

Lehrstuhl für Ergonomie
der Technischen Universität München

Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen

Jörg Reisinger

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

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr. phil. habil. Birgit Spanner-
Ulmer, Technische Universität Chemnitz

Die Dissertation wurde am 14.07.2008 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 05.02.2009 angenommen.

Für Felix und Nico

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Automotive Competence Center der Hochschule Heilbronn in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Ergonomie der TU München und der Audi AG in Ingolstadt. An dieser Stelle möchte ich allen Denen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle bedanke ich mich bei Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb, für das stetige Interesse an der Arbeit, was in zahlreichen Diskussionen und Anregungen sehr zu ihrem Gelingen beigetragen hat. Mein besonderer Dank gilt auch Frau Prof. Dr. phil. habil. Dr.-Ing. Birgit Spanner-Ulmer für das große Interesse und die Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens, aber auch für ihre Initiative zum Start dieses Projektes.

Prof. Dr. Ing. Jörg Wild kommt als Leiter des Teams Haptik im Automotive Competence Centers eine wichtige Rolle zu. Auch bei ihm möchte ich mich für die praktischen Ratschläge und Unterstützung, die stets zielführenden Anregungen sowie den notwendigen Freiraum bedanken. In diesem Zusammenhang muss Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Mauter von der Audi AG gedankt werden, einem der Hauptinitiatoren des Projektes, der durch sein Wissen und seine große Erfahrung die Grundlage für einen schnellen Erfolg des Projektes gelegt hat. In zahlreichen Diskussionen und anhand vieler praktischer Problemstellungen hat er einen unersetzlichen Beitrag geleistet.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kollegen, Mitarbeitern und Studenten für den Einsatz und die großartige, kreative Unterstützung bedanken. In diesem Sinne gilt auch mein Dank der Firma Ehmann und Partner für den Aufbau der Tauchspulenaktoren, sowie der Firma Schunk Spann- und Greiftechnik für die großzügige und unbürokratische Unterstützung meiner Promotion. Getragen wurde das Projekt von der Landesstiftung Baden-Württemberg.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mir eine kritische, aber stets positive und kreative Lebenseinstellung vermittelt haben und mir immer ein Rückhalt waren.

Meinen Söhnen Nico und Felix und meiner Frau Nadja gilt mein besonderer Dank, sie haben die Belastung dieser Arbeit mitgetragen und waren meine besondere Motivation und Freude.

“The system should treat all user input as sacred“

Jef Raskin (2001)

Inhalt

1	MOTIVATION	1
1.1	Zielsetzung und Schwerpunkte.....	2
1.2	Gliederung.....	2
2	GRUNDLAGEN	3
2.1	Der Begriff Haptik.....	3
2.2	Geschichtliche Betrachtung der Haptik.....	3
2.3	Verwendung des Begriffs Haptik	4
2.4	Haptische Wahrnehmung und Physiologie.....	4
2.4.1	Wahrnehmungsprozess	5
2.4.2	Physiologische Hintergründe	5
2.5	Haptische Gliederungen.....	14
2.5.1	Verhaltenspsychologische Betrachtung	14
2.5.2	Funktionale Gruppen	14
2.5.3	Arbeitsgebiete	15
2.5.4	Technische Aspekte	15
2.6	Bedienelemente im Kraftfahrzeug.....	17
3	STAND DER FORSCHUNG	19
3.1	Haptische Wahrnehmung und Effekte	19
3.2	Haptische Sensoren und Displays.....	20
3.3	Haptische Kodierung.....	21
3.4	Haptische Beschreibung von Bedienelementen.....	21
3.4.1	Einordnung in der Ergonomie	22
3.4.2	Betätigungshaptik	22
3.4.3	Oberflächenhaptik.....	23
4	UNTERSCHIEDUNG VON BEDIENELEMENTEN	25
4.1	Bewegungsformen von Bedienelementen: translatorisch und rotatorisch.....	25
4.2	Definition: Taster und Schalter	26
4.3	Technische Ausführungsformen.....	27
4.3.1	Elektrische Auswertung	27
4.3.2	Erzeugung des haptischen Feedbacks	28

5	UNTERSUCHUNG ROTATORISCHER BEDIENELEMENTE.....	31
5.1	Beschreibung rotatorischer Bedienelemente.....	31
5.1.1	Begriffsdefinitionen.....	32
5.1.2	Messung rotatorischer Kennlinien.....	34
5.1.3	Betätigung.....	35
5.1.4	Betrachtung realer Bedienelemente.....	35
5.1.5	Rückschlüsse.....	36
5.2	Eignung der Drehmoment-Drehwinkel-Darstellung.....	37
5.2.1	Definition der Problembereiche.....	37
5.2.2	Hypothesenbildung.....	41
5.2.3	Abwägung verschiedener Lösungsansätze.....	42
5.3	Lösungsansatz zur intuitiven haptischen Beschreibung von Bedienelementen.....	43
5.3.1	Ruhelage – Betrachtung anhand der Kurvendiskussion.....	43
5.3.2	Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit – Mathematischer Hintergrund.....	43
5.3.3	Asymmetrische Kennlinien.....	45
5.3.4	Zusammenfassung.....	47
5.4	Modell eines rotatorischen Bedienelementes.....	48
5.4.1	Aufbau.....	48
5.4.2	Zusammenhänge.....	49
5.4.3	Zusammenfassung der Modellbetrachtung.....	52
5.5	Zu den Begriffen Integral, Energie und Arbeit.....	53
5.6	Versuch zur Prüfung der Integralhypothese bei Drehstellern.....	54
5.6.1	Versuchskonzept.....	54
5.6.2	Versuchsaufbau.....	60
5.6.3	Pilotversuch Vergleichbarkeit der Haptik mit grafischen Darstellungen.....	60
5.6.4	Versuchsdurchführung.....	62
5.6.5	Versuchsergebnisse.....	66
5.6.6	Zusammenfassung.....	81
5.7	Versuch zur Parametrisierung rotatorischer Bedienelemente.....	82
5.7.1	Versuchskonzept.....	82
5.7.2	Identifikation der technischen Parameter.....	83
5.7.3	Pilotversuch zur Ermittlung bipolarer Adjektivpaarungen.....	87
5.7.4	Versuchsablauf.....	89
5.7.5	Versuchsergebnisse.....	90
5.7.6	Bezug der Ergebnisse zur Integraldarstellung.....	106
5.7.7	Vergleich der „idealen“ Kennlinien mit realen Bedienelementen.....	108

6	UNTERSUCHUNG TRANSLATORISCHER BEDIENELEMENTE	109
6.1	Technische Beschreibung translatorischer Bedienelemente: Kraft-Weg-Darstellung	109
6.1.1	Begriffe	110
6.1.2	Messung von Drucktastern.....	112
6.1.3	Betätigung.....	112
6.1.4	Betrachtung realer Bedienelemente	112
6.1.5	Rückschlüsse und offene Fragen.....	115
6.2	Identifikation haptischer Parameter.....	116
6.2.1	Federvorspannung.....	116
6.2.2	Lage des Schaltpunktes in Kraft und Weg.....	117
6.2.3	Höhe und Steigung des Kraftsprungs.....	117
6.2.4	Flanken vor und nach dem Kraftsprung.....	117
6.2.5	Endanschlag	119
6.2.6	Gewählte Parametrisierung	119
6.3	Eignung der Kraft-Weg-Darstellung	122
6.3.1	Integraldarstellung	122
6.3.2	Kraft-Weg-Darstellung	123
6.3.3	Differentialdarstellung	123
6.3.4	Gedämpfte Schwingung.....	123
6.3.5	Zusammenfassung.....	125
6.3.6	Hypothesenbildung	125
6.4	Versuch zur Prüfung der Visualisierung bei Drucktastern	126
6.4.1	Versuchskonzept	126
6.4.2	Versuchsaufbau.....	132
6.4.3	Versuchsdurchführung.....	133
6.4.4	Diskussion der Versuchsergebnisse	136
6.5	Versuch zur Parametrisierung translatorischer Bedienelemente.....	160
6.5.1	Identifizierung und Festlegung der haptischen Parameter	160
6.5.2	Versuchsumgebung.....	161
6.5.3	Versuchskonzept	161
6.5.4	Pilotversuch Adjektivfindung und Erstellung des Fragebogens	165
6.5.5	Versuchsablauf.....	166
6.5.6	Versuchsergebnisse.....	166
6.5.7	Diskussion der Versuchsergebnisse	207
6.5.8	Zusammenfassung.....	211

7	ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION	213
7.1	Visualisierung.....	213
7.2	Ereignisorientierung der Visualisierung.....	213
7.3	Parametrisierung	214
7.4	Subjektive Beschreibung.....	215
7.5	Lageabhängigkeit und Abstützung	216
7.6	Ausblick	216
	QUELLENVERZEICHNIS	218
	FORMELZEICHEN.....	227
	ABKÜRZUNGEN	230
	TABELLENVERZEICHNIS	231
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	232
	ANHANG.....	239

Kurzfassung

Der steigende Funktionsumfang technischer Geräte erfordert neue, den Benutzer weniger stark beanspruchende Bedienkonzepte. Gerade im Kraftfahrzeug haben sich in den vergangenen Jahren sogenannte Dreh-Drück-Steller als zentrale Bedienelemente etabliert, mit denen der Benutzer innerhalb von Menüstrukturen navigieren kann. Diese Form der Bedienung stellt besondere Ansprüche an die Qualität der Rückmeldung von Bedienelementen, gerade in einem dynamischen Umfeld und bei der Forderung nach blinder Bedienung. Für die Rückmeldung kommen optische, akustische und haptische Reize in Frage, wobei nicht das Vorhandensein selbst, sondern die Beschaffenheit der Rückmeldung eine zentrale Frage darstellt.

Der Fokus dieser Arbeit legt sich diesbezüglich auf die haptische Rückmeldung bei Betätigung von Drehstellern und Drucktastern. Zielsetzung ist die Klärung von Zusammenhängen zwischen subjektivem Eindruck und objektiven technischen Parametern.

Durch den Aufbau von Bedienelementen mit frei programmierbarem haptischem Feedback wird eine systematische Variation objektiver Parameter als Grundlage für die eingesetzten Probandenstichproben ermöglicht. Verschiedene Visualisierungen zur Darstellung des subjektiven haptischen Eindrucks eines Bedienelementes werden erörtert. In Versuchsreihen stellt sich heraus, dass das Integral des Drehmomentes über dem Drehwinkel das Rastverhalten von Drehstellern beschreibt. Vergleichbare Untersuchungen an Drucktastern zeigen je nach Ausprägung des Schaltpunktes, weitere unterschiedliche Beschreibungsmöglichkeiten, welche sich mit der ereignisorientierten Wahrnehmung des Menschen erklären lassen. Durch Kenntnis dieser Zusammenhänge lassen sich relevante technische Parameter identifizieren, die in weiteren Versuchsreihen qualifiziert und quantifiziert werden. Im Gesamten leisten die Ergebnisse dieser Arbeit einen grundlegenden Beitrag zum Verständnis entsprechender Mechanismen der haptischen Wahrnehmung. Darauf aufbauend bietet die Arbeit Entwicklern und Designern von Bedienelementen Hilfsmittel für den zielgerichteten Entwurf und die Weiterentwicklung von betätigungshaptischem Design.

1 Motivation

Der technische Fortschritt, vor allem der Einsatz der Digitaltechnik, hat in den vergangenen Jahrzehnten eine massive Zunahme neuer Funktionen und Möglichkeiten bewirkt. Diese Entwicklung bringt jedoch die Problematik mit sich, dass die neuen Funktionen mit all ihren Möglichkeiten auch bedienbar sein müssen. Bedienkonzepte mit einer geringst möglichen Beanspruchung des Benutzers sind gefragt. Vor diesem Hintergrund hat sich der Trend zu zentralen Bedienelementen entwickelt, wie sie beispielsweise im automobilen Sektor mit dem Audi MMI, dem BMW iDrive, dem Daimler COMAND, aber auch in der Unterhaltungselektronik beim Apple iPod zu finden sind.

In Menüstrukturen wählt der Benutzer die gewünschten Funktionen aus. Als Eingabemedium haben sich vornehmlich Dreh-Drück-Steller durchgesetzt. Die Drehfunktion realisiert dabei die Positionierung innerhalb einer Auswahl, welche anschließend mittels der Druckfunktion selektiert wird.

Die Anwendung im Automobil erfordert, aufgrund starker dynamischer Einflüsse sowie der starken Beanspruchung des visuellen Sinneskanals, die Möglichkeit einer „blinden“ Bedienung. Im Vergleich zur klassischen Funktion von Drehstellern, ist eine exakte Positionierung notwendig, um Menüpunkte gezielt auswählen zu können, was einer präzisen und eindeutigen Rückmeldung bedarf.

Die Rückmeldung im Sinne der Informationsverarbeitung in einem Mensch-Maschine-System (MMS) besteht in der Information des Benutzers, dass die gewünschte Funktion angewählt, bzw. aktiviert worden ist. Die Art und Weise der Rückmeldung kann über verschiedene Sinneskanäle erfolgen, die Verwendung mehrerer Sinneskanäle für dieselbe Information ist darüber hinaus jedoch als positiv einzuschätzen (Bubb, 1992), da dies den natürlichen Erwartungen entspricht. Die Rückmeldung über die Betätigung erfolgt oftmals bereits durch die gewünschte Funktion selbst, wie etwa bei Fensterheber oder Lautstärkeregler. Zeitliche Verzögerungen oder gar deren Fehlen unterstreichen jedoch die Notwendigkeit einer direkten Rückmeldung des Schaltvorgangs, in Form optischer, akustischer und haptischer Signale. Die visuelle Kontrolle der Stellung eines Bedienelementes erfordert in der Regel eine Blickabwendung vom Straßenverkehr. Durch haptische und akustische Rückmeldung kann die Blickabwendung verringert werden. Eine erhöhte Geräuschkulisse verschlechtert jedoch die akustische Rückmeldung und ist teilweise auch nicht gewünscht („silent switch“). Die haptische Rückmeldung wird davon nicht beeinflusst und kann z. B. durch rastende Schalter den Funktionsstatus ohne Blickabwendung widerspiegeln.

Aufgrund ihrer mechanischen Beschaffenheit wirkt die haptische Rückmeldung auch mechanischen Störungen entgegen, weshalb sie zudem die Präzision der Bedienung erhöhen kann.

Die haptische Wahrnehmung bietet neben den genannten Eigenschaften eine bis zu vier Mal schnellere Reizverarbeitung (Schmidt, 1979), was sie als grundlegende Modalität zur Rückmeldung bei Bedienelementen empfiehlt.

1.1 Zielsetzung und Schwerpunkte

Im Mittelpunkt der Arbeit steht daher die haptische Rückmeldung von Bedienelementen während der Betätigung und die Gewinnung ergonomisch verwertbarer Daten zum Design von Betätigungshaptik. Der Fokus liegt dabei auf Drehschaltern und Drucktastern, Bedienelemente die hauptsächlich für sekundäre und tertiäre Aufgaben im Fahrzeug eingesetzt werden.

Eine Hinterfragung der technischen Beschreibung im Kontext der menschlichen Wahrnehmung ermöglicht die Aufstellung einer effektiven Parametrisierung. Diese dient als Basis für Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen den subjektiv wahrgenommenen Eigenschaften und deren technischer Beschreibung.

1.2 Gliederung

Eine grundlegende Auseinandersetzung mit Themen der menschlichen Wahrnehmung sowie Interpretationen und Gliederungen des Begriffes „Haptik“ wird in Kapitel 2 durchgeführt. Eine weitergehende Vertiefung zum Stand der Forschung im Bereich der Betätigungshaptik wird in Kapitel 3 durchgeführt. Kapitel 4 befasst sich mit der Unterscheidung der verschiedenen Bedienelementtypen und deren Eigenheiten technischer Beschreibung, als vorbereitenden Schritt für die folgenden Untersuchungen.

Kapitel 5 beschreibt die Versuchsreihen zu Drehstellern, beginnend mit einer theoretischen Auseinandersetzung zu Problemen der technischen Darstellung und möglichen Alternativen. Entsprechende Untersuchungen zum Thema Visualisierung werden anschließend erläutert. Untersuchungen zur Parametrisierung und eine Diskussion der Teilergebnisse schließen dieses Kapitel.

Das Thema Drucktaster wird in Kapitel 6 in einer vergleichbaren Gliederung abgehandelt, wobei Ergebnisse der Untersuchungen zu Drehstellern direkt in die Versuchsplanung mit einfließen.

Eine abschließende Diskussion der Ergebnisse findet in Kapitel 7 statt. Im Fokus liegen Gemeinsamkeiten und Querbeziehungen zwischen Drehstellern und Drucktastern.

2 Grundlagen

Das folgende Kapitel soll in die notwendigen Grundlagen und Definitionen der *Haptik* einführen. Neben der Klärung des Begriffes Haptik und einem kurzen historischen Exkurs, wird auf physiologische und psychologische Grundlagen eingegangen und die Einbindung der Haptik in die menschliche Wahrnehmung erläutert. Zur Vermeidung von Missverständnissen und zur Klärung der Zielsetzung dieser Arbeit werden gebräuchliche Gliederungen und Definitionen im Arbeitsfeld dargestellt.

2.1 Der Begriff Haptik

Der Begriff *Haptik* selbst entstammt dem griechischen *haptain*, mit der Bedeutung *berühren, begreifen, erfassen* oder *tasten* und steht allgemein für *den Tastsinn Betreffendes*.

Der Begriff Haptik steht nach heutiger Bedeutung für die *Lehre vom Tastsinn* und umfasst, vergleichbar mit den Bereichen *Akustik* oder *Optik*, alle Wahrnehmungen, die in unmittelbarem Zusammenhang mit *Anfassen, Erfühlen* und *Begreifen* bzw. deren wissenschaftlich oder technisch verwandten Themen stehen.

2.2 Geschichtliche Betrachtung der Haptik

Historisch betrachtet wurde der Tastsinn erstmals von Aristoteles in seiner Schrift „über die Seele“ als solcher zu den noch heute verwendeten fünf Sinnen des Menschen aufgenommen, wengleich auch an letzter Stelle in deren Bedeutung. John (2001) zeigt die historische Entwicklung und philosophische Bedeutung der haptischen Sinneswahrnehmung auf und erläutert die religiös und moralisch geprägten Diskussionen, welche dem Tastsinn zum einen dunkle und der Berührung wegen negativ belegte Eigenschaften zusprechen, zum anderen den haptischen Sinn als den allgemeinsten und umfassendsten Sinn betrachten. Seit dem 18. Jahrhundert erfährt der Tastsinn eine andere durchaus positive und bedeutende Beachtung durch Philosophen und Autoren wie Kant, Herder, Condillac, Lotze, Weber oder Katz. Es setzt sich die Überzeugung durch (John, 2001, S. 23), dass der haptische Sinn als Schlüsselsinn und Grundlage für die übrigen Sinne zu sehen ist, der die zuverlässigsten Informationen über die Außenwelt liefert. Es wird in den Raum geführt, dass die Ursache der niederen Einordnung des Tastsinnes darin bestehen kann, dass die empfundene Sinneswahrnehmung nur vergleichbar schwer in Worte gefasst werden kann.

2.3 Verwendung des Begriffs Haptik

Neben der grundlegenden Bedeutung des Begriffes Haptik als Lehre vom Tastsinn existieren *Anwendungen* und *Berufsbranche* die den Begriff Haptik mit konkreten Vorstellungen und Bedeutungen belegen.

In der *Textil-* und *Papierindustrie* wird die Haptik des Produktes als grundlegendes *Qualitäts-* und *Gütemerkmal* gewertet. Hierbei spielen die Oberflächeneigenschaften und das Verhalten bei der Handhabung des Materials eine große Rolle. Je nach Anwendungsfall und Zielgruppe werden diese Eigenschaften variiert und entsprechend eingestellt (papyrus.li, 2007), (Haptex, 2005).

Im Bereich der *Augenoptik* findet man ebenfalls den Begriff der *Haptik des Auges*. Hier bezeichnet die sogenannte „Haptik“ an Intraokularlinsen Fortsätze zu deren Fixierung im Auge dar. Diese werden z. B. bei Operation des grauen Stars eingesetzt (Warlo, 2005).

Die Haptik in *sozialer Bedeutung* wird als Begriff der *Nähe* verwendet. Sie steht im Bereich der Kunst, des Theaters oder des Kinos für den Grad der Nähe von Darstellern zum Publikum und damit auch der Möglichkeit des Eintauchens des Zuschauers in die Szene (Krewany, 2007).

Bei der *Betätigung von Mensch-Maschine-Schnittstellen* wie Lenkung, Pedalerie, Schalt- und Steuerhebel, Drehschaltern und Drucktastern sowie aktiven Stellteilen muss jedoch eine weitere Qualität einbezogen werden: Die *Betätigungshaptik*. Sie bezieht sich auf das haptische Feedback bei Betätigung von Mechanismen und ist landläufig unter dem Begriff *Force-Feedback* zu finden (Die Zeit, 2004/17). Der Bereich der *Oberflächenhaptik* setzt sich thematisch wie die Papierindustrie mit Oberflächeneigenschaften, breiter noch mit Materialien auseinander, die bei der Berührung entsprechende Material- und Qualitätseigenschaften vermitteln (Swaboda, 2006).

Betätigungshaptik und *Oberflächenhaptik* sind vor allem in der Automobilbranche und im Bereich der PC-Spiele anzutreffen und haben zur Zielsetzung, einem Produkt einen gewünschten haptischen Charakter zu geben, der entsprechende qualitative Eigenschaften vermitteln soll. Die vorliegende Arbeit befasst sich in diesem Sinne mit der Betätigungshaptik.

2.4 Haptische Wahrnehmung und Physiologie

Zum Verständnis der haptischen Wahrnehmung ist eine grundlegende Kenntnis der menschlichen Wahrnehmung erforderlich. Der haptische Wahrnehmungsapparat ist im gesamten menschlichen Körper verteilt und stellt das größte Wahrnehmungsorgan des Menschen dar. Grundlegende physiologische Informationen stellen Schmidt (1995), Deetjen (2005) und Thews (1999) dar. Psychologische Zusammenhänge der Wahrnehmung sind bei Goldstein (2002) oder Zimbardo und Gerrig (2004) zu finden. Von besonderem Interesse im Zusammenhang mit

Bedienelementen sind der Wahrnehmungsprozess sowie die Physiologie des Wahrnehmungsapparates.

2.4.1 Wahrnehmungsprozess

Die Wahrnehmung des Menschen durchläuft etliche Stufen, die strukturell durchaus mit technischen Systemen vergleichbar sind (Doerrer, 2001): Nach der eigentlichen Sensierung eines physikalischen Reizes mittels Sensororgan wird über sog. afferente Nervenbahnen die Information zum zentralen Nervensystem (ZNS) geleitet. Dort findet eine Vorverarbeitung der Information statt. Die eintreffenden Informationen werden aufbereitet, gewichtet und gefiltert. Schließlich werden diese aufbereiteten Informationen an einen Bereich der objektiven Wahrnehmung übergeben.

Die subjektive Wahrnehmung wird nun aus der objektiven Wahrnehmung unter Einfluss von Erfahrungen und Prägungen des Subjekts gewonnen und tritt so ins Bewusstsein. Dies wird dem Individuum als Sinneswahrnehmung *bewusst* (Schmidt, 1995; Thews, 1999).

2.4.2 Physiologische Hintergründe

Aufgrund der vielfältigen haptischen Wahrnehmungsqualitäten und der besseren Übersicht werden die verschiedenen Organe in drei Gruppen unterteilt, obwohl die subjektive Wahrnehmung selbst, laut Gibson (1979) und Zinchenko und Lomov (1969), ein Zusammenspiel aller Qualitäten und Moden darstellt:

- Oberflächensensibilität: Mechanosensoren
- Tiefensensibilität: Propriozeptoren
- Kinästhetik¹: Vestibular- und Maculaorgane.

Zur Gruppe der Oberflächensensibilität werden die Organe gezählt, die Oberflächenkontakte wie Kräfte oder Deformation des Körpers registrieren, die so genannten Mechanosensoren. Sie liegen in der Haut und liefern verschiedene Aspekte körperlichen Kontaktes. Man spricht hierbei auch von Taktilität² und Oberflächenwahrnehmung.

Eine weitere Gruppe haptischer Wahrnehmungsorgane liefert Informationen zur sog. Tiefensensibilität, die sog. Propriozeptoren. Hierzu gehören Informationen über

¹ Griech. kinein: bewegen und aisthesis: Sinneswahrnehmung → Wahrnehmung der Bewegung

² Lat. tactilis: berührbar, lat. tactus: Berührung, Tastsinn

Gelenkstellungen, Muskelkräfte, allgemein ausgedrückt: Die Stellung des Körpers und dessen Gliedmaßen zueinander. Man spricht hierbei auch von Propriozeption³.

Zur dritten Gruppe, der Kinästhetik, zählen die Vestibular- und Maculaorgane, die auch als Gleichgewichtsorgane bekannt sind.

Vor allem im angelsächsischen Raum wird die Propriozeption zur Kinästhetik hinzugerechnet. Die Kinästhetik lässt sich nach Bubb jedoch klar von der Propriozeption differenzieren (Bubb, 2001): Beschleunigungskräfte, die auf den gesamten Körper wirken, können eindeutig von Skelettkräften, welche durch Belastung oder Stellung einzelner Körperteile entstehen, differenziert werden.

Für die Untersuchung der Haptik von Bedienelementen stehen jedoch die Oberflächen- und Tiefenwahrnehmung im Mittelpunkt.

Die Tiefensensibilität

Der entsprechende Begriff Propriozeption bedeutet Selbstwahrnehmung. Die Gruppe der Propriozeptoren (Abbildung 1) liefert Informationen über Gelenkstellungen, Muskel- und Skelettkräfte. Sie registrieren sowohl aktive als auch passive Bewegungen der Gelenke sowie den Widerstand, gegen den eine Bewegung ausgeführt wird.

Die Golgie-Sehnenorgane sitzen in den Sehnen der Muskeln und geben anhand deren Ausdehnung eine Rückmeldung über die aktuelle Muskelkraft (Deetjen, 2005), vergleichbar mit aus der Messtechnik bekannten Dehnmessstreifen (DMS).

Die Muskelspindeln sitzen im Inneren eines Muskels und registrieren die Ausdehnung dessen als Maß für eine Längenänderung und damit die Stellung der entsprechenden Gliedmaßen zueinander. Im Besonderen verfügen Muskelspindeln über einen Mechanismus – die sogenannten γ -Motoneuronen – der durch Verlängerung oder Verkürzung der Spindeln deren Auflösung verändern kann. Muskelspindeln haben sowohl eine statische als auch dynamische Empfindlichkeit (Schmidt, 1995; Thews, 1999). Zusätzlich existieren in der Gelenkhaut Mechanosensoren, welche anhand der Dehnung Informationen über die Stellung des Gelenkes liefern. Diese sind jedoch nach Aussage von Schmidt (1995) von untergeordneter Wichtigkeit.

³ Lat. proprius: eigen ; lat. recipere: aufnehmen → Selbstwahrnehmung

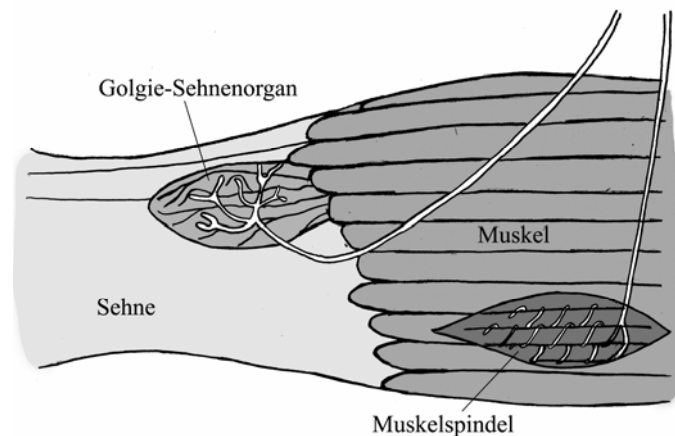


Abbildung 1: Propriozeptoren: Das Golgie-Sehnenorgan liefert Information über Muskelkräfte. Muskelspindeln liefern Informationen über die Ausdehnung des Muskels und damit die Position des entsprechenden Gliedmaßes. Bild nach Deetjen (2005, S. 239)

Für die Haptik von Bedienelementen spielt die Propriozeption aufgrund ihrer Positionsinformationen eine wichtige Rolle.

