, Z-inv	D
Hollow Shaft	ø3 mm	03
Dimensions:	ø4 mm	04
(Tolerance G7)	ø5 mm	05
	ø6 mm	06
	ø1/4"	1/4
IP-rating:	IP 64	64
Round Cable	Standard 1 meter	01
Length of cable:	No. of meters	XX
Round Cable	Side	S
take out:	Back	B
Cable and connector options:	View section 15 page 10 to 14	
Anti rotation spring coupling or Flange / Plate:	View Section 8 page 9 to 13	

Flat Ribbon Cable and/or Connector

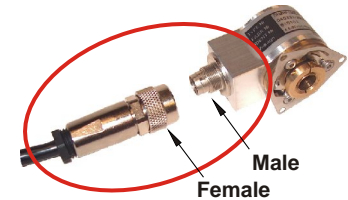
View section 15 page 10 to 14

Options

Flat Cable (only IP 50)
Ribbon + IDC or AMP



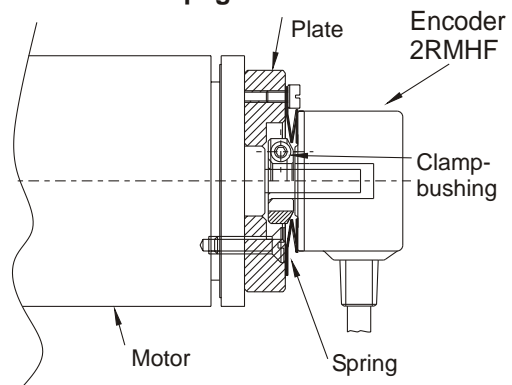
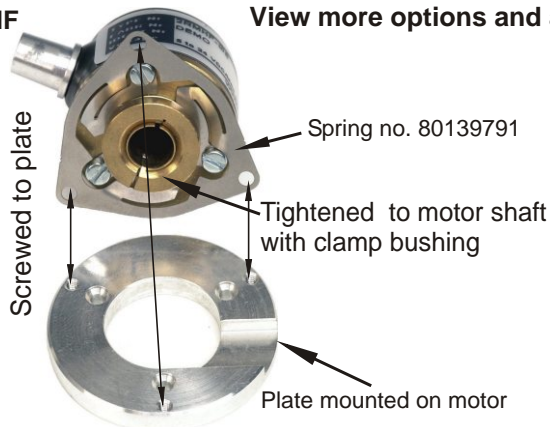
Connector on Encoder:
(only IP64)



CHARACTERISTICS; For montage on motor or other unit.

2RMHF

View more options and accessories in Section 9 page 1 to 6



2RMHF

Pulses

Output signal

Hollow Shaft

IP-rating

Length of round cable take out

Anti Rotation Spring Coupling

Flange / Plate Order Number