

**Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung
und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und
Bedienfeldern für den Kfz-Innenraum**

Von der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

von

Dipl.-Ing. Nikolay Anguelov

geboren am 29. April 1976 in Lom/Bulgarien

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder
Prof. Dr. Bernhard Schlag
Dr.-Ing. Stefan Blossey

Tag der Einreichung: 22. Juli 2008
Tag der Verteidigung: 18. Mai 2009

Anguelov, Nikolay:

Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und Bedienfeldern für den Kfz-Innenraum

Nikolay Anguelov. –

Als Ms. gedr.. – Berlin : dissertation.de – Verlag im Internet GmbH, 2009

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2009

ISBN 978-3-86624-445-0

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

dissertation.de – Verlag im Internet GmbH 2009

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, auf Datenträgern oder im Internet und der Übersetzung, vorbehalten.

Es wird ausschließlich chlorfrei gebleichtes Papier (TCF) nach DIN-ISO 9706 verwendet.
Printed in Germany.

dissertation.de - Verlag im Internet GmbH
Pestalozzistraße 9
10625 Berlin

URL: <http://www.dissertation.de>

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung „Elektrik/Elektronik-Telematik“ (EP/ETI) des Mercedes-Benz-Technologie-zentrums (MTC) in Sindelfingen. Deshalb möchte ich mich zunächst bei meinem wissenschaftlichen Leiter, Herrn Dr. Stefan Blossey, sowie bei seinem Vorgänger, Herrn Dr. Stefan Schwehr, für ihr Vertrauen und für die von ihnen aufgestellten Rahmenbedingungen bedanken, die diese Promotion erst ermöglicht haben. Danken möchte ich auch dem Team „Emotionale Bedienelemente“, dem ich angehörte, insbesondere meinem Teamleiter, Herrn Arthur Hipp, der großzügig für den für die Umsetzung dieser Doktorarbeit notwendigen Freiraum gesorgt hat.

Zu Dank verpflichtet bin ich außerdem Herrn Dr. Götz Renner und seinem Team vom „Customer Research Center“ (CRC) in Berlin für die intensive und kooperative Zusammenarbeit. Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Holger Enigk und Herrn Norbert Boemak für ihre unentbehrliche Unterstützung und ihre konstruktive Kritik.

Bedanken möchte ich mich weiterhin beim Direktor des „Instituts für technische Logistik und Arbeitssysteme“ an der Technischen Universität Dresden, Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder, für die freundliche Übernahme der Betreuung meiner Arbeit. Auch Herrn Prof. Bernhard Schlag gilt mein Dank für sein Interesse und seine Bereitschaft, das Koreferat zu übernehmen.

Ein ganz herzliches Dankeschön spreche ich meiner Ehefrau Anna aus. Ohne ihre Unterstützung und ihr Verständnis für die zahlreichen Überstunden wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ismaning, im Mai 2008

Nikolay Anguelov

Danksagung

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	1
1	Einleitung 7
1.1	Ausgangssituation 7
1.2	Problemstellung 9
1.3	Ziele der Arbeit 11
1.4	Vorgehensweise 12
2	Stand der Wissenschaft und Technik 13
2.1	Allgemeiner Überblick 13
2.2	Physiologische Grundlagen des Tastens 15
2.2.1	Das somatosensorische System..... 17
2.2.2	Das motorische System 22
2.3	Physiologische Grundlagen des Hörens 25
2.3.1	Das auditive System 25
2.4	Psychologische Grundlagen des Hörens 28
2.4.1	Reiz- und Empfindungsgrößen 28
2.4.2	Psychoakustische Empfindungsgrößen 29
2.5	Zusammenfassung des Forschungsüberblicks 32
2.6	Stand der Technik bei Stellteilen im Auto 33
2.6.1	Begriffsdefinition und Systematik der Bedienelemente 33
2.6.2	Funktionsprinzipien von Stellteilen..... 35
2.6.3	Kenngößen von Tastern und Drehschaltern 47
2.6.4	Erkenntnisse zur Haptik und Akustik von Stellteilen 52
2.6.5	Zusammenfassung 56
3	Ermittlung von Kenngrößen für Stellteile 59
3.1	Voruntersuchungen 59
3.2	Aufstellung der Forschungsfragen (Hypothesen) 64
3.2.1	Allgemeine Hypothesen 64
3.2.2	Hypothesen zu den demografischen Merkmalen 64
3.2.3	Hypothesen zu den haptischen Gestaltungsparametern 65
3.2.4	Hypothesen zu akustischen Gestaltungsparametern..... 65
3.3	Merkmalsextraktion und Gegenstand der Untersuchungen 66
3.3.1	Extraktion charakteristischer Merkmale bei den Tastern 66

3.3.2	Extraktion charakteristischer Merkmale bei den Drehschaltern	70
3.3.3	Extraktion charakteristischer Merkmale bei den Schaltergeräuschen	74
3.4	Versuchsdesign und Versuchsdurchführung	76
3.4.1	Planung und Vorbereitung	76
3.4.2	Versuchsaufbau und Versuchsablauf	83
4	Ergebnisse	89
4.1	Haptische Wertanmutung von Tastern	89
4.1.1	Charakterisierung der Mittelwerte und Standardabweichungen.....	89
4.1.2	Korrelationsanalysen	96
4.1.3	Untersuchung hinsichtlich des Faktors „Alter“.....	99
4.2	Haptische Wertanmutung von Drehschaltern	102
4.2.1	Charakterisierung der Mittelwerte und Standardabweichungen.....	102
4.2.2	Analyse der Wertungskorrelationen	111
4.2.3	Untersuchung hinsichtlich des Faktors „Alter“.....	113
4.3	Akustische Wertanmutung von Schaltergeräuschen	116
4.3.1	Charakterisierung der Mittelwerte und Standardabweichungen.....	116
4.3.2	Analyse der Wertungskorrelationen	122
4.3.3	Untersuchung hinsichtlich des Faktors „Alter“.....	124
4.4	Kenngößen zur Objektivierung der haptischen Wertanmutung.....	126
4.4.1	Definition der Wertanmutungskenngrößen von Tastern	126
4.4.2	Definition der Wertanmutungskenngrößen von Drehschaltern	128
4.5	Validierung psychoakustischer Empfindungsgrößen	130
4.6	Wechselwirkung zwischen Haptik und Akustik	131
4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	133
5	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	135
5.1	Anmerkung zur Bewertung der Probanden	135
5.2	Diskussion der Hypothesen.....	135
5.3	Kritische Betrachtung der Studie	137
5.3.1	Datenerhebungs- und Auswertungsmethode.....	137
5.3.2	Auswahl der Stichprobe	138
5.3.3	Untersuchungsinstrumente und -situation.....	138
5.3.4	Interpretationsumfang der Ergebnisse	139
6	Zusammenfassung und Ausblick	141
7	Abbildungsverzeichnis	143

8	Literaturverzeichnis.....	149
Anhang	159	
Anhang A: Zusammenfassung der physikalischen Parameter der Taster.....		160
Anhang B: Zusammenfassung der physikalischen Parameter der Drehschalter.....		169
Anhang C: Zusammenfassung der physikalischen Parameter der Schaltergeräusche.....		175
Anhang D: Vollständiger Output des Programms SPSS		179
D.1: Output Faktorenanalyse Taster.....		179
D.2 Output Regressionsanalyse Taster		186
D.3 Output Faktorenanalyse Drehschalter.....		191
D.4 Output Korrelationsanalyse Drehschalter.....		196
Anhang E: Beschreibung der verwendeten statistischen Methoden		197
E.1 Faktorenanalyse mit SPSS		197
E.2 Multiple lineare Regressionsanalyse		199

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Neben der äußeren Formgebung und den guten Fahreigenschaften eines Kraftfahrzeugs kommt dem Innenraum eine immer größer werdende Bedeutung für die Schaffung einer positiven Emotionalität zu. Der Innenraum ist der Bereich, in dem der Kunde den engsten Kontakt mit dem Auto hat. Hier bewältigt er seine Fahraufgabe, hier „lebt“ er während der Fahrzeugnutzung.

Die unterschiedliche Gewichtung der Anforderungen für die Gestaltung des Fahrzeuginnenraums bei den verschiedenen Automobilherstellern führte zu Beginn der 1990er-Jahre dazu, dass die Stellteile trotz einer steigenden Anzahl von Funktionen tendenziell abnahmen. Dies wurde durch die Einführung von sogenannten multifunktionalen Stellteilen ermöglicht. Eine intern durchgeführte Analyse von Anordnungskonzepten für Bedienelemente im PKW-Innenraum [Anguelov, 2002] bestätigte die folgenden zwei Erkenntnisse: Erstens findet eine Funktionsgruppierung der Stellteile und damit auch eine räumliche Gruppierung im Innenraum statt, zweitens sind die am häufigsten betätigten Stellteile der Taster und der Drehschalter. Weiterhin zeigte diese Analyse, dass häufig und herstellerunabhängig für sicherheits- und fahrspezifische Funktionen Taster und/oder Drehschalter verwendet werden – Start-Stopp-Taster, Taster für die Warnblinkanlage, Notruftaster, Taster für das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), Lichtdrehschalter etc.

Der Kunde interessiert sich nicht dafür, was sich hinter dem einzelnen Bedienelement verbirgt, solange es seine Funktion erfüllt. Außerdem erwartet der Kunde hinsichtlich des Interieurs, dass der erste optische Eindruck durch die bei der Betätigung der Bedienelemente wahrnehmbare Haptik und das dabei auftretende Geräusch bestätigt wird. Kann diese Erwartungshaltung aufgrund des Schaltergeräusches nicht bestätigt werden, so verliert selbst ein ergonomisch hervorragender und mit einer ansprechenden Optik versehener Schalter jedwede Kundenakzeptanz. Die Steigerung der haptischen und akustischen Wertigkeit im Innenraum erweist sich daher als ein wesentlicher Beitrag zur Wertanmutung des gesamten Fahrzeugs.

Auf der anderen Seite sind die Erwartungshaltungen und die individuellen Erlebnisse der Kunden sehr unterschiedlich. Um dieser Vielfalt gerecht zu werden, ist es nötig,

Kundengruppen mit spezifischen Eigenschaften und Motiven zu identifizieren und zu beschreiben. Psychologen arbeiten stetig an der Verbesserung der existierenden Kundentypologien, wobei Merkmale wie z. B. der Fahrstil und die technische Affinität berücksichtigt werden. Ohne ein solides Wissen über die speziellen Wünsche und Erwartungen der Kunden bezüglich der haptischen und akustischen Gestaltung der Bedienelemente ist der Automobilhersteller oft zu weit vom Kunden entfernt und entwickelt Produkte, welche die erwartete und erhoffte Kundenakzeptanz verfehlen.

Aber nicht nur die Automobilhersteller, sondern auch die entsprechenden Zulieferer entdecken zunehmend die Wichtigkeit der Wertanmutung, wie folgende Zitate belegen:

„Die Wertanmutung wird zu einem der wichtigsten Kriterien beim Kauf“ [Pressemappe Fa. Faurecia, Oktober 2004];

„Wertigkeit und Emotion sind entscheidende Elemente im Fahrzeuginnenraum. Denn die empfundene Wertanmutung ist bedeutend für die Kaufentscheidung des Kunden“ [Internetpublikation, Fa. Bayern Innovativ GmbH, Innovationskongress November 2006].

Trotz der weitverbreiteten Verwendung des Kunstwortes „Wertanmutung“ liegen seine genaue Bedeutung und Herkunft noch immer im Dunkeln, da es eine klare und eindeutige Definition des Begriffes in der deutschen Sprache bis heute nicht gibt. Aus den im Duden beschriebenen Bedeutungen der Begriffe „anmuten“¹ und „zumuten“² ließe sich jedoch ableiten, dass dieses Begriffspaar für eine Subjekt-Objekt-Beziehung steht bzw. auf eine solche übertragen werden kann. Demzufolge fühlt sich ein Subjekt „angemutet“ als Reaktion auf die „Zumutung“ eines Gegenstandes. Darüber hinaus suggeriert der Begriff „Anmutung“ ein gefühlsmäßiges, meist unbewusstes Eindruckerlebnis.

¹ Einen bestimmten Eindruck machen, in bestimmte Weise wirken [Duden, 2001, 1. Bedeutung]

² Von jemandem etwas verlangen [Duden, 2001, 1. Bedeutung]

1.2 Problemstellung

Um die Bediensicherheit im Auto weiterhin zu steigern und gleichzeitig den Fahrer nicht zu sehr von seiner Primäraufgabe, der Fahrzeugführung, abzulenken, ist eine eindeutige Rückmeldung als Bestätigung des erfolgreichen Bedienvorgangs notwendig. In seiner Analyse hinsichtlich der Eignung bzw. Verfügbarkeit der menschlichen Sinne für eine uneingeschränkte Interaktion bei der Fahrzeugführung zeigt [Mauter, 2004], dass der Tastsinn, darunter auch der haptische Informationskanal inbegriffen, heutzutage der einzige weitgehend freie Eingangskanal für Wahrnehmungsinhalte ist. Der Sehsinn und der Hörsinn, die auch für die Interaktion mit dem Fahrzeug relevant sind, sind dagegen bereits überlastet. Zu dieser Schlussfolgerung kommt auch [Zeilinger, 2005] in seiner Forschungsarbeit. Neben der starken Belastung des visuellen und des auditiven Sinneskanals, die aus der steigenden Informationsdichte im heutigen Straßenverkehr resultiert, weist er „erhebliche Schwachstellen“ bezüglich der Qualität der im Rahmen der heutigen technischen Lösungen erzeugten Haptik nach.

Andererseits orientieren sich die Fahrzeughersteller bei der Konzipierung der Fahrzeuginnenräume bestmöglich an den Wünschen der Zielkunden und gestalten diese im Hinblick auf Bedienfreundlichkeit, Design und Materialien so, dass sie für jeden Sinn angenehme, werthaltige Eindrücke bereithalten: „Auch die Innenverkleidungen der Türen spiegeln das Ziel der Mercedes-Ingenieure wider, formschönes Design und angenehme Haptik in Einklang zu bringen“ [DaimlerChrysler AG, 2004].

Nachdem die wesentliche Rolle der haptischen Rückmeldung bei einer intuitiven Bedienung durch die Arbeit von [Doerrer, 2003] nachgewiesen werden konnte, ergab sich für den Entwickler die Herausforderung, die subjektiv erlebbare haptische Wertigkeit, die wiederum von der konstruktiven Gestaltung des Bedienteils abhängt, gezielt zu gestalten. Diese Herausforderung wird weiterhin durch die Tatsache erschwert, dass zum einen das individuelle Erlebnis des Kunden nur sehr schwer objektiv messbar ist und dass zum anderen der Kunde seine erlebbaren Wahrnehmungsinhalte nur mühsam mit Worten beschreiben kann.

Wie schon im vorherigen Kapitel angedeutet und von [Rosenberg, 2003] bestätigt, wird das subjektive Wertigkeitserlebnis beim Kunden unter anderem durch die Funktions- und Betätigungsgeräusche maßgeblich beeinflusst. Daher sind die Schalterentwickler bestrebt, die akustische Gestaltung der Bedienelemente aktiv durchzuführen.

ren. Dies wird vor allem dadurch erschwert, dass die Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen den physikalischen Eigenschaften eines Schaltergeräusches und der subjektiv erlebbaren akustischen Wertigkeit beim Kunden noch immer unzureichend sind. Weiterhin hat bis heute kein Verfahren für die objektive Bestimmung von psychoakustischen Kenngrößen wie Lautheit, Tonhöhe, Schärfe etc. bei den transienten Funktions- und Betätigungsgeräuschen Eingang in Norm und Standard gefunden.

Über die erkennbare Wechselwirkung zwischen der haptischen und der akustischen Wahrnehmung im Rahmen eines subjektiven Wertigkeitserlebnisses, die einen potenziellen Kunden hinsichtlich seiner Entscheidung für oder gegen ein Produkt steuert, liegen gemäß des derzeitigen Wissensstandes keine ausreichenden Erkenntnisse vor.

1.3 Ziele der Arbeit

Aus den oben beschriebenen Problemstellungen ergibt sich das Hauptziel der vorliegenden Arbeit, nämlich die Entwicklung von quantitativen Kenngrößen, die eine Objektivierung der subjektiven haptischen Wertanmutung von Tastern und Drehschaltern ermöglichen. Dieses Ziel soll durch die empirische Erforschung der komplexen Wechselwirkungen zwischen den physikalischen Messgrößen und der subjektiv wahrgenommenen haptischen Wertigkeit erreicht werden. Die Kenngrößen sollen darüber hinaus die Möglichkeit mit sich bringen, das subjektive Wertigkeitserlebnis, das bei der Betätigung eines Bedienelementes entsteht, schon in seiner frühen Entwicklungsphase gezielt zu gestalten. Somit bilden diese Kenngrößen eine sinnvolle Ergänzung zur physikalischen Messtechnik.

Das zweite Ziel der Arbeit besteht darin, bereits bekannte psychoakustische Kenngrößen im Bereich der transienten Schallsignale zu verifizieren. Dafür ist eine Untersuchung der psychoakustischen Empfindungsgrößen Tonhöhe und Schärfe mithilfe von umfangreichen Probandenversuchen notwendig. Die Untersuchung dieser beiden Kenngrößen ergibt sich aus der transienten Natur der Funktions- und Betätigungsgeräusche.

Das dritte Ziel der Arbeit ist die Beschreibung der Wechselwirkung zwischen der haptischen und der akustischen Wahrnehmung in einem ganzheitlichen Wertigkeitsurteil am Beispiel der Betätigung eines Tasters.

1.4 Vorgehensweise

In **Abbildung 1.4.1** ist die inhaltliche Logik der Arbeit schematisch dargestellt. Nach der Definition der drei Ziele der Arbeit wird zunächst der aktuelle Stand der Wissenschaft umrissen. Im Anschluss daran wird der momentane Stand der Technik hinsichtlich der Konzeption, der Entwicklung und der Fertigung der Stellteile im Kfz-Innenraum vorgestellt. Die dabei gewonnenen Kenntnisse dienen später als Basis für die Aufstellung der zu prüfenden Hypothesen. Anschließend beginnt die Konzeptionsphase der Arbeit, in der die Konzepte für die Entwicklung der haptischen Kenngrößen zur Verifikation der Empfindungsgrößen Tonhöhe und Schärfe sowie zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Haptik und Akustik aufgestellt werden. Diese Konzepte basieren auf umfangreichen Probandenversuchen, deren Randbedingungen mithilfe eines Vorversuches definiert werden müssen. Aus den gewonnenen empirischen Kenntnissen ergeben sich schließlich die gesuchten Ergebnisse.

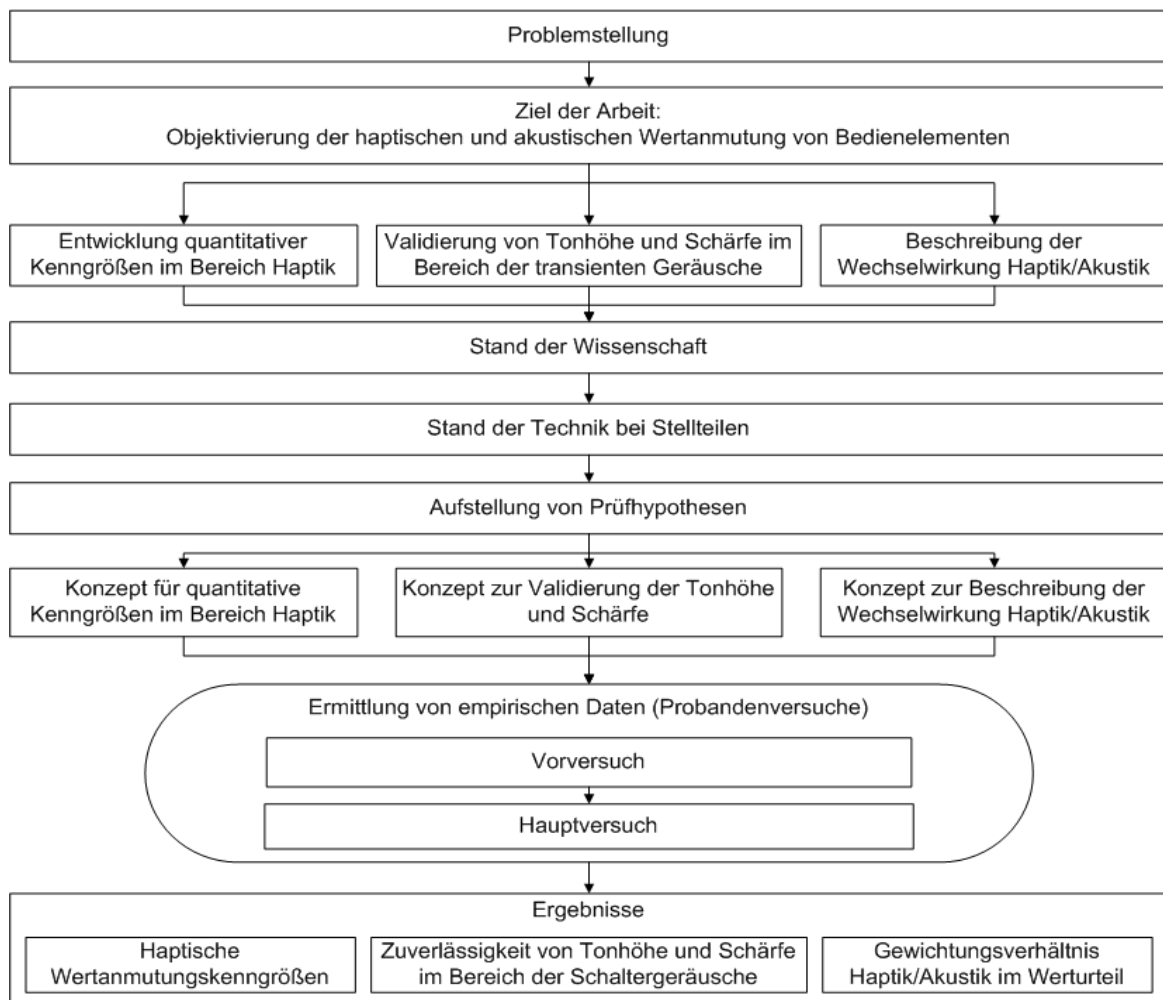


Abbildung 1.4.1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Allgemeiner Überblick

In **Abbildung 2.1.1** sind die wissenschaftlichen Bereiche und deren Schnittstellen dargestellt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachtet werden. Um die vorher angesprochenen Ziele zu erreichen, muss ausgehend vom technischen Hintergrund eines Bedienelementes über die physiologische Verarbeitung der Wahrnehmungsinhalte bis zur psychologischen Definition des subjektiven Wertigkeitserlebnisses ein Basiswissen erarbeitet werden.

Wie **Abbildung 2.1.1** weiterhin zu entnehmen ist, entstehen bei der Betätigung eines Bedienelementes physikalisch messbare Größen wie Druck, Intensität, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Diese sind einerseits durch die technischen Eigenschaften des Stellteils bedingt, andererseits stellen sie die adäquaten Reize für die physiologischen Sensoren dar. Die so entstandenen Wahrnehmungsinhalte werden anschließend weiterverarbeitet und bilden die subjektiven Wahrnehmungen eines Sinnes. Diese sinnlichen Wahrnehmungen beeinflussen wiederum die Entstehung des subjektiven Wertigkeitserlebnisses.

Um den gesuchten Zusammenhang zwischen den technischen Eigenschaften eines Bedienelementes und dem subjektiv erlebbaren Wertigkeitserlebnis bei seiner Betätigung überhaupt beschreiben zu können, ist der Aufbau eines physiologischen Basiswissens vonnöten. Die vorliegende Arbeit wird sich dabei auf die Betrachtung der Sinne Hören und Tasten beschränken, die weitestgehend freie Eingangskanäle für Wahrnehmungsinhalte darstellen, bislang jedoch nur unzureichend untersucht worden sind [Mauter, 2004].

Im Gegensatz dazu ist der wichtigste Sinn für das „Augentier Mensch“ [BMBF, 2006] – das Sehen – bereits vielfältig untersucht worden. Er stellt den bei der Fahrzeugführung dominanten Sinn dar [Chatziastros, 2004; Goldstein, 1997]. Die restlichen zwei Sinne – Riechen und Schmecken – sind für die Primäraufgabe eines Fahrers nicht von Bedeutung und werden deshalb im Rahmen der Arbeit nicht näher betrachtet.

Im Folgenden werden die benötigten physiologischen Grundkenntnisse über die Sinne Tasten und Hören auf der Basis von **Abbildung 2.1.1** genauer erläutert.

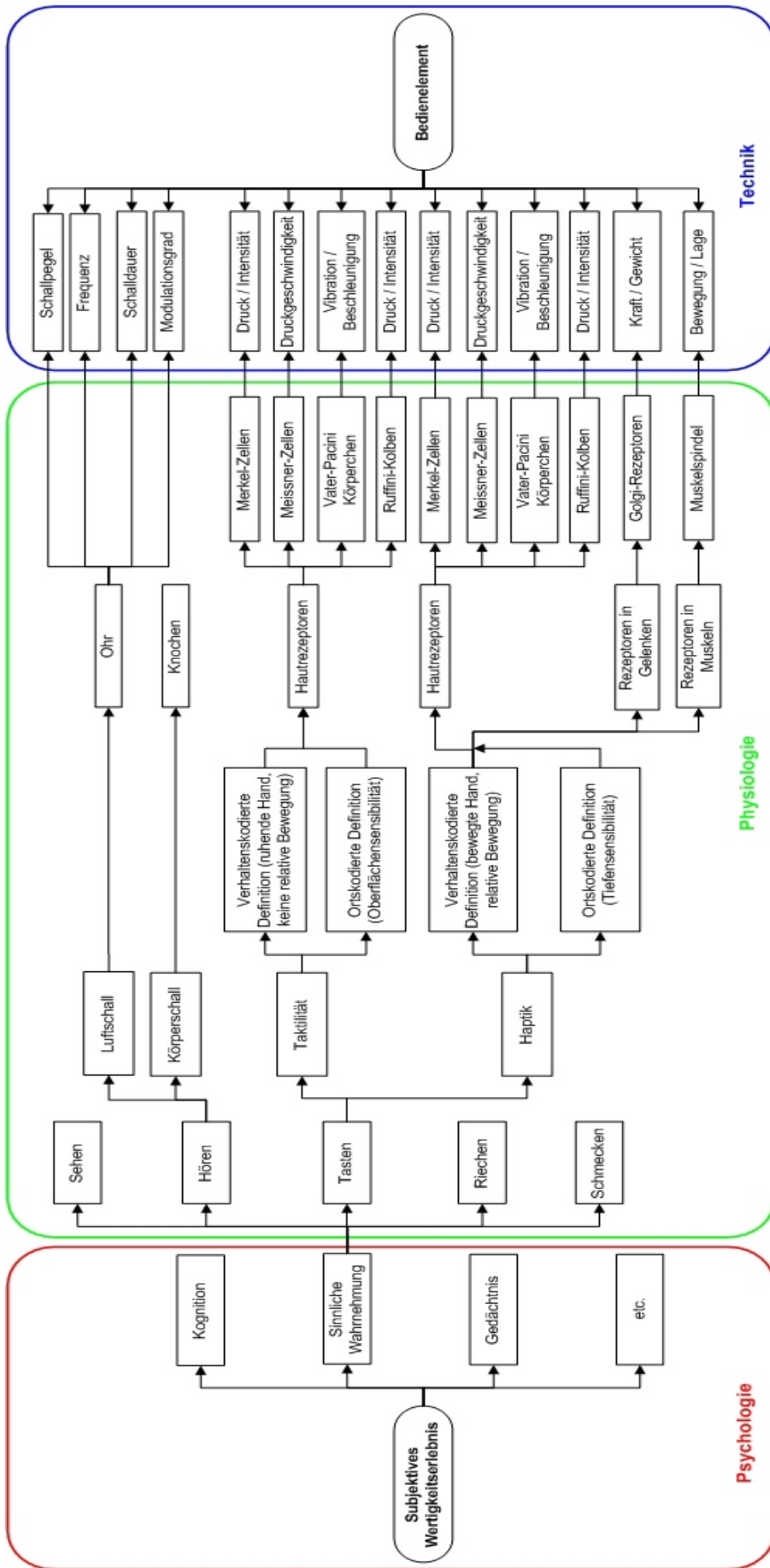


Abbildung 2.1.1: Übersicht über die Entstehung eines subjektiven Wertigkeitserlebnisses, beeinflusst durch die technischen Eigenschaften eines Bedienelementes

2.2 Physiologische Grundlagen des Tastens

Aus physiologischer Sicht ist der Tastsinn aus hoch differenzierten biologischen Elementareinheiten aufgebaut, deren Bestandteile und Funktionen in diesem Kapitel genauer beschrieben werden. Die Elementareinheiten bilden nach [Grundwald, 2001] ein hoch entwickeltes, spezialisiertes Eigenschaftssystem, das kodierte Informationen aus den Rezeptoren zur Weiterverarbeitung durch das Zentralnervensystem (ZNS) weiterleitet. Diese Weiterleitung von Informationen sowie deren Verarbeitung in der Hirnrinde sind nach [von Campenhausen, 1993] und [Kandel, 1995] die unmittelbare Voraussetzung für den Prozess, der in diesem Fall als „Tastwahrnehmung“, „Tastempfindung“ oder auch „Tastleistung“ bezeichnet wird. Diese Begriffe werden meistens im Sinne eines Resultats einer Sinnestätigkeit verwendet. Wichtig ist in diesem Zusammenhang außerdem noch der Hinweis, dass unter „Tastwahrnehmung“ jede Form von Wahrnehmungsinhalten und Empfindungen gemeint ist, unabhängig davon, ob diese an Haut, Muskel oder Gelenken hervorgerufen werden.

Ein anderes weitverbreitetes Synonym für den Tastsinn ist der Begriff „Haptik“. Zu Beginn der 20er-Jahre des letzten Jahrhunderts haben [Katz, 1925] und später auch [von Skramlik, 1937] deutlich gemacht, dass unter einer „haptischen Leistung“ eine kombinierte Leistung des Druck- und Kraftsinnes verstanden werden sollte. Die „haptische Wahrnehmung“ – in dieser Arbeit auch nur „Haptik“ genannt – kennzeichnet somit diejenigen Wahrnehmungsinhalte, die durch das aktive Berühren und Ertasten von Objekten ermöglicht werden. Die „taktile Wahrnehmung“ bzw. „Taktilität“ kennzeichnet dagegen diejenigen Wahrnehmungsinhalte, die ohne eine aktive Bewegung der Hand ermöglicht werden. Diese zwei Interpretationen reflektieren die psychologische, verhaltenskodierte Definition der haptischen und der taktilen Wahrnehmung (siehe Abbildung 2.1.1). Weiterhin zeigt dies eindeutig, dass zwischen den auf der Verhaltensebene basierenden Begriffen „haptische Wahrnehmung“ und „taktile Wahrnehmung“ keine gegenständliche Konkurrenz besteht, sondern sich die beiden Begriffe vielmehr inhaltlich ergänzen.

Aus physiologischer Sicht hingegen wird der haptische Sinneskanal entsprechend der räumlichen Lage der Sinnesorgane in zwei Komponenten unterteilt: in die „taktile“ und die „kinästhetische Wahrnehmung“. Die taktile Wahrnehmung wird in der Fachli-

teratur oft als „Oberflächensensibilität“ bezeichnet [Silbernagl & Despopoulos, 2003; Deetjen & Speckmann, 1999]. Dies hängt damit zusammen, dass die Sinnesorgane, die für diesen Wahrnehmungsinhalt verantwortlich sind, in der menschlichen Haut – d. h. an der Oberfläche – angeordnet sind. Bei der kinästhetischen Wahrnehmung wird auch von „Tiefensensibilität“ gesprochen [Silbernagl & Despopoulos, 2003; Deetjen & Speckmann, 1999]. Dies wird mit der tieferen räumlichen Lage der Sinnesorgane, die für die entsprechenden Wahrnehmungsinhalte zuständig sind, begründet. Die zwei Begriffe reflektieren folglich eine sogenannte ortskodierte Definition.

Folgendes Beispiel soll die oben beschriebenen Definitionen veranschaulichen: Bei einer unbewegten Hand entstehen durch die Hautrezeptoren taktile Wahrnehmungsinhalte wie z. B. Druck, wenn die Hautrezeptoren durch einen adäquaten Reiz, in diesem Fall das Aufdrücken eines Gegenstandes auf die Haut, aktiviert werden (siehe **Abbildung 2.2.1**). Haptische Wahrnehmungsinhalte entstehen dagegen durch die gleichzeitige Aktivierung von Hautrezeptoren (Oberflächensensibilität) und Rezeptoren in Muskeln und Gelenken (Tiefensensibilität). Ein Beispiel für solche Wahrnehmungsinhalte ist die aktive Betätigung eines Bedienelementes.

Des Weiteren sind andere Begriffe wie „passive Haptik“, „Betätigungshaptik“, „Bedienhaptik“, „Bedienungshaptik“ etc. in der Praxis und in bestimmten Veröffentlichungen [Mauter & Katzki, 2003; Zeilinger 2005] zu finden, die in den oben beschriebenen Definitionen inbegriffen sind und im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet werden.

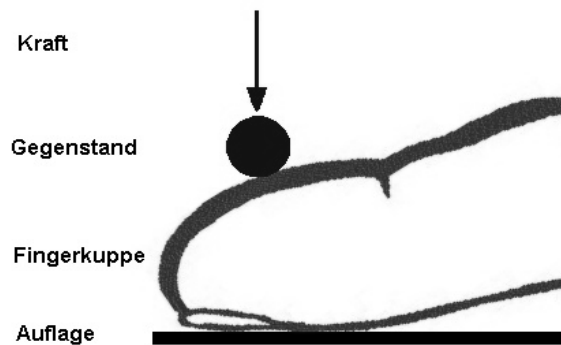


Abbildung 2.2.1: Darstellung einer taktilen Druckwahrnehmung

2.2.1 Das somatosensorische System

Bei gewöhnlichen motorischen Aktionen spielen visuelle und andere sensorischen Informationen eine zentrale Rolle. In diesem Zusammenhang wird von sensomotorischen Fertigkeiten gesprochen. In der Regel werden dabei Gegenstände zunächst visuell wahrgenommen, anschließend ergriffen und unter visueller Kontrolle manipuliert. Es gibt aber auch Situationen, in denen die visuelle Kontrolle nicht vorhanden ist oder sein kann. Ein Beispiel für eine solche Situation ist das Autofahren, bei dem der Schalthebel und der Lenkstockhebel meist ohne Sichtkontakt bedient werden. In diesem Fall wird die Lage des Objekts zwar visuell erkannt, die motorische Aktion wird jedoch ohne visuelle Kontrolle durchgeführt.

Das somatosensorische System umfasst nach [Goldstein, 1997] sowohl die Haut- als auch die Haltungssinne sowie die damit verbundenen Wahrnehmungsinhalte. Die Wahrnehmungen der Hautsinne, auch „Somatosensorik“ genannt, gehen auf die Reizung der verschiedenen Rezeptorsysteme der Haut zurück. Die Haltungssinne liefern Informationen über die Lage und die Bewegung des Körpers im Raum.

Im Folgenden wird der Aufbau des somatosensorischen Systems ausgehend von seiner Peripherie, d. h. von der Haut und ihren Rezeptoren, kurz beschrieben. Die menschlichen Hautrezeptoren werden in Abhängigkeit von ihrer Funktion in Mechano-, Thermo-, Chemo- und Schmerzrezeptoren („Nozizeptoren“) unterteilt. Die Thermorezeptoren sind für die Empfindungsqualitäten Wärme und Kälte zuständig und dem Temperatursinn untergeordnet. Die Nozizeptoren sind für die Empfindungsqualität Schmerz verantwortlich und gehören zum Schmerzsinne. Die Chemorezeptoren reagieren auf chemische Substanzen und werden den Empfindungsmodalitäten Geruchssinn und Geschmacksinn zugerechnet.

Die Mechanorezeptoren werden hier in Anlehnung an [Deetjen & Speckmann, 1999] klassifiziert und beschrieben. Am zweckmäßigsten erscheint dabei die Einteilung dieser Rezeptoren anhand ihres Adaptionsverhaltens und der Größe ihrer rezeptiven Felder. Nach dem Adaptionsverhalten werden die Mechanorezeptoren in

- langsam adaptierende (SA-Rezeptoren) und
- schnell adaptierende (FA-Rezeptoren) unterteilt.

Die SA-Rezeptoren bilden bei lang andauernden mechanischen Druckreizen während der gesamten Reizdauer Aktionspotenziale in ihren afferenten Fasern. Die FA-Rezeptoren dagegen reagieren bei einer Änderung des Reizes, d. h. bei bewegten Hautreizen wie Berührung oder Vibration. Entsprechend der Größe ihrer rezeptiven Felder werden die SA- und FA-Rezeptoren nochmals in Rezeptoren mit

- kleinen, scharf begrenzten Rezeptivfeldern (FA I und SA I) und mit
- großen Rezeptivfeldern mit unscharfen Grenzen (FA II und SA II) unterteilt.

Tabelle 2.2.1 illustriert die Aktionspotenzialmuster der oben beschriebenen Rezeptoren bei einer rampenförmig verlaufenden Eindrückung der Haut, wie sie auch bei der Betätigung eines Tasters vorkommt.

Adaption	Rezeptive Felder	
	klein, scharf begrenzt	groß, Grenzen verwaschen
rasch, nur dynamische Antwort	<p>FA I</p> <p>Meißner</p> <p>Zeit</p>	<p>FA II</p> <p>Pacini</p> <p>Zeit</p>
langsam, statische Antwort	<p>SA I</p> <p>Merkel</p> <p>Zeit</p>	<p>SA II</p> <p>Ruffini</p> <p>Zeit</p>

Tabelle 2.2.1: Typen von Mechanoafferenzen der unbehaarten Haut [Deetjen & Speckmann, 1999].

Merkel-Zellen (Tastzellen; Merkel's discs)

Sie liegen an der Grenze zwischen Epidermis und Dermis der unbehaarten Haut (siehe **Abbildung 2.2.2**) und zeichnen sich durch einen gelappten Kern aus. Als Intensitätssensoren messen sie die Stärke oder Eindringtiefe eines mechanischen Hautreizes. Morphologisch stellen die Merkel-Zellen große, helle Epithelzellen dar (siehe **Abbildung 2.2.3**), die zwischen den Basalzellen der äußeren Haarwurzelscheide liegen und fingerförmige Fortsätze in die Umgebung ausstrecken. Ihre Deformierung führt zu einer Erregung der Nervenfasern. Die Merkel-Zellen gehören zu den langsam adaptierenden (SA) Mechanosensoren und besitzen ein kleines, scharf begrenztes rezeptives Feld.

Meissner-Körperchen (Meissner-Zellen)

Die Meissner-Körperchen liegen in den Papillen des Koriums. Sie sind an den Plantarflächen der Hände und der Füße am dichtesten gelagert, wobei sie an den distalen Enden, den Fingerbeeren (insbesondere an der Fingerbeere des Zeigefingers), um ein Vielfaches dichter liegen als an den übrigen Plantarflächen. Diese Verteilung weist auf ihre Bedeutung für die feinen Tastempfindungen hin. Bei den Meissner-Körperchen handelt es sich um ovale Gebilde (siehe **Abbildung 2.2.4**), die aus lamellenartig geschichteten Zellen aufgebaut und von einer dünnen Kapsel umgeben sind. Die Meissner-Körperchen gehören zu den schnell adaptierenden (FA) Mechanosensoren und haben ein kleines, scharf begrenztes rezeptives Feld. Sie signalisieren das Eindringen der Haut, passen sich aber der neuen, tieferen Position an und feuern nicht mehr weiter. Ihrer Eigenschaft, die Entladefrequenz mit der Geschwindigkeit zu steigern, verdanken sie ihre Bezeichnung als „Geschwindigkeitsdetektoren“.

Vater-Pacini-Körperchen (Vater-Pacini-Lamellenkörperchen)

Die Vater-Pacini-Lamellenkörperchen sind relativ große, bis zu 4 mm lange Elemente, die unter der Haut in der Subkutis anzutreffen sind. Sie befinden sich

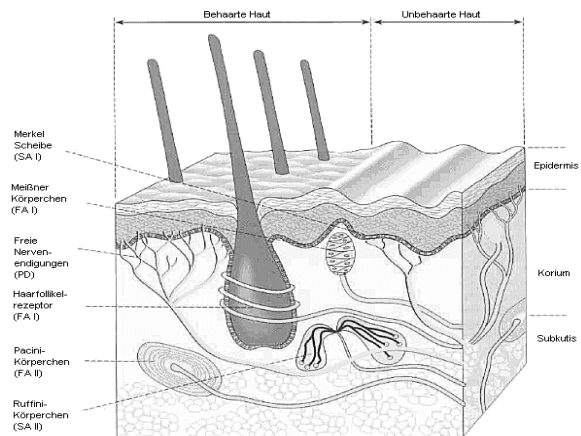


Abbildung 2.2.2: Anatomischer Aufbau der Haut [Deetjen & Speckmann, 1999].

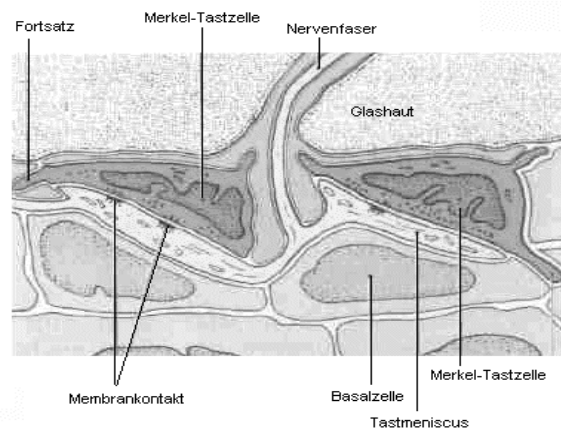


Abbildung 2.2.3: Anatomischer Aufbau der Merkel-Zellen [Kahle, 2002].

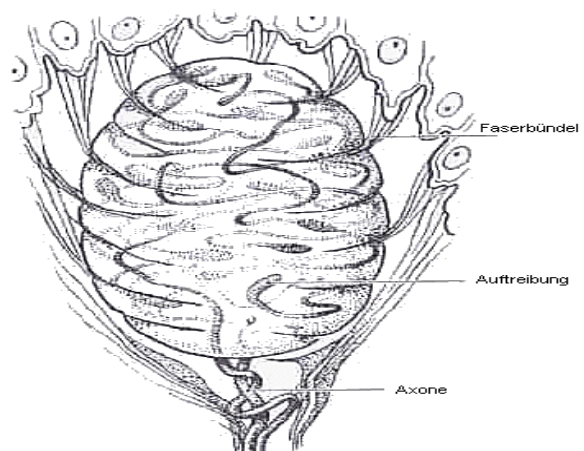


Abbildung 2.2.4: Anatomischer Aufbau der Meissner-Körperchen [Kahle, 2002].

außerdem in der Umgebung von Gelenken und an der Oberfläche von Sehnen. Aufgebaut sind sie aus einer großen Zahl konzentrisch geschichteter Lamellen, an denen drei Schichten unterschieden werden: die Kapsel, die äußere Lamellenschicht und der Innenkolben (siehe **Abbildung 2.2.5**). Die Vater-Pacini-Körperchen sind nicht nur Druckrezeptoren, sondern vor allem auch Vibrationsrezeptoren. Sie gehören zu den rasch adaptierenden (FA) Rezeptoren mit großen und verwachsenen rezeptiven Feldern. Sie registrieren den Übergang von Stillstand zu Bewegung bzw. von Bewegung zu Stillstand, nicht aber gleichförmige Bewegungen. Aus diesem Grund werden sie auch als „Beschleunigungsrezeptoren“ bezeichnet.

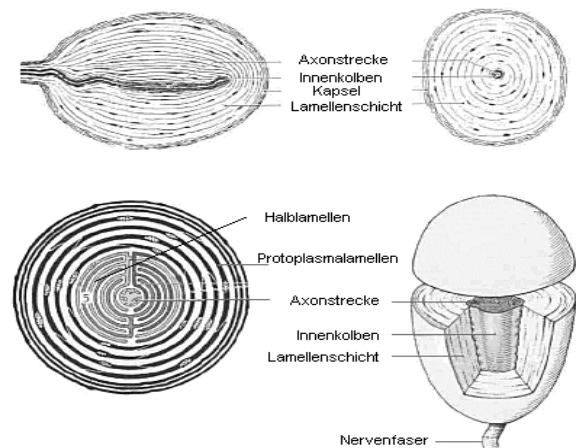


Abbildung 2.2.5: Anatomischer Aufbau der Pacini-Körperchen [Kahle, 2002].

Ruffini-Kolben (Ruffini-Körperchen)

Die Ruffini-Körperchen sind vielfach verzweigte, 0,5 bis 2 mm lange und flache Nervenfasern, die von einer zylinderförmigen Kapsel umschlossen sind (siehe **Abbildung 2.2.6**). Sie adaptieren langsam (SA-Rezeptoren), besitzen kleine, scharf begrenzte rezeptive Felder und können deshalb nicht nur anzeigen, dass ein Gegenstand die Haut berührt, sondern auch, wie tief die Haut dabei eingedrückt bzw. gedehnt wird („Intensitätsdetektoren“).

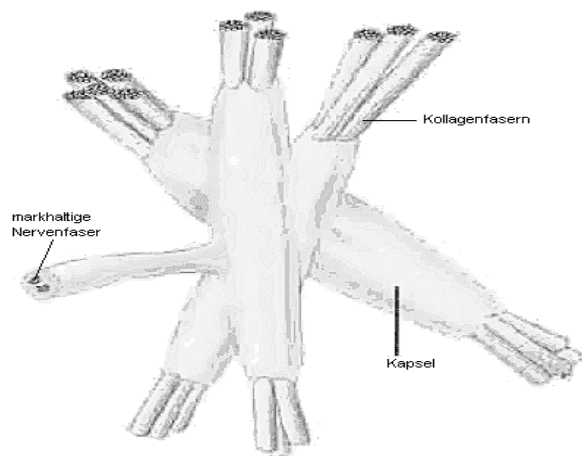


Abbildung 2.2.6: Anatomischer Aufbau der Ruffini-Körperchen [Universität Bern, Inst. für Physiologie].

Die oben beschriebenen Mechanorezeptoren der Haut können auch entsprechend ihres Adaptionsverhaltens und ihres adäquaten Reizes – Intensität, Geschwindigkeit und Beschleunigung – klassifiziert werden. Die nachfolgende **Tabelle 2.2.2** zeigt die Klassifizierung nach Birbaumer & Schmidt.

Die Sensibilität des somatosensorischen Systems ist im hohen Alter durch einen progressiven Verlust von Meissner- und Pacini-Tastkörperchen beeinträchtigt, der bei einer 90-jährigen Person bis zu 30 % beträgt [Schmidt, 2005].

	Adaption bei konstantem Druckreiz		
	<i>langsam</i>	<i>mittelschnell</i>	<i>sehr schnell</i>
Unbehaarte Haut	Merkel-Zellen, Ruffini-Körperchen	Meissner-Körperchen	Pacini-Körperchen
Behaarte Haut	Tastscheiben, Ruffini-Körperchen	Haarfollikel-sensor	Pacini-Körperchen
	<i>Intensität</i>	<i>Geschwindigkeit</i>	<i>Beschleunigung</i>
	Klassifikation nach adäquatem Reiz		

Tabelle 2.2.2: Klassifikation der Mechanorezeptoren nach ihrem Adaptionsverhalten und ihrem adäquaten Reiz [Birbaumer & Schmidt, 1991].

2.2.2 Das motorische System

Das motorische System dient der Haltung (Aufrichtung des Körpers gegen die Schwerkraft) und der Bewegung (Ortsveränderung des Körpers oder seiner Teile im Raum) und wird hier in Anlehnung an [Deetjen & Speckmann, 1999] beschrieben.

Skelettmuskeln sind in Faserbündeln gegliedert, die sich wiederum aus einer Vielfalt von Einzelfasern zusammensetzen. Die Muskelfaser ist eine durch die Fusion von mehreren spindelförmigen Vorläuferzellen entstandene Riesenzelle mit zahlreichen Zellkernen. Ihr Durchmesser beträgt bis zu 80 μm , ihre Länge bis zu mehrere Zentimeter. Als „motorische Einheit“ wird die Gruppe von Muskelfasern bezeichnet, die von einem α -Motoneuron über motorische Endplatten innerviert werden (Deetjen & Speckmann, 1999).

Die Skelettmuskeln setzen sich aus drei Typen von motorischen Einheiten zusammen. Innerhalb einer motorischen Einheit gehören alle Muskelfasern zum gleichen Typ. Die Typen unterscheiden sich bezüglich ihrer Kontraktionseigenschaften. Es existieren:

- Typ-S-Fasern,
- Typ-FR-Fasern und
- Typ-FF-Fasern.

Die Typ-S-Fasern, auch Gruppe-I-Fasern genannt, entwickeln bei Einzelzuckungen eine geringe Kontraktionskraft. Der Kraftanstieg ist langsam, die Kraft kann über lange Zeit aufrechterhalten werden. Die Typ-FR-Fasern, auch als Gruppe-IIa-Fasern bekannt, entwickeln bei Einzelzuckungen eine mittlere Kontraktionskraft. Die Kontraktionsgeschwindigkeit ist hoch, die Kraft kann über lange Zeit aufrechterhalten werden. Die Typ-FF-Fasern bzw. Gruppe-IIb-Fasern entwickeln bei Einzelzuckungen eine hohe Kontraktionskraft. Der Kraftanstieg ist sehr schnell. Bei lang anhaltenden Kontraktionen aber ermüden sie rasch.

Golgi-Rezeptor (Golgi-Sehnenorgan)

Das Golgi-Sehnenorgan ist eine Bindegewebe kapsel von etwa 1 mm Länge und 0,1 mm Durchmesser, die von jeweils einer Nervenfasern der Gruppe Ib (siehe Deetjen & Speckmann, 1999) mit mehreren rezeptiven Endigungen versorgt wird. Die Ib-

Fasern sind funktionell spiegelbildlich zu den Ia-Fasern der Muskelspindel schaltet.

Die Sehnenorgane liegen in Serie zu den Skelettmuskelfasern (siehe **Abbildung 2.2.7**) und werden bei einer Kontraktion des Muskels gespannt, wodurch ihre Entladungsfrequenz steigt.

Den adäquaten Reiz für die Ib-Endigungen ist die Muskelspannung. Bei aktiven Kontraktionen motorischer Einheiten komprimieren die kollagenen Faserbündel die Golgi-Terminalen und erregen sie dadurch. Aktiv entwickelte Kräfte werden somit besonders effektiv übertragen. Ib-Afferenzen reagieren hochempfindlich auf Kontraktionen von einzelnen motorischen Einheiten (siehe **Abbildung 2.2.8** und **Abbildung 2.2.9**). Auch bei einer passiven Dehnung des Muskels wird Spannung entwickelt und es werden Ib-Afferenzen aktiviert.

Muskelspindel

Die Muskelspindeln besitzen spindelförmige Bindegewebekapseln, die drei bis zehn dünne, spezialisierte Muskelfasern umschließen (siehe **Abbildung 2.2.10**). Diese werden „intrafusale“ Muskelfasern genannt, weil sie innerhalb der Spindel liegen, in Abgrenzung zu den „extrafusalen“ Fasern der Arbeitsmuskulatur.

Als adäquater Reiz für die Rezeptorendigungen fungiert eine Verlängerung der

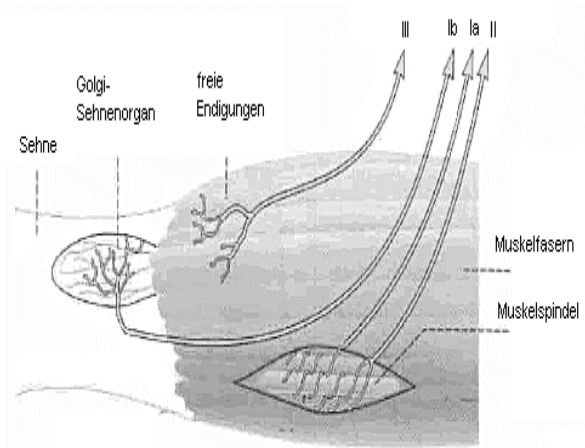


Abbildung 2.2.7: Anordnung von Muskelrezeptoren [Deetjen & Speckmann, 1999].

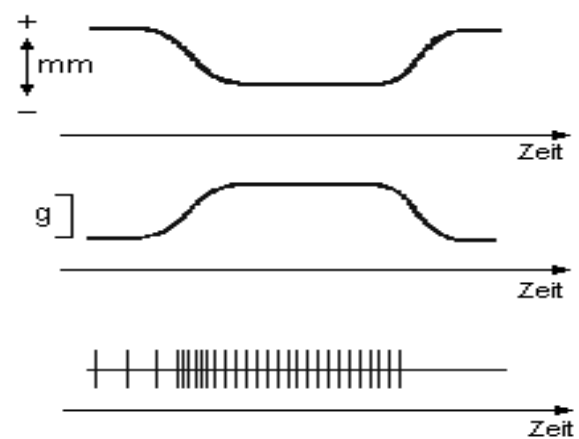


Abbildung 2.2.8: Erregung einer Ib-Faser durch Kontraktion [Deetjen & Speckmann, 1999].

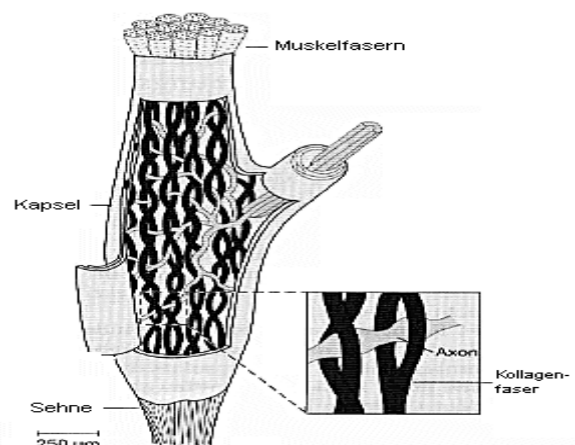


Abbildung 2.2.9: Anatomischer Aufbau eines Sehnenorgans [Universität Bern, Inst. für Physiologie].

mittleren Teile der Intrafusalmuskeln. Daher erzeugt die Muskelspindel – ähnlich wie das Golgi-Sehnenorgan – bei Muskeldehnung Impulse. Der funktionelle Unterschied zu den Sehnenorganen beruht darauf, dass die Muskelspindeln im Bindegewebe des Muskels ansetzen und somit parallel (und nicht seriell) zur Arbeitsmuskulatur liegen. Bei einer Verkürzung des Muskels werden sie entspannt und reduzieren dabei ihre Entladungsrate.

Muskelspindeln messen folglich die Muskelänge (Weg), die Golgi-Sehnenorgane hingegen die Muskelspannung (Kraft). Die passive Dehnung eines Muskels vergrößert sowohl seine Spannung als auch seine Länge; bei aktiven Kontraktionen hingegen nimmt die Spannung zu, die Länge jedoch ab. Deswegen müssen beide Größen simultan erfasst werden, wenn das Zentralnervensystem über die Muskelmechanik eindeutig informiert werden soll.

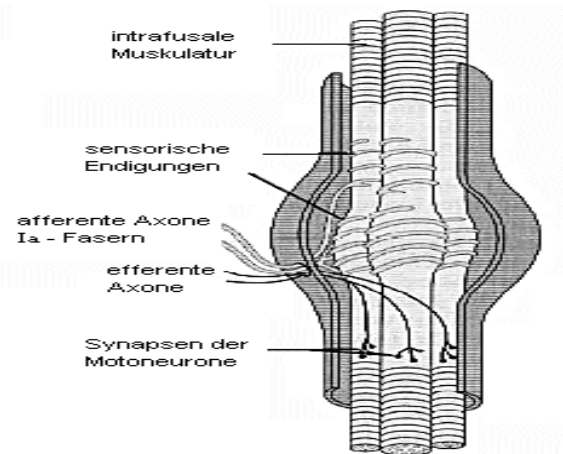


Abbildung 2.2.10: Anatomischer Aufbau einer Muskelspindel [Universität Bern, Inst. für Physiologie].

Schmidt definiert das Altern als „die ständige Abnahme der Überlebenswahrscheinlichkeit bewirkt durch intrinsische Prozesse“ [Schmidt, 2005]. Darüber hinaus charakterisiert er das Altern durch morphologische und funktionelle Veränderungen in praktisch allen Organsystemen. Mit zunehmendem Alter kommt es außerdem zu einem Verlust von Nervenzellen. Dies bewirkt eine Verzögerung von Nervenleitgeschwindigkeit und synaptischer Übertragung, was wiederum zu einem nachlassenden Reaktionsvermögen führt.

2.3 Physiologische Grundlagen des Hörens

Die ins Ohr gelangenden Luftdruckschwankungen werden in Signale umgewandelt und in der Folge weiterverarbeitet. Sie führen schließlich zur Wahrnehmung der unterschiedlichen auditiven Wahrnehmungsqualitäten der Schallsignale. In diesem Kapitel werden der Aufbau und die Funktion des auditiven Systems in Anlehnung an [Schmidt, 2005] und [Goldstein, 1997] kurz geschildert.

2.3.1 Das auditive System

Es gibt zwei Wege, auf denen der Schall zu unseren Hörorganen gelangen kann: per Luftleitung und per Knochenleitung. Die Luftleitung erfolgt durch den äußeren Gehörgang über das Trommelfell, den Hammer, den Amboss, den Steigbügel bis hin zur Cochlea (Schnecke). Die Frequenzübertragung erfolgt bei dieser Variante in einem Bereich von ca. 16 bis ca. 20000 Hz. Die Knochenleitung erfolgt entlang des gesamten Gehörorgans über die Reizung der einzelnen Elemente (äußerer Gehörgang, Trommelfell, Hammer, Amboss, Steigbügel, gesamte Cochlea) durch Vibrationen des Schädelknochens. Übertragen werden hier Frequenzen, die unter 2000 Hz liegen. Die Knochenleitung ist weitaus uneffizienter als die Luftleitung. Niederfrequente Signale von ca. 300 Hz abwärts können aufgrund der Knochenleitung nur schwer geortet werden, da der eintreffende Schall auch den jeweils kürzesten Weg durch den Schädelknochen nehmen kann. Der Umweg um den Kopf herum und damit auch die Laufzeitdifferenz entfallen dabei.

Der Schall gelangt durch die Luft des äußeren Gehörgangs bis hin zum Trommelfell (siehe **Abbildung 2.3.1**). Anschließend wird seine Energie durch Schwingungen von Trommelfell und Gehörknöchelchen bis zum ovalen Fenster des Innenohrs fortgeleitet. Gleichzeitig wird der niedrige Schallwellenwiderstand (Schallimpedanz) der Luft an die hohe Impedanz des mit Flüssigkeit gefüllten Innenohrs angepasst. Ohne das Mittelohr gingen nach [Goldstein, 1997] bis zu 98 % der Schallenergie verloren. Das Mittelohr

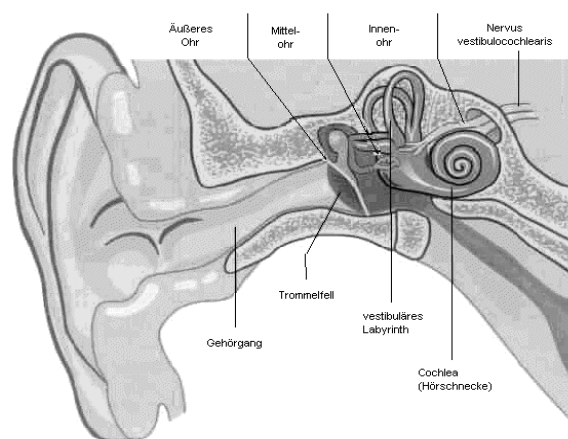


Abbildung 2.3.1: Anatomischer Aufbau des menschlichen Ohrs [Schmidt, 2005].

ist ein kleiner Hohlraum von etwa zwei Kubikzentimetern, der die Gehörknöchelchen enthält (siehe **Abbildung 2.3.2**).

Das erste dieser Knöchelchen, der Hammer, wird direkt vom angrenzenden Trommelfell in Schwingungen versetzt und gibt diese an den Amboss weiter, der sie wiederum an den Steigbügel überträgt. Der Steigbügel leitet die Schwingungen durch Druck auf eine Membran, die das ovale Fenster abdeckt, an das Innenohr weiter.

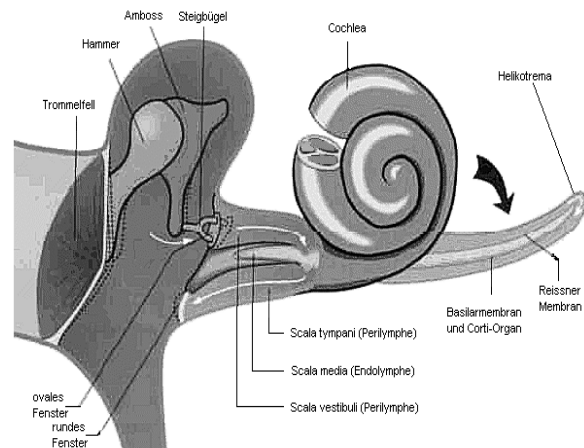


Abbildung 2.3.2: Schema von Mittelohr und Cochlea [Schmidt, 2005].

Die wichtigste Struktur des Innenohrs bildet die mit Flüssigkeit gefüllte Cochlea. Der Steigbügel schwingt gegen die Membran im ovalen Fenster und versetzt so die Flüssigkeit in der Cochlea in Schwingung. Es ist schwierig, sich die Cochlea bildlich vorzustellen, weil sie zwei drei viertel Windungen beschreibt. Ihre innere Struktur lässt sich besser analysieren, wenn man sie sich zu einem langen, geraden Schlauch entrollt denkt. Dabei wird ersichtlich, dass die Cochlea von einer Wand, der cochlearen Trennwand (Schneckentrennwand), die sich fast durch die gesamte Länge der Cochlea zieht, in eine untere und eine obere Hälfte geteilt wird. Der Querschnitt der Cochlea gliedert sich dagegen in drei Teile: die Scala vestibuli, die Scala tympani und die Scala media (siehe **Abbildung 2.3.2**). Erkennbar ist auch, dass die cochleare Trennwand eine große Struktur, das cortische Organ, enthält (siehe **Abbildung 2.3.3**).

Die drei wichtigsten Bestandteile des cortischen Organs sind die Basilarmembran, die Tectorialmembran und die Haarzellen. Es gibt zwei Arten von Haarzellen: die inneren Haarzellen und äußeren Haarzellen. Die Zahl der inneren Haarzellen ist zwar geringer als die der äußeren (3500 inneren Haarzellen stehen 12000 äußere gegenüber [Goldstein,

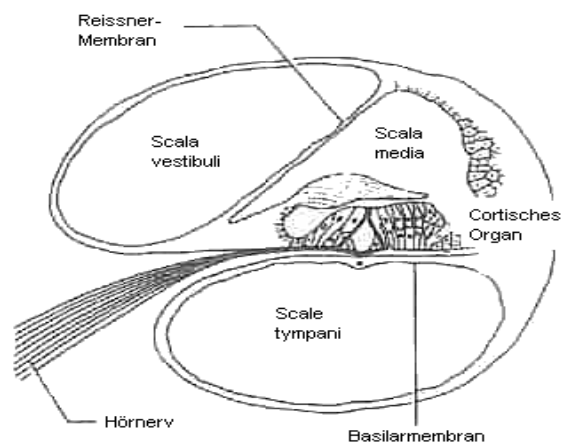


Abbildung 2.3.3: Querschnitt durch die Cochlea [Goldstein, 1997].

1997]), doch 95 % der Hörnervenfasern erhalten ihre Signale von den inneren Haarzellen. Dies liegt daran, dass jede innere Haarzelle mit etwa acht bis 30 Hörnervenfasern verbunden ist, während äußere Haarzellen jeweils mit Verzweigungen derselben Hörnervenfasern verbunden sind. Anders ausgedrückt: Die Signale von einer einzelnen inneren Haarzellen divergieren auf mehrere Nervenfasern, während die Signale mehrerer äußerer Haarzellen auf eine Nervenfasern konvergieren.

Die Leistungen des Gehörs nehmen mit fortschreitendem Alter ab. Die Fähigkeit, hohe Frequenzen wahrzunehmen, geht laufend zurück. Gründe für diese sensorischen Einbußen sind die Versteifung der Basilarmembran, eine Atrophie des Corti-Organes sowie metabolische Defizite infolge eines Gewebeschwundes des Gleichgewichtsorgans. Außerdem reduziert zunehmender Neuronenverlust die Leistungsfähigkeit der auditiven Informationsverarbeitung.

2.4 Psychologische Grundlagen des Hörens

In diesem Kapitel werden die Forschungserkenntnisse im Bereich der Psychoakustik zusammengefasst, welche die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Reizen und den Empfindungen beschreiben, die sie beim Menschen hervorrufen. Die Darstellung erfolgt im größten Teil in Anlehnung an [Zwicker, 1982].

2.4.1 Reiz- und Empfindungsgrößen

Die physikalischen Komponenten eines Schallereignisses wie z. B. den Schalldruckpegel, die Frequenz, die Dauer, den Modulationsgrad usw. bezeichnet Zwicker als „Reizgrößen“. Sie sind mit physikalischen Methoden messbar, voneinander unabhängig und lassen sich mithilfe von mathematischen Gleichungen darstellen.

Demgegenüber lösen die Reize nur dann Empfindungen aus, wenn die einzelnen Reizgrößen hörbare Werte erreichen. Für die Reizgrößen Frequenz und Schalldruckpegel ist bereits bekannt, dass das Gehör in einem Frequenzbereich zwischen ca. 20 Hz und 20 KHz eine Empfindung auslösen kann und sehr kleine Schalldruckpegel unhörbar sind.

Im Bereich der Hörforschung existieren nur wenige Adjektive, mit deren Hilfe eine genaue Beschreibung der Hörempfindungen möglich ist [Zwicker, 1982]. Beispiele dafür sind Adjektive wie „laut“, „leise“, „schrill“ und „dröhnend“. Aus diesem Grund ist der Benutzer gezwungen, Worte aus anderen Gebieten der Wahrnehmung zu verwenden, die eigentlich hörenspezifisch sind. Beispiele dafür sind Adjektive wie „hell“, „dunkel“, „tief“ und „hoch“. Daher scheint es am zweckmäßigsten, die bei der physikalischen Beschreibung der Reizgrößen angewandten Methoden auch im Rahmen der Darstellung der Hörempfindungen zu benutzen, d. h. die Empfindungen in Größengleichungen als Produkt aus Zahlenwert und Einheit anzugeben. Diese Angabe bezeichnet Zwicker als „Empfindungsgröße“. Unter Zuhilfenahme dieser Empfindungsgrößen können Hörempfindungen nicht nur in Worten, sondern auch in Zahlen angegeben werden.

Die quantitative Beschreibung der Empfindungsgrößen wird zusätzlich dadurch erschwert, dass jede Empfindungsgröße von mehreren Reizgrößen beeinflusst wird. Im Allgemeinen sind diese Beeinflussungen laut Zwicker jedoch sehr unterschiedlich.

Der Schalldruckpegel ist die dominierende Reizgröße für die Lautstärkeempfindung, die Frequenz die dominierende Reizgröße für die Tonhöhenempfindung. Der Zusammenhang zwischen einer dominierenden Reizgröße und der zugehörigen Empfindungsgröße wird von Zwicker als „Empfindungsfunktion“ bezeichnet.

2.4.2 Psychoakustische Empfindungsgrößen

Lautheit

Die Empfindung der physikalischen Größe Lautstärke ist eine Intensitätsempfindung. Ihre Empfindungsgröße, die Lautheit (N), geht nicht unmittelbar aus den eben wahrnehmbaren Pegelstufen hervor und lässt sich nach Zwicker nur aus Verhältnismessungen ableiten. Sie wird bestimmt durch die Beantwortung der Frage, wie viel Mal lauter oder leiser ein zu messender Schall im Vergleich zu einem Standardschall ist. Dabei wird von der Versuchsperson entweder ein Verhältnis gesucht oder über ein Verhältnis von Empfindungsgrößen eine Aussage getroffen. Dem Standardschall – dem 1-kHz-Ton mit einem Pegel von 40 dB im ebenen Schallfeld – wurde die Lautheit 1 sone zugeordnet.

Damit die Lautheitsfunktion (Lautheitskurve) vollständig gezeichnet werden kann, ist es notwendig, den zur Verdopplung und/oder Halbierung der Lautheit notwendigen Pegelzuwachs zu kennen. Für die in **Abbildung 2.4.1** dargestellte Lautheitskurve bedeutet dies, dass bei kleinen Pegeln nur eine kleine Steigerung des Pegels notwendig ist, damit eine Verdopplung der Lautheit erreicht wird. Bei ca. 40 dB flacht sich die Kurve ab und verläuft bei großen Pegeln nach einem Potenzgesetz. Der Exponent dieses Gesetzes beträgt nach Zwicker 0,3. Die Lautheitsfunktion ist eine sehr wichtige Funktion, mit deren Hilfe Aussagen darüber gemacht werden können, um welchen Faktor ein Schall „B“ lauter ist als ein Schall „A“. Der Lautstärkepegel und die Pegellautstärke geben nur die Richtung an. Aussagen über die quantitativen Relationen der Lautheiten, d. h. der von den beiden Schallen hervorgerufenen Empfindungen, sind durch Angabe des Lautstär-

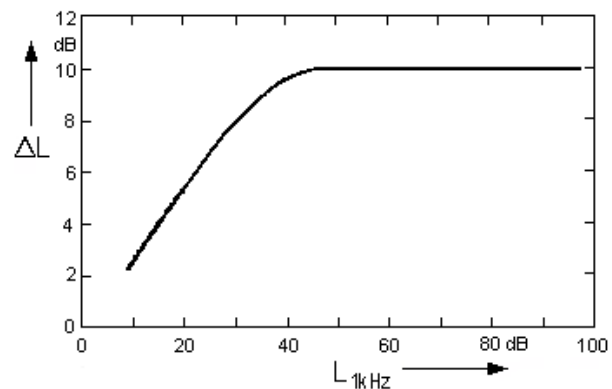


Abbildung 2.4.1: Lautheitskurve [Zwicker, 1982].

kepegels nicht möglich. Das Verfahren zur Berechnung der Lautheit stationärer Schalle aus den physikalischen Schalleigenschaften ist in DIN 45631 festgelegt. Grundlage dieser Lautheitsberechnung ist das Terzpegelspektrum, aus dem unter Verwendung einer gehörgerechten Frequenzskala (der sogenannten Bark-Skala) die Frequenzgruppenpegel bestimmt werden.