Oberflächensensibilität

Die *Oberflächensensibilität* umfasst verschiedene sogenannte Mechanosensoren. Es wird häufig der Begriff *Taktilität* verwendet. Die Mechanosensoren registrieren Kraftinformationen, die durch direkten Kontakt mit der Hautoberfläche entstehen. Sie lassen sich über der Zeit auftragen und ergeben ein räumlich zweidimensionales Abbild einer Berührung, jedoch keine direkte Information über die Stellung des Körpers. Wobei der Haut in den Gelenkbereichen diesbezüglich eine Sonderrolle zukommt, da diese durch Gelenkwinkeländerungen eine Dehnung erfährt und somit auch Informationen über die Gelenkstellung bereitstellt. Erfasst werden jedoch rein oberflächige Berührungsinformationen, sei dies durch passive Berührung, d. h. etwas wird über die Haut bewegt oder durch aktive Exploration, d. h. der Proband ertastet selbst aktiv. Letzterer Fall ergibt im Zusammenspiel mit der Tiefensensibilität einen erweiterten Eindruck über Körper und Gegenstände.

Für die Haptik von Bedienelementen ist aufgrund der finger- oder handorientierten Bedienung die unbehaarte Haut relevant. In ihr gibt es vier verschiedene Typen von Mechanosensoren: nach Schmidt (1995) die Merkel-, Ruffini-, Meissnerzellen und Pacini-Korpuskel. Abbildung 2 zeigt den Aufbau der Haut mit Mechanosensoren sowie die einzelnen Zellen separat dargestellt. Eine Einteilung dieser Zellen kann nach Größe und Schärfe des rezeptiven Feldes, Adaptionsgeschwindigkeit oder nach vermittelten Qualitäten erfolgen.

Die Größe des rezeptiven Feldes ist die Hautfläche, in der durch entsprechende Reizung ein Mechanosensor stimuliert werden kann. Die Schärfe dessen indiziert, ob ein Sensor eine abrupte oder allmählich schwächer werdende Feldgrenze besitzt. Grunwald (2001) folgert daraus, dass Felder mit kleinen scharf abgegrenzten rezeptiven Feldern zur Wahrnehmung von Konturen und damit räumlicher Auflösung der taktilen Reize dienen. Deren räumliche Verteilung beschränkt demzufolge auch die räumliche Auflösung der Wahrnehmung.

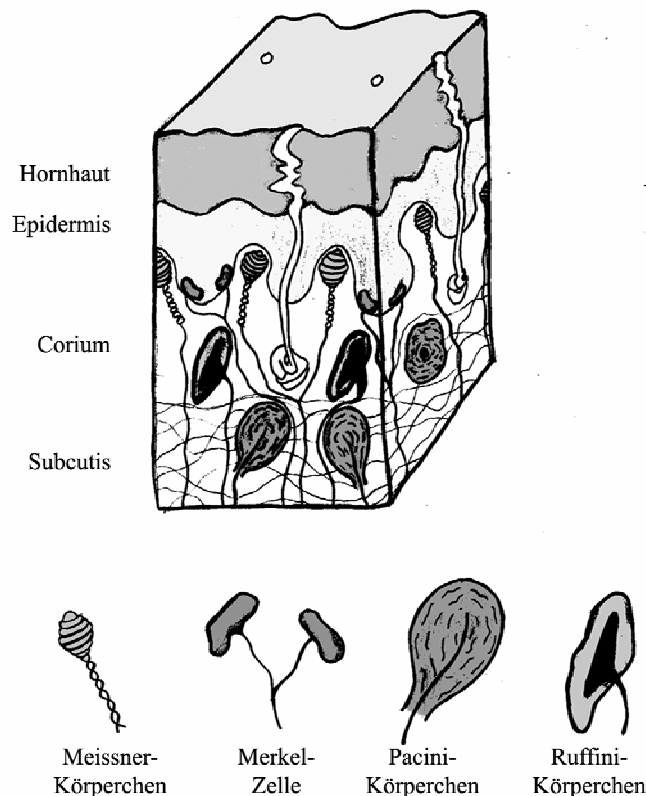


Abbildung 2: Mechanosensoren in der unbehaarten Haut. Sie ist aufgrund der finger- oder handorientierten Betätigung für Bedienelemente relevant. Die einzelnen Mechanosensoren sind separat nach Schmidt (1995, S. 218) dargestellt.

Die Adaptionsgeschwindigkeit ist das Antwortverhalten eines Mechanosensors auf einen konstanten Reiz. Hierbei antworten *langsam adaptierende Sensoren* (slowly adapting – SA I und SA II) konstant auf einen dauerhaften Reiz und über einen längeren Zeitraum des Reizes, während *schnell adaptierende Sensoren* (fast adapting – FA I und FA II) nur zu Beginn und zum Ende des Reizes antworten. Dieses zeitabhängige Verhalten bestimmt einen Teil der Eigenschaften der Mechanosensoren. Zu den langsam adaptierenden Sensoren zählen Merkel (SA I) und Ruffini (SA II) welche ein reizproportionales Verhalten zeigen. Meissner (FA I) und Pacini (FA II, aber auch RA für rapidly adapting oder PC Pacini Corpuscle stehend) zeigen differentielles Verhalten, reagieren also nur auf Änderungen des Reizes. Hierbei kann man dem FA I ein Differential erster

Ordnung zuordnen, während FA II für Differentiale höherer Ordnung steht (vgl. Abbildung 3 nach Schmidt, 1995). Beyer und Weiss (2001, S.33) ordnen den Sensortypen die in Tabelle 1 aufgeführten haptischen Qualitäten und Merkmale zu.

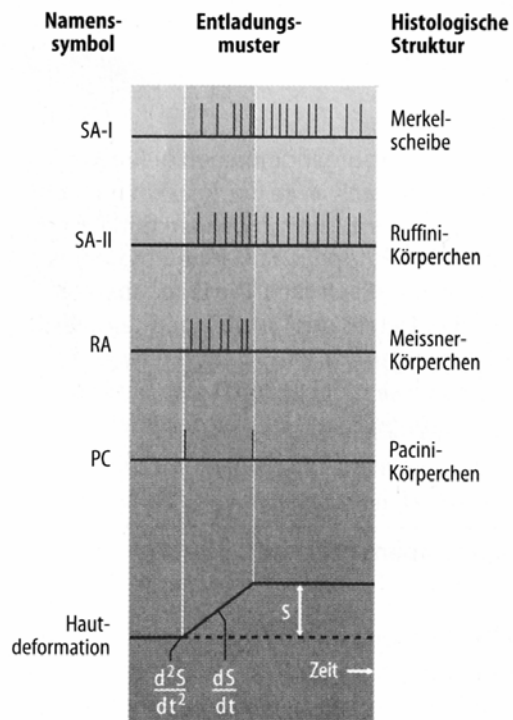


Abbildung 3: Antwortverhalten der Mechanosensoren auf eine Hautdeformation nach Schmidt (1995, S. 218). Die Bezeichner RA stehen hier alternativ für FA I, bzw. PC für FA II.

Tabelle 1: Eigenschaften und Zuordnung haptischer Qualitäten zu den verschiedenen Mechanosensoren¹ und deren typisches Übertragungsverhalten².

Mechano-sensor	Adaptionsgeschwindigkeit ¹	Haptische Qualitäten ¹	Übertragungsverhalten ²
Merkelzelle	SA I: Langsam adaptierend, kleines rezeptives Feld mit scharfen Grenzen	Sensitiv auf ansteigende und andauernde Reize, besonders jedoch hohe dynamische Sensibilität.	P-Verhalten
Ruffini-körperchen	SA II: Langsam adaptierend, großes rezeptives Feld mit unscharfen Grenzen	Sensitiv auf ansteigende und andauernde Reize, besonders jedoch hohe dynamische Sensibilität. Besonders exakte Wiedergabe während der Reizdauer.	P-Verhalten
Meissner-körperchen	FA I/ RA: Schnell adaptierend, kleines rezeptives Feld mit scharfen Grenzen	Sensitiv auf Druckanstieg an der Haut.	D-Verhalten
Pacini-körperchen	FA II/ PC: Schnell adaptierend, großes rezeptives Feld mit unscharfen Grenzen	Sensitiv auf Beschleunigungen oder höhere Ableitungen wie Vibrationen. Sowohl Auslenkung als auch Rückstellung des Reizes.	D ² -Verhalten

¹ Nach Beyer und Weiss (2001, S.33)

² Nach Schmidt (1995)

Weitere Sensoren der Haut

Neben den Mechanosensoren, welche Kraft-Aspekte der Berührung erfassen, gibt es *Thermosensoren* zur Temperaturwahrnehmung und *multirezeptive Schmerzsensoren*.

Die *Temperaturwahrnehmung* wird über Warm- und Kaltsensoren realisiert. Hierbei spielen Größe der Reizfläche, der Temperatursprung und die Änderungsgeschwindigkeit neben der absoluten Temperatur eine wichtige Rolle (Thews, 1999). Ausgehend von einem mittleren Temperaturbereich von 31 bis 36°C, der eine neutrale Empfindung hervorruft, wird darüber bis ca. 45°C eine zunehmend intensivere Wärmewahrnehmung hervorgerufen, die darüber in eine schmerzhafteste Hitzeempfindung übergeht. Unter dem neutralen Bereich wird es bis 17°C zunehmend als „kalt“ und darunter als Kälteschmerz empfunden. Hohe Temperaturen können zudem einen Kaltreiz auslösen.

Haptisch relevant ist die Temperaturwahrnehmung im Bereich der Oberflächenhaptik, da sie Informationen über Materialeigenschaften beiträgt (Deml, 2006).

Die *Schmerzempfindung* wird über sogenannte multirezeptive Nozizeptoren registriert. Sie können durch das Einwirken verschiedenartiger Reize etwa mechanisch, thermisch oder chemisch angeregt werden. Ihre Aufgabe ist es, den Organismus vor Schädigung, z. B. durch entsprechende

Fluchreflexe, zu schützen. Die Haut zeigt etwa neunmal so viele Schmerzrezeptoren wie Druck- oder Thermorezeptoren.

Zusammenfassend kann die Bedeutung der einzelnen Sensortypen für das Handhabungsgefühl von Bedienelementen, bzw. für die Betätigungshaptik in Abbildung 4 dargestellt werden. Schmerzrezeptoren reagieren bei jeglicher Überbeanspruchung, so dass diese nicht mit aufgeführt sind.

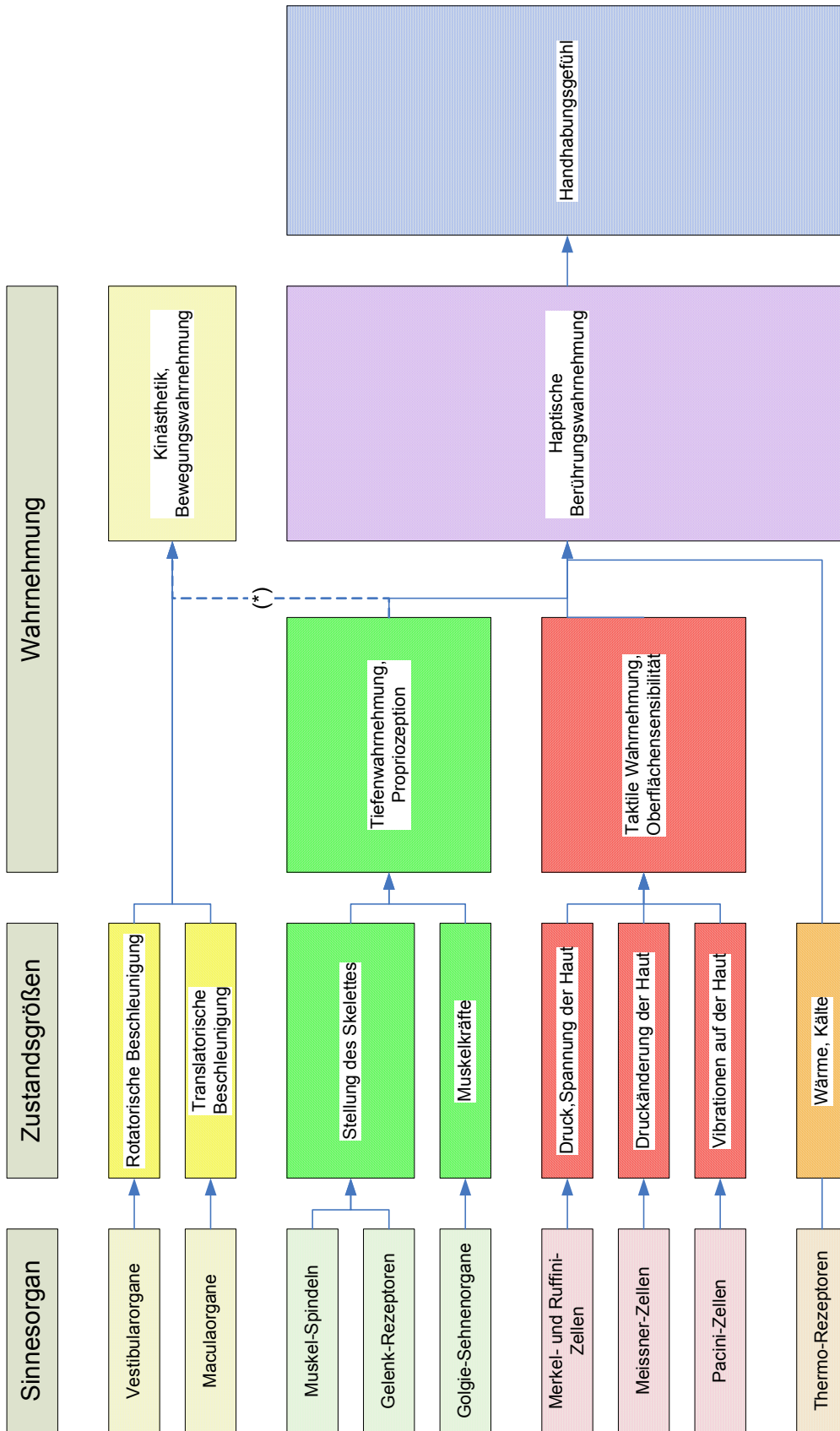


Abbildung 4: Einordnung der Sinnesorgane und deren haptische Sinnesqualitäten im Kontext des Handhabungsgefühls. (*) kennzeichnet die Trennung zwischen Kinästhetik und Propriozeption mittels der gestrichelten Verbindung.

Verteilung der Sensorpunkte auf der Haut

Die Haut hat für die Wahrnehmung der verschiedenen Reize nicht an jeder Stelle des Körpers dieselbe Empfindlichkeit. Je nach Körperregion finden sich unterschiedliche Verteilungsdichten der verschiedenen Rezeptoren. Besonders hohe Dichten findet man auf der Hand, im Mund, speziell die Zunge, und den Geschlechtsorganen.

Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Mechanosensoren auf der Hand. Die Bereiche stehen für die jeweiligen rezeptiven Felder. Merkel-Zellen und Meissner-Körperchen sind oberflächlich angeordnet und besitzen daher kleine rezeptive Felder, während Ruffini- und Pacini-Körperchen tiefer im Gewebe liegen und große rezeptive Felder (die hellen Bereiche) mit Punkten maximaler Empfindlichkeit (kräftige Bereiche) haben (Schmidt, 1995; Grunwald, 2001).

Die Dichte der Mechanosensoren ist vergleichsweise hoch, die von Thermosensoren wesentlich geringer, was sich mit Hilfe der Zweipunktschwelle feststellen lässt (Deetjen, 2005). Dies bedeutet z.B. dass zwei Reize schon bei wesentlich größerem Abstand auf der Haut als ein einzelner Reiz wahrgenommen werden, als bei höherer Dichte.



Abbildung 5: Verteilung der Mechanosensoren auf der Hand nach Deetjen (2005, S. 65)

2.5 Haptische Gliederungen

Wie schon in Kapitel 2.3 dargestellt, wird aufgrund verschiedener Gegebenheiten der Begriff Haptik unterschiedlich interpretiert und untergliedert. Dies ist meist in entsprechenden in sich abgeschlossenen Arbeitsbereichen gewachsen. Jedoch birgt diese Vielzahl der Gliederungen die Gefahr von Missverständnissen bei der Verwendung von Begriffen in anderem Umfeld. Um hier einen Überblick und ein besseres Verständnis der Definitionen der jeweiligen Arbeitsbereiche zu erreichen, sind im Folgenden geläufige Definitionen erläutert und in Bezug zu der vorliegenden Aufgabe gebracht.

2.5.1 Verhaltenspsychologische Betrachtung

Die *Verhaltenspsychologische Definition* von haptisch und taktil unterscheidet zwischen *haptisch*, als aktive Berührung bzw. aktive Exploration durch gezielte Körperbewegung, und *taktil*, als passive Berührung bzw. ohne eine aktive Bewegung des Körpers. Wichtig für den Psychologen ist in diesem Falle, ob der Proband aktiv einen Vorgang steuert oder ob er nur passiv eine Kraftwirkung wahrnimmt (Revesz, 1950; Gibson, 1962; Grunwald, 2001).

Da Bedienelemente prinzipiell mit der Absicht der aktiven Auslösung einer Funktion betätigt werden, ist diese Terminologie jedoch eher ungeeignet.

2.5.2 Funktionale Gruppen

Eine Zuordnung bezüglich des *Informationsgehalts funktionaler Gruppen* stellt eine weitere Gliederungsmöglichkeit dar, die sich an der Wahrnehmungsphysiologie orientiert, die bereits in Kapitel 2.4.2 erläutert wurde.

Die Haptik ist in diesem Fall der Überbegriff der Berührungswahrnehmung und beinhaltet sowohl die Tiefenwahrnehmung (Propriozeption), die Oberflächenwahrnehmung (Taktilität) und die Kinästhetik. Es lässt sich dabei ein Bedeutungskonflikt mit der verhaltenspsychologischen Betrachtungsweise (Kapitel 2.5.1) erkennen: Taktil steht hier für die Oberflächenwahrnehmung, die sowohl bei aktiver, als auch passiver Exploration im Sinne der verhaltenspsychologischen Definition entsprechende Information bereitstellt.

Für Bedienelemente ist diese Gliederung sinnvoll, da sich die Wahrnehmungsorgane relativ einfach physikalischen Größen, die direkt beeinflusst werden können, zuordnen lassen, wie z. B. der Tastenhub zur Propriozeption (vgl. Abbildung 4).

2.5.3 Arbeitsgebiete

Das Arbeitsgebiet *Haptik* ist enorm vielfältig. Die Psychophysik oder im Speziellen auch Psychohaptik genannt, befasst sich mit der wissenschaftlichen Untersuchung der haptischen Wahrnehmung. Ihr Ziel ist es die haptische Wahrnehmung des Menschen mit objektiven Größen zu fassen und menschliche Verarbeitungsmechanismen zu eruieren.

Von diesen Erkenntnissen profitierend stellen hauptsächlich im ingenieurwissenschaftlichen Bereich neben dem Entwurf taktiler und haptischer Displays, der Entwurf haptischer Sensorik aufgrund des bidirektionalen Charakters der Haptik (Hannaford, 1995) ein komplexes Teilgebiet dar. Hinzu kommt die Anwendung dieser Schnittstellen in einem Kontext, z. B. der Teleoperation oder virtuellen Realität (VR) bzw. augmented reality (AR). Dort geht es darum, erfasste oder virtuell erzeugte haptische Größen auch über große Distanzen oder durch Skalierungen hindurch korrekt wiederzugeben und dem Menschen eine möglichst reelle oder praktikable Abbildung dessen zu präsentieren, was am gegenüberliegenden Ende zu fühlen ist.

Ein wissenschaftliches Schattendasein führt die ergonomische Gestaltung von haptischem Feedback, wie dies anhand der Konferenzbände einschlägiger Veranstaltungen zu erkennen ist (EHC, 2004; WHC, 2005; GfA, 2006; EHC, 2006; GfA, 2007; WHC, 2007). Speziell für die Bearbeitung des Themas Bedienelemente ist es notwendig, weitere Arbeitsgebiete zu unterscheiden, da hier verschiedene wissenschaftliche Disziplinen Anwendung finden.

In diesem Zusammenhang bezeichnet die *Oberflächenhaptik* die Auseinandersetzung mit Oberflächen und deren Materialien (Haptex ; Kapitel 2.3)

Der Bereich ist klar von der *Bedien-* oder *Betätigungshaptik* zu unterscheiden, die sich nur wenig mit Materialwissenschaften auseinandersetzt, sondern die Rückwirkung eines Mechanismus auf die menschliche Wahrnehmung beschreibt. Fokus dieser Arbeit liegt auf der Beschreibung der *Betätigungshaptik*.

2.5.4 Technische Aspekte

Eine vierte Blickrichtung stellt die technische Umsetzung und Anwendung physikalischer Größen dar. Diese Darstellung ist sehr stark produktbezogen, da in ihr konkrete konstruktive Hintergründe als Grundlage dienen. Diese *technischen Aspekte* führt Reisinger et al. (2007) als maßgeblich bei der Gestaltung von Bedienelementen an. Auch Ledermann und Klatzky (2004) trennen in diesem Sinne die Oberflächenwahrnehmung in Makro- und Mikrostruktur auf: Die Mikrostruktur, als Oberfläche, die auf der Makrostruktur, dem Objekt, abgelegt ist. Diese

Einteilung entspricht der Unterteilung in Gestaltqualitäten, wie sie Ehrenfels (1890) am Beispiel der Musik in Melodie und Töne aufführt.

Aus der Mechanik können drei kinematische Größen abgeleitet werden:

Die wesentliche Rolle spielt hierbei die *Rastkurve*. Sie resultiert aus Energiespeichern, wie Federn die positions- und drehrichtungsabhängig Energie abgeben und aufnehmen und damit positionsabhängige Kräfte erzeugen. In ihr wird die Rastung in Form eines Kraft-Weg-Verlaufes bei translatorischen Bedienelementen bzw. eines Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufes bei rotatorischen Bedienelementen definiert.

Ihr überlagert ist ein *coulombscher und newtonscher Reibungsanteil*. Ihre Ursache ist bei Bedienelementen in der Führung beweglicher Teile zu finden. Die Drehgeschwindigkeit und in direktem Zusammenhang auch die Reibpaarung als Parameter für Materialien und Oberflächengüten beeinflussen diese Größe maßgeblich. In Messungen ist diese Kraft als Offset mit drehrichtungsabhängiger Hysterese ersichtlich.

Eine weitere Einflussgröße stellt die *Massenträgheit* dar. Die Abhängigkeit der Massenkräfte von wirkenden Beschleunigungen ist, gerade bei durch Hand- oder Fingerzugriff betätigten Bedienelementen wie Hebel oder Drehsteller, relevant für das Betätigungsgefühl.

Zu den kinematischen Größen kommen weitere Qualitäten, die materialspezifische Informationen vermitteln. Dementsprechend hängen diese besonders von Material und fertigungstechnischen Parametern ab: Eine *dynamische Reibung* oder *Mikrostruktur* sowie *thermische Eigenschaften*.

Anhand verschiedener Arbeiten und Untersuchungen zeigen Wall und Harwin (1999) auf, dass Oberflächeneigenschaften mittels auf Fourierreihen basierenden Vibrationen simuliert werden können. Am realen System entstehen diese Vibrationen durch Stick-Slip-Verhalten der entsprechenden Reibpaarungen. Es können sämtliche Reibpaarungen im System, also sowohl direkte Reize, wie die Paarung *Haut-Oberfläche* (Oberflächenhaptik), als auch vermittelte Reize mechanischer Führungen, die wahrgenommenen Eigenschaften beeinflussen. Es bleibt jedoch offen, ob hier ein Unterschied in der Wahrnehmung zwischen direkten oder vermittelten Reizen besteht.

Thermische Eigenschaften wie die Leitfähigkeit und Wärmekapazität des Werkstoffes vermitteln zudem Informationen über die materielle Beschaffenheit einer Kappe (Demel, 2006). Dabei stellt Demel fest, dass Materialgruppen identifiziert werden können, die ähnlichen thermischen Charakter haben. Dies weist darauf hin, dass diese Sinnesqualität gemeinsam mit anderen

Sinnesqualitäten, z. B. der oben aufgeführten Mikrostruktur die Materialinformation übermittelt, also einen Beitrag zur Wahrnehmung leistet, diese jedoch nicht vollständig erfüllen kann.

Diese Gliederung der Haptik ermöglicht die Diskussion auf Basis technischer Gegebenheiten und kann direkt in das konstruktive Design einfließen.

2.6 Bedienelemente im Kraftfahrzeug

Gerade im Kraftfahrzeug spielt die Betätigungshaptik eine wesentliche Rolle, werden doch grundlegende Funktionen über verschiedene Bedienelemente kontrolliert. Die Bedienung entsprechender Mechanismen erfolgt typischerweise mit Fingern, Händen, Armen, Füßen und Beinen. Man unterscheidet verschiedene Arten der Bedienaufgabe: Primäre, sekundäre und tertiäre Bedienaufgaben.

Primäre Aufgaben befassen sich direkt mit der Fahraufgabe wie Längs- und Querführung des Fahrzeuges und werden in der Regel mittels Gaspedal, Bremspedal und Lenkrad bedient. Aufgrund technisch-historischer Hintergründe sind diese Bedienelemente dazu ausgelegt hohe wirkende Kräfte z. B. für die Lenkung oder die Bremse zu erzeugen, weshalb sie Arme und Beine sowie große Radien oder Hebel im Aufbau des Bedienelementes verwenden (Bubb, 2001).

Sekundäre Aufgaben stehen in abhängiger Beziehung zur Fahraufgabe. Sie verbessern die Qualität der Ausführung von primären Aufgaben, indem sie z. B. die Sichtbedingungen oder den Drehzahlbereich des Antriebes optimieren. Sie selbst dienen jedoch nicht primär der Fahrzeugstabilisierung. Darunter fallen u. a. Scheibenwischer, Licht, Blinker oder Hupe, aber auch Kupplungspedal und Schalthebel.

Tertiäre Aufgaben haben mit der eigentlichen Fahraufgabe keinen Zusammenhang mehr. Sie beziehen sich auf Komfort-, Unterhaltungs-, Kommunikations- und Informations-Aufgaben, wie Klimatisierung, Radio oder Telekommunikation bzw. Internet und Informationsdienste.

Für sekundäre und tertiäre Aufgaben finden primär Tasten, Schalter, Hebel und Drehsteller Anwendung, die in geringen Kraftbereichen liegen und meist von Hand oder mit Fingern betätigt werden. Die Ursache hierfür liegt wohl im Umkehrschluss zu den bei primären Bedienelementen historisch bedingten hohen Kraftbereichen: sekundäre Bedienelemente haben zum einen geringe Kraftbereiche, da sie zur Betätigung bestimmter Mechanismen nur geringe Kräfte benötigen oder zweitens der Einsatz von Elektronik, bei der lediglich Stromkreise geschlossen werden müssen und entsprechende Aktoren die notwendige Kraft erzeugen. Beispiele für letztere sind Licht oder Scheibenwischer.

Eine Wandlung im Bereich der primären Bedienelemente hin zu kleineren mit weniger Kraftaufwand bedienbaren Bedienelementen ist an Beispielen wie dem Bremskraftverstärker oder der Servolenkung klar zu erkennen. Die Entwicklung von Sidestickfahrzeugen, welche die gesamten klassischen Bedienelemente der Fahrzeugführung über Bord werfen und diese Aufgabe auf einen Joystick übertragen, ist erst mit der technischen Entwicklung der Drive-by-wire-Technologie möglich und zeigt beste Ergebnisse in der Bedienbarkeit (Eckstein, 2000).

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Bedienelementen der sekundären und der tertiären Bedienungsaufgaben wie finger- oder handbetätigte Bedienelemente im niederen Kraftbereich.

3 Stand der Forschung

Der Bereich der haptischen Forschung und Entwicklung stellt ein breites Spektrum verschiedener Wissenschaften und Arbeitsgebiete dar. Neben den physiologischen und psychologischen Aspekten werden technische Lösungen für die entsprechenden Aufgaben benötigt. Vor diesem Hintergrund wird der Stand der Forschung in verschiedene Gebiete unterteilt und zunehmend fokussierend auf die Haptik von Bedienelementen dargestellt.

3.1 Haptische Wahrnehmung und Effekte

Basierend auf der grundlegenden Kenntnis über die Funktionsweise haptischer Wahrnehmung (vgl. Kapitel 2.4) ist es weiterhin notwendig, spezifische Eigenschaften und Randbedingungen abhängig von der jeweils interessierenden Körperregion, zu ermitteln. Von besonderer Bedeutung zur Bewertung von Bedienelementen sind dabei Schwellwerte, speziell der Hand, bzw. Finger. Dörrer (2003, S.15ff) stellt neben den sensorischen auch Schwellwerte der menschlichen Ausgabefähigkeit, also Aktorik, zusammen. Tan et al. (1995) tragen Ergebnisse über Wahrnehmungsschwellen für Größen die sich aus verschiedenen Größen zusammensetzen, wie z.B. Steifigkeiten aus Kraft und Weg, zusammen.

Eine weitere Stufe der Wahrnehmung bilden Wechselwirkungen verschiedener Modalitäten. Ergebnisse von Untersuchungen der intermodalen (crossmodal) Wirkungsweise werden bei Lederman und Klatzky (2004) zusammengetragen und diskutiert. Sie erklären das Vorhandensein mehrerer „Sensoren“ für dieselbe Information beim Menschen damit, dass durch redundante Information eine Verbesserung der Qualität, also mehr Sicherheit und eine genauere Wahrnehmung erreicht wird. Außerdem werden Informationen schneller und umfangreicher erfasst sowie Unstimmigkeiten eher erkannt.

Ernst und Banks (2002) stellen in diesem Zusammenhang für haptische und visuelle Wahrnehmung ein Berechnungsmodell anhand der höchsten Wahrscheinlichkeit (maximum likelihood estimation) vor. Diese Ergebnisse bestätigen die Bewertung durch Bubb (1992), dass die Rückmeldung eines Stellteils simultan über mehrere Sinneskanäle erfolgen soll, um einen möglichst positiven Informationsfluss zu erreichen.

Aufgrund der großflächigen Ausdehnung am gesamten Körper und einer Vielzahl existierender haptischer Effekte kann auf die Komplexität dieser Wahrnehmungsmodalität geschlossen

werden. Einige haptische Täuschungen spielen in diesem Kontext eine besondere Rolle: Hayward (2004) beschreibt mehrere Möglichkeiten, Konturen haptisch darzustellen, ohne entsprechende Erhebungen abzubilden. Er unterteilt in drei Effekte, mit deren Hilfe der Eindruck von Erhebungen mit einer flächigen Anordnung erreicht werden können: Erstens die Deformation der Fingerkuppe durch eine positionsabhängige Neigung einer schwenkbaren Fingerauflage. Eine zweite Möglichkeit besteht darin die Fingerkuppe, lateral zu verformen, d. h. Scherkräfte durch überproportioniertes Verfahren der Fingerauflage bei Bewegung zu erzeugen, welche die Konturen simulieren. Der dritte Weg dehnt lokal die Haut und erzeugt den Effekt lokaler Eindruckstellen, der angeordnet in einer zweidimensionalen Matrix ebenfalls Konturen abbilden kann. Einen vergleichbaren Ansatz stellen Makino und Shinoda (2005), basierend auf einem Vakuum-Array vor, bei dem die Haut tangential durch lokales Ansaugen gedehnt wird und den Eindruck erzeugt. Hayward bescheinigt den einzelnen Effekten eine eingeschränkte Darstellungsqualität, schreibt deren Kombinationen miteinander jedoch gute Möglichkeiten und verschiedenste Anwendungen zu. Es wirken demzufolge verschiedene Wahrnehmungseffekte zusammen. Man kann daraus schließen, dass bei der Betätigung von Bedienelementen bereits geringe Änderungen im Aufbau, z. B. Kappenform oder unterschiedliche Bewegungsabläufe, die Wahrnehmung beeinflussen und damit die notwendige Vergleichbarkeit verschlechtern.

3.2 Haptische Sensoren und Displays

Zur Wiedergabe haptischer Effekte werden sogenannte *haptische Displays* eingesetzt. Aufgrund der Komplexität, wie sie sich am Beispiel von Hayward aufzeigt, aber vor allem aufgrund hoher Bandbreite, Kräfte, Energien und Steifigkeiten ist die Realisierung eines universellen haptischen Displays sehr aufwändig. Daher werden haptische Effekte meist unabhängig voneinander realisiert. Martín und Savall (2005) geben geordnet nach Freiheitsgraden einen Überblick über verschiedene haptische Displays, für Bewegungen im Raum. Speziell für Handhabungsaufgaben im Bereich der Teleoperation finden haptische Displays mit fünf und mehr Freiheitsgraden Anwendung (Sensables, Haption, Forcedimension, u.a.). Diese Gruppe bietet primär propriozeptorische (vgl. Kapitel 2.4.2) Informationen dar. Taktile Informationen wie z. B. für Braille-Schrift (Howe, 2004) oder die Simulation von Oberflächeneigenschaften (Wall und Harwin, 1999), werden mit Hilfe anderer Displays erzeugt.

Problematisch und mit hohem technischem Aufwand verbunden ist die Realisierung hoher Steifigkeiten (Kuchenbecker et al., 2005). Mit jedem weiteren Freiheitsgrad erschwert sich diese Anforderung, weshalb für eine hochwertige haptische Wiedergabe eine geringst mögliche Anzahl von Freiheitsgraden sinnvoll erscheint. Haptische Displays für Drehsteller beschreiben Badescu et al. (2002) und Reisinger et al. (2006). Bei Dörrer (2003) ist basierend auf einem Tauchspulensystem ein haptisches Display für Drucktaster zu finden. Ein ähnliches Prinzip verwendet Reisinger (2006).

3.3 Haptische Kodierung

Die bisher aufgeführte Simulation befasst sich mit der Wiedergabe haptischer Rückmeldung bei Betätigung z. B. eines Mechanismus. Ansätze zur haptischen Codierung von Benutzeroberflächen erleichtern im Vorfeld der Betätigung das Auffinden der gewünschten Bedienelemente, bzw. die Navigation durch Menüstrukturen. In diesem Zusammenhang befassen sich mit variabler Formgebung von Tastkappen Dörrer (2003) mit einem variablen Drucktastenfeld sowie Michelitsch et al. (2004) mit der Form-Änderung bei Drehstellerkappen.

Grane und Bengtson (2005) befassen sich mit dem Nutzen haptischer Codierung bei Bewegung, also während der Betätigung von Drehstellern. Sie hinterlegen in verschiedenen Schalterstellungen unterschiedliche haptische Muster, die bei Bewegung in diesem Bereich spürbar werden. Sie weisen einer Kombination aus haptischer plus grafischer Markierung eine verbesserte Bedienbarkeit im Vergleich zu einzelner Rückmeldung anhand schnellerer Aufgabenabwicklung nach. Damit wird der Ansatz unterstrichen, dass die Rückmeldung über mehrere Sinnesmodalitäten verbessert wird.

3.4 Haptische Beschreibung von Bedienelementen

Die Ausrichtung der Forschungsaktivitäten konzentriert sich im Wesentlichen auf physiologische Untersuchungen und die Realisierung haptischer Displays. Die Thematik „Wie“ eine haptische Rückmeldung gestaltet werden muss, um eine möglichst klare und hochwertige Rückmeldung zu erhalten, ist demgegenüber nur sehr schwach vertreten. Nach Kapitel 2.5 scheint es dabei sinnvoll zwischen Oberflächen- und Betätigungshaptik zu unterscheiden, wobei jedoch generell von einer gegenseitigen Beeinflussung beider Größen auszugehen ist.

3.4.1 Einordnung in der Ergonomie

Die Komforthierarchie nach Bubb (1995) besagt, dass sich durch das Erreichen eines gewissen Komfort-Niveaus im Kraftfahrzeug ein Handlungsbedarf in zuvor nicht berücksichtigten Themengebieten ergibt. Für die Haptik von Bedienelementen bedeutet dies, dass zunächst Bedingungen des Umwelt- und Haltungskomforts im Kraftfahrzeug erfüllt werden müssen, bevor das Thema Bedienkomfort relevant wird (vergleiche Bubb, 2007). In dieser Makrostruktur lassen sich feinere Gliederungen vornehmen: so ist neben der Gestaltung und dem Material der Knöpfe (Götz, 2007; Bullinger, 1994), auch die Kompatibilität, bzw. Sinnfälligkeit eine grundlegende Anforderung, z. B. eine inhaltlich stimmige Bewegungsrichtung oder Anordnung (Neumann und Timpe, 1970; Spanner, 1993; Bubb, 2007). In diesem Zusammenhang ist es leicht vorzustellen, dass eine widersprüchliche Bewegungsrichtung eines Bedienelementes Missfallen beim Benutzer hervorruft, so dass z. B. eine sehr gut ausgearbeitete haptische Rückmeldung nicht zum Tragen käme, da der Benutzer den Diskomfort bereits auf nächst niedrigerer Ebene erleidet. Ob in dieser „Mikrostruktur“ jedoch ebenfalls eine Hierarchie herrscht, ist unbekannt.

3.4.2 Betätigungshaptik

DIN EN 196000 (2001) beschreibt die Vermessung des elektrischen Verhaltens von Drucktastern bezüglich dessen Lageanforderungen. Dabei wird der Kraft-Weg-Verlauf aufgegriffen und einzelne Kennwerte und Verhältnisse definiert. In diesem Sinne werden der Schalterpunkt (F_1, s_1) sowie der Kraftsprung (F_2, s_2) festgelegt. Zur Bestimmung notwendiger elektrischer Schalterpunkte wird ein von F_1 abhängiger Betätigungskraftpunkt (F_3, s_3) eingeführt. Der Blickpunkt haptischen Designs wird jedoch nur bedingt aufgenommen.

Osumi et al. (1990) untersuchen die Positionierung von Bedienelementen bei Autoradios bzgl. deren Erreichbarkeit. Dabei beschreiben sie u. a. erste Definitionen einer technischen Charakterisierung von Drucktastern anhand charakteristischer Punkte in einem Kraft-Weg-Diagramm. Sie berichten über Ergebnisse in Form erster einfacher psychohaptischer Zusammenhänge eines Pilotversuchs mit realen Bedienelementen. Weitergehende Schritte hin zum haptischen Design werden von Kosaka und Watanabe (1996) unternommen. Mit Hilfe eines Simulators für Drucktaster ordnen sie ausgewählten Kraftpunkten durch Variation von Kräften diese objektiven Größen den Auswirkungen auf subjektive Größen zu. Bubb (2001) bewertet und überträgt die o. g. Ergebnisse ins Deutsche.

Börschlein (1994) betrachtet reale Bedienelemente in Kraftfahrzeugen. Anhand von Versuchsreihen werden verschiedenartige Bedienelemente bezüglich Material, Form des Griffs Betätigungsgefühl, worunter akustische und haptische Eindrücke fallen, bewertet. Für geometrische Größen werden Idealbereiche und Rangfolgen ermittelt. Für Kräfte und akustische Größen werden Rangfolgen gebildet. Es werden Zusammenhänge zwischen subjektiven und objektiven Größen ausschließlich für geometrische Größen, wie Durchmesser, Länge, Fläche oder Volumen, hergestellt.

Mit der physikalisch technischen Beschreibung von Drucktastern und -schaltern befasst sich Weir et al. (2004) und stellt ein haptisches Profil („Haptic Profile“) vor. Dieses besteht aus der Darstellung der Kraft und der Geschwindigkeit über der Position mit farblich eingearbeiteten Beschleunigungswerten. Er differenziert die Zuordnung von aus der Bewegung des Bedienelements resultierenden Effekten wie Kratzen, Wackeln oder Vibrieren und die Kraft-Weg-Darstellung. Er geht nicht tiefer auf eine Parametrisierung der Kennlinien ein, regt diese jedoch in Form von Versuchen mit haptischen Simulatoren an.

3.4.3 Oberflächenhaptik

Wall und Harwin (1999) befassen sich mit der haptischen Beschreibung von Oberflächen in Form von Fourierreihen. Sie entwickelten einen Tastkopf zur Erfassung haptischer Oberflächenmerkmale durch hochfrequente Schwingungen (Harwin und Wall, 1999). Die Möglichkeit zur Simulation von Oberflächen mittels der Fourierreihen konnten sie in Versuchsreihen nachweisen (Wall und Harwin, 1999). Diese haptische Qualität wird in der vorliegenden Arbeit jedoch ausgeklammert.

4 Unterscheidung von Bedienelementen

Speziell im Fokus dieser Arbeit stehen elektromechanische Bedienelemente wie Drehschalter oder Drucktaster und haben letztendlich den Zweck, anhand von Benutzereingaben ein elektrisches Signal zu erzeugen, welches direkt oder indirekt die gewünschte Funktion auslöst. Diese Bedienelemente sind kaum im Bereich primärer Fahrzeugsteuerungsaufgaben zu finden, jedoch dominierend im Bereich sekundärer und tertiärer Fahraufgaben.

Ihre Funktion ist die Wandlung einer mechanischen Position in ein dementsprechendes elektrisches Signal.

Aufgrund der vielfältigen Anwendungsfälle und der daraus resultierenden Ausführungsformen ist dieser Markt unübersichtlich und es bedarf einer Strukturierung und Gliederung. Das folgende Kapitel setzt dafür den Fokus auf die vorliegende Aufgabenstellung.

4.1 Bewegungsformen von Bedienelementen: translatorisch und rotatorisch

Bedienelemente haben in der Regel Bewegungsrichtungen und -arten, die abhängig von der jeweiligen Funktion ausgerichtet sind. Die Anzahl möglicher Bewegungen ist durch den dreidimensionalen Raum beschränkt und lässt sich in je drei translatorische und drei rotatorische Bewegungen, also sechs Freiheitsgrade, einschränken. Klassische Bedienelemente verwenden meist nur eine Bewegungsrichtung. Sonderformen wie der Joystick oder Dreh-Drück-Steller kombinieren letztlich mehrere Freiheitsgrade, die sich wiederum aus den einzelnen Freiheitsgraden überlagern lassen. Auf den ersten Blick eine Ausnahme stellen haptische Eingabegeräte wie das in der Haptik-Forschung weit verbreitete Phantom (Sensables, 2007) dar. Hier werden sechs Freiheitsgrade zeitgleich und programmierbar zur Verfügung gestellt. Aber auch diese gesamte Bewegung kann in einzelne translatorische und rotatorische Teilbewegungen zerlegt werden.

Oftmals werden jedoch translatorische durch rotatorische Bewegungen angenähert, was zumeist jedoch technische Hintergründe hat, wie die günstigere Lagerung bewegter Teile z. B. bei Tastwippen. Teilweise wird dies ergänzt durch praktischen Nutzen, wie zum Beispiel der Lenkstockhebel, der seine Bewegung entlang der Lenkradform macht. Bei Reisinger und Wild (2007, S.121ff) findet man hierfür etliche Beispiele.

Letztendlich scheint eine Reduktion der Freiheitsgrade auf *eine Dimension* für die haptische Bewertung sinnvoll, weshalb auch im Folgenden die Unterscheidung zwischen translatorischen und rotatorischen Bedienelementen gemacht wird.

4.2 Definition: Taster und Schalter

Die Ausführung der Bedienelemente beinhaltet eine grundlegende Unterscheidung zwischen tastenden und rastenden Ausführungen. Beide Eigenschaften sind sowohl bei Druckfunktionen, als auch bei Drehstellern zu finden, Beispiele hierzu findet man bei Reisinger und Wild (2007).

Als durchgängige Bezeichnung wären hier die Begriffe *Drehschalter* für *rastende* und *Drehtaster* für *tastende* rotatorische Bedienelemente sinnvoll. Hier hat sich auch der Begriff Drehencoder eingebürgert.

In diesem Sinne steht *Druckschalter* für *rastende* und *Drucktaster* für *tastende* translatorische Bedienelemente, wobei sich bei letzterem der Begriff *Tastschalter* eingebürgert hat.

Im Englischen wird von *rotary encoder* oder *rotary switch* für Drehsteller allgemein und *Push button* oder *tact switch* für Drucktaster gesprochen.

Für die verschiedenen Bauarten kann es verschiedene Beweggründe geben. Das elektrische Signal kann dauerhaft oder impulshaft gewünscht sein, während es für den Benutzer auch sinnvoll sein kann, dass eine entsprechende Rückmeldung über den Zustand des Bedienelementes, bzw. dessen Funktion besteht, ohne dass er das Bedienelement erneut betätigen muss – eine Art haptischer Kodierung. Beispiele für dauerhaft geschaltete elektrische Signale finden sich z. B. bei elektrischen Sitzverstellungen, die häufig den Laststrom der Motoren direkt schalten und daher den Kontakt dauerhaft schließen müssen. Ein Beispiel für eine mechanische Rastung findet man bei der Verriegelung von z. B. elektrischen Fensterhebern. Hier kann der Fahrer unauffällig den Status der Kappenposition prüfen, ohne z. B. mitfahrende Kinder auf die verhängten Sanktionen aufmerksam zu machen. Generell ist ein technischer Trend hin zu Drucktastern zu erkennen. Diese stellen aufgrund ihrer Einfachheit eine kostengünstigere Variante dar und benötigen aufgrund der Digitaltechnik nur noch bedingt ein dauerhaftes elektrisches Signal. Speziell in Hinblick auf eine haptische Kodierung des Schaltzustandes ist dieser Trend jedoch nicht unbedingt als ergonomisch sinnvoll einzustufen.

Im Kraftfahrzeug findet man derzeit vorwiegend Drucktaster und Drehschalter (Drehsteller). Die Varianten Druck- bzw. Tastschalter, vor allem aber Drehtaster sind im Kraftfahrzeug selten

anzutreffen. Als Beispiel für Mischformen, die sowohl tastend, als auch schaltend betätigt werden, kann wiederum der Lenkstockhebel herangezogen werden (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Bauarten und Auswertungsprinzipien von Bedienelementen

		Bewegung	
		rotatorisch	translatorisch
Schaltform	rastend	Drehschalter	Rastschalter
	tastend	Drehtaster	Drucktaster
Elektrische Auswertung	mechanisch	x	x
	magnetisch	x	x
	optisch	x	x

4.3 Technische Ausführungsformen

Die Funktion eines Bedienelementes umfasst elektrische und mechanische Komponenten. An dieser Stelle ist es sinnvoll – gerade in Bezug auf das haptische Feedback – einen Trennstrich zu ziehen: Steht auf der elektrischen Seite die Auswertelektronik, die vom Bediener selbst nicht wahrgenommen wird und letztendlich die Aufgabe hat die gewünschte Funktion auszulösen, so steht auf Seiten der Mechanik der Benutzer der das Feedback des dahinter stehenden Mechanismus vollkommen erfasst. Ihn interessiert in erster Linie die Funktion und das Feedback der Mensch-Maschine-Schnittstelle (Raskin, 2000). Im Folgenden wird daher neben der Bewegungsrichtung zwischen haptischem Feedback an den Benutzer und der elektrischen Auswertung unterschieden.

4.3.1 Elektrische Auswertung

Die elektrische Auswertung von Bedienelementen basiert auf verschiedenen physikalischen Prinzipien. So kommen mechanische Schleifer, magnetische Hall-Sensorik oder Lichtschranken zum Einsatz. Die beiden erstgenannten Prinzipien können aufgrund der Rückwirkung Einfluss auf das haptische Feedback haben und sind daher diesbezüglich zu berücksichtigen. Im Weiteren werden diese Einflüsse jedoch nicht konkret betrachtet. Informationen über deren Aufbau und Eigenschaften sind bei Reisinger und Wild (2007) bzw. in Anhang A zu finden.

4.3.2 Erzeugung des haptischen Feedbacks

Die Erzeugung des haptischen Feedbacks erfolgt durch Federelemente, die auf eine Kulissee wirken. Das Federelement kann sowohl von innen nach außen auf eine Kulissee, wie auch außen liegend auf eine innen liegende Kurvenscheibe wirken. Die Federelemente wirken überwiegend radial, selten axial. Abbildung 6 zeigt innen und außen liegende radial wirkende Federelemente.

Die Ausführung des Federelements kommt als Spiralfeder mit Kugel oder Gleitstift sowie als Blattfeder mit Kunststoffgleitsteinen vor.

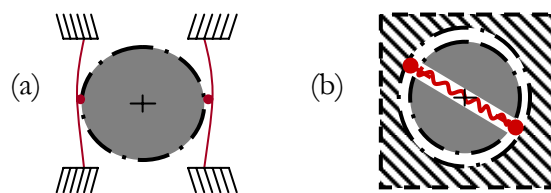


Abbildung 6: Radiale Wirkrichtung von Federelementen:
(a) Außen liegend mit Blattfeder; (b) Innenliegend mit Spiralfeder.

Bei Drucktastern werden im Massenmarkt hauptsächlich Prinzipien verwendet, die auf der Eigenschaft eines Bauelementes beruhen, die bei einer definierten Kraftschwelle schlagartig „durchschnappen“ und damit den so genannten Kraftsprung erzeugen. Hier kommen zum einen sog. *Schnapp-* bzw. *Federscheiben* als Schaltelement zum Einsatz, welche auch als *Knackfrosch* bekannt sind (vgl. Abbildung 7(b)), zum anderen werden so genannte *Gummi-* oder *Silikonschaltmatten* (vgl. Abbildung 7(a)) verwendet.

Zur Erläuterung der Charakteristika ist in Abbildung 7 jeweils ein schematisches Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. So ergibt sich ein sehr kurzer Hub, bei einem sehr hohen und steilen Kraftsprung beim Knackfrosch und ein großer Hub bei einem sehr hohen aber relativ flachen Kraftsprung im Falle der Gummischaltmatte. Ein inzwischen weit verbreiteter Typ kombiniert beide Prinzipien und erreicht damit einen großen Hub, einen hohen, aber sehr steilen Kraftsprung. Abbildung 7(c) zeigt das Prinzip des Schaltvorgangs dieses Typs: Ein Druck auf den Taster bewirkt durch Komprimierung des Silikonstößels zunächst einen Hub bei stetiger, nahezu linearer Kraftzunahme. Der Kraftsprung wird, wie bei den anderen Typen, beim Erreichen der Schaltkraft ausgelöst, indem die darunter angeordnete Federscheibe durchschnappt. Beim Durchschnappen kann sich der Silikonstößel wieder etwas ausdehnen, was zum einen zur Folge hat, dass der Kraftsprung selbst nicht so hoch, dafür aber steiler verläuft als beim Knackfrosch und zum anderen noch einen längeren Hub nach dem Kraftsprung. Dieser Tastertyp kombiniert

also beide Eigenschaften des langen Hubs und des steilen Kraftsprungs. Er wird im Folgenden unter der Bezeichnung *Mikroschalter* verstanden.

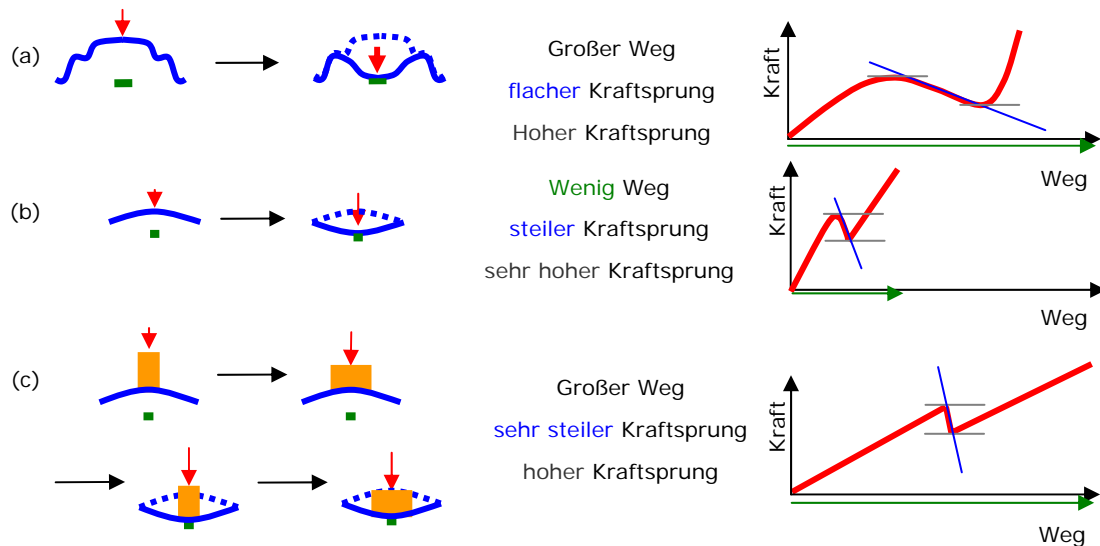


Abbildung 7: Gängige Prinzipien haptischen und elektrischen Feedbacks bei Drucktastern mit typischen Merkmalen: (a) Silikonmattenschalter; (b) Federscheibe; (c) Mikroschalter als Kombination aus Federscheibe mit Silikonstößel

Neben diesen Prinzipien kommen Mechanismen, vorwiegend bei sehr großen Hübten, zum Einsatz, die jedoch aus ökonomischer Sicht keine wirkliche Alternative darstellen. An dieser Stelle werden Prinzipien, vergleichbar mit denen oben genannter rotatorischer Bedienelemente, z. B. Schnapphaken oder Kugel-Federkombinationen, eingesetzt.

Rastschalter sind auf vielfältige Art und komplex aufgebaute Mechanismen, die durch eine Flip-Flop-Funktion zwischen zwei Zustände wechseln. Diese beiden Zustände lassen sich durch zwei Diagramme darstellen. Aus diesem Hintergrund heraus ist es sinnvoll, zunächst nur einfache Drucktaster zu untersuchen.

5 Untersuchung rotatorischer Bedienelemente

Die Untersuchung von rotatorischen Bedienelementen konzentriert sich gemäß Kapitel 2.5.4 zunächst auf die Darstellung der Rastung. Von konkretem Interesse ist hierbei deren Parametrisierung.

Die übliche technische Beschreibung erfolgt in Form der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie. Eine Analyse von im Markt befindlichen Bedienelementen zeigt Tendenzen und Auffälligkeiten in der Gestaltung dieser Kennlinie. Darauf basierend wird mit Hilfe eines Bedienelement-Simulators für variables haptisches Feedback eine Versuchsreihe vorbereitet, bei der sich Ungereimtheiten bei der Interpretation der Kennlinien zeigen, die zu einer Überprüfung der Visualisierung führen. Mittels theoretischer Ansätze kann das Integral des Drehmoments über dem Drehwinkel gefunden werden, welches schließlich in einer Versuchsreihe positiv überprüft wird. Aus diesen Ergebnissen ergeben sich einige vereinfachende Besonderheiten bezüglich der Parametrisierung der Drehmomentkennlinie. In einer zweiten Versuchsreihe werden Parameter der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie identifiziert und qualifiziert.

5.1 Beschreibung rotatorischer Bedienelemente

Zur haptischen Beschreibung der Rastung von Drehstellern wird eine Darstellung des Drehmoments über dem Drehwinkel, wie in Abbildung 8 dargestellt, verwendet. Diese Darstellung basiert auf den direkt physikalisch messbaren Größen Drehmoment und Position und ist daher technisch für diesen Zweck sehr gut geeignet. Auffällig ist dabei die Hysterese zwischen Rechts- und Linksdrehung (Hin- und Rückweg). In der Regel sind Bedienelemente bezüglich der Kraft-Weg-Darstellung nur auf das maximale Drehmoment in absoluten Größen sowie die Anzahl der Detents, also die Anzahl der Rastpositionen, spezifiziert.

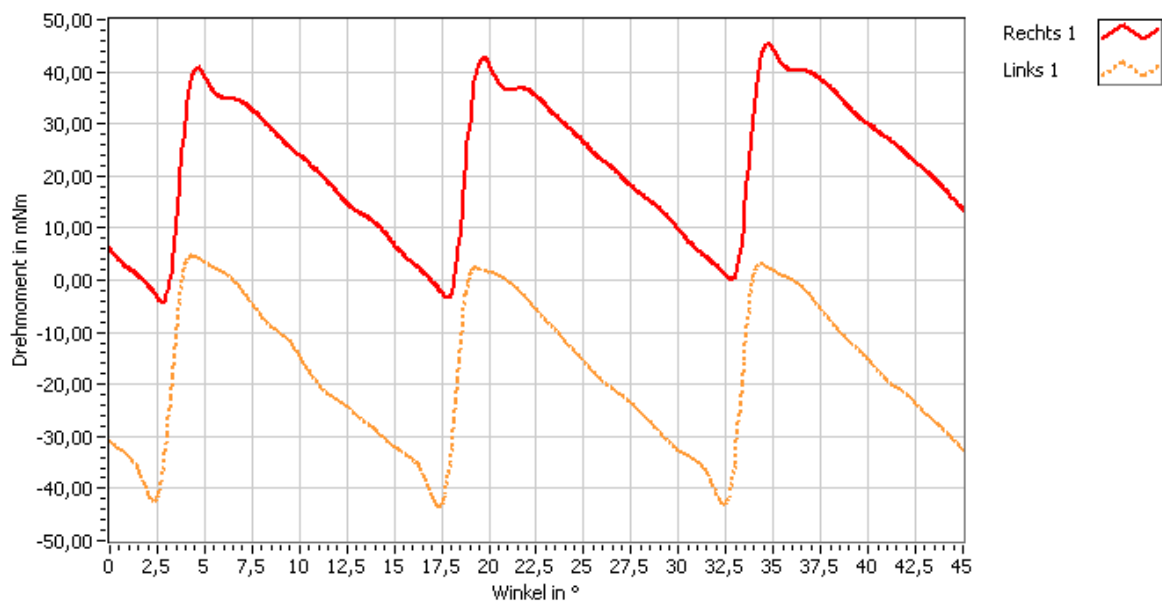


Abbildung 8: Messung eines Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs mit Rechts- und Linksdrehung.

5.1.1 Begriffsdefinitionen

Anhand von Abbildung 9 werden gängige Begriffe erläutert (nach Reisinger und Wild (2007)).