Tonhöhe (Verhältnistonhöhe)

Die Empfindungsfunktion der Tonhöhenempfindung kann direkt nur durch die Messung von Verhältniswerten bestimmt werden. Versuchspersonen erhalten dabei die Aufgabe, den Reiz so zu verändern, dass im Vergleich zu einem Ausgangsreiz der doppelte oder auch der halbe Wert der Empfindung hervorgerufen wird. Der Zusammenhang zwischen der Frequenz f_1 und der Frequenz $f_{1/2}$, die nur die Hälfte der von f_1 erzeugten Tonhöhenempfindung hervorruft, ist in **Abbildung 2.4.2** als durchgezogene Linie dargestellt. Bei tieferen Frequenzen empfinden die Versuchspersonen, dass sich die Frequenz, der die halbe Tonhöhe zugeordnet wird, und die Ausgangsfrequenz wie 0,5 zu 1 verhalten. Die gestrichelte, im doppellogarithmischen Maßstab unter 45° eingezeichnete Gerade entspricht diesem Zusammenhang. Bei höheren Frequenzen dagegen weicht die Tonhöhe stark von der Proportionalität zur Frequenz ab. Dies hängt laut Zwicker damit zusammen, dass der Mensch daran gewöhnt ist, dass die halbe Tonhöhe mit einer Verminderung der Frequenz um einen Faktor 2 gleichgesetzt wird, weil er dies unbewusst den in der Musik verwendeten Oktaven zuordnet. Die Empfindungsgröße wird zur quantitativen Beschreibung benutzt und wird in [mel] gemessen. Daraus folgt, dass ein reiner Ton der Frequenz 125 Hz die Verhältnistonhöhe von 125 mel besitzt.

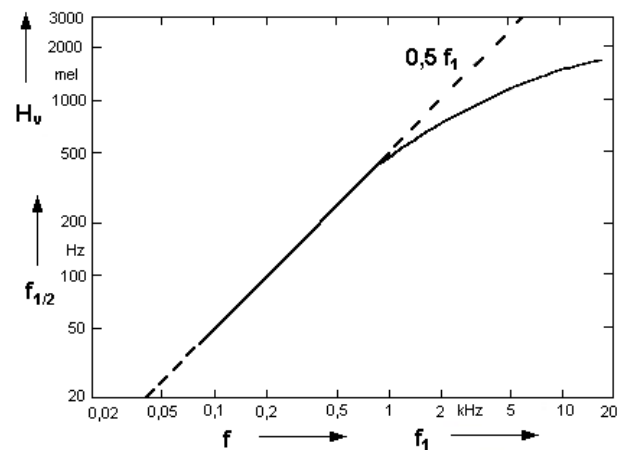


Abbildung 2.4.2: Empfindungsfunktion der Tonhöhe [Zwicker, 1982].

Klangfarbe

Wenn zwei Töne verschieden klingen, obwohl sie dieselbe Lautheit und Tonhöhe besitzen und in derselben Weise dargeboten werden, unterscheiden sie sich hinsichtlich der als Klangfarbe bezeichneten Empfindungsgröße. Untersuchungen von Zwicker haben gezeigt, dass die Schärfe ein wesentlicher Teil der Klangfarbe ist. Sie kann als eine Empfindungsgröße angesehen werden, auf die getrennt geachtet werden kann und die sich wesentlich weniger in Abhängigkeit vom Pegel ändert als in Abhängigkeit von der spektralen Zusammensetzung.

Eine Ursache für die Unterschiede in der Wahrnehmung der Klangfarbe liegt nach [Goldstein, 1997] in der relativen

Stärke der harmonischen Oberschwingungen. **Abbildung 2.4.3** zeigt die Fourier-Spektren der A- und D-Saiten einer Geige für einen Ton mit einer Grundfrequenz von 440 Hz. Da beide Töne dieselbe Grundschiwingung haben, ist ihre Tonhöhe gleich, doch Unterschiede in der Amplitude der Obertöne bewirken, dass beiden Töne unterschiedliche Klangfarben besitzen. Dabei fällt außerdem

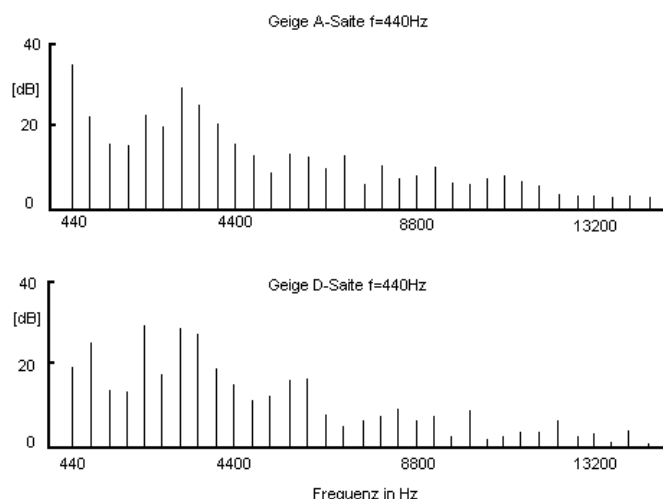


Abbildung 2.4.3: Fourier-Spektren einer Geige für einen Ton mit einer Grundfrequenz von 440 Hz [Goldstein, 1997].

auf, dass die Frequenzen der Obertöne zwar identisch sind, dass jedoch jeder Oberton eine andere relative Amplitude aufweist. Weiterhin zitiert Goldstein verschiedene Studien, die als Ergebnis die Erkenntnis liefern, dass die Klangfarbe nicht nur von der harmonischen Struktur des Tones abhängt. Vielmehr beeinflussen der Verlauf der Einschwingzeit (die Anfangsphase, in der sich der Ton aufbaut) und der Ausschwingzeit (die Phase, in der der Ton ausklingt) maßgeblich die Klangfarbe.

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass die Klangfarbe – die Wahrnehmungsqualität eines Tones, die zwei Töne mit derselben Tonhöhe und Lautheit unterscheidbar macht – sowohl von der harmonischen Struktur des Tones als auch vom zeitlichen Verlauf der Einschwing- und Ausschwingphasen seiner Obertöne abhängt.

2.5 Zusammenfassung des Forschungsüberblicks

Erst durch die gewonnenen Erkenntnisse in den Bereichen Psychologie und Physiologie wurde es möglich, den Zusammenhang zwischen der Entstehung eines subjektiven Wertigkeitsurteils und den physikalischen Eigenschaften eines Bedienelementes darzustellen (vgl. Abbildung 2.1.1). Weiterhin ermöglichte der Einblick in die psychologische und die physiologische Sichtweise eine Differenzierung der Begriffe „Haptik“ und „Taktilität“ und offenbarte gleichzeitig deren inhaltliche Ergänzung. Aufgrund dieser Differenzierung und aufgrund des Basiswissens über den Aufbau und die Funktionsweise des somatosensorischen Systems konnten die physikalischen Reize den subjektiven Wahrnehmungsinhalten zugeordnet werden. Mithilfe dieser Erkenntnisse wird die Entwicklung der gesuchten Kenngrößen im Bereich der Haptik vereinfacht.

Auf dem Gebiet der Psychoakustik stellten sich die Tonhöhe und die Schärfe als die einzigen psychoakustischen Kenngrößen heraus, die eine Verwendung im Bereich der transienten, impulshaftigen Schallereignisse finden könnten. Deshalb werden nur diese beiden Kenngrößen im weiteren Verlauf der Arbeit mithilfe von Hörversuchen validiert.

Darüber hinaus dienen die gewonnenen physiologischen und psychologischen Erkenntnisse der Klärung des Aufbaus und der Durchführung des Vorversuches, z. B. der Ermittlung des Messaufbaus für die Bestimmung der maximalen Betätigungskraft. Dieser Vorversuch wiederum definiert die Randbedingungen des empirischen Hauptversuches.

Nicht zuletzt werden mit den hier gewonnenen Ergebnissen die erste, zweite, vierte und fünfte Hypothese begründet (vgl. Seite 62).

2.6 Stand der Technik bei Stellteilen im Auto

Abbildung 2.6.1 zeigt die Gliederung dieses Kapitels. Nach der Differenzierung der zentralen Begriffe wird die Systematik der Bedienelemente im Auto erläutert. Anschließend werden die Konstruktionsprinzipien von Tastern und Drehschaltern vorgestellt, gefolgt von den verfügbaren Methoden der messtechnischen Behandlung von Stellteilen. Am Ende des Kapitels werden die Erkenntnisse aus bereits durchgeführten Untersuchungen im Bereich der Haptik und der Akustik von Stellteilen im Kraftfahrzeug zusammengefasst.

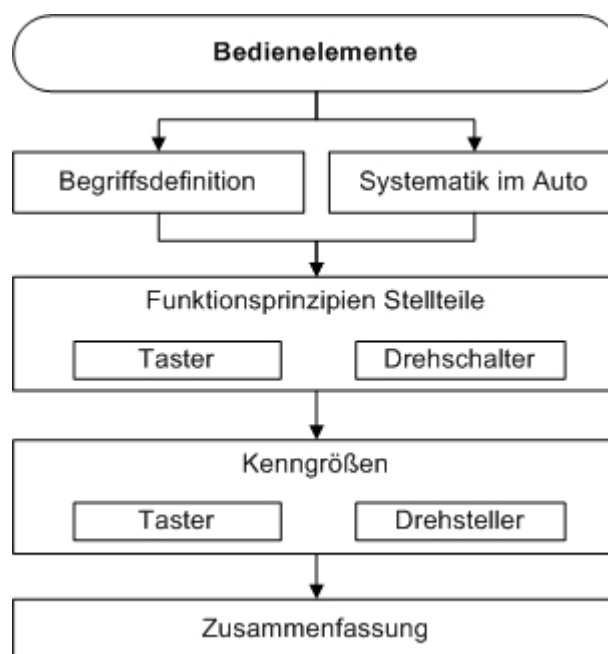


Abbildung 2.6.1: Vorgehensweise bei der Darstellung vom momentanen Stand der Technik

2.6.1 Begriffsdefinition und Systematik der Bedienelemente

Im Rahmen der aktuellen Normung wird für den Begriff „Bedienteil“ das Synonym „Stellteil“ verwendet und als „das Teil eines Stellteil-Systems, das vom Operator, z. B. durch Druck, direkt betätigt wird“, definiert [DIN EN 894, Teil 1]. Des Weiteren kommt im dritten Teil derselben Norm der Begriff „handbetätigtes Stellteil“ vor, der umrissen wird als ein „Stellteil, das von Hand gestellt oder beeinflusst wird, um eine Veränderung an einem System zu bewirken, z. B. Druckknopf, Drehknopf oder Steuerrad“. Nach [Rühmann, 1993a] soll unter dem Begriff „Bedienelement“ respektive „Stellteil“ „eine technische Einrichtung an der Eingangseite der Maschine“ verstanden werden, die „durch den physikalischen Kontakt mit der Körperoberfläche“ aktiviert

werden kann. In vergleichbarer Weise definiert [Schmidtke, 1989] den Begriff „Steuerarmatur“. Seinem Ansatz zufolge umfasst die „Steuerarmatur“ alle Bedien- und Stellteile, mit denen „der Mensch haltend, verstellend, steuernd oder regelnd auf das Arbeitssystem einwirkt“. Eine detaillierte Beschreibung der Begriffe findet sich auch in der Arbeit von [Zeilinger, 2005].

In Abhängigkeit von der Funktion und der Bewegungsart eines Bedienelementes lassen sich die Stellteile im Auto in mehrere Klassen unterteilen (siehe **Abbildung 2.6.2**). So werden die Bedienelemente laut [Zeilinger, 2005] bezüglich ihrer Funktion in „Taster“, „Schalter“ und „Steller“ gegliedert. [Schmidtke, 1989b] definiert den „Taster“ als ein nicht einrastendes Bedienteil, das translatorisch betätigt werden kann und nach der Betätigung wieder in seine Ausgangslage zurückkehrt. Der „Schalter“ und der „Steller“ stellen dagegen einrastende Stellteile dar, die sich lediglich darin voneinander unterscheiden, dass der Schalter eine diskrete und der Steller eine kontinuierliche Einrastfunktion besitzt.

Auch im Hinblick auf ihre Bewegungsart werden die Bedienelemente im Kraftfahrzeug in drei Klassen unterteilt: in Bedienelemente mit „translatorischer Bewegung“, in Bedienelemente mit „Rotationsbewegung“ und in Bedienteile mit „angenommener translatorischer Bewegung“. Der Drucktaster führt eine translatorische Bewegung, der Drehschalter eine Rotationsbewegung aus. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird außerdem der Ausdruck „Push-push-Taster“ verwendet, der mit dem Begriff des „Tasters“ in der oben genannten Definition vollkommen übereinstimmt. Eine detaillierte Beschreibung der Bezeichnungssystematik von Stellteilen im Auto ist z. B. in der Arbeit von [Zeilinger, 2005] zu finden.

Bew.art		Funktion	Taster	Schalter	Steller
		Transl.- Bew.	Drücken Schieben Ziehen	Drucktaster, Pedal Schiebetaster Zuggriff	Druckschalter Schiebeschalter Zug-/Druckgriff
angen. Transl.- Bew.	Wippen Kippen Stellen	Wipptaster Kipptaster Stelltaster	Wippschalter Kippschalter Stellschalter	- - Stellhebel	
Rotat.- Bew.	Drehen	Drehknebeltaster Drehknopftaster	Drehknebelschalter Drehknopfschalter	Drehknebelsteller Drehknopfsteller Drehrad	

Abbildung 2.6.2: Bezeichnungssystematik für Stellteile im Kraftfahrzeug [Zeilinger, 2005].

2.6.2 Funktionsprinzipien von Stellteilen

Abbildung 2.6.3 zeigt das vereinfachte manuelle Mensch-Maschine-System (MMS) als Regelkreis nach [Timpe, 2002]. Vergrößert dargestellt ist dabei diejenige Stelle im Regelkreis, auf die sich die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen konzentrieren: die sensomotorische Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Die menschliche Sensomotorik (vgl. Kapitel 2.2) konzentriert sich in diesem Fall auf die Hand bzw. den Finger. Als Repräsentant des technischen Gebildes „Maschine“ fungiert hingegen das Stellteil, das gleichzeitig eine der wesentlichen Komponenten der Benutzungsschnittstelle der Maschine ist.

In **Abbildung 2.6.4** sind die hierarchischen Bearbeitungsebenen bei der Gestaltung von Stellteilen nach [Bullinger, 1994] zu sehen. Bei diesem Ebenenmodell fällt auf, dass die Gestaltung von Stellteilen mit der Analyse der Einsatzbedingungen – der Bedienungsaufgabe – begonnen wird und erst nach drei weiteren Analysen die eigentlichen Designparameter in den Gestaltungsprozess einfließen.

Die Primäraufgabe eines Fahrzeugführers für ein sicheres Fahren beinhaltet nach [Schattenberg, 2002] die Teilaufgaben Spurhaltung und Geschwindigkeitsanpassung mit der permanenten Abschätzung des situativen Handlungsbedarfs. Diese Anforderungen bewältigt der Fahrer durch die kontinuierliche Steuerung des Lenkrades mit den Händen und die zeitweilige Fußbetätigung von Gaspedal, Bremse und ggf. Kupplung. Dabei ist es dem Fahrer nach [Wierwille, 1993] durchaus möglich, die Primäraufgabe der Fahrzeugführung nur mit einer Hand auszuführen, während er mit der anderen Hand eine sekundäre Bedienungsaufgabe erfüllt, z. B. die Betätigung eines Tasters. Weiterhin ist eine sequenzielle Ausführung der Spurhalteaufgabe und weiterer sekundärer Bedienungsaufgaben nur in kritischen Situationen wie z. B. dem Ausweichen eines Hindernisses oder im Falle einer Notbremsung notwendig.

Infolge der frontalen Körperstellung und der sitzenden Körperhaltung bei der Führung eines Fahrzeugs findet eine Vorfixierung des Bewegungsraumes des Hand-Arm-Systems statt (siehe **Abbildung 2.6.5**). Im Gegensatz zum stehenden Fahrer, z. B. bei der Führung eines Schiffes, der den vollen Bewegungsraum aller Gelenke nutzen kann, sind bei einem sitzenden Kraftfahrzeugführer die Bewegungsmöglichkeiten des Hand-Arm-Systems deutlich eingeschränkt.

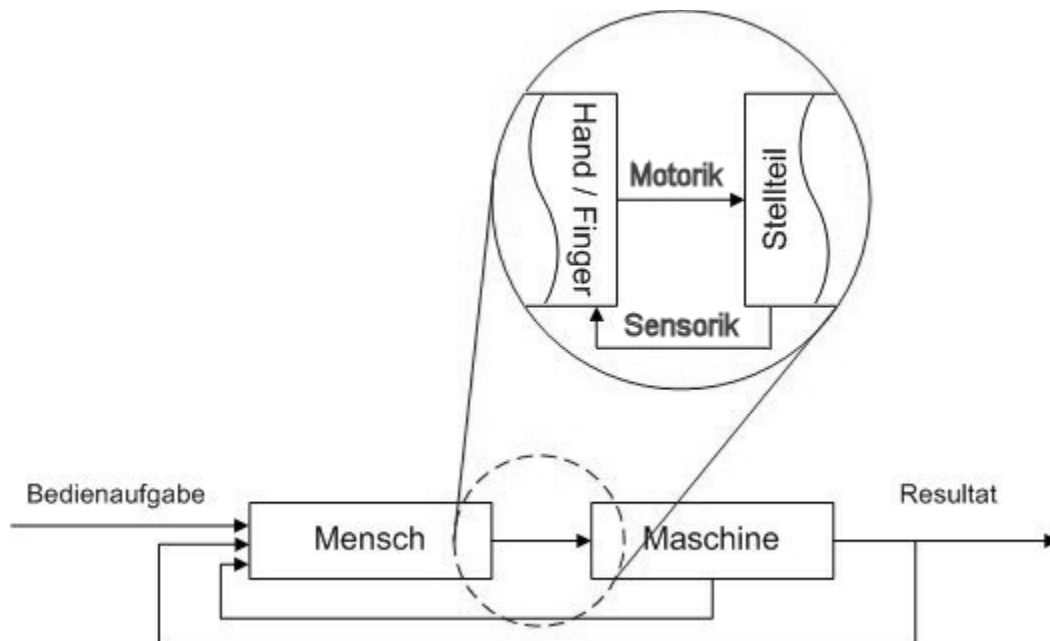


Abbildung 2.6.3: Vereinfachte Struktur eines MMS als Regelkreis [Timpe, 2002].

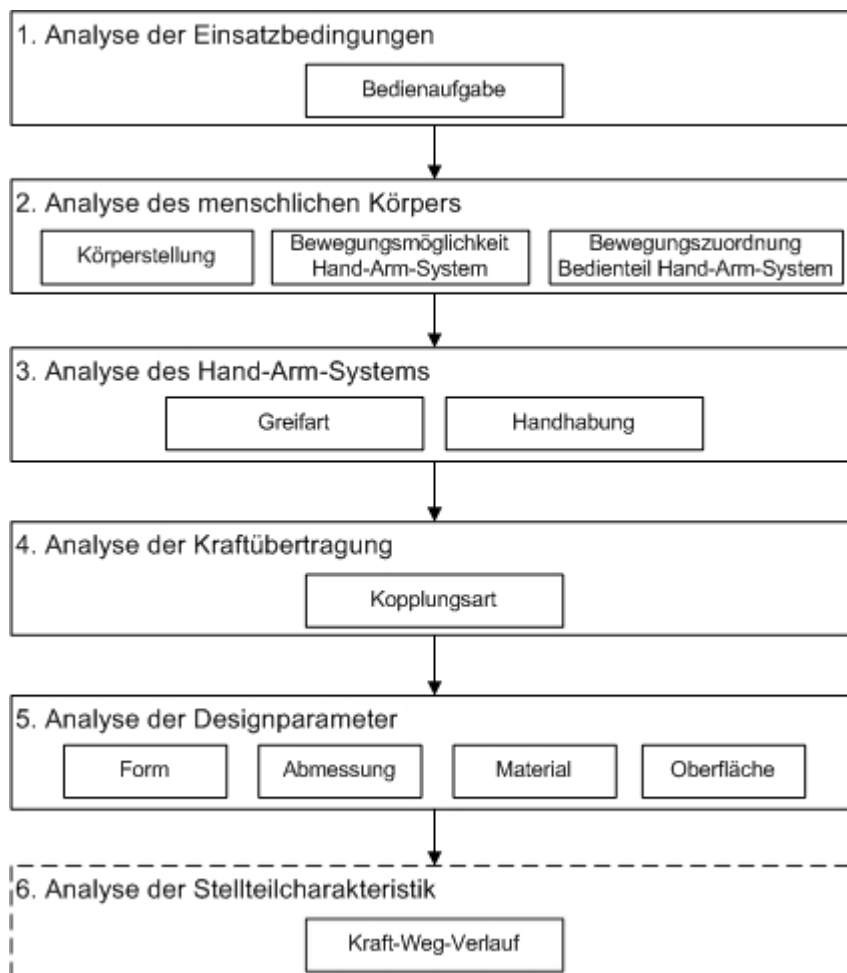


Abbildung 2.6.4: Hierarchisches Bearbeitungsmodell bei der Konzeption von Stellteilen [Bullinger, 1994].

Die Handhaltung gibt nach [Bullinger, 1994] die Lage der Hand zur Unterarmachse an und wird dann als Normallage definiert, wenn die Handlängs- und Unterarmachse fluchten. Eine von der Normallage abweichende Haltung ist im Rahmen der Bedienungsaufgaben eines Fahrers nur selten anzutreffen, z. B. bei der Bedienung von Stellteilen in der Türverkleidung mit der näher liegenden Hand.

Über die Greifart wird die Wechselwirkung der Hand mit der Bedienoberfläche des Stellteils angegeben. [Bullinger, 1994] unterscheidet drei Gruppen von Greifarten: Kontaktgriff, Zufassungsgriff und Umfassungsgriff.



Abbildung 2.6.5: Greifraum eines Fahrers, ermittelt mit der Ergonomiesoftware RAMSIS



Abbildung 2.6.6: Auszug aus den relevanten Greifarten im Kraftfahrzeug [Zeilinger, 2005].

Beim Führen eines Kraftfahrzeugs sind alle drei Greifarten vertreten, wobei für sekundäre Bedienungsaufgaben meistens der Kontakt- oder Zufassungsgriff bevorzugt werden (siehe **Abbildung 2.6.6**). Weiterhin eignet sich der Kontaktgriff laut [Bullinger, 1994] am besten für solche Bedienungsaufgaben, die lediglich einen kleinen Zeitbedarf erfordern, z. B. die Betätigung eines Tasters. Der Zufassungsgriff ist dagegen am besten für Bedienungsaufgaben geeignet, die eine größere Genauigkeit erfordern wie z. B. die Temperaturregelung einer Klimaanlage.

Die Kopplungsart gibt die Kraftübertragung zwischen Hand/Finger und Stellteil an. Dabei werden – je nach der Übertragungsrichtung der Bedienkraft – eine mittelbare (Reibschluss) und eine unmittelbare (Formschluss) Kraftübertragung unterschieden. Beim Reibschluss wird die Bedienkraft in der Ebene der Berührungsfläche des Stellteils übertragen, beim Formschluss in einer senkrechten Ebene zur Berührungsfläche

des Stellteils. Im Kraftfahrzeug ist der Formschluss am weitesten verbreitet – z. B. bei Tastern, Hebeln, Wippen, Kippschaltern etc.

Mit der Formgestaltung, der Dimensionierung der Bedienteile sowie der Auswahl des Materials und der Oberfläche wird die konzeptionelle Gestaltungsarbeit abgeschlossen. Für die Formgebung ist die entscheidende Einflussgröße die Greifart, wobei auch die Randbedingungen der Handhaltung, der Kopplungsart und der Arbeitsaufgabe nicht vernachlässigt werden dürfen. Im Gegensatz zum Formschluss spielt bei der reibschlüssigen Kopplungsart die Materialauswahl des Stellteils eine entscheidende Rolle. Auch die Auswahl der Oberfläche mit ihrem Reibungskoeffizienten ist in diesem Zusammenhang von Bedeutung.

Als Ergänzung zum hierarchischen Bearbeitungsmodell von [Bullinger, 1994] bietet sich an dieser Stelle die Betrachtung der Stellteilcharakteristik an. Damit ist die physikalische Charakteristik der Stellteile während des Betätigungsvorgangs gemeint, im konkreten Fall der Kraft-Weg-Verlauf bei den Tastern und der Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf bei den Drehschaltern.

Anforderungen für Drucktaster

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Drucktaster (auch nur „Taster“ genannt) ergeben sich aus dem oben beschriebenen Bearbeitungsmodell für die Konstruktion, die Auslegung und die Positionierung von Tastern folgende Konstruktionsgrundsätze [Schmidtke, 1989]:

- Alle Taster müssen über einen Druckpunkt („Snap“) verfügen, dessen Überwindung vom Bediener akustisch und haptisch wahrgenommen werden kann.
- Der Kraft-Weg-Verlauf des Tasters muss langsam ansteigen und am Druckpunkt steil abfallen.
- Die Betätigungsoberfläche der Taster soll eine konkave Form aufweisen. Ist dies nicht möglich, so ist eine Sicherung gegen das Abrutschen des Fingers vorzusehen.
- Zur Vermeidung einer unbeabsichtigten Betätigung sollen die Taster nicht in Auflage- und Abstützbereichen von Armen und Händen positioniert werden.
- Für fingerbetätigte Taster wird eine optimale Stellkraft von 4 N empfohlen.
- Für fingerbetätigte Taster wird ein optimaler Stellweg von 7 mm empfohlen.

Anforderungen für Drehschalter

Als diskrete Stellteile dienen Drehschalter der stufenweisen Schaltung von Funktionen. Für ihre Konstruktion, Auslegung und Positionierung sind folgende Grundsätze zu beachten [Schmidtke, 1989]:

- Der bewegliche Drehknopf des Drehschalters ist grundsätzlich als Knebel auszulegen.
- Für Drehschalter mit einem runden Drehknopf wird die Anzahl von Schaltstellungen (auch „Rastungen“ genannt) je nach Einstellbereich von vier bis 24 empfohlen.
- Ist während der Betätigung des Drehschalters eine Sichtkontrolle nicht möglich, so ist die Anzahl der Rastungen auf maximal zwölf zu begrenzen.
- Die Schaltstellungen des Drehschalters sollen einen Drehwinkel von 15° bis 45° aufweisen.
- Der Drehknopf soll einen Durchmesser zwischen 25 mm und 100 mm aufweisen. Das Optimum liegt bei 30 mm.
- Der Drehschalter ist am Anfang und am Ende des Schaltbereiches grundsätzlich mit konstruktiven Anschlägen zu versehen. Ausnahmen hiervon sind nur bei einem Schaltbereich von 360° zulässig.
- Die Betätigungskraft (der Drehwiderstand) ist grundsätzlich so auszulegen, dass sie zwischen 12,5 Ncm und 70 Ncm liegt. Der Optimalwert liegt bei 15 Ncm.
- Ein Stehenbleiben des Drehschalters zwischen zwei Rastungen ist generell konstruktiv auszuschließen.
- Eine Sinnfälligkeit, d. h. ein Anstieg der entsprechenden Funktion bei einer Betätigung im Uhrzeigersinn, muss vorhanden sein.

Einfluss mechanischer Eigenschaften auf die Steuerleistung

Neben der konstruktiven Gestaltung der Stellteile im Hinblick auf die Designparameter „Form“, „Abmessung“, „Material“ und „Oberfläche“ spielen außerdem ihre mechanischen Eigenschaften eine vordergründige Rolle. Nur wenn die mechanischen Eigenschaften des Stellteils wie coulombsche Reibung, Spiel und Trägheit die Erwartungen des Kunden erfüllen, kann eine hohe Kundenakzeptanz erreicht werden. Im folgenden Abschnitt werden die Einflüsse der oben erwähnten physikalischen Eigenschaften von Stellteilen auf die sogenannte „Steuerleistung“ beschrieben. Nach

[Schmidtke, 1989] beinhaltet der Begriff „Steuerleistung“ vor allem die Einstellzeit und die Fehlerquote.

Einfluss der coulombschen Reibung auf die Steuerleistung

Die nicht linearen Übertragungseigenschaften wie die coulombsche Reibung (Gleitreibung), die im Gegensatz zur viskosen Reibung nicht von der Betätigungsgeschwindigkeit des Stellteils abhängt, sind aufgrund der mechanischen Natur der Stellteile in gewissen Grenzen immer vorhanden (siehe **Abbildung 2.6.7**). [Schmidtke, 1989] hat verschiedene Versuche mit Stellteilen durchgeführt. Seine Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die coulombsche Reibung in Stellteilen generell einen überwiegend negativen Einfluss auf die Steuerleistung ausübt. Dieser Effekt tritt vor allem dann in Erscheinung, wenn das betroffene Stellteil eine geringe Eigenmasse besitzt und der Betätigungsweg klein ist. Ferner zeigt sich, dass die Nachteile bei solchen Bedienungsaufgaben überwiegen, bei denen die Leistung primär von der Bedienschnelligkeit abhängt.

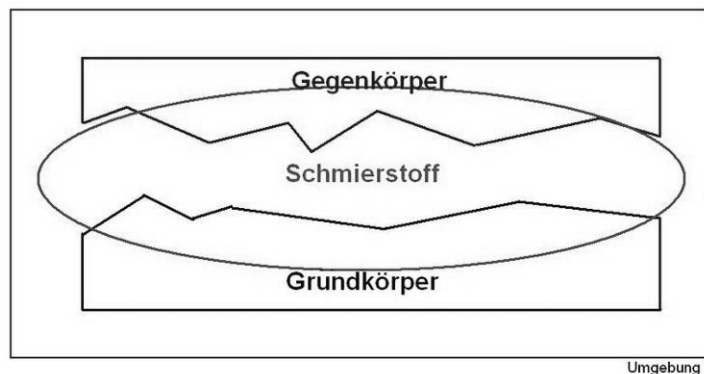


Abbildung 2.6.7: Tribologisches System [Wikipedia, 2008].

Einfluss des Spiels auf die Steuerleistung

Der Wunsch nach einem Stellteil ohne nennenswerte coulombsche Reibung führt dazu, dass die Stellteile mit sogenannten „Spielpassungen“ konstruiert werden (siehe **Abbildung 2.6.8**). Die Größe des Spiels kann dabei – wie [Schmidtke, 1989] zeigt – einen Einfluss auf die Güte der Steuerleistung haben. Aufgrund seiner Befunde schlussfolgert er, dass vorhandenes Spiel in Stellteilen für Translations- und Rotationsbewegungen zu einer „erheblichen Leistungsbeeinträchtigung“ führt. Dies gilt in-

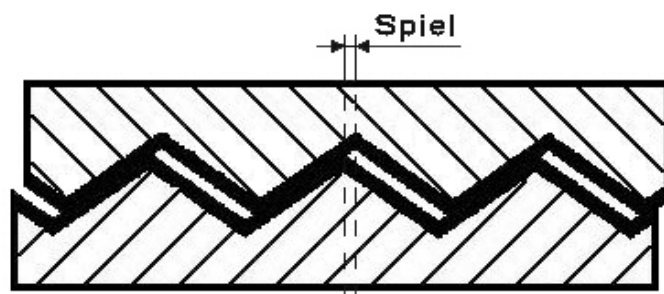


Abbildung 2.6.8: Spiel eines Drehschalterrastwerks

insbesondere dann, wenn neben der Bediengeschwindigkeit hohe Anforderungen an die Bediengenauigkeit – z. B. bei Lenkkorrekturen am Lenkrad – gestellt werden.

Einfluss der Massenträgheit auf die Steuerleistung

Die Trägheit (Massenträgheit), die von der Massenverteilung über das Körpervolumen des Festkörpers abhängt, beeinflusst nach [Rühmann, 1993] das kinematische und kinetische Verhalten, d. h. die sichtbaren Wirkungen von Kräften des bewegungsfähigen Körpers. Obwohl nur wenige diesbezügliche Untersuchungsbefunde vorliegen, fasst [Rühmann, 1993] die existierenden Einzelergebnisse wie folgt zusammen: „Erhöhte Massenträgheit von translatorischen Stellteilen ist zu vermeiden, insbesondere dann, wenn die Armatur propriozeptive Rückmeldungen infolge anderer Betätigungswiderstände (Federkraft) liefert“ (vgl. auch Kapitel 2.2.1). Im Zusammenhang mit rotatorischen Stellteilen stellt er fest, dass eine Vergrößerung der Drehmasse zu kontinuierlichen Drehbewegungen führt und dadurch den schädlichen Einfluss der coulombschen Reibung mindert.

Einfluss von Konstruktionsprinzipien auf die Wertanmutung von Tastern

Das Betätigungselement eines Stellteils, bei Tastern auch „Tastenkappe“ genannt, ist der Teil des Bedienelements, der durch eine auf ihn wirkende Druckkraft den Sprungmechanismus des sich darunter befindenden Mikroschalters (siehe **Abbildung 2.6.9**) auslöst und dadurch den Schaltvorgang bewirkt. Wie die Praxis und einige Untersuchungen zeigen (vgl. Kapitel 2.6.4), beeinflusst die konstruktive Gestaltung des Sprungmechanismus maßgeblich den Kraft-Weg-Verlauf des Stellteils, der wiederum die subjektiv erlebbare haptische Wertigkeit prägt.

Als Sprungmechanismen von Mikroschaltern haben sich auf dem Markt zwei Technologien durchgesetzt: die Schaltmatte aus Silikon und die metallische Schnappscheibe (siehe **Abbildung 2.6.10**).



Abbildung 2.6.9: Mikroschalter der Fa. RAFI [RAFI, 2008].

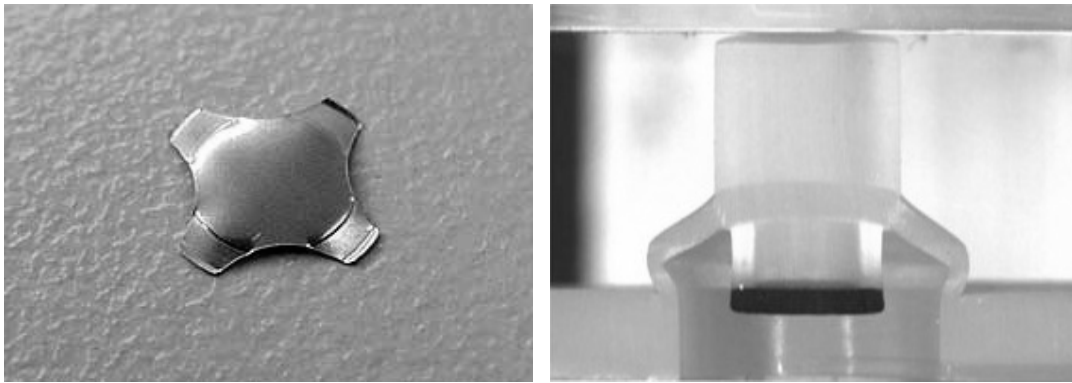


Abbildung 2.6.10: Abbildung einer Schnappscheibe (links) und einer Schaltmatte (rechts)
[Marquardt, 2008; Sateco, 2008].

Abbildung 2.6.11 präsentiert einige der bewährten Konstruktionen von Schaltmatten (oben) mit dem dazugehörigen Kraft-Weg-Verhältnis (unten). Skizze A zeigt die meistverbreitete Konstruktion von Schaltmatten. Am Anfang der Betätigung steigt die Betätigungskraft bei relativ geringem Betätigungsweg bis zur Überwindung des Druckpunktes an (gefühlte Härte des Tasters). Nach der Überwindung des Druckpunktes beschleunigt die Tastenkappe selbstständig und legt innerhalb kurzer Zeit einen relativ großen Betätigungsweg zurück (gefühlter Kraftabfall). Dieser Vorgang wird bis zum Aufsetzen der Kontaktpille auf die PCB-Platine fortgesetzt. Anschließend beginnt die Widerstandskraft wieder steil zu steigen, was wiederum zu einer rapiden Abbremsung der Tastenkappe führt (gefühlter Anschlag des Tasters bzw. Ende des erfolgreichen Schaltvorgangs). Die Praxis hat gezeigt, dass diese Form des Kraft-Weg-Verlaufs mit einem deutlich wahrnehmbaren Druckpunkt und einem ausgeprägten Endanschlag bei den Kunden zu einem angenehmen Schaltgefühl führt.

Im Gegensatz dazu resultiert beim in Skizze B dargestellten Kraft-Weg-Verlauf aus einem kleineren Kraftabfall („Snap“) ein schlecht wahrnehmbarer Druckpunkt. Skizze C zeigt eine Konstruktion, die durch einen kaum wahrnehmbaren Druckpunkt und einen schlecht definierten Endanschlag gekennzeichnet ist. Die Praxis hat bewiesen, dass diese Art der Gestaltung generell zu einer schlechteren Rückmeldung über einen erfolgreich durchgeführten Bedienvorgang und damit auch zu einer schlechteren haptischen Wertanmutung des Tasters führt.

Skizze D und E veranschaulichen die gängigen Konstruktionen eines zweistufigen Tasters. Begründet durch den Kraft-Weg-Verlauf zeichnet sich der erste Taster durch

zwei deutlich wahrnehmbare Schaltstufen aus. Die zweite Stufe des Tasters in Skizze E ist dagegen weniger stark ausgeprägt, was zur Folge hat, dass eine unbeabsichtigte Schaltung in der zweiten Schaltstufe (Überdrücken) nicht mehr sicher ausgeschlossen werden kann. Dies zieht wiederum eine Verminderung der Haptik des Tasters nach sich. In der letzten Skizze F ist die Konstruktion eines Tasters ohne haptischen Druckpunkt dargestellt. Diese Konstruktion widerspricht den oben beschriebenen Konstruktionsgrundsätzen, weil sie keine haptische Rückmeldung über den Stand des Bedienvorgangs zulässt. Aus diesem Grund findet sie in der Praxis minimale Anwendung.

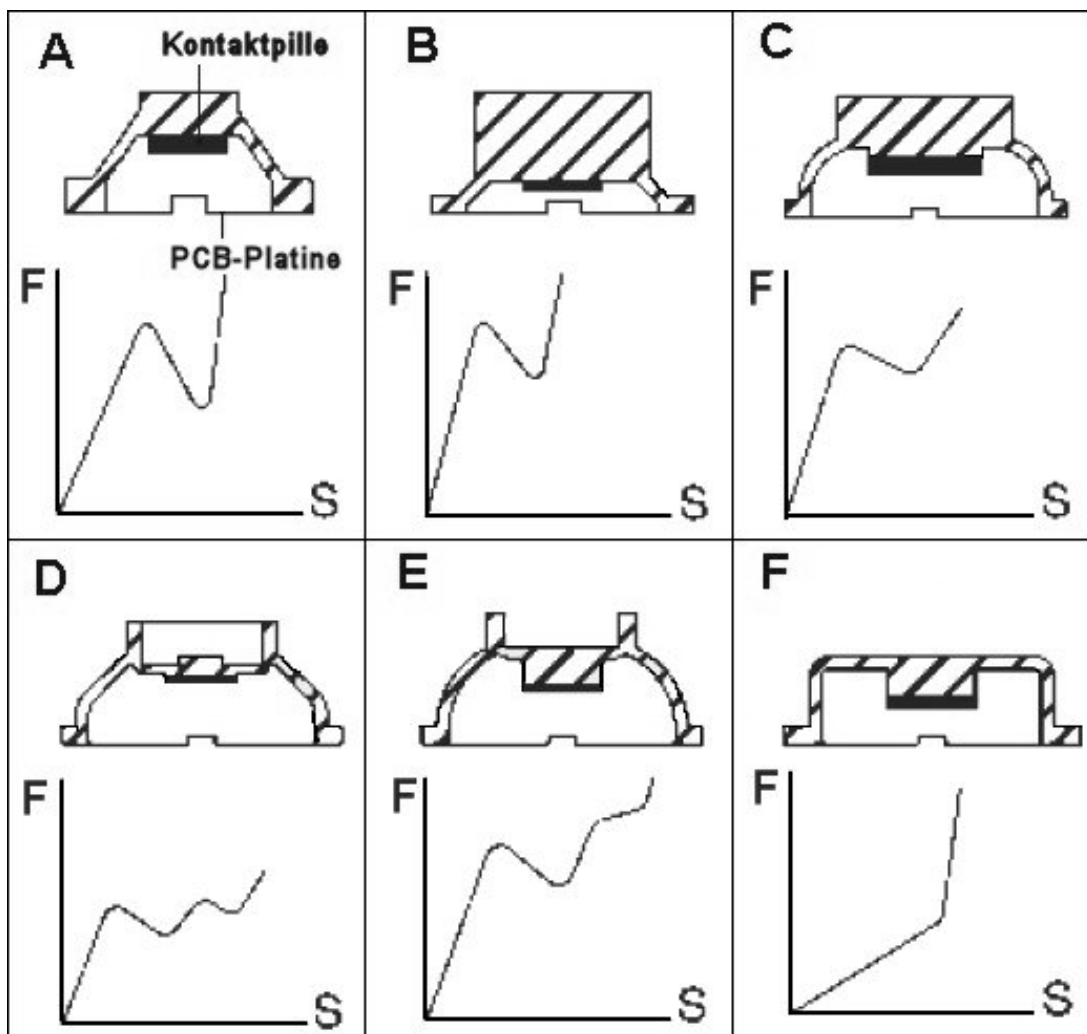


Abbildung 2.6.11: Darstellung verschiedener Konstruktionsprinzipien mit dazugehörigem Kraft-Weg-Verlauf bei einer Schaltmatte [Sateco, 2006].

Der Schaltmattentechnologie sind durch die physikalischen Eigenschaften des verwendeten Materials Grenzen gesetzt. So ist z. B. die Einhaltung von exakt vorgege-

benen Schaltkräften (z. B. eine Genauigkeiten von 0,01 N) nur mit enormem Aufwand möglich. Ein weiterer Nachteil dieser Technologie im Vergleich zur Schnappscheibe liegt in der großen Schwankungsbreite bei den Betätigungs Kräften und dem deutlich größeren erforderlichen Bauraum. Die Schnappscheibe benötigt im Gegensatz dazu nur einen sehr kleinen Bauraum. Die kleinsten Mikroschalter mit Schnappscheibe besitzen eine Höhe von nur 2 mm (siehe Abbildung 2.6.9) und sind gegenüber Schwankungen in der Betätigungskraft relativ unempfindlich. Dafür kann mit der Schnappscheibe allerdings auch nur ein digitaler Sprung im Kraft-Weg-Verlauf realisiert werden. Um dieses Manko zu umgehen und einen weichen Druckpunkt im Kraft-Weg-Verlauf zu ermöglichen, setzen die Hersteller ein zusätzliches Bauteil aus Silikon ein (siehe **Abbildung 2.6.12**). Es wird direkt über der Schnappscheibe eingebaut und fungiert als dämpfender Zwischenbetätiger.



Abbildung 2.6.12: Mikroschalter mit Zwischenbetätiger aus Silikon [Marquardt, 2008].

Einfluss von Konstruktionsprinzipien auf die Wertanmutung von Drehschaltern

Die konstruktive Gestaltung des mechanischen Rastwerks eines Drehschalters, das für die Schaltfunktion zuständig ist und durch den Drehmoment-Winkel-Verlauf charakterisiert ist, ist ebenso wie bei den Tastern für die subjektiv erlebbare haptische Wertigkeit des Bedienteils entscheidend (vgl. Kapitel 2.6.4). Dieses Rastwerk besteht im Allgemeinen aus zwei aneinander entlang gleitenden Festkörpern, die die sogenannte „Schaltkulissee“ bilden. Bei der Gestaltung der Schaltkulissee wird einerseits mit verschiedenen Materialpaarungen gearbeitet, andererseits bedienen sich Konstruk-

teure der Formgebung, um unterschiedliche Drehmoment-Winkel-Verläufe realisieren zu können (siehe **Abbildung 2.6.13**).

In **Abbildung 2.6.13** sind die vier Grundtypen von Drehmoment-Winkel-Verläufen für Drehschalter dargestellt. Skizze A zeigt einen dreieckförmigen Verlauf, der in diesem Fall durch die Kombination aus einer vorgespannten Stahlkugel und einer konkaven Kunststoffgleitfläche realisiert wurde. Dieser Drehschalter findet in der Praxis eine hohe Verbreitung, da er durch eine präzise Rastung – der Wechsel von Rastung zu Rastung erfolgt schnell und mit Schwung – und durch wenig Spiel in der Ruhelage gekennzeichnet ist. Ein Stehenbleiben des Drehschalters zwischen zwei benachbarten Rastungen wird durch die konstruktive Gestaltung der Kulissee vermieden. Dieser Fall ist auch im Rahmen der in Skizze B gezeigten Konstruktion ausgeschlossen. Das Schaltgefühl des Drehschalters in Skizze B unterscheidet sich von dem in Skizze A durch eine geringere Präzision der Schaltung, d. h. die Schaltung geht langsamer und mit geringem Schwung vonstatten.

Weiterhin wird auch das Spiel in Ruhelage durch die Konstruktion begünstigt. So weist der Drehschalter in Skizze D keinerlei Spiel auf. Durch eine Kombination aus vorgespannter Stahlkugel und dreieckförmiger Gleitfläche wird das Spiel eliminiert, wobei jedoch die Nachteile einer im Vergleich zum Drehschalter A deutlich ungleichmäßigeren Betätigung in Kauf genommen werden.

Das beste Beispiel für einen haptisch schlechten Drehschalter zeigt Skizze C. Durch die konstruktiv bedingte große Anpressfläche entsteht ein zusätzliches konstantes Reibmoment (vgl. Einfluss der coulombschen Reibung, S. 39), das den Drehschalter träge und schwunglos erscheinen lässt. In der Folge kommt es zu einer unpräzisen Betätigung des Schalters. Nicht zuletzt führt auch das durch die hohen Reibkräfte bedingte Stehenbleiben des Drehschalters zwischen zwei Rastungen dazu, dass er in der Praxis wenig angewendet wird.

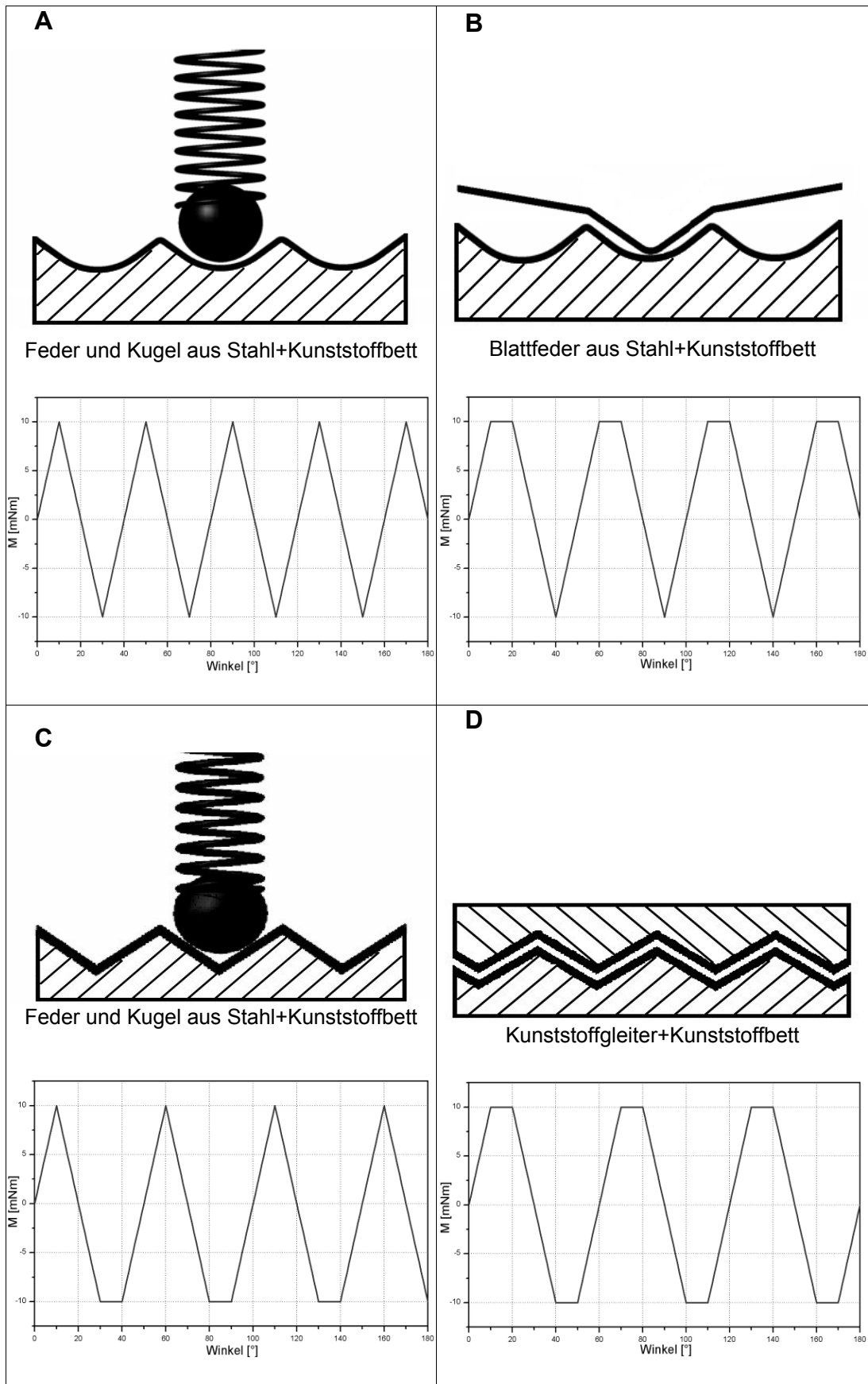


Abbildung 2.6.13: Darstellung der Schaltkulissen mit dazugehörigem Drehmoment-Winkel-Verlauf

2.6.3 Kenngrößen von Tastern und Drehschaltern

Die Objektivierung der haptischen Wertanmutung von Tastern und Drehschaltern im Bereich der Tiefensensibilität (vgl. Kapitel 1.3 und Kapitel 2.2) erfordert die messtechnische Betrachtung der physikalischen Eigenschaften, die für die genannten Wahrnehmungsinhalte zuständig sind, nämlich der Betätigungskraft und des Betätigungswegs (vgl. Abbildung 2.1.1). Auf die Betrachtung anderer physikalischer Eigenschaften der genannten Stellteile, wie z. B. der Festigkeit, wird aufgrund des fehlenden Zusammenhangs mit den Zielen der Arbeit verzichtet.

In **Abbildung 2.6.14** und **Abbildung 2.6.15** sind die typischen Funktionen der Betätigungskraft über den Betätigungsweg für einen Taster und einen Drehschalter zu sehen. Die Betätigungskraft beim Taster steigt am Anfang langsam bis zum Erreichen des Druckpunktes an. Im Bereich des Druckpunktes findet ein steiler Kraftabfall statt. Anschließend steigt die Betätigungskraft bis zum Erreichen des konstruktiven Endanschlags wieder an. Beim Loslassen des Tasters verläuft die Funktion der Betätigungskraft in umgekehrter Reihenfolge bis zur Ausgangslage. Dieser Verlauf der Betätigungskraft beim Drücken und Loslassen besitzt im Allgemeinen die Form einer Hysterese. Charakteristisch für den Kraft-Weg-Verlauf erweisen sich die maximale Betätigungskraft am Druckpunkt, der Betrag des Kraftabfalls sowie der Betätigungsweg bis zum Druckpunkt (vgl. Kapitel 3.1).

Bei den Drehschaltern bildet ein Paar von Betätigungskräften das sogenannte „Betätigungsdrehmoment“. Die Funktion dieses Betätigungsmoments über den Drehwinkel ist im Allgemeinen durch einen steilen Anstieg, einen anschließenden schnellen Drehmomentwechsel und einen darauffolgenden Drehmomentanstieg gekennzeichnet. Charakteristisch für den Verlauf sind das maximale Drehmoment und der Winkel zwischen den einzelnen Rastungen (vgl. Kapitel 3.1).

Um die oben erwähnten charakteristischen Merkmalen messtechnisch zuverlässig erfassen zu können, ergeben sich folgende Anforderungen an das verwendete Messsystem:

- Möglichkeit zur Vermessung von Kräften und Drehmomenten;
- hohe Messgenauigkeit im Bereich der Kraftaufnahme (Auflösung von 0,01 N);
- hohe Messgenauigkeit im Bereich der Wegaufnahme (Auflösung von 0,01 mm);
- hohe Reproduzierbarkeit der Messungen;

- hohe Zuverlässigkeit des Messsystems;
- hohe Flexibilität zur Vermessung von komplexen 3D-Geometrien.

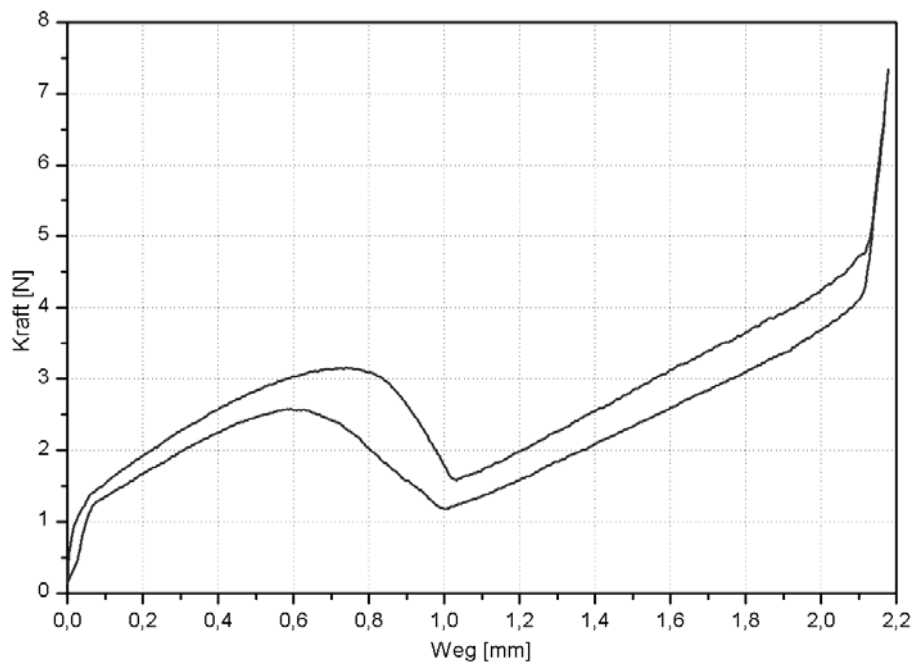


Abbildung 2.6.14: Typischer Kraft-Weg-Verlauf eines Tasters

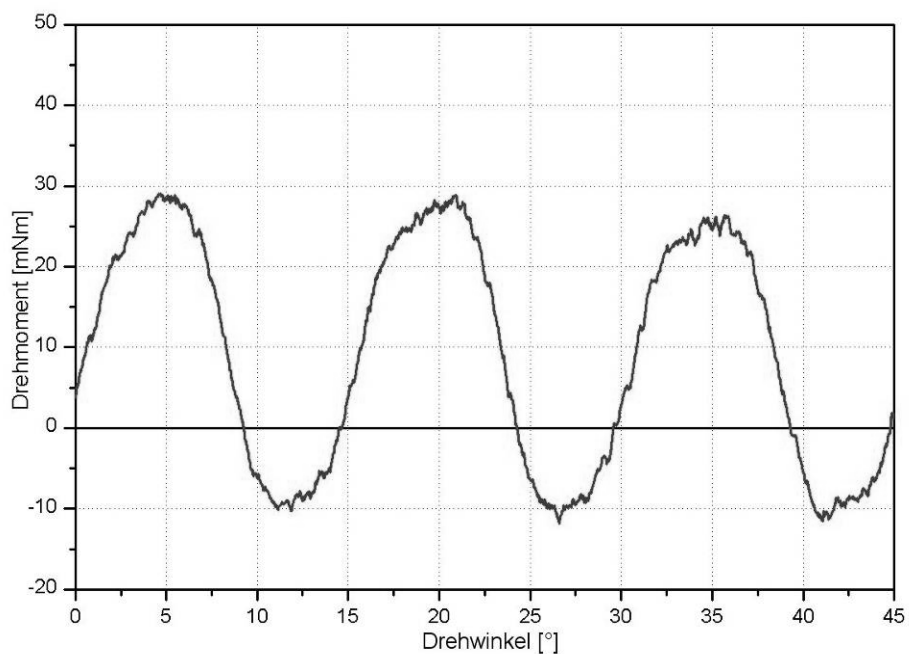


Abbildung 2.6.15: Typischer Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf eines Dreh-
schalters (nur Rechtsdrehung dargestellt)

Auf dem Gebiet der messtechnischen Erfassung von Kräften und Drehmomenten stehen sogenannte „Messrobotiksysteme“ zur Verfügung (siehe **Abbildung 2.6.16**),

mit deren Hilfe die oben aufgeführten Anforderungen erfüllt werden können. Das Messrobotikmesssystem besteht im Wesentlichen aus einem Sechs-Achs-Knickarm-Industrieroboter und einem Sechs-Achs-Kraft-Moment-Sensor. Der Sensor wird am Flansch des sechsten Gelenks des Roboters befestigt und dadurch vom Roboter mitgeführt. Für die Betätigung von verschiedenen Bedienelementen (Tastern, Dreh-schaltern, Hebeln etc.) während eines Messvorgangs werden auf der Werkzeugseite des Sensors entsprechend der Messaufgabe verschiedene Messadapter befestigt.

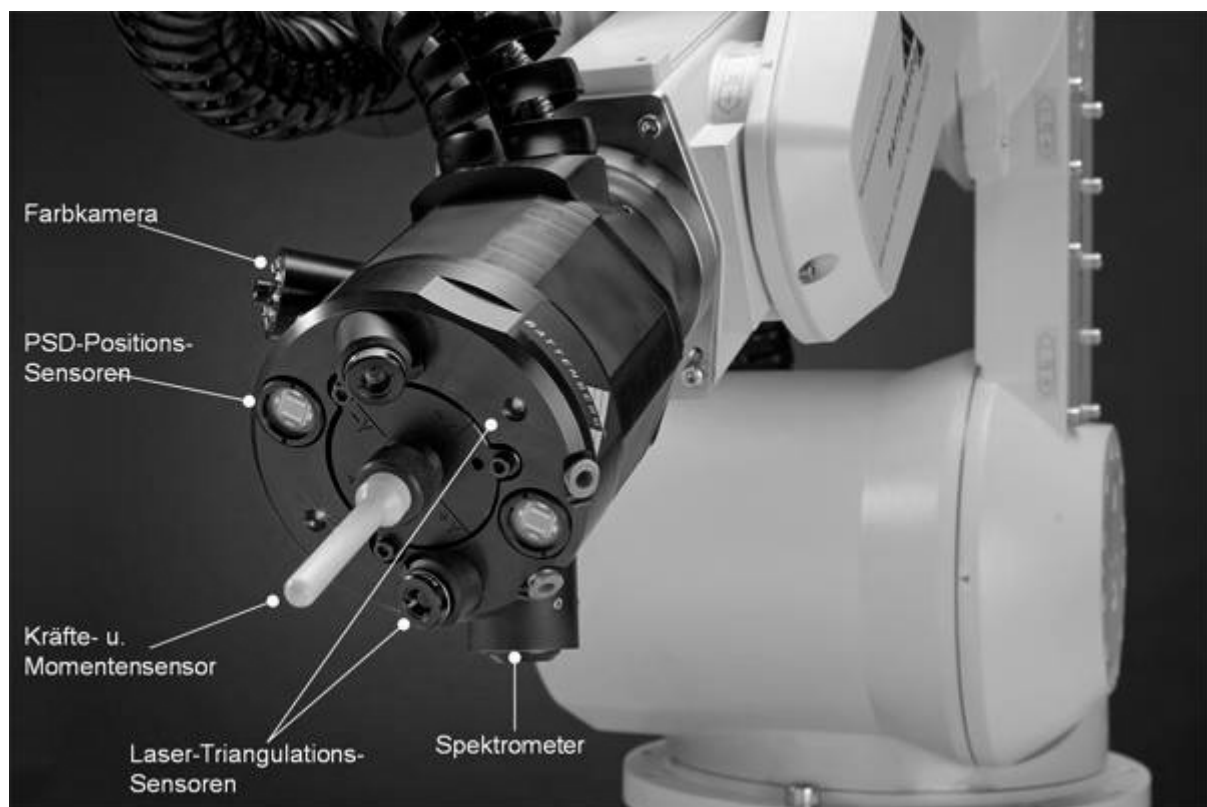


Abbildung 2.6.16: Industrieroboter mit Hightech-Multisensorik-Kopf [Battenberg, 2008].

Die Steuerung des Roboters übernimmt eine speziell entwickelte Software. Diese Software ermöglicht eine Regelung des Roboters während des Messvorgangs nahezu in Echtzeitmodus. Dies ist notwendig, um den Einfluss von unerwünschten Kräften und Momenten entgegenzuwirken, die aufgrund der komplexen, in den meisten Fällen dreidimensionalen, Formgebung der Betätigungsoberfläche der Stellteile entstehen. Als Beispiel kann die konvexe Form einer Tastenkappe genannt werden, deren Normalvektor mit der Bewegungsrichtung der Tastenkappe nicht übereinstimmt, so dass bei senkrechter Betätigung zur Oberfläche eine Querkraft entsteht (siehe **Abbildung 2.6.17**).

Auch die ausgewählte Messgeschwindigkeit spielt eine entscheidende Rolle für die Qualität der Messung (vgl. Kapitel 3.1). Aufgrund der hohen Eigenmasse des Roboters entstehen bei hohen Messgeschwindigkeiten (ab 10 mm/s) große Fliehkräfte, die zu einer Verfälschung des gemessenen Betätigungswegs/Drehwinkels führen. Die Praxis zeigt eine optimale Messgeschwindigkeit von 0,5 mm/s für Taster und 5°/s für Drehschalter.

Im Bereich der Schaltergeräusche ergeben sich aus den Zielen der Arbeit (vgl. Kapitel 1.3) folgende Anforderungen an das verwendete Messsystem:

- gehörrichtige Aufnahme und Wiedergabe eines Schalldruckpegels;
- binaurale Aufnahmen von Schalleignissen;
- hohe zeitliche Messauflösung (ca. 1 ms) und präzise Entzerrung der Schallaufnahmen.

Zur Erfüllung der oben beschriebenen Anforderungen eignet sich das hoch entwickelte digitale Kunstkopfmesssystem (siehe **Abbildung 2.6.18**). Mit diesem Messsystem können gehörrichtige, binaurale Aufnahmen durchgeführt werden, die die Voraussetzung für das korrekte Hörempfinden bei der Wiedergabe im Probandenversuch bilden. Der dabei verwendete Kunstkopf verfügt über eine korrekte Nachbildung der akustisch relevanten Komponenten des menschlichen Außenohrs (richtungsabhängige Filterung) und ermöglicht daher Aufnahmen mit den Merkmalen der subjektiven Hörwahrnehmung (räumlicher Eindruck und Lokalisierung). Die dafür benötigte Elektronik ist inklusive der Spannungsversorgung in der

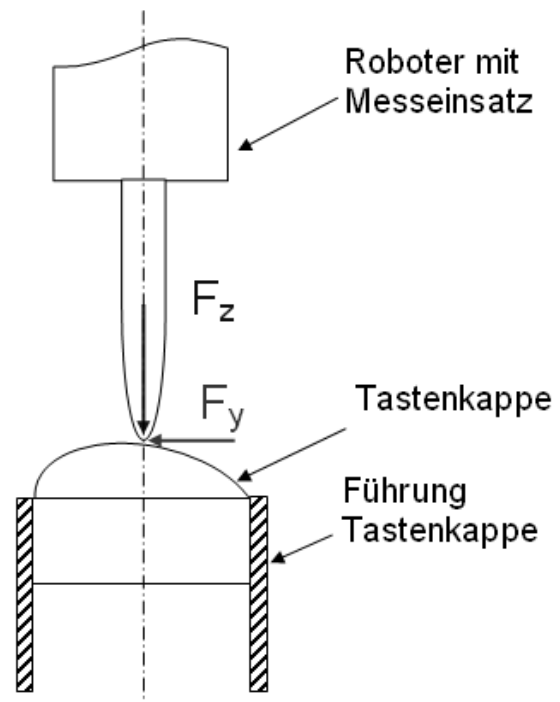


Abbildung 2.6.17: Veranschaulichung der Entstehung von Querkräften an Betätigungsoberflächen



Abbildung 2.6.18: Binaurales Kunstkopfmesssystem [HEAD acoustics, 2006].

Kopf-Schulter-Einheit integriert. Weiterhin bietet das Messsystem kompatible Schnittstellen zur herkömmlichen Messtechnik an und ist auch für mobile Messungen sehr gut geeignet.

Die aktuell in der Praxis verwendeten akustischen Auswertungsverfahren sind streng genommen nur für (quasi)stationäre Schallereignisse geeignet. Daher erweist sich die Bestimmung der psychoakustischen Kenngrößen „Lautheit“, „Tonhöhe“ und „Schärfe“ eines transienten Schallereignisses mithilfe dieser Verfahren in der Praxis als sehr mühselig und nur bedingt möglich [Fresner, 2004]. Darüber hinaus hat bis heute kein Verfahren für die Bestimmung dieser psychoakustischen Kenngrößen weder bei den transienten noch bei den instationären Schallsignalen einen Eingang in Norm und Standard gefunden.

2.6.4 Erkenntnisse zur Haptik und Akustik von Stellteilen

Zur Haptik und Akustik von Stellteilen gibt es nur wenige Erkenntnisse. [Doerrer, 2003] führte Untersuchungen mit einem Tastensimulator durch, um Erkenntnisse über die Anforderungen an haptische Displays zu gewinnen. Zwei Aufgaben wurden von ihm bearbeitet:

- Empirische Ermittlung der Wahrnehmung von Kraftsprüngen bei Tastenbetätigungen.
- Empirische Ermittlung der präferierten Kraft-Weg-Kennlinie einer Taste.

Wahrnehmung von Kraftsprüngen:

Für die Auslegung der Aktorik, der Signalverarbeitung und der Regelung eines aktiven Eingabefeldes („HapKey“) waren Erkenntnisse über die vom Menschen bei Kraftsprüngen im Kraft-Weg-Verlauf eines Tasters gerade wahrnehmbare Differenz – auch „Unterschiedsschwelle“ bzw. „Just Noticeable Difference“ (JND) genannt – vonnöten. Zur empirischen Bestimmung dieser Unterschiedsschwelle benutzte [Doerrer, 2003] eine Versuchsanordnung, bei der der Hauptbestandteil ein haptischer Tastensimulator war (siehe **Abbildung 2.6.19**).

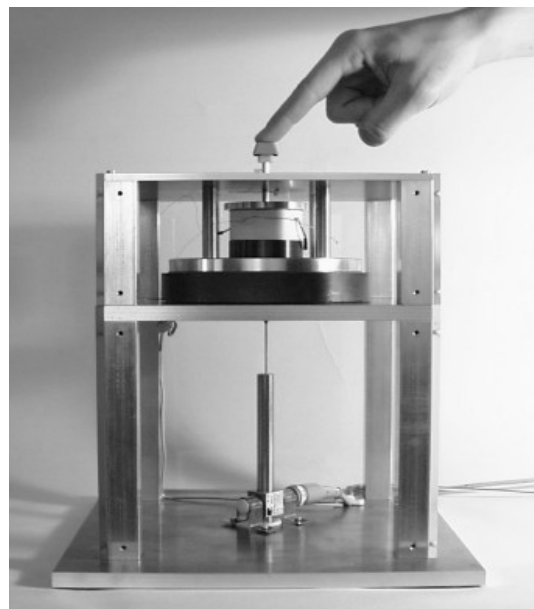
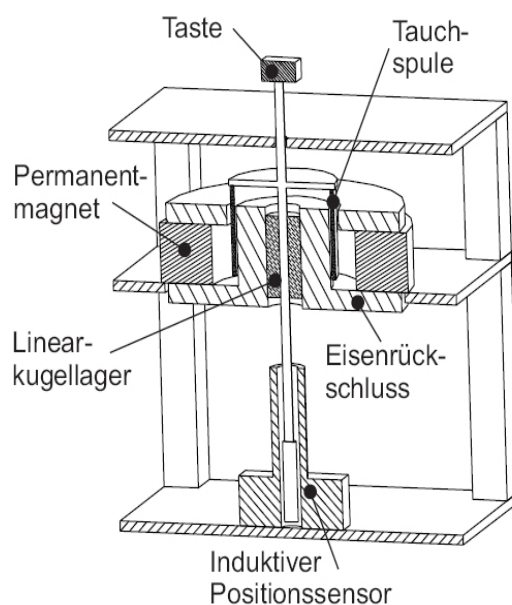


Abbildung 2.6.19: Aufbau und Bild des Tastensimulators [Doerrer, 2003].

Für die Durchführung des Versuchs wurde die sogenannte „Herstellungsmethode“ eingesetzt. Dabei wird der Proband gebeten, den Vergleichsreiz so lange selbststän-

dig zu regeln, bis er gerade noch einen Unterschied wahrnehmen kann. Am Experiment nahmen 20 Versuchspersonen teil, denen fünf unterschiedliche Referenzkräfte dargeboten wurden: 0,5 N, 1,0 N, 1,5 N, 2,0 N, 2,5 N.

Die Versuche zeigten eine Unabhängigkeit der Unterschiedsschwelle bei Kraftsprüngen, die im Durchschnitt bei 100 mN (0,1 N) lagen. Das bedeutet, dass plötzliche Kraftschwankungen im Kraft-Weg-Verlauf eines Tasters von 0,1 N nicht wahrgenommen werden können.

Präferierte Kraft-Weg-Kennlinie:

Die gleichen Probanden wurden anschließend aufgefordert, die Kraft-Weg-Kennlinie der anhand des Simulators dargestellten Taste so lange zu verändern, bis sie das Optimum gefunden hatten. Die Parameter der Kennlinie konnten die Probanden mithilfe von Schiebereglern auf einer grafischen Bedienoberfläche variieren. Das Ergebnis des Versuchs ist in **Abbildung 2.6.20** dargestellt. Obwohl sich auf den ersten Blick keine allgemeingültigen Eigenschaften feststellen lassen, konnte [Doerrer, 2003] dennoch einen Kennwert ableiten: Die Maximalkraft am Schalterpunkt wurde im Durchschnitt auf 1,5 N eingestellt. Für weitaus wichtiger erachtet [Doerrer, 2003] jedoch die im Rahmen des Experiments gewonnene Einsicht, dass bei der Betätigung von Tasten individuell unterschiedliche Erwartungen an die haptische Rückmeldung existieren.