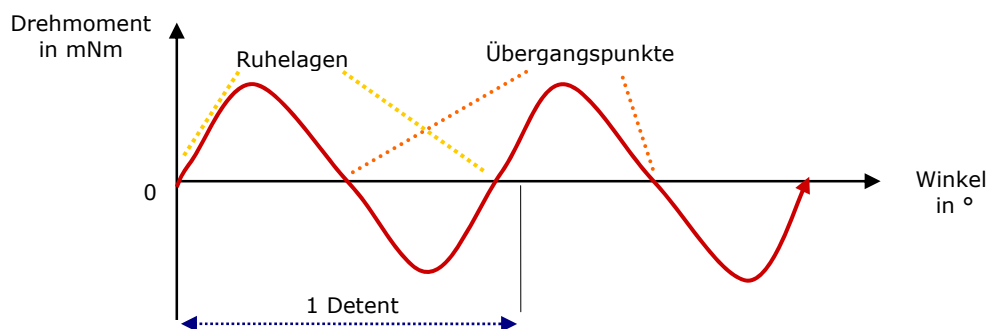


Abbildung 9: Systematische Darstellung einer Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie. Es sind zwei Detents mit Ruhelagen und Übergangspunkten abgebildet. Die Lage der Ruhelage bzw. Übergangspunkte lässt sich anhand der Wirkrichtungen von Benutzer und Bedienelement bzw. des Nulldurchgangs des Drehmoments erklären.

Detent

Ein Detent stellt eine Raste bzw. einen Schaltschritt dar. Die Anzahl Detents gibt Auskunft über die Schritte je Umdrehung und den Winkelbereich, den ein Detent überstreicht. In der Regel werden nur wenige Detents zur Charakterisierung dargestellt.

Elektrischer Schaltpunkt

Die Lage des elektrischen Schaltpunkts definiert die Auslösung der Funktion und steht darüber in unmittelbarem Bezug zum haptischen Feedback. Die korrekte Beziehung beider Größen zueinander ist ergonomisch als sinnvoll einzustufen, weshalb die Definition des elektrischen Schaltpunktes sinnvoll ist.

Ruhelage

Die Ruhelage ist die Position eines Drehstellers, an der er einrastet. Je Detent ergibt sich eine Ruhelage (vgl. Abbildung 9).

Übergangspunkt

Der Übergangspunkt oder auch instabile Ruhelage genannt, stellt das Gegenstück zur Ruhelage dar. Er befindet sich in der Mitte der fallenden Flanke und hat ebenso ein Null-Drehmoment. Hier geht, im Gegensatz zur Ruhelage, das entgegenwirkende in das treibende Drehmoment über, also Drehmomente, die aus der Lage abdrängen. Damit stellt dies eine instabile Lage dar, in der bereits geringe Winkelabweichungen zu einem Verlassen der Lage führen.

Reibungsoffset oder Reibungshysterese

Bedienelemente sind immer reibungsbehaftet. Da die Reibung immer der Drehrichtung entgegen gerichtet ist, bewirkt dies eine Verschiebung der Charakteristik in Abbildung 9 bei Rechtsdrehung nach oben und bei einer Linksdrehung nach unten. Daraus ergibt sich das typische Hystereseverhalten wie es in Abbildung 8 zu sehen ist.

Die Ermittlung der Reibung erfolgt wie anhand Abbildung 10 beschrieben:

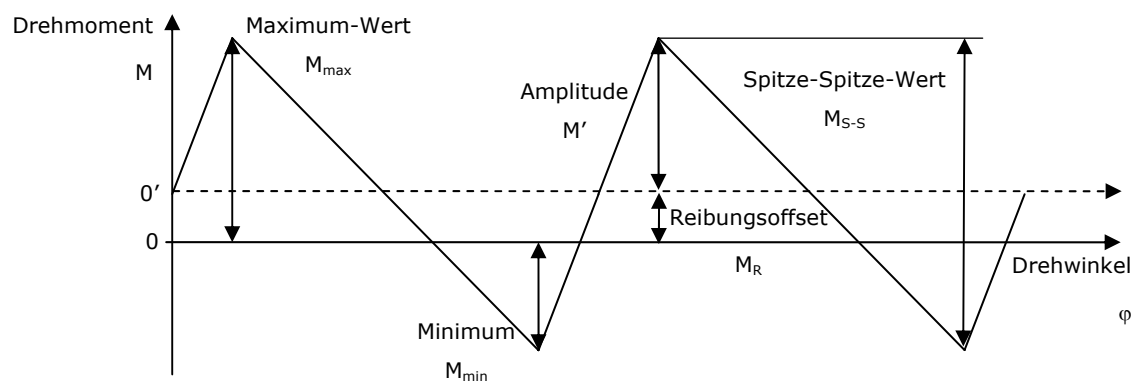


Abbildung 10: Zusammenhänge der Parameter Reibung, maximales Drehmoment und Spitze-SpitzeWert

Da einfache mechanische Bedienelemente eine symmetrische Kennlinie haben, muss die Nulllage der Rastung genau in der Mitte zwischen dem gemessenen Minimum-Wert M_{\min} und dem Maximum-Wert M_{\max} liegen. D.h. die höchste Wahrscheinlichkeit des Bedienelements zum Stehen zu kommen, liegt nicht etwa im Nulldurchgang 0 der gemessenen Kennlinie, sondern im Nulldurchgang $0'$ der Rastung, in der Abbildung gestrichelt dargestellt.

Die Ermittlung der Größen Reibungsoffset M_R sowie des Spitze-Spitze-Wertes M_{S-S} , bzw. daraus abgeleitet der Amplitude M' der Rastung erfolgt so:

Der Spitze-Spitze-Wert M_{S-S} wird durch Subtraktion der Extremwerte M_{\max} und M_{\min} nach Gleichung 1 ermittelt.

$$M_{S-S} = M_{\max} - M_{\min} \quad \text{Gleichung 1}$$

Daraus lässt sich die Amplitude der Rastung M' ermitteln. Dieser Wert steht für die eigentliche Federkraft, die das Bedienelement erzeugen kann und damit für den Wert, der die Reibung M_R im treibenden Periodenabschnitt überwinden soll. Dies entspricht dem halben Spitze-Spitze-Wert M_{S-S} , wie in Gleichung 2 dargestellt.

$$M' = \frac{M_{S-S}}{2} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2} \quad \text{Gleichung 2}$$

Der Reibungsoffset M_R ermittelt sich aus der Summe der Werte M_{\min} und M_{\max} nach Gleichung 3. Die Herleitung erfolgt aus der Differenz des Maximum-Wertes M_{\max} und der Amplitude der Rastung M' .

$$M_R = M_{\max} - M' = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2} \quad \text{Gleichung 3}$$

Sobald dieses Reibmoment $M_R > M'$ wird, kann das Bedienelement an jeder Position stehen bleiben, da die Federkraft dann nicht für eine Positionsänderung ausreicht.

5.1.2 Messung rotatorischer Kennlinien

Die Messung dieser Kennlinien erfolgt mittels eines Prüfstandes zur Vermessung haptischer Bedienelemente. Mittels eines Drei-Finger-Zentrisch-Greifers wird die Bedienelementachse oder deren Kappe gegriffen. Hierbei spielt die Ausrichtung des Bedienelementes eine wichtige Rolle, da Verspannungen, welche durch Fluchtungsfehler zwischen Mess- und Bedienelementachse entstehen, empfindliche Messfehler verursachen können. Diese wirken sich z. B. bei Winkelfehlern als Drehmomentschwankungen (Krause, 1989) oder bei Achsversatz als eine

Veränderung des Reibungsoffsets aus. Nähere Informationen zum eingesetzten Messsystem sind in Anhang B dokumentiert.

5.1.3 Betätigung

Die Betätigung eines Drehstellers erfolgt meist durch Zwei- oder Dreifinger-Zugriff. Vgl. hierzu Bullinger (1994). Der Zufassungsgriff zeichnet sich durch seine große Genauigkeit aus. Die gewählte Kappenform, konvex, zylindrisch oder konkav, unterstützt, wie in Reisinger und Wild (2007) aufgeführt, je nach Ausführung Kraft- oder Formschluss.

Für die Untersuchungen wird eine im Audi-MMI verwendete zylindrische Form aus Aluminium mit einem Durchmesser von 35,5 mm eingesetzt.

Die Betätigung rotatorischer Bedienelemente ohne Knebel im Zwei- oder Dreifinger-Zugriff bewirkt Scherkräfte, die mit den tangentialen Umfangskräften an den Kappen übereinstimmen.

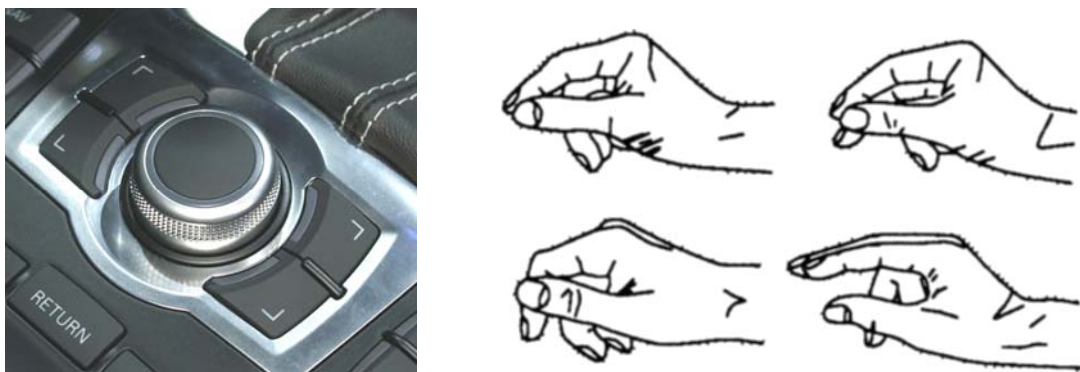


Abbildung 11: Kappe des zylindrischen Audi-MMI-Drehstellers (linke Abbildung) und typische Griffarten (rechte Abbildung) nach Bullinger (1994). Zufassung mit zwei (links) oder drei (rechts) Fingern.

5.1.4 Betrachtung realer Bedienelemente

Eine Betrachtung realer Bedienelemente im Markt soll Hinweise zur Parametrisierung von Drehstellern liefern. Zu diesem Zweck werden Bedienelemente verschiedener Hersteller ausgewählt und vermessen. Einen Überblick über Bauformen und Varianten findet man bei Reisinger und Wild (2007).

Auswahl

Kriterien für die Auswahl der Bedienelemente sind der subjektive Eindruck der einzelnen Bedienelemente, jedoch auch das Zusammenspiel der Bedienelemente im gesamten Fahrzeug. Die Vermessung der Bedienelemente erfolgt auf dem in Kapitel 5.1.2 vorgestellten Prüfstand (Wilky, 2005).

Auffälligkeiten und Besonderheiten der Kennlinien

Bei der Untersuchung verschiedener Kennlinien sind einige Gemeinsamkeiten aufgefallen. Abbildung 12 zeigt exemplarisch drei Kennlinien, denen allen gemein ist, dass die von links nach rechts ansteigende Flanke wesentlich steiler verläuft als die fallende Flanke. Eine weitere Auffälligkeit ist auch die geschwungene Form des Audi-Bedienelementes, während die beiden übrigen Bedienelemente eine recht ausgeprägte Spitze besitzen. Die erwartete auffällige und prägnante Haptik der „spitz“ ausgeführten Bedienelemente kann allerdings nicht gefühlt werden.

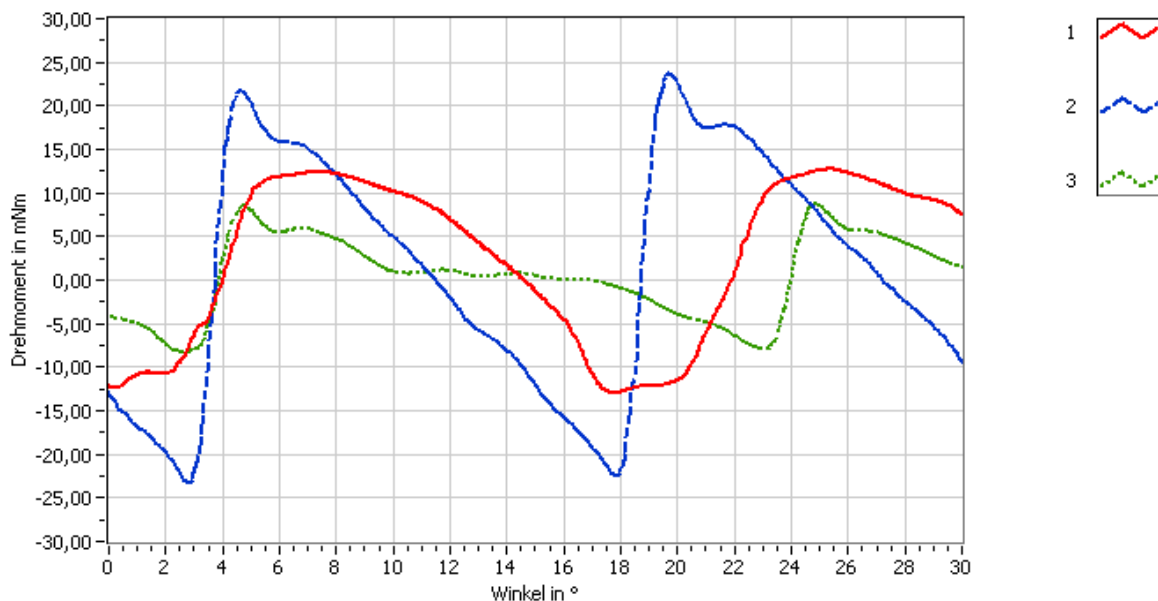


Abbildung 12: Vergleich verschiedener Kennlinien: 1. Audi MMI A8 (2004), 2. BMW iDrive 5er (2004), 3. Volvo Klima V50 (2004). Alle Kennlinien sind reibungsfrei dargestellt.

5.1.5 Rückschlüsse

Auffällig bei realen Bedienelementen sind besonders die Flankensteigungen und die Ausprägung der Spitzen: Es haben sich demzufolge steil ansteigende Flanke im Bereich der Ruhelage und eher flach abfallende Flanke im Übergangspunkt bewährt. Aus technischer Sicht ist die Steigung der Flanken ein Maß für die Steifigkeit im entsprechenden Kurvenabschnitt. Dies bedeutet eine hohe Steifigkeit in der Ruhelage und eine geringe negative Steifigkeit im Übergangspunkt.

Die Beobachtung, dass sich spitze Ausformungen im Drehmoment-Dreh-Winkel-Verlauf wenig differenzierend zu entsprechenden runden Ausformungen auf das haptische Empfinden auswirken, ist an dieser Stelle noch nicht zu erklären, jedoch für die Parameterfindung von größtem Interesse, da hier der notwendige Parametrisierungsaufwand eventuell erheblich reduziert werden kann.

5.2 Eignung der Drehmoment-Drehwinkel-Darstellung

Zur Untersuchung haptischer Eigenschaften werden Bedienelemente mit frei definierbarer Haptik entwickelt (Reisinger et al., 2005), im Folgenden Haptik-Simulatoren genannt. Bei der Inbetriebnahme und Vorversuchen treten zunächst unerklärliche haptische Besonderheiten auf.

Aufgrund dieser Beobachtungen und einer auch in Kapitel 5.1.5 festgestellten Besonderheit realer Bedienelemente, wird die Darstellung haptischer Eigenschaften von Drehstellern durch die Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie in Frage gestellt. Dies fordert eine Überprüfung der Darstellungsart und die Suche nach einer alternativen, intuitiv interpretierbaren Darstellung.

5.2.1 Definition der Problembereiche

Zunächst werden in den folgenden Abschnitten die erwähnten Beobachtungen detaillierter erläutert.

Ruhelage

Die *Ruhelage* befindet sich, wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt, in der ansteigenden Flanke mittig zwischen den Extremwerten der Kennlinie. Generell kann die Lage bei genauerer Betrachtung dadurch identifiziert werden, dass hier ein Nulldurchgang erfolgt, also kein Drehmoment vom Bedienelement ausgehend wirkt.

Der Benutzer bewegt ein Bedienelement, indem er ein sog. Benutzermoment aufbringt. Wird also das Bedienelement aus dieser Ruhelage herausbewegt, so wirkt ein Benutzermoment und es entsteht ein zunehmendes Bedienelement-Drehmoment, welches nur im Gleichgewicht mit dem Benutzermoment zum Stillstand kommt. Wirkt kein äußeres Benutzermoment, so wird das Bedienelement den Zustand des Nulldurchganges anstreben.

Die Entscheidung, welcher der beiden Nulldurchgänge, die steigende oder die fallende Flanke, die Ruhelage und welcher den Übergangspunkt darstellt, hängt von der Definition der Wirkungsrichtung des Drehmomentes ab.

Anhand von Abbildung 13 kann dies erläutert werden:

Ausgehend von einer *Ruhelage* wird das Bedienelement auf der Abszisse nach rechts bewegt. Das Bedienelement wirkt zunehmend mit einem Drehmoment mit positivem Vorzeichen dagegen, also der Wirkungsrichtung nach links.

Bewegt man das Bedienelement dagegen nach links, so bekommt das wirkende Drehmoment ein negatives Vorzeichen, was eine Richtungsumkehr zum vorhergehenden Fall bedeutet. Das Bedienelement wirkt also nach rechts und damit wiederum gegen das Benutzermoment.

Kurzum: Es wirken bei der Auslenkung aus der Ruhelage die Bedienelement-Drehmomente hin zur Ruhelageposition und zentrieren das Bedienelement daraufhin selbstständig.

Im Falle des *Durchgangspunktes* verhält es sich genau umgekehrt:

Eine Auslenkung nach rechts bewirkt ein positives Drehmoment, welches nun jedoch gemeinsam mit dem Benutzermoment nach rechts wirkt und damit das Bedienelement vom Durchgangspunkt wegbewegt.

Dasselbe Verhalten im zweiten Fall: Eine Auslenkung nach links bewirkt ein negatives Drehmoment und das Bedienelement bewegt sich wiederum weg. Daher zeigt der Übergangspunkt instabiles Verhalten und kann dort nicht einrasten.

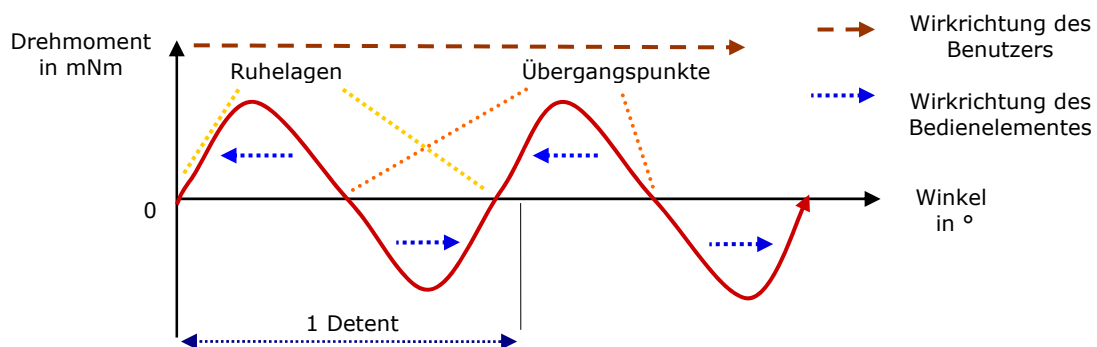


Abbildung 13: Systematische Darstellung einer Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie. Die Position der Ruhelage bzw. Übergangspunkte lässt sich anhand der Wirkrichtungen von Benutzer und Bedienelement und des Nulldurchgangs des Drehmoments erklären.

Dieser Zusammenhang ist nicht offensichtlich. Es zeigt sich, dass die Ruhelage von der Versuchsperson nicht in der Mitte einer der Flanken, sondern, wie in Abbildung 14 dargestellt, meistens in den Tiefpunkten der Kennlinie erwartet wird. Scheinbar vermutet man eine Ruhelage eher in einer Senke.

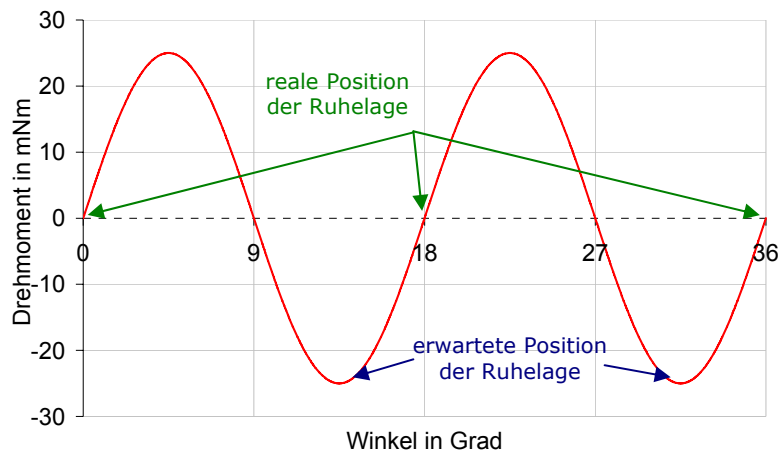


Abbildung 14: Problematik der Ruhelage bei Verwendung der Drehmomentkennlinie. Auffällig wird häufig die Ruhelage intuitiv falsch gewählt.

Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit

Zunächst werden am Simulator die in Abbildung 15 dargestellten periodische Signale $M(\varphi)$, wie Rechteck, Sägezähne, Sinus und Dreieck realisiert, um einen Eindruck des jeweiligen haptischen Feedbacks zu bekommen.

Bei verschiedenen Tests zeigt sich, dass das erwartete haptische Feedback mit dem subjektiven Eindruck der Tester in keiner Weise übereinstimmt. Lediglich der sinusförmige Verlauf scheint in etwa den Erwartungen zu entsprechen.

Die Sägezahn-Kennlinien (b) und (c) in Abbildung 15 stellen eine besondere Schwierigkeit dar, da ihnen aufgrund ihres Aussehens eine hohe Ähnlichkeit zugesprochen wird, ihr haptisches Verhalten jedoch extrem unterschiedlich bewertet wird.

Ebenso unerwartet jedoch besonders eindrücklich ist die folgende Auffälligkeit: Die Dreieck-Kennlinie (e) wird, trotz einer eindeutigen grafischen Unterscheidung, haptisch in der Regel dem Sinus (d) zugeordnet. Lediglich beim Paarvergleich mit gleicher Amplitude wird er als etwas schwächer, aber dennoch als sinusförmig eingeschätzt. Diese klare Zuordnung bewirkt zunächst Zweifel an der Funktionsfähigkeit des Systems, weitere Tests bestätigen jedoch eine einwandfreie Funktion.

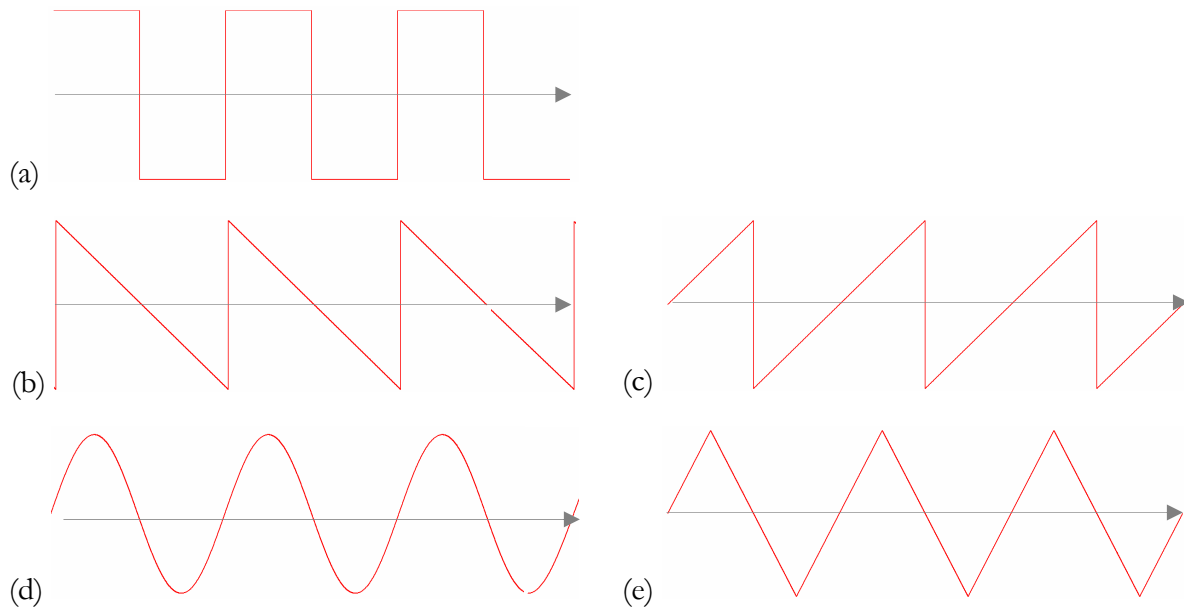


Abbildung 15: Applizierte Kurvenverläufe I: Rechteck (a), Sägezahn steil (b), Sägezahn flach (c), Sinus (d), Dreieck (e)

Asymmetrische Kennlinien

Eine dritte Auffälligkeit kann bei Varianten der oben genannten Kennlinien beobachtet werden (vgl. Abbildung 16): Sie tritt auf, wenn oben genannte Kennlinien entweder um einen Offset nach oben oder unten versetzt (a) oder eine der Halbwellen eines Detents, z.B. die untere, breiter als die obere gestaltet wird (b).

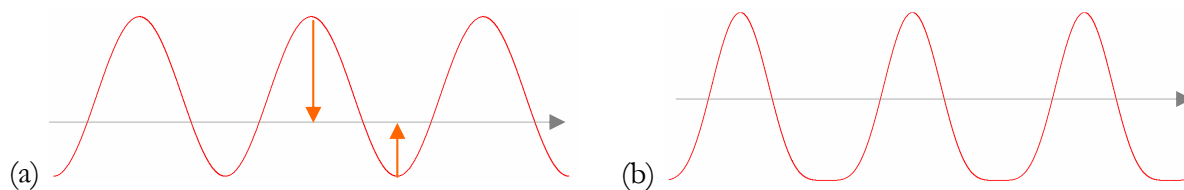


Abbildung 16: Applizierte Kurvenverläufe II: (a) Sinusverlauf aus der Nulllage nach oben verschoben, (b) Sinus mit breiterer Ausprägung der unteren Halbwelle

Die hieraus resultierende Asymmetrie fällt im Vergleich zu gemessenen Kennlinien zunächst nicht gesondert auf, da dort eine durch Reibung entstandene Hysterese (vgl. Kap. 5.1.2) die Kennlinie ebenfalls nach oben bzw. unten versetzt. Die Auswirkungen der Asymmetrie bewirken ein drehrichtungsabhängig unterschiedliches Verhalten, d.h. im Fall (b) der Abbildung 16 ist die Linksdrehung schwergängiger als die Rechtsdrehung. Dieses Verhalten wird vor allem bei einer Fehleinschätzung der Ruhelage nicht erwartet. Solches Verhalten bei rein mechanischen Bedienelementen ist nicht bekannt. Diese Bedienelemente müssten über eine Federrückstellung

oder eine einseitig ansteigende Kurvenscheibe verfügen, während aktive Bedienelemente solche Kennlinien ohne Probleme erzeugen können.

5.2.2 Hypothesenbildung

Die aufgeführten Beobachtungen führen zu der Schlussfolgerung, dass die Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie für eine intuitive haptische Beschreibung der Rastung von Drehstellern nicht geeignet ist. Daraus folgert die Frage, ob eine alternative technische Visualisierung gefunden werden kann, welche die gezeigten Auffälligkeiten schlüssig erklärt. Diese Visualisierung muss eine intuitive Lesbarkeit bieten, die es gestattet anhand der grafischen Darstellung Rückschlüsse auf das zu erwartende haptische Feedback zu ziehen.