Im Rahmen einer im Jahr 2004 im Customer Research Center der Fa. DaimlerChrysler AG in Berlin durchgeführten Probandenuntersuchung wurde die sinnliche Bewertung von Drehschaltern untersucht [Enigk, 2005]. Dabei wurden Drehschalter von insgesamt elf verschiedenen Klimabediengeräten von verschiedenen Herstellern unter Laborbedingungen von einer repräsentativen Stichprobe beurteilt. Die Untersuchung unterteilte sich in je einen haptischen und einen akustischen vollständigen Paarvergleich³ sowie in eine rein haptische Einzelbewertung⁴ und eine ganzheitliche Bewertung. Die Ergebnisse der Studie brachten die qualitative Erkenntnis, dass eine angenehme Drehschalterbetätigung durch „die gute Möglichkeit einer schnellen Drehung“ gekennzeichnet ist, während das Bedienrad „eher leicht und mit wenig Kraft“ zu drehen ist.

Weiterhin erwiesen sich eine „mittlere Größe des Drehschalters“ sowie eine „mittlere Ausprägung an Präzision“ der Rasterung als ausreichende Voraussetzung für eine

³ Vollständiger Paarvergleich: Bildung aller möglichen Vergleichspaare und deren Darbietung zur Bewertung.

⁴ Einzelbewertung: Jedes Versuchsobjekt wird einzeln zur Bewertung dargeboten und auf einer Skala einsortiert.

angenehme Betätigung. Die vollständigen akustischen Paarvergleiche haben ergeben, dass eine „präzise und deutliche Akustik“ präferiert wird. Außerdem sollte das Schaltgeräusch „nicht aufdringlich und nicht zu laut“ sein. Diese Erkenntnisse liegen leider nur qualitativ vor.

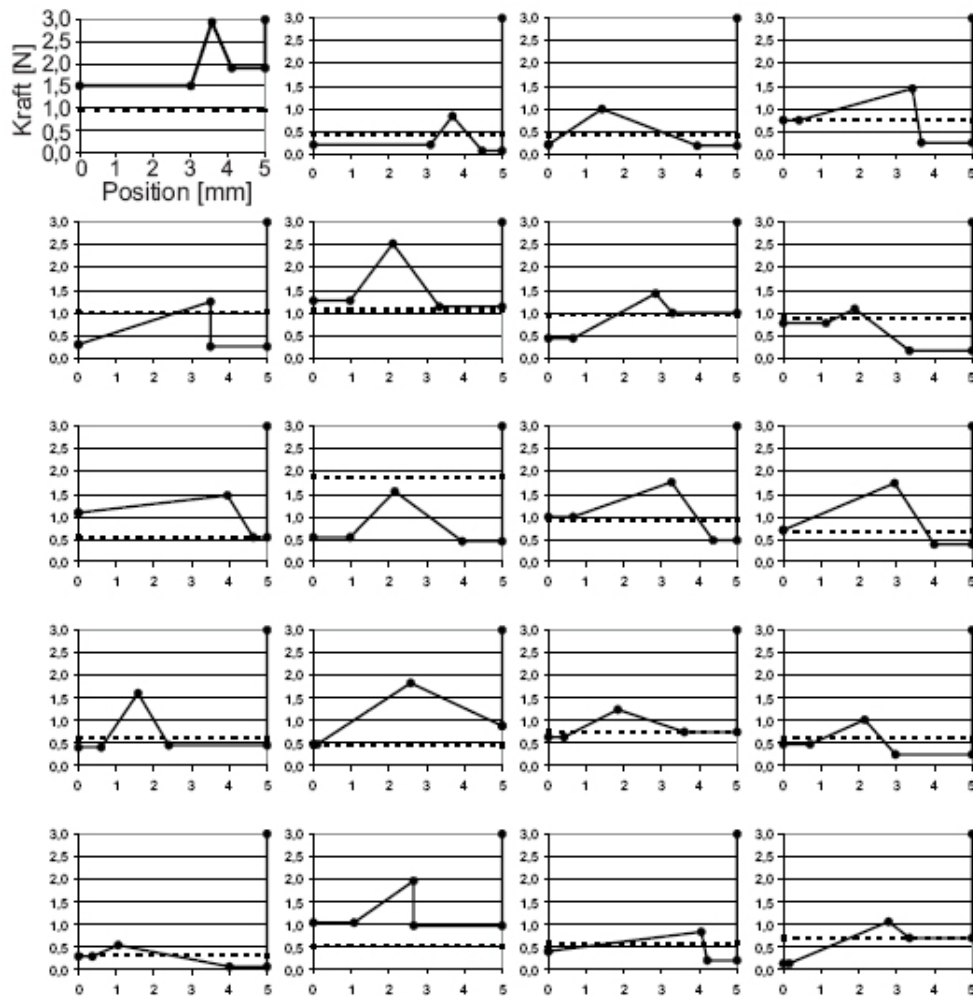


Abbildung 2.6.20: Präferierte Kennlinien einer Taste (gestrichelte Linie zeigt die Größe der Rückstellkraft) [Doerrler, 2003].

Eine weitere Studie, die im Jahr 2002 im Customer Research Center der Fa. DaimlerChrysler AG durchgeführt wurde, beschäftigte sich mit der Bewertung von Push-push-Tastern verschiedener Hersteller. Die Ergebnisse der Untersuchung offenbarten, dass Taster mit einem Kraftabfall von 35-50 % präferiert werden [Rosenberg, 2003]. Außerdem wurde festgestellt, dass die akustischen und die haptischen Eindrücke bei der Bewertung der ganzheitlichen Wertanmutung „gleichermaßen ausschlaggebend“ sind. Die im darauffolgenden Jahr durchgeführte zweite Untersu-

chung von Rosenberg hatte zum Ziel, die Ergebnisse der vorangegangenen Studie zu verifizieren und zu vertiefen. Auch die zweite Studie fand unter Laborbedingungen statt und umfasste vier Abschnitte: jeweils einen haptischen und einen akustischen vollständigen Paarvergleich, eine Einzelbewertung und eine ganzheitliche Bewertung. Alles in allem konnte die Untersuchung bestätigen, dass bei der Betätigung einer Taste ein Snap von 35-50 % bevorzugt wird. Die im Rahmen der Ergebnisse aufgetretenen signifikanten Unterschiede im Bereich der subjektiven haptischen Wertanmutung erklärte die Studie mit den Unterschieden im Kraft-Weg-Verlauf der Taster.

Mit der Untersuchung des Einflusses der haptischen Rückmeldung von Stellteilen auf die Bedienleistung beschäftigte sich auch [Rühmann, 1993a]. Er unterzog sowohl die Stellteildynamik als auch die linearen Übertragungseigenschaften von Stellteilen einer eingehenden Analyse und leitete daraus die Begriffe „Wegrückmeldung“ und „Krafrückmeldung“ ab. Da [Rühmann, 1993a] dabei auch die sogenannten „aktiven Stellteile“, d. h. elektromechanische Stellteile, die „digitale Informationen in physikalische Empfindungen übertragen“ [Zeilinger, 2005], mit einbezogen hat, sind seine Ergebnisse nicht direkt auf den hier vorliegenden Anwendungsfall übertragbar.

Weiterhin empfiehlt Rühmann in seiner Arbeit über Stellteilgestaltung [Rühmann, 1993c] eine progressive Stellteilcharakteristik, bei der die Funktion der Betätigungskraft über den Betätigungsweg langsam ansteigt und am Druckpunkt steil abfällt. Nach [Rühmann, 1993c] verbessert neben der Wegrückmeldung eine zusätzliche Krafrückmeldung durch einen Ausgleich von Diskontinuitäten im Bewegungsablauf die Stellteilgenauigkeit. Die Verwendung einer Widerstandskraft, die langsam einsetzt, dann schnell ansteigt und plötzlich wieder stark abfällt, wird auch von [Chapanis, 1963] empfohlen. Beim Erreichen des konstruktiven Endanschlags stellt seiner Auffassung nach eine sehr große Widerstandskraft mit steilem Anstieg die optimale Lösung dar.

2.6.5 Zusammenfassung

In Kapitel 2 wurden zunächst die Begriffe „Bedienteil“, „Stellteil“, „Taster“ und „Dreh-schalter“ definiert sowie ihr Standort bestimmt. Anschließend erfolgte eine Beschreibung der Systematik der Bedienelemente im Auto.

In einem relativ umfangreichen Abschnitt wurden daraufhin die Funktionsprinzipien von Stellteilen erläutert. Dabei wurde eingehend auf die Positionierung der vorliegenden Arbeit im Regelkreis des Mensch-Maschine-Systems nach [Timpe, 2002] eingegangen. Darüber hinaus wurden die hierarchischen Bearbeitungsebenen bei der Gestaltung von Stellteilen beschrieben. Die Darstellung startete mit der Bedienungsaufgabe und führte über die Analyse des menschlichen Körpers und des Hand-Arm-Systems sowie über die Analyse der Kraftübertragung bis hin zur Analyse des Designparameters. Nach der Charakterisierung der Designparameter „Form“, „Abmessung“, „Material“ und „Oberfläche“ ergab sich die Möglichkeit, das hierarchische Bearbeitungsmodell nach [Bullinger, 1994] um eine Analyse der Stellteilcharakteristik während des Bedienvorgangs in Bezug auf den Kraft-Weg-Verlauf bei Tastern und den Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf bei Drehschaltern zu erweitern. Anschließend ließen sich aus der Erläuterung der einzelnen Ebenen des Bearbeitungsmodells die Gestaltungsanforderungen für Taster und Drehschalter herleiten.

Im Anschluss wurde die Steuerleistung nach [Schmidtke, 1989] definiert und der Einfluss von mechanischen Eigenschaften (coulombsche Reibung, Spiel und Massenträgheit) auf die Steuerleistung beschrieben.

Als Nächstes wurde auf den Einfluss von Konstruktionsprinzipien auf die Wertanmutung von Tastern und Drehschaltern eingegangen. Ausführlich beschrieben wurden die Konstruktionsprinzipien einer Schaltmatte als Sprungmechanismus bei Tastern sowie die eines Drehschalterrastwerks. Bei beiden wurde der Einfluss der Konstruktion auf den Kraft-Weg- bzw. Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf detailliert dargelegt und die daraus resultierende Wertanmutung beschrieben.

Das dritte Unterkapitel hatte die Anforderungen an die messtechnische Behandlung von Tastern und Drehschaltern zum Gegenstand. In diesem Zusammenhang wurden die charakteristischen Merkmale eines Kraft-Weg- bzw. Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs definiert und daraus konkrete Anforderungen an die verwendeten Messvorrichtungen des Messrobotiksystems und des digitalen Kunstkopfmesssystems abgeleitet.

Im letzten Unterkapitel wurden Untersuchungen auf dem Gebiet der Haptik und Akustik von Stellteilen zusammengefasst. Dabei konnten quantitative Erkenntnisse bezüglich der Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle bei Kraftsprüngen sowie bezüglich der maximalen Betätigungskraft von Tastern gewonnen werden. Gute qualitative Einsichten konnten aus den im Customer Research Center der Fa. DaimlerChrysler AG intern durchgeführten Untersuchungen von [Enigk, 2005] und [Rosenberg, 2003] gewonnen werden, die die haptische und akustische Gestaltung von Tastern und Drehstellern zum Thema haben. Darüber hinaus wurden auch die Resultate von [Rühmann, 1993a] bezüglich der Gestaltung der Stellteilcharakteristik geschildert.

3 Ermittlung von Kenngrößen für Stellteile

In diesem Abschnitt werden die Konzipierung, die Vorbereitung und die Durchführung des empirischen Probandenversuchs vorgestellt. Im ersten Unterkapitel werden die Voruntersuchungen beschrieben, die zur Bestimmung der technischen Randbedingungen des Probandenversuchs dienten. Anschließend folgt die Aufstellung der Forschungsfragen (Hypothesen), die in vier Kategorien aufgeteilt werden. Danach werden die Merkmalsextraktion bei den Tastern, den Drehschaltern und den Schaltergeräuschen sowie die Festlegung des Untersuchungsgegenstands charakterisiert. Daraufhin folgt die Darlegung des Versuchsdesigns und der Versuchsdurchführung.

3.1 Voruntersuchungen

Vor der Durchführung des eigentlichen Probandenversuchs mussten mehrere technische Randbedingungen eingegrenzt werden. Hierzu wurden folgende Fragen im Rahmen von Voruntersuchungen beantwortet:

- Wie groß ist bei der Betätigung eines Tasters die maximale Betätigungskraft am Endanschlag?
- Welche Messparameter sichern eine korrekte Erfassung der Prototypen?
- Welche charakteristischen Merkmale weist ein Kraft-Weg-Verlauf bzw. ein Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf auf?
- Ist ein Drehhaptiksimulator für die Durchführung der Drehschalteruntersuchungen geeignet?
- Sind synthetisch generierte Schaltergeräusche für einen Hörversuch geeignet?

Ziel des ersten Vorversuches war es, eine Tendaussage über die reale maximale Betätigungskraft am Endanschlag zu bekommen, die bei der Betätigung eines Tasters entsteht. Die empirisch ermittelte Druckkraft wurde für die spätere Extraktion der physikalischen Beschreibungsmerkmale verwendet. Bestimmt wurde die Kraft mithilfe einer kleinen, 16 Personen umfassenden Stichprobe, deren Größe durch die Zielsetzung bestimmt wurde. Auf der Betätigungsoberfläche von zwei Tastern wurde je ein taktile Flächendrucksensor befestigt (siehe **Abbildung 3.1.1**). Mithilfe dieses Drucksensors war es möglich, die durch den Probanden auf die Bedienoberfläche erzeugte Druckkraft zu messen. Die Probanden wurden aufgefordert, die Taster ganz spontan über einen Zeitraum von ca. 60 s mehrmals zu betätigen. Die zwei verwendeten Taster wiesen unterschiedliche Kraft-Weg-Verläufe auf (siehe **Abbildung**

3.1.2). Dieser Umstand basierte auf dem Wunsch, die maximale Betätigungskraft unabhängig vom Kraft-Weg-Verlauf zu bestimmen, da bislang keine gesicherten Erkenntnisse über einen Zusammenhang existieren. Die anschließende Auswertung ergab einen rampenförmigen Kraftverlauf mit einer maximalen Betätigungskraft zwischen 7 N und 7,5 N (siehe **Abbildung 3.1.3**). Die im Rahmen des ersten Vorversuchs ermittelte maximale Druckkraft von 7 N wurde als Messabbruchskriterium für die folgende messtechnische Erfassung der Prototypen übernommen.



Abbildung 3.1.1: Taktile Flächendrucksensor [Althen, 2006].

Anhand der Untersuchung der charakteristischen Merkmale eines Kraft-Weg-Verlaufs bzw. eines Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs sollten erste Erkenntnisse gewonnen werden, die dazu dienen sollten, den Probandenversuch zweckmäßiger zu gestalten. Bei der Vermessung und Analyse von über 50 unterschiedlichen Tastern und Drehstellern konnten folgende charakteristische Merkmale festgestellt werden:

- Kraftabfall (Snap);
- Betrag der Betätigungskraft;
- Betätigungsweg;
- maximales Drehmoment;
- Drehwinkel zwischen zwei benachbarten Rastpositionen.

Diese Voruntersuchung lieferte außerdem Einblicke in die messtechnischen Randbedingungen bei der Erfassung der Taster und Drehsteller. Die hohe Eigenmasse des Roboterarms verursacht bei hohen Messgeschwindigkeiten (ab 10 mm/s) große Massenfliehkräfte, die zu einer Verfälschung des gemessenen Betätigungswegs/Drehwinkels führen. Für das verwendete Messrobotiksystem wurde eine optimale Messgeschwindigkeit von 0,5 mm/s für Taster und 5°/s für Drehschalter festgestellt.

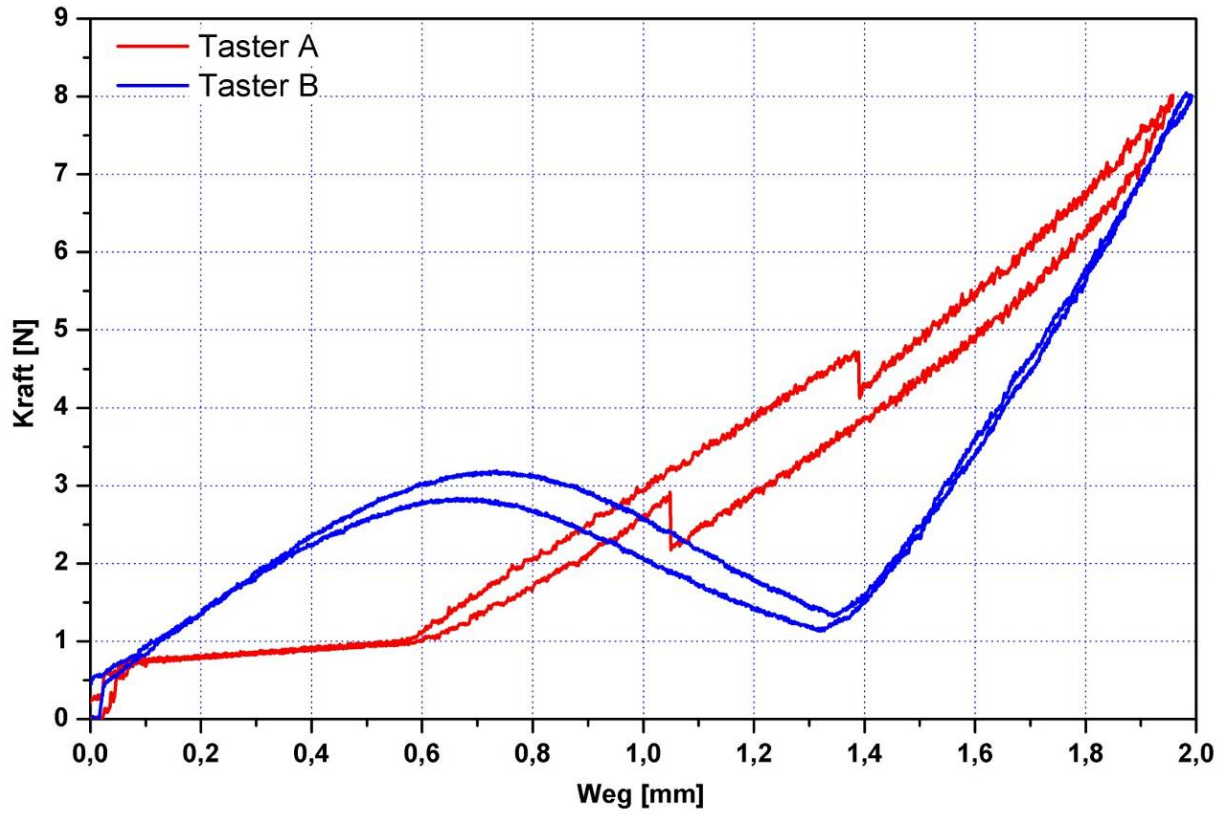


Abbildung 3.1.2: Kraft-Weg-Verläufe der verwendeten Taster.

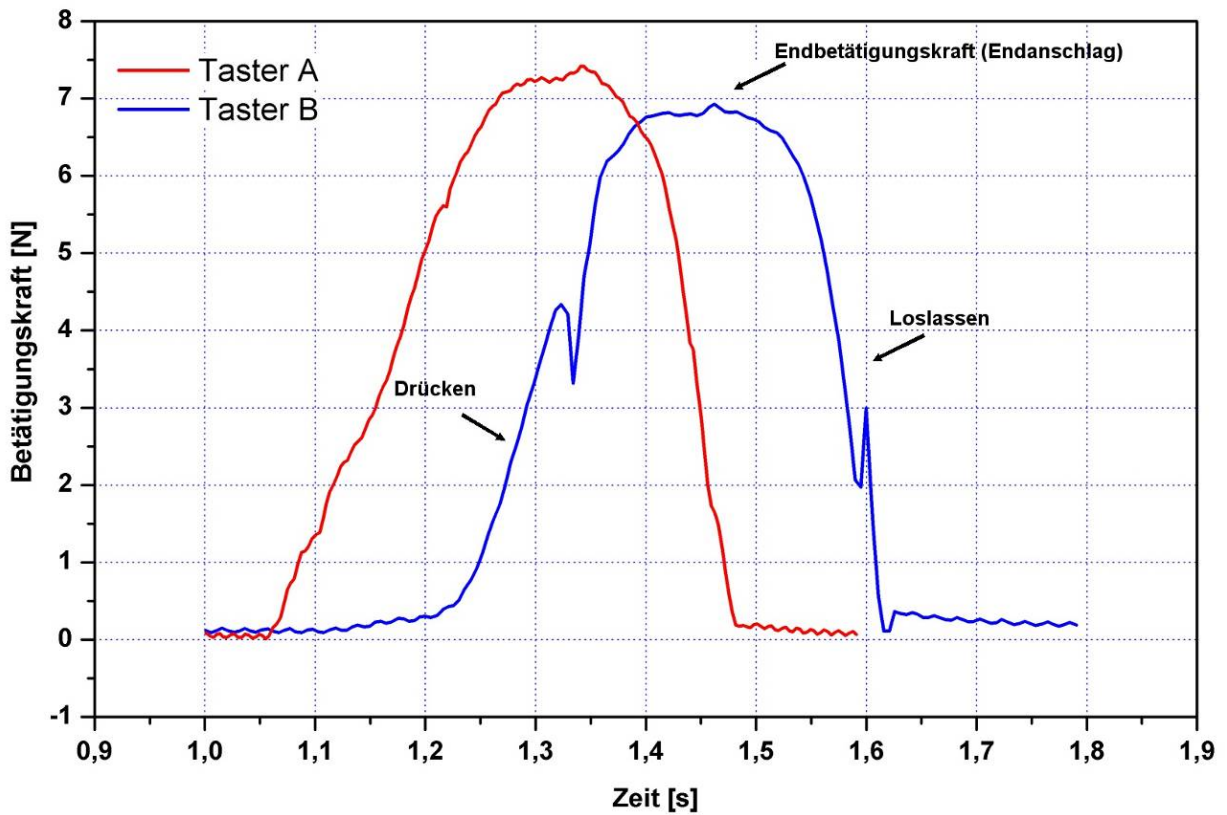


Abbildung 3.1.3: Mit dem Flächendrucksensor gemessener Zeitverlauf der Betätigungskraft.

Im Rahmen des zweiten Vorversuchs sollten versuchstechnische Potenziale bei der Verwendung von haptischen Drehschaltersimulatoren (siehe **Abbildung 3.1.4**) gegenüber der Verwendung von mechanischen Prototypen ausgewiesen werden. 15 Versuchspersonen wurden aufgefordert, drei Haptiksimitatoren der Fa. Immersion mindestens 60 s lang zu bedienen und anschließend mit realen mechanischen Drehschaltern zu vergleichen. Die Größe der Stichprobe wurde durch den Wunsch nach einer Trendaussage bestimmt. Den Probanden wurden verschiedene Drehmoment-Winkel-Verläufe zur Beurteilung angeboten. Dabei zeigte sich, dass die untersuchten Drehhaptiksimitatoren für die Zwecke der vorliegenden Arbeit nicht geeignet sind. Den Probanden fielen insbesondere folgende Eigenschaften negativ auf:

- keine präzise Einrastung;
- begrenzte Möglichkeit, beliebige Drehmoment-Winkel-Verläufe darzustellen;
- begrenzte bzw. schlechte Messbarkeit.

Auch das permanente Bremsmoment, das aus dem Bauprinzip des Simulators resultiert, wurde häufig bemängelt. Es erzeugt ein konstantes Widerstandsmoment das das eigentliche Drehmoment überlagert wird und dadurch einen Drehmomentoffset bewirkt (vgl. nächstes Kapitel). Dieser Offset lässt den Simulator im Vergleich zum mechanischen Drehschalterträger und schwergängiger erscheinen. Aus diesen Gründen wurde die Entscheidung getroffen, für den Hauptversuch speziell angefertigte mechanische Prototypen zu benutzen.



Abbildung 3.1.4: Haptiksimitatoren der Fa. Immersion [Immersion, 2006].

Im zweiten Teil dieses Vorversuchs sollte die Verwendung von synthetischen, d. h. am Computer generierten, Schaltergeräuschen auf die Zielsetzung der Arbeit hin überprüft werden. Die aufgebaute Versuchsanordnung erlaubte es dem jeweiligen Probanden, zehn synthetische mit zehn realen, d. h. mit Kunstkopf aufgenommenen, Schaltergeräuschen im direkten Paarvergleich subjektiv zu beurteilen. Der Versuch

fand ohne Kenntnis der Probanden über die Herkunft der Geräusche und unter Einhaltung der folgenden Randbedingungen statt:

- gleiche Zeitdauer der Geräusche;
- gleicher Schalldruckpegel/Lautstärke.

Die Auswertung der dabei gewonnenen Daten lieferte die Erkenntnis, dass die Benutzung von künstlichen Schaltergeräuschen für Hörversuche nicht unbedenklich ist. 80 % der Probanden konnten das synthetische Geräusch eindeutig identifizieren. Außerdem gaben über 85 % der Probanden an, dass das Erkennen eines künstlichen Geräusches an sich zu einer negativeren Umstimmung führt. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Hauptversuchs reale Schaltergeräusche verwendet, die mithilfe eines binauralen Aufnahmesystems aufgenommen wurden.

3.2 Aufstellung der Forschungsfragen (Hypothesen)

Basierend auf den im Forschungsüberblick bzw. im Rahmen der durchgeführten Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnissen wurden mehrere Hypothesen aufgestellt, die, in Gruppen zusammengefasst, nachfolgend beschrieben werden.

3.2.1 Allgemeine Hypothesen

Hypothese 1 (H 1)

Vorwiegend durch biologische Gegebenheiten begründet, wird erwartet, dass im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung eines Tasters die akustische Wahrnehmung einen höheren Stellenwert einnimmt als die haptische.

Hypothese 2 (H 2)

Unabhängig von demografischen Merkmalen wird vermutet, dass aufgrund von physiologischen Unterschieden Betätigungskräfte generell besser differenziert werden als Betätigungswege.

Hypothese 3 (H 3)

Weiterhin wird aufgrund der Komplexität der haptischen Wahrnehmung davon ausgegangen, dass viele der extrahierten physikalischen Beschreibungsmerkmale im Einzelnen keinen signifikanten Einfluss auf die haptische Beurteilung haben. Erwartet wird, dass sich Gruppen aus mehreren Merkmalen herausbilden, die einen größeren Einfluss auf die subjektive haptische Beurteilung haben.

3.2.2 Hypothesen zu den demografischen Merkmalen

Hypothese 4 (H 4)

Im Hinblick auf die demografischen Faktoren wird dahin gehend ein Unterschied erwartet, dass Frauen aufgrund der gegebenen biologischen Unterschiede geringe Betätigungskräfte angenehmer empfinden als Männer. In Bezug auf die Betätigungswege eines Bedienelements sind dagegen keine signifikanten Unterschiede zu erwarten.

Hypothese 5 (H 5)

Aufgrund der zuvor beschriebenen physiologischen Veränderungen während des Alterungsprozesses sind bei den verschiedenen Altersgruppen signifikante Unterschie-

de sowohl in der haptischen als auch in der akustischen Wahrnehmung zu erwarten. Aus diesem Grund muss eine Auswertung hinsichtlich der Altersgruppen unbedingt stattfinden.

3.2.3 Hypothesen zu den haptischen Gestaltungsparametern

Hypothese 6 (H 6)

Aus ergonomischen Gründen wird im Bereich der Drehschalter erwartet, dass die Größe des Raddurchmessers und die Anzahl der Rastpositionen eines Drehschalters in einer direkten Verbindung zur erlebbaren Wertigkeit stehen. Es ist davon auszugehen, dass diese zwei Merkmale innerhalb der Stichprobe die Form einer Normalverteilung annehmen werden.

3.2.4 Hypothesen zu akustischen Gestaltungsparametern

Hypothese 7 (H 7)

Aufgrund der psychoakustischen Erkenntnisse wird angenommen, dass die psychoakustischen Empfindungsgrößen „Tonhöhe“ und „Schärfe“ bei den Impulsgeräuschen ähnlich wie bei den stationären Geräuschen in einem direkten Zusammenhang zur akustischen Wertanmutung des Schaltergeräusches stehen. Eine Erhöhung der Schärfe bzw. der Tonhöhe dürfte als unangenehm empfunden werden.

3.3 Merkmalsextraktion und Gegenstand der Untersuchungen

Nach der Durchführung der Vorversuche und der Klärung der Fragestellungen bezüglich des Hauptversuches werden in diesem Kapitel die messtechnischen Merkmale von Tastern, Drehschaltern und Schaltergeräuschen definiert. Mithilfe dieser Merkmale werden später die gesuchten Kenngrößen entwickelt.

3.3.1 Extraktion charakteristischer Merkmale bei den Tastern

Abbildung 3.3.1 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf eines Tasters, der mit einem Messrobotikmesssystem aufgenommen wurde. Der Verlauf wurde mit einer konstanten Messgeschwindigkeit von 0,5 mm/s und einer Messauflösung von 0,0035 mm pro Messpunkt aufgenommen. Als Messabbruchkriterium wurde die in den Vorversuchen empirisch ermittelte Maximalbetätigungskraft von 7 N verwendet. Um den Einfluss der üblichen Messstreuung auf die anschließende Merkmalsextraktion zu verringern, wurden Mittelwerte über mindestens fünf Messungen gebildet.

Der Verlauf der Betätigungskraft weist mehrere markante Punkte auf. Diese Punkte sind in **Abbildung 3.3.1** mit dem Buchstaben „P“ und einem dazugehörigen Index gekennzeichnet und werden wie folgt definiert:

- P_0 : Messausgangspunkt bzw. Ruhestellung.
- P_1 : Betätigungspunkt: Der Punkt, an dem der Sprungmechanismus in Funktion gesetzt wird.
- P_2 : Snappunkt: Definitionspunkt für den Kraftabfall (Snap) auf dem Hinweg des Betätigers.
- P_3 : Snapsprungpunkt: Definitionspunkt für das Merkmal „Snapsprung“, definiert als der Schnittpunkt der Horizontale durch den Betätigungspunkt mit der Kraftanstiegskurve nach dem Snap.
- P_4 : Endbetätigung: Empirisch ermittelte Endbetätigungskraft, die zugleich das Ende des Messvorgangs darstellt (Abbruchkriterium).
- P_5 : Konstruktiver Endanschlag: Stellung des Betätigers am Ende des konstruktiv zulässigen Weges. Schließt die Phase der Überdrückung des Tasters ein und wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.
- P_6 : Rückstellpunkt: Punkt auf dem Rückweg des Betätigers, an dem der Sprungmechanismus in seine Ausgangsstellung zurückgeführt wird.

- P_7 : Rücksprung: Definitionspunkt für den Kraftanstieg auf dem Rückweg des Betätigers.
- P_8 : Ende Rücksprungweg: Definitionspunkt für das Merkmal „Rücksprungweg“, der als der Schnittpunkt der Horizontale durch den Rückstellpunkt mit der Rücklaufkurve des Betätigers nach dem Rücksprung definiert wird.

Mithilfe der oben definierten markanten Punkte ist es nun möglich, die eigentlichen messtechnischen Beschreibungsmerkmale eines Tasters zu extrahieren. Die nachfolgende **Tabelle 3.3.1** gibt einen Überblick über die extrahierten Merkmale.

Aus fertigungstechnischen Gründen – eine Variation der definierten Merkmale konnte nicht hergestellt werden – konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit folgende Merkmale nicht untersucht werden:

- Vorspannkraft,
- Vorspannweg und
- Rücksprungwegkraft.

In Anhang A ist eine vollständige Übersicht über die festgehaltenen physikalischen Eigenschaften aller Taster zu finden.

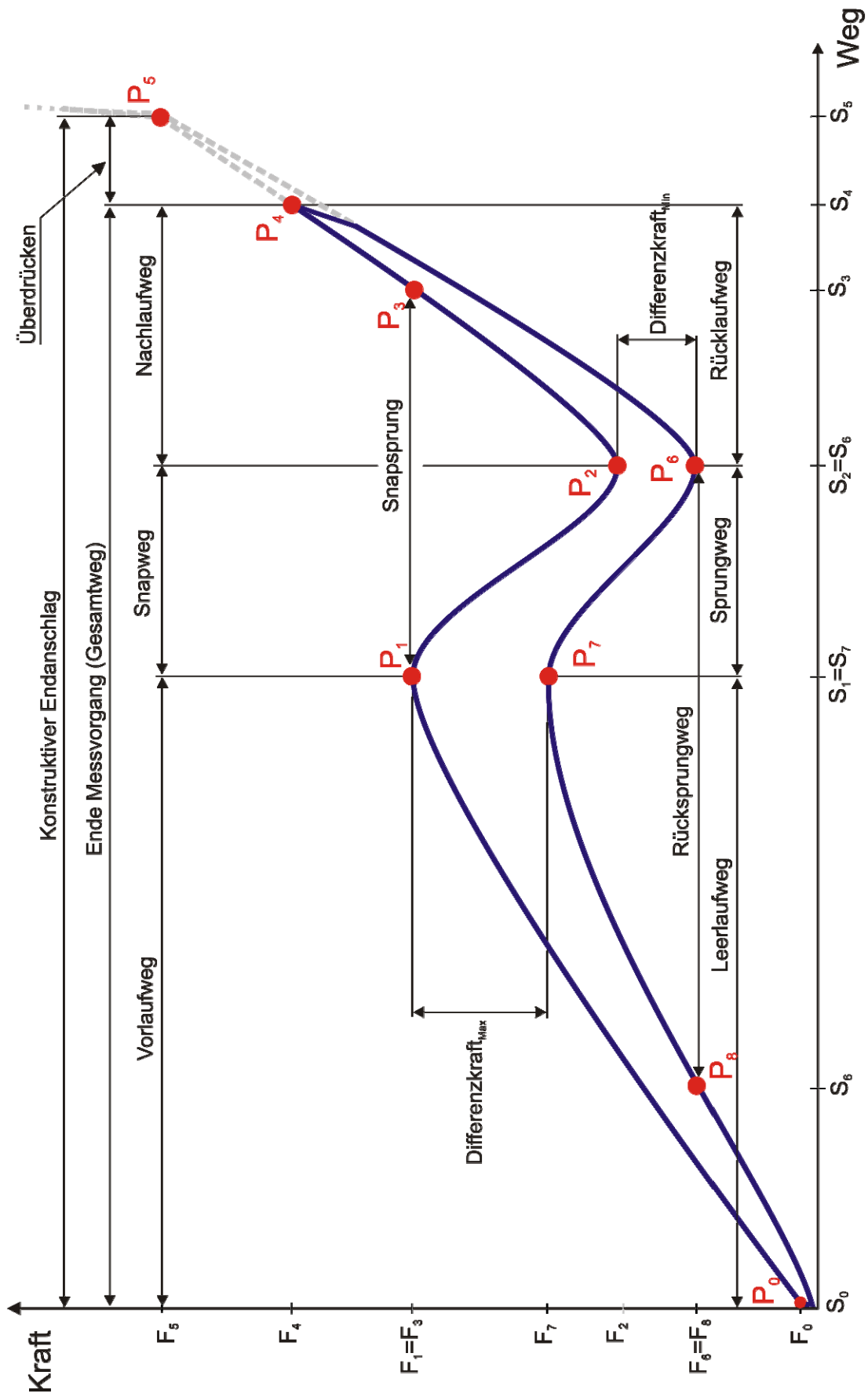


Abbildung 3.3.1: Definition messtechnischer Merkmale bei den Tastern.

Experimenteller Teil – Merkmalsextraktion

Punkt	Merkmal	Zeichen	Beschreibung des Merkmals
P ₀	Vorspannkraft	F ₀	Die erforderliche Kraft, um den Betätiger in Bewegung zu setzen.
	Vorspannweg	S ₀	Laut Definition ist P ₀ gleich 0 mm.
P ₁	Betätigungskraft (P ₁ -Kraft)	F ₁	Am Betätiger erforderliche maximale Kraft, um diesen von der Ruhestellung über den Betätigungspunkt (P ₁) zu führen.
	Vorlaufweg (P ₁ -Weg)	S ₁	Der Weg des Betätigers von der Ruhestellung bis zum Betätigungspunkt.
P ₂	Schaltkraft (P ₂ -Kraft)	F ₂	Kraft, bis zu welcher die Betätigungskraft auf dem Hinweg durch den Sprungmechanismus vermindert wird.
	Kraftabfall (Snap) Snapweg (P ₂ -Weg)	SNAP S _W	Der Kraftabfall von der Betätigungskraft in Prozent. Der Weg des Betätigers vom Betätigungspunkt (P ₁) bis zum Snappunkt (P ₂).
P ₃	Snapsprungkraft	F ₃	Laut Definition gleich der Betätigungskraft (F ₁).
	Snapsprung (P ₃ -Weg)	S _S	Der Weg vom Betätigungspunkt (F ₁) bis zum Snapsprungpunkt (P ₃).
P ₄	Endbetätigungskraft	F ₄	Empirisch ermittelte Endbetätigungskraft, die zugleich das Ende des Messvorgangs darstellt.
	Nachlaufweg	S _N	Der Weg des Betätigers vom Snappunkt (P ₂) bis zum Erreichen der Endbetätigungskraft.
	Gesamtweg (P ₄ -Weg)	S _G	Der Weg des Betätigers von der Ruhestellung (P ₀) bis zum Ende der Betätigung (P ₄).
P ₆	Rückstellkraft (P ₆ -Kraft)	F ₆	Kraft, bis zu welcher die Endbetätigungskraft auf dem Rückweg vermindert werden muss, damit der Sprungmechanismus in die Ausgangslage zurückgeführt wird.
	Rückstellweg (P ₆ -Weg)	S _{RS}	Der Weg, bei dem der Sprungmechanismus in die Ausgangslage zurückgeführt wird.
	Differenzkraft _{MIN}	F _{MIN}	Der Kraftunterschied zwischen der Schaltkraft (F ₂) und der Rückstellkraft (F ₆).
	Rücklaufweg	S _R	Der Weg des Betätigers von der Endbetätigung (P ₄) bis zum Rückstellpunkt (P ₆).
P ₇	Rücksprungkraft (P ₇ -Kraft)	F ₇	Kraft, bis zu welcher die Rückstellkraft durch den Sprungmechanismus auf dem Rückweg erhöht wird.
	Differenzkraft _{MAX}	F _{MAX}	Der Kraftunterschied zwischen der maximalen Betätigungskraft (F ₁) und der Rücksprungkraft (F ₇).
	Sprungweg	S _{SP}	Der Weg des Betätigers vom Rückstellpunkt (P ₆) bis zum Rücksprung (P ₇).
P ₈	Leerlaufweg (P ₇ -Weg)	S _L	Der Weg des Betätigers vom Rücksprung (P ₇) bis zur Ruhestellung (P ₀).
	Rücksprungwegkraft	F ₈	Laut Definition von Rücksprungweg (P ₈) ist sie gleich der Rückstellkraft (F ₆).
P ₈	Rücksprungweg	S _{RS}	Der Weg des Betätigers vom Rückstellpunkt (P ₆) bis zum Ende des Rücksprungwegs (P ₈).

Tabelle 3.3.1: Messtechnische Beschreibungsmerkmale der Taster.

3.3.2 Extraktion charakteristischer Merkmale bei den Drehschaltern

Bei der messtechnischen Erfassung eines Drehschalters wird üblicherweise ein Drehmoment-Drehwinkel-Diagramm erstellt, dessen grundlegendes theoretisches Konstrukt in **Abbildung 3.3.2** dargestellt ist. Ebenso wie bei den Tastern lassen sich auch hier markante Punkte finden, die den allgemeinen Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf beschreiben und wie folgt definiert werden:

- P_0 : Einrastpunkt (Ruhestellung): Der Betätiger befindet sich in einer Rastposition und ist kraftfrei.
- P_1 : Erster Betätigungspunkt: Der Punkt, an dem das Betätigungsdrehmoment seinen maximalen Wert erreicht. Der Betätiger befindet sich in der Zugphase (Betätiger wird gezogen).
- P_2 : Ende Betätigungsweg Zugphase: Der Drehmomentwechsel wird eingeleitet.
- P_3 : Zweiter Betätigungspunkt: Der Punkt, an dem das Drehmoment erneut seinen maximalen Wert erreicht. Der Drehmomentwechsel ist vollzogen, der Betätiger befindet sich in der Schubphase (Betätiger schiebt).
- P_4 : Ende Betätigungsweg Schubphase: Der nächste Drehmomentwechsel wird eingeleitet, die nächste Rastposition wird erreicht.
- P_5 : Einrastpunkt (Ruhestellung): Der Betätiger erreicht die nächste Rastposition.

Mithilfe dieser markanten Punkte ist es nun möglich, die messtechnischen Merkmale eines Drehschalters zu extrahieren. Die nachfolgende **Tabelle 3.3.2** gibt einen Überblick über die extrahierten Merkmale.

Ausgehend vom soeben definierten Merkmal „Betätigungsweg“ lässt sich ein weiterer physikalischer Parameter als Beschreibungsmerkmal definieren: die Grundform des Drehmomentverlaufs. Eine zusammenfassende Übersicht über dieses Merkmal ist in **Tabelle 3.3.3** abgebildet. Die verschiedenen Drehmomentverläufe basieren auf den unterschiedlichen Bauprinzipien der Drehschalter und sind für die subjektive Wahrnehmung einer leichten und präzisen Rastung (Kodierung 1) bzw. einer groben und trägen Rastung (Kodierung 4) verantwortlich (vgl. Kapitel 2.6.2).

Weiterhin wurden im Rahmen dieser Arbeit die Merkmale „Raddurchmesser“ und „Rastpositionenanzahl“ berücksichtigt. Folgende Beschreibungsmerkmale konnten

nicht untersucht werden, da keine Prototypen mit der erforderlichen Variation hergestellt werden konnten:

- Drehmomentoffset und
- Steigung der Drehmomentkurve.

Der Drehmoment-Winkel-Verlauf der im Versuch verwendeten Prototypen wurde mit einer Messgeschwindigkeit von $5^\circ/\text{s}$ und einer Messauflösung von $0,035^\circ$ angenommen. Als Messabbruchkriterium wurde ein Winkel von 180° verwendet. Um den Einfluss der üblichen Messstreuung auf die anschließende Merkmalsextraktion zu verringern, wurden Mittelwerte über mindestens fünf Messungen gebildet.

Anhang B zeigt eine vollständige Übersicht über die festgehaltenen Messwerte aller Drehschalter. Die Neigungen der Drehmomentkurve wurden in $[\text{mNm}^\circ]$ erfasst, das Betätigungs-drehmoment in $[\text{mNm}]$, der Schritt in Grad $[\circ]$.

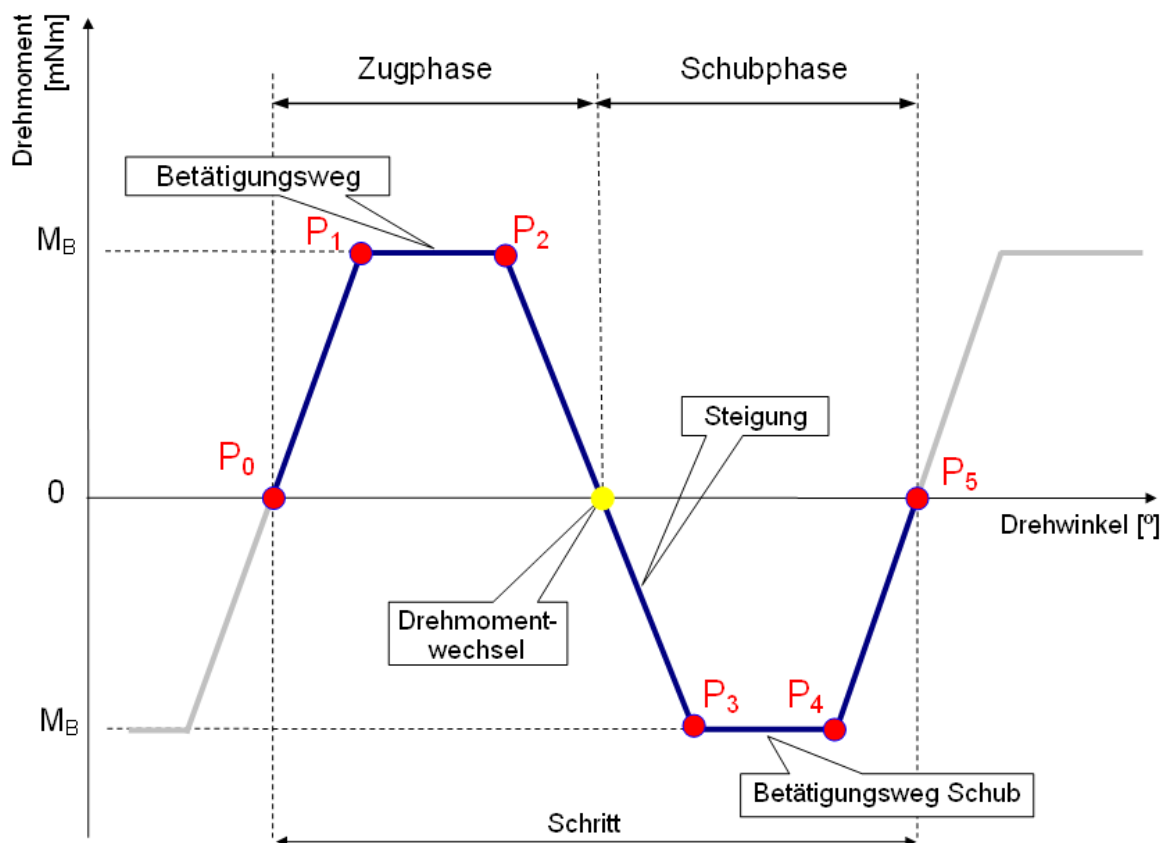


Abbildung 3.3.2: Definition messtechnischer Merkmale bei den Drehschaltern.

Punkt	Merkmal	Zeichen	Beschreibung des Merkmals
P ₀	Drehmomentoffset	O _D	Durch die Überlagerung von Reibmomenten hervorgerufene Verschiebung des gesamten Drehmomentverlaufs bzgl. der X-Achse.
P ₁	Betätigungsdrehmoment	M _B	Das maximale Drehmoment, das notwendig ist, um den Betätiger in einer neuen Rastposition zu bringen .
	Drehmomentsteigung Zug	Γ _Z	Die Neigung des Drehmomentverlaufs beim Anlauf.
P ₂ , P ₄	Betätigungsweg (Zug+Schub)	W _B	Der Drehwinkel zwischen der ansteigenden Anpressflanke und der abfallenden Mitnahmeflanke.
	Grundform	F _G	Beschreibungsmerkmal, das durch das Vorhandensein und den Betrag des Merkmals „Betätigungsweg“ definiert wird.
P ₃	Drehmomentsteigung Schub	Γ _S	Die Neigung des Drehmomentverlaufs während des Drehmomentwechsels.
P ₅	Schritt	S _D	Der Abstand zwischen zwei benachbarten Rastpositionen. Bestimmt die Anzahl der Rastpositionen.

Tabelle 3.3.2: Messtechnische Beschreibungsmerkmale von Drehschaltern.

Numerische Kodierung	Bedingung	Grundform des Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs
1	$P_1 \equiv P_2$ und $P_3 \equiv P_4$	
2	$P_1 \equiv P_2$ und $P_3 \neq P_4$	
3	$P_1 \neq P_2$ und $P_3 \equiv P_4$	
4	$P_1 \neq P_2$ und $P_3 \neq P_4$	

Tabelle 3.3.3: Grundformen des Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs.

3.3.3 Extraktion charakteristischer Merkmale bei den Schaltergeräuschen

Aus den Erkenntnissen der Psychoakustik erweisen sich die Kenngrößen „Tonhöhe“ und „Klangfarbe“ als geeignet für eine Verifikation im Bereich der transienten Schaltergeräusche. Die restlichen psychoakustischen Kenngrößen wie z. B. „Rauhigkeit“ oder „Schwankungsstärke“ setzen laut Definition ein Schallereignis mit einer Dauer von mindestens vier Sekunden voraus und werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Wie schon im vorherigen Kapitel beschrieben, werden hier reale Schaltergeräusche mit einer Gesamtdauer zwischen 40 ms und 70 ms untersucht. **Abbildung 3.3.3** zeigt den Zeitverlauf und die daraus abgeleitete Frequenzanalyse eines aufgenommenen Schaltergeräuschs. Die Schallaufnahmen wurden mit Kunstkopf frontal in einem Abstand von 30 cm, mit einer Abtastfrequenz von 44 KHz und einer Bitrate von 16 Bit durchgeführt. Die nachträgliche Bearbeitung und Variation der extrahierten Merkmale wurde mithilfe der Software ArtemiS Version 7.0 durchgeführt. Dabei wurden in ArtemiS zur Verfügung stehende Analysemethoden und Filterfunktionen benutzt.

Für die Untersuchung der psychoakustischen Kenngröße „Tonhöhe“ wurde der physikalische Parameter „Peakfrequenz“ verwendet, der die Frequenz darstellt, bei der die maximale Schallenergie übertragen wird. Für die Untersuchung der Klangfarbe wurde die psychoakustische Kenngröße „Schärfe“ eingesetzt. Die Variation der Schärfe, die als das Verhältnis vom Anteil der tiefen Frequenzen zum Anteil der hohen Frequenzen definiert ist, wurde ebenfalls mithilfe der Software ArtemiS durchgeführt. Dabei kam eine Funktion zum Einsatz, mit der die Anteile der tiefen und der hohen Frequenzen unter der Prämisse der Beibehaltung der gesamten Schallenergie geändert werden konnten. Als Referenzpunkt für die Bildung des Verhältnisses wurde stets die Frequenz des Peaks ausgewählt.

Anhang C beinhaltet eine Zusammenfassung der physikalischen Eigenschaften der im Hauptversuch untersuchten Schaltergeräusche.

Experimenteller Teil – Merkmalsextraktion

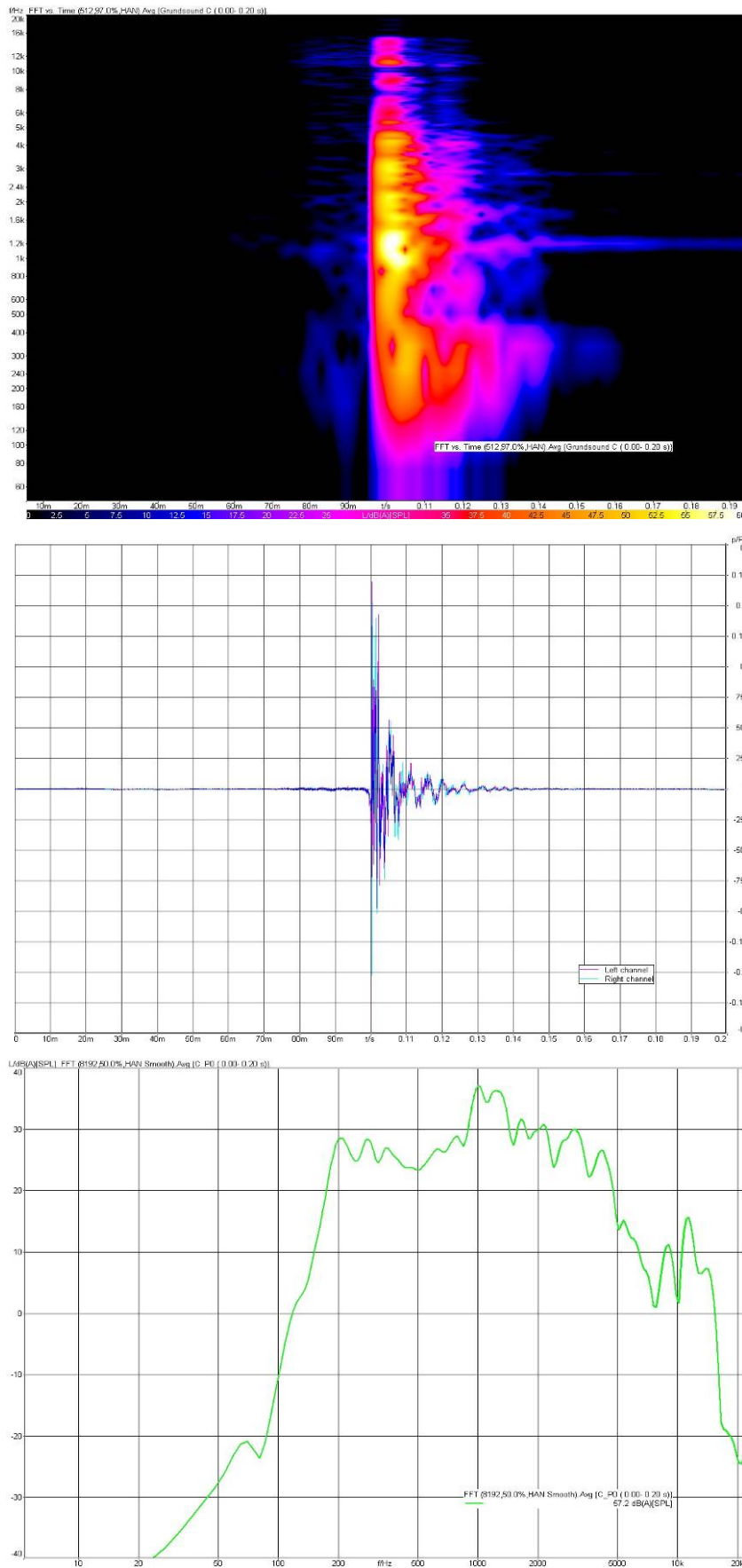


Abbildung 3.3.3: Zeitverlauf (Mitte) und Frequenzanalyse (unten) eines Schaltergeräusches.

3.4 Versuchsdesign und Versuchsdurchführung

3.4.1 Planung und Vorbereitung

Auswahl der Untersuchungsmethode

Der Hauptversuch der vorliegenden Arbeit fand unter Laborbedingungen statt und wurde in vier Teilversuche aufgeteilt, die weiter unten ausführlich beschrieben werden. Das Experiment im Labor und nicht im Feld durchzuführen war durch die Notwendigkeit begründet, den subjektiven Eindruck der Probanden ohne den unerwünschten Fremdeinfluss der Umgebung zu ermitteln. Dieser Aspekt ist auch für die Durchführung der späteren Korrelation der empirischen Ergebnisse mit den physikalischen Merkmalen der Versuchsobjekte notwendig und wurde erreicht, indem der optische, der akustische und der haptische Sinneskanal während des Experimentes strikt voneinander getrennt gehalten wurden. So wurden z. B. alle Prototypen einer Untersuchungsgruppe mit gleicher Optik und/oder Oberfläche angefertigt. Außerdem wurde auch den ergonomischen Einflussgrößen wie Form, Größe, Greifart und Bedienposition in derselben Form Rechnung getragen. Die Versuchsobjekte besaßen ausnahmslos die gleiche Größe und Form und wurden von allen Probanden in derselben Position bedient.

Die Auswahl der Untersuchungsmethode wurde durch die Anforderungen und die Zielsetzung der Arbeit bestimmt. Während durch die Verwendung von Rankingskalen und Paarvergleich nur indirekt Erkenntnisse über die Größe der Unterschiede der einzelnen Stimuli gewonnen werden kann, können diese Informationen mithilfe von Ratingskalen auf direktem Weg gewonnen werden. Bei der Erstellung einer Ratingskala werden die Probanden dazu aufgefordert, die angebotenen Stimuli auf einer vorgegebenen Skala einzuordnen. Im Rahmen des Experiments wurde eine bipolare, siebenstufige Ratingskala verwendet (siehe **Abbildung 3.4.1**), die Werte von „sehr minderwertig“ bis „sehr hochwertig“ umfasste. Die Entscheidung für die Verwendung von verbalen und numerischen Ankern resultierte aus einem Vorschlag von [Rohrmann, 1978]. Nach Rohrmann sollen Skalen auf diese Weise sowohl metrischen Intentionen genügen als auch von den Versuchspersonen gut verstanden und gehandhabt werden können.

Eine bipolare Ratingskala einzusetzen bot sich insofern an, als bipolare Skalen gegenüber unipolaren den Vorteil haben, dass sich die beiden gegensätzlichen Begriffe

„sehr minderwertig“ und „sehr hochwertig“ gegenseitig definieren. Dies führt letztendlich zu einer erhöhten Präzision der Urteile.

sehr minderwertig	ziemlich minderwertig	eher minderwertig	weder noch	eher hochwertig	ziemlich hochwertig	sehr hochwertig
-3	-2	-1	0	1	2	3

Abbildung 3.4.1: Bipolare siebenstufige Beurteilungsskala

Weiterhin wurde die Anzahl der Stufen ungerade gehalten, da so eine neutrale Mittelkategorie gewünscht war, auf die der Proband im Zweifelsfall ausweichen konnte. Nach [Bortz, 2002] und [Krosnick, 1997] werden allgemein Ratingskalen mit einer Stufenanzahl von fünf bis sieben empfohlen.

Aufgrund der hohen Anzahl von Untersuchungsobjekten und der relativ großen Stichprobe wurde auf die ausschließliche Verwendung eines Dominanzpaarvergleichs als Testmethode verzichtet. Trotzdem wurden jedoch in einigen Teilversuchen partielle Ähnlichkeitspaarvergleiche durchgeführt. Ziel war es, Angaben über die auf ein bestimmtes Merkmal bezogene Ähnlichkeit von jeweils zwei Versuchsobjekten zu bekommen. Die so gesammelten Rohdaten wurden anschließend mithilfe der multidimensionalen Skalierung zur Ermittlung von Urteilsdimensionen, welche die untersuchten Objekte beschreiben, ausgewertet.

Aufgrund des spezifischen Versuchsaufbaus, der dem Versuchsleiter die Möglichkeit gab, während des Versuchs auf verbalem Weg direkt mit dem Probanden zu kommunizieren, konnte der Proband von der lästigen Aufgabe des Ausfüllens eines Fragebogens entbunden werden. Dies führte sowohl zu einer Aufmerksamkeitssteigerung bei der Erfüllung der Aufgabe als auch zu einer enormen Zeitersparnis. Der Proband musste dem Versuchsleiter lediglich seine Beurteilung verbal mitteilen; die Erfassung und Digitalisierung der Daten war Aufgabe des Versuchsleiters.

Auswahl der Variablen

Die einzelnen Variablen haben im Kontext der empirischen Untersuchungen unterschiedliche funktionale Bedeutungen, Veränderungen der abhängigen Variablen werden mit dem Einfluss der unabhängigen Variablen erklärt. Auf die Ziele der vorliegenden Arbeit übertragen, erschien es sinnvoll, das Wertigkeitsurteil als abhängige

Variable einzustufen. Die extrahierten physikalischen Beschreibungsmerkmale wurden dagegen als unabhängige Variablen definiert. Die Festlegung der Ausprägungen der unabhängigen Variablen folgte einerseits den Empfehlungen von [Enigk, 2005] und [Rosenberg, 2003], andererseits war sie auch durch die Grenzen der technischen Machbarkeit beeinflusst. Weiterhin ist aufgrund der komplexen Zusammenhänge und basierend auf den Voruntersuchungen zu erwarten, dass einige der soeben definierten unabhängigen Variablen auch die Funktion einer Moderatorvariable einnehmen werden und somit den Einfluss der unabhängigen auf die abhängigen Variablen verändern.

Als wichtige Störvariablen, deren Einfluss in dieser Arbeit nicht erfasst werden konnte, sind die kognitiven Leistungen der Urteilenden in Verbindung mit ihrer allgemeinen Lebenserfahrung zu nennen. Auch die expliziten und impliziten Gedächtnisleistungen der Probanden, die einen wesentlichen Einfluss auf die taktilmotorische Informationsverarbeitung und somit auf die Bildung eines ganzheitlichen Urteils haben [Wagner, 1991], konnten nicht erfasst werden.

Auswahl der Stichprobe

Da das Experiment als Stichprobenerhebung konzipiert wurde, stellte sich als Erstes die Frage nach der Anzahl der am Experiment teilnehmenden Versuchspersonen. Die im Versuch gewonnenen Ergebnisse sollten später mit den definierten physikalischen Beschreibungsmerkmalen korreliert werden. Daher war es notwendig, aussagekräftige empirische Ergebnisse zu erzielen, die mithilfe einer Stichprobe von 60 Personen realisiert wurde. Bei der Auswahl der Stichprobe wurde darauf geachtet, dass ihre demografische Verteilung der Zielgruppe des Produktes entspricht. Dies führte zu einem Durchschnittsalter der Stichprobe von 50,8 Jahren. Der jüngste Proband war 22 Jahre, der älteste 72 Jahre alt. **Abbildung 3.4.2** gibt einen kurzen Überblick über die wichtigsten demografischen Merkmale der Stichprobe.

Um schleichende Reihenfolgeeffekte in der Beurteilung auszuschließen, wurde die Stichprobe in zwei Hauptgruppen unterteilt, bei denen die Reihenfolge der Teilversuche sowie die Reihenfolge der dargebotenen Prototypen in den einzelnen Teilversuchen geändert wurde.

Es wurden keine Probanden nachträglich aus der Stichprobe ausgeschlossen.

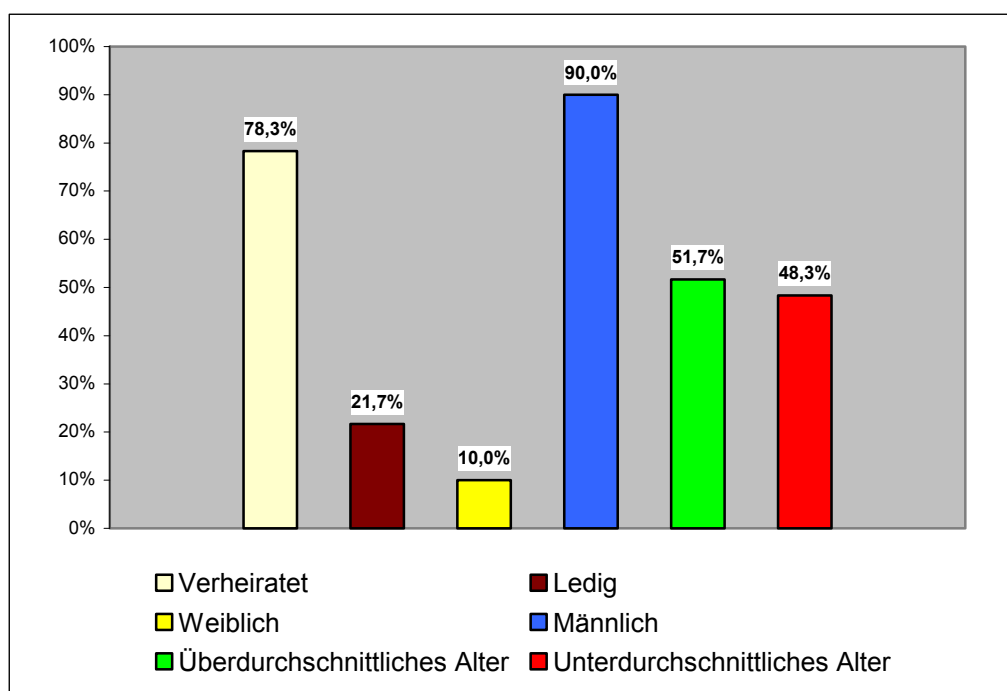


Abbildung 3.4.2: Allgemeine Beschreibung der Stichprobe.

Auswahl und Aufbereitung der Versuchsobjekte

Die untersuchten 37 Taster wurden in mehrere Versuchsträger integriert (siehe **Abbildung 3.4.3**), die anschließend in einem Versuchsbrett untergebracht wurden. Die Anordnung der Muster erfolgte zufällig, sodass sich die einzelnen Variationen eines physikalischen Parameters nicht in unmittelbarer Reihenfolge befanden. Dies machte es dem Urteilenden unmöglich, die Positionen der einzelnen Muster eines Parameters zu erkennen.

Die Variationen der einzelnen Parameter waren eigentlich so konzipiert, dass die einzelnen Parameter orthogonal zueinander waren. Dies war jedoch aufgrund der technischen Machbarkeit nicht immer möglich. Erwartungsgemäß führte dies zu partiellen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen physikalischen Merkmalen, die später mithilfe der statistischen Methoden aufgeklärt werden konnten (vgl. Kapitel 4.1).

Die genaue Beschreibung der physikalischen Merkmale der untersuchten Taster sowie deren Kraft-Weg-Diagramme sind in Anhang A zu finden.

Die Fertigung der 19 Drehschaltermuster gestaltete sich im Gegensatz zur Herstellung der Taster etwas unproblematischer. Die definierten Beschreibungsmerkmale konnten gezielter variiert und dabei noch eine relativ gute Orthogonalität zu den anderen Parametern erzielt werden. Dies begründete das weitere Vorgehen bei der Untersuchung der Drehschalter.



Abbildung 3.4.3: Versuchsträger für die Tasterprototypen.

Die Prototypen wurden in mehreren Versuchsträgern untergebracht, sodass alle Variationen eines messtechnischen Parameters in eine Versuchsbox eingebettet werden konnten (siehe **Abbildung 3.4.4**). Eine genaue Beschreibung der physikalischen Merkmale der untersuchten Drehschalter sowie deren Drehmoment-Drehwinkel-Diagramme befinden sich in Anhang B.

Wie oben bereits beschrieben, wurden die untersuchten Schaltergeräusche mithilfe eines Kunstkopfs aufgenommen. Dabei wurde aus einer Vielzahl von Samples in mehreren Iterationsschleifen eine Auswahl getroffen. Die Auswahl wurde von Experten durchgeführt. Aufgrund der hohen Variabilität in der Klangfarbe wurden drei Grundgeräusche ausgewählt, die sich im Grundcharakter deutlich voneinander unterscheiden und es so möglich machten, einen größeren Bereich von existierenden Schaltergeräuschen in den Untersuchungen zu berücksichtigen. Anschließend wurden die Grundgeräusche mithilfe der Software ArtemiS bearbeitet und auf ein gleiches Qualitätsniveau gebracht. Um eine bessere Orthogonalität der zu untersuchenden physikalischen Merkmale zu erzielen, wurden die Grundsounds sowie die daraus resultierenden Variationen auf dem gleichen

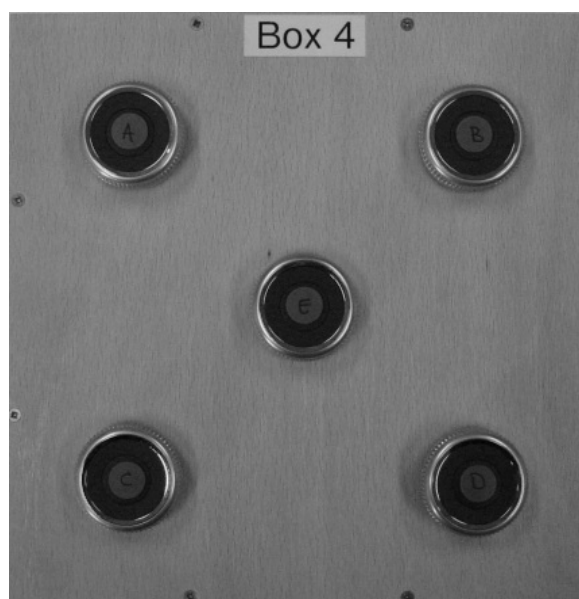


Abbildung 3.4.4: Anordnung der Prototypen in einer Versuchsbox.

Schalldruckpegel- bzw. Lautstärkeniveau normiert. Dieses Vorgehen machte es möglich, den Einfluss des Schalldruckpegels auf die anschließende Bewertung der Signale zu minimieren. Mithilfe des Programms ArtemiS wurden daraufhin unter Anwendung verschiedener Filterfunktionen und mithilfe der Methoden Pitch-Shifting und Spectral-Balance die gewünschten Tonhöhe- und Schärfevariationen realisiert. Dabei wurde erneut darauf geachtet, dass bei allen erzeugten Variationen die gesamte übertragene Schallenergie vor und nach der Manipulation beibehalten bleibt.

Eine detaillierte Beschreibung der physikalischen Beschreibungsmerkmale der im Versuch verwendeten Schaltergeräusche ist in Anhang C zu finden.

Auswahl der Analysesoftware

Für die Analyse der physikalischen Beschreibungsmerkmale von Tastern und Drehaltern wurde ein Softwarewerkzeug benötigt, das in der Lage ist, die mit dem Messrobotiksystem erfassten Messdaten zu analysieren und zu visualisieren. Erwartungsgemäß existierte auf dem Markt eine große Anzahl von Produkten, die auf den ersten Blick für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit anfallenden Aufgaben geeignet waren. Nach einer gründlichen Prüfung mehrerer Produkte konnte eine Software gefunden werden, die eine umfangreiche Datenanalyse und Datenvisualisierung in einer Anwendung kombiniert. Das Programm ORIGIN 7.5 der Fa. OriginLab Corporation ermöglichte es, wissenschaftliche Diagramme in Präsentationsqualität zu erstellen, und bot mithilfe der Programmiersprache C und weiterer numerischer Bibliotheken die Möglichkeit, durch eine automatisierte Auswertung eine enorme Zeitersparnis zu erzielen.

Für die Analyse der Schaltergeräusche wurde eine Signalanalysesoftware benötigt, mit der sich akustische Signale bearbeiten und untersuchen lassen. Um die Entscheidung für die letztlich verwendete Software stichhaltig begründen zu können, wurde erneut eine gründliche Prüfung der sich auf dem Markt befindlichen Produkte durchgeführt. Die Entscheidung fiel zugunsten des Programms ArtemiS der Fa. HEAD acoustics GmbH aus. Mithilfe dieser Anwendung konnten die aufgenommenen Schaltergeräusche bearbeitet, analysiert und visualisiert werden. Außerdem konnten die psychoakustischen Anwendungen des Softwarepaketes für eine erweiterte Analyse benutzt werden. Lediglich die Nachvollziehbarkeit der Berechnungsalgorithmen

für einzelne psychoakustische Parameter war nicht gegeben, da diese teilweise von der HEAD acoustics GmbH selbst entwickelt und somit geheim gehalten werden.

Für die Auswertung und Analyse der im Experiment gesammelten empirischen Daten wurde ein statistisches Softwarewerkzeug benötigt, das sowohl strukturentdeckende als auch strukturprüfende multivariate Analysemethoden in einer Anwendung miteinander vereint. Hierfür erschien das Programm SPSS der Fa. SPSS Inc. als am besten geeignet. Mithilfe von SPSS konnten die nötigen Regressions- und Varianzanalysen durchgeführt werden sowie auf der Grundlage der Faktorenanalyse die partiellen Zusammenhänge zwischen den untersuchten Variablen analysiert werden.

3.4.2 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Ermittlung der haptischen Präferenz von Tastern (erster Teilversuch)

Der erste Teilversuch fand in einem Schallmessraum statt, sodass eine ruhige Umgebung geschaffen werden und unerwünschte störende Fremdgeräusche ausgeschlossen werden konnten. Darüber hinaus wurden die jeweiligen Versuchsobjekte mit ein und derselben Optik versehen und auch die Bedienung der Taster war infolge der frontalen Anordnung nicht beeinflusst. Zur Trennung des akustischen Sinneskanals vom haptischen Sinneskanal wurde ein Kopfhörer benutzt, in dem ein Maskierungsgeräusch abgespielt wurde. Motiviert war dieses Vorgehen durch den Wunsch, die Eigengeräusche der Prototypen für den Probanden nicht hörbar zu machen. Die verbale Kommunikation mit dem Versuchsleiter, der sich außerhalb des Akustikraumes befand, lief über Mikrophone ab. In diesem Teilversuch wurden 37 Taster untersucht. Die Taster wurden als Prototypen im Musterbau hergestellt. Die Beurteilung durch die Probanden geschah nach einer Explorationsphase, in welcher dem Probanden die Möglichkeit gegeben wurde, die dargebotenen Taster kennenzulernen und einen impliziten Vergleich durchzuführen (siehe **Abbildung 3.4.5**). Dies wurde vom Versuchsleiter ausdrücklich eingefordert. Ansonsten wurde dem Probanden die Freiheit gewährt, die dargebotenen Taster mit beiden Händen so oft wie gewünscht zu betätigen.

In einem zweiten Schritt wurden die Versuchspersonen gebeten, aus allen 37 Tastern die drei besten und die drei schlechtesten auszuwählen und ihre Entscheidung dann verbal zu begründen. Bei der dritten und letzten Aufgabe im ersten Teilversuch wurde der Proband aufgefordert, aus allen Versuchsobjekten mindestens fünf Tasterpaare auszuwählen, die seiner Meinung nach eine sehr ähnliche haptische Wertigkeit aufweisen.



Abbildung 3.4.5: Versuchsaufbau des ersten und zweiten Teilversuches.

Wichtig ist an dieser Stelle noch zu erwähnen, dass die Taster frontal in einem Abstand von ca. 45 cm zur Beurteilung dargeboten wurden. Der Proband konnte sie mit

oder ohne Abstützen der Arme betätigen. Die mentale Vorstellung der Bedienung einer bestimmten Funktion wurde vom Probanden nicht gefordert.

Ermittlung der Korrelation Haptik/Akustik (zweiter Teilversuch)

Da die Gewichtung zweier Wahrnehmungen, nämlich der akustischen und der haptischen, im Rahmen der ganzheitlichen Beurteilung eines Tasters untersucht werden sollte, erforderte der zweite Teilversuch einen speziellen Versuchsaufbau. Das Erreichen der Untersuchungsziele wurde dadurch ermöglicht, dass drei Taster mit grundsätzlich verschiedenen Kraft-Weg-Verläufen mit drei unterschiedlichen Schaltergeräuschen kombiniert zur ganzheitlichen Bewertung dargeboten wurden. Um das Risiko eines technischen Ausfalls und des damit verbundenen Datenverlusts zu minimieren, fiel die Entscheidung auf eine redundante Absicherung. Hierzu wurden drei weitere Taster mit einem Kraft-Weg-Verlauf herausgesucht, der dem der ersten drei Taster ähnelte, und den Probanden zur Beurteilung angeboten (siehe **Abbildung 3.4.6**). Die minimalen Unterschiede im Kraft-Weg-Verlauf der Tasterpaare lagen dabei teilweise unter dem subjektiven haptischen Auflösungsvermögen der Probanden.

Das gleichzeitige Ansprechen des haptischen und des akustischen Sinneskanals des Probanden wurde mithilfe einer Quasi-Echtzeitcomputersimulation umgesetzt. Die sechs Taster wurden anschließend elektrisch mit einem Rechner verbunden. Der Einsatz einer speziellen Software machte es möglich, beim Betätigen eines bestimmten Tasters ein entsprechendes Schaltergeräusch über Kopfhörer abzuspielen.

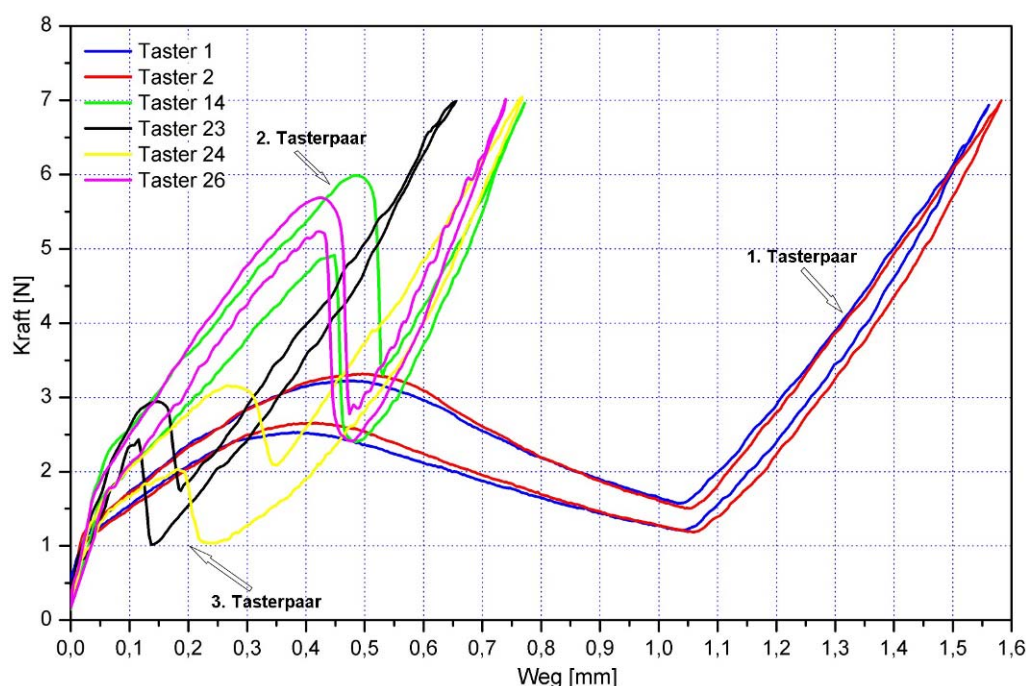


Abbildung 3.4.6: Kraft-Weg-Verläufe der ausgewählten Taster für den zweiten Teilversuch.

Die beim Abspielen des Schaltergeräusches erwartungsgemäß auftretende Zeitverzögerung konnte mithilfe des speziellen Versuchsaufbaus unter 20 ms gehalten werden, sodass sie von den Probanden subjektiv nicht wahrgenommen werden und ihr unerwünschter Einfluss auf die Bewertung eliminiert werden konnte. Die drei unterschiedlichen Haptiken wurden mit insgesamt 18 Schaltergeräuschen kombiniert, sodass jeder Taster in Kombination mit drei verschiedenen Sounds nacheinander ganzheitlich beurteilt werden konnte. Ähnlich wie beim ersten Teilversuch mussten die Probanden zunächst auf der Grundlage der oben beschriebenen Ratingskala eine allgemeine ganzheitliche Bewertung der jeweiligen Kombination aus Haptik und Geräusch abgeben. Danach wurden die Versuchspersonen gebeten, die beste und die schlechteste Kombination zu nennen und ihre Wahl anschließend verbal zu begründen.

Ermittlung der akustischen Präferenz von Schaltergeräuschen (dritter Teilversuch)

Der dritte Teilversuch wurde in demselben akustischen Raum durchgeführt wie die ersten beiden Teilversuche. Das Hauptziel des Versuches war die empirische Ermittlung einer akustischen Präferenz für die Schaltergeräusche. Das Experiment wurde als reiner Hörversuch konzipiert und umfasste die Beurteilung von 30 Schaltergeräuschen. Um den unbekanntem und zumeist unbewussten Einfluss der Haptik auf die Beurteilung der Geräusche zu vermeiden, wurde der Versuchsaufbau mithilfe eines Touchscreens realisiert (siehe **Abbildung 3.4.7**).

Auf dem Touchscreen wurden die Schaltergeräusche mithilfe einer simplen Animation anonym abgebildet. Das Auslösen der jeweiligen Schaltergeräusche wurde dem Probanden selbst überlassen. Die Wiedergabe des Geräusches wurde auch hier mithilfe eines Rechners und eines offenen, hochwertigen Kopfhörers realisiert. Diese Entscheidung basierte auf dem Wunsch, die akustische Wahrnehmung der Versuchsperson so natürlich wie möglich zu gestalten.



Abbildung 3.4.7: Versuchsaufbau des dritten Teilversuches.

Im Rahmen der ersten Aufgabe wurden die Schaltergeräusche erneut nach der siebenstufigen Ratingskala beurteilt. Dies geschah nach einer Explorationsphase, in der dem Probanden die Möglichkeit gegeben wurde, die dargebotenen Versuchsobjekte kennenzulernen und einen impliziten Vergleich durchzuführen. Nach einer ersten Beurteilung wurde die jeweilige Versuchsperson aufgefordert, eine Best-worst-Auswahl zu treffen. Auch in diesem Fall sollte die Entscheidung in der Folge verbal begründet werden.

Zur Bewertung standen sechs Gruppen von Schaltergeräuschen mit jeweils fünf Variationen zur Verfügung. Die Aufteilung der Schaltergeräusche und die gruppenweise Darbietung waren durch die Versuchsplanung bedingt. Sie entspricht der in der Planungsphase festgelegten Variation von zwei physikalischen Parametern der ausgewählten drei Grundsounds mit jeweils fünf Variationen.

Ermittlung der haptischen Präferenz von Drehschaltern (vierter Teilversuch)

Der letzte Teilversuch fand in der sogenannten „Sitzkiste“ statt. Die Sitzkiste stellt eine einfache Nachbildung eines Fahrerarbeitsplatzes dar (siehe **Abbildung 3.4.8**). Die Durchführung des Versuchs in der Sitzkiste sollte dem Probanden das Gefühl geben, eine erwartete und natürliche Bedienung eines Drehschalters in der Tunnelkonsole eines Fahrzeugs durchzuführen. Der Proband konnte die Drehschalter mit Abstützung des Arms betätigen, wobei eine mentale Vorstellung der Bedienung einer bestimmten Funktion nicht gefordert wurde.



Abbildung 3.4.8: Versuchsaufbau des vierten Teilversuches.

Um die Aufmerksamkeit des Probanden auf die zu beurteilende haptische Wertigkeit der Versuchsobjekte richten zu können,

wurde der akustische Sinneskanal mithilfe eines Maskierungsgeräusches ausgeschaltet. Die Wiedergabe des Maskierungsgeräusches erfolgte mithilfe eines hochwertigen Kopfhörers.

Zur Beurteilung wurden alle 19 in mehreren Versuchsboxen angeordneten Drehschalter dargeboten. Die Versuchsboxen wurden vom Versuchsleiter in die Bedienposition gebracht und wieder entfernt. Die Versuchsperson wurde zunächst gebeten, jeden der Prototypen nach der siebenstufigen Ratingskala zu beurteilen. Nach diesem Urteil musste der Proband erneut eine Best-worst-Auswahl treffen. Anschließend wurde ein vollständiger Ähnlichkeitspaarvergleich durchgeführt. Ähnlich wie bei den vorangegangenen Teilversuchen musste der Urteilende an dieser Stelle keinen lästigen Fragebogen ausfüllen, sondern konnte sich dem Versuchsleiter auf verbalem Weg verständigen, der seinerseits die Erfassung der Daten übernahm.

4 Ergebnisse

4.1 Haptische Wertanmutung von Tastern

4.1.1 Charakterisierung der Mittelwerte und Standardabweichungen

Nach der Datenerhebung im ersten Teilversuch (vgl. Kapitel 3.4.2, S. 81) wurden die Ratingskalabewertungen auf einer Skala von 0 bis 1 transformiert. Die Transformationsvorschrift lautete: $(\text{Ratingskalabewertung}+3)/6$. Im Anschluss an die Transformation wurde für jedes Versuchsobjekt über alle 60 Probanden das arithmetische Mittel gebildet. **Abbildung 4.1.1** zeigt die so gebildeten empirischen Mittelwerte, nach Größe sortiert. Weiterhin ist in der Abbildung die Standardabweichung für jeden Taster als grüner Balken dargestellt.

Im Allgemeinen lässt sich aus dem Diagramm ablesen, dass die Versuchsobjekte, in diesem Fall die 37 Taster, sehr gut differenziert werden konnten. Dies sollte zusätzlich durch die Durchführung eines Signifikanztests bestätigt werden, da ansonsten mit zufälligen stichprobenbedingten Schwankungen zu rechnen ist.

Weiterhin wird ersichtlich, dass eine kontinuierlich steigende Wertigkeit mit gleichzeitig abfallender Streuung vorhanden ist. Als am hochwertigsten wurden mit einer empirischen Bewertung von 0,67 bis 0,69 die Taster mit den Nummern 1, 2 und 3 eingeschätzt. Als am minderwertigsten wurde Taster 33 empfunden, dessen Beurteilung unter 0,1 lag. Ein kurzer Blick auf die physikalischen Eigenschaften der Taster 1 und 33 liefert bereits an dieser Stelle die Erkenntnis, dass die große Urteilsdifferenz von 0,6 mit deutlichen Unterschieden in den Kraft-Weg-Verläufen der Taster korreliert (siehe **Abbildung 4.1.2**).

Betrachtet man die absolute Höhe der Urteile, wird ersichtlich, dass sich die Urteile in den unteren zwei Dritteln der Skala befinden. So konnte für keinen Taster ein Mittelwert von über 0,7 ermittelt werden. Dies könnte zum einen bedeuten, dass sich trotz der großen Anzahl von Prototypen und trotz der damit verbundenen großen Variation von physikalischen Parametern unter den angebotenen Tastern keine optimale Lösung befand. Zum anderen könnte das Ergebnis als Hinweis darauf gewertet werden, dass die Probanden Schwierigkeiten hatten, mit dem Begriff „hochwertig“ adäquat umzugehen, und/oder dass kein linearer Zusammenhang zwischen Gefallen und Wertigkeit existiert.

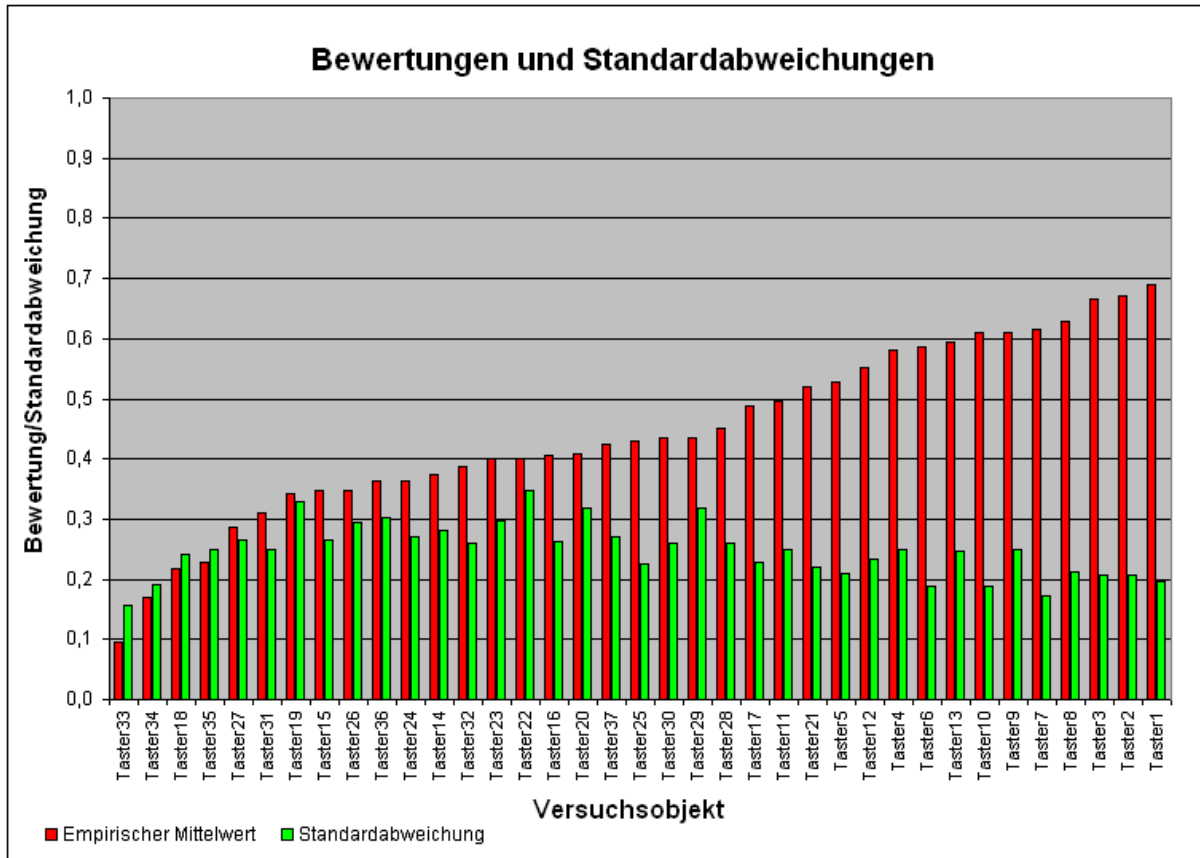


Abbildung 4.1.1: Bewertungen und Streuungen bei der Beurteilung der Tasten.

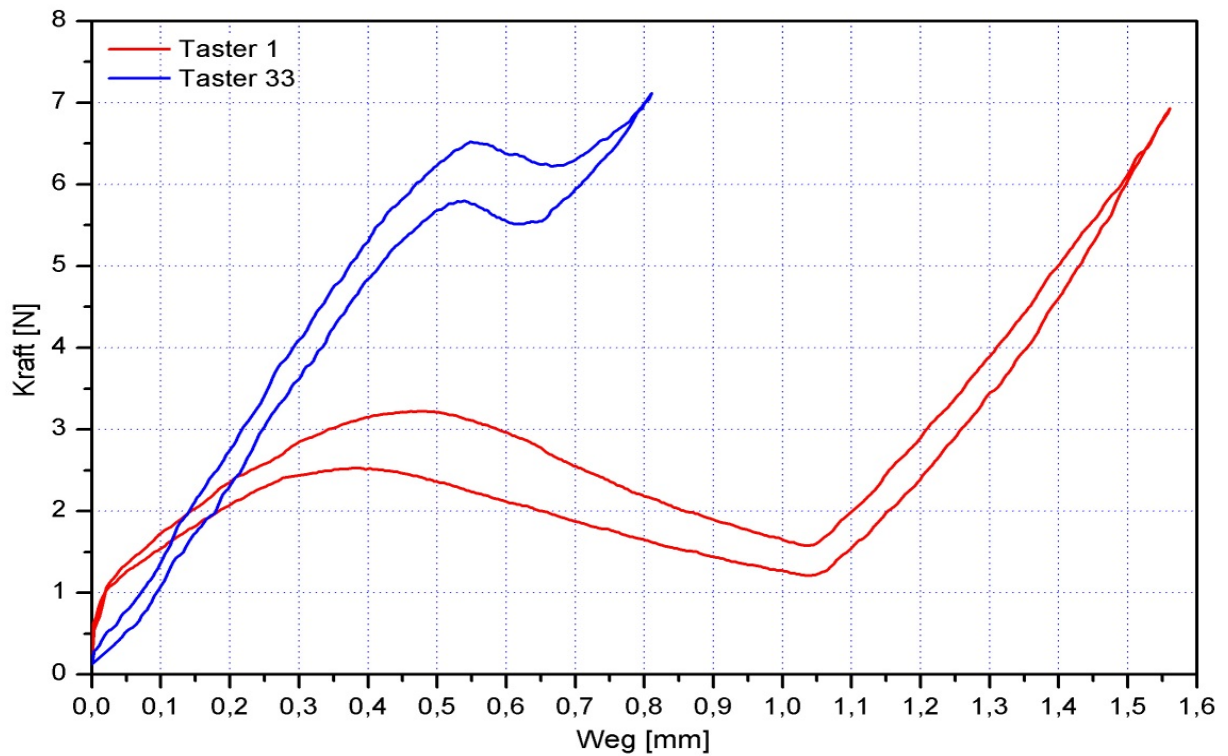


Abbildung 4.1.2: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe des hochwertigsten und des minderwertigsten Tasters.

Weiterhin zeigt der Verlauf der Urteilsstreuung mit zunehmender eingeschätzten Hochwertigkeit der Taster eine abfallende Tendenz. Ohne die weiteren Ergebnisse, z. B. die Korrelation zwischen Wertigkeits- und Gefallensurteil, die weiter unten beschrieben wird, zu berücksichtigen, konnte diese Tendenz dahingehend interpretiert werden, dass mit der steigenden Wertigkeit eines Tasters (ab Mittelwerten über 4,5) die Bereitschaft und die Fähigkeit des Probanden, den Taster als hochwertig wahrzunehmen und zu bezeichnen, ebenso ansteigt. Eine ähnliche, wenn auch abfallende Tendenz der Urteilsstreuung ist auch bei den minderwertigsten Mustern (ab Mittelwerten unter 0,35) zu beobachten.

Die Korrelation zwischen den Urteilen und deren Streuungen lässt sich am besten anhand eines Diagramms erkennen (siehe **Abbildung 4.1.3**). Die rote Trendlinie verdeutlicht erneut die zuvor beschriebene Tendenz der Streuung bei steigender bzw. fallender Bewertung. Im Scheitel der Trendkurve befindet sich eine Punktwolke, die gleichzeitig die größten Streuungen umfasst. Die Tatsache, dass sich die größte Urteilsstreuung in der Mitte des Wertungsbereichs befindet, kann wiederum auf zwei Arten interpretiert werden. Zum einen könnte die hohe Streuung ein Hinweis darauf sein, dass die entsprechenden Taster polarisieren und es durch die Bildung des arithmetischen Mittels zu einer mittleren Bewertung kommt. Zum anderen könnte die höhere Abweichung unter dem Aspekt betrachtet werden, dass die Probanden die betreffenden Muster nicht klar zuordnen konnten. Größere Klarheit in die Interpretation der betrachteten Korrelation könnte die Auswertung der gebildeten Präferenzindizes bringen.

Das relativ hohe Bestimmtheitsmaß von 0,57, das das Quadrat des pearsonschen Korrelationskoeffizienten zurückgibt, belegt eine gute Trendabbildung.

Übertragen auf die Aufgabe des Entwicklungsingenieurs, zeigen diese Ergebnisse, dass mithilfe einer aktiven Gestaltung der haptischen Rückmeldung eines Tasters eine breite Kundenakzeptanz erreicht werden kann. Weiterhin offenbart sich an den oben beschriebenen Ergebnissen die reale Gefahr, einen haptisch polarisierenden oder gar schlechten Taster zu entwickeln, wenn die haptische Gestaltung dem Zufall überlassen wird.

Die Beantwortung der zweiten und dritten Frage während des ersten Teilversuchs ermöglichte die Erhebung von empirischen Daten, mit deren Hilfe die in **Abbildung**

4.1.4 dargestellten Präferenzindizes gebildet wurden. Der Präferenzindex wurde als Differenz zwischen der Anzahl der positiven und der negativen Nennungen gebildet. Anschließend wurden die so gebildeten Indizes auf einer Skala von 0 bis 1 transformiert und normiert.

Die normierten Präferenzindizes zeigen im Bereich von ca. 0,45 bis ca. 0,55 einen waagerechten Verlauf. Dies deutet darauf hin, dass es Taster gibt, die die Probanden trotz verschiedener Wertigkeitsurteile gleichermaßen präferieren. Dies führt zu der Vermutung, dass kein linearer Zusammenhang zwischen dem Gefallensurteil und dem Verständnis für Wertigkeit bzw. Wertanmutung existiert. Diese Vermutung wird auch durch die Gegenüberstellung des Wertigkeitsurteils mit dem Präferenzindex bestätigt (siehe **Abbildung 4.1.5**). Anhand des Diagramms wird deutlich erkennbar, dass im unteren und im oberen Bewertungsbereich eine lineare positive Korrelation zwischen dem Wertigkeitsurteil und dem Gefallensurteil vorhanden ist. Dieser Zusammenhang wird zusätzlich durch die sinkende Streuung in diesen Bereichen verstärkt. Im mittleren Wertungsbereich dagegen ist der oben beschriebene Verlauf zu beobachten. Gleichzeitig steigt in diesem Bereich auch die Standardabweichung. Die relativ hohen Bestimmtheitsmaße bei der Standardabweichung ($R^2=0,66$) und bei dem Präferenzindex ($R^2=0,83$) deuten auf eine sehr gute Abbildung der Tendenz durch die Trendlinie hin. Wird die Korrelation zwischen Mittelwert und Präferenzindex auf Signifikanz hin untersucht, so ergibt sich eine auf dem Niveau von 0,01 zweiseitig höchst signifikante Korrelation (siehe **Abbildung 4.1.6**).

Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,44 zeigt sich die Korrelation zwischen dem Wertungsurteil und der Auswahlhäufigkeit der einzelnen Taster dagegen eher verhalten.

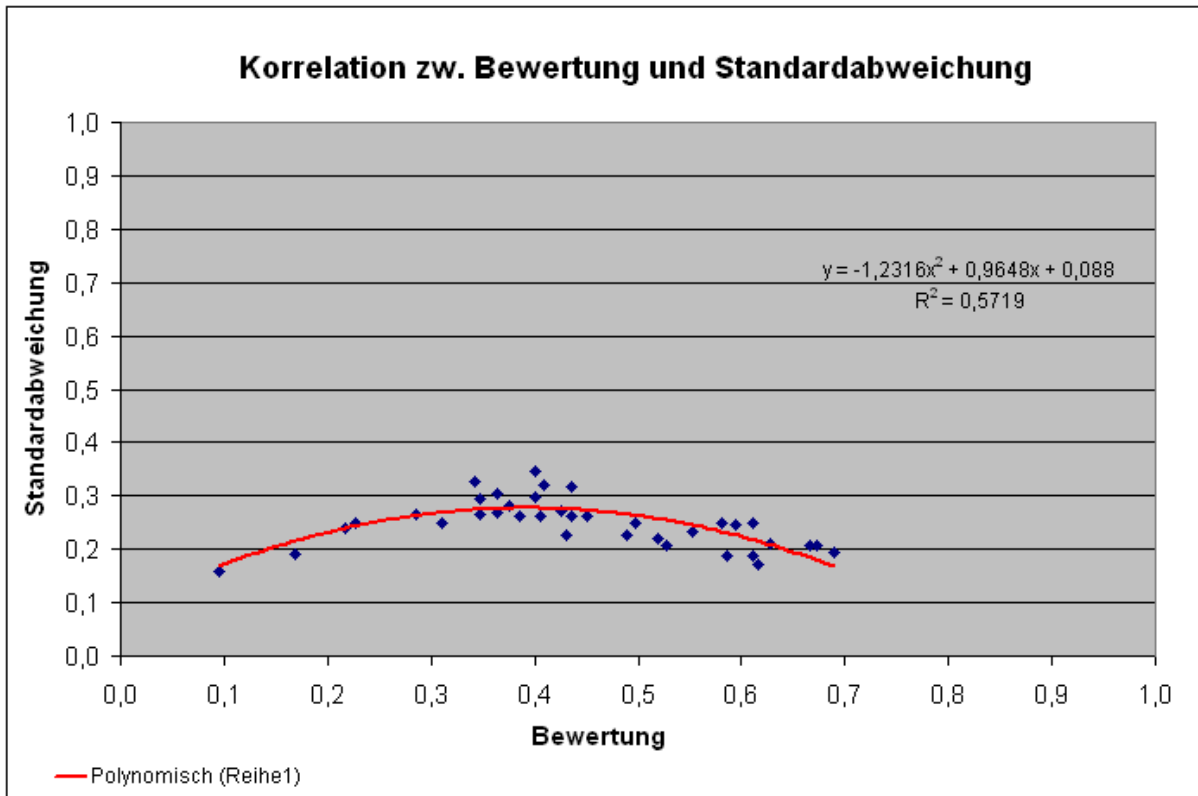


Abbildung 4.1.3: Korrelation zwischen Werturteil und Standardabweichung.

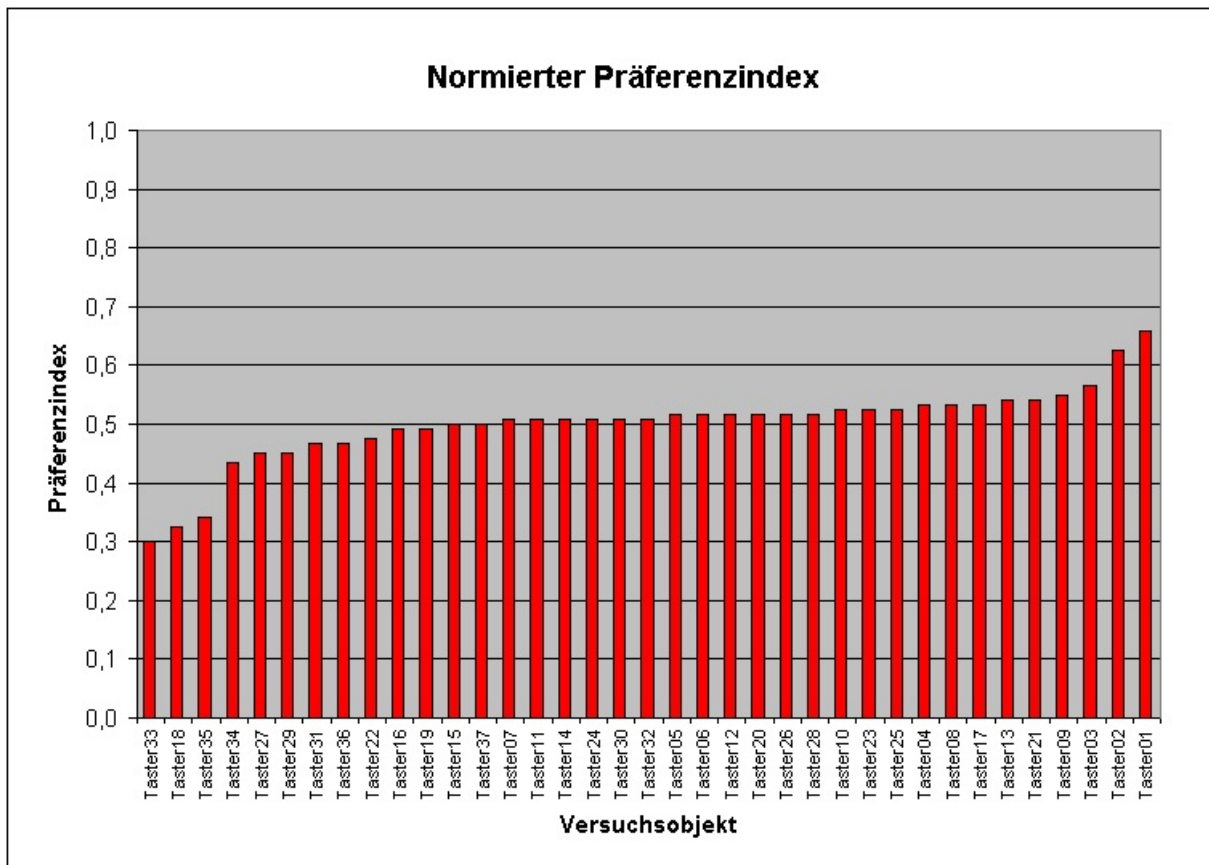


Abbildung 4.1.4: Übersicht über die normierten Präferenzindizes.

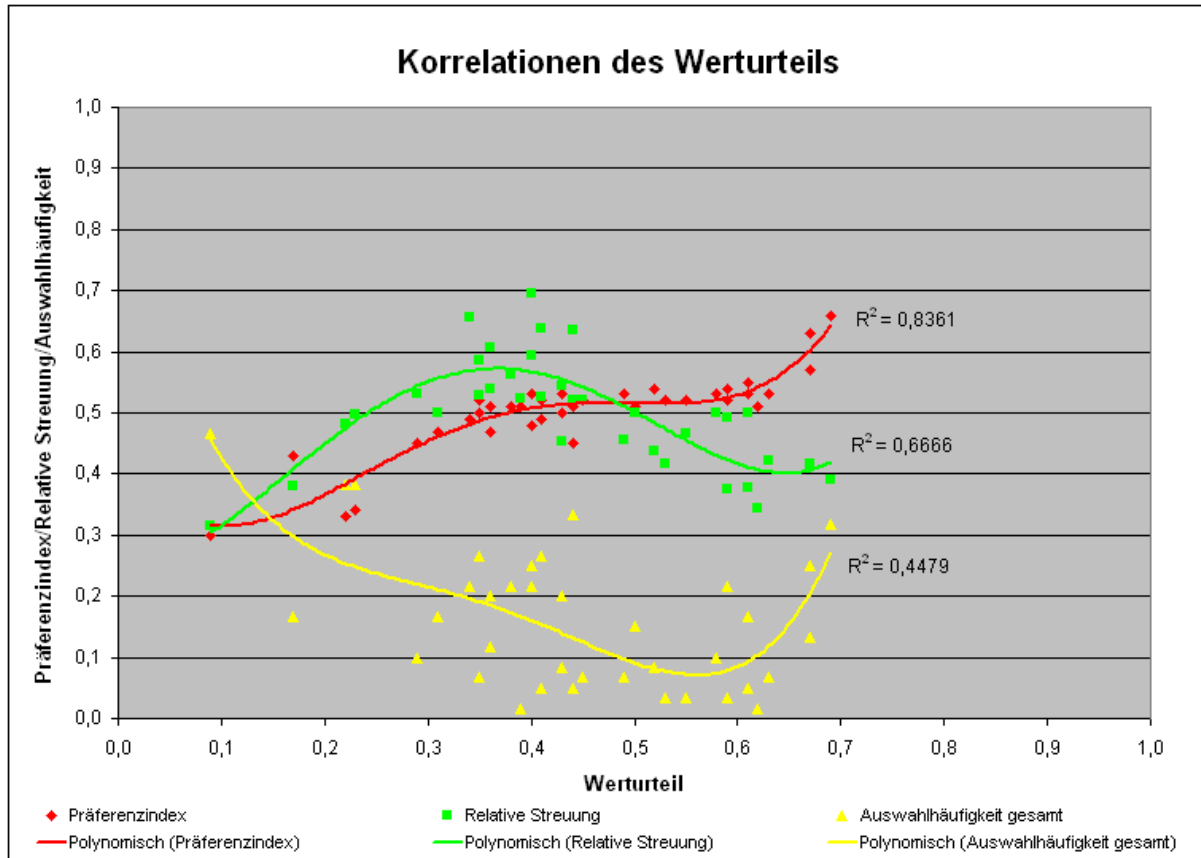


Abbildung 4.1.5: Wertungskorrelationen bei den Tastern.

Im Rahmen der dritten Aufgabe mussten die Probanden ihre Wahl des besten bzw. schlechtesten Tasters verbal begründen. Nach der Analyse und Systematisierung der empirischen Daten bildeten sich insgesamt sieben Kategorien aus, die in **Abbildung 4.1.7** dargestellt sind. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die klare haptische Rückmeldung über eine Funktionsauslösung das wichtigste Kriterium für die Kundenakzeptanz ist. Diese Kategorie erreichte eine Nennungshäufigkeit von über 65 %. Dieses Ergebnis erscheint vor dem Hintergrund einer bestimmten Erwartungshaltung aufseiten des Kunden durchaus plausibel. Als zweitwichtigster Grund für das (Nicht-)Gefallen eines Tasters wurde die Länge seines Schaltwegs genannt. Dabei zeigte sich, dass die Probanden zu den mittleren

		Wertung	PI
Wertung	Korrelation nach Pearson	1	,834**
	Signifikanz (2-seitig)		,000
	Quadratsummen und Kreuzprodukte	,768	,298
	Kovarianz	,021	,008
	N	37	37
	PI	Korrelation nach Pearson	,834**
Signifikanz (2-seitig)		,000	
Quadratsummen und Kreuzprodukte		,298	,167
Kovarianz		,008	,005
N		37	37

Abbildung 4.1.6: Korrelation zwischen Werturteil und Präferenzindex (PI).

Schaltwegen (von 1,00 mm bis 1,05 mm) tendieren. Dies könnte insofern mit der allgemeinen Lebenserfahrung der Probanden begründet werden, als der Mensch im Alltag vorwiegend mit mittleren bis großen Schaltwegen konfrontiert wird. Nicht erwartungskonform erwies sich hingegen die Einstufung des allgemeinen Kraftaufwands als drittwichtigster Grund. Erwartet worden war ursprünglich, dass der zur Betätigung benötigte Kraftaufwand ein wichtigerer Grund für die Akzeptanz ist als der Schaltweg. Die Wahrnehmung eines haptischen Druckpunktes zeigte jedoch keine große Relevanz hinsichtlich der Begründung der Auswahl. Als weniger wichtig erwiesen sich außerdem die mentalen Kategorien „hart/weich“, „angenehm/unangenehm“ und „leichtgängig/schwergängig“.

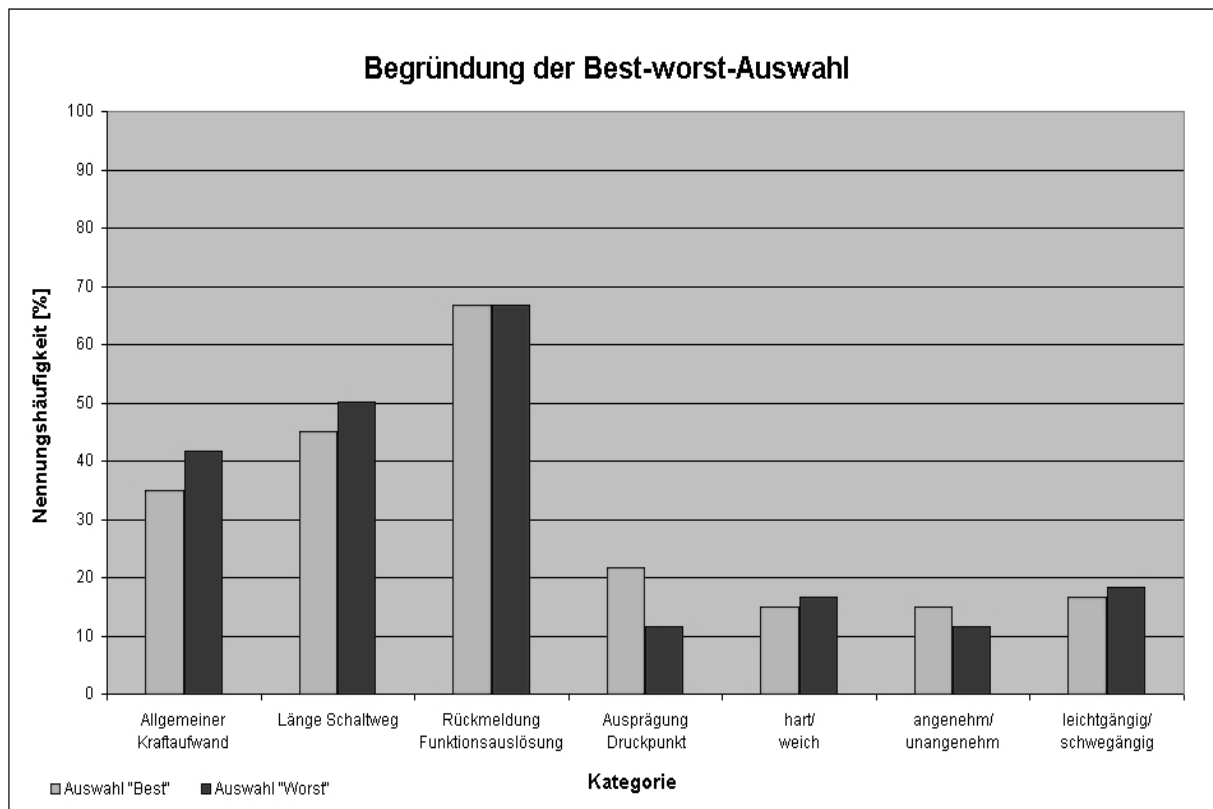


Abbildung 4.1.7: Kategorien zur Begründung der Best-worst-Auswahl.

4.1.2 Korrelationsanalysen

Mithilfe der statistischen Faktorenanalyse werden im Folgenden die Korrelationen zwischen den physikalischen Beschreibungsmerkmalen der Taster untersucht. Ziel ist es, aus den zahlreichen extrahierten physikalischen Parametern neue, sogenannte „latente“ Variablen – die Faktoren – zu generieren und dadurch eine Dimensionsreduktion der Daten zu erreichen. Dazu wird bei der Faktorenanalyse angenommen, dass die Faktoren als verborgene Konstrukte ursächlich für die Korrelationen zwischen den definierten Parametern verantwortlich sind [Geiser, 2003]. Durch die Dimensionsreduktion erzielt man Variablen, die unabhängig voneinander und somit orthogonal zueinander sind. Eine ausführliche Beschreibung der in dieser Arbeit verwendeten statistischen Methoden ist in Anhang E zu finden.

Für die Durchführung der Faktorenanalyse wurden 18 der extrahierten 22 physikalischen Beschreibungsmerkmale verwendet. Die restlichen vier Parameter wiesen keine ausreichende Varianz auf und wurden deshalb von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Als Faktorenanalysemethode wurde die voreingestellte Hauptkomponentenanalyse verwendet. Die Iterationsschritte wurden auf maximal 25 festgelegt und die Rotationsmethode auf Varimax mit Kaiser-Normalisierung eingestellt. Lediglich die Sortierung der Ladungen in der rotierten Komponentenmatrix wurde nicht standardmäßig belassen, sondern so eingestellt, dass Ladungen unter 0,300 ausgeblendet wurden. Dadurch wird eine bessere Übersichtlichkeit der Ladungen der einzelnen Faktoren erreicht.

Die erklärte Gesamtvarianz der 18 physikalischen Beschreibungsmerkmale erreichte einen sehr hohen Wert von über 98 % und wurde durch die Bildung von sechs Faktoren realisiert. Aus **Tabelle 4.1.1** wird ersichtlich, dass das Ladungsmuster eine relativ einfache, erkennbare Struktur aufweist. Das eindeutige Ladungsmuster machte deutlich, dass eine Sechs-Faktoren-Lösung zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den ausgewählten 18 manifesten Parametern angemessen ist. Sieben unabhängige Variablen laden auf den ersten Faktor hoch. Auf den zweiten Faktor laden vier Variablen hoch. Je zwei Variablen laden auf den dritten, vierten und fünften Faktor hoch; nur eine einzige Variable lädt auf den letzten, sechsten Faktor hoch. Im Rahmen der inhaltlichen Interpretation der Faktorenladungen gilt nach [Geiser, 2003] die Faustregel, dass Ladungen erst ab 0,700 als besonders hohe Ladungen zu inter-

pretieren sind. Dies führt dazu, dass die Doppelladungen in den Faktoren 1, 3, 4 und 6 vernachlässigt werden können. Auffällig ist vor allem Faktor 6, der aus einer einzigen unabhängigen Variable gebildet wird.

Einen besonders großen Einfluss auf die berechneten Faktoren haben Variablen mit einer Ladung von über 0,9. Dies ist bei

- Faktor 1: Snapweg und Sprungweg,
- Faktor 2: P7-Kraft (Rücksprungskraft),
- Faktor 3: Vorlaufweg und Leerlaufweg,
- Faktor 5: Differenzkraft_{MAX},
- Faktor 6: Kraftabfall

der Fall. Nach der erreichten Dimensionsreduktion bietet sich nun die Möglichkeit der Durchführung einer Regressionsanalyse mit den gespeicherten Faktorenwerten. Ziel ist es, mithilfe der linearen Regressionsanalyse den Einfluss der unabhängigen Faktoren auf die abhängige Variable „Bewertung“ hin zu untersuchen. Sowohl das Wertungsurteil als auch die Faktoren sind in diesem Fall metri-

Parameter	Komponente (Faktor)					
	1	2	3	4	5	6
Snapweg	,956					
Sprungweg	,936					
Rücksprungweg	,895					
Snap sprung	,884			,358		
P6-Weg	,831		,494			
P2-Weg	,826		,522			
P4-Weg	,773		,335	,443		
P7-Kraft		,922				
P1-Kraft		,892				
P6-Kraft		,790				-,430
P2-Kraft	-,327	,758				-,458
Vorlaufweg			,971			
Leerlaufweg			,949			
Rücklaufweg				,899		
Nachlaufweg	,303			,879		
Differenzkraft _{MAX}					,949	
Differenzkraft _{MIN}					,891	
Kraftabfall						,917

Tabelle 4.1.1: Rotierte Komponentenmatrix der Faktorenanalyse (Ladungen unter 0,300 ausgeblendet).

sche Variablen. Bei der Durchführung der Analyse wurden die Variablen gleichzeitig ins Regressionsmodell aufgenommen. Dieses Vorgehen machte es möglich, die Gütekriterien der einzelnen Variablen (Faktoren) selbst zu überprüfen und gegebenenfalls aus inhaltlichen Gründen auch solche Faktoren in das Modell aufzunehmen, die z. B. die Signifikanzkriterien eigentlich nicht erfüllen.

Bei gleichzeitiger Aufnahme aller unabhängigen Variablen in das Berechnungsmodell ergibt sich ein hoher R^2 von 0,614, welcher für über 61 % aufgeklärter Varianz mit den betrachteten Prädiktoren steht (siehe **Tabelle 4.1.2** und **Tabelle 4.1.3**). Der Dur-

bin-Watson-Koeffizient, der Aufschluss über die mögliche Autokorrelation der Residuen gibt, deutet mit einem Wert von 1,336 solche Autokorrelationen an. Diese Vermutung bestätigte sich anhand der im Anschluss durchgeführten Varianzanalyse ANOVA. In **Tabelle 4.1.4** ist zu sehen, dass von den 76,8 % der aufgeklärten Gesamtvarianz nur 47,2 % Varianzanteile auf das Regressionsmodell zurückzuführen sind. Die restlichen 29,6 %, die sogenannte „nicht erklärte“ Varianz, werden von den Residuen erzeugt.

Modell	R	R ²	Korrigiertes R ²	Standardfehler des Schätzers	Änderungsstatistiken					Durbin-Watson-Statistik
					Änderung in R ²	Änderung in F	df1	df2	Änderung in Signifikanz von F	
1	,784	,614	,537	,099399	,614	7,955	6	30	,000	1,336

Tabelle 4.1.2: Modellzusammenfassung der Regressionsanalyse.

Modell	Nicht standard. Koeffizienten		Standard. Koeffizienten			95 %-Konfidenzintervall für B		Korrelationen			Kollinearitätsstatistik	
	B	Standardfehler	Beta	T	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze	Nullter Ordnung	Partiell	Teil	Toleranz	VIF
1 (Konstante)	,445	,016		27,230	,000	,412	,478					
Faktor 1	,059	,017	,403	3,550	,001	,025	,093	,403	,544	,403	1,000	1,000
Faktor 2	-,045	,017	-,311	-2,743	,010	-,079	-,012	-,311	-,448	-,311	1,000	1,000
Faktor 3	,002	,017	,016	,137	,892	-,032	,036	,016	,025	,016	1,000	1,000
Faktor 4	,042	,017	,285	2,509	,018	,008	,075	,285	,416	,285	1,000	1,000
Faktor 5	-,023	,017	-,160	-1,412	,168	-,057	,010	-,160	-,250	-,160	1,000	1,000
Faktor 6	,073	,017	,498	4,393	,000	,039	,107	,498	,626	,498	1,000	1,000

Tabelle 4.1.3: Berechnete Betagewichte der Regressionsanalyse.

Modell	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz	
1	Regression	,472	6	,079	7,955	,000(a)
	Residuen	,296	30	,010		
	Gesamt	,768	36			

Tabelle 4.1.4: Output der Varianzanalyse ANOVA.

Die Ergebnisse aus der anschließend durchgeführten einfachen Korrelationsanalyse sind in **Tabelle 4.1.5** dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Faktoren 3 und 5 sehr schwache Korrelationen mit der Bewertung aufweisen, die außerdem auch nicht signifikant sind. Den größten positiven Zusammenhang mit der Bewertung weist Faktor 6 auf, der auch durch eine Signifikanz auf dem Niveau von 0,01 bestätigt wird. Ei-

ne negative signifikante Korrelation mit der Bewertung, auf dem Niveau von 0,1, weist einzig Faktor 2 auf.

		Bewertung	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6
Korrelation nach Pearson	Bewertung	1,000	,403	-,311	,016	,285	-,160	,498
	Faktor 1	,403	1,000	,000	,000	,000	,000	,000
	Faktor 2	-,311	,000	1,000	,000	,000	,000	,000
	Faktor 3	,016	,000	,000	1,000	,000	,000	,000
	Faktor 4	,285	,000	,000	,000	1,000	,000	,000
	Faktor 5	-,160	,000	,000	,000	,000	1,000	,000
	Faktor 6	,498	,000	,000	,000	,000	,000	1,000
Signifikanz (einseitig)	Bewertung	.	,007	,030	,464	,044	,172	,001
	Faktor 1	,007	.	,500	,500	,500	,500	,500
	Faktor 2	,030	,500	.	,500	,500	,500	,500
	Faktor 3	,464	,500	,500	.	,500	,500	,500
	Faktor 4	,044	,500	,500	,500	.	,500	,500
	Faktor 5	,172	,500	,500	,500	,500	.	,500
	Faktor 6	,001	,500	,500	,500	,500	,500	.

Tabelle 4.1.5: Korrelationen und Signifikanzen der Faktoren.

4.1.3 Untersuchung hinsichtlich des Faktors „Alter“

Die Untersuchung möglicher Korrelationen zwischen dem Alter der Probanden und deren Bewertungen der Taster wurde von den in Kapitel 2.5 beschriebenen Forschungserkenntnissen angeregt. Hierzu wurden Korrelationen zwischen dem Alter des Probanden und seiner Bewertung für jeden Taster gebildet und in **Abbildung 4.1.8** dargestellt. Anhand des Diagramms ist zu erkennen, dass die Korrelation Werte innerhalb eines breiten Spektrums von -0,5 bis 0,4 annimmt. Die größte negative Korrelation besitzt Taster 24, die größte positive Taster 29. Die Bewertungen der Taster 5 und 7 weisen kaum eine Korrelation mit dem Alter des Probanden auf. Diese Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Korrelation zwischen Alter und Bewertung in einer komplexen Wechselwirkung mit weiteren, unbekanntem Faktoren steht. Die Suche nach möglichen Erklärungen für den spezifischen Verlauf der Korrelation konzentrierte sich dabei auf die extrahierten physikalischen Beschreibungsmerkmale. Starke Hinweise auf einen Einfluss auf die Korrelation ergaben sich schließlich beim Parameter „Gesamtweg“ (siehe **Abbildung 4.1.9**).

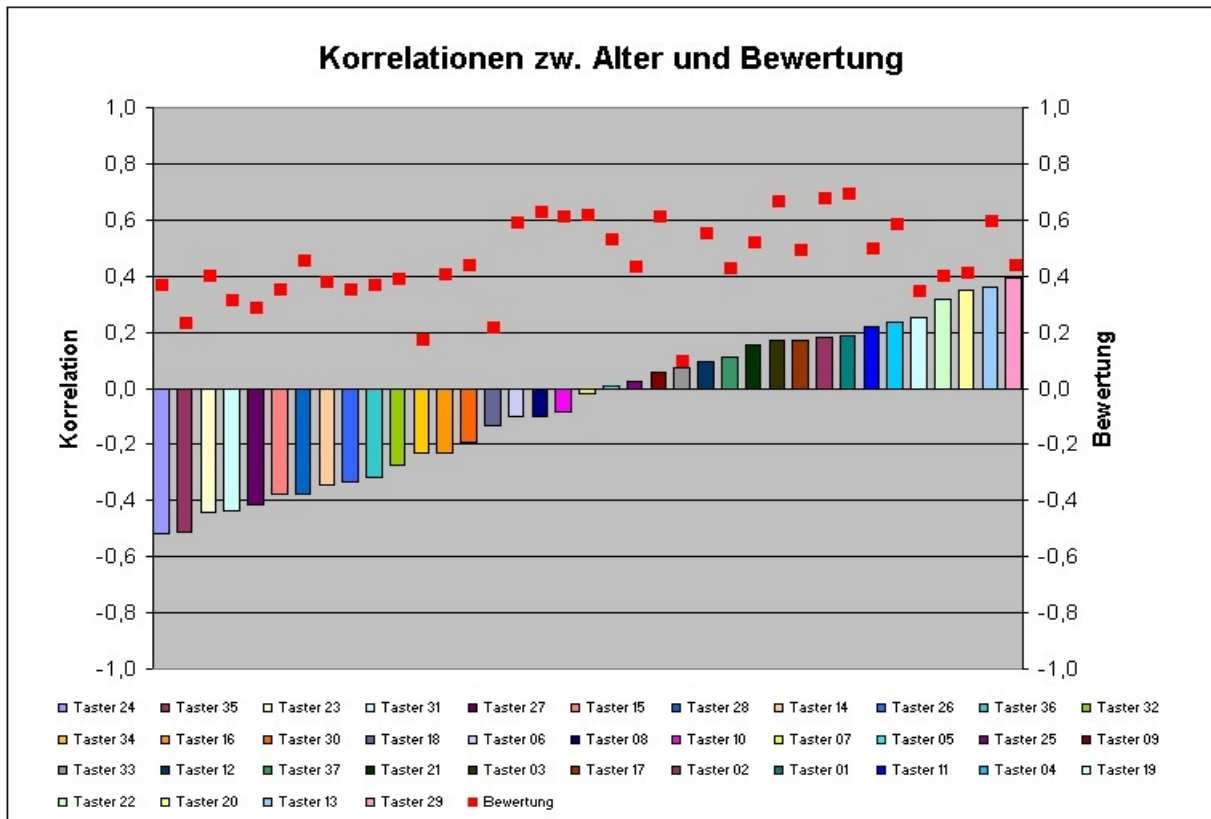


Abbildung 4.1.8: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung für alle Tasten.

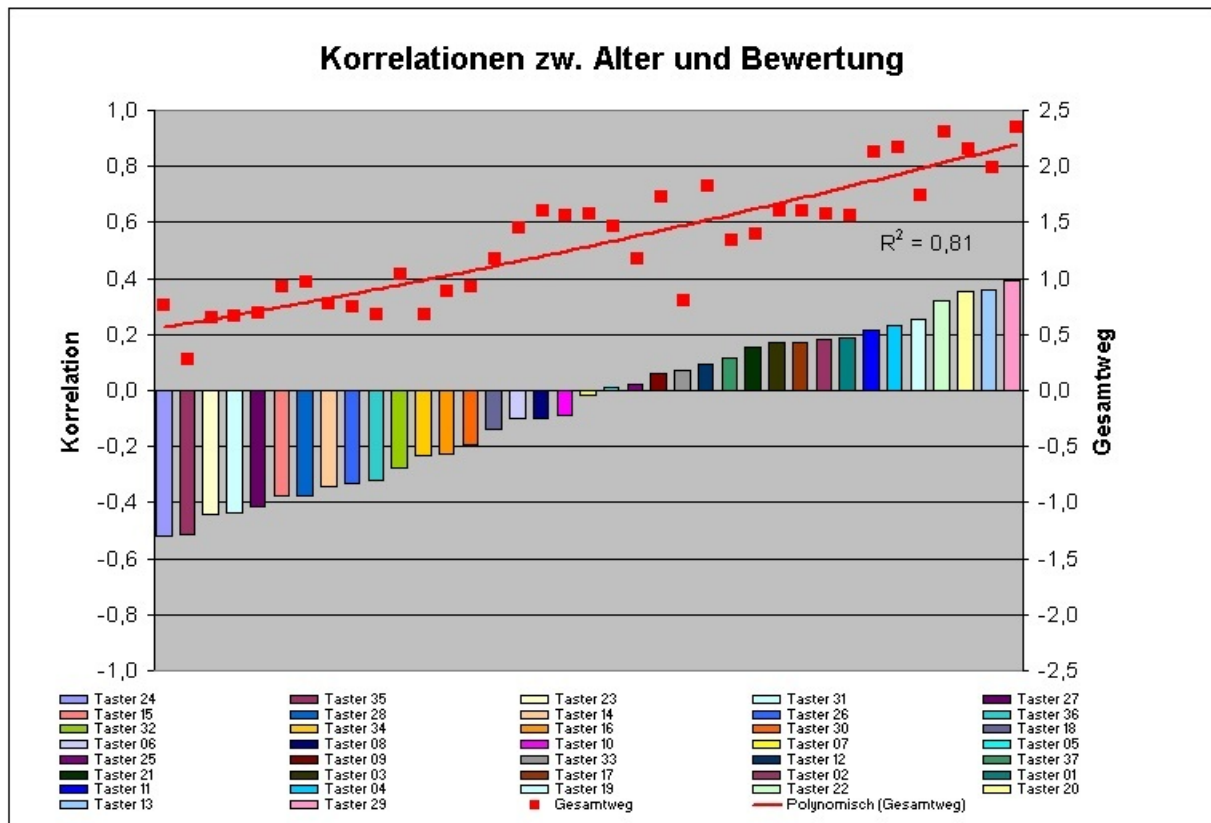


Abbildung 4.1.9: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung mit Bewertung des Gesamtwegs.

Die auf der sekundären Y-Achse aufgetragenen Werte für den Gesamtweg bilden einen Verlauf, der sehr gut mit dem der Korrelation übereinstimmt. Das hohe Bestimmtheitsmaß von über 0,8 bestätigt die Aussagekraft der Trendlinie. Werden die Kraft-Weg-Verläufe der markantesten Taster einander in einem Diagramm gegenübergestellt, so bestätigt sich die oben beschriebene Wechselwirkung (siehe **Abbildung 4.1.10**).

Die gewonnenen Ergebnisse lassen an dieser Stelle die Schlussfolgerung zu, dass jüngere Personen Taster mit einem kurzen Gesamtweg präferieren, während ältere Personen Taster mit einem langen Gesamtweg bevorzugen. Wichtig erscheint an dieser Stelle der Hinweis, dass es das erklärte Ziel eines Entwicklungsingenieurs sein muss, Taster zu entwickeln, die keine Korrelation mit dem Alter der Kunden aufweisen, um die Kundschaft nicht zu polarisieren. Als Beispiel für einen solchen Taster kann Taster 7 herangezogen werden. Dieser Taster weist kaum eine Korrelation zwischen dem Alter des Probanden und seiner Bewertung auf und besitzt eine relativ hohe Wertanmutung von über 0,6 (siehe Abbildung 4.1.8). Aus diesen Ergebnissen lassen sich nun konkrete Empfehlungen für die haptische Gestaltung von Tastern ableiten, die im nächsten Abschnitt zusammengefasst werden.

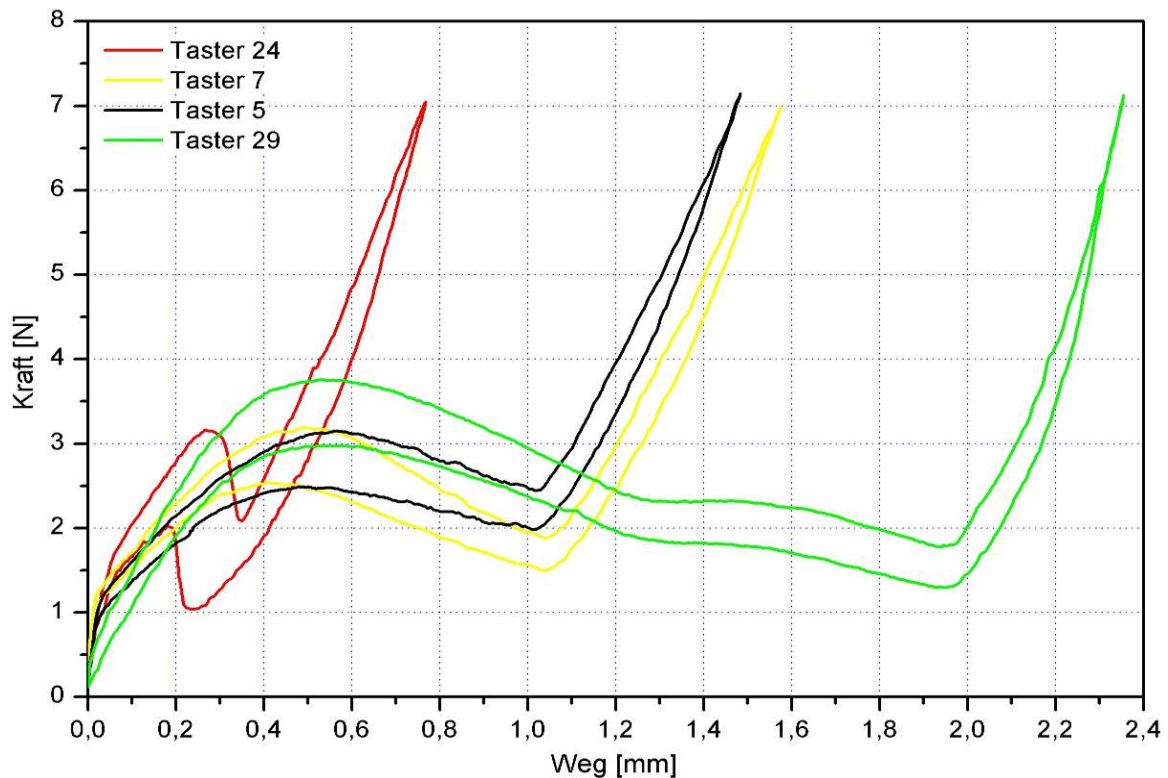


Abbildung 4.1.10: Vergleich der untersuchten Kraft-Weg-Verläufe.

4.2 Haptische Wertanmutung von Drehschaltern

4.2.1 Charakterisierung der Mittelwerte und Standardabweichungen

Die im vierten Teilversuch (vgl. Kapitel 3.4.2, S. 85) ermittelte Bewertung der unabhängigen Variable (UV) „Rastpositionenanzahl“ ist in **Abbildung 4.2.1** dargestellt. Die Drehschalter B und C mit einer Rastpositionenanzahl von 24 bzw. 36 erwiesen sich mit einer mittleren Beurteilung von 0,7 als die besten Muster. Den untersten Grenzfall stellt Drehschalter A mit 18 Rastpositionen dar. Er bekam einen mittleren Urteilswert von nur 0,35. Das Diagramm macht weiterhin deutlich, dass eine Erhöhung der Anzahl der Rastpositionen zu einer abfallenden Beurteilung führt. Aus der Verteilung der Standardabweichung wird ersichtlich, dass die am höchsten bewerteten Muster die niedrigste Streuung aufweisen. Dies erlaubt die Schlussfolgerung, dass mithilfe der dargebotenen fünf Variationen eine optimale Wertanmutung hinsichtlich der Rastpositionenanzahl, inklusive ihrer Unter- und Obergrenze, gefunden werden konnte.

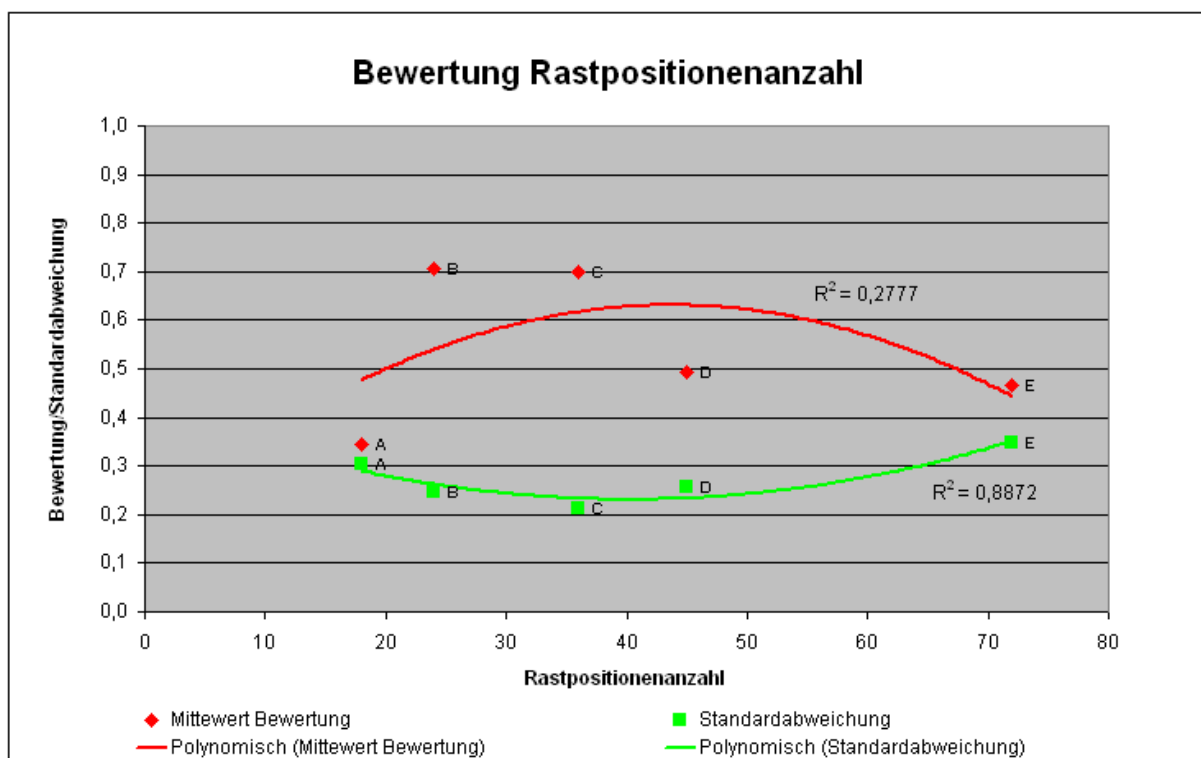


Abbildung 4.2.1: Bewertung der UV-Rastpositionenanzahl.

Um die oben dargestellten Bewertungen besser nachvollziehen zu können, lohnt es sich, einen Blick auf die Auswertung der abgegebenen Ähnlichkeitsurteile zu werfen (siehe **Abbildung 4.2.2**).

Anhand des Diagramms lässt sich klar erkennen, dass die einzelnen Muster von den Probanden relativ schlecht differenziert werden konnten. So konnten die Probanden z. B. bei den besten zwei Drehschaltern, Drehschalter B und C, die unterschiedlichen zwölf Rastpositionen (50 %) nicht wirklich deutlich wahrnehmen. Dieser Umstand spiegelt sich in dem relativ hohen Ähnlichkeitsgrad wider. Ähnlich große Mittelwerte erreichten auch die Vergleichspaare CD und DE mit neun bzw. 27 unterschiedlichen Rastpositionen. Auf die Frage nach den Korrelationen zwischen der Differenz der Rastpositionenanzahl zweier Drehschalter und ihrer subjektiven Unterscheidbarkeit durch den Probanden ergeben sich die in **Abbildung 4.2.3** dargestellten Ergebnisse. In der Abbildung ist der empirische Ähnlichkeitsgrad in Prozent als Funktion der Differenz der Rastpositionen abgebildet. Als zusätzlicher Parameter wurde das Ausgangsvergleichsniveau der Rastpositionen berücksichtigt, bei dem der Vergleich stattgefunden hat.

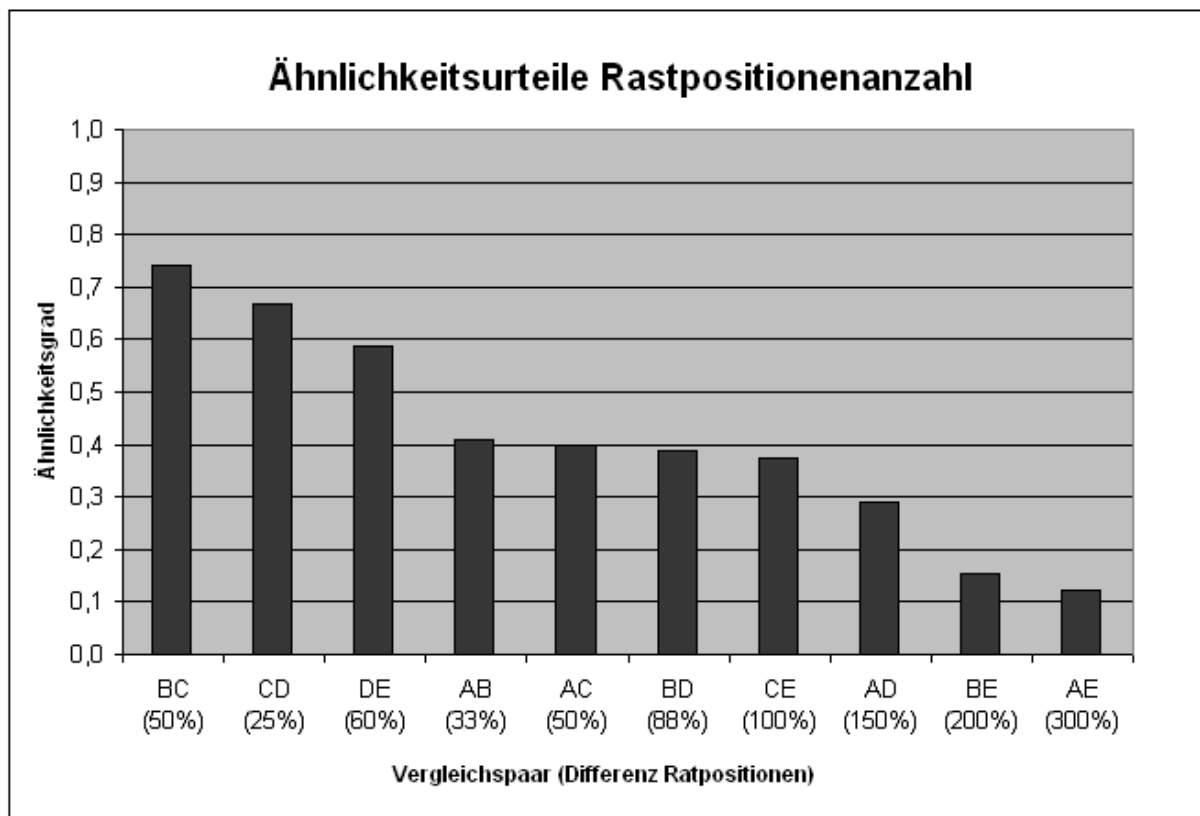


Abbildung 4.2.2: Ähnlichkeitsurteile im Hinblick auf den Parameter „Rastpositionenanzahl“.

Es zeigen sich drei verschiedene Tendenzen. Beim ersten Drehschalter A (gelbe Linie) mit einer Rastpositionenanzahl von 18 offenbarte sich eine deutliche Wahrnehmung der unterschiedlichen Anzahl von Rastpositionen (Ähnlichkeitsgrad kleiner als 0,4) erst ab einer Differenz von über 50 %. Beim zweiten Drehschalter B (rote Linie, 24 Rastpositionen) war die Rastpositionendifferenz erst ab einer Differenz von 85 % deutlich wahrzunehmen. Beim dritten Drehschalter C (grüne Linie, 36 Rastpositionen) betrug die subjektive Unterschiedsschwelle etwa 100 %.