Vor diesem Hintergrund lassen sich drei *grundlegende Hypothesen* formulieren:

R.1. Ruhelage

- a. *Wenn die Ruhelage des Bedienelementes in einer Visualisierung im Minimum evt. auch im Maximum liegt, dann drückt diese Visualisierung das entsprechende haptische Verhalten aus.*

R.2. Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit

- a. *Wenn sich Sinus- und Dreieckcharakteristik in einer Visualisierung stark ähneln, dann drückt diese Visualisierung das entsprechende haptische Verhalten aus.*
- b. *Wenn die Dreieckcharakteristik in einer Visualisierung etwas schwächer interpretierbar ist, als die Sinuscharakteristik, dann unterstreicht dies Hypothese R.2.a.*

R.3. Asymmetrie

- a. *Wenn eine Asymmetrische Kennlinie in einer Visualisierung als einseitig abfallend erkannt wird, dann drückt diese Visualisierung das entsprechende haptische Verhalten aus.*

Darüber hinaus kann eine übergeordnete, d. h. von den grundlegenden Hypothesen abhängige, Hypothese formuliert werden:

R.4. Intuitive haptische Kennlinien:

- a. *Wenn die Hypothesen R.1-R.3 von einer Visualisierung erfüllt werden, dann handelt es sich bei dieser um eine intuitive, anschauliche Visualisierung die das haptische Verhalten dieses Bedienelementes ausdrückt.*

Es ist trivial, dass eine grafische Darstellung (Visualisierung) auf visuellen Vorstellungen beruht. Erzeugt ein haptischer Eindruck ebenfalls eine haptische Vorstellung, so liegt es nahe, dass diese

haptische Vorstellung auch einer visuellen Vorstellung entspricht und damit intuitiv⁴ grafisch darstellbar ist. Lassen sich haptische Wahrnehmungen und grafische Darstellung zur Deckung bringen, so muss diese haptische Wahrnehmung einer entsprechenden grafischen Darstellung zuzuordnen sein.

Dies lässt auf die folgenden übergeordneten Hypothesen schließen:

- R.5. Zusammenhänge haptischer und visueller Wahrnehmung:
- b. *Existiert eine Visualisierung, die als intuitiv, im Sinne von Hypothese R.4, bezeichnet werden kann, dann existiert eine haptische Vorstellung.*
 - c. *Existiert eine Visualisierung, die als intuitiv, im Sinne von Hypothese R.4, bezeichnet werden kann, dann existiert auch eine Kopplung zwischen haptischer und visueller Vorstellung.*

5.2.3 Abwägung verschiedener Lösungsansätze

Es werden zwei Lösungsansätze näher betrachtet: Die Fourieranalyse einer Charakteristik und das Integral des Drehmomentes über dem Drehwinkel.

Eine Fourierreihenanalyse könnte anhand von Filtereigenschaften des menschlichen Organismus z. B. die Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit erklären. Dabei wird eine periodische Kennlinie in eine Summe amplitudengewichteter trigonometrischer Funktionen (Bronstein, 2001, S.436) zerlegt. Eine Verringerung der Amplituden höherer Frequenzanteile kommt dabei einer Tiefpassfilterung gleich. Die Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit könnte erfüllt werden, wenn ein Tiefpassverhalten der menschlichen Wahrnehmung (Loomis, 1990) die Spitzen glättet und damit die Ähnlichkeit zwischen beiden Kennlinien erklärt. Auch eine geringere Amplitude des Dreiecks würde damit beschrieben.

Allerdings liegt die Ruhelage weiterhin in der steigenden Flanke und nicht wie gefordert in einem Minimum der Kennlinie. Dies disqualifiziert eine Fourierreihenzerlegung der Kennlinie als Modell einer intuitiv lesbaren Darstellung.

Abhilfe dafür könnte eine betragsmäßige Behandlung, also ein „Nach-Oben-Klappen“ der unteren Halbwellen, der Drehmomentwerte zumindest bezüglich der Ruhelage schaffen. Hierbei würde der Nullpunkt zum Minimum. Dieser Ansatz könnte aufgrund der Annahmen von Hayward (2004) bzgl. taktiler Reizerzeugung durch tangentielle Streckung der Haut für normale Kräfte getroffen werden, indem er besagt, dass Zug- und Druckbelastung vergleichbare

⁴ Lat. intueor = 1. hin-, anblicken, hin-, ansehen; 2. betrachten, erwägen

Wahrnehmungseffekte erzeugen. Problematisch stellt sich dabei jedoch die Behandlung rechts- oder linkslastiger Drehmomentkennlinien, wie Sägezahncharakteristika (vgl. Abbildung 15 b und c), dar, da ein nichtperiodischer Verlauf entsteht. Diese Überlegungen führen zu einer Verwerfung dieses Ansatzes.

Ein weiterer Ansatz beschäftigt sich mit der notwendigen Phasenverschiebung der Senke hin zur realen Ruhelage. Eine Integration erfüllt diese Anforderung, indem sie eine Phasenverschiebung um ein Viertel der Periodendauer bewirkt. Diese notwendige Bedingung ist erfüllt. Generell hat die Integration eine glättende Wirkung, weshalb dieses Verfahren im folgenden Kapitel näher betrachtet wird.

5.3 Lösungsansatz zur intuitiven haptischen Beschreibung von Bedienelementen

Im Folgenden wird die Eignung des Integral-Ansatzes aus dem vorhergehenden Kapitel einer mathematischen Überprüfung unterzogen. Dieser Ansatz wird künftig Integraldarstellung genannt.

5.3.1 Ruhelage – Betrachtung anhand der Kurvendiskussion

An dieser Stelle lohnt ein Blick in die grundlegenden Methoden der Kurvendiskussion, die Bestimmung von Extremwerten:

Ausgehend von einer stetigen Funktion $f(x)$ sind notwendige Bedingungen für ein Minimum, dass die erste Ableitung $f'(x) = 0$ sein muss. Überdies muss nach der Methode des Vorzeichenvergleiches $f'(x)$ einen Wechsel von „-“ nach „+“ beim Übergang von x_- nach x_+ aufweisen (Bronstein, 2001, S.405).

Der entscheidende Schritt ist, den Drehmoment-Verlauf mit der ersten Ableitung $f'(x)$ gleichzusetzen, denn hier werden beide notwendigen Bedingungen der Kurvendiskussion für ein Minimum erfüllt: Die Kennlinie durchquert den Nulldurchgang von links nach rechts, also mit steigendem x von „-“ nach „+“. Dies bedeutet, dass das Potential dieser Kennlinie hier ein Minimum besitzt und damit den Anforderung bezüglich der Ruhelage in Kapitel 5.2.1 genügen würde.

5.3.2 Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit – Mathematischer Hintergrund

Nun gilt es zu überprüfen, ob dieser Ansatz auch der Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit aus Kapitel 5.2.1 genügt. Das Potential genügt dann diesem Anspruch, wenn die Sinus- und die Dreieck-Kennlinie

in dieser Darstellung eine ähnliche Form haben. Um dies zu prüfen, muss zunächst das Potential $I(\varphi)$ durch Integration der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie $M(\varphi)$ über dem Drehwinkel φ von φ_1 bis φ_2 durchgeführt werden (siehe Gleichung 1).

$$I(\varphi) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M(\varphi) d\varphi$$

Gleichung 1

Abbildung 17 zeigt die Integraldarstellungen von Sinus und Dreieck überlagert und zeigt eine deutliche Ähnlichkeit beider. Selbst die beobachtete schwächere Ausprägung des Dreiecks kann klar erkannt werden.

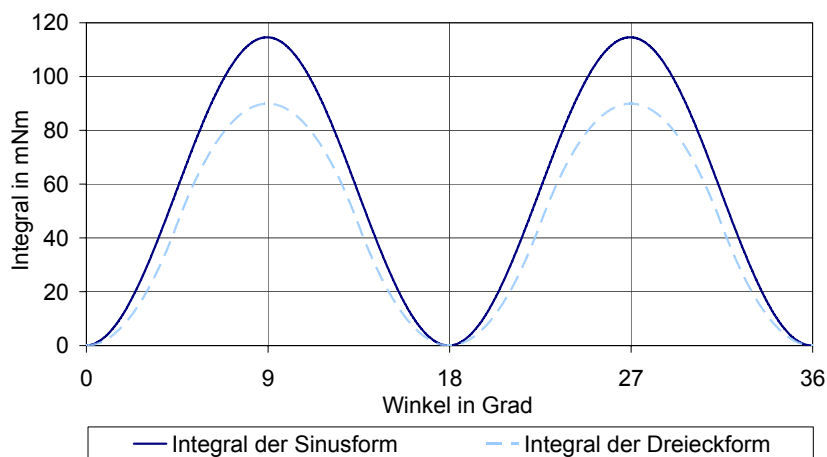


Abbildung 17: Integraldarstellung von Sinusform und Dreieckform. Beide haben große Form-Ähnlichkeit. Die Dreieckform hat eine geringere Höhe, was sich mit den Beobachtungen der haptischen Wahrnehmung deckt.

Die Sinus-Kennlinie behält bei der Integration ihre Sinusform, während der Dreieckverlauf als Aneinanderreihung von Geradenstücken wiederum eine Aneinanderreihung von Parabelbögen ergibt. Die Minima beider Kennlinien werden um $\frac{1}{4}$ der Periodenlänge nach rechts geschoben, was auch die korrekte Positionszuordnung der Ruhelage erklärt.

Abbildung 18 bietet eine Übersicht zu den Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinien mit zugehörigen Integraldarstellungen.

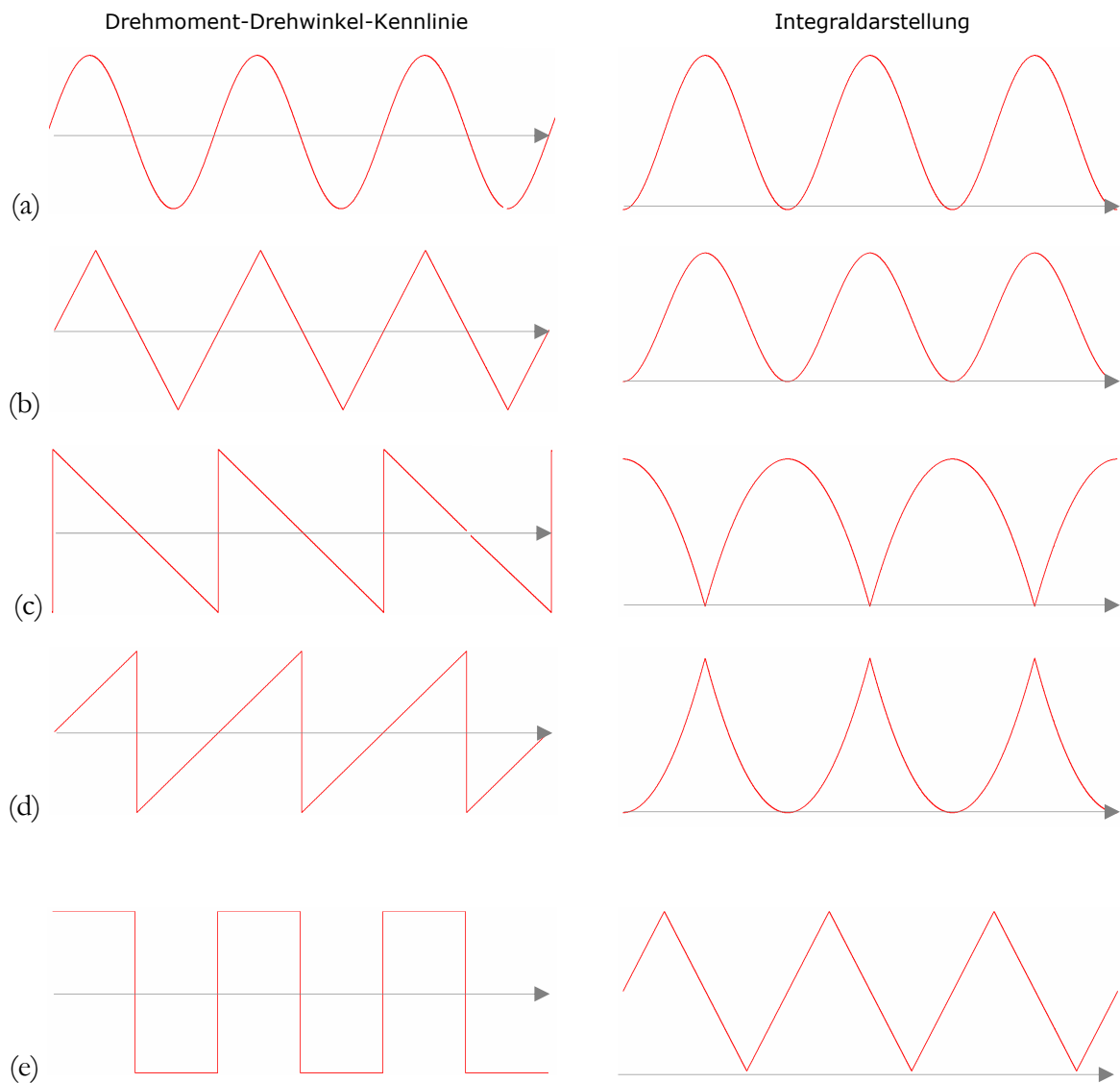


Abbildung 18: Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinien mit zugehörigen Potentialen: Integral-Kennlinie: (a) Sinus, (b) Dreieck, (c) Sägezahn steil, (d) Sägezahn flach, (e) Rechteck

5.3.3 Asymmetrische Kennlinien

Bleibt noch das Phänomen der asymmetrischen Kennlinien. Exakt ausgedrückt handelt es sich um eine fehlende Punktsymmetrie zur Ruhelage einer Kennlinie.

Hier ist es hilfreich, das System energetisch zu betrachten: Die Fläche unter der Kurve steht für die im System befindliche Energie, die bei einer Bewegung überwunden werden muss. Eine Drehung aus der Ruhelage muss Energie in der Höhe des beschränkten Integrals der Drehmomentkennlinie über dem Drehwinkelbereich, den es überstreicht, aufwenden.

Bei einem symmetrischen System ist die Fläche oberhalb und unterhalb der Abszisse gleich groß und es muss bei Links- und Rechtsdrehung dieselbe Energie aufgebracht werden. Auch hier ist der integrale Zusammenhang zu erkennen.

Der Fall, wie er in Abbildung 19 dargestellt ist, besitzt nun eine ausgeprägte untere Halbkurve. Das zugehörige Integral in Abbildung 20 fällt nach rechts hin ab, drückt also auch das einseitige haptische Empfinden des Bedienelementes aus. Die Ruhelage befindet sich wiederum in lokalen Minima der Integraldarstellung.

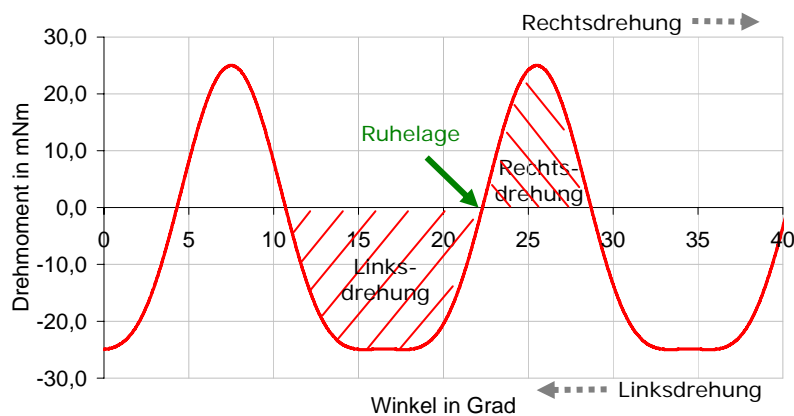


Abbildung 19: Drehmomentdarstellung einer asymmetrischen Kennlinie. Die Flächen oberhalb und unterhalb der Abszisse haben unterschiedliche Größe.

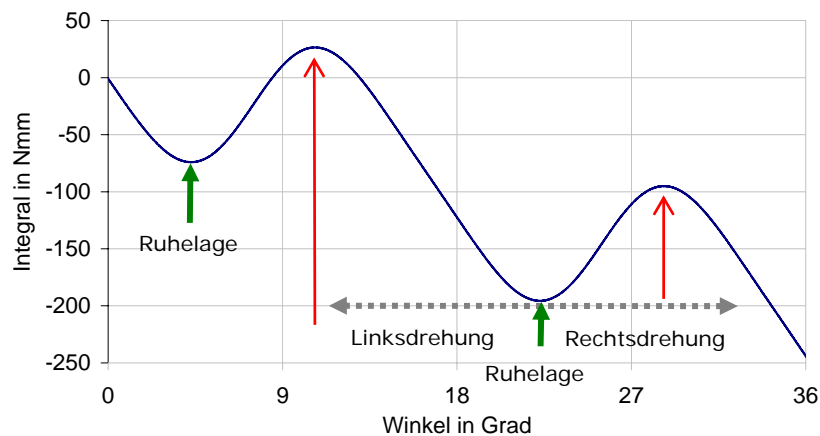


Abbildung 20: Integraldarstellung einer asymmetrischen Kennlinie. Sie fällt nach rechts hin ab, hat die Ruhelage in den jeweiligen lokalen Minima.

Abbildung 21 zeigt asymmetrische Drehmomentkennlinien mit zugehörigen Integraldarstellungen, wobei die Asymmetrie durch einen Offset oder durch eine spezielle Kurvenform verursacht wird. Das Verhältnis der beiden Flächenanteile bestimmt die Steigung der Integraldarstellung: Je größer die Differenz, desto steiler steigt diese an (vgl. Abbildung 21 (a)).

Überwiegt die obere Fläche, so steigt die Kennlinie von rechts nach links an, überwiegt die untere Fläche, so fällt sie ab (vgl. Abbildung 21 (b)).

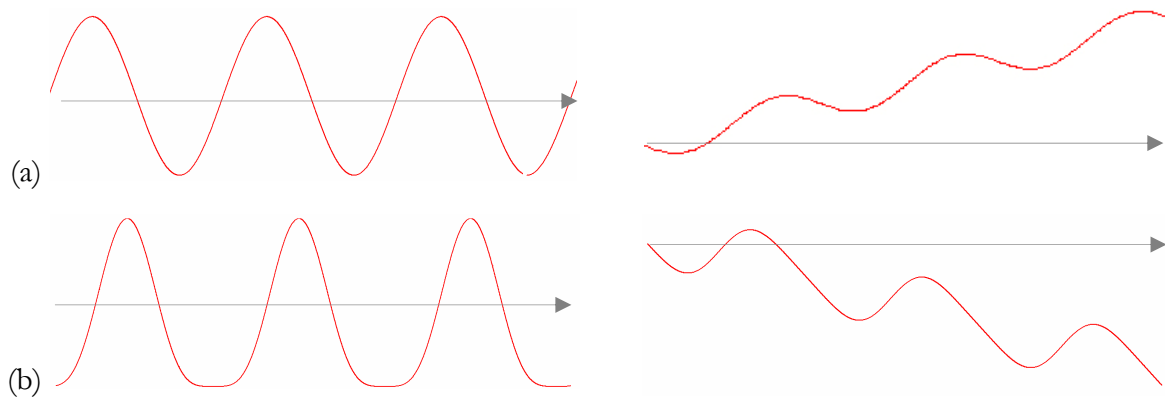


Abbildung 21: Asymmetrische Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinien mit zugehörigen Potentialen: (a) Sinus mit Offset, (b) Sinus mit breiterer Ausprägung der unteren Halbwellen

Rein physikalisch kann bei der Integration wie in Reisinger et al. (2005) von Arbeit oder Energie gesprochen werden.

5.3.4 Zusammenfassung

Die Integraldarstellung erfüllt alle Forderungen der Hypothesen aus Kapitel 5.2, die sie als intuitive Darstellung benötigt: Ruhelagen liegen im Minimum, so dass erwartete und reale Ruhelagen zur Deckung kommen. Dreieck und Sinusdarstellung haben eine ähnliche Form, wobei außerdem eine Dreieckskennlinie etwas kleiner dargestellt wird. Asymmetrische Kennlinien zeigen eindeutige steigende oder fallende Tendenzen, die mit einem einseitigen Drehverhalten in Verbindung gebracht werden können. Treffen die Hypothesen zu, so hieße das, dass der Mensch haptisch nicht die Kraft über dem Weg, sondern dessen Integral wahrnimmt.

Offen bleibt an dieser Stelle, wie dieser Zusammenhang entsteht. Physikalisch betrachtet beschreibt die Integration eine Energie bzw. Arbeit. Bewertet der Mensch nun die Arbeit, die er in das System hineinsteckt, bzw. den Energieaustausch mit dem Bedienelement?

5.4 Modell eines rotatorischen Bedienelementes

Ein stark vereinfachtes mechanisches Modell eines Bedienelementes ermöglicht es, einen Zusammenhang zwischen der Mechanik und der zu erwartenden Haptik zu liefern. Die technische Gliederung nach Kapitel 2.5.4 wird zugrunde gelegt.

5.4.1 Aufbau

Der Ausschnitt des beschriebenen Modells konzentriert sich auf den Federmechanismus, der für das Einrasten des Bedienelementes verantwortlich ist. Ohne diesen wäre das Bedienelement lediglich reibungsbasiert und würde in der Drehmoment-Drehwinkel-Darstellung letztlich als Offset mit einer drehrichtungsabhängigen Hysterese dargestellt sein. Daher wird, wie in Abbildung 22 dargestellt, nur das Federelement, ohne Lager und Massenträgheitskräfte, betrachtet.

Der Aufbau besteht aus der Kappe, welche einen Griff darstellt, sowie der Rastscheibe, die über eine Achse miteinander verbunden sind. Auf die Kontur der Rastscheibe wirkt über einen Gleitstein eine Blattfeder mit der Federkraft F_f . Die Wechselwirkungen zwischen Rastscheibe und Gleitstein ergeben eine zur Drehrichtung tangential Kraft F_φ , die letztlich ein positionsabhängiges Drehmoment zur Drehachse, die eigentliche Rastung, erzeugt.

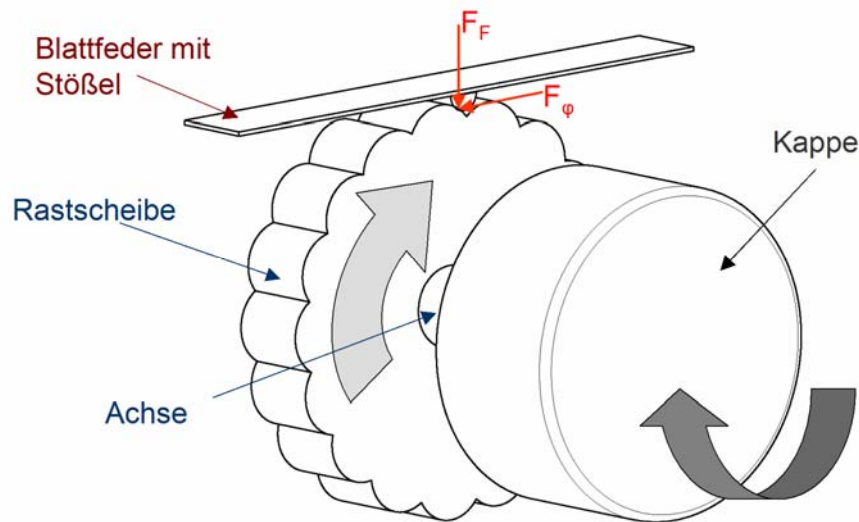


Abbildung 22: Schematische Darstellung eines rotatorischen Bedienelementes zur mechanischen Modellbildung. Die Feder wirkt über einen Gleitstein mit der Kraft F_F auf die Rastscheibe. Diese Anpresskraft verursacht eine Kraft F_φ tangential zur Rastscheibe, die letztendlich das wirkende und spürbare Drehmoment erzeugt.

5.4.2 Zusammenhänge

Folgende Zusammenhänge werden für die Modellbildung angenommen. Das Modell wird einfach gehalten, um einen guten Überblick über die Zusammenhänge zu behalten. Es kann damit als Ausgangspunkt weitergehender Modelle dienen.

Federkraft

Ausgehend von einem linearen Verhalten der Feder, wie in Gleichung 4, kann die Auslenkung x der Feder proportional zur Federkraft F_F gesetzt werden. Wird eine sehr weiche, stark vorgespannte Feder angenommen, so ändert sich die Federkraft F_F nur gering und kann idealisiert als konstant angenommen werden.

$$F_F = c \cdot x$$

Gleichung 4

Diese Auslenkung x entspricht idealisiert der drehwinkelabhängigen Rastscheibenform $x(\varphi)$. Es wird ein punktförmiger Kontakt zwischen Stößel und Rastscheibe angenommen. Daraus ergibt sich Gleichung 5 mit der Folgerung, dass die Federkraft proportional zur Rastscheibenform ist.

$$F_F(\varphi) = c \cdot x(\varphi)$$

Gleichung 5

Rastmoment

Das erzeugte Rastmoment $M_\varphi(\varphi)$ ergibt sich aus dem Produkt der tangentialen Kraft F_φ und dem Radius der Rastscheibe (Gleichung 6). Dieser Radius variiert jedoch aufgrund der Federauslenkung und des daraus resultierenden veränderlichen Kontaktpunktes zwischen Rastscheibe und Gleitstein. Wird auch hier ein im Verhältnis zu $x(\varphi)$ sehr großer Radius $r(\varphi)$ realisiert, so kann auch dieser idealisiert konstant angenommen werden.

$$M_\varphi(\varphi) = F_\varphi \cdot r(\varphi)$$

Gleichung 6

Die Annahme der konstanten Größen wird jedoch zunächst nicht getroffen.

Zusammenhang zwischen Federkraft und tangentialer Kraft

Eine Schlüsselrolle spielt die Übersetzung zwischen Federkraft F_F und Tangentialkraft F_φ . Dies geschieht im Berührungspunkt zwischen Gleitstein und Rastscheibe. In Abbildung 23 ist dies schematisch als Berührungspunkt der Spitze des Kraftvektors F_F mit der Kennlinie $x(\varphi)$ zu erkennen.

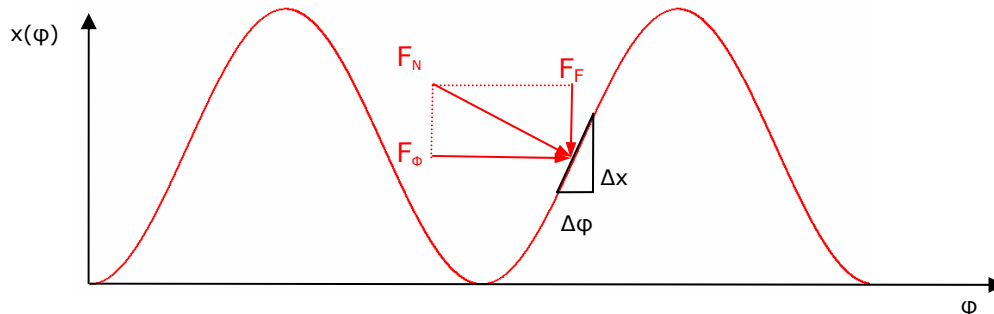


Abbildung 23: Schematische Darstellung der Rastung mit punktförmiger Abtastung. Die Normalkraft F_N steht senkrecht auf der Rastkurve und kann in Federkraft F_F und wirksame Kraft F_φ zerlegt werden. Sie ist für die Reibung des Gleitsteines verantwortlich, die für die folgenden Betrachtungen jedoch nicht berücksichtigt wird.

Der Zusammenhang zwischen F_F und F_φ ist mit dem Keilgesetz nach Gleichung 7 beschreibbar. Maßgeblich ist die Steigung $\Delta x / \Delta \varphi$ im Berührungspunkt.

$$F_\varphi \cdot \Delta \varphi = F_F \cdot \Delta x \rightarrow \frac{\Delta x}{\Delta \varphi} = \frac{F_\varphi}{F_F}$$

Gleichung 7

Für infinitesimal kleine Wegstücke ergibt sich der Zusammenhang in Gleichung 8.

$$x' = \frac{dx}{d\varphi} = \frac{F_\varphi}{F_F} \quad \text{Gleichung 8}$$

Folgendes Integral (Gleichung 9) bzw. Differential (Gleichung 10) kann daraus abgeleitet werden. Sie zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen der Kurvenform $x(\varphi)$ und der Tangentialkraft F_φ .

$$x(\varphi) = \int \frac{F_\varphi}{F_F} d\varphi \quad \text{Gleichung 9}$$

$$F_\varphi = F_F \cdot \frac{dx}{d\varphi} \quad \text{Gleichung 10}$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung 5 für die Positionsabhängigkeit der Federkraft F_F wird der Zusammenhang komplexer, da hierdurch $x(\varphi)$ aufgrund von $F_F(x(\varphi))$ in höherer Ordnung auftritt.

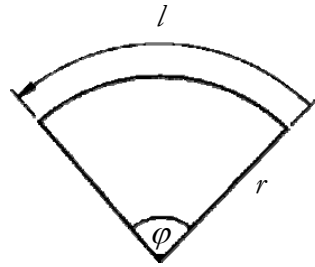
$$F_\varphi = c \cdot \frac{x(\varphi) \cdot dx}{d\varphi} \quad \text{Gleichung 11}$$

Zum Verständnis des Grundzusammenhanges reicht nun die als konstant betrachtete Kraft F_{F0} aus. Für die Wahrnehmung des Bedienelementes ist wie bereits dargestellt die Erzeugung der Kraft F_F nur von untergeordnetem Interesse, da F_F durch beliebige Mechanismen erzeugt werden kann, die von x und φ unabhängig sein können und außerdem dem Benutzer in der Regel unbekannt sind.