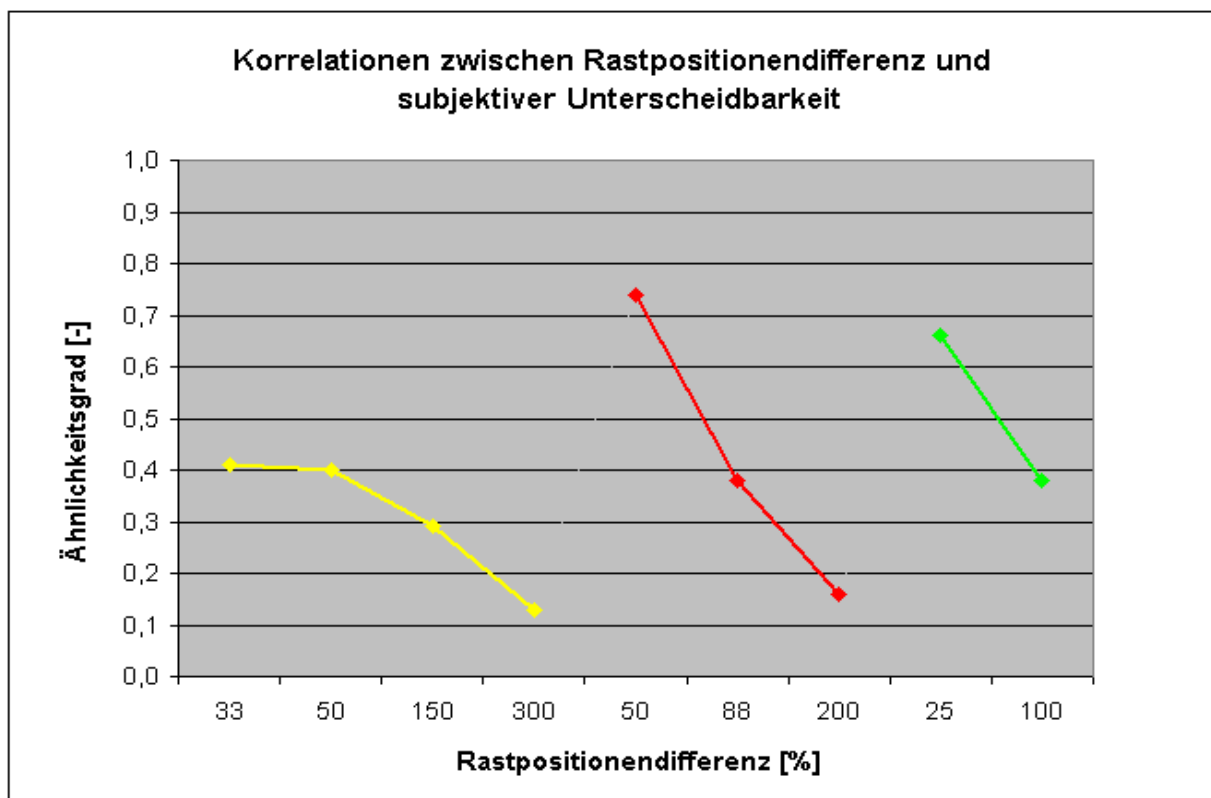


Abbildung 4.2.3: Korrelationen zwischen der Rastpositionendifferenz und der subjektiven Unterscheidbarkeit.

Die Beschreibung der eben genannten Erkenntnisse fand vor dem Hintergrund eines Bedienfeldes statt. So ist zu erwarten, dass die Auslegung von mehreren Drehschaltern innerhalb eines Bedienfeldes mit einer Rastpositionendifferenz, die über den ermittelten Unterscheidbarkeitsschwellen liegt, zu einer deutlichen Minderung der haptischen Wertanmutung und somit zu einer geringeren Kundenakzeptanz führen kann.

Bei der Auswertung des physikalischen Beschreibungsmerkmals „Drehmoment“ ergab sich eine ähnliche Verteilung der Bewertungen wie bei der unabhängigen Va-

riable „Rastpositionenanzahl“ (siehe **Abbildung 4.2.4**). Als bester Drehschalter erwies sich Drehschalter C mit einer Bewertung von knapp 0,7 und einem Drehmoment von 30 mNm. Der schlechteste Drehschalter D erreichte eine Bewertung von lediglich 0,31 und wies ein Drehmoment von knapp 60 mNm auf. Anhand der dargestellten Streuungstendenz lässt sich erneut darauf schließen, dass Drehschalter C mit seinem Betätigungs-drehmoment ein gewisses Optimum hinsichtlich der haptischen Wertigkeit darstellt.

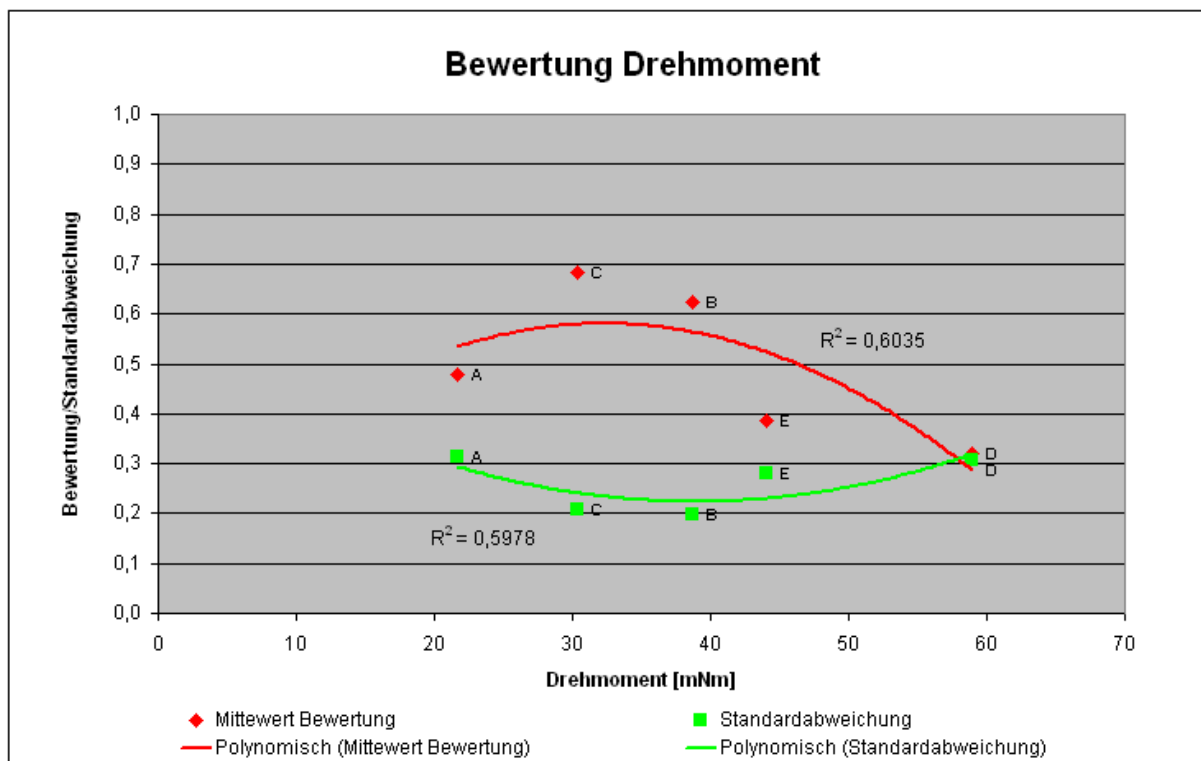


Abbildung 4.2.4: Bewertungen des Parameters „Drehmoment“.

Die Ergebnisse aus den durchgeführten vollständigen Ähnlichkeitspaarvergleichen sind **Abbildung 4.2.5** zu entnehmen. Sie zeigt, dass die Probanden den Parameter „Drehmoment“ insgesamt besser differenzieren als den Parameter „Rastpositionenanzahl“. Die hohen Ähnlichkeitsgradwerte für die Vergleichspaare BC, DE und AC lassen darauf schließen, dass die Probanden diese nicht deutlich differenzieren konnten. Betrachtet man an dieser Stelle die subjektive Unterscheidbarkeit der Muster, gelangt man zu den in **Abbildung 4.2.6** dargestellten Zusammenhängen. Diese Ergebnisse korrelieren sehr stark mit den im Zusammenhang mit dem Parameter „Rastpositionenanzahl“ beschriebenen Korrelationen.

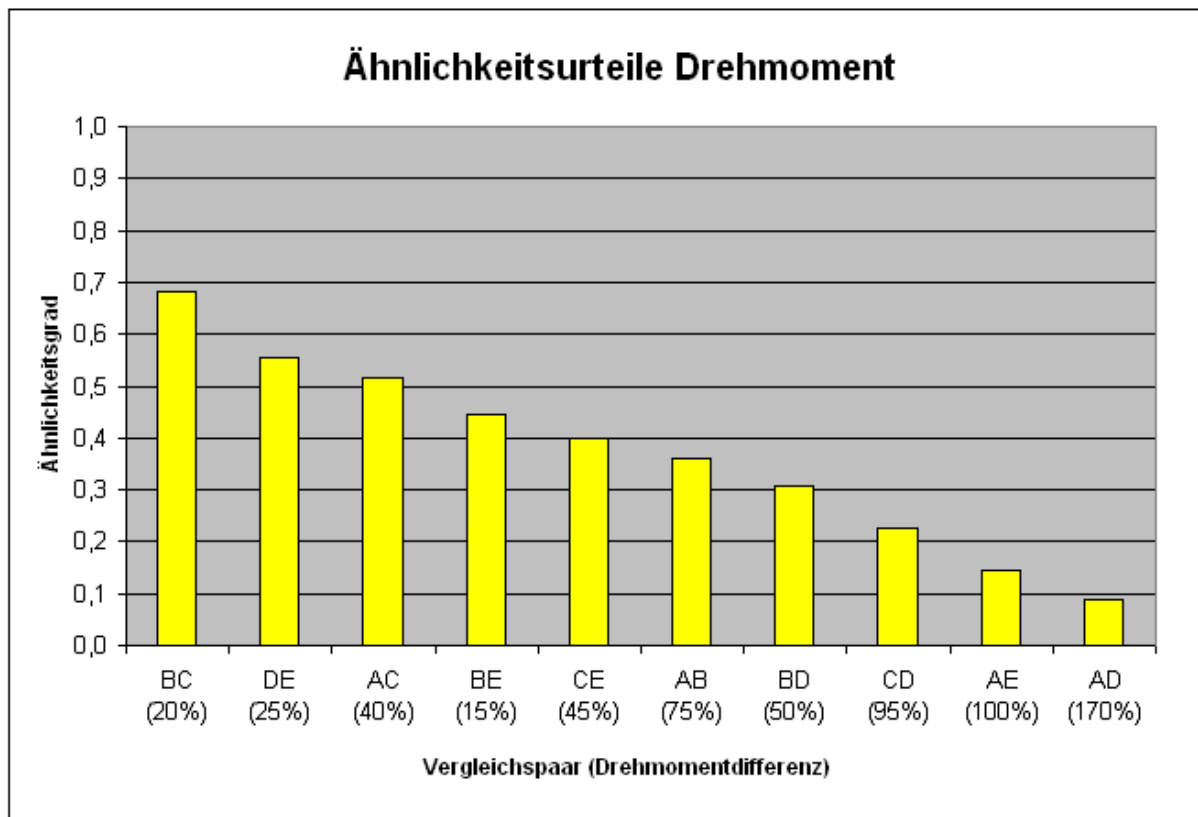


Abbildung 4.2.5: Ähnlichkeitsurteile hinsichtlich des Parameters „Drehmoment“.

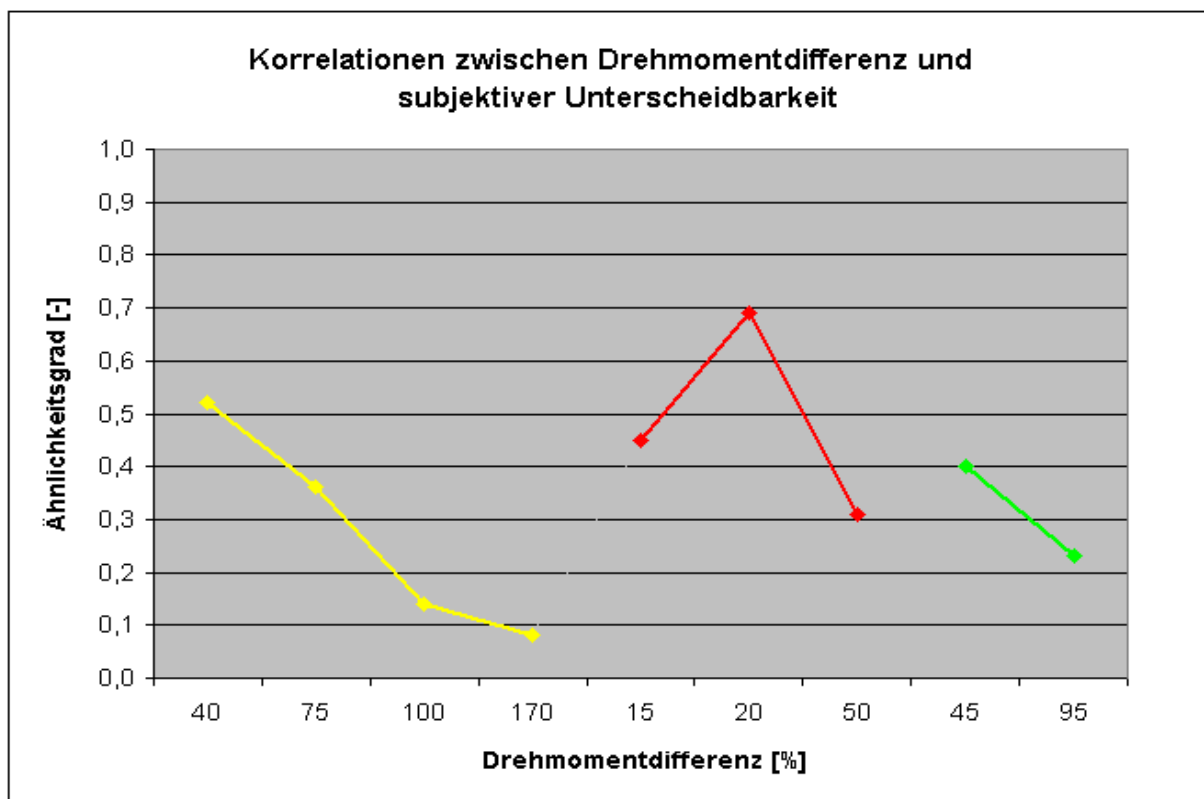


Abbildung 4.2.6: Korrelationen zwischen der Drehmomentdifferenz und der subjektiven Unterscheidbarkeit.

Die Verteilung der Bewertungen hinsichtlich des Parameters „Raddurchmesser“ ist in **Abbildung 4.2.7** dargestellt. Die höchste Akzeptanz fand in diesem Fall Drehschalter B mit einem Raddurchmesser von 44 mm und einem Mittelwert von 0,7. Darüber hinaus zeigte dieser Drehschalter die kleinste Streuung in Bezug auf die Werturteile. Anhand des Diagramms ist weiterhin zu erkennen, dass eine Erhöhung des Raddurchmessers, wie sie in der Automobilindustrie oftmals aus Designgründen durchgesetzt wird, zu einer steil abfallender Wertigkeit führt.

Die Ergebnisse des durchgeführten Ähnlichkeitspaarvergleichs sind **Abbildung 4.2.8** zu entnehmen. Eine gute subjektive haptische Unterscheidbarkeit, die in diesem Fall auch durch einen Ähnlichkeitswert unter 0,4 definiert wird, ergab sich bei einem auf der Basis eines Raddurchmessers von 31,5 mm (gelbe Linie) durchgeführten Vergleich erst ab einer Raddurchmesserdiffenz von ca. 90%. Ausgehend von einem Raddurchmesser von 44 mm (rote Linie) lag die Unterschiedsschwelle bei einer Differenz von ca. 70 %. Bei 57 mm Raddurchmesser (grüne Linie) war die Unterschiedsschwelle dagegen bei ca. 55 % anzusiedeln (siehe **Abbildung 4.2.9**). Diese Resultate sind als eindeutige Hinweise darauf zu werten, dass die subjektive Unterschiedsschwelle mit steigendem Raddurchmesser tendenziell abnimmt.

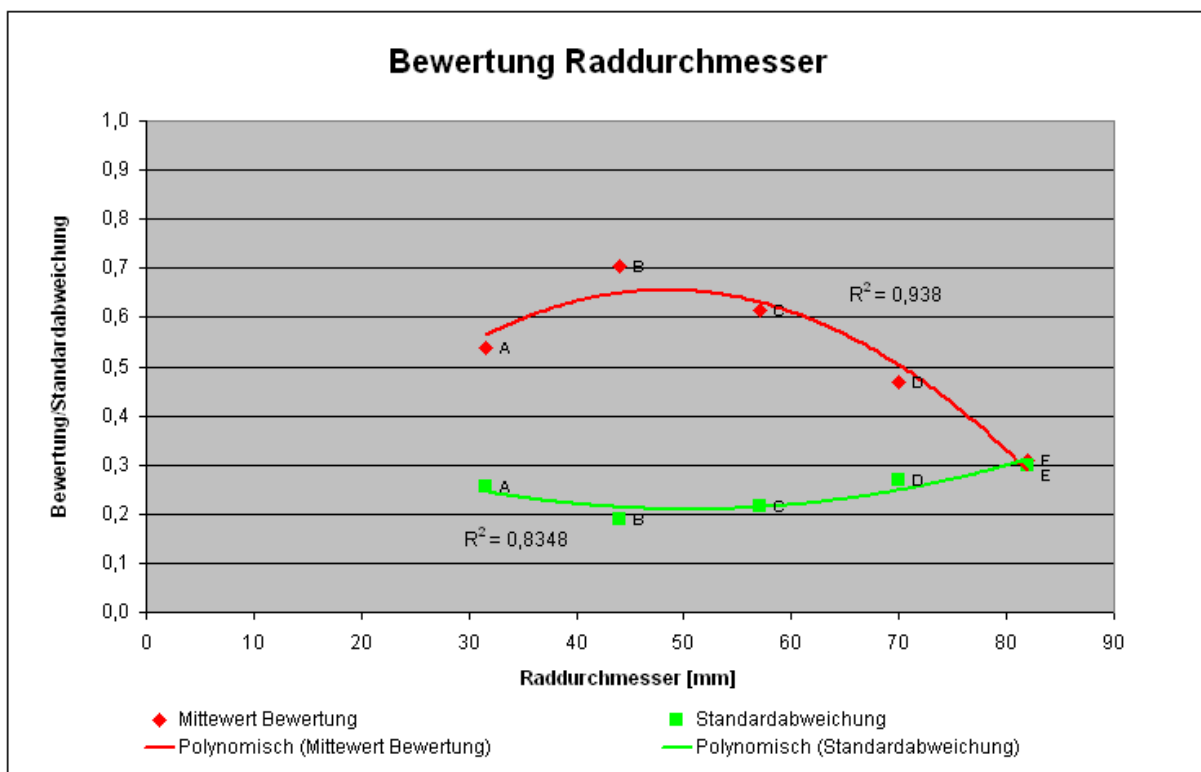


Abbildung 4.2.7: Bewertungen des Parameters „Raddurchmesser“.

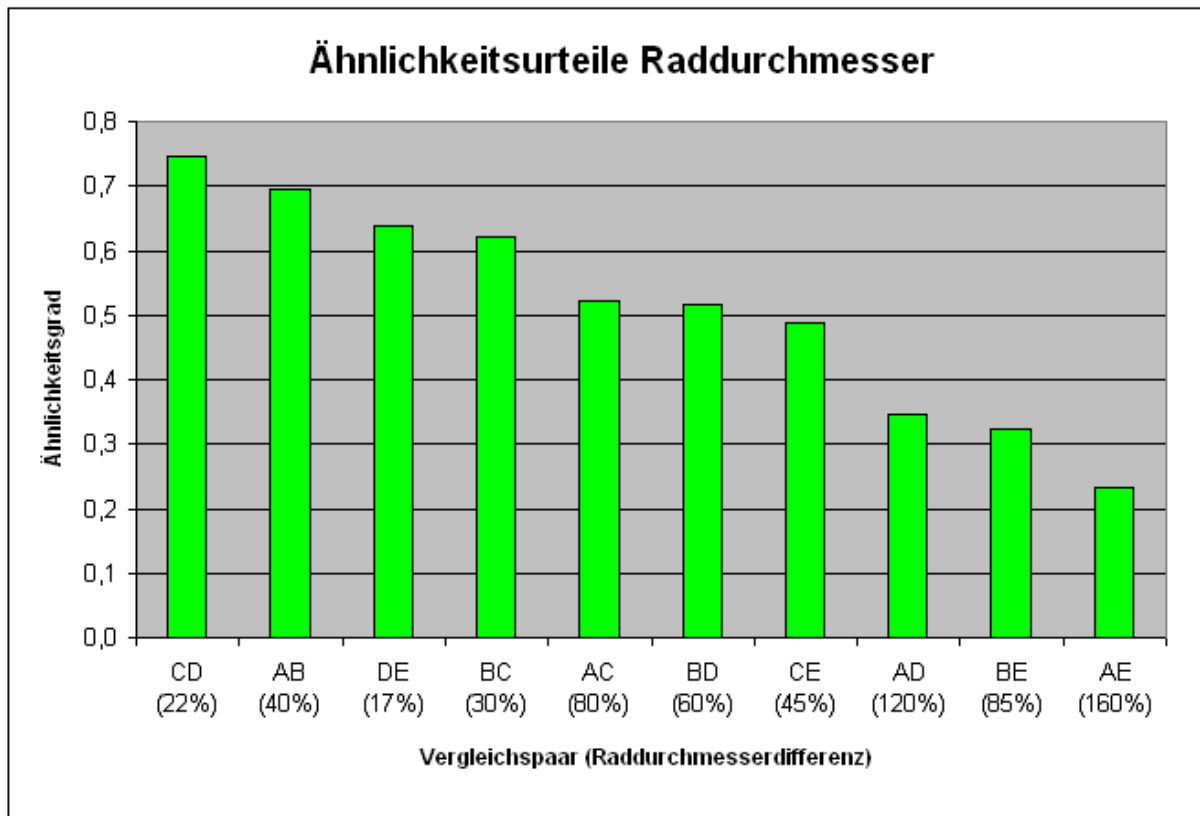


Abbildung 4.2.8: Ähnlichkeitsurteile hinsichtlich des Parameters „Raddurchmesser“.

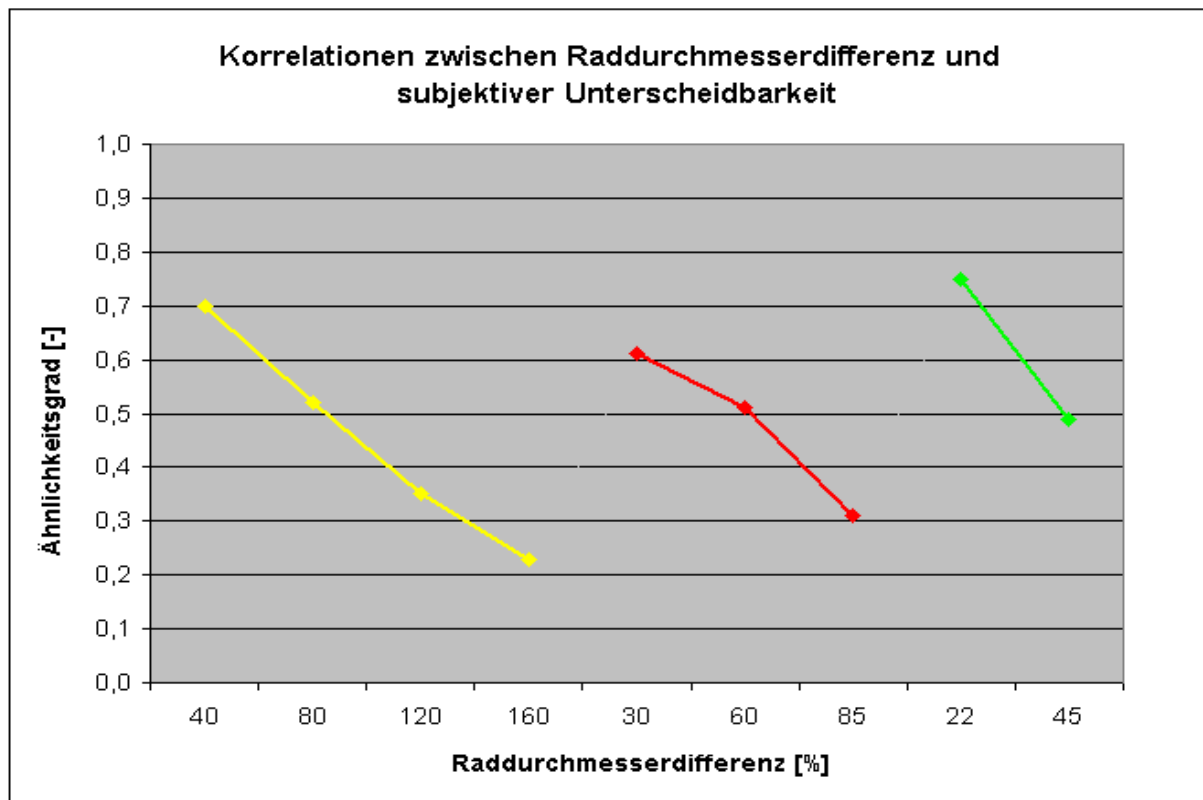


Abbildung 4.2.9: Korrelationen zwischen der Raddurchmesserdiffereenz und der subjektiven Unterscheidbarkeit.

Der vierte und letzte untersuchte Parameter war die Form des Drehmomentverlaufs. Die vier Variationen wurden mithilfe der sogenannten „Formzahl“ numerisch kodiert, um so die statistische Bearbeitung der empirischen Daten zu ermöglichen. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in **Abbildung 4.2.10** dargestellt. Daraus ist abzulesen, dass der einfachste Sägezahnverlauf (Drehschalter A) die größte haptische Wertanmutung aufweist. Die restlichen drei Muster wurden bis zum Erreichen eines Mittelwertes von nur 0,2 zunehmend schlechter beurteilt. Die Streuung der Urteile verläuft relativ waagrecht, was dahingehend interpretiert werden kann, dass sich die Probanden hinsichtlich ihrer Beurteilung aller vier Muster sicher waren, was wiederum auf eine exakte Wahrnehmung der haptischen Unterschiede zurückgeführt werden kann. Diese Ergebnisse lassen für den Entwicklungsingenieur den eindeutigen Rückschluss zu, dass die haptische Wertigkeit eines Drehschalters schon in seiner frühen Konzeptphase maßgeblich bestimmt wird.

Die Ergebnisse der durchgeführten Ähnlichkeitsvergleiche sind **Abbildung 4.2.11** zu entnehmen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Verlauf der Ähnlichkeitsgrade erwartungskonform die Verteilung der Bewertungen wiedergibt.

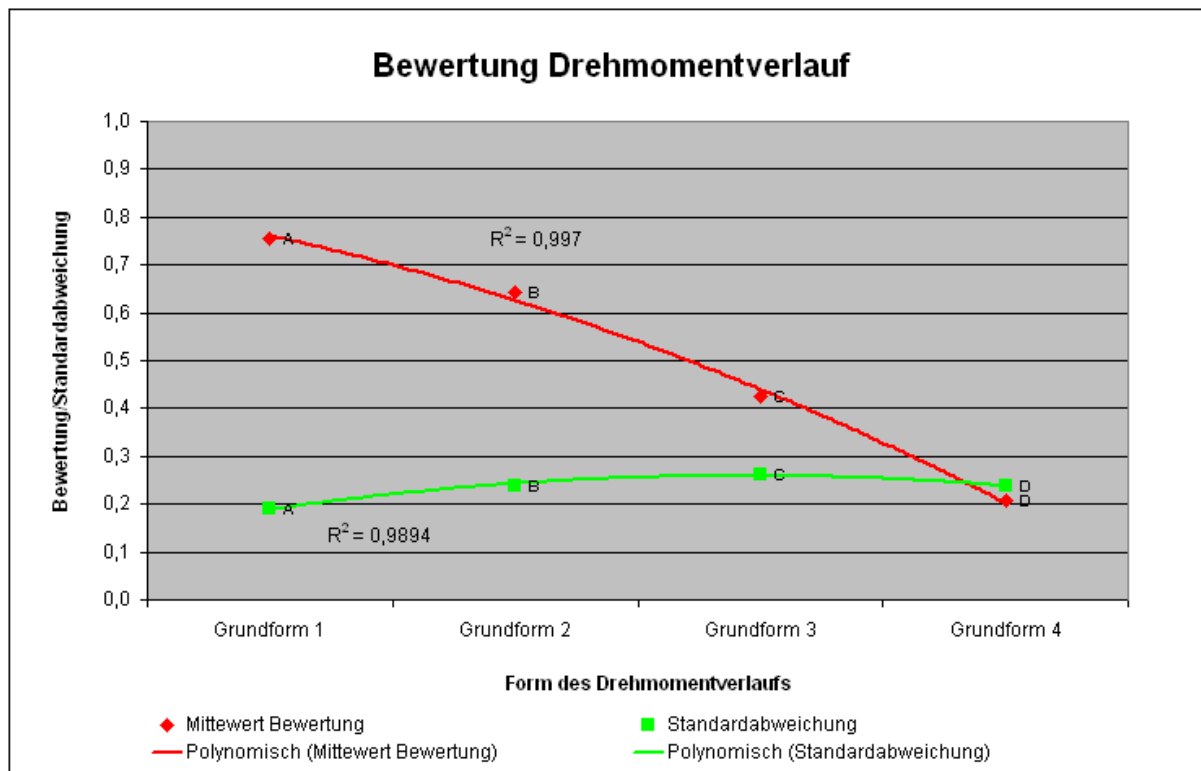


Abbildung 4.2.10: Bewertungen des Parameters „Drehmomentverlauf“.

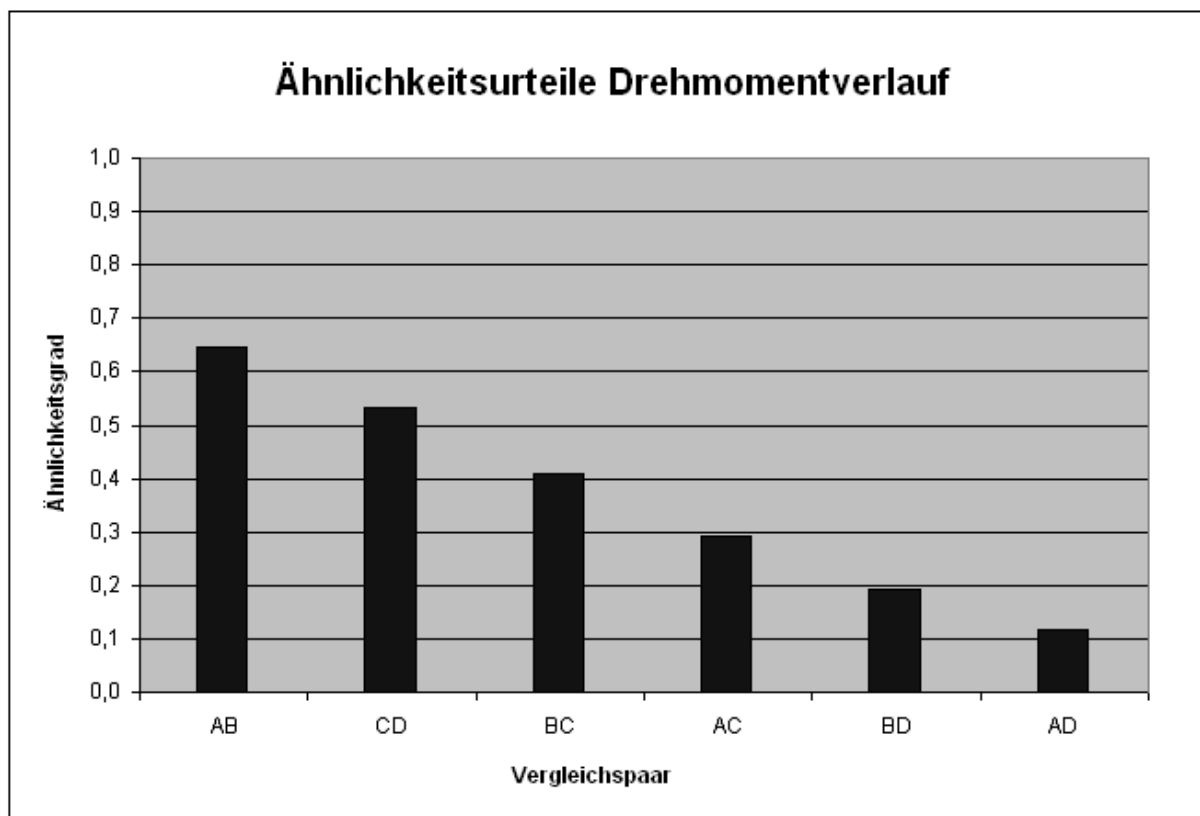


Abbildung 4.2.11: Ähnlichkeitsurteile hinsichtlich des Parameters „Drehmomentverlauf“.

4.2.2 Analyse der Wertungskorrelationen

Bei den Drehschaltern bietet sich, ähnlich wie bei den Tastern, die Möglichkeit der Durchführung einer Wertungskorrelationsanalyse an. Hierzu werden die Wertungsurteile den gebildeten Präferenzindizes gegenübergestellt.

Für jeden der untersuchten Parameter ist in **Abbildung 4.2.12** die Korrelation zwischen dem Wertungsurteil und dem Präferenzurteil dargestellt. Darüber hinaus sind in diesem Diagramm auch die gebildeten polynomischen Trendlinien verzeichnet. Diese zeigen im Gegensatz zu den Tastern über alle unabhängigen Variablen einen starken linearen positiven Zusammenhang von über 95 % zwischen der Wertigkeit eines Drehschalters und seiner Präferenz. Die ebenfalls relativ hohen Bestimmtheitsmaße, die alle über 0,85 liegen, bestätigen die Aussagekraft der gebildeten Trendlinien. Im Diagramm nicht dargestellt ist die relative Streuung der Bewertung in Abhängigkeit vom Präferenzindex. Diese wurde aus Übersichtsgründen ausgeblendet, da die Standardabweichung auch in diesem Fall vom Präferenzindex unabhängig ist. Sie zeigt eine sehr kleine Volatilität und bewegt sich zwischen 0,2 und 0,3.

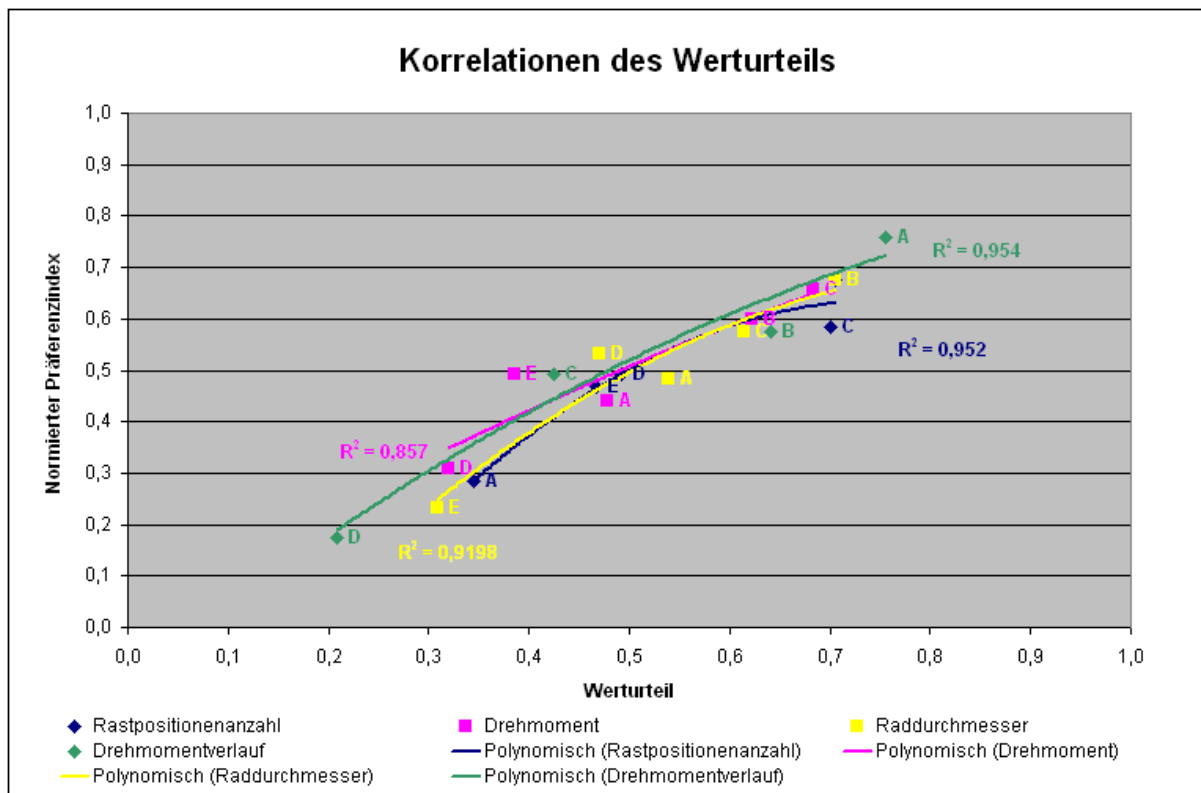


Abbildung 4.2.12: Wertungskorrelationen bei den Drehschaltern.

Nicht zuletzt wurde auch für die Drehschalter eine Faktorenanalyse durchgeführt, um die vermuteten Zusammenhänge zwischen den manifesten physikalischen Beschreibungsmerkmalen zu belegen. Die erklärte Gesamtvarianz der untersuchten sechs Beschreibungsmerkmale erreichte einen sehr hohen Wert von 91,48 % und wurde durch die Ausbildung von drei Faktoren realisiert (siehe **Tabelle 4.2.2**). Aufgrund des eindeutigen Ladungsmusters ist offensichtlich, dass eine Drei-Faktoren-Lösung zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den ausgewählten manifesten Variablen angemessen ist. Dennoch lädt der physikalische Parameter „Drehmoment“ auf zwei Faktoren beinahe gleich hoch, was zu einer erschwerten Interpretation führt. Werden jedoch die Ergebnisse der im Anschluss durchgeführten Korrelationsanalyse berücksichtigt (siehe **Tabelle 4.2.3**), werden die Interpretation des Ladungsmusters und damit auch die Aufnahme des Drehmomentes zum Faktor 2 erleichtert. Die durchgeführten zweiseitigen Korrelationen nach Pearson ergaben jeweils eine hohe, auf dem Niveau von 0,05 signifikante negative Korrelation der Faktoren 1 und 2. Faktor 3 hingegen erwies sich als nicht signifikant und wurde somit aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Der vollständige Output der mit dem Programm SPSS durchgeführten Analysen kann Anhang D entnommen werden.

Parameter	Komponente (Faktor)		
	1	2	3
Drehmomentverlauf	,916		
Rastpositionenanzahl	,915		
Drehmoment		,667	,659
Raddurchmesser			,902

Tabelle 4.2.2: Rotierte Komponentenmatrix (Ladungen unter 0,30 ausgeblendet).

		Bewertung	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
Bewertung	Korrelation nach Pearson	1	-,511	-,466	-,144
	Signifikanz (2-seitig)		,026	,044	,555
	N	19	19	19	19
Faktor 1	Korrelation nach Pearson	-,511	1	,000	,000
	Signifikanz (2-seitig)	,026		1,000	1,000
	N	19	19	19	19
Faktor 2	Korrelation nach Pearson	-,466	,000	1	,000
	Signifikanz (2-seitig)	,044	1,000		1,000
	N	19	19	19	19
Faktor 3	Korrelation nach Pearson	-,144	,000	,000	1
	Signifikanz (2-seitig)	,555	1,000	1,000	
	N	19	19	19	19

Tabelle 4.2.3: Korrelationen und Signifikanzen der Faktoren.

4.2.3 Untersuchung hinsichtlich des Faktors „Alter“

Wie in den vorherigen Kapiteln wurden auch hier Korrelationen zwischen dem Alter der Probanden und ihren Bewertungen für jeden der untersuchten physikalischen Parameter gebildet. In **Abbildung 4.2.13** sind die Korrelationen hinsichtlich des Parameters „Rastpositionenanzahl“ dargestellt. Anhand der im Diagramm dargestellten Ergebnisse lässt sich erkennen, dass zwischen dem Alter der Probanden und der Variation der Rastpositionenanzahl kein klarer Zusammenhang besteht. Auffällig ist jedoch der große Unterschied zwischen der Korrelation des ersten Drehschalters und der Korrelation der restlichen vier Muster.

Beim Parameter „Drehmoment“ ist ebenfalls keine eindeutige Korrelation festzustellen. Das in **Abbildung 4.1.14** dargestellte Diagramm zeigt eine gemischte Verteilung der Korrelationen über die untersuchten Variationen. Auffällig ist, dass der beste Drehschalter als Einziger eine negative Korrelation aufweist. Werden die anderen Variationen an dieser Stelle außer Acht gelassen, zeigt sich, dass mit steigendem Alter eine gewisse Präferenz für niedrigere Betätigungsdrehmomente vorhanden ist.

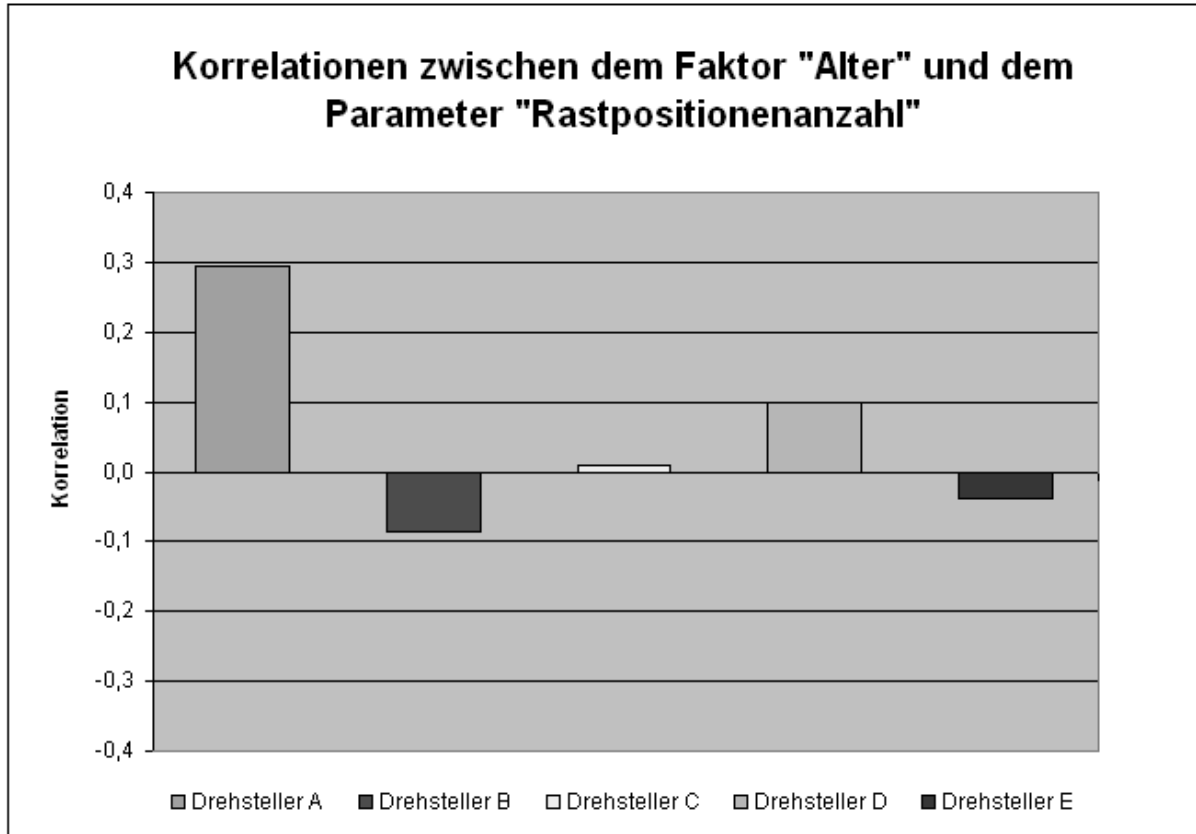


Abbildung 4.2.13: Korrelationen hinsichtlich des Parameters „Rastpositionenanzahl“.

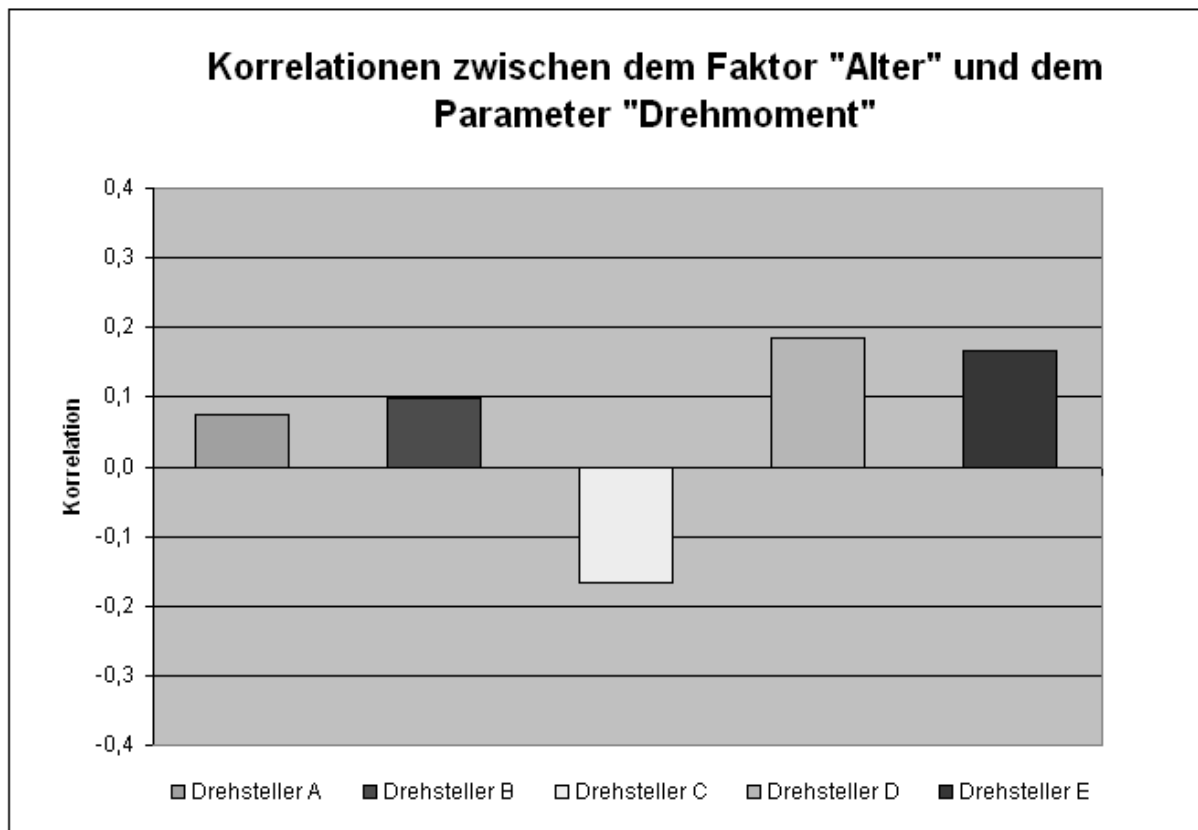


Abbildung 4.2.14: Korrelationen hinsichtlich des Parameters „Drehmoment“.

Bei der Variation des Raddurchmessers konnte nur eine geringe Korrelation zwischen dem Alter und der Bewertung der Probanden nachgewiesen werden (siehe **Abbildung 4.2.15**).

Erwartungskonform konnte erst beim letzten Parameter eine deutliche Korrelation zwischen Alter und Bewertung bestätigt werden (siehe **Abbildung 4.2.16**). Drehschalter A weist eine negative Korrelation von über 0,4 auf, Drehschalter D eine positive Korrelation, die ebenfalls über 0,4 liegt. Aus dieser diametralen Verteilung der Korrelationen lässt sich die klare Tendenz ableiten, dass der Proband die Drehmomentverläufe 1 und 2 umso stärker präferiert, je jünger er ist.

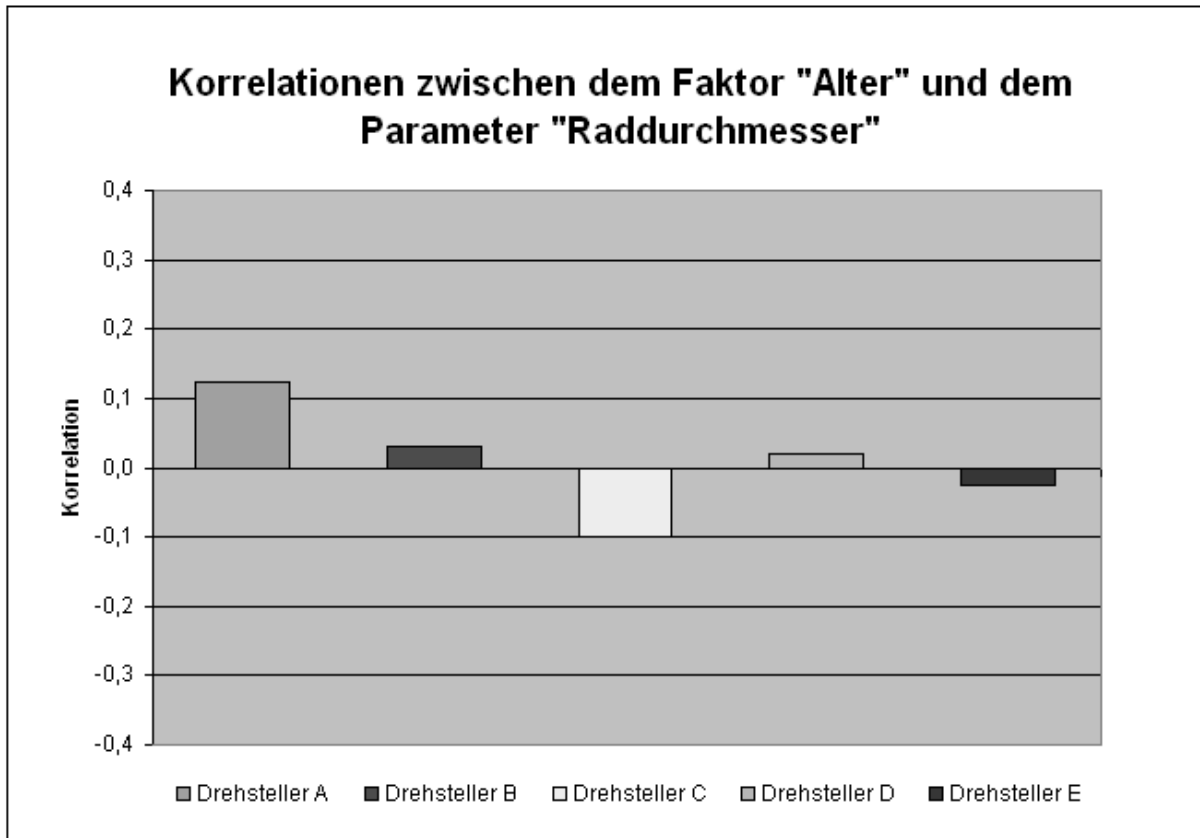


Abbildung 4.2.15: Korrelationen hinsichtlich des Parameters „Raddurchmesser“.

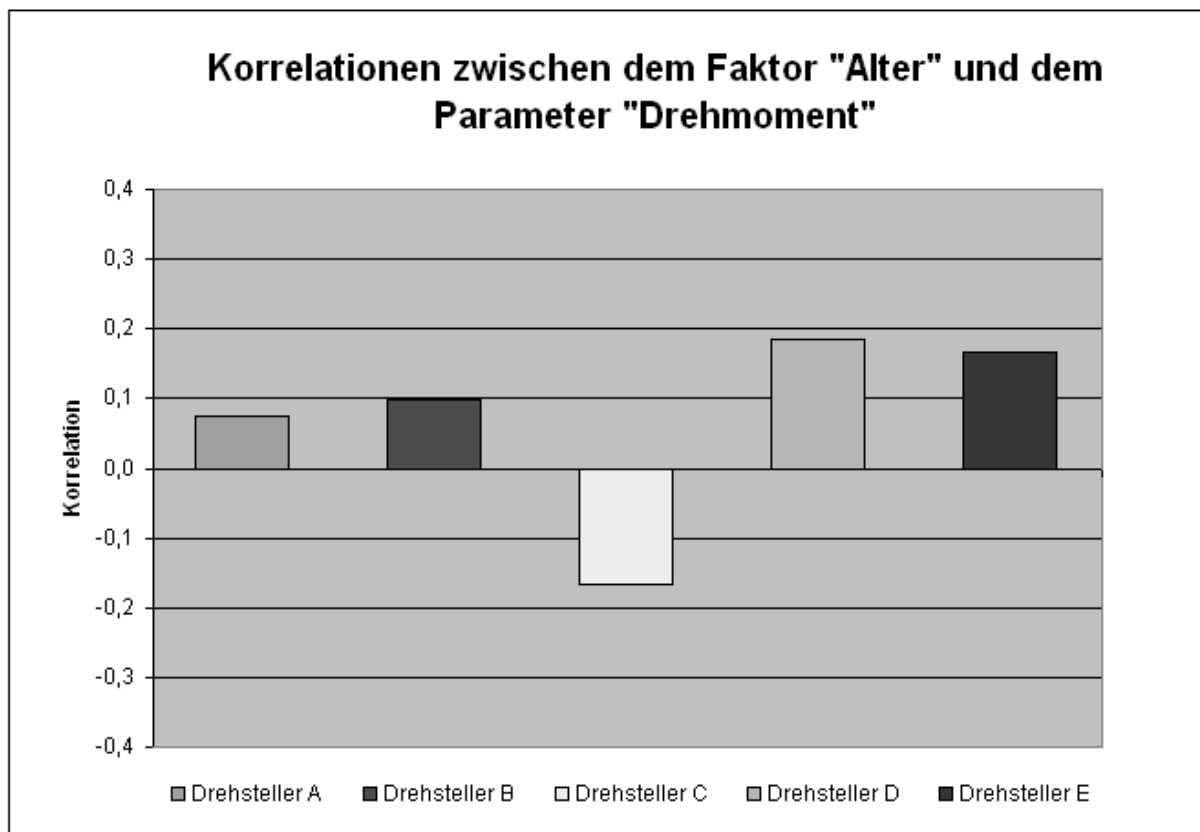


Abbildung 4.2.16: Korrelationen hinsichtlich des Parameters „Drehmomentverlauf“.

4.3 Akustische Wertanmutung von Schaltergeräuschen

4.3.1 Charakterisierung der Mittelwerte und Standardabweichungen

Vor der Auswertung der empirischen Wertungsurteile, die im dritten Teilversuch abgegeben wurden (vgl. Kapitel 3.4.2, S. 84), muss an dieser Stelle ein Überblick über die allgemeine Akzeptanz der im Experiment verwendeten Grundgeräusche gegeben werden. In **Abbildung 4.3.1** sind die Wertungsurteile der drei Schaltergeräusche in steigender Reihenfolge abgebildet. Schaltergeräusch B schnitt mit einer Bewertung von nur 0,34 am schlechtesten ab. Die höchste Akzeptanz erreichte Schaltergeräusch C mit einer mittleren Bewertung von 0,6. Die Streuung der Urteile fiel mit Absolutwerten von 0,23 bis 0,28 unerwartet groß aus. Sie könnte mit der komplexen Natur der Bewertung von Impulsgeräuschen erklärt werden. Sicherlich spiegelt sich im Ergebnis auch die fehlende Erfahrung der Probanden bei der Bewertung von Schaltergeräuschen wider. Zusammenfassend lässt sich dennoch sagen, dass die ausgewählten Schaltergeräusche von den Probanden sehr gut differenziert werden konnten und ein relativ großer Wertigkeitsbereich im Experiment untersucht werden konnte. Die nachfolgende Auswertung der Wertungsurteile erfolgt für jedes Schaltergeräusch separat.

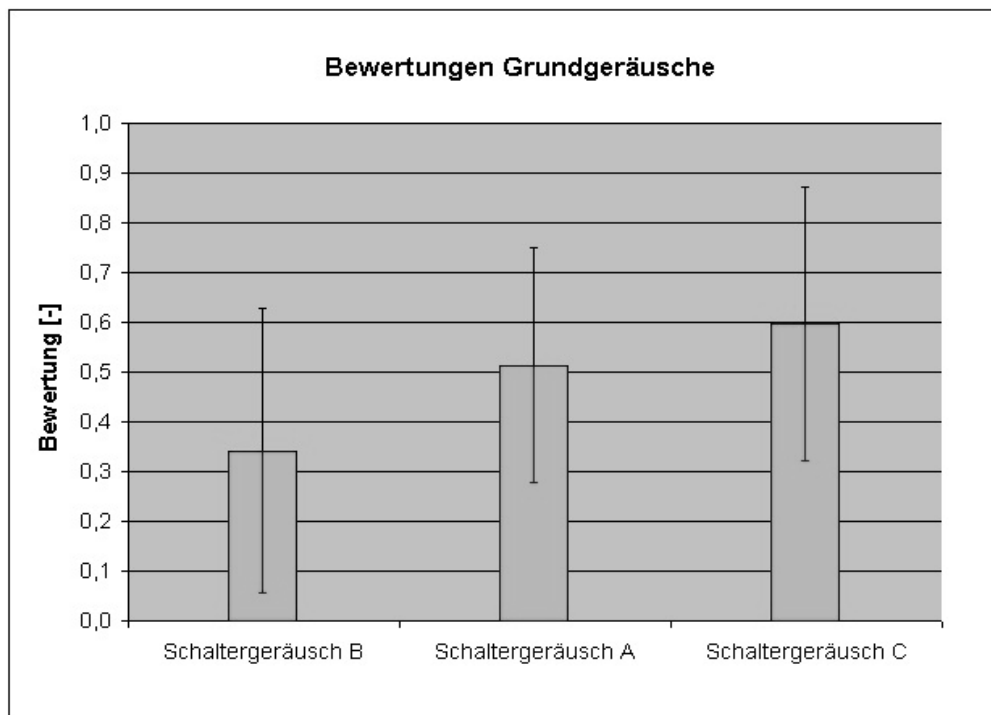


Abbildung 4.3.1: Bewertungen der Grundgeräusche.

Von den zu beurteilenden fünf Variationen des Schaltergeräusches A wurde die mittlere, die dem unveränderten Grundgeräusch entsprach, mit dem höchsten Mittelwert von 0,52 bewertet. Dies geschah sowohl beim physikalischen Parameter „Tonhöhe“ als auch beim Parameter „Schärfe“ (siehe **Abbildung 4.3.2**). Jede weitere Variation des Geräusches führte bei beiden Parametern gleichermaßen zu einer niedrigeren Bewertung. Die Urteilsstreuungen blieben auch hier relativ hoch. Die gebildeten polynomischen Trendlinien deuten eine Normalverteilung an, die ihren Scheitelpunkt bei Grundgeräusch A hat.

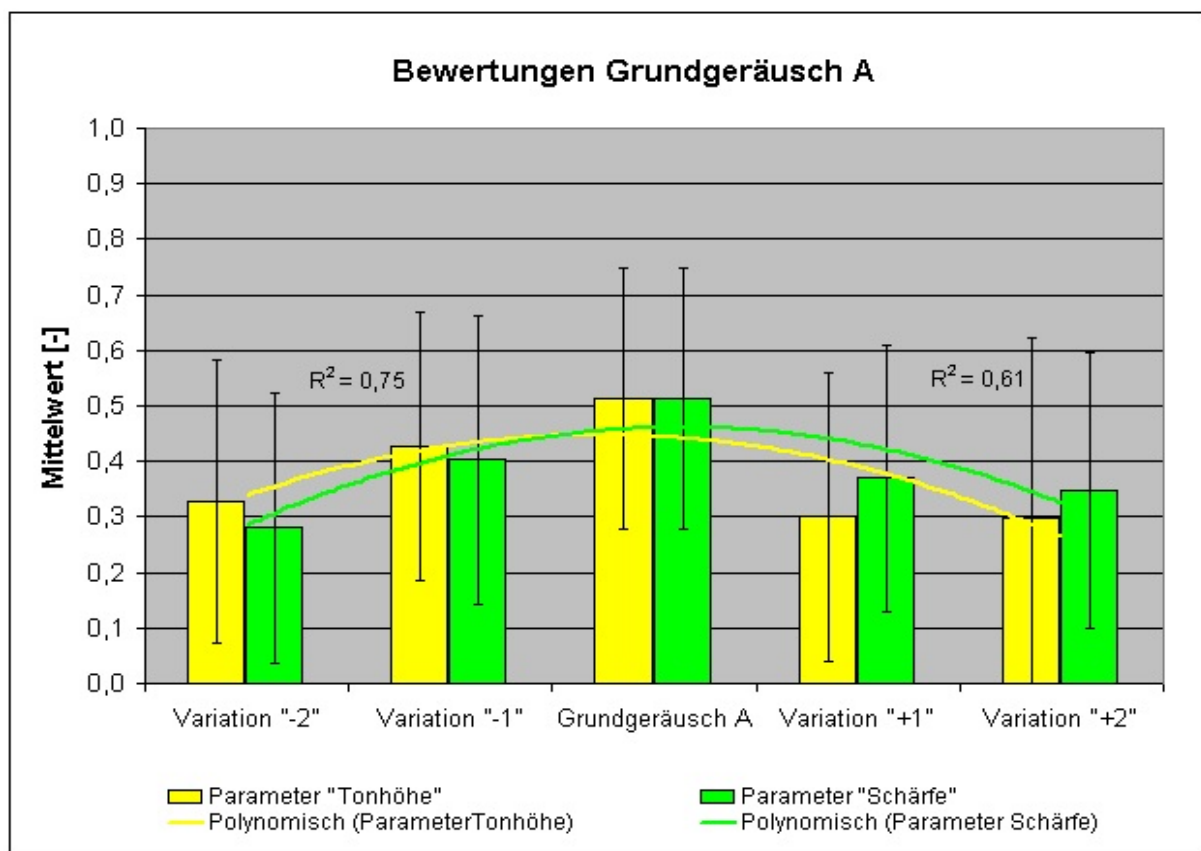


Abbildung 4.3.2: Wertungsurteile bei Grundgeräusch A.

Beim minderwertigsten Grundgeräusch B konnte die akustische Wertigkeit mithilfe der Variationen erwartungsgemäß deutlich gesteigert werden (siehe **Abbildung 4.3.3**). **Abbildung 4.3.3** lässt erkennen, dass eine geringe Reduzierung der Schärfe bzw. eine geringe Erhöhung der Tonhöhe zu Steigerungen in der Wertigkeit von bis zu 55 % führt. Mit der Steigerung der Wertigkeit wurde gleichzeitig eine Absenkung der Urteilsstreuungen beobachtet. Eine weitere Veränderung der Tonhöhe bzw. der Schärfe führte zu einer erneuten Verminderung der akustischen Akzeptanz.

Im Zusammenhang mit dem besten Grundgeräusch C ließ sich eine interessante Tendenz hinsichtlich der Beurteilung der Tonhöhevariationen beobachten (siehe **Abbildung 4.3.4**). Mithilfe der dargebotenen Variationen konnte keine signifikante Verbesserung in Bezug auf die Wertigkeit des Geräusches erreicht werden. Dies lässt den Schluss zu, dass dieses Schaltergeräusch vom Grundcharakter her bereits eine optimale Akzeptanz beim Kunden findet und gegenüber Variationen in der Tonhöhe relativ unempfindlich ist. Die Variation der Schärfe brachte dagegen erwartungskonforme Ergebnisse. So konnte die Kundenakzeptanz beim besten Grundgeräusch durch eine kleine Reduzierung der Schärfe noch mehr gesteigert werden. Die Urteilsstreuungen blieben auch in diesem Fall auf einem relativ hohen Niveau.

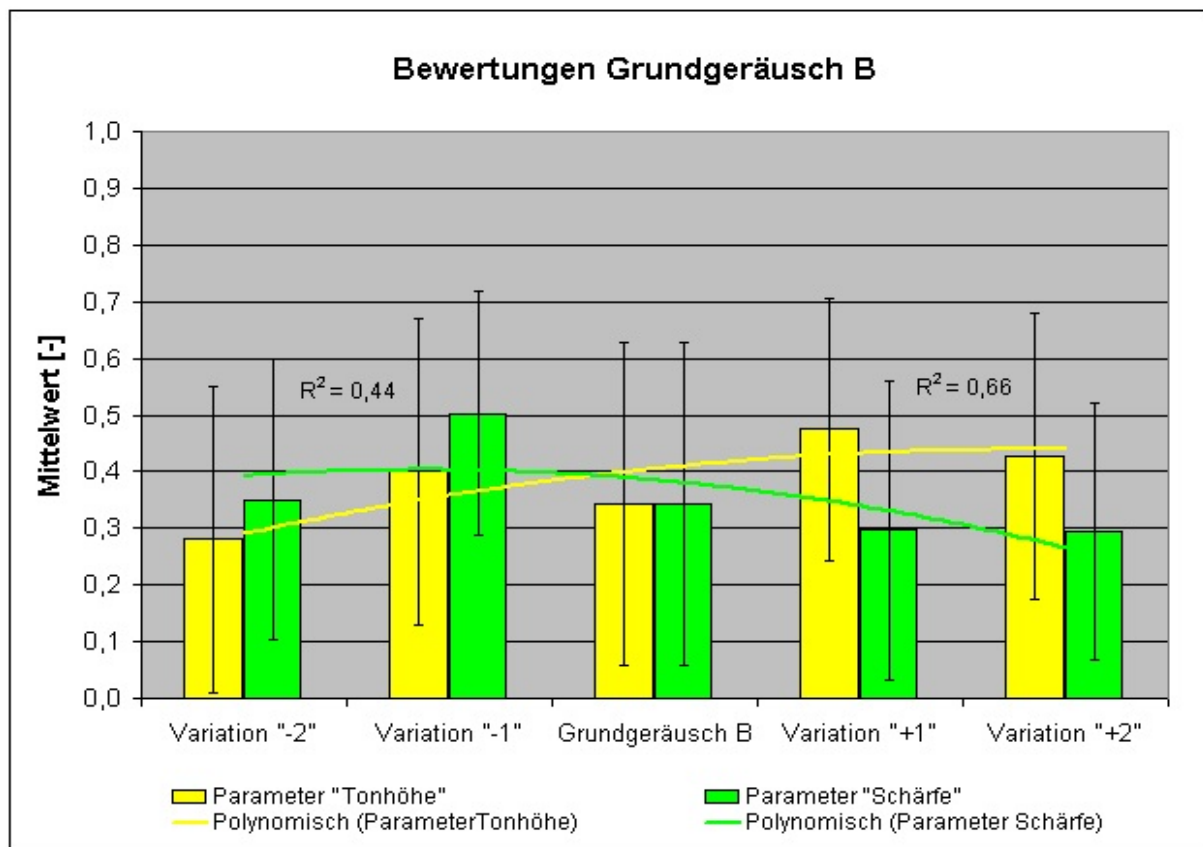


Abbildung 4.3.3: Wertungsurteile bei Grundgeräusch B.

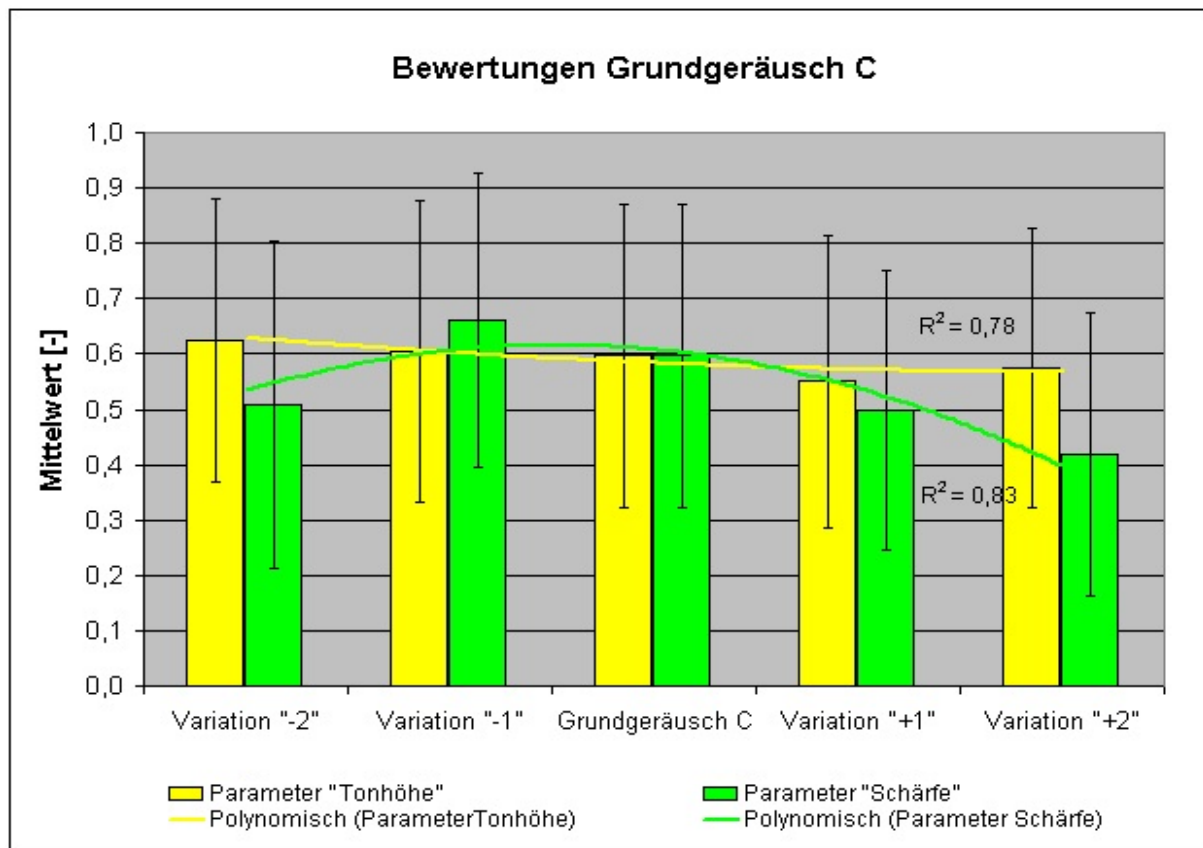


Abbildung 4.3.4: Wertungsurteile bei Grundgeräusch C.

Die Auswertung der Korrelationen des physikalischen Parameters „Ausklingszeit“ mit der Bewertung der einzelnen Schaltergeräusche ergab eine niedrige negative Korrelation, die außerdem noch durch eine sehr schwache Signifikanz gekennzeichnet ist (siehe **Tabelle 4.3.1**).

		Bewertung	Ausklingszeit
Bewertung	Korrelation nach Pearson	1	-,258
	Signifikanz (2-seitig)		,194
	N	27	27
Ausklingszeit	Korrelation nach Pearson	-,258	1
	Signifikanz (2-seitig)	,194	
	N	27	27

Tabelle 4.3.1: Korrelationen hinsichtlich der Bewertung des Parameters „Ausklingszeit“.

Die Beantwortung der dritten Aufgabe des Teilversuches führte zur Bildung von insgesamt sieben verbalen Kategorien, mit deren Hilfe die Probanden ihre Best-worst-

Auswahl begründeten. Dem Diagramm in **Abbildung 4.3.5** ist zu entnehmen, dass für die Bewertung eines Schaltergeräusches die Tonhöhe der entscheidende physikalische Parameter ist. Mit einer Nennungshäufigkeit von über 23 % bei der Begründung der Best-Auswahl und über 34 % bei der Begründung der Worst-Auswahl stellt die Tonhöhe die Kategorie mit der größten Gewichtung dar. Mit Ausnahme der Kategorie der subjektiven Lautheit, die aus versuchstechnischen Gründen konstant gehalten wurde, fielen die restlichen fünf verbalen Kategorien deutlich weniger ins Gewicht.

Weiterhin interessant erscheint die Tatsache, dass die psychoakustische Kenngröße „Schärfe“ von den Probanden nicht als Begründung ihrer Beurteilung verwendet wurde. Im Gegensatz zu den stationären bzw. quasistationären Geräusche, bei denen die Schärfe bekanntlich eine wesentliche Rolle für die akustische Wertigkeit spielt, entsteht hier der Eindruck, dass diese Kenngröße bei den transienten Schallereignissen für die Probanden hinsichtlich der Begründung einer Präferenz nicht von Bedeutung ist.

Im Allgemeinen bestätigt sich der Eindruck, dass die Bewertung der Schaltergeräusche wesentlich durch die fehlende Erfahrung der Probanden gekennzeichnet war. Nicht zuletzt konnte die erwartungskonforme Tendenz bestätigt werden, dass die subjektiven Eigenschaften „Länge“ und „Volumen“ eines Geräusches eher mit einer positiven Stimmung verbunden werden. Die Faktoren „Schärfe“ und „Tonhöhe“ führen dagegen eher zu einer negativen Stimmung bei den Probanden.

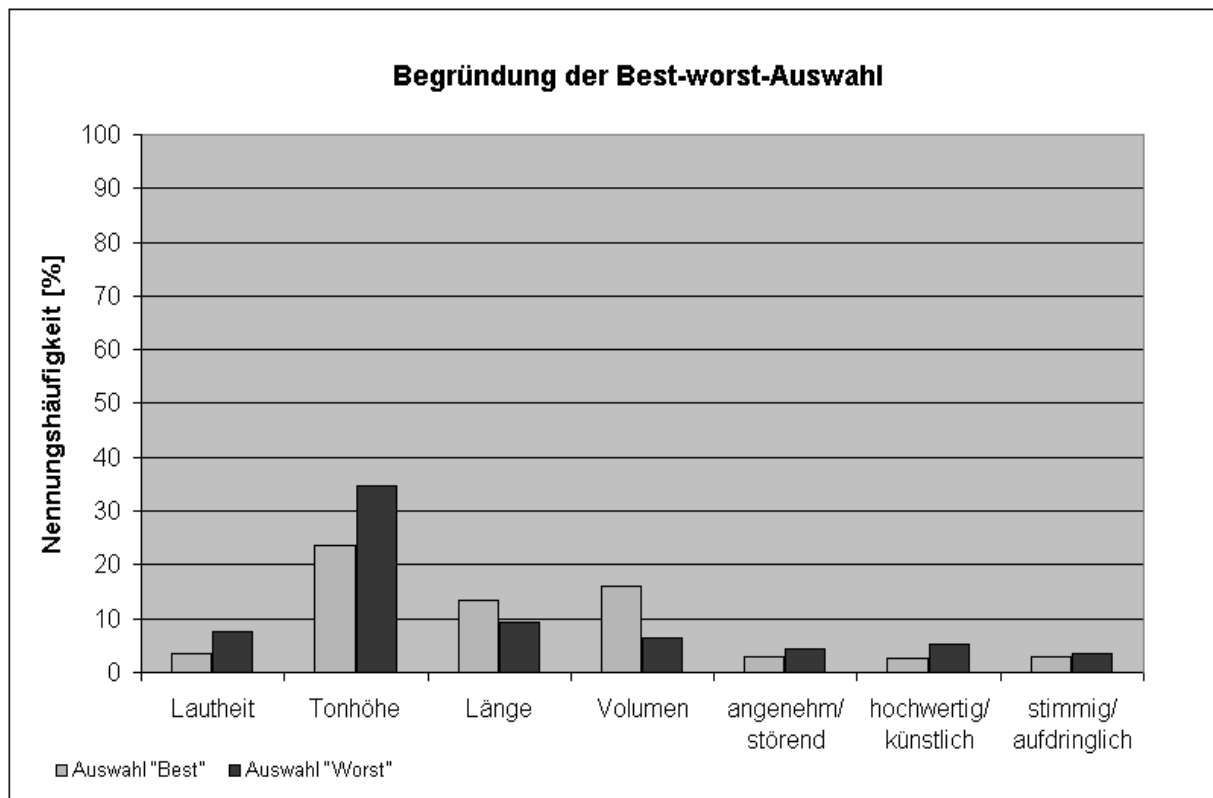


Abbildung 4.3.5: Begründungskategorien hinsichtlich der Schaltergeräusche.

4.3.2 Analyse der Wertungskorrelationen

Ähnlich wie bei der Auswertung der Taster und Drehschalter wird an dieser Stelle nach möglichen Wertungskorrelationen hinsichtlich der Beurteilung der Schaltergeräusche gesucht. Dazu wurde der Urteilswert über den gebildeten Präferenzindex aufgetragen (siehe **Abbildung 4.3.6**). Werden die dabei gewonnenen Ergebnisse mit den Wertungskorrelationen bei den Tastern verglichen, zeigen sich große Ähnlichkeiten. Abgesehen vom insgesamt größeren Wertungsbereich bei den Tastern weist die Wertungskorrelation der Schaltergeräusche keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem Wertungsurteil und der subjektiven Präferenz für Urteilswerte zwischen 0,4 und 0,6 auf. Außerhalb dieses Wertungsbereiches zeigt sich eine positive Korrelation. Die relative Streuung verhält sich hier anders als bei den Tastern – sie sinkt im oben erwähnten Wertungsbereich und bestätigt damit die Tendenz.

Die Suche nach Korrelationen zwischen den Bewertungen der Parameter „Schärfe“ und „Tonhöhe“ führte zu den in **Abbildung 4.3.7** dargestellten Ergebnissen. Das Diagramm zeigt deutlich, dass bei den Grundgeräuschen B und C keine nennenswerten Korrelationen existieren. Grundgeräusch A hingegen weist eine positive lineare Korrelation auf.

Zusammenfassend können diese Ergebnisse dahingehend interpretiert werden, dass die Beurteilung von Impulsgeräuschen sehr komplexer Natur ist und im Vergleich zur Bewertung von (quasi)stationären Geräuschen größere Wissenslücken existieren. Diese können mithilfe von weiterführenden Untersuchungen geschlossen werden.

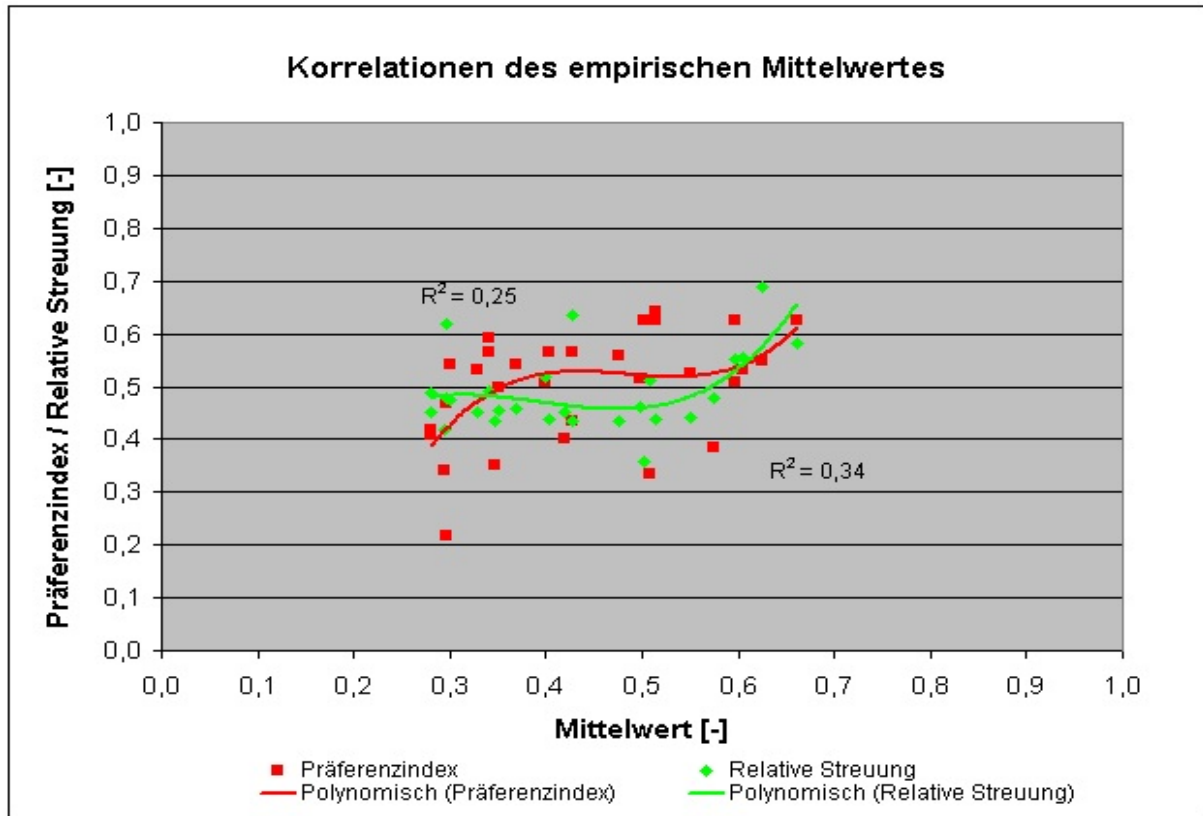


Abbildung 4.3.6: Wertungskorrelationen hinsichtlich der Schaltergeräusche.

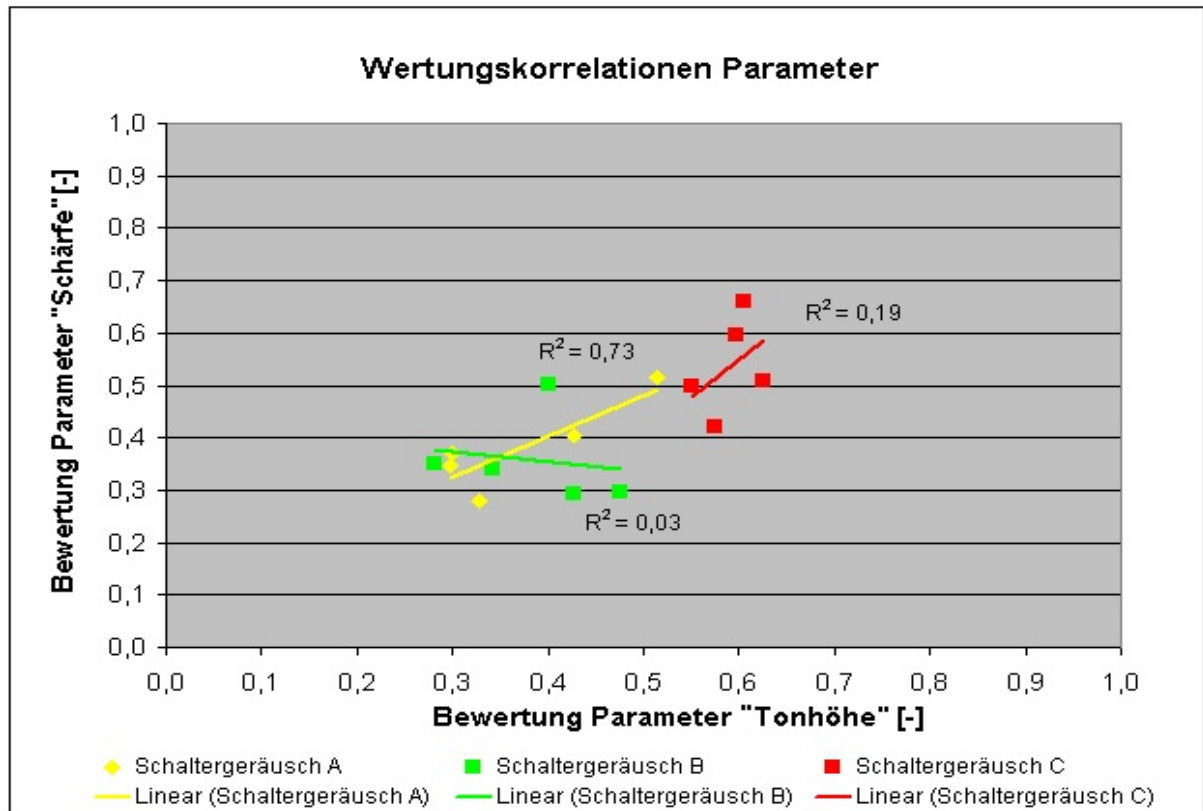


Abbildung 4.3.7: Wertungskorrelationen zwischen den Parametern „Tonhöhe“ und „Schärfe“.

4.3.3 Untersuchung hinsichtlich des Faktors „Alter“

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich des Alters der Probanden kurz zusammengefasst. In **Abbildung 4.3.8** sind die gefundenen Korrelationen zwischen dem Alter und der Bewertung der Probanden für alle Variationen des Grundgeräusches A dargestellt. Anhand des Diagramms ist erkennbar, dass weder beim Parameter „Tonhöhe“ noch beim Parameter „Schärfe“ ein linearer Zusammenhang zwischen dem Alter der Probanden und der Variation der Parameter nachgewiesen werden konnte. Während die Variation der Tonhöhe in keinem Zusammenhang mit dem Alter der Probanden steht, konnten hinsichtlich der Schärfe sowohl eine steigende als auch eine fallende Tendenz beobachtet werden. Diese Tendenz wurde auch bei Grundgeräusch B festgestellt (siehe **Abbildung 4.3.9**). Bei Grundgeräusch C hingegen weisen alle Variationen eine negative Korrelation zwischen Alter und Bewertung auf (siehe **Abbildung 4.3.10**). Ein signifikanter linearer Zusammenhang zwischen dem Alter der Probanden und der Variation der zwei Parameter konnte jedoch, anders als erwartet, nicht nachgewiesen werden.

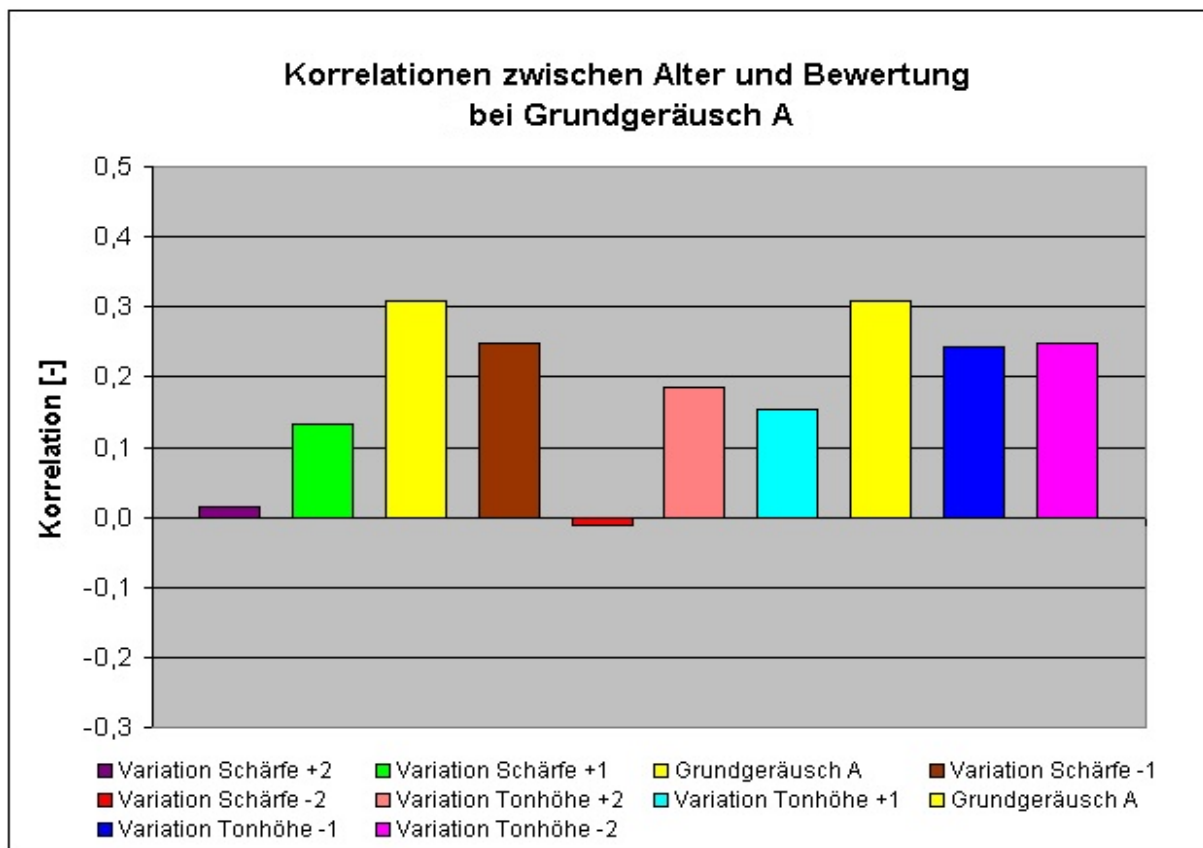


Abbildung 4.3.8: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung bei Grundgeräusch A.

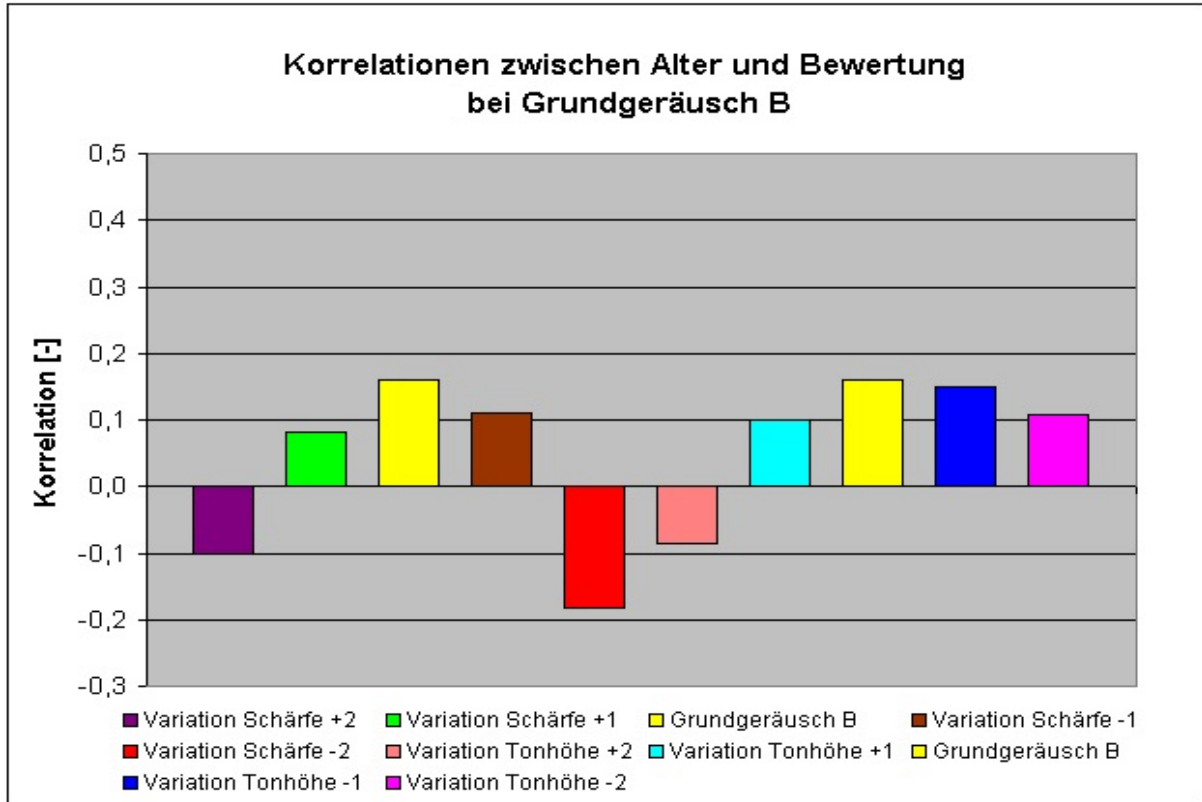


Abbildung 4.3.9: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung bei Grundgeräusch B.

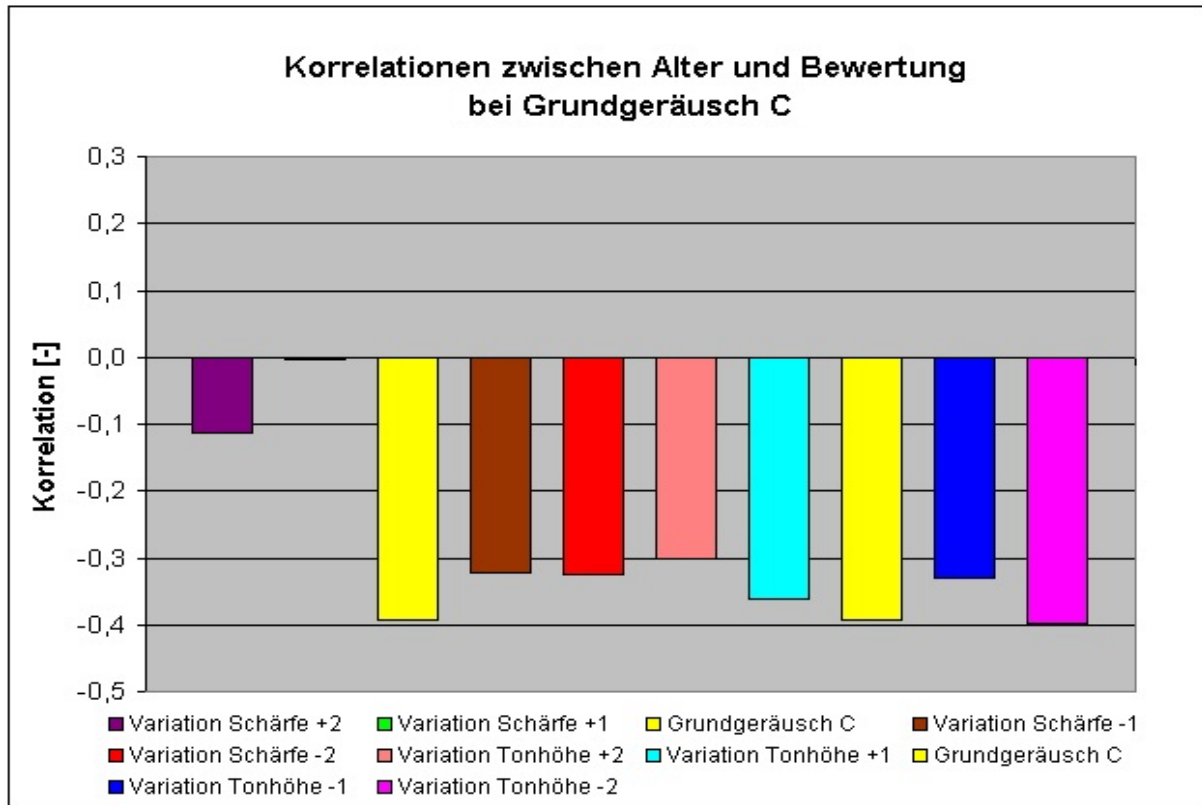


Abbildung 4.3.10: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung bei Grundgeräusch C.

4.4 Kenngrößen zur Objektivierung der haptischen Wertanmutung

Im nun folgenden Kapitel werden die für die Objektivierung der haptischen Wertanmutung von Tastern und Drehschaltern ergründeten komplexen Wechselwirkungen zusammengefasst und die entstandenen Wertanmutungskenngrößen beschrieben. Weiterhin werden Antworten auf folgende Fragen gegeben: „WAS macht einen Taster oder Drehschalter haptisch hochwertig?“ bzw. „WIE kann ein Taster oder Drehschalter haptisch hochwertiger gemacht werden?“

4.4.1 Definition der Wertanmutungskenngrößen von Tastern

Mithilfe der durchgeführten Faktorenanalyse wurden mehrere signifikante Faktoren berechnet, die die Gemeinsamkeiten zwischen den einzelnen physikalischen Parametern beschreiben. Wird nun mithilfe dieser vier Faktoren eine einfache Regressionsgleichung aufgestellt, wird ein dimensionsloser, psychohaptischer Wertanmutungsindex definiert, der die Wechselwirkung zwischen der subjektiven Bewertung und den physikalischen Eigenschaften eines Tasters beschreibt und quantifiziert. Dieser Index wird mit Hilfe der berechneten Korrelationen (vgl. Tabelle 4.1.5 auf Seite 99) berechnet und hat folgende Form:

$$I_W(Taster) = (0,403 * F1) - (0,311 * F2) + (0,285 * F4) + (0,498 * F6) \quad [-] \quad (4.4.1)$$

Darüber hinaus lassen sich aus der Zusammensetzung der Faktoren auch ihre Bezeichnungen herleiten:

Faktor 1: „Betätigungs- und Gesamtwegfaktor“

Faktor 2: „Betätigungskraftfaktor“

Faktor 4: „Anschlagwegfaktor“

Faktor 6: „Kraftabfallfaktor“

Die Eigenwerte der einzelnen Faktoren können mithilfe ihrer Ladungen (vgl. Tabelle 4.1.1 auf Seite 97), der physikalischen Eigenschaften der Taster und der einfachen Regressionsgleichung wie folgt berechnet werden:

$$F1 = (0,956 * Snapweg) + (0,936 * Sprungweg) + (0,895 * Rücksprungweg) + (0,884 * Snap-sprung) + (0,831 * P6-Weg) + (0,826 * P2-Weg) + (0,773 * P4-Weg) \quad (4.4.2)$$

$$F2=(0,922*P7\text{-Kraft})+(0,892*P1\text{-Kraft})+(0,79*P6\text{-Kraft})+(0,758*P2\text{-Kraft}) \quad (4.4.3)$$

$$F4=(0,899*\text{Rücklaufweg})+(0,879*\text{Nachlaufweg}) \quad (4.4.4)$$

$$F6=(0,917*\text{Kraftabfall}) \quad (4.4.5)$$

Mithilfe dieses psychohaptischen Wertanmutungsindexes wurde eine Möglichkeit beschrieben, die subjektive haptische Wertanmutung bei der Betätigung eines Tasters unabhängig von seinem Einbauort und der hinterlegten Bedienfunktion zu quantifizieren. Weiterhin wird mit seiner Hilfe die Möglichkeit geschaffen, die haptische Auslegung eines Tasters schon in seiner frühen Entwicklungsphase aktiv zu gestalten, sodass im Endeffekt eine höhere erlebbare Wertigkeit und Kundenakzeptanz erreicht werden kann. Nicht zuletzt lassen sich aus der Zusammenfassung der Ergebnisse konkrete Empfehlungen für die haptische Gestaltung eines haptisch optimierten Tasters ableiten (siehe **Tabelle 4.4.1**).

Messgröße	Empfohlener Wert
Kraftabfall	40,00-55,00 [%]
Snapweg	0,50-0,60 [mm]
Sprungweg	0,50-0,70 [mm]
Rücksprungweg	0,95-1,05 [mm]
Snapsprung	0,70-0,90 [mm]
P6-Weg	1,00-1,05 [mm]
P2-Weg	1,00-1,05 [mm]
P4-Weg	1,50-1,75 [mm]
P7-Kraft	2,45-2,65 [N]
P1-Kraft	3,10-3,30 [N]
P6-Kraft	1,10-1,50 [N]
P2-Kraft	1,20-1,90 [N]
Rücklaufweg	0,50-0,70 [mm]
Nachlaufweg	0,50-0,70 [mm]

Tabelle 4.4.1: Empfohlene Wertebereiche für die optimale haptische Wertanmutung von Tastern.

Der soeben definierte Wertanmutungsindex ($I_w(\text{Taster})$) stellt lediglich eine Möglichkeit zur Quantifizierung der haptischen Wertanmutung von Tastern dar und darf wegen seiner Stichprobenabhängigkeit nicht als feste Formel betrachtet werden. Um diese Stichprobenabhängigkeit minimieren und die gefundenen Parameterwerte überprüfen zu können, könnte eine Kreuzvalidierung durchgeführt werden, wodurch die berechneten Parameter leichte Anpassungen erfahren könnten.

Eine genaue Beschreibung der verwendeten Faktorenanalyse und der Regressionsgleichung ist in Anhang E zu finden.

4.4.2 Definition der Wertanmutungskenngrößen von Drehschaltern

Ähnlich wie bei den Tastern lässt sich an dieser Stelle ebenso mithilfe der berechneten signifikanten Faktoren F 1 und F 2 ein dimensionsloser, psychohaptischer Wertanmutungsindex definieren, der die Wechselwirkungen zwischen der subjektiv erleb- baren haptischen Wertanmutung bei der Betätigung eines Drehschalters und seinen physikalischen Eigenschaften beschreibt und quantifiziert. Dies findet unabhängig von seinem Einbauort und der hinterlegten Bedienfunktion statt. Dieser Index wird mithilfe der berechneten Korrelationen (vgl. Tabelle 4.2.3 auf Seite 112) berechnet und hat folgende Form:

$$I_{W(Drehschalter)} = -(0,511 \cdot F1) - (0,466 \cdot F2) \quad [-] \quad (4.4.6)$$

Weiterhin lassen sich aus der Zusammensetzung der Faktoren auch ihre Bezeich- nungen herleiten:

Faktor 1: „Grundform- und Rastpositionenfaktor“

Faktor 2: „Drehmomentfaktor“

Die Eigenwerte der einzelnen Faktoren können mithilfe ihrer Ladungen (vgl. Tabelle 4.2.2 auf Seite 112), der physikalischen Eigenschaften der Drehschalter und der ein- fachen Regressionsgleichung wie folgt berechnet werden:

$$F1 = (0,916 \cdot \text{Drehmomentverlauf}) + (0,915 \cdot \text{Rastpositionenanzahl}) \quad (4.4.7)$$

$$F2 = (0,667 \cdot \text{Drehmoment}) \quad (4.4.8)$$

Erneut lassen sich an dieser Stelle aus der Zusammenfassung der Ergebnisse konkrete Empfehlungen für die hapti- sche Gestaltung eines optimalen Drehschalters ableiten (siehe **Tabelle 4.4.2**).

Messgröße	Empfohlener Wert
Drehmomentverlauf	Grundform 1 [-]
Raddurchmesser	40,00-50,00 [mm]
Rastpositionenanzahl	25-35 [-]
Drehmoment	30,00-40,00 [mNm]

Tabelle 4.4.2: Empfohlene Wertebereiche für die optimale haptische Wertanmutung von Drehschal- tern.

Der soeben definierte Wertanmutungsindex ($I_{W(Drehschalter)}$) stellt eine Möglichkeit zur Quantifizierung der haptischen Wertanmutung von Drehschaltern dar und darf wegen

seiner Stichprobenabhängigkeit nicht als feste Formel betrachtet werden. Auch im Fall der Drehschalter könnten mithilfe einer Kreuzvalidierung die Stichprobenabhängigkeit minimiert und die gefundenen Parameterwerte überprüft werden. Die berechneten Parameter könnten dadurch leichte Anpassungen erfahren.

4.5 Validierung psychoakustischer Empfindungsgrößen

Die Auswertung der im dritten Teilversuch (vgl. Kapitel 3.4.2, S. 84) ermittelten empirischen Daten ergab eine sehr gute Übereinstimmung der Variation der psychoakustischen Empfindungsgröße „Tonhöhe“ mit den abgegebenen Wertungsurteilen der Probanden. Über das gesamte Spektrum der untersuchten Schaltergeräusche konnte mit einem Wert von ca. 75 % eine signifikante Korrelation zwischen der Tonhöhe des Schaltergeräusches und seiner Bewertung festgestellt werden. Dieses Ergebnis wurde schließlich auch durch die Auswertung der verbalen Begründung einer Bestworst-Auswahl bestätigt. Dabei erwies sich die Tonhöhe als diejenige Kategorie mit der größten Nennungshäufigkeit. Weiterhin kann an dieser Stelle für die Tonhöhe ein Wertebereich von 900 Hz bis 1100 Hz empfohlen werden, mit dessen Hilfe die Wertigkeit eines Schaltergeräusches gesteigert werden kann.

Die Untersuchung der psychoakustischen Kenngröße „Schärfe“ ergab eine deutlich geringere Korrelation mit dem Wertungsurteil der Probanden. Weiterhin auffällig ist ihre starke Abhängigkeit von der Natur des untersuchten Schaltergeräusches. Daraus kann gefolgert werden, dass die psychoakustische Kenngröße „Schärfe“ für die Beschreibung der subjektiven Empfindungen im Bereich der transienten Schallereignisse nicht geeignet ist.

Ebenfalls keine signifikante Korrelation konnte bei der Untersuchung der Kenngröße „Ausklingszeit“ festgestellt werden. Somit eignet sich auch diese psychoakustische Kenngröße nicht zur Beschreibung der Klangfarbe eines transienten Schaltergeräusches.

4.6 Wechselwirkung zwischen Haptik und Akustik

Wie schon im Rahmen der Aufgabenstellung erwähnt, werden in der vorliegenden Arbeit auch mögliche Auswirkungen der akustischen Wahrnehmung auf die haptische Wertanmutung eines Tasters untersucht. Diesbezüglich kam ein spezieller Versuchsaufbau zur Anwendung, der es erlaubte, den Einfluss des Schaltergeräusches auf die subjektiv erlebbare haptische Wertigkeit des Tasters zu untersuchen (vgl. Kapitel 3.4.2). Die umgekehrte Frage nach dem Einfluss der Haptik auf die akustische Wertanmutung eines Tasters wurde ebenfalls einer Analyse unterzogen.

In **Abbildung 4.6.1** ist der Einfluss der Schaltergeräusche auf die ganzheitliche Wertanmutung von drei Tastern in Abhängigkeit der Haptik dargestellt. Zusätzlich findet sich im Diagramm die rein haptische Bewertung der drei verschiedenen Haptiken. Dabei zeigt sich, dass bei einer hervorragenden haptischen Rückmeldung (Haptik 1) die ganzheitliche Wertigkeit eines Tasters durch das Schaltergeräusch nicht gesteigert werden kann. Dem gegenüber steht bei einer mittleren bis schlechten Haptik eine deutliche Verbesserung des Gesamturteils mithilfe des Schaltergeräusches (Haptik 2+Haptik 3). Bei Haptik 2 kann davon ausgegangen werden, dass bei einer relativ schlechten haptischen Rückmeldung die Gesamtbewertung durch das Schaltergeräusch nicht wesentlich verschlechtert werden kann.

Bei der Analyse des Einflusses des Schaltergeräusches auf die ganzheitliche Wertanmutung eines Tasters ergaben sich die in **Abbildung 4.6.2** dargestellten Ergebnisse. Sie lassen erkennen, dass die Variation der Haptik selbst bei einem hervorragenden Schaltergeräusch (Grundgeräusch C) zu einer Verbesserung des gesamten Wertigkeitsurteils führen kann. Darüber hinaus zeigt Schaltergeräusch C außerdem, wie eine ungeeignete Auswahl der haptischen Rückmeldung zu deutlichen Einbußen (bis zu 50 %) in der Wertigkeit des Tasters führen kann.

Zusammenfassend lässt sich aus diesen Ergebnissen ableiten, dass die haptische Wahrnehmung im Hinblick auf die subjektive, ganzheitliche Bewertung eines Tasters einen etwas höheren Stellenwert einnimmt als die akustische Wahrnehmung, die damit die weniger dominante Größe darstellt.

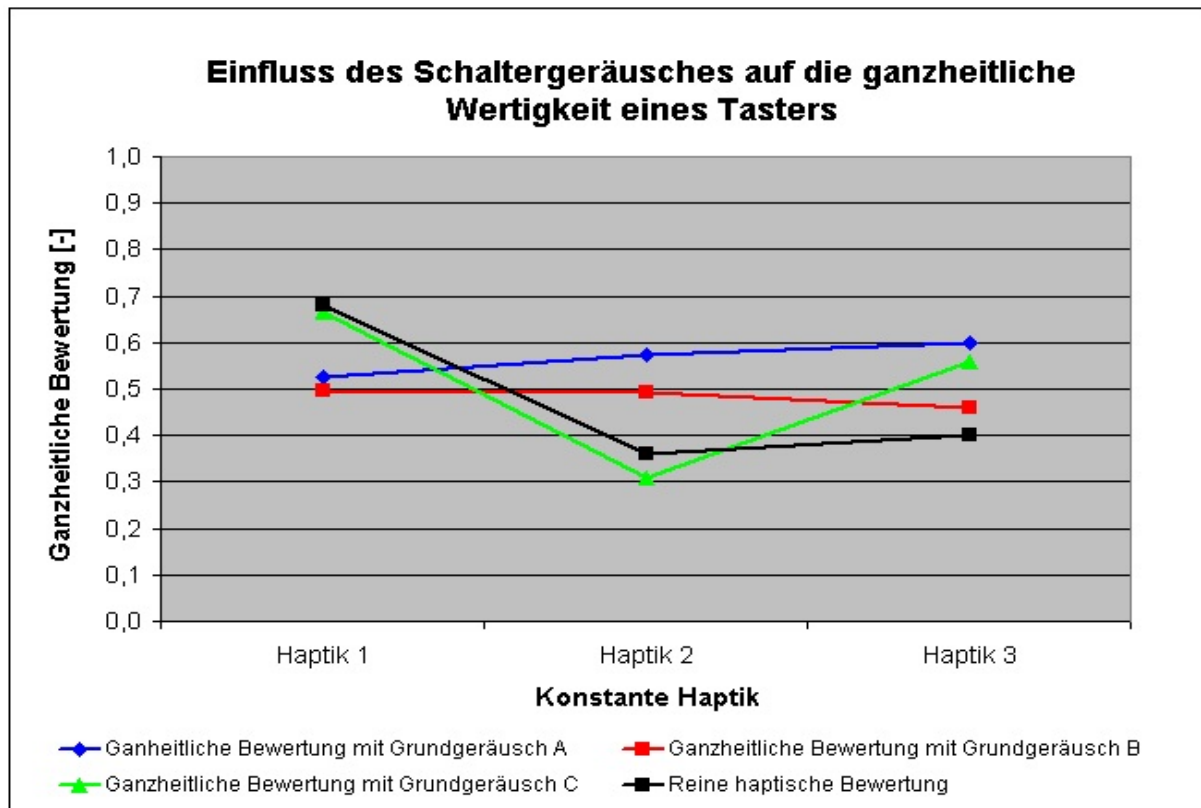


Abbildung 4.6.1: Einfluss des Schaltergeräusches auf die Wertigkeit eines Tasters.

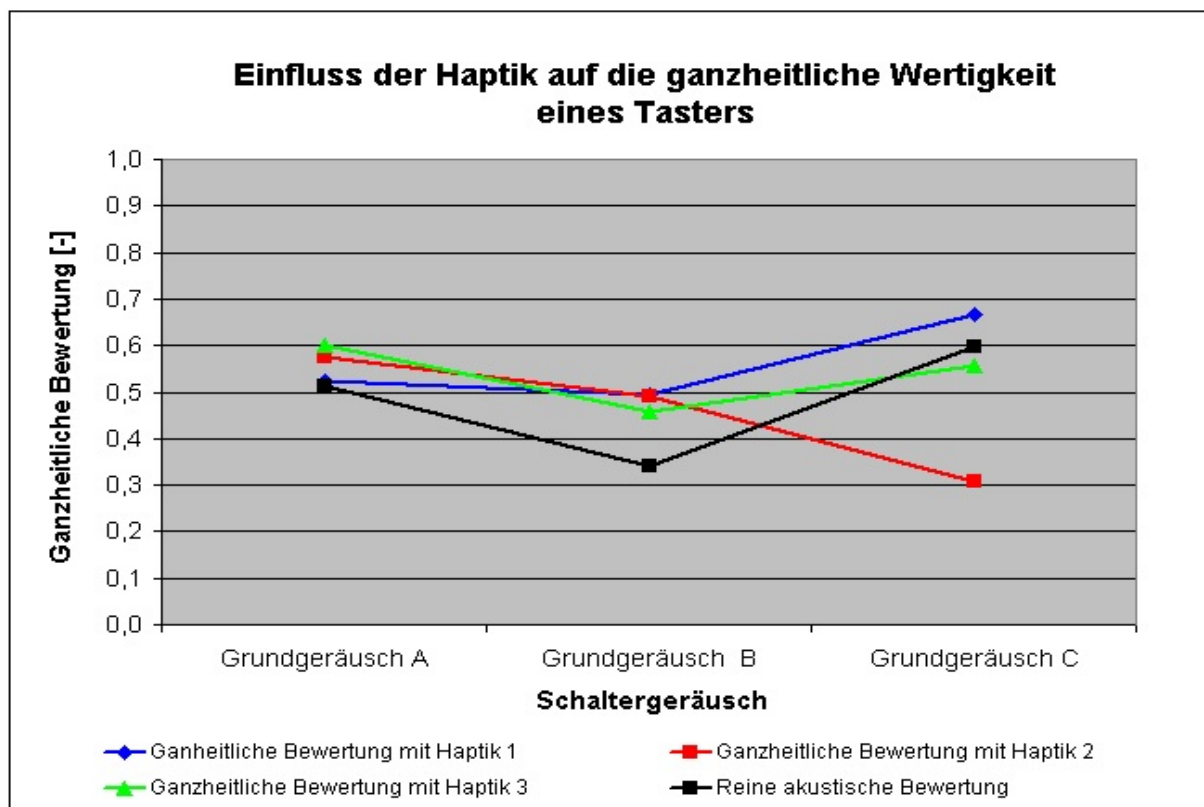


Abbildung 4.6.2: Einfluss der Haptik auf die Wertigkeit eines Tasters.

4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mithilfe der Definition des Wertanmutungsindex im Bereich der haptischen Wahrnehmung bei Tastern und Drehschaltern wurden die neu gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und dadurch eine Möglichkeit geschaffen, die subjektiv erlebbare haptische Wertigkeit eines Tasters oder Drehschalters aktiv zu gestalten. Dies wurde durch die Beschreibung der komplexen Wechselwirkungen zwischen den physikalischen Eigenschaften beider Bedienelemente und der subjektiv erlebbaren Wertigkeit bei ihrer Betätigung ermöglicht. Allerdings ist dieser Index nicht als feste Formel zu betrachten, da eine latente Stichprobenabhängigkeit vermutet wird. Diese Stichprobenabhängigkeit kann minimiert werden, indem eine sogenannte Kreuzvalidierung – Überprüfung des aufgestellten statistischen Modells mithilfe einer zweiten Stichprobe – durchgeführt wird, und dadurch die gefundenen Parameterwerte überprüft werden. Weiterhin konnten aus den durchgeführten empirischen Versuchen Erkenntnisse über haptische Präferenzen bei der Bedienung von Tastern und Drehschaltern gewonnen werden, die anschließend in einer Empfehlung zur konstruktiven Gestaltung von haptisch optimierten Tastern und Drehschaltern mündeten.

Die Validierung der bekannten psychoakustischen Empfindungsgrößen „Tonhöhe“ und „Schärfe“ auf dem Gebiet der transienten Schaltergeräusche hatte zum Ergebnis, dass bei den Schaltergeräuschen nur die Tonhöhe zuverlässig zur Beschreibung von subjektiven Hörempfindungen benutzt werden kann. Weiterhin ergab die Auswertung der empirischen Daten eine präferierte Tonhöhe für Schaltergeräusche, die ebenfalls in die Gestaltungsempfehlung einfluss.

Im Rahmen der Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen der haptischen und der akustischen Wahrnehmung bei der ganzheitlichen Beurteilung eines Tasters konnte empirisch nachgewiesen werden, dass das ganzheitliche Wertigkeitsurteil durch die haptische Rückmeldung stärker beeinflusst wird. Trotzdem kann mithilfe der weniger dominanten akustischen Wahrnehmung eine schlechte haptische Rückmeldung in bestimmten Grenzen ausgeglichen werden.

5 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Die im vorherigen Teil dargestellten Ergebnisse werden im Folgenden ausführlich interpretiert und diskutiert. Im ersten Abschnitt wird zunächst auf Auffälligkeiten in den Messwerten eingegangen, die durch Unsicherheiten der Probanden bei der Beurteilung der erfragten Eigenschaft auftreten können. Die im nachfolgenden Abschnitt vorgenommene Diskussion der Hypothesen erfolgt vor dem Hintergrund dieser Auffälligkeiten. Da die Ergebnisse verschiedene Interpretationsmöglichkeiten zulassen, werden sowohl hypothesekonforme als auch hypothesewiderlegende Erklärungsansätze vorgestellt. Deren Bedeutung soll anschließend im Hinblick auf die Beibehaltung bzw. Verwerfung der Hypothesen aufgezeigt werden. Im dritten Abschnitt wird die Untersuchung kritisch reflektiert. Hier erfolgt eine Betrachtung des Untersuchungsvorgehens, der Untersuchungssituation und der eingesetzten Instrumente. Zudem wird die Repräsentativität der ausgewählten Stichprobe diskutiert.

5.1 Anmerkung zur Bewertung der Probanden

Im Allgemeinen konnten die Probanden die Unterschiede zwischen den Proben relativ gut wahrnehmen. Dies spiegelt sich darin wider, dass sich die durchschnittlichen Urteile für die Versuchsobjekte voneinander abheben. Insgesamt gingen die Probanden mit der Vergabe von sehr hohen und sehr niedrigen Werten zurückhaltend um, sodass sich die Urteile vorwiegend im mittleren Skalenbereich von 0,3 bis 0,7 befinden. Diese „vorsichtige“ Bewertung seitens der Probanden könnte zum einen dadurch erklärt werden, dass eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Beurteilungen vorlag. Zum anderen wird von Personen im Alltag selten gefordert, mithilfe des Tastsinns bzw. des Hörsinns den Preis, die Echtheit oder die Wertigkeit von Gegenständen einzuschätzen, sodass die Aufgabe auf den ersten Blick gewiss ungewöhnlich und irritierend erscheint.

5.2 Diskussion der Hypothesen

Die erste Hypothese (H 1), die der akustischen Wahrnehmung am Beispiel der Betätigung eines Tasters aufgrund biologischer Gegebenheiten einen höheren Stellenwert einräumte als der haptischen Wahrnehmung, konnte nicht bestätigt werden. Im Gegenteil wurde die Hypothese durch die beschriebenen Ergebnisse eindeutig widerlegt.

Die zweite Hypothese (H 2), die den Versuchspersonen eine bessere Differenzierbarkeit der Betätigungskräfte als der Betätigungswege unterstellte, konnte in ihrer ursprünglichen Formulierung nicht erhärtet werden. Es ergaben sich keine Hinweise auf eine bessere Differenzierbarkeit von Bedienkräften als von Betätigungswegen durch die Probanden. Es ließen sich jedoch Anhaltspunkte für die berechnete Schlussfolgerung finden, dass die Betätigungswege im Rahmen der ganzheitlichen Beurteilung besser zu differenzieren sind als die Betätigungskräfte, wodurch Ersteren ein höherer Stellenwert zukommt.

Die Resultate der durchgeführten Faktorenanalysen bei der Untersuchung der Taster und Drehschalter konnten die dritte Hypothese (H 3), die besagte, dass einzelne physikalische Parameter keinen signifikanten Einfluss auf die Wertanmutung haben, in hervorragender Weise untermauern. Erwartungskonform bildeten sich hier aus allen untersuchten physikalischen Merkmalen mehrere Gruppen – die Faktoren – aus. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass einzelne physikalische Parameter keinen signifikanten Einfluss auf die haptische Wertanmutung haben. Als Sonderfall erwies sich hier der Parameter „Snap“.

Aufgrund der ungünstigen Zusammensetzung der Stichprobe bezüglich des demografischen Merkmals Geschlecht (90 % männliche Probanden) konnte die aufgestellte vierte Hypothese (H 4), die Frauen eine Affinität zu geringeren Betätigungskräften unterstellte, nicht untersucht werden.

Die Untersuchung hinsichtlich des Alters der Probanden konnte die aufgestellte fünfte Hypothese (H 5), die den verschiedenen Altersgruppen signifikante Unterschiede sowohl in der haptischen als auch in der akustischen Wahrnehmung unterstellte, teilweise bestätigen. So konnte die Existenz eines starken Zusammenhangs zwischen dem Alter der Probanden und ihrer haptischen Präferenz bei den Tastern nachgewiesen werden. Bei den Schaltergeräuschen dagegen konnten keine signifikanten Korrelationen nachgewiesen werden.

Die untersuchte sechste Hypothese (H 6), die von einem signifikanten Einfluss der physikalischen Parameter „Rastpositionenanzahl“ und „Raddurchmesser“ auf die haptische Wertanmutung von Drehschaltern ausging, konnte teilweise untermauert werden. Die Ergebnisse der beschriebenen Faktorenanalyse und die Definition des haptischen Wertanmutungsindex brachten den Nachweis, dass der physikalische Parameter „Rastpositionenanzahl“ einen signifikanten Einfluss hat.

Die Untersuchung der siebten Hypothese (H 7), die den psychoakustischen Empfindungsgrößen „Tonhöhe“ und „Schärfe“ einen direkten Zusammenhang mit der akustischen Wertigkeit eines Schaltergeräusches unterstellte, ließ sich teilweise bestätigen. Die entsprechenden Ergebnisse zeigten einen hohen positiven Zusammenhang zwischen der Tonhöhe und der Wertigkeit. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Schärfe und der Wertanmutung eines Schaltergeräusches konnte hingegen nicht nachgewiesen werden.

5.3 Kritische Betrachtung der Studie

Im Folgenden werden methodische Aspekte der Untersuchung sowie mögliche Probleme bei der Stichprobenauswahl kritisch reflektiert.

5.3.1 Datenerhebungs- und Auswertungsmethode

Als Datenerhebungsmethode wurden Ratingskalen eingesetzt. Dabei wurde die Möglichkeit, dass Urteilsfehler wie eine Antworttendenz auftreten, bewusst in Kauf genommen. Die Entscheidung für die Verwendung von Ratingskalen fiel unter anderem aus pragmatischen Gründen. Schließlich sollten vier Teilversuche mit insgesamt 86 Versuchsobjekten bei einer Stichprobe von 60 Personen durchgeführt werden.

Ratingskalen eigneten sich für die vorliegende Untersuchung auch insofern, als sie auf unkomplizierte Weise Urteile erzeugen, die als intervallskaliert interpretiert werden können. Für zukünftige Untersuchungen könnte überlegt werden, ob andere Erhebungsmethoden (z. B. ein vollständiger Paarvergleich) angebrachter sind.

Insbesondere bei der Beurteilung der Wertanmutung mithilfe von Ratingskalen ist das Auftreten einer Unsicherheit bei der Urteilsabgabe sehr wahrscheinlich. So könnte der Proband die Extremkategorien der Beurteilungsskala für Proben mit extremerer Merkmalsausprägung „reservieren“, die dann aber nicht folgen. Somit würde eine zentrale Tendenz in den Urteilen vorherrschen und eine letztlich zu geringe Streuung der Urteile vorliegen. Um diesen Nachteil zu minimieren, wurde nach der Einweisung der Versuchsperson und vor der eigentlichen Beurteilung der Proben eine Explorationsphase gewährt, in der sich der Proband mit dem Untersuchungsmaterial vertraut machen konnte und ein Verständnis für den Ursprung und die Einheit der verwendeten Ratingskala entwickeln konnte. Die Entscheidung für eine Explorationsphase vor dem eigentlichen Versuch folgte einem Vorschlag von [Bortz & Döring, 2002].

Als Auswertungsmethode wurde die Regressionsanalyse mit vorgeschalteter Faktorenanalyse ausgewählt. Dieses Vorgehen wurde hauptsächlich durch das ausgewählte Versuchsdesign begründet. Weiterhin bietet sich an dieser Stelle die Möglichkeit zur Durchführung einer Varianzanalyse mit Messwiederholung an, die wiederum ein angepasstes Versuchsdesign voraussetzt. Durch diese Vorgehensweise ist eine Anpassung der berechneten Wertanmutungsindizes durchaus denkbar.

5.3.2 Auswahl der Stichprobe

Der Umfang der Stichprobe von 60 Personen erwies sich für die vorliegende Studie als angemessen. Bezüglich der Repräsentativität der Stichprobe erschien es nicht notwendig, sämtliche in Frage kommenden demografischen Merkmale bei der Auswahl der Versuchspersonen zu berücksichtigen. Schließlich sind nur wenige Faktoren bekannt, die die haptische Wahrnehmung beeinflussen. [Bortz & Döring, 2002] schreiben in diesem Zusammenhang: „Wenn man weiß, dass Merkmale (...), die üblicherweise bei der Zusammenstellung einer repräsentativen Stichprobe eine Rolle spielen, für die untersuchte Variable völlig unbedeutend sind, man also keine Merkmale kennt, die mit der untersuchten Variable kovariieren, leistet jede beliebige Stichprobe mit weniger Aufwand dasselbe wie eine sorgfältig zusammengestellte repräsentative Stichprobe.“

Ein Beispiel für ein solches Merkmal wäre die soziale Schicht, der die Probanden entstammen. Möglich ist, dass die soziale Schicht das individuelle Wissen der Personen mit prägt, das sich wiederum auf die Wahrnehmung auswirkt. Inwieweit dieses und andere Merkmale jedoch die haptische und akustische Wahrnehmung beeinflussen, müsste in zusätzlichen Untersuchungen überprüft werden.

Weiterhin wird davon ausgegangen, dass es bei einer Wiederholung der Untersuchungen mit einer anderen Stichprobe zu leichten Abweichungen in den berechneten Parametern der haptischen Wertanmutungsindizes kommen kann. Dies liegt daran, dass die formelhaftigen Indizes stichprobenabhängig sind. Daher wird an dieser Stelle eine Überprüfung bzw. Anpassung des statistischen Modells mithilfe einer Kreuzvalidierung empfohlen.

5.3.3 Untersuchungsinstrumente und -situation

Die Untersuchung fand unter Laborbedingungen statt, was sich erwartungskonform auf die externe Validität der Studie auswirkt. Es stellt sich folglich die häufig diskutier-

te Frage, ob die Ergebnisse aufgrund der Unnatürlichkeit der Untersuchungsumgebung auch auf andere, „natürlichere“ Situationen wie z. B. das direkte Bedienen von Tastern und Drehschaltern im Fahrzeug übertragbar sind. Allerdings kann die separate Untersuchung der haptischen Wahrnehmung ebenfalls als „unnatürliche“ Situation gedeutet werden. Wie [Guski, 1996] feststellt, geschieht das Wahrnehmen normalerweise in einem System, in dem „alle sensorischen und motorischen Elemente integriert sind und zusammenarbeiten“. Daher ist eine Übertragung der Ergebnisse auf Situationen außerhalb des Labors nur unter Vorbehalt möglich.

Die Durchführung der Untersuchung unter Laborbedingungen schien dennoch gerechtfertigt, da hier die Vergleichbarkeit der Untersuchungssituation sowie die Kontrolle von Störgrößen besser gewährleistet werden konnte. Die haptische Wahrnehmung bei der Betätigung von Bedienelementen hätte ebenso direkt im fahrenden Fahrzeug untersucht werden können, was realitätsnah gewesen wäre. Neben dem enormen Aufwand der Fahrzeugbeschaffung wäre jedoch die aus heutiger Sicht technisch nicht umsetzbare Integration der Versuchsträger ins Cockpit extrem problematisch gewesen. Außerdem ist die Durchführung einer solchen Studie in einem fahrenden Fahrzeug aus reinen Sicherheitsgründen nicht vorstellbar.

Für die Entscheidung, die Studie unter Laborbedingungen durchzuführen, sprach außerdem die Möglichkeit, den Versuchsaufbau durch geeignete Apparaturen so zu gestalten, dass eine Trennung des haptischen Sinneskanals vom akustischen vorgenommen werden konnte.

Die an dem Experiment teilnehmenden Probanden entstammten einer Probandenkartei der Fa. DaimlerChrysler AG, in der Personen verzeichnet sind, die sich in der Vergangenheit für andere Versuchsteilnahmen bereit erklärt hatten. Da viele dieser untersuchten Personen bei vorangegangenen Versuchen bereits als Testpersonen zur Verfügung gestanden hatten, war ihnen die allgemeine Untersuchungssituation vertraut.

5.3.4 Interpretationsumfang der Ergebnisse

Die vorliegende Untersuchung wurde für den Bereich der haptischen und akustischen Wahrnehmung (vgl. Kapitel 2.2, Definition der haptischen Wahrnehmung) konzipiert und durchgeführt. Demzufolge finden die beschriebenen Ergebnisse hinsich-

tlich der Objektivierung der Wertigkeit von Stellteilen ihre Gültigkeit nur in diesen zwei Bereichen. Eine pauschale Übertragung der vorliegenden Resultate auf die Objektivierung des ganzheitlichen subjektiven Wertigkeitserlebnisses (vgl. Kapitel 2.1, Definition des ganzheitlichen Wertigkeitserlebnisses) bei der Betätigung eines Stellteils ist nicht möglich.

Weiterhin ist eine Übertragung der vorliegenden Ergebnisse auf andere Stellteile nur sehr bedingt möglich. Unterschiedliche Funktions- und Konstruktionsprinzipien bei der Gestaltung von Stellteilen sowie in dieser Arbeit nicht in Betracht gezogene Drittfaktoren (wie z. B. spezifische ergonomische Anforderungen oder spezifische mentale Belastungen) können große Bedeutung für die Berechnung der Wertanmutungsindizes haben. In solchen Fällen ist eine Validierung der Anwendung des berechneten statistischen Modells empfehlenswert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die systematische Entwicklung von Kenngrößen zur Quantifizierung der haptischen Wertanmutung von Tastern und Drehschaltern. Dieses Ziel wird durch ein empirisches Experiment vor dem Hintergrund der ingenieurwissenschaftlichen Betrachtung des haptischen Sinneskanals erreicht. Die systematische Entwicklung der Kenngrößen beginnt mit der Analyse der physikalischen Eigenschaften von Tastern und Drehschaltern sowie mit den technischen Möglichkeiten ihrer messtechnischen Behandlung. Nach der Extraktion der Untersuchungsgegenstände wird eine populationsbeschreibende Probandenuntersuchung konzipiert und durchgeführt. Ziel der Studie sind empirische Erkenntnisse über die subjektiven haptischen Präferenzen bei der Bedienung von Tastern und Drehschaltern. Die gewonnenen Einsichten werden anschließend zur Beschreibung der komplexen Wechselwirkungen zwischen den physikalischen Eigenschaften von Tastern und Drehschaltern und der subjektiv wahrgenommenen Wertigkeit bei ihrer Betätigung verwendet. Die Bestimmung der beschreibenden Kenngrößen findet mithilfe eines statistischen Regressionsmodells statt, das die empirischen Präferenzdaten und die definierten physikalischen Eigenschaften integriert und analysiert. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse werden in zwei Wertanmutungsindizes zusammengefasst, die die Form einer Formel besitzen. Durch diese Indizes wird eine neue Möglichkeit geschaffen, die haptische Gestaltung von Tastern und Drehschaltern schon in ihrer frühen Entwicklungsphase aktiv zu gestalten. Dadurch bilden diese Wertanmutungsindizes auch eine sinnvolle Ergänzung zur physikalischen Messtechnik.

Weiterhin wird im Rahmen der Arbeit eine Validierung der psychoakustischen Kenngrößen „Tonhöhe“ und „Schärfe“ im Bereich der transienten Schallereignisse durchgeführt. Dies geschieht erneut in Form einer populationsbeschreibenden Untersuchung, deren Ziel die Ermittlung der akustischen Präferenz ist und die am Beispiel des Schaltergeräusches eines Tasters stattfindet. Die Resultate machen deutlich, dass die Empfindungsgröße „Tonhöhe“ im Gegensatz zur Kenngröße „Schärfe“ gut geeignet ist für Beschreibung der subjektiv wahrnehmbaren Wertigkeit von Schaltergeräuschen.

Auch die Frage nach der Wechselwirkung zwischen der haptischen und der akustischen Wahrnehmung bei der Bildung eines ganzheitlichen Wertigkeitsurteils am Beispiel der Betätigung eines Tasters wird untersucht. Die Analyse zeigt, dass die haptische Wahrnehmung im Hinblick auf die subjektiv wahrnehmbare Wertigkeit eines Tasters einen etwas höheren Stellenwert besitzt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in den Entwicklungsprozess von Stellteilen einzubringen wäre die logische Folge einer ingenieurwissenschaftlichen Arbeit. Gleichzeitig sollen jedoch folgende weiterführende Untersuchungsansätze nicht vernachlässigt werden:

Zum einen sollte das berechnete Regressionsmodell mithilfe einer zweiten repräsentativen Stichprobe, d. h. durch die Durchführung einer Kreuzvalidierung, geprüft bzw. angepasst werden. Die Ergebnisse dieser Forschungstätigkeit können dann auf die haptische Gestaltung von anderen Stellteilen übertragen werden.

Zum anderen sollte unter Berücksichtigung weiterer Wahrnehmungsmodalitäten des Menschen (z. B. optische Wahrnehmung) und/oder unter Berücksichtigung anderer Interaktionsarten (Menüauswahl, Buchstabeneingabe etc.) eine weiterführende Untersuchung stattfinden. Dies würde zu einer sinnvollen Erweiterung des definierten Wertanmutungsindex führen und einen weiteren Schritt in Richtung der vollständigen Beschreibung des subjektiven, ganzheitlichen Wertigkeitserlebnisses darstellen.

Mit den vorliegenden praktischen Ergebnissen, vor allem die Indizes, ist die erstmalige Entwicklung eines Grundsatzes gelungen, mit dem die Objektivierung des subjektiven Wertigkeitserlebnisses bei der Betätigung von Stellteilen in der frühen Entwicklungsphase realisiert werden kann und eine neue Ausgangsbasis für weiterführende Forschungsarbeiten angeboten wird.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.4.1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise.....	12
Abbildung 2.1.1: Übersicht über die Entstehung eines subjektiven Wertigkeitserlebnisses, beeinflusst durch die technischen Eigenschaften eines Bedienelementes	14
Abbildung 2.2.1: Darstellung einer taktilen Druckwahrnehmung	16
Abbildung 2.2.2: Anatomischer Aufbau der Haut [Deetjen & Speckmann, 1999].	19
Abbildung 2.2.3: Anatomischer Aufbau der Merkel-Zellen [Kahle, 2002].....	19
Abbildung 2.2.4: Anatomischer Aufbau der Meissner-Körperchen [Kahle, 2002].	19
Abbildung 2.2.5: Anatomischer Aufbau der Pacini-Körperchen [Kahle, 2002].	20
Abbildung 2.2.6: Anatomischer Aufbau der Ruffini-Körperchen [Universität Bern, Inst. für Physiologie].	20
Abbildung 2.2.7: Anordnung von Muskelrezeptoren [Deetjen & Speckmann, 1999].	23
Abbildung 2.2.8: Erregung einer Ib-Faser durch Kontraktion [Deetjen & Speckmann, 1999].....	23
Abbildung 2.2.9: Anatomischer Aufbau eines Sehnenorgans [Universität Bern, Inst. für Physiologie].	23
Abbildung 2.2.10: Anatomischer Aufbau einer Muskelspindel [Universität Bern, Inst. für Physiologie].	24
Abbildung 2.3.1: Anatomischer Aufbau des menschlichen Ohrs [Schmidt, 2005]. ...	25
Abbildung 2.3.2: Schema von Mittelohr und Cochlea [Schmidt, 2005].	26
Abbildung 2.3.3: Querschnitt durch die Cochlea [Goldstein, 1997].....	26
Abbildung 2.4.1: Lautheitskurve [Zwicker, 1982].	29
Abbildung 2.4.2: Empfindungsfunktion der Tonhöhe [Zwicker, 1982].	30
Abbildung 2.4.3: Fourier-Spektren einer Geige für einen Ton mit einer Grundfrequenz von 440 Hz [Goldstein, 1997].....	31
Abbildung 2.6.1: Vorgehensweise bei der Darstellung vom momentanen Stand der Technik	33
Abbildung 2.6.2: Bezeichnungssystematik für Stellteile im Kraftfahrzeug [Zeilinger, 2005].....	34
Abbildung 2.6.3: Vereinfachte Struktur eines MMS als Regelkreis [Timpe, 2002]. ...	36
Abbildung 2.6.4: Hierarchisches Bearbeitungsmodell bei der Konzeption von Stellteilen [Bullinger, 1994].	36

Abbildung 2.6.5: Greifraum eines Fahrers, ermittelt mit der Ergonomiesoftware RAMSIS	37
Abbildung 2.6.6: Auszug aus den relevanten Greifarten im Kraftfahrzeug [Zeilinger, 2005].....	37
Abbildung 2.6.7: Tribologisches System [Wikipedia, 2008].	40
Abbildung 2.6.8: Spiel eines Drehschalterrastwerks.....	40
Abbildung 2.6.9: Mikroschalter der Fa. RAFI [RAFI, 2008].	41
Abbildung 2.6.10: Abbildung einer Schnappscheibe (links) und einer Schaltmatte (rechts) [Marquardt, 2008; Sateco, 2008].	42
Abbildung 2.6.11: Darstellung verschiedener Konstruktionsprinzipien mit dazugehörigem Kraft-Weg-Verlauf bei einer Schaltmatte [Sateco, 2006].....	43
Abbildung 2.6.12: Mikroschalter mit Zwischenbetätiger aus Silikon [Marquardt, 2008].	44
Abbildung 2.6.13: Darstellung der Schaltkulissen mit dazugehörigem Drehmoment- Winkel-Verlauf	46
Abbildung 2.6.14: Typischer Kraft-Weg-Verlauf eines Tasters	48
Abbildung 2.6.15: Typischer Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf eines Drehschalters (nur Rechtsdrehung dargestellt)	48
Abbildung 2.6.16: Industrieroboter mit Hightech-Multisensorik-Kopf [Battenberg, 2008].....	49
Abbildung 2.6.17: Veranschaulichung der Entstehung von Querkräften an Betätigungsflächen	50
Abbildung 2.6.18: Binaurales Kunstkopfmesssystem [HEAD acoustics, 2006].	50
Abbildung 2.6.19: Aufbau und Bild des Tastensimulators [Doerrer, 2003].	52
Abbildung 2.6.20: Präferierte Kennlinien einer Taste (gestrichelte Linie zeigt die Größe der Rückstellkraft) [Doerrer, 2003].....	54
Abbildung 3.1.1: Taktile Flächendrucksensor [Althen, 2006].....	60
Abbildung 3.1.2: Kraft-Weg-Verläufe der verwendeten Taster.	61
Abbildung 3.1.3: Mit dem Flächendrucksensor gemessener Zeitverlauf der Betätigungskraft.....	61
Abbildung 3.1.4: Haptiksimulatoren der Fa. Immersion [Immersion, 2006].	62
Abbildung 3.3.1: Definition messtechnischer Merkmale bei den Tastern.	68
Abbildung 3.3.2: Definition messtechnischer Merkmale bei den Drehschaltern.	71

Abbildung 3.3.3: Zeitverlauf (Mitte) und Frequenzanalyse (unten) eines Schaltergeräusches.	75
Abbildung 3.4.1: Bipolare siebenstufige Beurteilungsskala	77
Abbildung 3.4.2: Allgemeine Beschreibung der Stichprobe.....	79
Abbildung 3.4.3: Versuchsträger für die Tasterprototypen.....	80
Abbildung 3.4.4: Anordnung der Prototypen in einer Versuchsbox.	80
Abbildung 3.4.5: Versuchsaufbau des ersten und zweiten Teilversuches.	83
Abbildung 3.4.6: Kraft-Weg-Verläufe der ausgewählten Taster für den zweiten Teilversuch.	85
Abbildung 3.4.7: Versuchsaufbau des dritten Teilversuches.	86
Abbildung 3.4.8: Versuchsaufbau des vierten Teilversuches.	87
Abbildung 4.1.1: Bewertungen und Streuungen bei der Beurteilung der Taster.	90
Abbildung 4.1.2: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe des hochwertigsten und des minderwertigsten Tasters.....	90
Abbildung 4.1.3: Korrelation zwischen Werturteil und Standardabweichung.....	93
Abbildung 4.1.4: Übersicht über die normierten Präferenzindizes.....	93
Abbildung 4.1.5: Wertungskorrelationen bei den Tastern.....	94
Abbildung 4.1.6: Korrelation zwischen Werturteil und Präferenzindex (PI).....	94
Abbildung 4.1.7: Kategorien zur Begründung der Best-worst-Auswahl.	95
Abbildung 4.1.8: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung für alle Taster.....	100
Abbildung 4.1.9: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung mit Bewertung des Gesamtwegs.....	100
Abbildung 4.1.10: Vergleich der untersuchten Kraft-Weg-Verläufe.	101
Abbildung 4.2.1: Bewertung der UV-Rastpositionenanzahl.	102
Abbildung 4.2.2: Ähnlichkeitsurteile im Hinblick auf den Parameter „Rastpositionenanzahl“.	103
Abbildung 4.2.3: Korrelationen zwischen der Rastpositionendifferenz und der subjektiven Unterscheidbarkeit.	104
Abbildung 4.2.4: Bewertungen des Parameters „Drehmoment“.	105
Abbildung 4.2.5: Ähnlichkeitsurteile hinsichtlich des Parameters „Drehmoment“. ...	106
Abbildung 4.2.6: Korrelationen zwischen der Drehmomentdifferenz und der subjektiven Unterscheidbarkeit.	106
Abbildung 4.2.7: Bewertungen des Parameters „Raddurchmesser“.	107

Abbildung 4.2.8: Ähnlichkeitsurteile hinsichtlich des Parameters „Raddurchmesser“.	108
Abbildung 4.2.9: Korrelationen zwischen der Raddurchmesserdiffereenz und der subjektiven Unterscheidbarkeit.	108
Abbildung 4.2.10: Bewertungen des Parameters „Drehmomentverlauf“	109
Abbildung 4.2.11: Ähnlichkeitsurteile hinsichtlich des Parameters „Drehmomentverlauf“	110
Abbildung 4.2.12: Wertungskorrelationen bei den Drehschaltern.	111
Abbildung 4.2.13: Korrelationen hinsichtlich des Parameters „Rastpositionenanzahl“.	113
Abbildung 4.2.14: Korrelationen hinsichtlich des Parameters „Drehmoment“	114
Abbildung 4.2.15: Korrelationen hinsichtlich des Parameters „Raddurchmesser“	115
Abbildung 4.2.16: Korrelationen hinsichtlich des Parameters „Drehmomentverlauf“.	115
Abbildung 4.3.1: Bewertungen der Grundgeräusche.	116
Abbildung 4.3.2: Wertungsurteile bei Grundgeräusch A.	117
Abbildung 4.3.3: Wertungsurteile bei Grundgeräusch B.	118
Abbildung 4.3.4: Wertungsurteile bei Grundgeräusch C.	119
Abbildung 4.3.5: Begründungskategorien hinsichtlich der Schaltergeräusche.	121
Abbildung 4.3.6: Wertungskorrelationen hinsichtlich der Schaltergeräusche.	123
Abbildung 4.3.7: Wertungskorrelationen zwischen den Parametern „Tonhöhe“ und „Schärfe“.	123
Abbildung 4.3.8: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung bei Grundgeräusch A.	124
Abbildung 4.3.9: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung bei Grundgeräusch B.	125
Abbildung 4.3.10: Korrelationen zwischen Alter und Bewertung bei Grundgeräusch C.	125
Abbildung 4.6.1: Einfluss des Schaltergeräusches auf die Wertigkeit eines Tasters.	132
Abbildung 4.6.2: Einfluss der Haptik auf die Wertigkeit eines Tasters.	132
Abbildung A.1: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 1 bis 8	163
Abbildung A.2: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 9 bis 16	164
Abbildung A.3: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 17 bis 24	165

Abbildung A.4: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 25 bis 32	166
Abbildung A.5: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 33 bis 37	167
Abbildung B.1: Drehmoment-Drehwinkel-Verläufe der Drehschalter 1 bis 8	171
Abbildung B.2: Drehmoment-Drehwinkel-Verläufe der Drehschalter 9 bis 16	172
Abbildung B.3: Drehmoment-Drehwinkel-Verläufe der Drehschalter 17 bis 19	173
Abbildung C.1: Grundgeräusch A: Darstellung der Variation „Tonhöhe“	176
Abbildung C.2: Grundgeräusch A: Darstellung der Variation „Schärfe“	176
Abbildung C.3: Grundgeräusch B: Darstellung der Variation „Tonhöhe“	177
Abbildung C.4: Grundgeräusch B: Darstellung der Variation „Schärfe“	177
Abbildung C.5: Grundgeräusch C: Darstellung der Variation „Tonhöhe“	178
Abbildung C.6: Grundgeräusch C: Darstellung der Variation „Schärfe“	178
Abbildung E.1: Pfaddiagramm eines Zwei-Faktoren-Modells mit vier manifesten (Y-) Variablen.....	197
Abbildung E.2: Streuungszerlegung	202

8 Literaturverzeichnis

- Anguelov, N.:** Analyse von Anordnungskonzepten für Bedienelemente in PKW-Innenräume, Studienarbeit, Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau, Universität Stuttgart, 2002
- ALTHEN GmbH:** Internetpräsenz unter <http://www.althen.de>, Stand Mai 2005
- Aristoteles:** Über die Seele, Akademie-Verlag 1986, Aristoteles Werke
- Ayres, A. J.:** Bausteine der kindlichen Entwicklung. 3. Auflage Springer-Verlag, Berlin 2002, ISBN 3-540-63741-9
- Battenberg Robotic GmbH & Co. KG:** Internetpräsenz unter www.battenberg.biz, Stand Februar 2008
- Backhaus, K.; Plinke, W.; Weiber, R.; Erichson, B.:** Multivariate Analyse Methoden – eine anwendungsorientierte Einführung, Springer-Verlag Berlin 2003, ISBN 3-540-00491-2
- Baumann, P.:** Erkenntnistheorie, Verlag J.B. Metzler 1998, ISBN 3-476017-63-X
- Baur, N.:** Wie kommt man von den Ergebnisse der Faktorenanalyse zu Dimensionsvariablen, Eine Einführung in die Dimensionsbildung mit SPSS für Windows, 2. korrigierte Auflage, Bamberger Beiträge zur empirischen Sozialforschung Nr. 13 2003, ISSN 1611-583X
- Baur, N.; Schulze, G.:** Multiple lineare Regressionsanalyse, Eine Einführung für Sozialwissenschaftler mit SPSS für Windows, Bamberger Beiträge zur empirischen Sozialforschung Nr. 10 2003, ISSN 1611-583X
- Birbaumer, N.; Schmidt, R. F.:** Biologische Psychologie, 2. Auflage, Springer Verlag Heidelberg 1991, ISBN 3-540539-30-1
- Bischof, N.:** Stellungs-, Spannungs- und Lagewahrnehmung, Verlag für Psychologie Göttingen 1974
- Bischofberger, W.:** Aspekte der Entwicklung Taktil-Kinaesthetischer Wahrnehmung, Neckar-Verlag Villingen-Schwenningen 1989, ISBN 3-7883-0256-9
- BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung.:** Erforschung der menschliche Sinne – Funktionen und Leistungen, Störungen und Therapien, Online-Publikation, Berlin 2006
- Bodden, M.; Grabke, J.; Hartung, K., Rateitschek, K.:** Hörereignisausdehnung in Abhängigkeit von Anzahl, Dichte und Einfallsbereich der frühen seitlichen Reflexionen. Fortschritte der Akustik – DAGA 1995, DPG-GmbH, Bad Honnef, 935-938.