Aus Gleichung 9 und Gleichung 6 ergibt sich somit der Zusammenhang zwischen dem Drehmomentverlauf $M(\varphi)$ und der winkelabhängigen Auslenkung $x(\varphi)$ einer idealisierten Kurvenscheibe (Gleichung 12).

$$x(\varphi) = \frac{1}{F_{F0}} \cdot \int \frac{1}{r(\varphi)} M(\varphi) d\varphi \quad \text{Gleichung 12}$$

Anhand einer Dimensionsanalyse ergäbe sich mit φ in Radiant für $x(\varphi)$ die Einheit $[l]$, also keine Strecke. Dieser Zusammenhang kann anhand von Abbildung 24 über die Zuordnung des Drehwinkels φ zur Bogenlänge l erklärt werden, für die nach Bronstein et al. (2001) der Zusammenhang in Gleichung 13 gilt.

Abbildung 24: Abhängigkeit der Bogenlänge l von Radius r und von Drehwinkel φ

Für die Integration muss demzufolge die Bogenlänge l berücksichtigt werden.

$$l = r \cdot \varphi \quad ; \quad \varphi \text{ in rad} \quad \text{Gleichung 13}$$

$$dl = r \cdot d\varphi \quad ; \quad \varphi \text{ in rad} \quad \text{Gleichung 14}$$

Damit ergibt sich der korrigierte Zusammenhang nach Gleichung 15, der jedoch mit Gleichung 15 direkt in Gleichung 16 umgeformt werden kann. Dabei wird ersichtlich, dass ein Einfluss von $r(\varphi)$ entfällt.

$$x(\varphi) = \frac{1}{F_{F0}} \cdot \int \frac{1}{r(\varphi)} M(\varphi) dl \quad \text{Gleichung 15}$$

$$x(\varphi) = \frac{1}{F_{F0}} \cdot \int \frac{r(\varphi)}{r(\varphi)} \cdot M(\varphi) d\varphi \quad \text{Gleichung 16}$$

Es ergibt sich der direkte Zusammenhang zwischen idealisierter Form der Rastscheibe $x(\varphi)$ und der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie $M(\varphi)$ nach Gleichung 17.

$$x(\varphi) = \frac{1}{F_{F0}} \cdot \int M(\varphi) d\varphi \quad \text{Gleichung 17}$$

Ableitung der Rastscheibenform

Um aus der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie die Form der Rastscheibe abzuleiten, muss die Betrachtung jedoch exakt durchgeführt werden. Neben geometrischen Randbedingungen müssen auch Einflüsse von Elastizitäten, Spiel und Toleranzen, aber auch Materialpaarungen und Reibung berücksichtigt werden.

5.4.3 Zusammenfassung der Modellbetrachtung

Der Blick auf die mechanische Funktionsweise des Bedienelementes zeigt einen Integral-Charakter im Zusammenhang zwischen der Form der Rastscheibe $x(\varphi)$ und dem

Rastmoment $M(\varphi)$. Dieser Zusammenhang belegt im Falle einer Bestätigung die Hypothese, dass der Mensch die Gestalt einer idealisierten Rastscheibe wahrnimmt, die er vermittelt durch Drehknopf und Achse ertastet. Daraus lässt sich des weiteren ableiten, dass die haptische Gestalt eines Objektes dasselbe innere Bild erzeugt, wie dies visuell geschieht.

Vor diesem Hintergrund wird eine weitere, übergeordnete Hypothese R.5 aufgestellt:

- R.5. Gestaltwahrnehmung
- a. *Wird die Integraldarstellung als intuitive haptische Darstellung bestätigt, dann ertastet der Mensch die Gestalt einer idealisierten Rastscheibe eines Bedienelementes.*

5.5 Zu den Begriffen Integral, Energie und Arbeit

An dieser Stelle ist es wichtig, sich mit der Bedeutung der verwendeten Begriffe im Zusammenhang der Integraldarstellung, den Modellzusammenhängen und der aufgestellten Hypothese auseinanderzusetzen.

Es muss die Frage gestellt werden, wozu der Mensch seine Sinne benötigt. Es ist naheliegend, dass sich die menschliche Wahrnehmung zur Erfüllung seiner grundlegenden Bedürfnisse entwickelt hat. Dazu zählen der Schutz des eigenen Körpers, die Orientierung im Raum und die Identifizierung von Objekten. In Bezug auf die haptische Wahrnehmung muss er Kollisionen und Gefahren schnell erkennen können, um entsprechende Schutzreaktionen auszulösen. Andererseits muss er Gegenstände blind ertasten können, um diese zu identifizieren. Es muss ein Ei von einem Stein unterschieden werden können, wie auch ein schlichtes Nachgeben vom wirklichen Brechen eines Astes.

Vor diesem Hintergrund müssen Objekte beim Ertasten ein vergleichbares mentales Abbild erzeugen, wie dies beim Sehen geschieht.

Wenn nun bei der Betätigung eines Bedienelementes die Kurvenscheibe als dessen Abbild ertastet wird, so wird die Gestalt des Objektes erkannt. Dies hat jedoch mit einer bewussten Wahrnehmung von Arbeit oder Energie wenig gemeinsam. Vielmehr wird die Geometrie des Objektes ermittelt.

Arbeit bzw. Energie sind Vermittler dieser Information wie auch Kraft und Weg nur vermittelnde Größen darstellen. Wichtig für den Menschen ist das Resultat, in diesem Fall die Gestalt eines Gegenstandes.

Aus dieser Sicht wäre es daher falsch zu sagen, der Mensch fühlt die Energie oder die Arbeit über dem Drehwinkel, während er eigentlich die geometrischen, mechanischen Eigenschaften des Objektes durch das Ertasten wahrnimmt.

Wenn im Folgenden von „Arbeit“ oder „Energie“ gesprochen wird, so ist damit rein die mathematisch ermittelte physikalische Größe definiert. Der Umsetzungsmechanismus zur Wahrnehmung der Gestalt ist nicht bekannt, jedoch ist dies die entscheidende wahrgenommene Größe.

Die wahrgenommene Gestalt der Rastscheibe wäre demzufolge proportional zum Energieverlauf über dem Drehwinkel.

5.6 Versuch zur Prüfung der Integralhypothese bei Drehstellern

Diese Versuchsreihe prüft die in den Kapiteln 5.2.2 und 5.4.3 aufgestellten Hypothesen zur Visualisierung.

Am haptischen Simulator für Drehsteller werden dazu zwei Aufgabentypen basierend auf Paarvergleichen durchgeführt. Dies sind ein haptischer Paarvergleich und ein Paarvergleich zwischen der Haptik und grafischen Darstellungen eines Bedienelementes.

5.6.1 Versuchskonzept

Folgende zwei verschiedene Aufgabentypen werden zur Prüfung der Hypothesen verwendet:

Aufgabentyp 1: Haptischer Paarvergleich

Den Versuchspersonen (VPn) werden am Simulator für rotatorische Bedienelemente paarweise haptische Kennlinien vorgestellt. Zwischen den Partnern der Paare kann die Versuchsperson (VP) mittels eines Schalters beliebig umschalten. Aufgabe ist es nun festzustellen, ob die beiden Partner „gleich“ oder „ungleich“ sind.

Hintergrund

Folgende Hypothesen nach Kapitel 5.2.2 stehen mit diesem Test zur Prüfung:

R.2.a Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit

R.2.b Sinus-Dreieck-Amplitude

Da zu diesem Zeitpunkt einerseits die Abhängigkeiten zwischen technischen Parametern und Wahrnehmungsgrößen unbekannt sind und andererseits zunächst schlicht die Frage nach der

Ähnlichkeit von Sinus und Dreieck im Vordergrund steht, wird auf eine Fragestellung mit dem Adjektivpaar *gleich* – *ungleich* zurückgegriffen. Darin sind verschiedene Dimensionen der Wahrnehmung zusammengefasst. Dies führt zwar zu einer geringeren Aussagekraft, jedoch auch zu einer Vereinfachung der gesamten Aufgabe, da keine spezielle Differenzierung innerhalb der Wahrnehmung gemacht werden muss. Für die vorgesehene Hypothesenprüfung ist die Aussagekraft ausreichend.

Durch den Einsatz eines Simulators für alle Kennlinien, können Parameter gezielt beeinflusst werden und Laborbedingungen geboten werden. Weitere Parameter bleiben währenddessen davon weitgehend unverändert. Eine hohe interne Validität des Versuches kann dementsprechend vorausgesetzt werden.

Methodik

Es wird eine abgeänderte Versuchsdurchführung des Ähnlichkeits-Paarvergleichs nach Fechner (vgl. Konstanzmethode, Bortz, 2003) zur Ermittlung von Schwellen angewandt.

Da die physikalischen Parameterwerte bekannt sind, soll nicht die Rangfolge der Objekte bestimmt werden, sondern die Verteilung der Antworthäufigkeiten über den Parametern. Damit wird eine Beziehung zwischen objektiven Größen und subjektiver Wahrnehmung hergestellt.

Aufgrund der in Kapitel 5.2.1 *Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit* dargestellten Erfahrungen werden, bis auf die Paarung *Sinus – Dreieck*, die verschiedenen Kennlinientypen zueinander, als stark unterschiedlich bewertet. Daher werden diese Kombinationen im Versuch gering gehalten. Die Paarungen haben, bzgl. der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie, eine vergleichbare Amplitude. Damit soll ein mögliches Überlappen der Empfindungsverteilungen geprüft werden (vgl. Bortz, 2003, S.167).

Die Paarungen der Sinusform mit der Dreiecksform werden ausführlicher, mit umfangreicheren Amplituden-Variationen, getestet. Damit werden Differenzenschwellen ermittelt. Als Referenzen werden zusätzlich Differenzenschwellen der Sinusform sowie der flachen und der steilen Sägezahnform mit derselben Methode ermittelt.

Die Paarungen zum Vergleich verschiedener Kennlinientypen sind zufällig festgelegt. Es wird jedoch darauf geachtet, dass die Häufigkeit offensichtlich gleicher und unterschiedlicher Kennlinien gleichmäßig verteilt ist.

Zur Ermittlung der Differenzenschwellen wird eine Up-Down Methode (vgl. Levitt, 1971) eingesetzt. Dabei wird die Amplitude des ersten Objektes konstant gehalten, während die

Amplitude des zweiten stufenweise einmal, von unten kommend, darüber hinaus steigt und dann umgekehrt, von oben kommend, nach unten fortgesetzt wird. Durch die Up-Down-Methode wird bei jeder VP das Merkmal doppelt geprüft und Einflüsse, die von den Vorgängerpaaren abhängen, gemittelt.

Auswertung

Die Differenzen der Drehmomentamplituden ΔM_i der Paarungen werden relativ, auf den höheren Amplitudenwert $M_{\max 1,i}$ bezogen, auf der Abszisse als x_i aufgetragen (vgl. Gleichung 18 und Abbildung 25). Eine relative Auftragung ist bezüglich Differenzenschwellen in einem mittleren Reizbereich sinnvoll (Gesetz von Weber). Die entstehende Skala stellt, mit $\Delta M=0$ als Nullpunkt, eine Verhältnisskala dar.

$$x_i = \frac{\Delta M_i}{M_{\max 1}} = \frac{M_{\max 1,i} - M_{\max 2,i}}{M_{\max 1,i}} \quad ; M_{\max 1,i} \geq M_{\max 2,i} \quad \text{Gleichung 18}$$

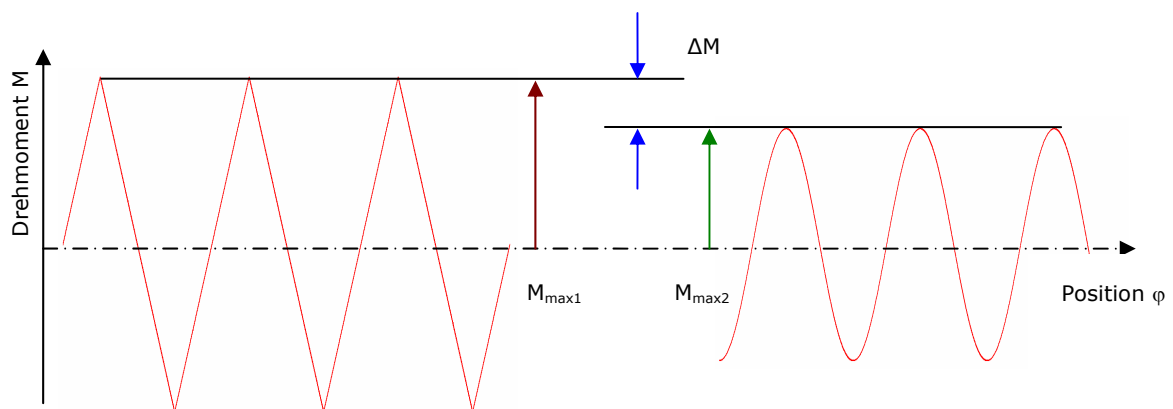


Abbildung 25: Verhältnis der Kennlinienamplituden

Auf der Ordinate werden die zugehörigen relativen Häufigkeiten y_i der „Gleich“-Antworten aufgetragen. Daraus entsteht eine Messpunkt-Verteilung der „Gleich“-Antworten.

Durch diese Messpunkt-Verteilung wird eine Regressionsfunktion als kumulierte Gaußsche Verteilung mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gelegt. Die Darstellung der Messergebnisse ist exemplarisch in Abbildung 26 dargestellt.

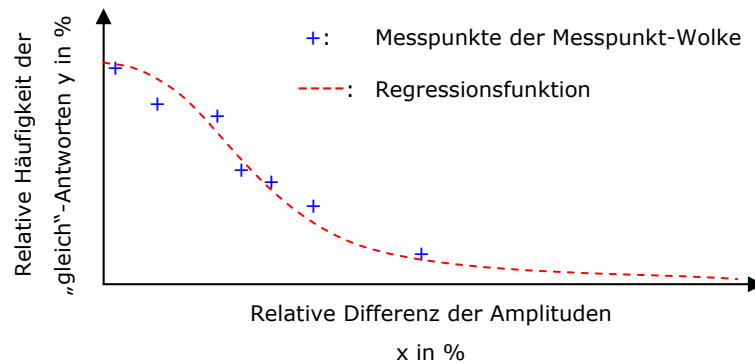


Abbildung 26: Auftragung der Messpunkte und Regressionsfunktion

Der Vergleich der Parameter gleichförmiger Paarungen mit denen der Sinus-Dreieck-Paarungen lässt Rückschlüsse auf deren Ähnlichkeit zu.

Der Mittelwert μ der Regressionsfunktion gibt Auskunft über den $x_{50\%}$ -Wert, der angibt, ab welcher relativen Differenz $\Delta M/M$ das Antwortverhalten der Versuchspersonen halbiert ist.

Ein direkter Vergleich der Kennlinienformen enthält neben der Amplitude weitere Parameter und kann mit dieser Methode nicht ausreichend bewertet werden. Nach den Erwartungen müssten alle eingesetzten Kennlinien, mit Ausnahme von Sinus – Dreieck, als unterschiedlich bewertet werden. Ist dies so, so stützt es die Sinus-Dreieck-Hypothese (Hypothese R.2).

Diese Parametrisierung der Kurvenform wird im anschließenden Versuch (Kapitel 5.7) untersucht.

Aufgabentyp 2: Grafische Zuordnung

Den VPn wird am Simulator für rotatorische Bedienelemente eine definierte haptische Kennlinie vorgestellt. Dabei ist es Aufgabe der VPn den haptischen Eindruck dieses Bedienelementes einer von sechs grafisch dargestellten Kennlinien zuzuordnen. Die Grafiken beinhalten verschiedene Visualisierungen der Kennlinie sowie weitere beliebige. Zudem sollen die Versuchspersonen in der Grafik die Ruhelage des Bedienelementes kennzeichnen.

Hintergrund

Die Hypothesen R.1-R.3, nach Kapitel 5.2, sollen geprüft werden:

- R.1.a Identifikation der Ruhelage,
- R.2.a Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit
- R.3.a Asymmetrie von Kennlinien.

Aufgrund der Vorüberlegungen wird die integrale Darstellung der haptischen Charakteristik im Vorfeld favorisiert und soll der Drehmomentdarstellung gegenübergestellt werden. Eine signifikante Bevorzugung einer der grafischen Darstellungen durch die Versuchspersonen kennzeichnet diese Darstellung als intuitiv im Vergleich zu den angebotenen Darstellungen. Allerdings kann im Versuch nur eine beschränkte Anzahl grafischer Darstellungen zur Auswahl angeboten werden. Zudem kann die Existenz einer besseren, nicht aufgeführten grafischen Darstellung nicht ausgeschlossen werden. Daher werden die übergeordneten Hypothesen versuchsspezifisch eingeschränkt:

R.4. Intuitive haptische Kennlinien:

a. Wird von Probanden eine grafische Visualisierung signifikant bevorzugt ausgewählt, so ist dies die intuitivste Visualisierung der verwendeten Darstellungen.

R.5. Zusammenhänge haptischer und visueller Wahrnehmung:

a. Wird von Probanden eine der grafischen Visualisierungen signifikant bevorzugt ausgewählt, dann existiert eine haptische Vorstellung.

b. Wird von Probanden eine der grafischen Visualisierungen signifikant bevorzugt ausgewählt, dann gibt es eine Übereinstimmung zwischen haptischer und visueller Vorstellung.

Machbarkeit

Die Erfüllung von Hypothese R.5 ist notwendig und vorneweg zu überprüfen. Ist sie nicht erfüllt, so erübrigt sich die Prüfung der anderen Hypothesen.

Zimmer (2001) analysiert gestaltpsychologische Hintergründe der haptischen Wahrnehmung und führt hierbei Beobachtungen und Versuche mit Sehenden und Geburtsblinden in den Raum, die einen engen Zusammenhang zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung aufzeigen: Besonders gut stützen Versuche von Gregory (1970) und Morgan (1977) sowie White (1970) die Machbarkeit eines Haptik-Grafik-Vergleiches. Es finden sich mehrere Arbeiten (Jungnitsch, 1984; Färber, 1980, Witte, 1975; Metzger, 1954; Grunwald, 2001), die sich gezielt mit aktiver Formerkennung bezüglich haptischer und visueller Wahrnehmung auseinandersetzen und auch hier zu sehr guten Übereinstimmungen zwischen Haptik und Optik kommen.

Eine generelle Machbarkeit des Versuchs scheint gegeben. Die Überprüfung der konkreten Aufgabenstellung an einem Bedienelement wird in einem Pilotversuch durchgeführt.

Methodik

Es wird für jede Zuordnungsaufgabe eine Häufigkeitsverteilung über die Auswahl der VPn ermittelt. Dies ergibt zunächst Häufigkeitsverteilungen mit Nominalskala, da eine Reihenfolge nicht explizit, z. B. anhand von Parametern, vorgesehen ist. Anhand der Häufigkeiten der einzelnen Zuordnungen können die Darstellungen, mit z. B. anhand zunehmender Intuitivität, in eine Reihenfolge und damit auf Ordinalskalen-Niveau gebracht werden. Die Hypothese erwartet jedoch eine eindeutige Auswahl eines Kennlinientyps als intuitive Darstellung, wofür eine Nominalskala ausreichend ist.

Auswertung

Angenommen keine der dargestellten Kennlinien ist sonderlich intuitiv, so müsste aufgrund der zufälligen Auswahl eine Gleichverteilung der Häufigkeiten aller Darstellungen zu erwarten sein. Zur Prüfung dieses Kriteriums wird ein χ^2 -Testverfahren auf die Datensätze angewandt. Aufgrund der geringen Erwartungshäufigkeit von unter 5 bei 25 VPn wird der exakte Test gerechnet.

Beide Teilaufgaben, sowohl die Zuordnung einer haptischen Empfindung zu einer grafischen Darstellung, als auch die Zuordnung der Position der Ruhelage, werden nach dieser Methodik geprüft.

Zusammenhänge zwischen Aufgabentypen und Hypothesen

Ausgehend von der Durchführbarkeit der Aufgabe, nach Hypothese R.5, sind in Abbildung 27 die Zusammenhänge zwischen Aufgabentypen und den zu prüfenden Hypothesen dargestellt.

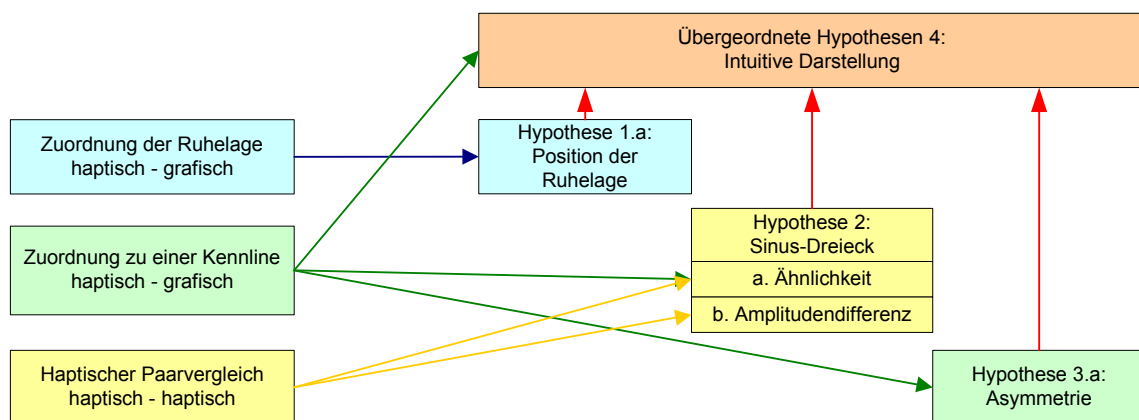


Abbildung 27: Zuordnung zwischen Aufgabentypen und Hypothesen

5.6.2 Versuchsaufbau

Als Versuchsumgebung kommt eine Sitzbox mit einem Simulator für rotatorische Bedienelemente zum Einsatz, deren Aufbau und Auslegung in Anhang D erläutert ist. Die Sitzbox ist mit einem Fahrzeugsitz, einer Mittelkonsole sowie einem Eingabe-Panel ausgerüstet (vgl. Abbildung 28). In der Mittelkonsole ist vertikal von oben bedienbar der Simulator integriert. Diese Ausrichtung ist an der Position zentraler Bedienelemente, wie dem BMW iDrive, dem Audi MMI oder dem Daimler COMAND, orientiert.

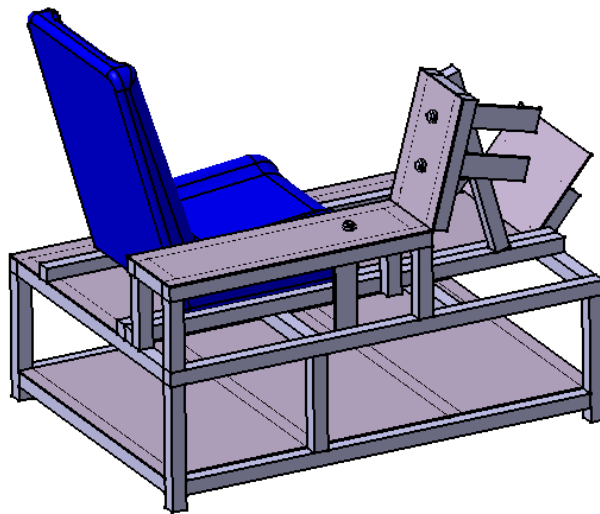


Abbildung 28: Sitzbox mit integriertem rotatorischem Simulator

Alle haptischen Charakteristika werden am selben Simulator dargestellt. Beim Paarvergleich können die Charakteristika mit einem Kippschalter (A-B-Umschalter) beliebig oft gewechselt werden. Beim Haptik-Grafik-Vergleich ist der Schalter deaktiviert.

Eine *Ampel* mit grünem und rotem Signal informiert die VP über den Versuchsstatus. Ein grünes Signal fordert zur Bearbeitung der Aufgabe auf; das rote Signal kennzeichnet einen inaktiven Status mit der Aufforderung die Kappe loszulassen und nicht zu berühren, da währenddessen ein Abgleich des Systems stattfinden kann.

5.6.3 Pilotversuch Vergleichbarkeit der Haptik mit grafischen Darstellungen

Zur Prüfung der Vergleichbarkeit von haptischer und grafischer Darstellung wird ein Pilotversuch gestartet, der zur Prüfung der Hypothese R.5, folgende zwei Fragen beantworten

soll: Ist es möglich, die haptische Empfindung der Rastung eines rotatorischen Drehstellers 1. grafisch selbst darzustellen und 2. diese vorgegebenen grafischen Darstellungen zuzuordnen.

Zu diesem Zweck wird ein reales Bedienelement, das zentrale Bedienelement des Audi A8 MMI, Studenten verschiedener Studienrichtungen vorgestellt. Anhand eines Fragebogens (Anhang E) wurden persönliche Daten abgefragt und anschließend die Aufgaben bearbeitet. Zuerst sollte die VP die empfundene Rastung selbst zeichnerisch darstellen, dann die Haptik des Bedienelementes einer der angebotenen Grafiken zuordnen und dabei auch die Ruhelage des Bedienelementes eintragen. Um eine Prägung der VP zu vermeiden, wurde Teil 2 der Aufgabe mit den graphischen Vorgaben erst nach Beendigung der ersten ausgehändigt.

Die dargebotenen Grafiken wurden idealisiert und vereinfacht dargestellt um Einflüsse durch unterschiedlich ausgeprägte Komplexität zu vermeiden. Die Originalkennlinie kann am ehesten durch als Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie durch Darstellung 4 bzw. als Integraldarstellung durch Darstellung 3 des Fragebogens (Anhang E.2) angenähert werden.

Der Versuch wurde mit 14 Studierenden beider Geschlechter und verschiedener technischer und nichttechnischer Studienrichtungen durchgeführt. Drei von ihnen verfügen über eine haptische Vorprägung. Zu haptischer Vorprägung zählen z. B. auch thematische Gespräche oder der Besuch von Vortragsveranstaltungen mit entsprechendem Inhalt.

Der Versuch zeigt, dass von einer zeichnerischen Darstellung der Haptik durch die VP eher abzusehen ist, da die Darstellungen stark variieren und nur schwer zu interpretieren sind. Eine begleitende Befragung der VP dazu scheint notwendig. Jedoch ist diese Art der Darstellung durchaus gut zur Ein- und Hinführung der VP an die Thematik geeignet, da hier eine aktive Mitwirkung der VP gefordert ist, was eine Steigerung der Motivation bewirken kann und eine konkrete Auseinandersetzung mit intermodalen Zusammenhängen gefordert wird. In Anhang E.3 sind die Ergebnisse des Versuches dargestellt.

Bei der Zuordnung der Grafiken wird häufig die integrale Darstellung gewählt, die Drehmomentdarstellung dagegen kaum. Andere Darstellungen werden jedoch nicht unerheblich oft ausgewählt.

Aufgrund des Pilotcharakters mit der generellen Frage nach der Machbarkeit, wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha=10\%$ zugelassen (Bortz, 2005); weiter gehende statistische Analysen werden nicht durchgeführt. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs und der geringen erwarteten Häufigkeiten wird die exakte Berechnung der asymptotischen Berechnung des χ^2 -Signifikanztests vorgezogen. Es wurden alle VPn mit und ohne haptische Vorkenntnisse

im Test berücksichtigt. Ergebnisse der Gruppe von VPn ohne haptische Vorkenntnisse sind zusätzlich in Anhang E.4 aufgeführt und zeigen eindeutige Tendenzen.

Für die Aufgabe „Zuordnung der Kennlinien“ ergibt sich eine Signifikanz von $p=14,6\%$ und lehnt damit die Alternativhypothese der nicht Gleichverteilung ab. Da das Ergebnis an der Untergrenze des Indifferenzbereichs ($\alpha=10\% < p < 25\%=\beta$) liegt, wird die Hypothese, u. a. auch aufgrund der geringen Anzahl VPn, des einfachen Versuchsaufbaus und einer nicht exakten grafischen Wiedergabe der realen haptischen Kennlinie, dennoch als akzeptabel interpretiert.

Die Aufgabe „Auswahl der Ruhelage“ ergibt eine Signifikanz von $p=3\%$, welche die Hypothese bestätigt, dass eine haptische Empfindung graphisch zugeordnet werden kann.

Die Zuordnung graphischer Kennlinien zu einer vorgegebenen haptischen Charakteristik wird nur in einem Teilversuch nicht eindeutig abgelehnt, im zweiten bestätigt. Daher wird die Aufgabe als machbar eingestuft. Die in Kapitel 5.6.1 aufgeführten Untersuchungen unterstützen diese Entscheidung.

Die Versuchsergebnisse zeigen zudem, dass eine haptische Vorbildung für die Durchführung des Versuches ungeeignet ist, da z. B. die Identifikation der Ruhelage bei VPn ohne Prägung eindeutig „unten“ ausfällt, während haptisch vorgebildete VPn anhand dieses Vorwissens die mittlere Lage auswählen und damit nicht mehr intuitiv handeln. Die Vorbildung scheint bei der Zuordnung zu Grafiken jedoch noch nicht auszureichend ausgeprägt zu sein, um eine der möglichen Kurvenformen eindeutig zu erkennen, vielmehr streut die Auswahl maximal. Eventuell aufgrund einer aus dem Hintergrundwissen bestehenden Verunsicherung, dass es mehrere Visualisierungen gibt. Diese Aussagen sind jedoch sehr schwach und daher statistisch nicht verwertbar, da lediglich drei VPn mit haptischer Vorprägung beteiligt sind. Die eindeutige Abweichung der haptisch vorgeprägten VPn bei der Wahl der Position der Ruhelage wird als ein starker Hinweis auf die schlechte Eignung dieser VPn für die vorgesehenen Versuche sowie dafür, dass eine hohe Teststärke bei der Identifikation der Ruhelage vorliegt, angesehen.

5.6.4 Versuchsdurchführung

Versuchsablauf

Der Ablauf des Hauptversuches besteht aus einer Vorbereitungsphase und drei Teilversuchen (Abbildung 29).

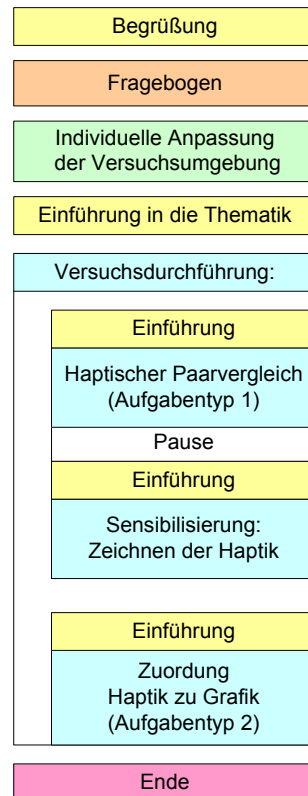


Abbildung 29: Versuchsablauf rotatorische Bedienelemente

Nach einer formlosen Begrüßung wird von der VP ein Fragebogen zur Person ausgefüllt (vgl. Anhang F.2). Die VP wird dann zur Sitzbox geführt und gebeten, den Sitz so einzustellen, dass sie das Versuchsobjekt bequem und gut bedienen kann.

Anhand einer Präsentation werden die VP in die Thematik und den bevorstehenden Versuch eingeführt. Die Einführungspräsentation und das Verhalten der Versuchsleitung sind dabei gezielt darauf abgestimmt, keine Hintergrundinformationen über die Integral-Theorie zu vermitteln, um dadurch eine Prägung der VP und damit verbundenen Versuchsleiterartefakten zu minimieren.

Aufgrund der hohen Versuchsdauer von ca. zwei Stunden bekommen die Probanden zu Trinken sowie eine finanzielle Aufwandsentschädigung. Überdies sind Pausen fest vorgesehen und die VPn werden gebeten Pausenbedarf zu signalisieren, wenn dies notwendig wird. Hintergrund dieser Maßnahmen ist die Schaffung einer entspannten, aber motivierten Atmosphäre und die Vermeidung von Ermüdungseffekten (Bortz, 2003, S.167).

Die Abfolge der Teilversuche ist nach folgenden Kriterien geordnet:

- (1) Nach Prägung und Vorgaben: Die Versuche sollen zu Beginn die geringste, am Ende die am stärksten prägende Wirkung haben. Vor allem muss das Zeichnen der

Kennlinien vor einer ersten grafischen Darstellung erfolgen, ansonsten ist dieser Versuchsteil nicht verwertbar, speziell in Bezug auf eine intuitive Darstellung dieser Kennlinie. Grafische Darstellungen dürfen daher erst nach den entsprechenden Versuchen erscheinen, auch nicht in einer Einführung.

- (2) Nach Schwierigkeitsgrad. Es ist davon auszugehen, dass ein Vergleich innerhalb einer Mode (unimodal) einfacher zu bewerkstelligen ist, als ein Versuch zwischen verschiedenen Moden (intermodal). Um die VP stetig weiterzuführen, muss zunächst der Vergleich haptischer Bedienelemente kommen, erst dann eine Zuordnung zwischen Haptik und Grafik.

Auf Basis dieser Grundüberlegungen und einem „hinführenden“ Ansatz wird die Abfolge der Versuche, wie in Tabelle 3 aufgeführt, festgelegt.

Tabelle 3: Abfolge der Teilversuche

Nr.	Versuch	Modalität	Schwierigkeit
1	Haptischer Paarvergleich	unimodal	einfach
2	Grafische Darstellung der Haptik durch Zeichnen	intermodal	sehr schwer
3	Zuordnung haptischer zu grafischer Kennlinie	intermodal	schwer
4	Zuordnung der Ruhelage in eine Grafik	intermodal	schwer

Der haptische Paarvergleich wird zu Beginn als Einführung in die Thematik verstanden. Die VPn sind nur auf ihren Tastsinn konzentriert und müssen verschiedene Bedienelemente vergleichen. Dabei setzen sie sich intensiv mit der haptischen Wahrnehmung auseinander.

Die zeichnerische Darstellung von haptischen Charakteristika fordert die aktive Auseinandersetzung mit den Modalitäten Haptik und Grafik (optisch), was einen hinführenden Charakter zum folgenden Versuch hat. Eine Auswertung dieser Darstellungen ist, nach Erkenntnissen aus Kapitel 5.6.3, nicht vorgesehen.

Die Zuordnung der haptischen Kennlinien zu grafischen Darstellungen hat einen stark prägenden Charakter, da die VPn nun mit grafischen Vorgaben konfrontiert werden. Zugleich hat diese Aufgabe, aufgrund der Intermodalität, einen höheren Schwierigkeitsgrad.

Die Zuordnung der Ruhelage zu einer Position in einer Kennliniendarstellung, kann zunächst als unimodale Aufgabe gesehen werden, da innerhalb einer grafischen Darstellung grafisch gearbeitet

wird. Sie bekommt allerdings einen intermodalen Kontext: Die VP muss sich mit der Zuordnung der haptischen Ruhelage in einem haptischen Umfeld auseinandersetzen und dabei auf ihre haptische Vorstellung zurückgreifen. Diese Zuordnung muss sie nun auf eine grafische Ruhelage in einem grafischen Umfeld übertragen.

Abfolge Teilversuch 1

Der erste Teilversuch ist der längste und beinhaltet 62 und 79 Paarvergleiche. Es kommen sechs verschiedene Kennlinienformen: Sinusform, Dreieckform, flach ansteigende Sägezahnform, steil ansteigende Sägezahnform, Trapez- oder Rechteckform und eine asymmetrische Sinusform zum Einsatz. Die maximalen Drehmomente variieren zwischen 10 mNm und 40 mNm. Die Grundformen sind in Abbildung 30 dargestellt. Beim Abgleich des Systems werden ca. 4 mNm Reibmoment M_R am Simulator ermittelt (Rudel, 2005; vgl. Kapitel 5.1.2).

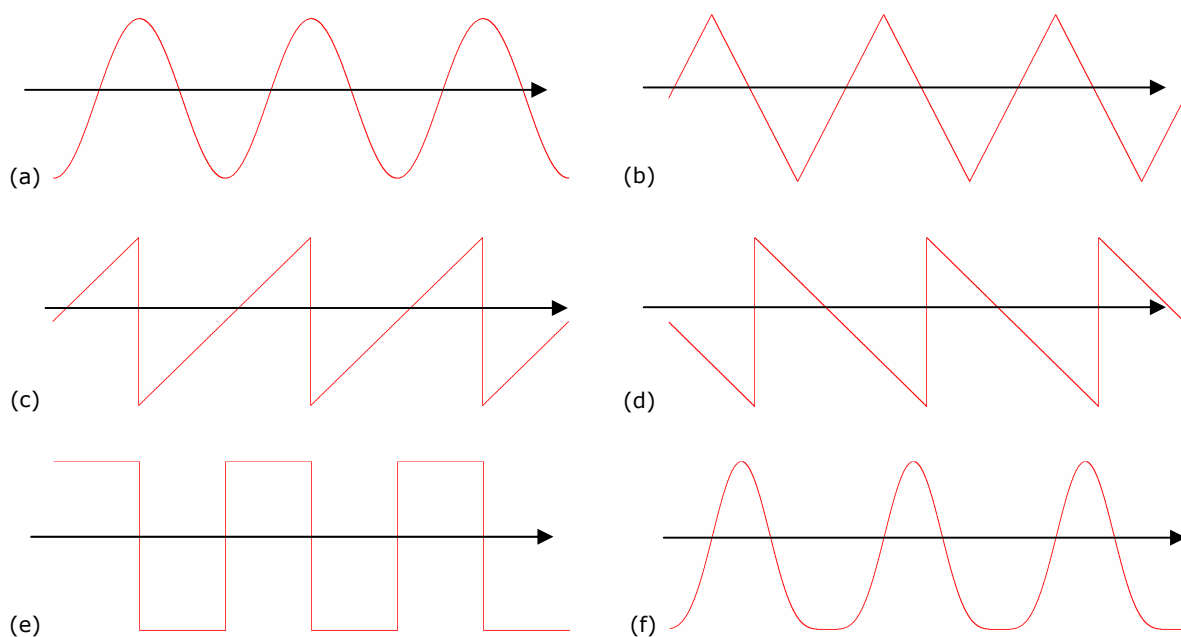


Abbildung 30: Im Versuch eingesetzte Kennlinientypen: (a) Sinusform, (b) Dreiecksform, (c) flach ansteigende Sägezahnform, (d) steil ansteigende Sägezahnform, (e) Trapez-/Rechteckform, (f) asymmetrische Sinusform.

Die VPn müssen gleiche Paarungen identifizieren und diese Wahl per Druck auf die Taste „gleich“ eingeben. Im anderen Fall, wird die Taste „ungleich“ betätigt.

Es werden zwei Abschnitte gestaltet: Im ersten Abschnitt kommen beliebige Kennlinienpaarungen zum Vergleich (27 Vergleiche). Im zweiten Abschnitt wird die Up-Down-Methode zur Bestimmung der Differenzschwelle angewandt (35 Vergleiche). Eine weitere vergleichbare Messreihe ergänzt die entstehende Messpunkt-Wolke um weitere 79 Paarungen. Die Abfolge der Vergleiche sind in Anhang F.3 aufgeführt.

Abfolge Teilversuch 2

Die Zuordnung Haptik-Grafik wird anhand von sechs vorgestellten haptischen Kennlinien, mit je sechs grafischen Zuordnungsmöglichkeiten (vgl. Anhang F.4), durchgeführt.

Anschließend erfolgt die Einordnung der Ruhelage. Der VP wird eine haptische Kennlinie vorgestellt. In einer ebenfalls vorgegebenen grafischen Darstellung, einer sinusförmigen Kennlinie müssen die VP nun, anhand vorgegebener Felder, die Ruhelage selbst eingetragen. Die Sinusform wurde deshalb gewählt, weil sie sämtliche Visualisierungen, Drehmoment und Integral, vereint und damit als neutral einzustufen ist.

Versuchspersonenkollektiv

Es haben 26 Versuchspersonen mit einem Altersdurchschnitt von 27 Jahren bei einer Standardabweichung von 5 Jahren, im Alter von 22 bis 45 Jahren am Versuch teilgenommen. Es waren 8 weibliche und 18 männliche VPn, davon 4 Linkshänder. Die VPn wurden im Hochschulumfeld angeworben.

5.6.5 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Es wird zuerst auf die Versuche von Teilversuch 2, dem Vergleich zwischen Haptik und Grafik, eingegangen.

Das Signifikanzniveau der Versuche wird, wie im Pilotversuch (Kapitel 5.6.3), mit $\alpha=10\%$ festgesetzt. Der Versuch zur Zuordnung der Ruhelage wird aufgrund einer hohen Teststärke hochsignifikant festgesetzt ($\alpha=1\%$).

Die Ergebnis-Daten der Versuche sind in Anhang F.6 aufgeführt.

Zuordnung der Ruhelage

Die Auswahl eins aus zwölf ergibt folgende Verteilungshäufigkeiten (Abbildung 31). Am häufigsten wird die Integraldarstellung (Punkt 9) mit 49% gewählt. Dicht gefolgt von Punkt 6 mit 26%. Die übrigen Punkte werden nur unwesentlich oft ausgewählt, darunter auch die Drehmoment-Darstellung (Punkt 12). Der χ^2 -Test ergibt eindeutig ein Signifikanzniveau von $p=0,0\%$.

Die Auswahl der Integraldarstellung erfolgt eindeutig. Sie stützt die Alternativhypothese R.1.a. Die zweithäufigste Auswahl Punkt 9 ist jedoch unklar, spiegelt er doch den Übergangspunkt der Drehmomentdarstellung wieder. Hierfür gibt es zwei Erklärungen: Erstens, die Darstellung der Ruhelage in der Drehmomentdarstellung ist in der Vorstellung der VPn die Position des

Übergangspunktes, also eine Fehldarstellung unserer theoretischen Überlegungen. Oder Zweitens, Punkt 6 liegt exakt in der Mitte der Auswahl (Vgl. Anhang F.6.1), so dass hier Anzeichen für eine zentrale Tendenz der VPn durch Verunsicherung auftreten kann. Hierauf deutet auch die Streuung um diesen Punkt hin, während Punkt 9 eindeutig und klar ausgewählt worden ist. Eine systematische Abänderung des Versuches könnte hier Abhilfe schaffen, es wird jedoch aufgrund der starken Aussage bezüglich der Integraldarstellung, die Alternativhypothese R.1.a angenommen.

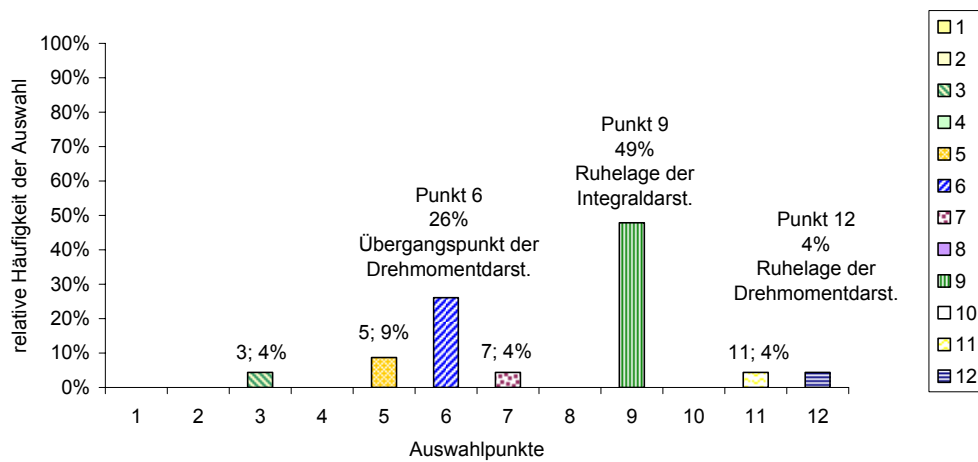


Abbildung 31: Verteilung der Zuordnungspunkte bezüglich der Ruhelage

Zuordnung der Haptik zu einer grafischen Darstellung

Die sechs Teilaufgaben ergeben folgende Signifikanzen in Tabelle 4 nach Anhang F.6.1.

Tabelle 4: Signifikanzwerte der Häufigkeitsverteilungen nach SPSS. Details in Anhang F.6.1.

Kennlinienform	exakte Signifikanz
flache Sägezahnform	0,005
Dreieckform	0,000
Rechteckform	0,050
asymmetrische Sinusform	0,025
Sinusform	0,396
steile Sägezahnform	0,016

Alle Kennlinienformen erfüllen das Signifikanzniveau, mit Ausnahme der Sinusform ($p \sim 40\%$), signifikant. In dem Fall kann nahezu von einer Gleichverteilung der Antworten gesprochen werden.

Im Folgenden werden die Teilergebnisse der Kennlinienformen diskutiert. In den Diagrammen ist jeweils die Integralkennlinie (senkrecht gestreifte Füllung) mit der Kennzeichnung „- I -“ sowie die Drehmomentdarstellung (waagrecht gestreifte Füllung) mit der Kennzeichnung „- M -“ versehen. Stehen weitere Darstellungen einer dieser Darstellung besonders nahe, haben diese eine ähnliche Markierung.

Flacher Sägezahn

In Abbildung 32 ist die Verteilung der Auswahl dargestellt. Es treten vor allem zwei Kennlinien in den Vordergrund: Die Integrale Darstellung hat mit 40% die höchste Auswahlhäufigkeit, während zu 28% die Drehmomentdarstellung gewählt wird. Die Rechteckdarstellung mit 16%, die Sinusform mit 12% sowie der abfallende Sinus (4%) und der steile Sägezahn werden selten oder gar nicht gewählt. Die Rechteckform ist schwer einzuordnen, da sie sowohl eine steil abfallende Flanke, wie die Drehmomentdarstellung, aber auch eine breite Senke, wie die Integraldarstellung hat. Die höchste Häufigkeit behält die Integraldarstellung.

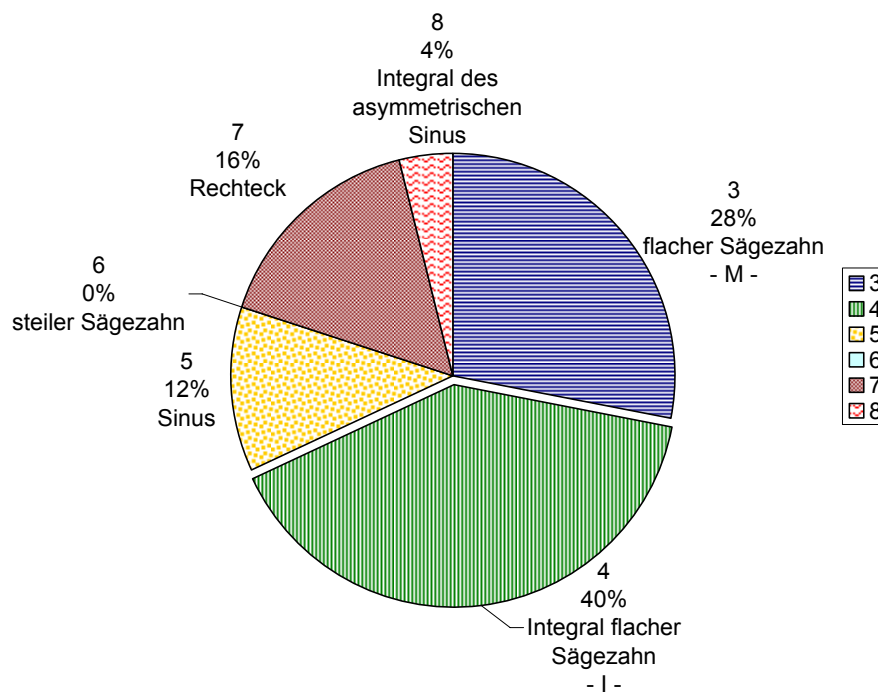


Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „flacher Sägezahn“ ($M_{\max} = 30 \text{ mNm}$; $p=0,5\%$)

Dreieck

Abbildung 33 zeigt die Verteilung. Die eindeutigste Auswahl wird hier für die Integraldarstellung mit 56% getroffen. Interessanter Weise wird die um 90° phasenverschobene Darstellung der sinusförmigen Drehmomentdarstellung nur selten gewählt. Die Drehmomentdarstellung wird nur in der Häufigkeit gewählt, wie die übrigen Kennlinien ausgewählt werden. Ein eindeutiges Ergebnis zugunsten der Integraldarstellung. Das höchste Signifikanzniveau stützt die Auswahl.

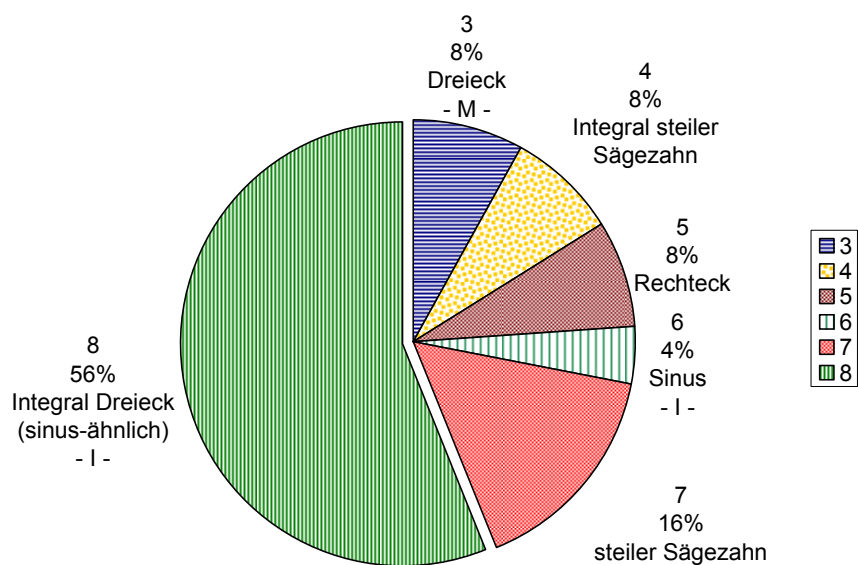


Abbildung 33: 2. Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „Dreieck“ ($M_{\max} = 20 \text{ mNm}$; $p=0,0\%$)

Rechteck

Abbildung 34 zeigt die Verteilung zur Rechteckform.

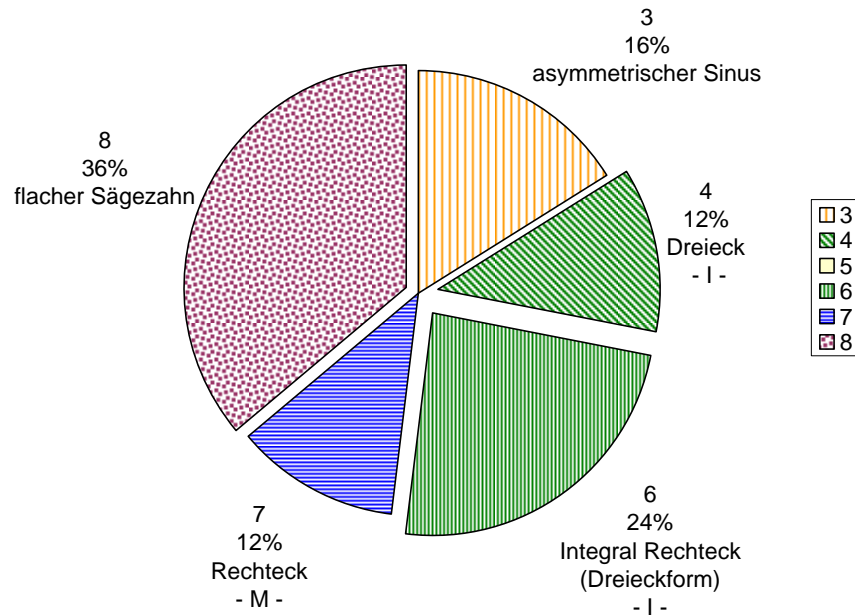


Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „Rechteck“ ($M_{\max} = 30 \text{ mNm}$; $p=5,0\%$)

Diese Verteilung ist etwas gleichmäßiger verteilt und hält das schlechteste Signifikanzniveau der akzeptierten Messreihen ($p=5\%$). Aus diesem Grund wird die Auswahl näher betrachtet um eventuelle typische Ähnlichkeiten zu erkennen.

Die höchste Wertung erhält die Darstellung Sägezahn flach mit 36% gefolgt von der Integraldarstellung (24%). Dahinter kommen der asymmetrischer Sinus (16%), die Rechteckdarstellung sowie die Dreieckform (je 12%), die ähnlich der Integraldarstellung ist. Interessanterweise wurde die Sinusform nicht ausgewählt, was auf die Wahrnehmung einer „Spitze“ schließen lässt und damit ideal runde Formen ausschließt.

Die Dreieckdarstellung könnte nun mit der Integraldarstellung gemeinsam betrachtet werden. Dieser Vorgehensweise sollen jedoch Vergleiche zwischen den zentralen Kennlinien vorgezogen werden: Die Drehmomentdarstellung besteht aus waagerechten und senkrechten Linienelementen, während die Integralform aus diagonal verlaufenden besteht.

Die flache Sägezahnform steigt bei einer Rechtsdrehung ebenfalls diagonal an (vgl. Anhang F.4), verfügt also über nahezu den gesamten Winkel über diagonal ansteigende Elemente. Der Winkelanteil der senkrechten Abschnitte ist naturgemäß sehr gering.

Die asymmetrische Kurvenform verfügt über einen breiten waagerechten Anteil, der durchaus mit dem unteren waagerechten Anteil der Rechteckform vergleichbar ist. Die schmalen sinusförmigen Spitzen können aber auch den schräg ansteigenden Flanken des Dreiecks zugeordnet werden, erscheinen sie doch weniger geschwungen als der reine Sinus. Welche genauen Vorstellungen hinter der Auswahl der VPn stehen, kann letztlich hiermit nicht gesagt werden. Aussagen der VP bezüglich ihrer Wahl sind nicht ausgewertet. Beim direkten Vergleich zwischen den physikalisch begründeten Darstellungen der Rechteckform ist die Integraldarstellung der Drehmomentdarstellung überlegen.

Asymmetrischer Sinus

Abbildung 35 zeigt die Verteilung der asymmetrischen Sinusform.

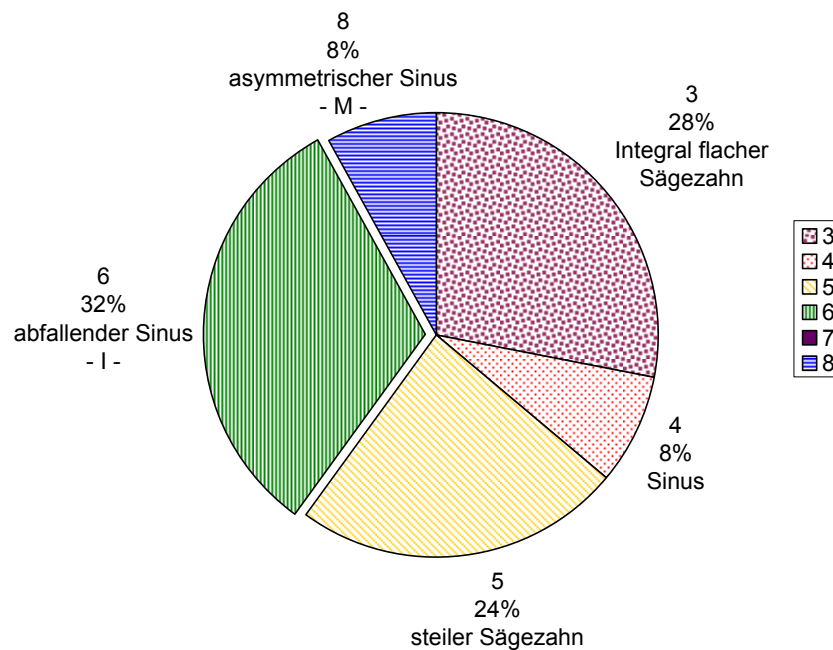


Abbildung 35: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „asymmetrischer Sinus“ ($M_{\max} = 40 \text{ mNm}$; $p=2,5\%$)

Eine besondere Rolle spielt die Zuordnung der asymmetrischen Kennlinie, da durch die abfallende Form der Integraldarstellung diese aus der Menge der anderen hervorsticht. Außerdem unterscheidet sich die in Kapitel 5.2.1 beschriebene einseitige Schwergängigkeit von den übrigen „symmetrischen“ Vergleichsaufgaben grundlegend. Entdecken die VPn diese „Asymmetrie“ in der Wahrnehmung, so sollte es für sie einfacher sein, die abschüssige Kennlinie wahrzunehmen, entdecken sie sie nicht, so wird die Aufgabe sich auf die Bewertung einer reinen Sinusform beschränken.

Die Integraldarstellung hat mit 32% die höchste Häufigkeit, gefolgt vom Integral des flachen Sägezahn (28%), der eine symmetrische Darstellung wiedergibt. Der steile Sägezahn wird zu 24% gewertet. Er kann als „einseitig ansteigend“ bezeichnet werden, was eine Tendenz zur Integraldarstellung bietet. Die Drehmomentdarstellung ist mit der Sinusform (je 4%) und Rechteck (0%) nur gering zu werten.

Unter Einbeziehung der obigen Überlegungen ist auch hier die Integraldarstellung der Drehmomentdarstellung vorzuziehen.

Sinus

Abbildung 36 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Sinusform. Sie wurde aufgrund der schlechten Signifikanz aus der Wertung genommen. Das Hauptproblem scheint das Fehlen einer einzigen, eindeutigen Lösung, bzw. das Vorhandensein mehrerer möglicher Lösungen für die VPn zu sein. Damit verbunden werden zufällig mehrere Lösungen ausgewählt, was zu einer hohen Gleichverteilung führt. Dies scheint dadurch verursacht zu werden, dass die Integral- und die Drehmomentdarstellung nahezu gleich aussehen. Das hohe Drehmoment von 40 mNm kann im Vergleich zur Dreiecksdarstellung mit lediglich 20 mNm einen recht harten Eindruck hinterlassen, weshalb hier evt. gehäuft spitze Kennlinien gewählt worden sind.