- Bodden, M.; Hartung, K., Rateitschek, K.:** Psychoakustische Untersuchungen zur Lokalisation in reflexionsbehafteter Umgebung. Fortschritte der Akustik – DAGA 1994, DPG-GmbH, Bad Honnef, 1169-1172.
- Bodden, M.; Meunier, S.:** Untersuchungen zur Detektion und Lokalisation von Intensitätsinkrementen in schmalbandigen Signalen. Fortschritte der Akustik – DAGA 1993, DPG-GmbH, Bad Honnef, 832-835.
- Bodden, M.; Heinrichs, R.; Linow, A.:** Vergleich psychoakustischer Methoden für den effizienten industriellen Einsatz. Fortschritte der Akustik – DAGA 1998, DPG-GmbH, Bad Honnef, 90-91.
- Bodden, M.; Canevet, G.; Grabke, J.; Hartung, K.; Takahashi, T.:** Räumliches Hören in komplexen akustischen Umgebungen. Fortschritte der Akustik – DAGA 1994, DPG-GmbH, Bad Honnef, 1137-1140.
- Bortz, J.; Döring, N.:** Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler, 3. überarbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin 2002, ISBN 3-540-41940-3
- Bubb, H.:** Haptik im Kraftfahrzeug, Springer Berlin, Heidelberg, 2001
- Bullinger, H.-J.:** Ergonomie - Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart 1994, ISBN 3-519-06366-2
- Chatziastros, A.:** Visuelle Kontrolle der Lokomotion, Dissertation, Justus-Liebig-Universität Giessen, Logos Verlag 2004, ISBN 3-8325-0379-X
- Chapanis, A.; Morgan, C.; Cook, J.; Lund, M.:** Human Engineering Guide For Equipment Design, McGraw-Hill Book Company 1963
- Cremer, L.:** Körperschall - Physikalische Grundlagen u. Technische Anwendungen, 2. vollständig neu bearbeitete Auflage Springer Verlag Berlin 1996, ISBN 3-540-54631-6
- DaimlerChrysler AG:** Pressemappe „Die neue Mercedes-Benz A-Klasse“, 2004
- Das Große Brockhaus:** 19., völlig neu bearbeitete Auflage, Mannheim 1992
- Deetjen, P.; Speckmann, E. J.:** Physiologie, 3. Auflage, Urban & Fischer Verlag 1999, ISBN 3-437-41316-3
- Degen, H.:** Entwicklung eines Wirkmodells für eine anspruchszentrierte Softwareproduktion, Dissertation, Berlin 1998
- Diller, H.:** Vahlens Großes Marketinglexikon. Vahlen Franz GmbH 1992, ISBN 3-800-61571-1

- DIN 33411:** Teil 1: Körperkräfte des Menschen, Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgroßen
- DIN 45630:** Grundlagen der Schallmessung, Physikalische und subjektive Größen von Schall, Beuth-Verlag Berlin Ausgabe 1971
- DIN 45631:** Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum, Verfahren nach E. Zwicker, Beuth-Verlag Berlin Ausgabe März 1991
- DIN 45681:** Akustik – Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung für Geräuschimmissionen, Beuth-Verlag Berlin Ausgabe 2006
- DIN EN 894-1:** Ausgabe Februar 1997, Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen, Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen
- DIN EN 894-3:** Ausgabe März 2000, Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen, Teil 3: Stellteile
- DIN EN 60651:** Schallpegelmesser (IEC 60651:1979 +A1:1993), Ausgabe 1994
- DIN EN 61672-1:** 2003-10 (DIN-IEC 651), Bewertungsfilter Lautstärke
- Doerrer, C.:** Entwurf eines elektromechanischen Systems für flexibel konfigurierbare Eingabefelder mit haptischer Rückmeldung, Dissertation 2003, Darmstadt
- Dubrowsky, A.:** Automobil-Entwicklung. Ausgabe März 2004, Rubrik: Innenraum – Ganzheitliche Produktbewertung
- Duden:** Deutsches Universalwörterbuch, 4. Auflage, Bibliographisches Institut Mannheim, Dudenverlag 2001, ISBN 3-411-05504-9
- Elbert, T.; Pantev, C.; Wienbruch, C.; Rockstroh, B.; Taub, E.:** Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players, 1995
- Enigk, H.:** Ein psychologisches Vorgehensmodell zur Entwicklung von Unterstützungssystemen für Kraftfahrzeuge, Verlag im Internet Berlin 2003 www.dissertation.de, ISBN 3-89825-731-2
- Enigk, H.:** Sinnliche Bewertung von Bedienrädern, Customer Research Center der Fa. DaimlerChrysler AG, Berlin 2005
- Fechner, G. T.:** Elemente der Psychophysik, Zweite unverändert Auflage, Druck und Verlag von Breitkopf & Härtel, Leipzig 1889
- Feng, Y.:** Entwicklung einer modularen Software zur automatischen Steuerung und Regelung von Robotern im Echtzeitmodus für haptische Prüfungen und Funk-

- tionstests, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart 2005
- Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen:** Geräuschgestaltung - Über die Psychoakustik zur Kundenzufriedenheit, FVV Frankfurt 1996
- Fresner, M.:** Untersuchung von Messmethoden zur Bestimmung eines einzelnen Lautheitswertes anhand realer Audiodaten, Diplomarbeit, Universität für Musik und darstellende Kunst, Institut für elektronische Musik und Akustik, Graz 2004
- Frey, B.:** Zur Bewertung von Anmutungsqualitäten. Fördergesellschaft Produkt-Marketing e.V., Köln 1993
- Fröhlich, W. D.:** dtv-Wörterbuch zur Psychologie. 15., bearbeitete und erweiterte Auflage, München 1987
- Geiser, C.:** Faktorenanalyse mit SPSS, Manuskript Wintersemester 2003/2004, Institut für Psychologie, Universität Magdeburg
- Genuit, K.; Poggenburg, J.:** Sound Engineering – vom Schlagwort zur Zielgerichteten Geräuschgestaltung, Vortragsmanuskript FVV-Workshop 1996
- Genuit, K.:** Parameter bei der Beurteilung von Fahrereindrücken, Tagungsunterlagen, Tagung im Haus der Technik, Herzogenrath 2001
- Geuß, H.; Breuer, J.:** Car-Kliniken und Probandenversuche: Hinweise zum methodisch richtigen Vorgehen, DaimlerChrysler AG, 2000
- Gibson, J. J.:** The senses considered as perceptual systems, Houghton Mifflin Boston 1966
- Goerne, T.:** Mikrofone in Theorie und Praxis, Elektor-Verlag Aachen 1994, ISBN 3-928051-76-8
- Gillert, M.:** Wertanmutung von Software am Beispiel von Software-Accessories im Fahrzeug, Diplomarbeit bei DaimlerChrysler AG, März 2005
- Glasberg, B. R.; Moore, B. C. J.:** A Revision of Zwicker's Loudness Modell, Acta Acustica, Vol. 82, 1996
- Glasberg, B. R.; Moore, B. C. J.:** Derivation of auditory filter shapes from notched noise data, Hear. Res. 47, 1990
- Glasberg, B. R.; Moore, B. C. J.; Bear T.:** A Model for the Prediction of Thresholds, Loudness and Partial Loudness, J. Audio Eng. Soc., Vol. 45, April 1997
- Goldstein, E. B.:** Wahrnehmungspsychologie - Eine Einführung, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 1997, ISBN 3-8274-0189-5

- Gregory, R. L.:** Auge und Gehirn. Psychologie des Sehens, Verlag Rowohlt Tb. April 2001, ISBN 3-4996-0805-7
- Grunwald, M.; Beyer, L.:** Der bewegte Sinn. Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung, Birkhäuser Verlag 2001, ISBN 3-7643-6516-1
- Guski, R.:** Wahrnehmung, Verlag Kohlhammer W. 1989, ISBN 3-1701-0412-8
- Haecker, H. O.; Stapf, K.-H.:** Psychologisches Wörterbuch, überarbeitete und erw. Auflage 14, Verlag Huber, Bern Oktober 2003, ISBN 3-4568-3966-9
- HEAD acoustics GmbH:** HEAD Application Note: Lautheits- und Schärferechnung in ArtemiS, <http://www.head-acoustics.de>, November 2006
- HEAD acoustics GmbH:** HEAD Application Note: Berechnung von Einzelwerten in ArtemiS, <http://www.head-acoustics.de>, November 2006
- HEAD acoustics GmbH:** HEAD Application Note: Durchführung von Hörversuchen, <http://www.head-acoustics.de>, November 2006
- HEAD acoustics GmbH:** HEAD Application Note: Analysen zur frequenzabhängigen Schallpegelbestimmung, <http://www.head-acoustics.de>, November 2006
- HEAD acoustics GmbH:** HEAD Application Note: Entzerrung von Kunstkopfaufnahmen, <http://www.head-acoustics.de>, November 2006
- Henn, H.; Sinambari, G. R.; Fallen, M.:** Ingenieurakustik - Grundlagen, Anwendungen, Verfahren, 2. Auflage, Vieweg Verlag Braunschweig 1999, ISBN 3-528-18570-8
- Immersion:** Immersion Corporate, 801 Fox Lane San Jose, California 95131 USA, April 2005, <http://www.immersion.com>
- Interpack Processing and Packaging:** Brain Pacs – Kaufbefehle aus dem Unbewusstsein, Presse-Archiv, Düsseldorf, 26.11.2007
- Jain, N.; Florence, S. L.; Kaas, J.H.:** Reorganization of somatosensory cortex after nerve and spinal cord injury, News in Physiological Science, 1998
- Jones, L. A.:** Perception of force and weight: Theory and research. Psychological Bulletin 100 (1986)
- Jürgensohn, T.; Timpe, K. P.:** Kraftfahrzeugführung, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2001, ISBN 3-540-42012-6
- Jütte, R.:** Geschichte der Sinne – von der Antike bis zum Cyberspace, Verlag C. H. Beck München 2000, ISBN 3-406-46767-9
- Kahle, W.:** Taschenatlas der Anatomie Bd. 3 - Nervensystem und Sinnesorgane, Thieme Verlag Stuttgart 2002, ISBN 3-13-492208-8

- Kandel, E. R.; Schwartz, J. H.; Jessel, T. M. (Hrsg.):** Neurowissenschaften. Eine Einführung, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 1995, ISBN 3-860253-91-3
- Katz, D.:** Der Aufbau der Tastwelt. unveränderter reprogr. Nachdruck der Ausgabe Leipzig 1925. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt 1969, ISBN B-0000BR-WS-8
- Kennedy, J. M.:** Handbook of Perception, Volumen 8 Perceptual Coding, Academic Press. New York 1978
- Kivisto-Rahnasto, J.; Vuori, M.; Toivonen, S.:** An Approach for Developing User Interfaces for Products of the Future, 1st IFAC Conference on Mechatronic Systems, Germany, Darmstadt 2000, Vol. 3
- Koppelman, U.:** Produktmarketing. Entscheidungsgrundlage für Produktmanager. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag Berlin 1993
- Krosnick, J. A.; Fabrigar, L. R.:** Designing Rating Scales for Effective Measurement in Surveys, Wiley-Interscience New York 1997
- Marquardt GmbH :** Internetpräsenz unter www.marquardt.de, Stand Februar 2008
- Martin, J. C.:** Ein Beitrag zur Integration von Sensoren in eine anthropomorphe künstliche Hand mit flexiblen Fluidaktoren, Dissertation, Karlsruhe 2004
- Mauter, G.; Katzki, S.:** The Application of Operational Haptics in Automotive Engineering, Business Briefing, Global Automotive Manufacturing Technology, 2003
- Niedermaier, F.:** Entwicklung und Bewertung eines Rapid-Prototyping Ansatzes zur multimodalen Mensch-Maschine-Interaktion im Kraftfahrzeug, Dissertation an der Technischen Universität München, August 2002
- Oetsch, B.:** Haptische Wahrnehmung im interkulturellen Vergleich, DaimlerChrysler AG 2004
- Oppenheim, A.; Schafer, R.; Buck, J.:** Zeitdiskrete Signalverarbeitung – Gebundene Ausgabe, 2. Auflage Verlag Pearson Studium 2004, ISBN 3-827-37077-9
- OriginLab Corporation:** Origin Version 7.5, <http://www.originlab.com>, November 2006
- Payette, J.; Hayward, V.; Ramstein, C; Bergeron, D:** Evaluation of a Force Feedback (haptic) Computer Pointing Device in Zero Gravity, DSC-Vol.58, Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division, 1996 [zitiert nach Zeilinger 2005]
- RAFI GmbH & Co. KG:** Internetpräsenz unter www.rafi.de, Stand Februar 2008

- Raskin, J.:** The Humane Interface. New Directions for Designing Interactive Systems, Addison-Wesley Verlag 2000, ISBN 0-201379-37-6
- Reisinger, J.; Wild, J.; Mauter, G.; Bubb, H.:** Mechatronic tools in haptic research for automotive applications, REM France, 2005
- Reisinger, J.; Wild, J.; Mauter, G.; Bubb, H.:** Haptical feeling of rotary switches, EuroHaptics 2006
- Reisinger, J.; Wild, J.; Mauter, G.; Bubb, H.:** Die Haptik von Bedienelementen, Ergonomie aktuell, Ausgabe 7, S. 29ff, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München 2006
- Ribback, S.:** Psychophysiologische Untersuchung mentaler Beanspruchung in simulierten Mensch-Maschine-Interaktionen, Dissertation an der Universität Potsdam, November 2002
- Ritter, J.:** Historisches Wörterbuch der Philosophie. Völlig neu bearbeitete Ausgabe des „Wörterbuchs der philosophischen Begriffe“ von Rudolf Eisler, Band 1, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt 1971
- Röhler, R.:** Sehen und Erkennen – Psychophysik des Gesichtsinnes, Springer Verlag Berlin 2002, ISBN 3-540-58537-0
- Rohrmann, B.:** Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung, Zeitschrift für Sozialpsychologie, Seite 9, 1978
- Rosenberg, J.:** Studien zur sinnlichen Bewertung von Tastern, Unveröffentlichtes Manuskript, Forschungsbericht der DaimlerChrysler AG, Berlin 2003/2004
- Rühmann, H. (1993a):** Schnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Rühmann, H. (1993b):** Isometrische Stellungskräfte an Stellteilen und Betriebsmitteln, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Rühmann, H. (1993c):** Stellteilgestaltung, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Sateco AG:** Internetpräsenz unter www.sateco.ch, Stand Februar 2008
- Schäfer, M.:** Entwicklung und Integration einer Haptik-Prüfeinrichtung, Diplomarbeit, Fachhochschule Gießen-Friedberg, Fachbereich Elektrotechnik, Wetzlar Juli 1999
- Schattenberg, K.:** Fahrzeugführung und gleichzeitige Nutzung von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Oktober 2002

- Schick, A.:** Schallwirkung aus psychologischer Sicht, Verlagsgemeinschaft Ernst Klett Stuttgart 1979, ISBN 3-12-927960-1
- Schmidt, R. F. (Hrsg.):** Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie, Springer Verlag Heidelberg 2005, ISBN 3-540-21882-3
- Schmidtke, H.:** Handbuch der Ergonomie. 2. Auflage, Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz 1989, ISBN 3-927038-70-9
- Schmidtke, H. (1989a):** Grundlagen der Gestaltung von Steuerarmaturen, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 1, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H. (1989b):** Steuerarmaturen für Translationsbewegungen, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 1, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H.; Rühmann, H. (1989):** Hand-Fingerkräfte, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 2, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H.; Rühmann, H. (1992):** Integrierte Steuerarmaturen, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 3, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H.; Rühmann, H. (1993):** Betriebsmittelgestaltung, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser
- Schmidtke, H. (1994):** Motorische Leistungen, in: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie, Band 2, München, Wien: Carl Hanser
- Silbernagl, S.; Despopoulos, A.:** Taschenatlas der Physiologie, 6. Auflage, Thieme Verlag Stuttgart 2003, ISBN 3-135677-06-0
- Sounddesign Ronnebaum & Springer:** Psychoakustischen Kenngrößen – Hintergrundinformationen, <http://www.sounddesign.net>, November 2006
- SPSS GmbH Software:** SPSS 13.0 – schneller Einstieg, SPSS Inc. 2004, <http://www.spss.com>, ISBN 1-56827-978-7
- Süddeutsche Zeitung:** Rätselhafte Kaufentscheidung, Online-Publikation, Neuro-Marketing, Autor: Nina von Hardenberg, 15.04.2006
- Timpe, K.-P.; Jürgensohn, T. & Kolrep, H. (Hrsg.):** Mensch-Maschine-Systemtechnik. Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation. Düsseldorf: Symposion, 2002. ISBN 3-933814-83-9.

- Universität Bern:** Institut für Physiologie, <http://www.physio.unibe.ch/>, 2005
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI):** Menschengerechte Bedienung technischer Geräte - Aktuelle Trends und Perspektiven, VDI-Verlag Düsseldorf 1999, ISBN 3-18-091498-X
- Vöhringer, K.-D.:** Innovationen – Basis für zukünftige Unternehmenserfolge, Landau 1998
- Von Campenhausen, C.:** Die Sinne des Menschen. Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung, Thieme Verlag Stuttgart 1993, ISBN 3-136033-02-7
- Von Skramlik, E.:** Psychophysiologie der Tastsinne, Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig 1937
- Wagner, V.:** Taktilmotorische Informationsverarbeitung und explizite und implizite Gedächtnisleistungen, Verlag Dr. Kovac Hamburg 1991, ISBN 3-925630-94-5
- Wierwille, W.W.:** Visual And Manual Demands of In-Car Controls And Displays, Taylor & Francis, London 1993 [zitiert nach Schattenberg, 2002]
- Wikipedia Foundation Inc.:** Online-Publikation unter <http://de.wikipedia.org>, Stand April 2008
- Zeilinger, S.:** Aktive haptische Bedienelemente zur Interaktion mit Fahrerinformationssystemen, Dissertation München 2005, ISBN 3-937300-24-4
- Zwicker, E.:** Psychoakustik, 1. Auflage Springer-Verlag Berlin 1982, ISBN 3-540-11401-7
- Zwicker, E.; Fastl, H.:** Psychoacoustics. Facts and Models, 2. Auflage Springer-Verlag 1999, ISBN 3-540-65063-6

Anhang

Anhang A: Zusammenfassung der physikalischen Parameter der Taster

Physikalische Beschreibungsmerkmale Taster										
Name	P ₁		P ₂		P ₃	P ₄	P ₆		P ₇	
	Kraft [N]	Weg [mm]	Kraft [N]	Weg [mm]	Weg [mm]	Weg [mm]	Kraft [N]	Weg [mm]	Kraft [N]	Weg [mm]
Taster 1	3,22	0,47	1,57	1,03	1,23	1,56	1,20	1,03	2,53	0,39
Taster 2	3,31	0,49	1,50	1,05	1,24	1,58	1,18	1,06	2,65	0,42
Taster 3	3,19	0,56	1,87	1,03	1,24	1,60	1,39	1,02	2,64	0,49
Taster 4	3,15	0,75	1,58	1,03	1,61	2,17	1,18	1,01	2,57	0,59
Taster 5	3,15	0,55	2,43	1,02	1,11	1,47	2,00	1,01	2,49	0,49
Taster 6	3,00	0,52	2,11	0,96	1,08	1,45	1,70	0,96	2,40	0,43
Taster 7	3,20	0,49	1,88	1,03	1,22	1,57	1,49	1,04	2,54	0,41
Taster 8	3,29	0,52	1,56	1,07	1,27	1,60	1,13	1,06	2,56	0,42
Taster 9	3,13	0,42	1,17	1,03	1,32	1,72	0,76	1,01	2,60	0,31
Taster 10	3,14	0,50	1,60	1,05	1,22	1,56	1,13	1,03	2,47	0,39
Taster 11	2,98	0,36	1,49	0,99	1,62	2,13	0,42	1,05	2,44	0,28
Taster 12	3,11	0,36	1,39	1,03	1,37	1,83	0,72	1,04	2,45	0,28
Taster 13	3,01	0,32	1,42	1,00	1,47	1,99	0,57	1,00	2,34	0,30
Taster 14	5,98	0,48	3,30	0,53	0,72	0,77	2,40	0,48	4,91	0,44
Taster 15	3,05	0,46	1,70	0,49	0,60	0,93	1,10	0,45	2,69	0,43
Taster 16	2,92	0,19	1,88	0,48	0,59	0,89	1,37	0,46	2,25	0,10
Taster 17	2,76	0,46	1,79	1,15	1,35	1,60	1,00	1,13	1,97	0,36
Taster 18	3,66	0,61	3,13	0,64	0,71	1,17	1,21	0,30	1,86	0,28
Taster 19	1,81	0,86	1,46	1,56	1,59	1,74	1,19	1,58	1,38	0,87
Taster 20	1,75	0,24	1,12	1,17	1,80	2,15	0,69	1,24	1,49	0,14
Taster 21	2,74	0,32	1,94	0,91	1,02	1,39	1,37	0,89	2,06	0,22
Taster 22	2,09	1,24	1,38	2,00	2,12	2,30	1,01	2,06	1,59	1,29
Taster 23	2,94	0,15	1,74	0,19	0,30	0,65	1,01	0,14	2,43	0,11
Taster 24	3,16	0,26	2,08	0,35	0,45	0,76	1,04	0,23	2,03	0,18
Taster 25	2,57	0,17	1,75	0,62	0,77	1,18	1,22	0,61	2,11	0,11
Taster 26	5,69	0,42	2,78	0,47	0,66	0,74	2,41	0,48	5,23	0,42
Taster 27	3,94	0,31	2,57	0,37	0,48	0,69	2,24	0,36	3,51	0,30
Taster 28	3,47	0,22	2,31	0,50	0,66	0,96	1,79	0,50	2,83	0,16
Taster 29	3,76	0,53	1,77	1,94	2,17	2,35	1,29	1,94	2,97	0,52
Taster 30	2,87	0,18	1,90	0,46	0,58	0,92	1,39	0,42	2,27	0,10
Taster 31	4,79	0,38	3,50	0,48	0,55	0,66	2,69	0,46	3,84	0,36
Taster 32	3,89	0,67	2,10	0,81	0,94	1,03	1,63	0,83	2,60	0,70
Taster 33	6,52	0,55	6,22	0,66	0,73	0,80	5,51	0,61	5,79	0,54
Taster 34	3,41	0,34	2,72	0,39	0,45	0,67	2,38	0,41	3,00	0,35
Taster 35	5,07	0,20	3,66	0,22	0,24	0,28	1,93	0,19	4,21	0,17
Taster 36	4,25	0,50	3,31	0,53	0,56	0,67	2,80	0,51	3,87	0,48
Taster 37	4,38	0,52	2,96	0,80	1,23	1,34	1,04	0,59	1,55	0,37

Tabelle A.1: Physikalische Beschreibungsmerkmale der Taster

Physikalische Beschreibungsmerkmale Taster (Fortsetzung)					
Name	Snap [%]	Nachlaufweg [mm]	Snapweg [mm]	Snapsprung [mm]	Rücklaufweg [mm]
Taster 1	51	0,53	0,56	0,76	0,53
Taster 2	55	0,53	0,56	0,75	0,52
Taster 3	41	0,57	0,47	0,68	0,58
Taster 4	50	1,14	0,28	0,86	1,16
Taster 5	23	0,45	0,47	0,56	0,46
Taster 6	30	0,49	0,44	0,56	0,49
Taster 7	41	0,54	0,54	0,73	0,53
Taster 8	53	0,53	0,55	0,75	0,54
Taster 9	63	0,69	0,61	0,90	0,71
Taster 10	49	0,51	0,55	0,72	0,53
Taster 11	50	1,14	0,63	1,26	1,08
Taster 12	55	0,80	0,67	1,01	0,79
Taster 13	53	0,99	0,68	1,15	0,99
Taster 14	45	0,24	0,05	0,24	0,29
Taster 15	44	0,44	0,03	0,14	0,48
Taster 16	36	0,41	0,29	0,40	0,43
Taster 17	35	0,45	0,69	0,89	0,47
Taster 18	14	0,53	0,03	0,10	0,87
Taster 19	19	0,18	0,70	0,73	0,16
Taster 20	36	0,98	0,93	1,56	0,91
Taster 21	29	0,48	0,59	0,70	0,50
Taster 22	34	0,30	0,76	0,88	0,24
Taster 23	41	0,46	0,04	0,15	0,51
Taster 24	34	0,41	0,09	0,19	0,53
Taster 25	32	0,56	0,45	0,60	0,57
Taster 26	51	0,27	0,05	0,24	0,26
Taster 27	35	0,32	0,06	0,17	0,33
Taster 28	33	0,46	0,28	0,44	0,46
Taster 29	53	0,41	1,41	1,64	0,41
Taster 30	34	0,46	0,28	0,40	0,50
Taster 31	27	0,18	0,10	0,17	0,20
Taster 32	46	0,22	0,14	0,27	0,20
Taster 33	5	0,14	0,11	0,18	0,19
Taster 34	20	0,28	0,05	0,11	0,26
Taster 35	28	0,06	0,02	0,04	0,09
Taster 36	22	0,14	0,03	0,06	0,16
Taster 37	32	0,54	0,28	0,71	0,75

Tabelle A.2: Physikalische Beschreibungsmerkmale der Taster

Physikalische Beschreibungsmerkmale Taster (Fortsetzung)				
Name	Sprungweg [mm]	Rücksprungweg [mm]	Differenzkraft _{MAX} [N]	Differenzkraft _{MIN} [N]
Taster 1	0,64	1,00	0,69	0,37
Taster 2	0,64	1,04	0,66	0,32
Taster 3	0,53	0,98	0,55	0,48
Taster 4	0,42	0,96	0,58	0,40
Taster 5	0,52	0,79	0,66	0,43
Taster 6	0,53	0,81	0,60	0,41
Taster 7	0,63	0,97	0,66	0,39
Taster 8	0,64	1,00	0,73	0,43
Taster 9	0,70	1,00	0,53	0,41
Taster 10	0,64	1,00	0,67	0,47
Taster 11	0,77	1,05	0,54	1,07
Taster 12	0,76	1,02	0,66	0,67
Taster 13	0,70	1,00	0,67	0,85
Taster 14	0,04	0,34	1,07	0,90
Taster 15	0,02	0,23	0,36	0,60
Taster 16	0,36	0,43	0,67	0,51
Taster 17	0,77	1,10	0,79	0,79
Taster 18	0,02	0,14	1,80	1,92
Taster 19	0,71	1,08	0,43	0,27
Taster 20	1,10	1,22	0,26	0,43
Taster 21	0,67	0,85	0,68	0,57
Taster 22	0,77	1,25	0,50	0,37
Taster 23	0,03	0,11	0,51	0,73
Taster 24	0,05	0,20	1,13	1,04
Taster 25	0,50	0,59	0,46	0,53
Taster 26	0,06	0,35	0,46	0,37
Taster 27	0,06	0,26	0,43	0,33
Taster 28	0,34	0,44	0,64	0,52
Taster 29	1,42	1,82	0,79	0,48
Taster 30	0,32	0,38	0,60	0,51
Taster 31	0,10	0,25	0,95	0,81
Taster 32	0,13	0,27	1,29	0,47
Taster 33	0,07	0,14	0,73	0,71
Taster 34	0,06	0,15	0,41	0,34
Taster 35	0,02	0,09	0,86	1,73
Taster 36	0,03	0,18	0,38	0,51
Taster 37	0,22	0,53	2,83	1,92

Tabelle A.3: Physikalische Beschreibungsmerkmale der Taster

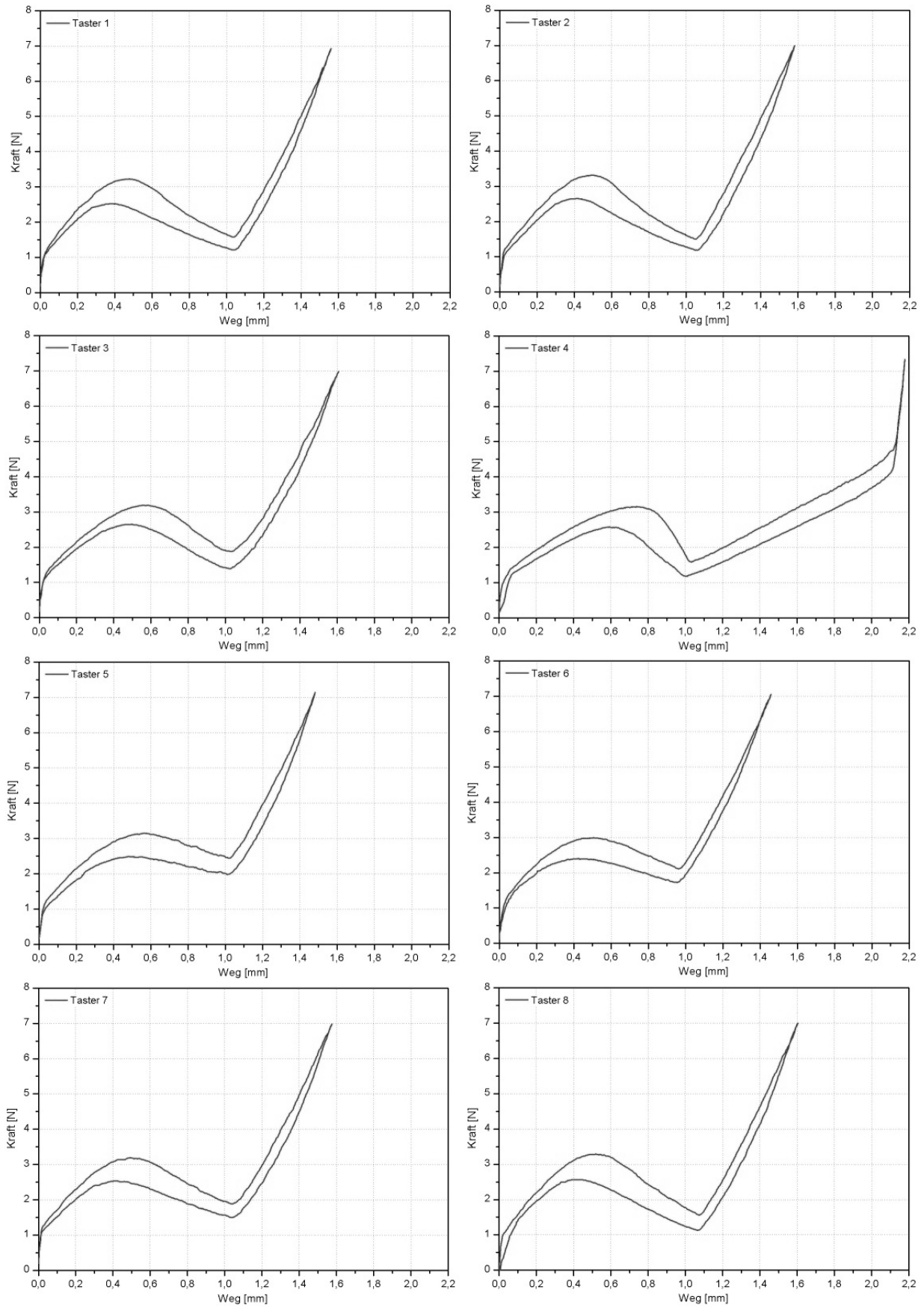


Abbildung A.1: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 1 bis 8

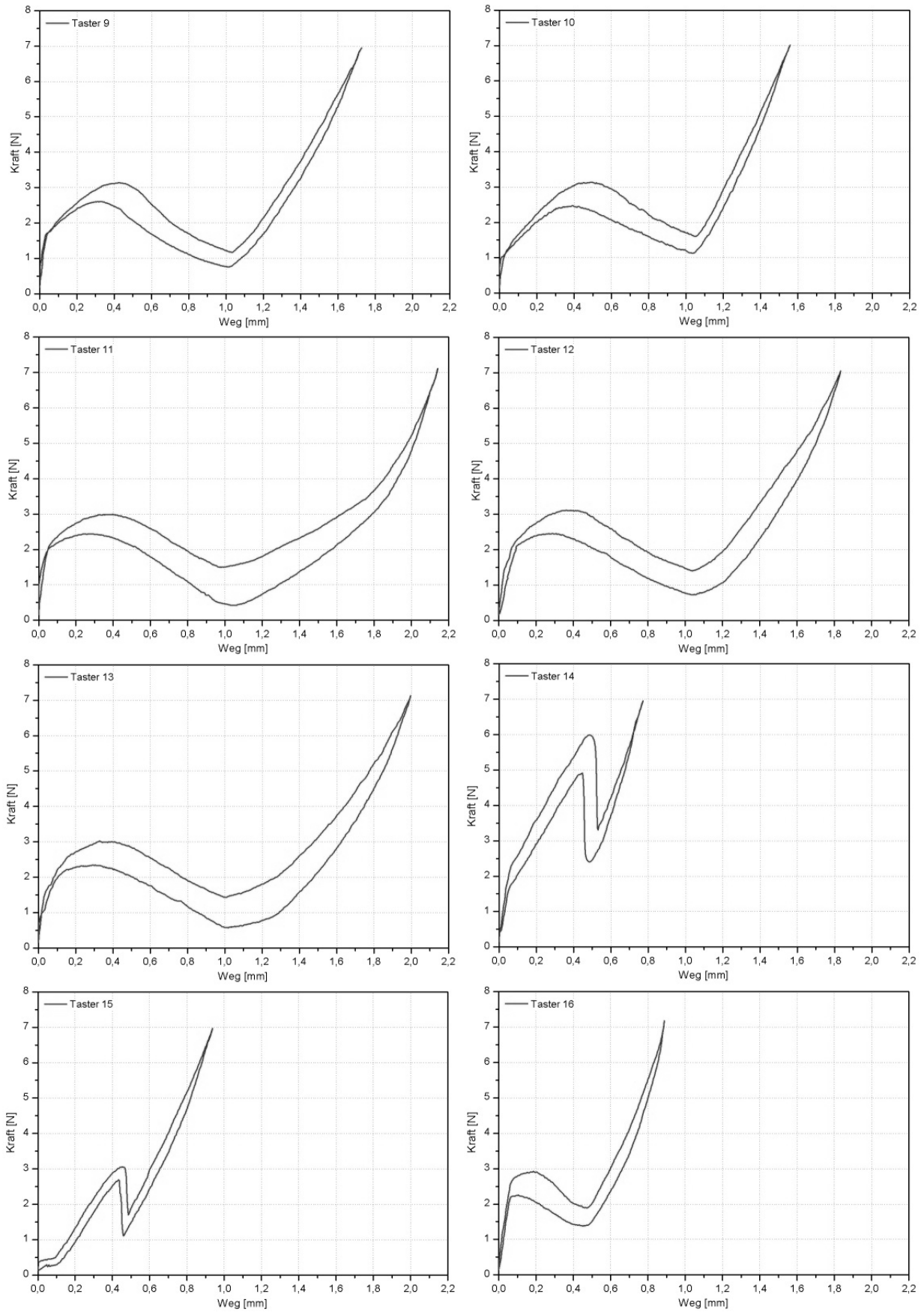


Abbildung A.2: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 9 bis 16

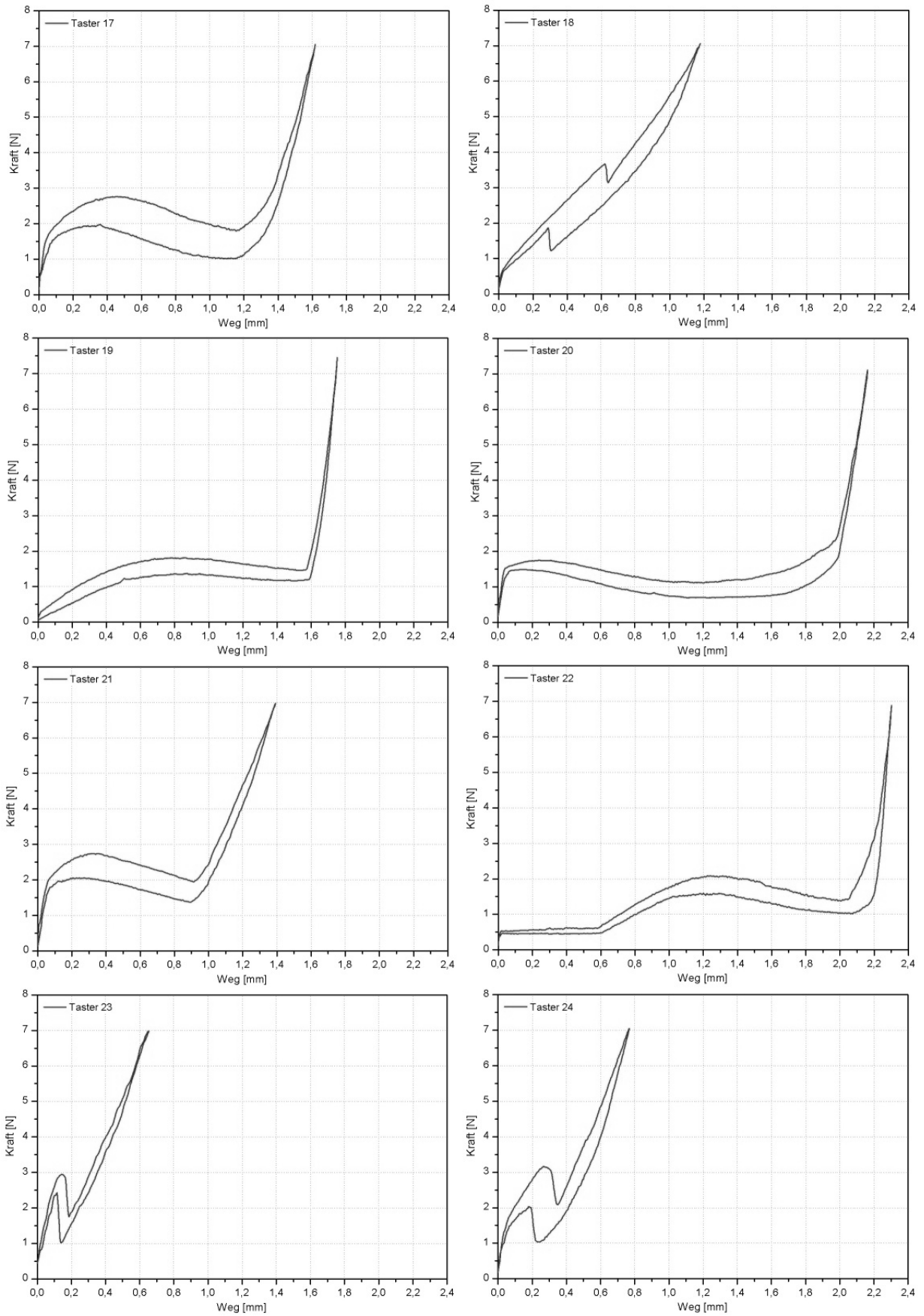


Abbildung A.3: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 17 bis 24

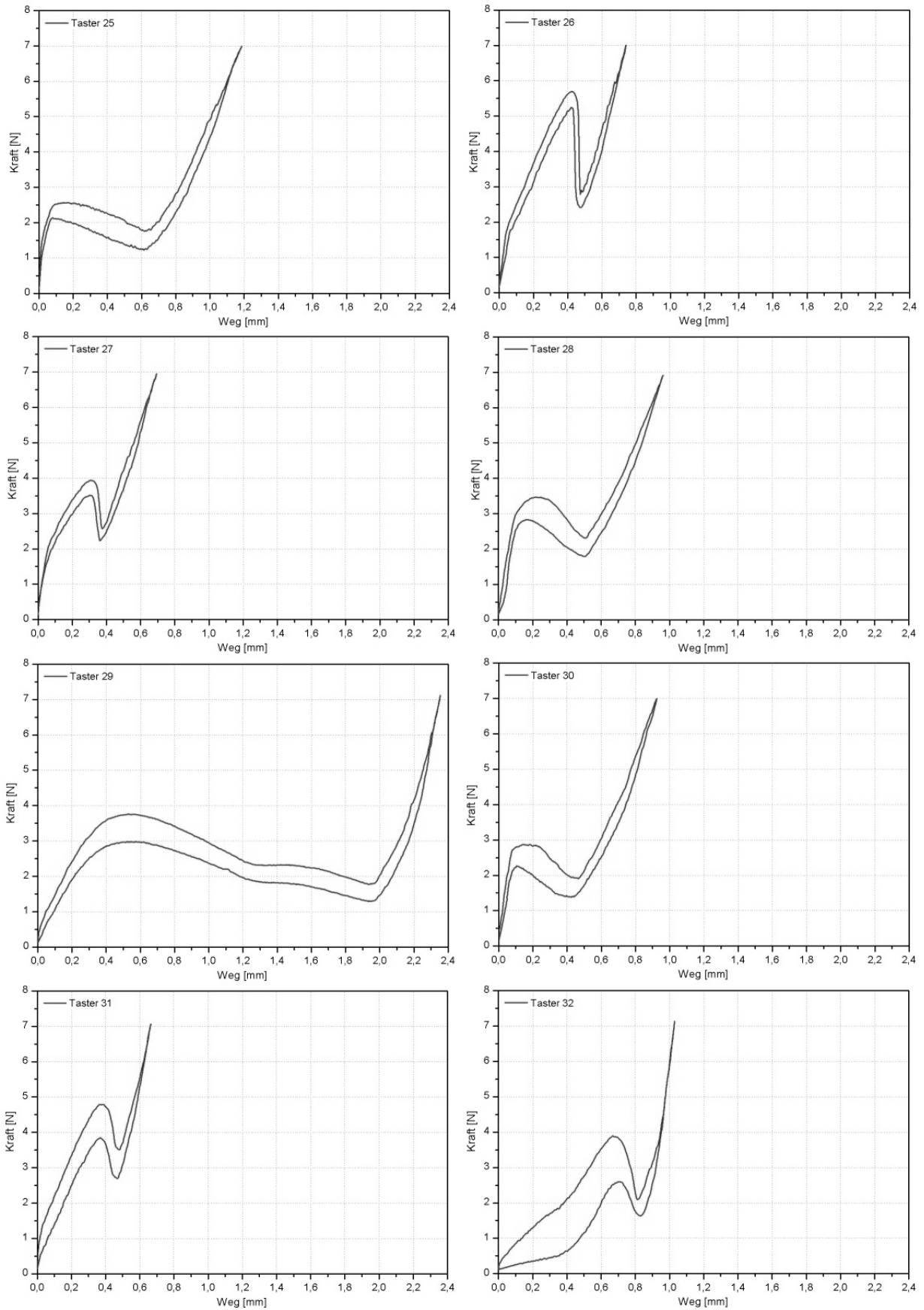


Abbildung A.4: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 25 bis 32

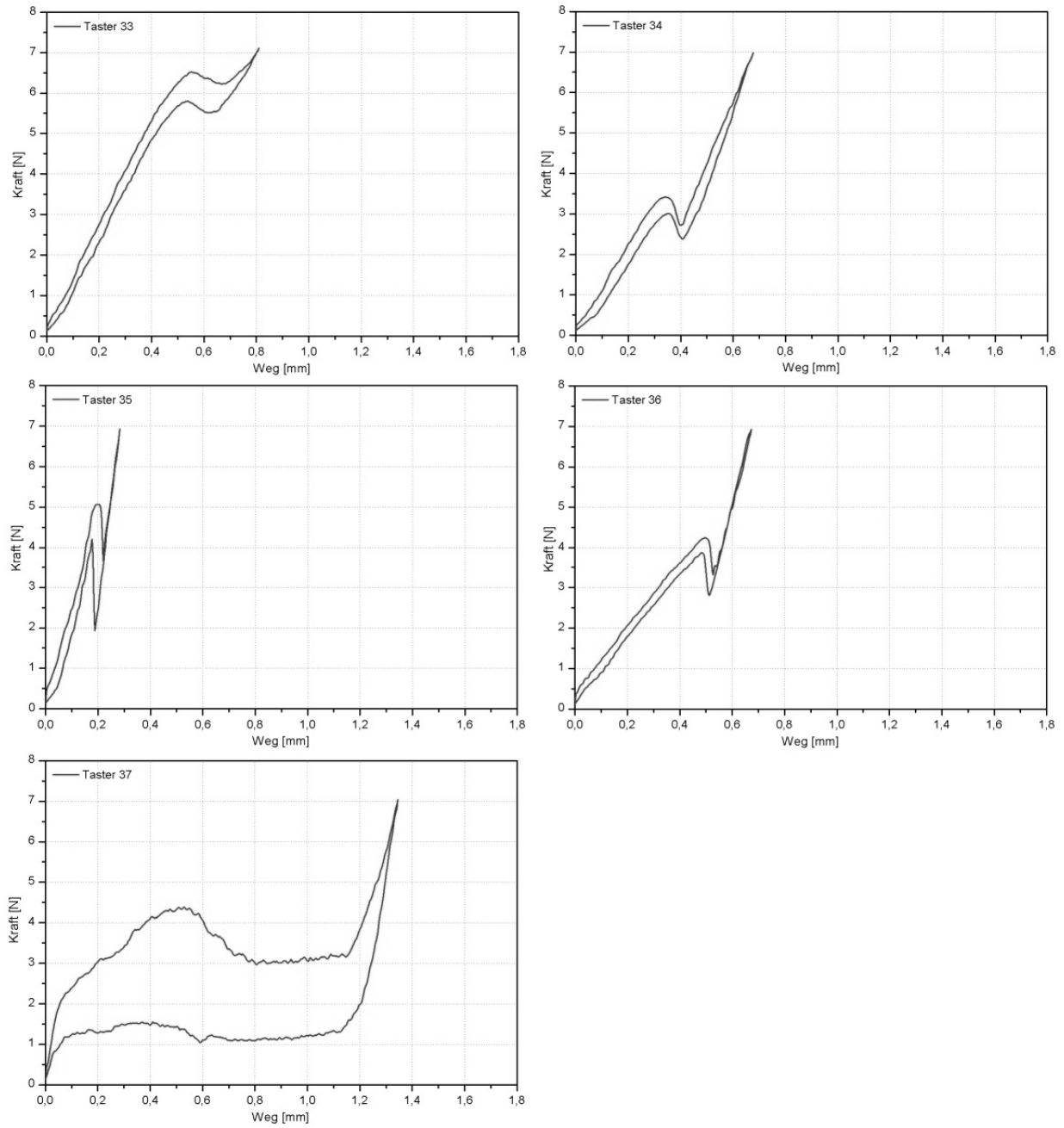


Abbildung A.5: Kraft-Weg-Verläufe der Taster 33 bis 37

Anhang B: Zusammenfassung der physikalischen Parameter der Drehschalter

Physikalische Beschreibungsmerkmale der Drehschalter				
Name	Raddurchmesser [mm]	Rastpositionenanzahl [-]	Grundform [-]	Drehmoment [mNm]
Drehschalter 1	44,00	18	4	29,51
Drehschalter 2	44,00	24	1	29,91
Drehschalter 3	44,00	36	1	31,03
Drehschalter 4	44,00	45	1	29,97
Drehschalter 5	44,00	72	1	22,38
Drehschalter 6	44,00	24	1	21,73
Drehschalter 7	44,00	24	1	38,69
Drehschalter 8	44,00	24	1	30,33
Drehschalter 9	44,00	24	1	58,92
Drehschalter 10	44,00	24	1	44,06
Drehschalter 11	31,50	24	1	23,08
Drehschalter 12	44,00	24	1	29,85
Drehschalter 13	57,00	24	1	27,65
Drehschalter 14	70,00	24	1	55,00
Drehschalter 15	82,00	24	1	58,46
Drehschalter 16	44,00	24	1	20,52
Drehschalter 17	44,00	24	2	23,56
Drehschalter 18	44,00	20	3	26,92
Drehschalter 19	44,00	15	4	22,50

Tabelle B.1: Physikalische Beschreibungsmerkmale der Drehschalter

Physikalische Beschreibungsmerkmale der Drehschalter (Fortsetzung)					
Name	Drehmoment- steigung Zug [mNm/°]	Drehmomentstei- gung Schub [mNm/°]	Betätigungs- weg Zug [°]	Betätigungs- weg Schub [°]	Offset [%]
Drehschalter 1	5,45	- 6,09	4,00	4,00	41,51
Drehschalter 2	8,15	- 4,81	0,00	0,00	24,14
Drehschalter 3	17,50	- 5,08	0,00	0,00	36,55
Drehschalter 4	12,17	- 7,54	0,00	0,00	37,84
Drehschalter 5	19,50	- 6,99	0,00	0,00	42,49
Drehschalter 6	6,24	- 3,32	0,00	0,00	25,22
Drehschalter 7	11,58	- 4,91	0,00	0,00	33,14
Drehschalter 8	7,81	- 4,51	0,00	0,00	29,38
Drehschalter 9	17,19	- 7,44	0,00	0,00	33,93
Drehschalter 10	14,06	- 6,44	0,00	0,00	24,85
Drehschalter 11	6,01	- 3,12	0,00	0,00	33,19
Drehschalter 12	8,14	- 4,77	0,00	0,00	24,49
Drehschalter 13	9,17	- 5,11	0,00	0,00	10,96
Drehschalter 14	16,56	- 7,16	0,00	0,00	31,82
Drehschalter 15	14,86	- 8,21	0,00	0,00	32,12
Drehschalter 16	3,93	- 2,86	0,00	0,00	35,38
Drehschalter 17	12,85	- 3,11	0,00	5,00	46,82
Drehschalter 18	17,03	- 7,21	10,17	0,00	26,30
Drehschalter 19	14,29	- 10,00	9,90	9,00	33,33

Tabelle B.2: Physikalische Beschreibungsmerkmale der Drehschalter

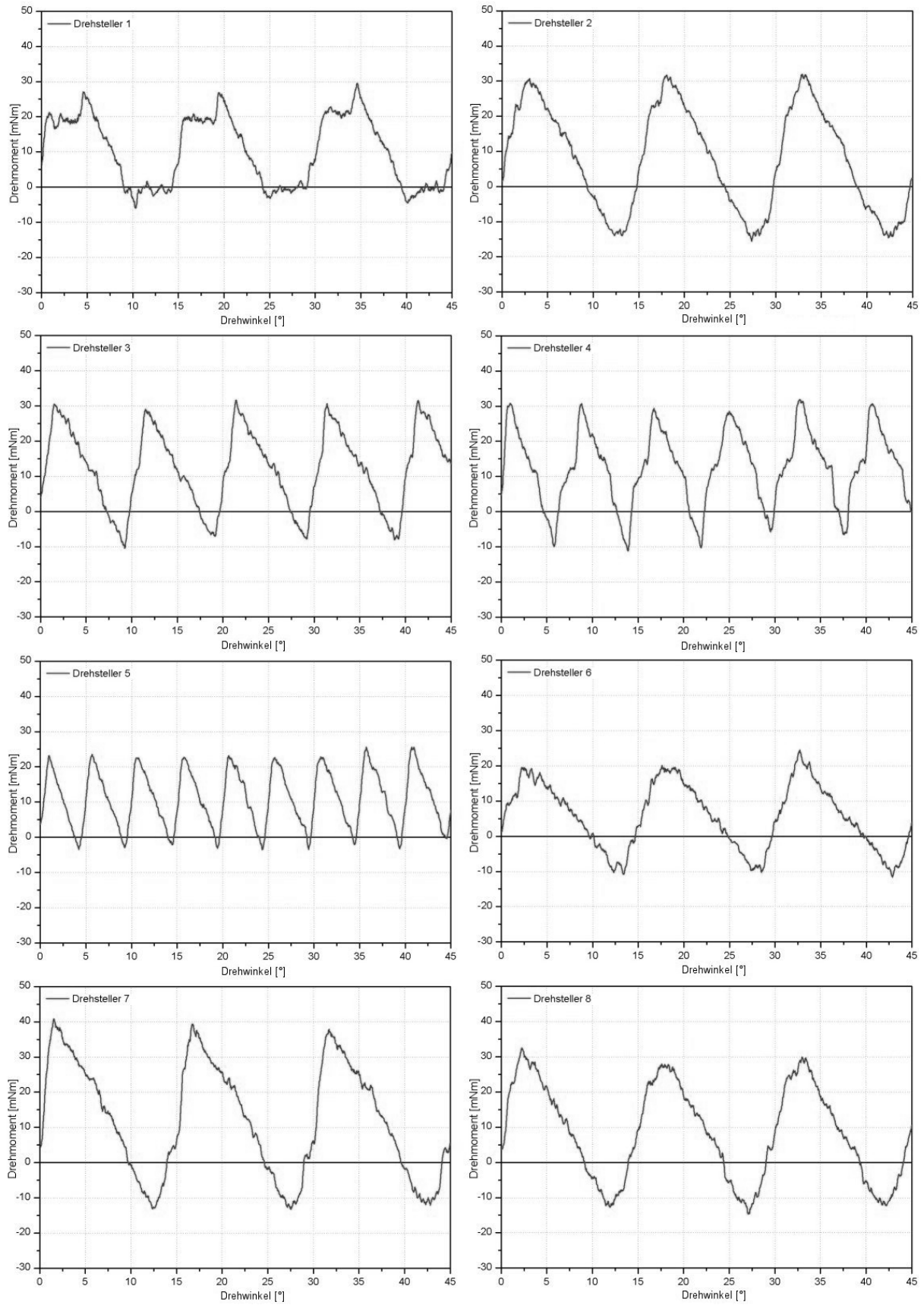


Abbildung B.1: Drehmoment-Drehwinkel-Verläufe der Drehschalter 1 bis 8

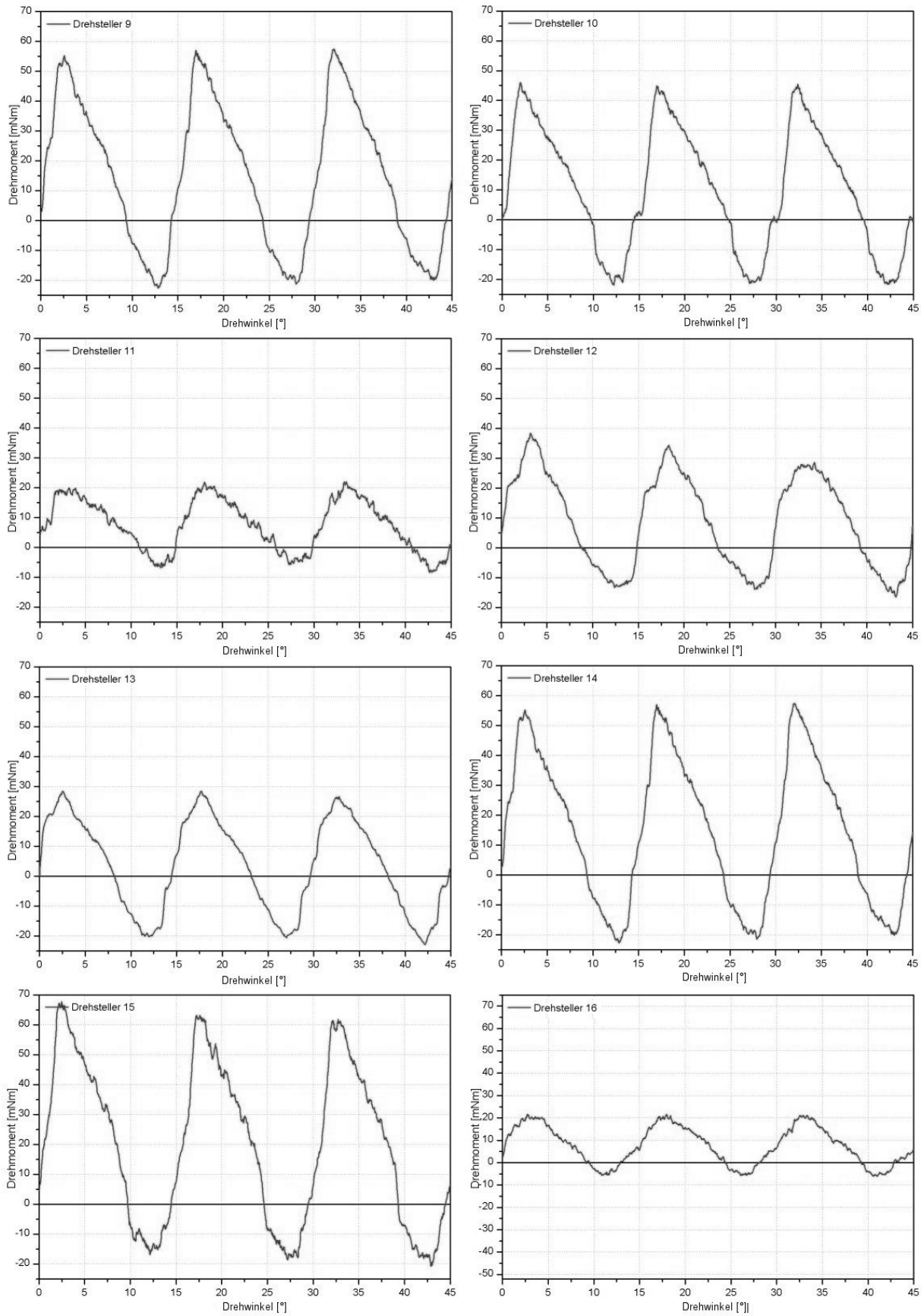


Abbildung B.2: Drehmoment-Drehwinkel-Verläufe der Dreshalter 9 bis 16

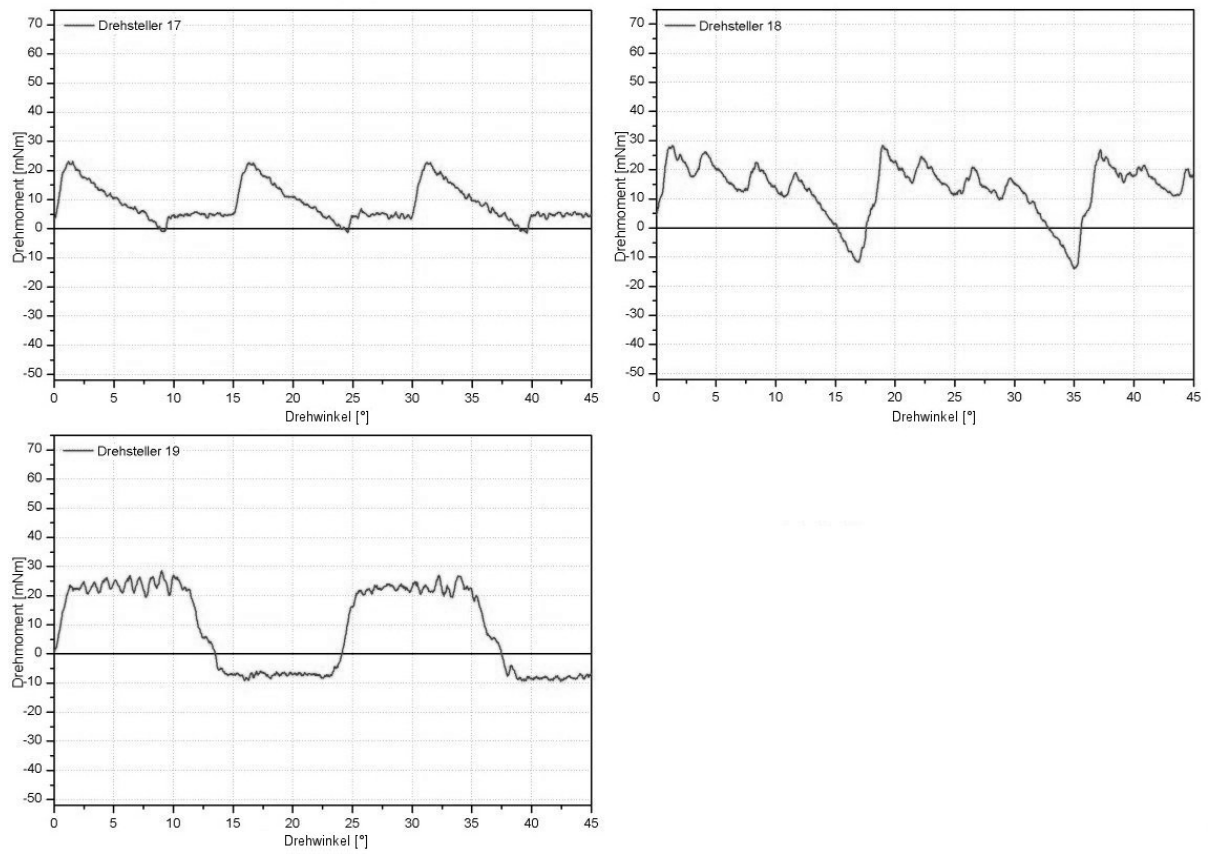


Abbildung B.3: Drehmoment-Drehwinkel-Verläufe der Drehschalter 17 bis 19

Anhang C: Zusammenfassung der physikalischen Parameter der Schaltergeräusche

Grundgeräusch A: Beschreibung der Geräuschvariationen							
Parameter	Name Variation	Bewertung	Pegel	Tonhöhe	Lautheit	Schärfe	Auskingzeit
			[dB(A)]	[Hz]	[sone]	[acum]	[ms]
Tonhöhe	Tonhöhe -2	0,328	57,0	1300	10,3	1,590	90
	Tonhöhe -1	0,428	56,7	1600	10,13	1,525	95
	Tonhöhe 0	0,514	56,9	2000	9,86	1,525	85
	Tonhöhe +1	0,300	56,8	2400	9,78	1,535	90
	Tonhöhe +2	0,297	57,0	2650	9,66	1,585	85
Schärfe	Schärfe -2	0,281	56,3	2000	9,35	1,255	110
	Schärfe -1	0,403	56,9	2000	9,82	1,335	100
	Schärfe 0	0,514	56,9	2000	9,86	1,525	90
	Schärfe +1	0,369	57,0	2000	9,60	1,715	80
	Schärfe +2	0,347	57,0	2000	9,11	1,805	65

Grundgeräusch B: Beschreibung der Geräuschvariationen							
Parameter	Name Variation	Bewertung	Pegel	Tonhöhe	Lautheit	Schärfe	Auskingzeit
			[dB(A)]	[Hz]	[sone]	[acum]	[ms]
Tonhöhe	Tonhöhe -2	0,281	57,1	280	10,75	1,565	50
	Tonhöhe -1	0,400	57,2	330	10,80	1,485	45
	Tonhöhe 0	0,342	57,2	430	10,50	1,425	45
	Tonhöhe +1	0,475	57,4	500	10,55	1,400	35
	Tonhöhe +2	0,428	57,3	600	10,55	1,420	35
Schärfe	Schärfe -2	0,350	57,2	430	10,07	1,145	53
	Schärfe -1	0,503	57,3	430	10,25	1,240	48
	Schärfe 0	0,342	57,2	430	10,50	1,425	45
	Schärfe +1	0,297	57,2	430	10,29	1,620	33
	Schärfe +2	0,294	57,2	430	9,77	1,710	28

Grundgeräusch C: Beschreibung der Geräuschvariationen							
Parameter	Name Variation	Bewertung	Pegel	Tonhöhe	Lautheit	Schärfe	Auskingzeit
			[dB(A)]	[Hz]	[sone]	[acum]	[ms]
Tonhöhe	Tonhöhe -2	0,625	57,2	700	11,15	1,355	60
	Tonhöhe -1	0,606	57,3	850	11,10	1,390	50
	Tonhöhe 0	0,597	57,2	1000	10,95	1,420	45
	Tonhöhe +1	0,550	57,3	1200	10,95	1,465	45
	Tonhöhe +2	0,575	57,2	1400	10,90	1,555	45
Schärfe	Schärfe -2	0,508	57,1	1000	11,40	1,155	75
	Schärfe -1	0,661	57,2	1000	11,00	1,260	50
	Schärfe 0	0,597	57,2	1000	10,95	1,420	43
	Schärfe +1	0,497	57,2	1000	10,60	1,585	32
	Schärfe +2	0,419	57,2	1000	10,08	1,670	25

Tabelle C.1: Physikalische Beschreibungsmerkmale der Schaltergeräusche

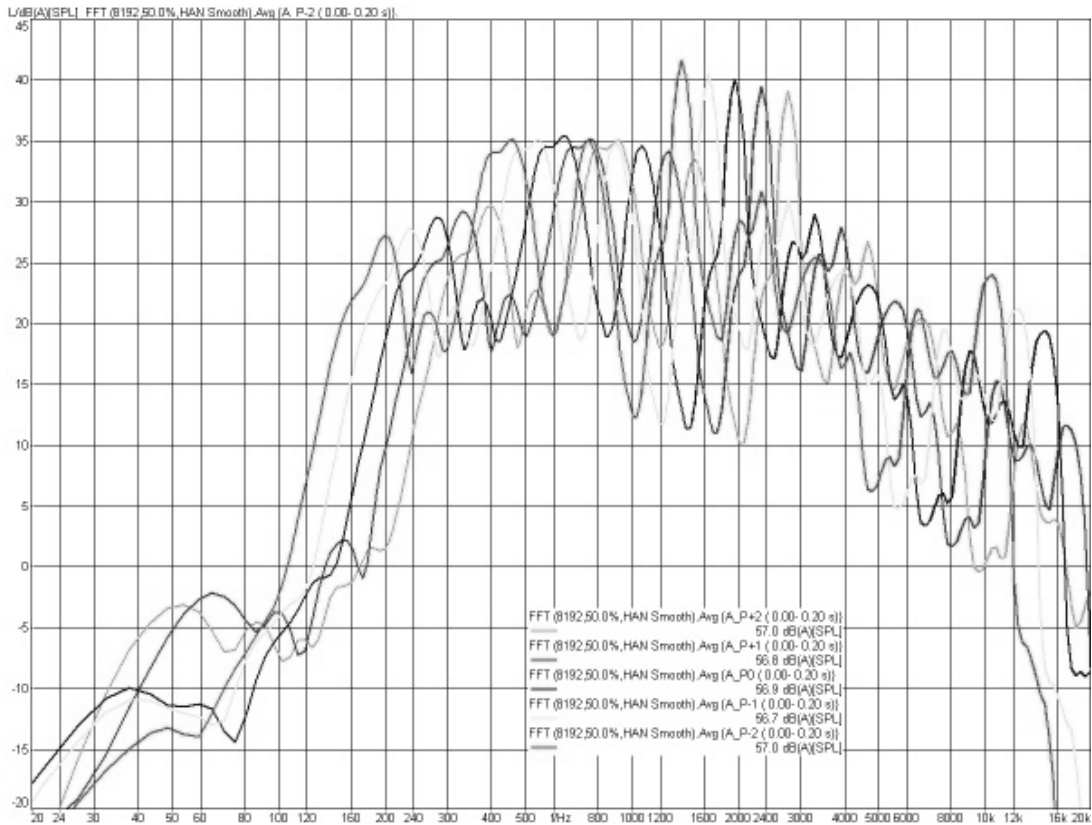


Abbildung C.1: Grundgeräusch A: Darstellung der Variation „Tonhöhe“

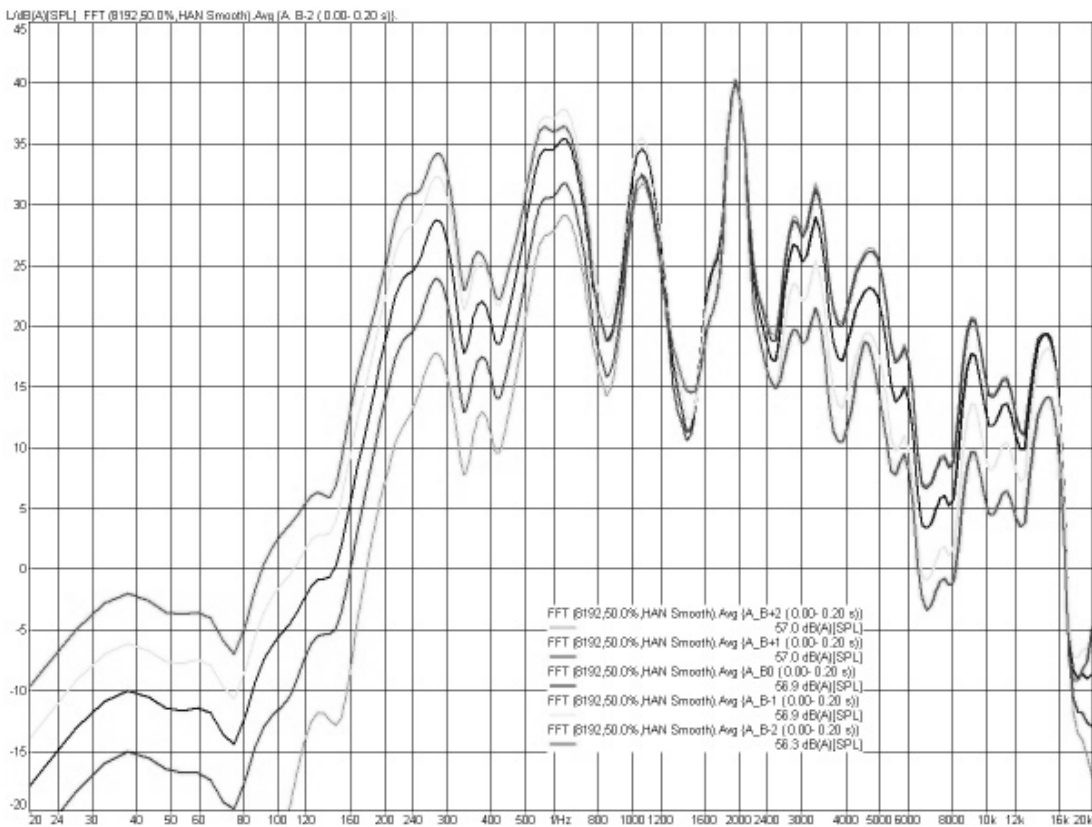


Abbildung C.2: Grundgeräusch A: Darstellung der Variation „Schärfe“

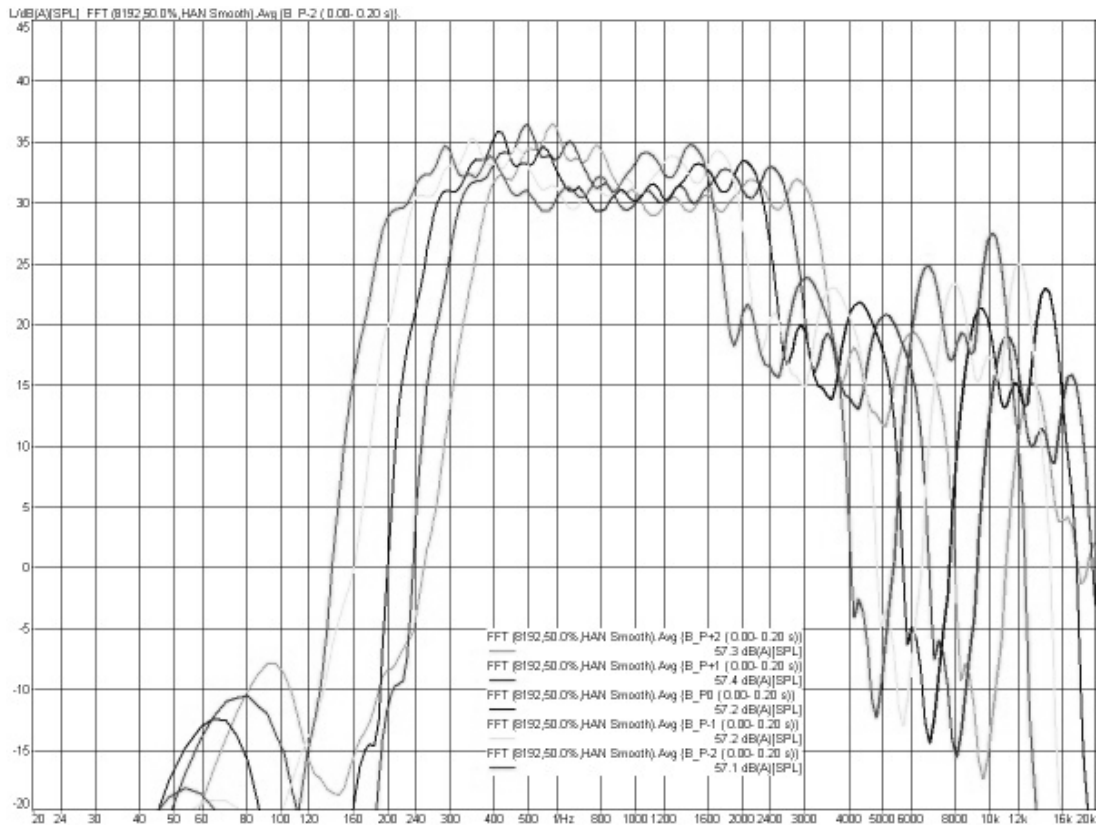


Abbildung C.3: Grundgeräusch B: Darstellung der Variation „Tonhöhe“

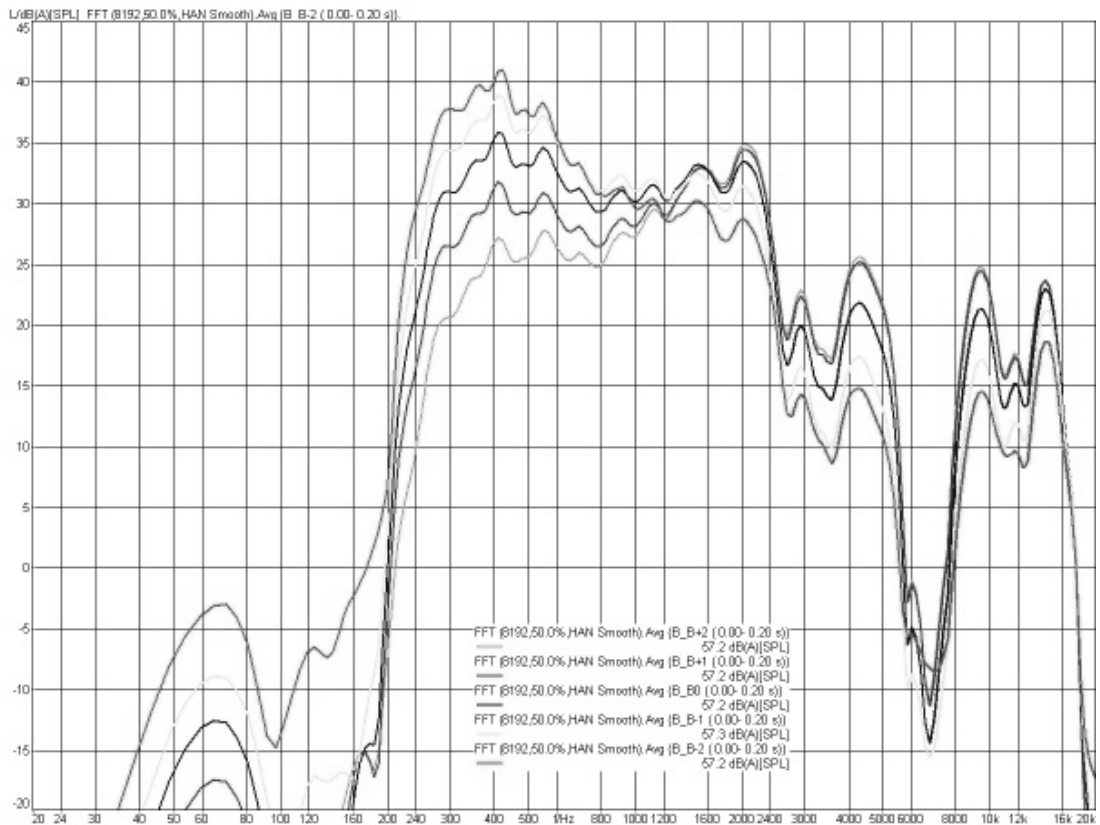


Abbildung C.4: Grundgeräusch B: Darstellung der Variation „Schärfe“

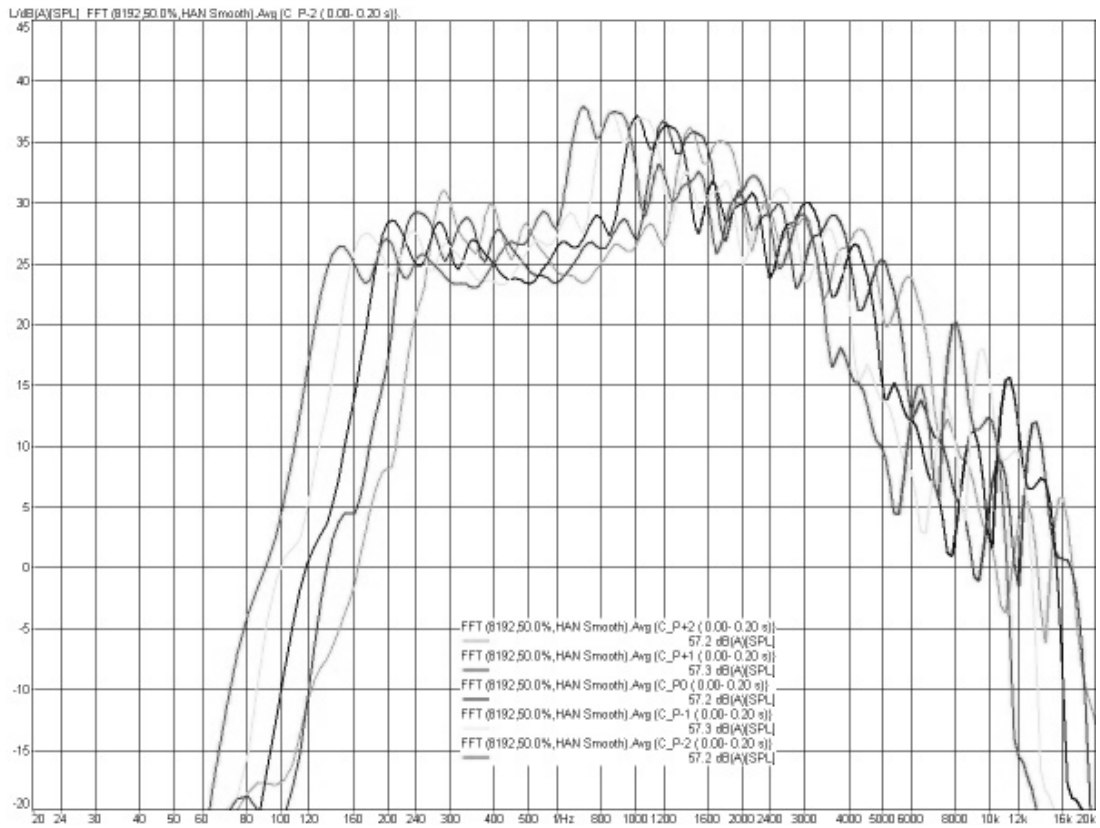


Abbildung C.5: Grundgeräusch C: Darstellung der Variation „Tonhöhe“

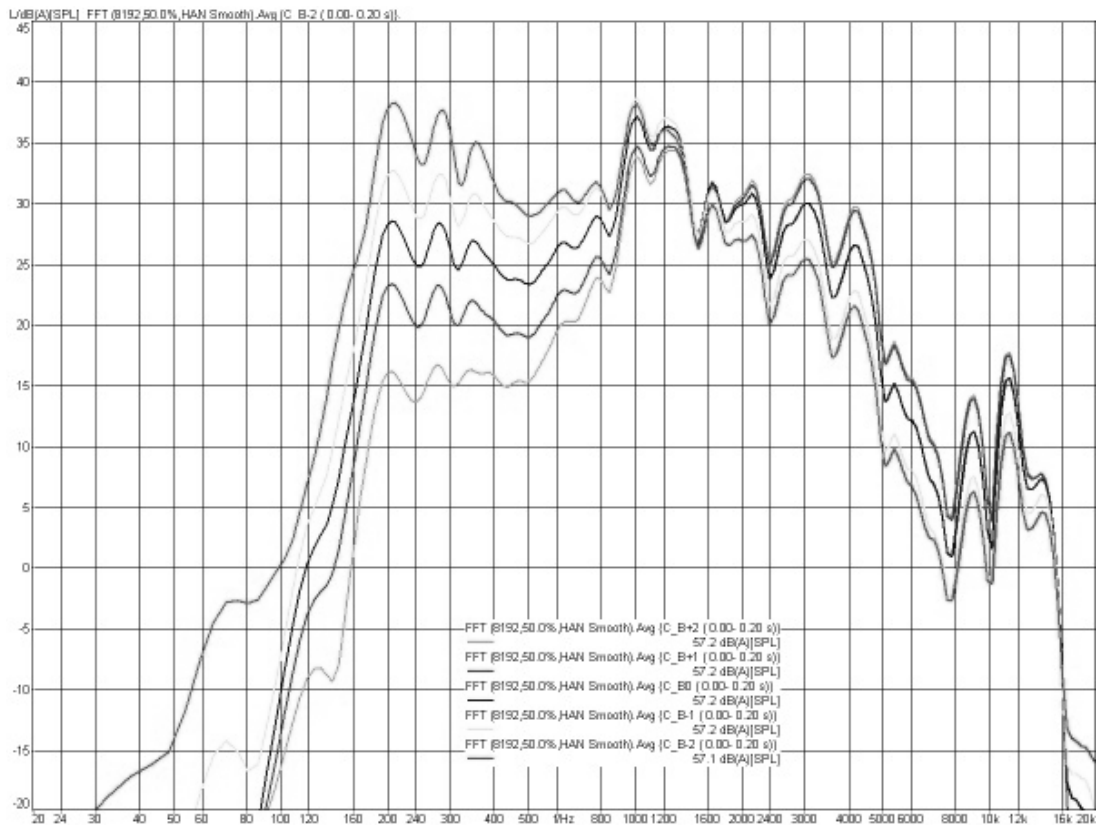


Abbildung C.6: Grundgeräusch C: Darstellung der Variation „Schärfe“

Anhang D: Vollständiger Output des Programms SPSS

D.1: Output Faktorenanalyse Taster

Anmerkungen	
Ausgabe erstellt	18-MAR-2007 16:35:18
Eingabe	H:\Promo\Messtechnische Auswertung\Auswertung Taster\SPSS-Analyse\ - FINAL - - Auswertung\Daten_Taster_neu_ohne kraffansiteg.sav
Daten	<keine>
Filter	<keine>
Gewichtung	<keine>
Aufgeteilte Datei	
Anzahl der Zeilen in der Arbeitsdatei	37
Definition von Fehlend	MISSING=EXCLUDE: Benutzerdefinierte fehlende Werte werden als fehlend behandelt.
Verarbeitete Fälle	PAIRWISE: Die Korrelationskoeffizienten jedes Variablenpaars basieren auf allen den Fällen, die für dieses Paar gültige Daten aufweisen. Die Faktorenanalyse basiert auf diesen Korrelationen.
Syntax	<pre> FACTOR /VARIABLES P1Kraft P2Kraft P6Kraft P7Kraft P2Weg P4Weg P6Weg Kraftabfall Vorlaufweg Snapweg Snap sprung Nachlaufweg Rücklaufweg Leerlaufweg Sprungweg Rücksprungweg Differenzkraft_MAX Differenzkraft_MIN /MISSING PAIRWISE /ANALYSIS P1Kraft P2Kraft P6Kraft P7Kraft P2Weg P4Weg P6Weg Kraftabfall Vorlaufweg Snapweg Snap sprung Nachlaufweg Rücklaufweg Leerlaufweg Sprungweg Rücksprungweg Differenzkraft_MAX Differenzkraft_MIN /PRINT UNIVARIATE INITIAL CORRELATION SIG INV REPR EXTRACTION ROTATION FSCORE /FORMAT SORT BLANK(.300) /PLOT EIGEN ROTATION /CRITERIA MINEIGEN(0.5) ITERATE(25) /EXTRACTION PC /CRITERIA ITERATE(25) /ROTATION VARIMAX /SAVE REG(ALL) /METHOD=CORRELATION . 0:00:01,56 </pre>
Ressourcen	Verstrichene Zeit

Erzeugte Variablen	Maximal benötigter Speicher	42408 (41,414K) Byte
FAC1_1	Komponentenwert 1	
FAC2_1	Komponentenwert 2	
FAC3_1	Komponentenwert 3	
FAC4_1	Komponentenwert 4	
FAC5_1	Komponentenwert 5	
FAC6_1	Komponentenwert 6	

Deskriptive Statistiken

	Mittelwert	Standardabweichung	Analyse N	Fehlendes N
P1Kraft	3,46892	1,040507	37	0
P2Kraft	2,17946	,963751	37	0
P6Kraft	1,52919	,894068	37	0
P7Kraft	2,73297	,997327	37	0
P2Weg	,83884	,418491	37	0
P4Weg	1,32081	,548814	37	0
P6Weg	,81595	,446725	37	0
Kraftabfall	,37817	,130440	37	0
Vorlaufweg	,44784	,211596	37	0
Snapweg	,39100	,315932	37	0
Snap sprung	,58649	,410645	37	0
Nachlaufweg	,48197	,260045	37	0
Rücklaufweg	,50486	,262082	37	0
Leerlaufweg	,38378	,228271	37	0
Sprungweg	,43216	,347412	37	0
Rücksprungweg	,67622	,430474	37	0
Differenzkraft_MAX	,73595	,454377	37	0
Differenzkraft_MIN	,65027	,414256	37	0

Kommunalitäten

	Anfänglich	Extraktion
P1Kraft	1,000	,997
P2Kraft	1,000	,996
P6Kraft	1,000	,974
P7Kraft	1,000	,984
P2Weg	1,000	,997
P4Weg	1,000	1,000
P6Weg	1,000	,998
Kraftabfall	1,000	,993
Vorlaufweg	1,000	,992
Snapweg	1,000	,996
Snap sprung	1,000	,980
Nachlaufweg	1,000	,995
Rücklaufweg	1,000	,993
Leerlaufweg	1,000	,986
Sprungweg	1,000	,997
Rücksprungweg	1,000	,981
Differenzkraft_MAX	1,000	,918
Differenzkraft_MIN	1,000	,899

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Anhang

Korrelationsmatrix(a)

	P1Kraft	P2Kraft	P6Kraft	P7Kraft	P2Weg	P4Weg	P6Weg	Kraft- abfall	Vorlauf- weg	Snap- weg	Snap- sprung	Nach- lauf- weg	Rück- lauf- weg	Leer- lauf- weg	Sprung- weg	Rück- sprung- weg	Differenz- kraft MAX	Differenz- kraft MIN
Korrelation	1,000	,839	,755	,901	-,442	-,564	-,456	-,169	-,080	-,532	-,499	-,479	-,404	-,030	-,566	-,518	,311	,324
P1Kraft	,839	1,000	,903	,743	-,453	-,619	-,482	-,651	-,039	-,575	-,600	-,577	-,475	-,008	-,614	-,627	,291	,377
P2Kraft	,755	,903	1,000	,805	-,347	-,557	-,332	-,582	,027	-,478	-,552	-,617	-,602	,120	-,505	-,512	-,039	-,057
P6Kraft	,901	,743	,805	1,000	-,419	-,538	-,381	-,112	-,131	-,468	-,463	-,461	-,478	-,017	-,479	-,447	-,131	-,009
P7Kraft	-,442	-,453	-,347	-,419	1,000	,890	,989	,262	,678	,870	,788	,268	,178	,647	,846	,905	-,093	-,305
P2Weg	-,564	-,619	-,482	-,381	,890	1,000	,881	,440	,464	,868	,921	,679	,592	,381	,882	,929	-,111	-,237
P4Weg	-,456	-,482	-,332	-,381	,989	,881	1,000	,298	,640	,880	,799	,269	,141	,642	,864	,915	-,207	-,406
P6Weg	-,169	-,651	-,582	-,112	,262	,440	,298	1,000	-,055	,384	,496	,508	,414	-,049	,416	,492	-,142	-,259
Kraftabfall	-,080	-,039	,027	-,131	,678	,464	,640	-,055	1,000	,228	,160	-,113	-,121	,958	,194	,360	,103	-,150
Vorlaufweg	-,532	-,575	-,478	-,468	,870	,868	,880	,384	,228	1,000	,936	,431	,317	,215	,991	,957	-,192	-,304
Snapweg	-,499	-,600	-,552	-,463	,788	,921	,799	,496	,160	,936	1,000	,676	,566	,120	,948	,930	-,127	-,205
Snap sprung	-,479	-,577	-,617	-,461	,268	,679	,269	,508	-,113	,431	,676	1,000	,963	-,236	,501	,504	-,084	-,010
Nachlaufweg	-,404	-,475	-,602	-,478	,178	,592	,141	,414	-,121	,317	,566	,963	1,000	-,296	,375	,385	,122	,194
Rücklaufweg	-,030	-,008	,120	-,017	,647	,381	,642	-,049	,958	,215	,120	-,236	-,296	1,000	,169	,322	-,032	-,277
Leerlaufweg	-,566	-,614	-,505	-,479	,846	,882	,864	,416	,194	,991	,948	,501	,375	,169	1,000	,965	-,245	-,340
Sprungweg	-,518	-,627	-,512	-,447	,905	,929	,915	,492	,360	,957	,930	,504	,385	,322	,965	1,000	-,205	-,354
Rücksprung- weg	,311	,291	-,039	-,131	-,093	-,111	-,207	-,142	,103	-,192	-,127	-,084	,122	-,032	-,245	-,205	1,000	,760
Differenz- kraft MAX	,324	,377	-,057	-,009	-,305	-,237	-,406	-,259	-,150	-,304	-,205	-,010	,194	-,277	-,340	-,354	,760	1,000
Differenz- kraft MIN																		

a Die Matrix ist nicht größer als null.

Anhang

Erklärte Gesamtvarianz											
Komponente	Anfängliche Eigenwerte			Summen von quadrierten Faktorladungen für Extraktion			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen				
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %		
1	9,194	51,079	51,079	9,194	51,079	51,079	6,012	33,398	33,398		
2	3,349	18,607	69,685	3,349	18,607	69,685	3,361	18,675	52,073		
3	1,932	10,736	80,421	1,932	10,736	80,421	2,598	14,433	66,506		
4	1,470	8,165	88,586	1,470	8,165	88,586	2,247	12,485	78,992		
5	,970	5,387	93,973	,970	5,387	93,973	2,018	11,209	90,201		
6	,760	4,224	98,197	,760	4,224	98,197	1,439	7,996	98,197		
7	,225	1,251	99,448								
8	,051	,281	99,729								
9	,023	,129	99,859								
10	,014	,076	99,934								
11	,007	,038	99,972								
12	,005	,028	100,000								
13	3,21E-016	1,78E-015	100,000								
14	-7,57E-018	-4,21E-017	100,000								
15	-1,61E-016	-8,94E-016	100,000								
16	-2,35E-016	-1,31E-015	100,000								
17	-3,28E-016	-1,82E-015	100,000								
18	-7,01E-016	-3,89E-015	100,000								

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Komponentenmatrix (a)

	Komponente					
	1	2	3	4	5	6
P4Weg	,956					
Rücksprungweg	,945					
Sprungweg	,925					
Snap sprung	,922			,323		
Snapweg	,906					
P6Weg	,861	,500				
P2Weg	,852	,486				
P2Kraft	-,796	,345		,336		
P1Kraft	-,717			,582		
P6Kraft	-,702	,533		,316		
P7Kraft	-,653	,345		,595		
Nachlaufweg	,647	-,565				,399
Leerlaufweg		,838			,321	
Vorlaufweg	,333	,740			,329	
Rücklaufweg	,536	-,636				,395
Differenzkraft_MAX					,883	
Differenzkraft_MIN	-,337	-,349			,791	
Kraftabfall	,526				,592	-,388

Rotierte Komponentenmatrix (a)

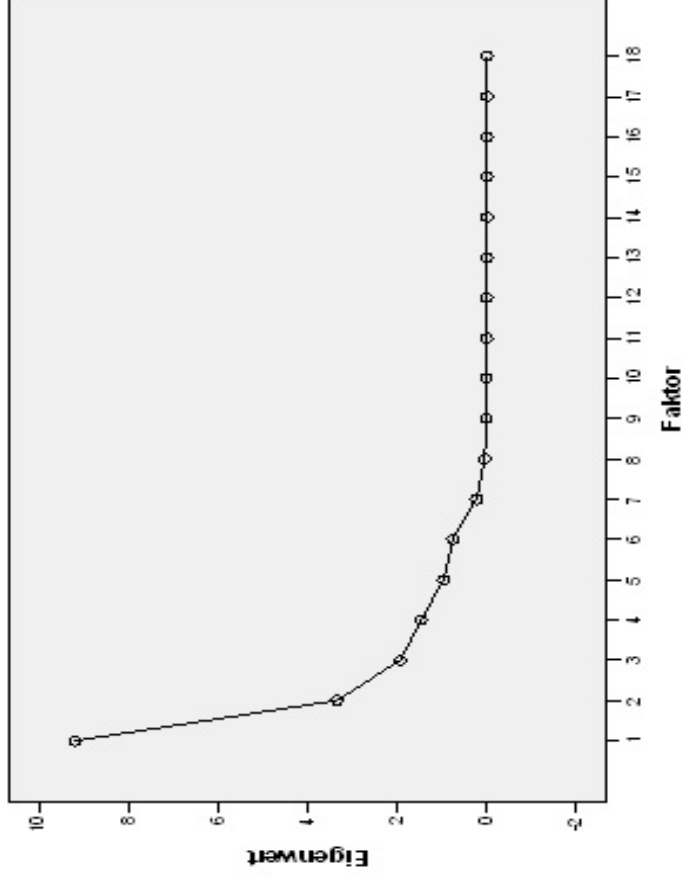
	Komponente					
	1	2	3	4	5	6
Snapweg	,956					
Sprungweg	,936					
Rücksprungweg	,895					
Snap sprung	,884			,358		
P6Weg	,831		,494			
P2Weg	,826		,522			
P4Weg	,773		,335	,443		
P7Kraft		,922				
P1Kraft		,892				
P6Kraft		,790				-,430
P2Kraft	-,327	,758				-,458
Vorlaufweg			,971			
Leerlaufweg			,949			
Rücklaufweg				,899		
Nachlaufweg				,879		
Differenzkraft_MAX	,303				,949	
Differenzkraft_MIN					,891	
Kraftabfall						,917

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.
a 6 Komponenten extrahiert

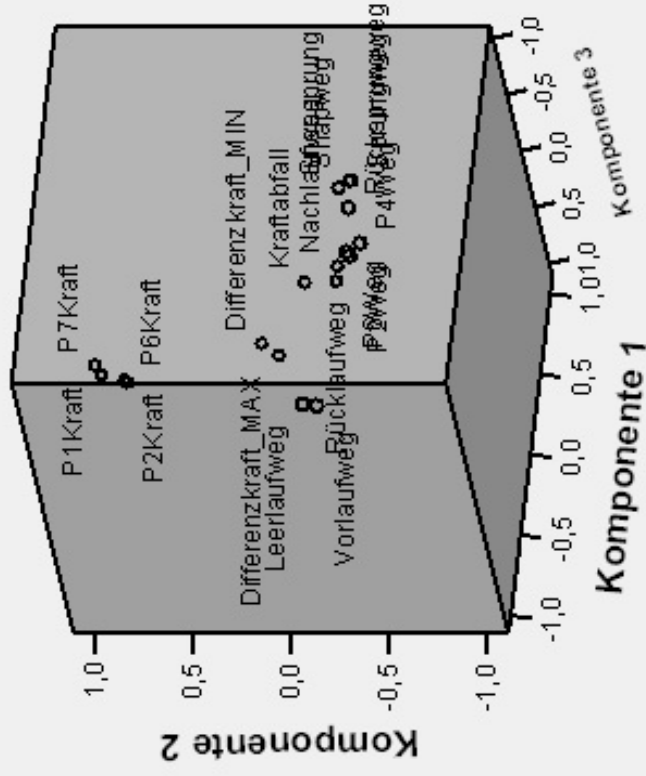
Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse
Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung

a Die Rotation ist in 6 Iterationen konvergiert.

Screep lot



Komponentendiagramm im rotierten Raum



Komponententransformationsmatrix

Komponente	1	2	3	4	5	6
1	,765	-,457	,204	,308	-,147	,218
2	,256	,390	,694	-,469	-,198	-,203
3	,048	-,018	,329	,187	,909	-,167
4	,386	,788	-,299	,297	,082	,215
5	-,408	,089	,481	,288	-,080	,711
6	-,175	,098	,219	,693	-,316	-,576

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.

Koeffizientenmatrix der Komponentenwerte

	Komponente					
	1	2	3	4	5	6
P1Kraft	,073	,378	,000	,012	,143	,256
P2Kraft	,099	,262	-,023	,117	,068	-,294
P6Kraft	,075	,284	,003	,129	-,141	-,296
P7Kraft	,049	,410	-,016	,078	-,098	,203
P2Weg	,153	,018	,103	-,065	,057	-,039
P4Weg	,072	,061	,110	,223	-,008	-,072
P6Weg	,150	,030	,089	-,070	-,003	-,021
Kraftabfall	-,065	,108	,038	-,082	,035	,820
Vorlaufweg	-,145	-,013	,483	,140	,020	,014
Snapweg	,300	,033	-,187	-,180	,062	-,061
Snapsprung	,224	,107	-,121	,053	,047	-,033
Nachlaufweg	-,093	,099	,066	,575	-,109	-,089
Rücklaufweg	-,104	,077	,080	,586	-,012	-,115
Leerlaufweg	-,124	-,001	,447	,042	-,032	,071
Sprungweg	,274	,039	-,180	-,118	,018	-,074
Rücksprungweg	,199	,062	-,051	-,060	,022	,048
Differenzkraft_MAX	,061	-,035	,036	-,142	,541	,140
Differenzkraft_MIN	,069	-,004	-,059	-,007	,461	-,046

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.
Komponentenwerte.

D.2 Output Regressionsanalyse Taster

Anmerkungen		18-MAR-2007 17:04:38
Ausgabe erstellt	Daten	H:\Promo\Messtechnische Auswertung\Auswertung Taster\SPSS-Analyse\ - FINAL - - Auswertung\Ohne Kraffanstieg!!!!\Daten_Taster_neu_ohne kraffanstieg.sav
Eingabe	Filter	<keine>
	Gewichtung	<keine>
	Aufgeteilte Datei	<keine>
	Anzahl der Zeilen in der Arbeitsdatei	37
	Definition von Fehlend	
	Verwendete Fälle	
Behandlung fehlender Werte		Benutzerdefinierte fehlende Werte werden als fehlend behandelt.
		Die Korrelationskoeffizienten für jedes Variablenpaar basieren auf allen Fällen mit gültigen Daten für das entsprechende Paar. Die Regressionsstatistik basiert auf diesen Korrelationen.
Syntax		REGRESSION /DESCRIPTIVES MEAN STDDEV CORR SIG N /MISSING PAIRWISE /STATISTICS COEFF OUTS CI BCOV R ANOVA COLLIN TOL CHANGE ZPP /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10) /NOORIGIN /DEPENDENT Bewertung /METHOD=ENTER FAC1_1 FAC2_1 FAC3_1 FAC4_1 FAC5_1 FAC6_1 /PARTIALPLOT ALL /RESIDUALS DURBIN HIST(ZRESID) NORM(ZRESID) .
Ressourcen	Verstrichene Zeit	0:00:04,25
	Erforderlicher Speicherplatz	3788 Byte
	Zusätzlich erforderlicher Speicherplatz für Diagramme von Residuen	3336 Byte

Deskriptive Statistiken

	Mittelwert	Standardabweichung	N
Bewertung	,44497	,146057	37
Factor 1	,0000000	1,000000000	37
Factor 2	,0000000	1,000000000	37
Factor 3	,0000000	1,000000000	37
Factor 4	,0000000	1,000000000	37
Factor 5	,0000000	1,000000000	37
Factor 6	,0000000	1,000000000	37

Anhang

Korrelationen

	Bewertung	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
Korrelation nach Pearson	Bewertung	,403	-,311	,016	,285	-,160	,498
	Factor 1	1,000	,000	,000	,000	,000	,000
	Factor 2	-,311	1,000	,000	,000	,000	,000
	Factor 3	,016	,000	1,000	,000	,000	,000
	Factor 4	,285	,000	,000	1,000	,000	,000
	Factor 5	-,160	,000	,000	,000	1,000	,000
	Factor 6	,498	,000	,000	,000	,000	1,000
Signifikanz (einseitig)	Bewertung	,007	,030	,464	,044	,172	,001
	Factor 1	,007	,500	,500	,500	,500	,500
	Factor 2	,030	,500	,500	,500	,500	,500
	Factor 3	,464	,500	,500	,500	,500	,500
	Factor 4	,044	,500	,500	,500	,500	,500
	Factor 5	,172	,500	,500	,500	,500	,500
	Factor 6	,001	,500	,500	,500	,500	,500
N	Bewertung	37	37	37	37	37	37
	Factor 1	37	37	37	37	37	37
	Factor 2	37	37	37	37	37	37
	Factor 3	37	37	37	37	37	37
	Factor 4	37	37	37	37	37	37
	Factor 5	37	37	37	37	37	37
	Factor 6	37	37	37	37	37	37

Aufgenommene/Entfernte Variablen(b)

Modell	Aufgenommene Variablen	Entfernte Variablen	Methode
1	Factor 6, Factor 5, Factor 4, Factor 3, Factor 2, Factor 1(a)		Eingeben

a Alle gewünschten Variablen wurden aufgenommen.

b Abhängige Variable: Bewertung

Modellzusammenfassung(b)

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Änderungsstatistiken			Durbin-Watson-Statistik		
					Änderung in R-Quadrat	Änderung in F	df2			
1	,784(a)	,614	,537	,099399	,614	7,955	6	30	,000	1,336

a Einflussvariablen : (Konstante), Factor 6, Factor 5, Factor 4, Factor 3, Factor 2, Factor 1

b Abhängige Variable: Bewertung

Anhang

ANOVA(b)

Modell	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
1					
Regression	,472	6	,079	7,955	,000(a)
Residuen	,296	30	,010		
Gesamt	,768	36			

a Einflussvariablen : (Konstante), Factor 6, Factor 5, Factor 4, Factor 3, Factor 2, Factor 1

b Abhängige Variable: Bewertung

Koeffizienten(a)

Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B		Korrelationen			Kollinearitätsstatistik		
	B	Standardfehler				Beta	Untergrenze	Obergrenze	Nullter Ordnung	Partiell	Teil	Toleranz	VIF
1													
(Konstante)	,445	,016		27,230	,000	,412	,478	,403	,544	,403	1,000	1,000	1,000
Factor 1	,059	,017	,403	3,550	,001	,025	,093	-3,311	-4,448	-3,311	1,000	1,000	1,000
Factor 2	-,045	,017	-,311	-2,743	,010	-,079	-,012	,016	,025	,016	1,000	1,000	1,000
Factor 3	,002	,017	,016	,137	,892	-,032	,036	,285	,416	,285	1,000	1,000	1,000
Factor 4	,042	,017	,285	2,509	,018	,008	,075	-,160	-,250	-,160	1,000	1,000	1,000
Factor 5	-,023	,017	-,160	-1,412	,168	-,057	,107	,498	,626	,498	1,000	1,000	1,000
Factor 6	,073	,017	,498	4,393	,000	,039	,107				1,000	1,000	1,000

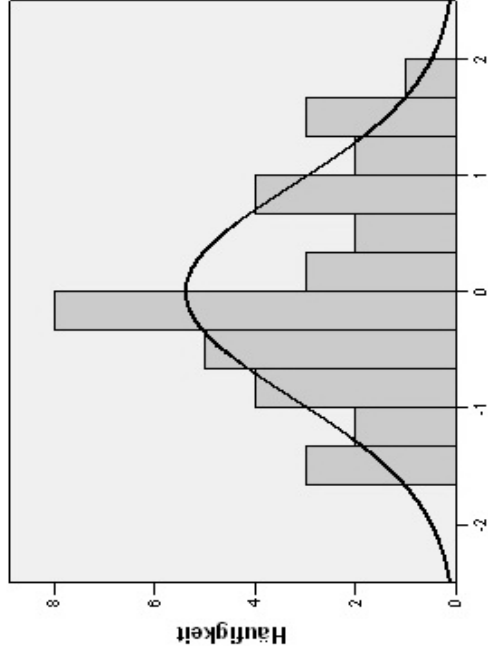
a Abhängige Variable: Bewertung

Residuenstatistik(a)

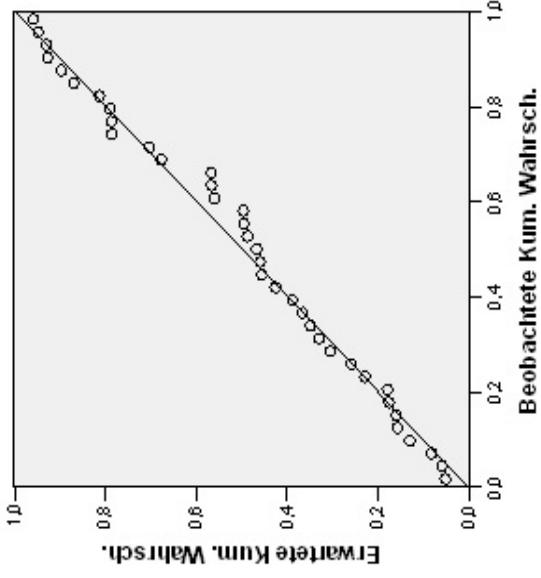
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	N
Nicht standardisierter vorhergesagter Wert	,09765	,61931	,44497	,114452	37
Nicht standardisierte Residuen	-,162362	,172927	,000000	,090739	37
Standardisierter vorhergesagter Wert	-3,035	1,523	,000	1,000	37
Standardisierte Residuen	-1,633	1,740	,000	,913	37

a Abhängige Variable: Bewertung

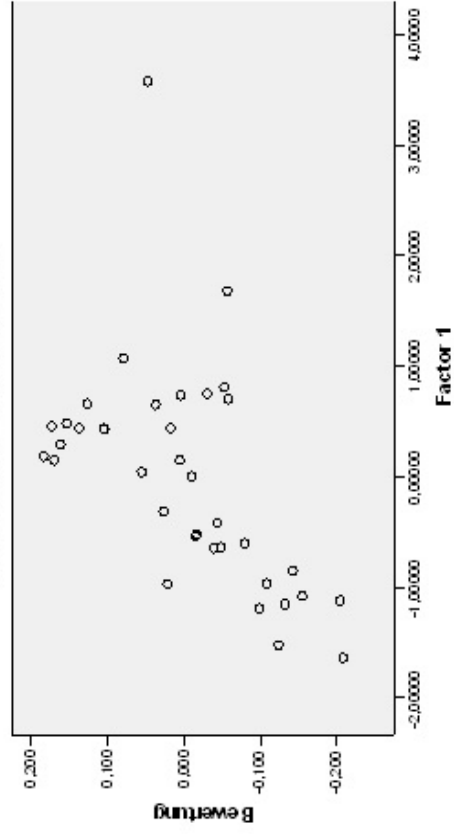
Histogramm
Abhängige Variable: Bewertung



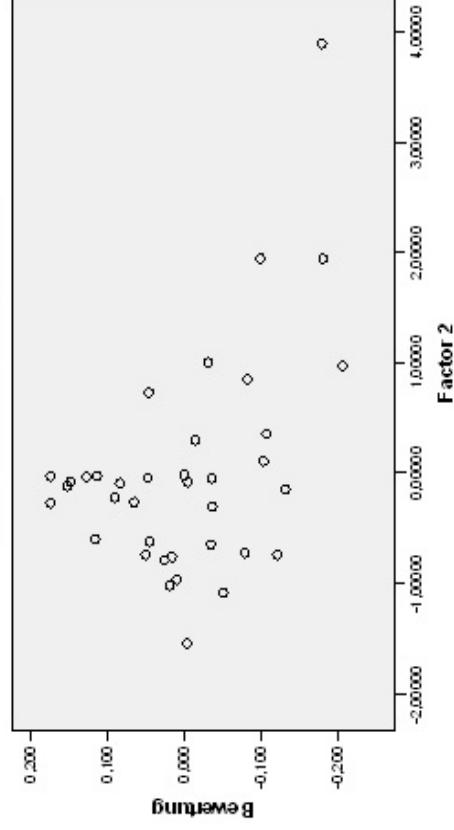
P-P-Diagramm von Standardisiertes Residuum
Abhängige Variable: Bewertung



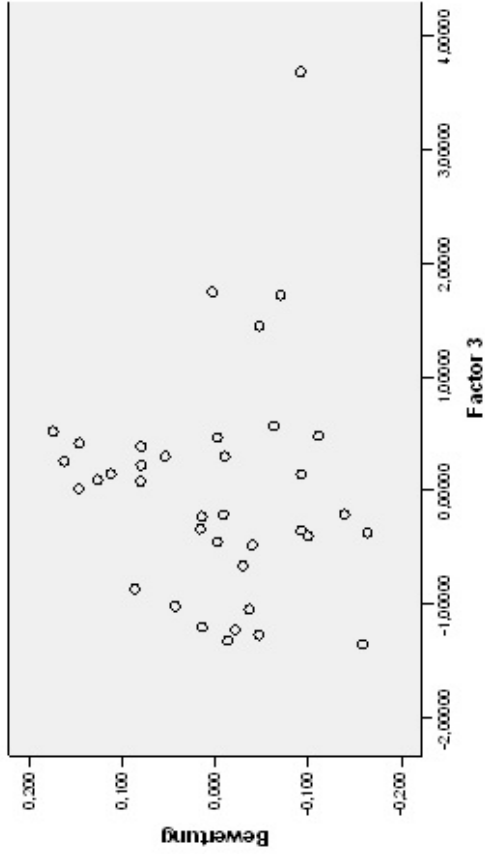
Regression Standardisiertes Residuum
Partielles Regressionsdiagramm
Abhängige Variable: Bewertung



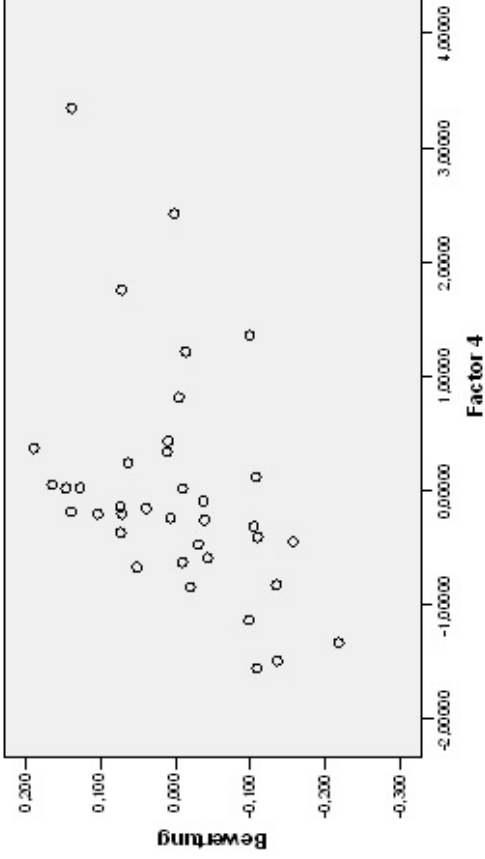
Partielles Regressionsdiagramm
Abhängige Variable: Bewertung



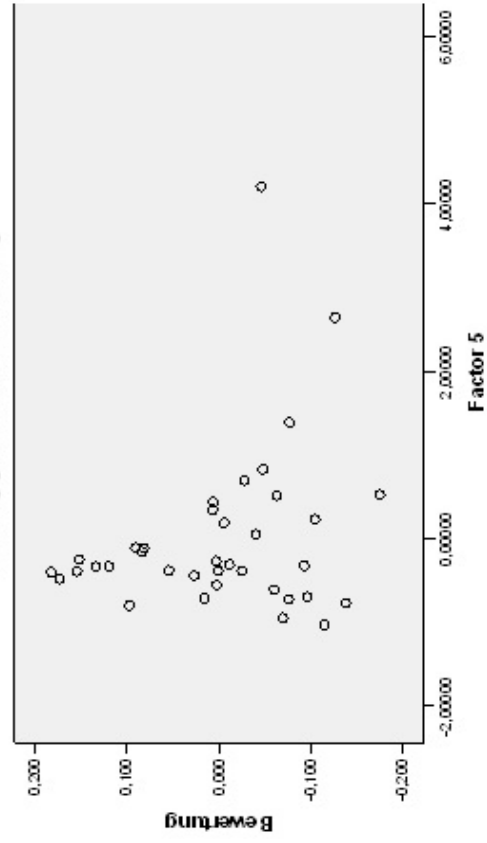
Partielles Regressionsdiagramm
Abhängige Variable: Bewertung



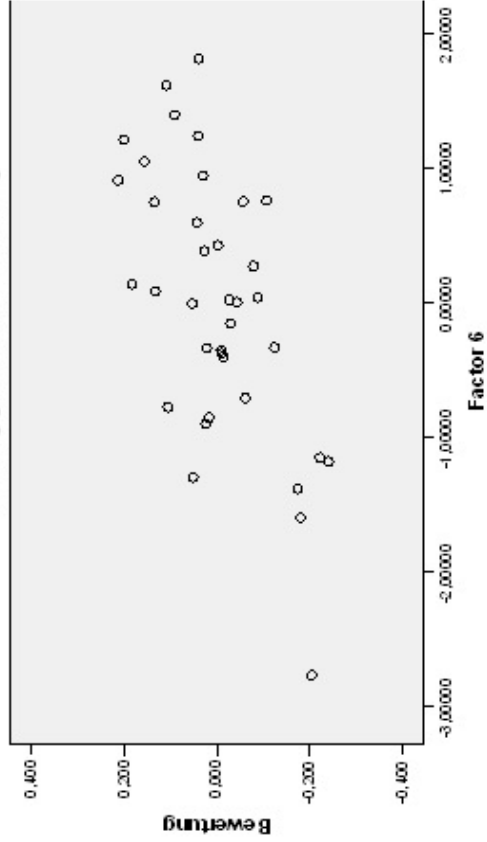
Partielles Regressionsdiagramm
Abhängige Variable: Bewertung



Partielles Regressionsdiagramm
Abhängige Variable: Bewertung



Partielles Regressionsdiagramm
Abhängige Variable: Bewertung



D.3 Output Faktorenanalyse Drehschalter

Anmerkungen		28-JUL-2006 16:53:18
Ausgabe erstellt		
Kommentare		
Eingabe	Daten	H:\Promo\Messtechnische Auswertung\Auswertung Drehschalter\SPSS-Analyse\ - FI-NAL - - Auswertung\Nachauswertung_aller_Drehschalter.sav
	Filter	<keine>
	Gewichtung	<keine>
	Aufgeteilte Datei	<keine>
	Anzahl der Zeilen in der Arbeitsdatei	19
	Definition von Fehlenden Werten	
Verarbeitung fehlender Werte	Verwendete Fälle	MISSING=EXCLUDE: Benutzerdefinierte fehlende Werte werden als fehlend behandelt. LISTWISE: Statistiken basieren auf Fällen, die für keine der verwendeten Variablen fehlende Werte aufweisen.
	Syntax	<pre> FACTOR /VARIABLES Rastpositionenanzahl Raddurchmesser Drehmoment Drehmomentverlauf /MISSING LISTWISE /ANALYSIS Rastpositionenanzahl Raddurchmesser Drehmoment Drehmomentverlauf /PRINT INITIAL EXTRACTION ROTATION FSCORE /FORMAT SORT BLANK(.30) /PLOT EIGEN ROTATION /CRITERIA MINEIGEN(0.5) ITERATE(25) /EXTRACTION PC /CRITERIA ITERATE(25) /ROTATION VARIMAX /SAVE REG(ALL) /METHOD=CORRELATION . </pre>
Ressourcen	Verstrichene Zeit	0:00:01,54
	Maximal benötigter Speicher	4396 (4,293K) Byte
Erzeugte Variablen	FAC1_1	Komponentenwert 1
	FAC2_1	Komponentenwert 2
	FAC3_1	Komponentenwert 3

Kommunalitäten

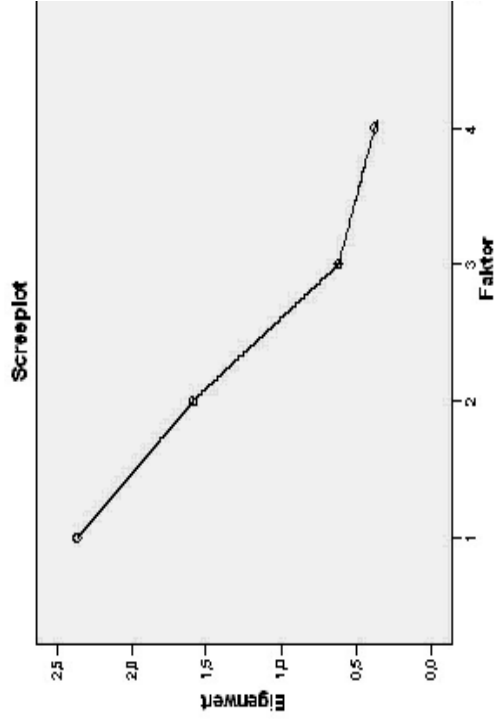
	Anfänglich	Extraktion
Rastpositionenanzahl	1,000	,910
Raddurchmesser	1,000	,873
Drehmoment	1,000	,886
Drehmomentverlauf	1,000	,920

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Erklärte Gesamtvarianz

Komponente	Anfängliche Eigenwerte			Summen von quadrierten Faktorladungen für Extraktion			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen		
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %
1	2,366	47,326	47,326	2,366	47,326	47,326	1,687	33,742	33,742
2	1,592	31,830	79,156	1,592	31,830	79,156	1,471	29,416	63,158
3	,617	12,332	91,488	,617	12,332	91,488	1,416	28,330	91,488
4	,051	1,025	100,000						

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.



Komponentenmatrix(a)

	Komponente		
	1	2	3
Drehmoment	,906		
Raddurchmesser	,751		
Rastpositionenanzahl	-,322	,867	-,475
Drehmomentverlauf	-,449	,799	

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.
a 3 Komponenten extrahiert

Rotierte Komponentenmatrix(a)

	Komponente		
	1	2	3
Drehmomentverlauf	,916		
Rastpositionenanzahl	,915		
Drehmoment		,667	,659
Raddurchmesser			,902

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.
Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.
a Die Rotation ist in 5 Iterationen konvergiert.

Komponententransformationsmatrix

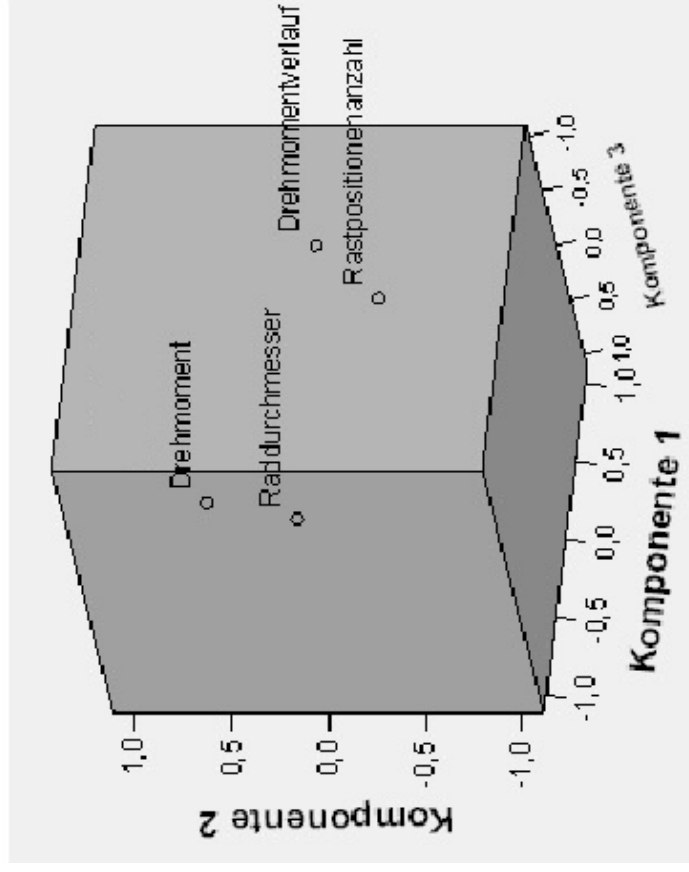
Komponente	1	2	3
1	-,354	,678	,644
2	,934	,228	,274
3	,039	,699	-,714

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.
Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.

Koeffizientenmatrix der Komponentenwerte

	Komponente		
	1	2	3
Rastpositionenanzahl	,542	-,234	,333
Raddurchmesser	,027	-,282	,804
Drehmoment	,014	,287	,300
Drehmomentverlauf	,554	,307	-,313

Komponentendiagramm im rotierten Raum



Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.
 Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.

Komponentenwerte.

Kovarianzmatrix des Komponentenwerts

Komponente	1	2	3
1	1,000	,000	,000
2	,000	1,000	,000
3	,000	,000	1,000

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.
Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.
Komponentenwerte.

D.4 Output Korrelationsanalyse Drehschalter

Anmerkungen		28-JUL-2006 16:55:37
Ausgabe erstellt	H:\Promo\Messtechnische Auswertung\Auswertung Drehschalter\SPSS-Analyse\ - FI-	
Kommentare	NAL -- Auswertung\Nachauswertung aller Drehschalter.sav	
Eingabe	Daten	
	Filter	<keine>
	Gewichtung	<keine>
	Aufgeteilte Datei	<keine>
	Anzahl der Zeilen in der Arbeitsdatei	19
Behandlung fehlender Werte	Definition von Fehlend	
	Verwendete Fälle	Benutzerdefinierte fehlende Werte werden als fehlend behandelt.
Syntax	Die Statistik für jedes Variablenpaar basiert auf allen Fällen, die gültige Daten für dieses Paar aufweisen. CORRELATIONS /VARIABLES=Bewertung Factor1 Factor2 Factor3 /PRINT=TWOTAIL NOSIG /STATISTICS DESCRIPTIVES /MISSING=PAIRWISE.	
Ressourcen	Verstrichene Zeit	0:00:00,24

	Bewertung	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3
Bewertung	1	-,511(*)	-,466(*)	-,144
Korrelation nach Pearson		,026	,044	,555
Signifikanz (2-seitig)		19	19	19
N	19	1	,000	,000
FACTOR 1	-,511(*)	1	1,000	1,000
Korrelation nach Pearson		19	19	19
Signifikanz (2-seitig)		,000	1	,000
N	19	1,000	19	1,000
FACTOR 2	-,466(*)	,000	1	,000
Korrelation nach Pearson		1,000	19	1,000
Signifikanz (2-seitig)		19	,000	1
N	19	1,000	1,000	19
FACTOR 3	-,144	,000	,000	1
Korrelation nach Pearson		,555	1,000	1,000
Signifikanz (2-seitig)		19	19	19
N	19	1	19	19

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Anhang E: Beschreibung der verwendeten statistischen Methoden

E.1 Faktorenanalyse mit SPSS [zitiert nach Geiser, C. 2003/2004]

Ziel von Faktorenanalysen (FA) ist es allgemein, multivariate Zusammenhänge (Korrelationen) zwischen *manifesten (beobachtbaren) Variablen* („Indikatoren“) durch eine geringere Anzahl von *latenten (nicht direkt beobachtbaren) Variablen* („Faktoren“) zu erklären. Hierbei wird häufig angenommen, dass die Faktoren als latente Konstrukte ursächlich für die Korrelationen zwischen den manifesten Variablen verantwortlich sind. Das Pfaddiagramm in **Abbildung E.1** soll das Konzept der Faktorenanalyse verdeutlichen.

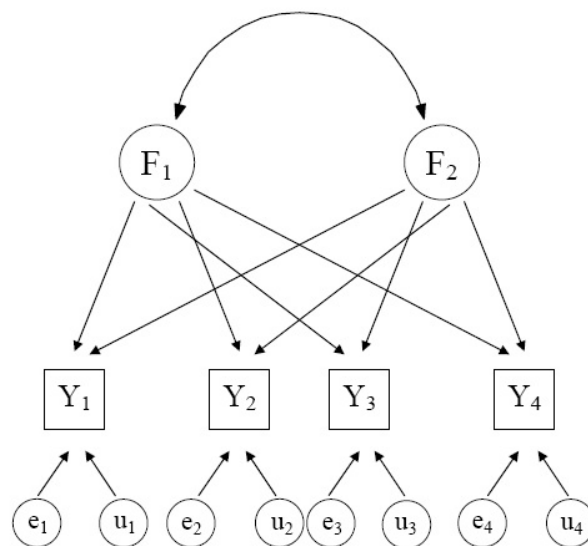


Abbildung E.1: Pfaddiagramm eines Zwei-Faktoren-Modells mit vier manifesten (Y-) Variablen

Abbildung E.1 zeigt ein einfaches Zwei-Faktoren-Modell. Die beiden Faktoren F_1 und F_2 sind in Kreisen dargestellt, was zum Ausdruck bringen soll, dass es sich bei ihnen um nicht beobachtete, latente Variablen handelt. F_1 und F_2 senden Pfeile zu den vier beobachteten (manifesten) Variablen $Y_1 - Y_4$ aus. Die Pfeilrichtung symbolisiert, dass F_1 und F_2 als Ursache für die Variabilität in den manifesten Y-Variablen angesehen werden (die Faktoren sind also in dem Modell die unabhängigen und die Y-Variablen die abhängigen Variablen). Eine zusätzliche Annahme ist, dass die manifesten Variablen nicht vollständig durch die Faktoren determiniert werden. Vielmehr

gibt es in den meisten Fällen bei einer manifesten Variable einen Varianzanteil, der nicht durch gemeinsame Faktoren erklärt werden kann und der auf andere (systematische und/oder unsystematische) Einflüsse zurückzuführen ist. Aus diesem Grund zeigen zusätzlich noch die latenten Variablen e und u auf die beobachteten Y -Variablen. „ e “ (für *error*) steht hierbei für die (unsystematischen) Messfehlereinflüsse und „ u “ (für *uniqueness*) für spezifische (systematische) Einflüsse, die auf eine manifeste Variable wirken. Spezifische Einflüsse können zum Beispiel durch spezielle Itemcharakteristika (z.B. die Formulierung des Items) zu Stande kommen. Der gebogene Doppelpfeil zwischen F_1 und F_2 bringt zum Ausdruck, dass die beiden Faktoren möglicherweise miteinander korrelieren. Wenn Faktoren korrelieren, bezeichnet man sie als „schiefwinklig“ oder „oblique“. Sind sie dagegen unkorreliert, so spricht man von „orthogonalen“ Faktoren.

$$Y_1 = a_{11} * F_1 + a_{12} * F_2 + u_1 + e_1$$

$$Y_2 = a_{21} * F_1 + a_{22} * F_2 + u_2 + e_2$$

$$Y_3 = a_{31} * F_1 + a_{32} * F_2 + u_3 + e_3$$

$$Y_4 = a_{41} * F_1 + a_{42} * F_2 + u_4 + e_4$$

Die Konstanten $a_{11} - a_{42}$ stehen hierbei für die so genannten *Faktorladungen*. Diese wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in dem Pfaddiagramm in Abbildung 1 dargestellt (es ist aber durchaus üblich, die Ladungen in einem Pfadmodell anzugeben, in dem man diese an die Pfeile schreibt, welche von den Faktoren auf die manifesten Y -Variablen zeigen). Die Faktorladungen sind das Pendant zu den Regressionsgewichten, die uns aus der Regressionsanalyse bekannt sind. In der Tat weisen Regression und Faktorenanalyse eine Reihe von Gemeinsamkeiten auf. So wird bei beiden Verfahren zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen („Prädiktoren“) unterschieden. Der wesentliche Unterschied zwischen multipler Regression und der FA ist, dass die unabhängigen Variablen (die Faktoren) bei der FA latente Variablen sind. Zudem sind im Modell der FA simultan mehrere abhängige und unabhängige Variablen Gegenstand der Analyse, während wir bei der normalen Regressionsanalyse nur eine Kriteriumsvariable zurzeit betrachten.

Die Anwendung der Faktorenanalyse macht insbesondere dann Sinn, wenn es darum geht, Gemeinsamkeiten in Datensätzen mit vielen manifesten Variablen aufzude-

cken. Faktorenanalysen dienen also gewissermaßen zur Datenreduktion (in SPSS findet man die FA daher unter der Rubrik „Dimensionsreduktion“).

E.2 Multiple lineare Regressionsanalyse [Auszug; zitiert nach Baur, N.; Schulze, G. 10.2003]

1. Einführung

In soziologischen Untersuchungen geht es häufig um die Frage, ob und wie eine oder mehrere unabhängige Variablen auf eine abhängige Variable einwirken. Eine typische Fragestellung wäre etwa, von welchen Faktoren es abhängt, wie hoch das Einkommen einer Person ist. In diesem Fall wäre das Einkommen die abhängige Variable, Größen wie das Alter, die berufliche Qualifikation, die Dauer der Berufstätigkeit, das Geschlecht usw. die unabhängigen Variablen. Um den Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable und den sie erklärenden unabhängigen Variablen zu analysieren, muss eine Modellannahme hinsichtlich der Art des Zusammenhanges getroffen werden. Dieser kann verschiedene Formen annehmen, er kann z.B. logistisch sein oder exponentiell oder aber – wie im Folgenden genauer dargestellt – linear.

Welche Form des Zusammenhanges man annimmt, kann einerseits in empirischen Erkenntnissen begründet sein, andererseits durch Hypothesen und theoretische Annahmen über den Gegenstandsbereich.

Ein *linearer* Zusammenhang liegt dann vor, wenn sich die Ausprägung der abhängigen Variable proportional mit der Veränderung der unabhängigen Variable verändert. So könnte z.B. jedes zusätzliche Berufsjahr einen Anstieg des Einkommens um den Faktor 0.05 bewirken.

Das Ziel der multiplen linearen Regressionsanalyse ist es, eine Schätzgleichung zur möglichst genauen Beschreibung der durchschnittlichen linearen Abhängigkeit einer Variablen von mehreren anderen Variablen aufzustellen. Damit werden zwei Probleme gelöst:

- Stärke und Richtung des Einflusses der einzelnen unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable können abgeschätzt werden. Zudem kann untersucht werden, wie gut alle betrachteten unabhängigen Variablen zusammen die abhängige Variable im statistischen Sinne erklären (s.u.).
- Für Merkmalsträger, deren Ausprägung der abhängigen Variable nicht bekannt ist, kann diese geschätzt werden.

Die multiple lineare Regressionsanalyse kann somit zu erklärenden ebenso wie zu prognostischen Zwecken eingesetzt werden.

2. Statistische Grundlagen

2.1 Das Grundmodell der linearen Regression mit nur 2 Variablen

Modelltheoretisch ist zunächst zwischen dem linearen Modell der Gesamtheit und dem deskriptiven Modell der Stichprobe zu unterscheiden. Es sei:

Y abhängige Variable (Kriterium)
X unabhängige Variable (Prädiktor)

2.1.1 Das lineare Modell der Gesamtheit

In der Gesamtheit besteht zwischen den Variablen X und Y ein Zusammenhang der Form

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X + U$$

mit:

α_0 Regressionskonstante

Im bivariaten Modell ist dies der Achsenabschnitt von Y bei $x=0$; vgl. **Abbildung E.2**. Inhaltlich ist dieser Achsenabschnitt nur interpretierbar, wenn $x = 0$ im Stütz- bzw. Geltungsbereich des Modells liegt. Im Beispiel mit den Variablen Einkommen und Anzahl Berufsjahre würde diese Größe das geschätzte Einkommen eines Berufsanfängers (0 Berufsjahre) wiedergeben.

α_1 Steigungsparameter

der Regressionsgeraden, Regressionskoeffizient; gibt an, um wie viele Einheiten sich y ändert, wenn sich x um eine Einheit ändert;

U Störvariable (s. u.).

Die Modellvorstellung ist also, dass der deterministische Zusammenhang zwischen Y und X *in der Gesamtheit* durch eine Störvariable U überlagert und so zu einem stochastischen Zusammenhang wird. Jedem X-Wert ist eine "Urne" von Y-Werten zugeordnet. Die Störvariable U ist nicht beobachtbar und damit auch nicht messbar.

Die abhängige Variable wird geschätzt mit:

$$Y' = \alpha_0 + \alpha_1 X \quad (Y' = \text{Schätzwert für das lineare Modell der Gesamtheit})$$

2.1.2 Das deskriptive lineare Modell (Stichprobe)

In der Stichprobe besteht zwischen den Variablen X und Y ein Zusammenhang der Form

$$Y = b_0 + b_1x + e$$

e Residuen; *beobachtete* Abweichungen $y_i - y'_i$ in der Stichprobe; Die e_i sind nicht Realisationen der U_i ; U hat keine Realisationen. In der Gesamtheit existieren umgekehrt keine Residuen.

Die Schätzgleichung für die Stichprobe lautet:

$$Y' = b_0 + b_1x$$

Die y -Messwerte der Stichprobe setzen sich somit zusammen aus den jeweiligen Schätzwert y' und den Residuen e_i :

$$y_i = y'_i + e_i$$

Die Funktion $y' = b_0 + b_1x$ beschreibt den Zusammenhang zwischen Y und X deshalb zwar im „Wesentlichen“, jedoch nicht perfekt; die Messwerte streuen um den Graphen der Funktion (= Regressionsgerade). Ziel der Regressionsschätzung ist es, die Parameter b_0 und b_1 der Regressionsgeraden so zu bestimmen, dass die quadrierten Abstände der y -Werte (Messwerte) zur Regressionsgeraden - auf der die Schätzwerte liegen - *insgesamt* minimiert werden (Methode der kleinsten Quadrate). Dabei werden die Koeffizienten b_0 und b_1 bestimmt als:

$$b_0 = \bar{y} - b_1\bar{x} \text{ und } b_1 = S_{xy} / S_x^2$$

Die Quadratsumme der Residuen stellt den Teil der Streuung dar, der durch die Regressionsgerade *nicht* "erklärt" wird ($y_i - y'_i$). Unter der durch die Regressionsgerade "erklärten" Streuung versteht man die Abweichungen der *Schätzwerte* vom Mittelwert ($y' - \bar{y}$).

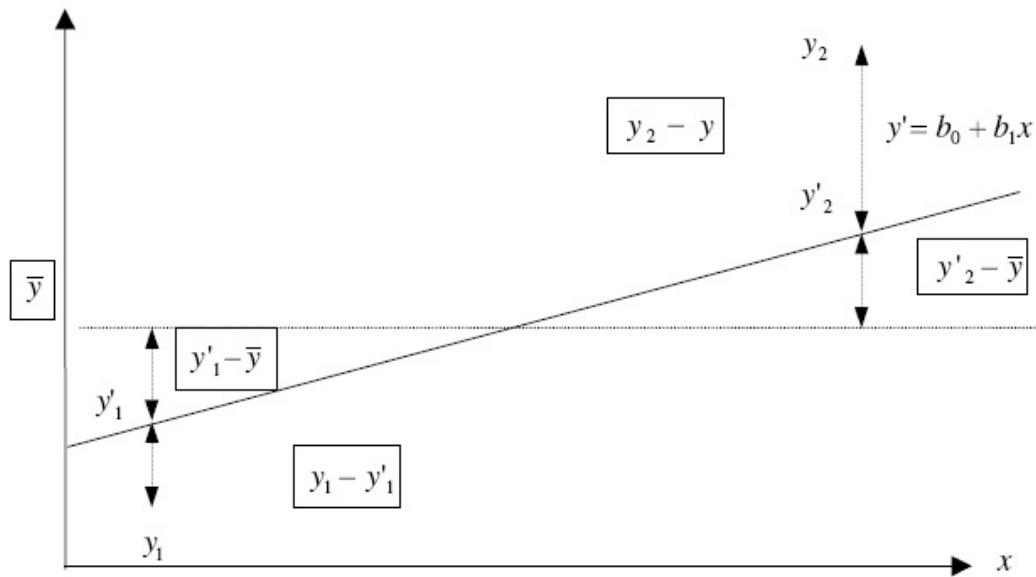


Abbildung E.2: Streuungserlegung

2.2. Das Modell der multiplen Regression

2.2.1 Schätzgleichung

Es werden *mehrere* unabhängige Variablen x zur Schätzung der abhängigen Variablen Y herangezogen.

$$Y' = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_m * x_m$$

bzw.:

$$Y' = b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_m * x_m \text{ (standardisierte Werte)}$$

Auch im multivariaten Modell geht es darum, die b -Parameter so zu bestimmen, dass die Summe der quadrierten Abweichungen minimiert wird. Die Vorstellung einer zum Modell gehörenden Regressionsgeraden muss allerdings aufgegeben werden.