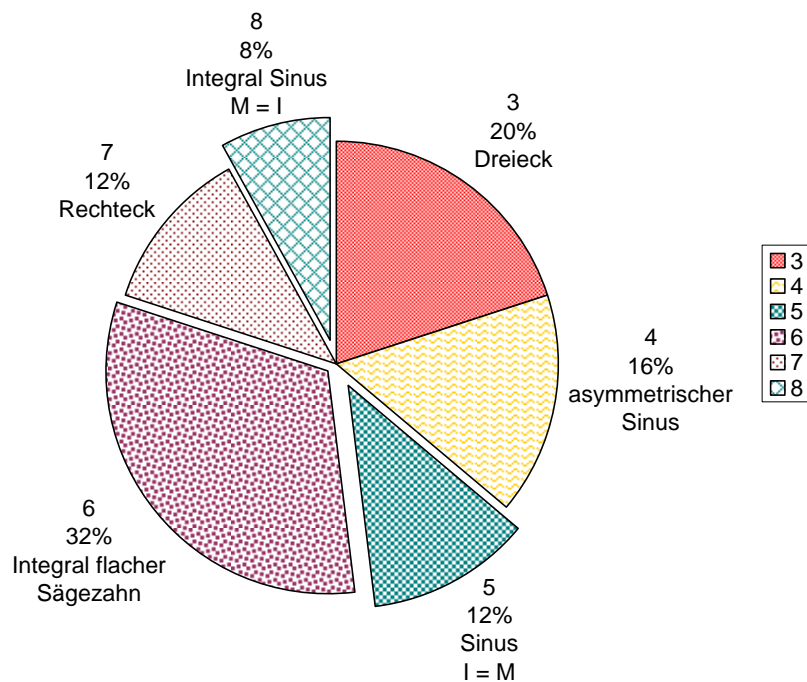


Abbildung 36: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „Sinus“ ($M_{\max} = 40 \text{ mNm}$; $p=39,6\%$)

Steiler Sägezahn

Abbildung 37 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Form steiler Sägezahn. Aus technischen Gründen sind jedoch nur acht Stichprobenwerte vorhanden. Die Signifikanz von $p=1,6\%$ veranlasst dazu, dennoch die Bewertung mit einzubeziehen.

Die Auswahl wird von der Integraldarstellung (62%) dominiert. Die Drehmomentdarstellung wird nicht ausgewählt. Anteile haben das Integral des flachen Sägezahns (25%) und die Dreiecksdarstellung (13%). Nicht gewählt sind eine impulshafte Darstellung sowie eine Sinusform.

Als Spiegelung an der Abszisse ließe sich die Auswahl des Integrals des flachen Sägezahns interpretieren, während der Dreieck wie beim Sinus evt. auf die hohe Amplitude von 40 mNm zurückführen lässt. Eindeutig wird jedoch hier die Integraldarstellung ausgewählt.

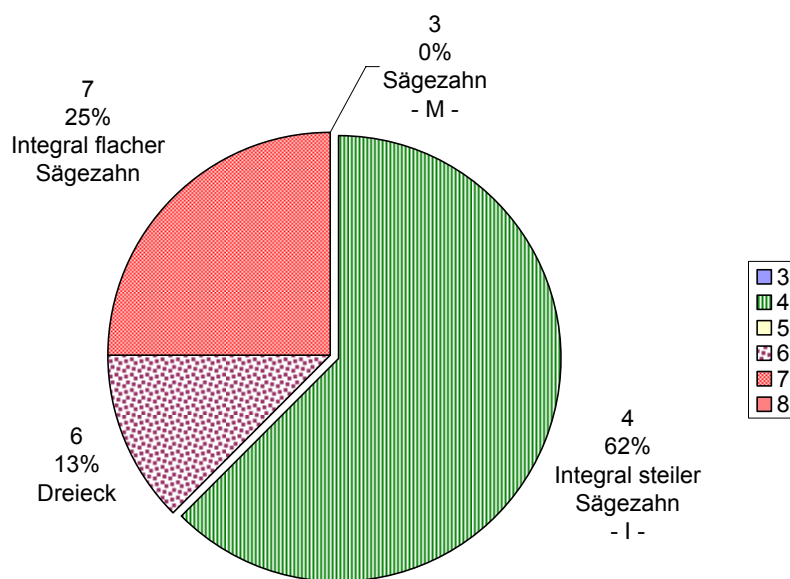


Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „steiler Sägezahn“ ($M_{\max} = 40 \text{ mNm}$; $p=1,6\%$; nur 8 VPn)

Zusammenfassung der Teilergebnisse

Die Betrachtung der Einzelergebnisse zeigt eindeutige Tendenzen, die Integraldarstellung der Drehmomentdarstellung vorzuziehen. In Abbildung 38 sind die aufsummierten Häufigkeiten von Drehmoment-, Integraldarstellungen sowie Darstellungen, die der Integraldarstellung gleichkommen (siehe Test Dreieck- und Rechteckform) und eine zusammengefasste Gruppe mit den übrigen, verschiedenen und uneinheitlichen Kennlinien, aufgetragen. Diese Aufsummierung korrelierter Daten erzeugt das Hervortreten einzelner signifikanter Datensätze gegenüber dem übrigen zufälligen „Rauschen“.

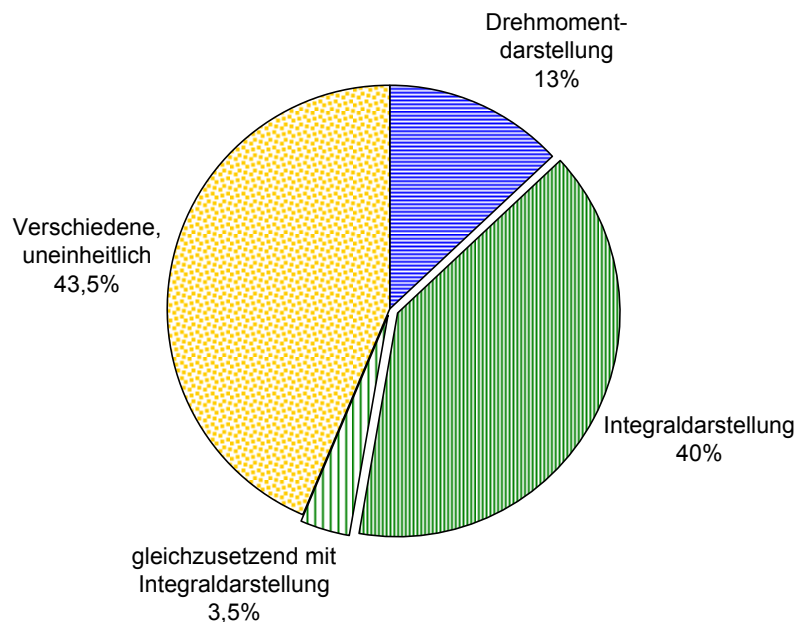


Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung aller Messungen gemeinsam

Die Integraldarstellung stellt einen der großen Blöcke dar. Der zweite große Block mit verschiedenen, uneinheitlichen Kennlinien muss jedoch anteilig betrachtet werden. Er setzt sich nicht aus jeweils einer Gruppe zusammen sondern aus 4-5 Auswahlmöglichkeiten je Test. Dies drückt sich im Mittelwert in Tabelle 5 aus. Hier dominiert die Integraldarstellung klar, während die Drehmomentdarstellung im Rauschen der übrigen zufälligen Antworten untergeht. Anschaulich gestützt wird dies durch Betrachtung der jeweiligen geringsten und der häufigsten Auswahl. Man erkennt, dass die Integraldarstellungen hervorstechen: Sie streifen im Bereich der kleinsten Auswahl den Bereich der größten Auswahl aller übrigen Darstellungen. Damit wird die Auswahl der Integralkennlinie als belegt angesehen. Siehe auch Reisinger et al. (2006).

Tabelle 5: Tabellarischer Vergleich der im Test erbrachten Häufigkeiten

Form	Auswahlsummen	kleinste Auswahl	größte Auswahl	Mittelwert	Standardabweichung
Drehmomentdarstellungen	13,0%	0%	28%	11%	10%
Integraldarstellungen	43,5%	32%	62%	46%	14%
Verschiedene andere	43,5%	0%	36%	14%	15%

Haptischer Paarvergleich

Werden die Messwerte des haptischen Paarvergleichs wie in Kapitel 5.6.1 beschrieben aufgetragen, so erhält man eine Darstellung, wie sie für den Vergleich von sinusförmigen Kennlinien in Abbildung 39 abgebildet ist. Die Regressionsfunktion wird als kumulierte Gaußsche Normalverteilung mittels Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Dabei werden der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ und ein Faktor a als Parameter eingesetzt. Der Faktor a wird als Korrekturwert für die Amplitude der Verteilung eingesetzt. Diese beträgt im Normalfall 100%. In den Versuchen treten jedoch Maximalwerte von 80-90% auf; es kann damit eine bessere Anpassung der Regressionsfunktion erreicht werden. Nach Gleichung 19 wird die Regressionsfunktion berechnet.

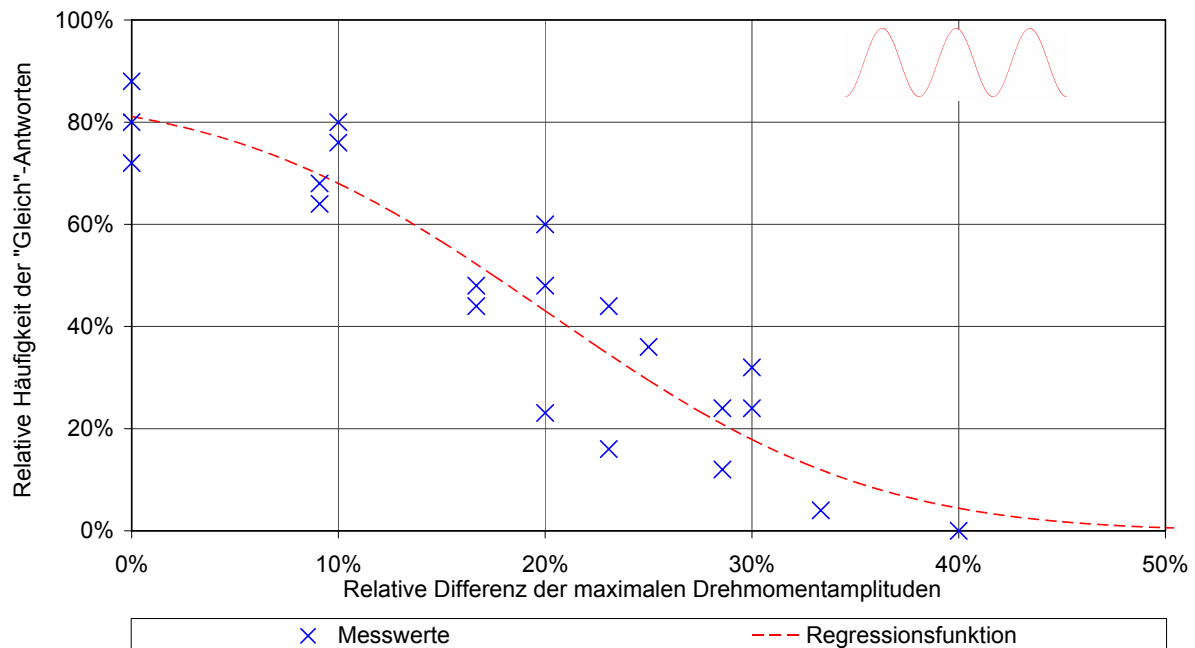


Abbildung 39: Auftragung der Messwerte für die Differenzenschwellen der Sinusform

Die Funktionen Sinus, flacher und steiler Sägezahn zeigen Maximalwerte bei 0% relativer Differenz der Kennlinien. Die übrigen Darstellungen sind in Anhang F.7 zu finden.

$$f(x) = a \cdot \left(1 - \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2} dt \right) \quad \text{Gleichung 19}$$

Der Vergleich zwischen Sinus- und Dreieckform zeigt jedoch ein nach rechts verschobenes Maximum. Dies wäre anhand der Integraldarstellung zu erwarten, da die dreiecksförmige Kennlinie eine höhere Amplitude als die sinusförmige Kennlinie haben muss, um in der Integraldarstellung mit dieser zu einer Übereinstimmung in der dortigen Amplitude zu bekommen. Abbildung 40 zeigt diesen Vergleich. Es wird jedoch eine nicht-kumulierte Gaußsche Normalverteilung als vorläufige Regressionsfunktion, ebenfalls mit einem Faktor a , verwendet, da in diesem Fall das Maximum ermittelt werden soll. Das spiegelt der Mittelwert μ dieser Funktion wieder.

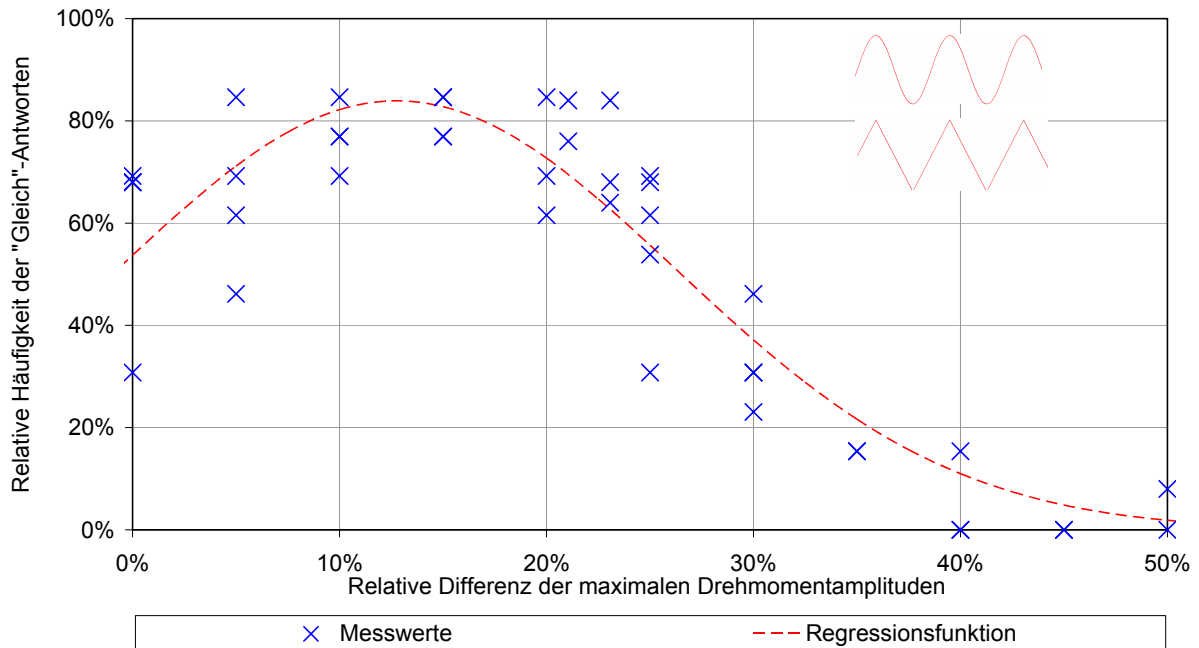


Abbildung 40: Auftragung der Messwerte für die Differenzschwelle zwischen Sinus- und Dreiecksform. Die Verschiebung des Maximum ist klar ersichtlich. Als Regressionsfunktion wird eine Gaußsche Normalverteilung hinzugezogen. Sie dient lediglich der Feststellung des Punktes maximaler Übereinstimmung.

Als Mittelwert der Funktion wird $\mu = 12,8\%$ ermittelt. Eine Verschiebung des Abszissennullpunktes auf das Maximum ermöglicht nun die Ermittlung der kumulierten Normalverteilung und damit einen direkten Parametervergleich (a, μ, σ) mit den Regressionsfunktionen der drei anderen Vergleichsreihen. Zu diesem Zweck werden die Parameter in Tabelle 6 und die Regressionsfunktionen in Abbildung 41 dargestellt.

Tabelle 6: Vergleich der Parameter der Regressionsgeraden

Kennlinienpaar	Amplitude a	Mittelwert μ	Standardabweichung σ	Normierte Fehlersumme
Flacher Sägezahn	0,86	0,25	0,12	0,0192
Sinus	0,85	0,21	0,12	0,0091
Steiler Sägezahn	0,83	0,19	0,10	0,0056
Sinus - Dreieck	0,83	0,16	0,06	0,0052
Arithm. Mittelwert	0,84	0,20	0,10	0,0098
Standardabweichung	0,02	0,04	0,03	0,0065

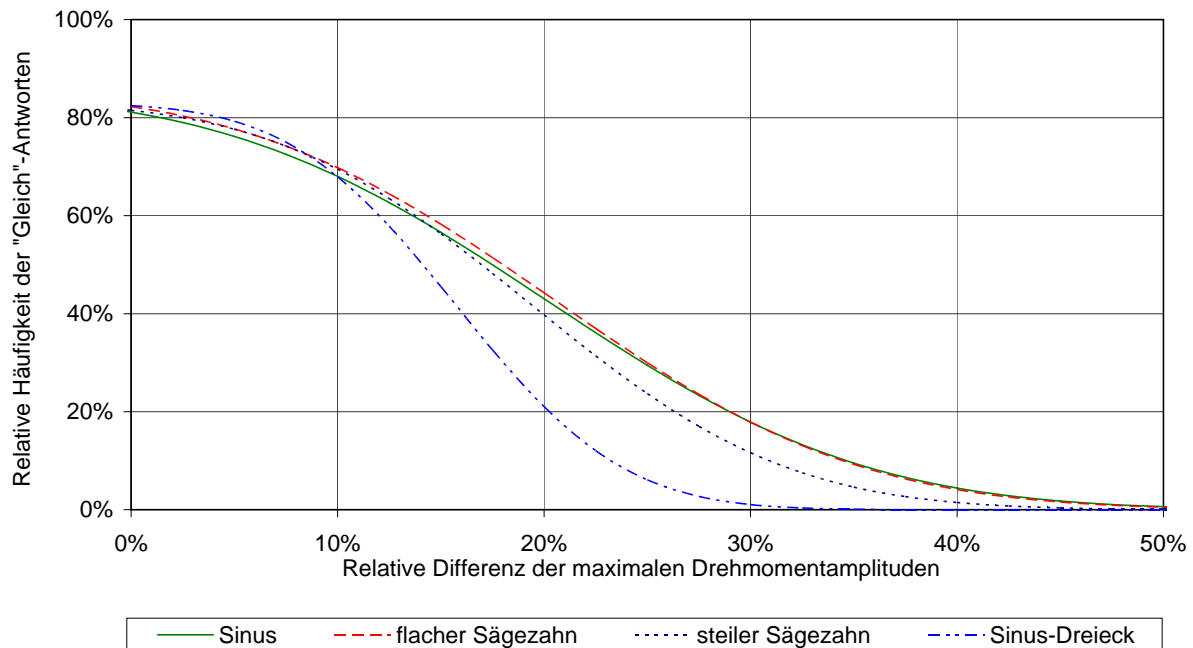


Abbildung 41: Vergleich der Regressionsfunktionen der Differenzenschwellen bei Sinusform, flachem und steilem Sägezahn sowie bei Sinus- und Dreieckform mit korrigierter Abszisse.

Sehr schön zu sehen ist die sehr hohe Übereinstimmung vor allem der drei reinförmigen Kennlinientypen. Dies ist ein Indiz dafür, dass unabhängig von der Kurvenform vergleichbare Differenzenschwellen herrschen. Vor allem aber fällt Parameter a mit einem Mittelwert von 84% bei einer Standardabweichung von 2% auf. Es scheint ein systematischer Fehler von rund 16% bei diesem Versuch vorzuherrschen, der wohl auf eine Unsicherheit der VPn zurückzuführen ist, wenn die Bedienelemente nur schwer differenzierbar sind. Ein Unterschied kann einfach und eindeutig erkannt werden. Ist dies der Fall ist die Antwort klar, weshalb die Regressionsfunktion immer den 0%-Wert erreicht. Sind die Kennlinien jedoch gleich oder sehr ähnlich, wird es schwer eine Entscheidung zu treffen und in 16% der Fälle wird bei Übereinstimmung ein Fehlurteil getroffen.

Dass auch der Sinus-Dreieck-Vergleich einen Faktor a von 83% erreicht, bestätigt Hypothese 2.b der Sinus-Dreieck-Amplitude. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass kein anderer gemischtförmiger Paarvergleich als „gleich“ gewertet worden ist.

Der $x_{50\%}$ -Wert aller Kennlinien entspricht dem Mittelwert μ und liegt bei 20% ($\sigma=4\%$). Dieser Wert ist wesentlich höher, als die in der Literatur aufgeführten Differenzenschwellen der Kraft von 5% bis 10% (Pang et al., 1991). Jandura und Srinivasan (1994) geben als Differenzschwelle

für Drehmomente einen Wert⁵ um 13% im Zweifingerzugriff an. Dies kann man als Hinweis auf eine geringere relative Sensibilität der Drehmomentwahrnehmung im Vergleich zur Kraftwahrnehmung deuten.

Es werden in diesem Fall mehrere Wahrnehmungsgrößen, Kraft und Weg, verarbeitet. Weitere Wahrnehmungsschwellen z. B. der Winkel für Finger- ($2,5^\circ$) und Handgelenk ($2,0^\circ$) (Tan et al., 1994) kommen dazu. Eine Zusammenführung von Weg und Kraft wie es zur Integration notwendig ist, findet auch bei der Beurteilung von Steifigkeiten statt, dort liegen die Differenzschwellen bei 23% (Jones und Hunter, 1990), also in einem vergleichbaren Bereich. Differenzschwellen bei Viskositäten liegen bei 34% (Jones und Hunter, 1993) und berücksichtigen Kraft und Geschwindigkeit. Diese Untersuchungen werden nach Tan et al. (1995) als Beweis dafür gesehen, dass sich die Wahrnehmungsauflösung verschlechtert, sobald Kraft mit Weg, bzw. Geschwindigkeit darin einfließen.

Der Mittelwert des Sinus-Dreieck-Vergleichs liegt mit $\mu = 16\%$ niedriger als der Vergleichswert des Sinus mit $\mu = 21\%$. Man kann daraus schließen, dass eine ansteigende Differenz zwischen Sinus und Dreieck früher erkannt wird, als dies bei einem reinförmigen Sinus-Vergleich der Fall ist. Die Verbesserung der Leistung kann damit zusammenhängen, dass aufgrund der unterschiedlichen Kennlinienform weitere Wahrnehmungsgrößen, z. B. eben die Steifigkeit, eine Differenz signalisieren und damit zu einer insgesamt früheren Unterscheidung der Bedienelemente beitragen. Es besteht demzufolge dennoch eine Differenz, die jedoch eine vergleichsweise geringe Bedeutung hat.

Aufgrund der Streuung der Standardabweichungen σ innerhalb der reinförmigen Vergleiche könnte man schließen, dass diese mit der Position des Maximum und damit eventuell mit den Steigungen der Flanken zusammenhängt: Der steile Sägezahn hat das größte $\sigma = 26\%$ und hat sein Maximum rechts in einer Periode liegen, während beim Sinus das Maximum mittig und σ bei 21% liegt. Der flache Sägezahn hat letztlich sein Maximum links und den kleinsten Wert für σ mit 19%.⁶

⁵ Der Wert wird aus einer Stichprobe mit 3 VP ermittelt, was den Autor dazu veranlasst die Nachkommastellen zu runden.

⁶ Ein Hersteller müsste letztendlich aus ökonomischen Gründen ein möglichst großes σ sowie möglichst ähnliche Kurvenformen anstreben, um eine möglichst geringe haptische Unterscheidbarkeit bei möglichst großen Amplitudentoleranzen seiner Bedienelemente zu erreichen.

5.6.6 Zusammenfassung

Die Betrachtung der Versuchsergebnisse stützt deutlich die aufgestellten Hypothesen:

Die Einordnung der Ruhelage ist hochsignifikant und identifiziert die Ruhelage an der Position wie sie die Integraldarstellung darstellt. *Hypothese R.1 zur Identifikation der Ruhelage* wird demnach angenommen.

Auch bei der Zuordnung der haptisch empfundenen Kennlinie wird signifikant die Integraldarstellung gewählt, während die Häufigkeiten der Drehmomentdarstellung im Rauschen untergehen. Dies bestätigt die *Hypothesen R.2.a zur Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit*, *R.3. zur Asymmetrie von Kennlinien* und direkt die *Hypothese R.4 zur intuitiven Lesbarkeit haptischer Kennlinien* (vgl. Abbildung 27, S.59).

Die Ergebnisse des Paarvergleiches bestätigen ebenfalls *Hypothese R.2.a*, aber zusätzlich auch *Hypothese R.2.b zur Sinus-Dreieck-Amplitude*.

Durch die *Hypothesen R.1-R.3* werden die übergeordneten *Hypothesen R.4* und damit auch *Hypothese R.5* gestützt. Damit sind alle Alternativhypothesen deutlich durch die Versuchsreihe bestätigt:

Die Integraldarstellung stellt eine intuitive Darstellung der Haptik von Drehstellern dar. Dabei wird das idealisierte ertastete Abbild einer Rastscheibe abgebildet, welches auch der menschlichen Vorstellung entspricht.

Weiter ist eine mittlere Differenzschwelle von $x_{50\%} = 20\%$ bezüglich der Amplitude rotatorischer Bedienelemente festgestellt worden. Bei gleichförmigen Kennlinien scheint nahezu kein Einfluss der Kurvenform auf die Differenzschwelle vorzuliegen, während zwischen Sinus- und Dreieckkennlinien ein schärferer Übergang festzustellen ist.

Weitere daraus abgeleitete Maßnahmen zur Vereinfachung von Drehmomentkennlinien werden im folgenden Kapitel am Versuch zur Parametrisierung diskutiert.

5.7 Versuch zur Parametrisierung rotatorischer Bedienelemente

Die vorangegangene Versuchsreihe hat sich mit der intuitiven Darstellung der haptischen Rastung von rotatorischen Bedienelementen befasst und festgestellt, dass der Mensch das Integral des Drehmomentes über dem Drehwinkel als Rastung wahrnimmt und dies deren intuitive haptische Darstellung ist.

Der folgende Versuch befasst sich mit der haptischen Parametrisierung der Rastung. Es wird der Frage nachgegangen, welchen subjektive Wahrnehmungen entsprechende objektive, technisch verwertbare Größen zuzuordnen sind.

5.7.1 Versuchskonzept

Vorgehen

Ausgehend von der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie, die als technische Grundlage dient, werden zunächst relevante technische Parameter sowie Adjektivpaare identifiziert und anhand von Versuchsreihen quantifiziert. Der gesamte Versuch wird mit dem Aufbau aus Kapitel 5.5.2 durchgeführt (vgl. auch Anhänge C und D).

Zur Ermittlung der Adjektivpaare werden Adjektive gesammelt und in einem Pilotversuch mit unipolaren Rating-Skalen bewertet. Die Ermittlung wesentlicher Adjektivpaare und deren Reduktion für den Fragenbogen erfolgt mittels einer Faktorenanalyse.

Im Hauptversuch werden Charakteristika mit variierten Parametern den VPn vorgestellt. Die VPn müssen anhand der bipolaren Rating-Skalen die Charakteristika bewerten. Die Faktorenanalyse wird zur Konsistenzprüfung und Gruppierung hinzugezogen. Darüber hinaus werden für jedes Adjektivpaar die Mittelwerte über den technischen Parameterkombinationen aufgetragen. Daraus können direkte Zusammenhänge zwischen den technischen Parametern und den subjektiven Bewertungen quantitativ gefunden werden.

Statistische Methoden

Prinzip

Für die Untersuchungen werden Rating-Skalen mit mehreren Urteilern verwendet. Die Urteiler (VPn) bewerten verschiedene Urteilsobjekte (hier: haptisch ertastete Kennlinien) anhand verschiedener bipolarer Rating-Skalen (Adjektivpaare), so dass sich jeweils ein Polaritätsprofil, im Sinne eines semantischen Differentials ergibt. Im vorliegenden Fall sind die Unterschiede zwischen den Objekten klar definiert und beruhen auf physikalischen Parametern. Damit ist eine

Zuordnung der subjektiven Wertungen je Adjektivpaar zu entsprechenden technischen Parametersätzen möglich.

Störgrößen, Maßnahmen

Zur Minimierung zentraler Tendenzen werden zu Beginn der Versuchsreihe Extrembeispiele vorgestellt. Die VPn werden entsprechend instruiert. Außerdem werden Adjektivpaare, die als vergleichbar eingestuft werden, umgekehrt gepolt im Fragebogen aufgetragen, sowie eine geradzahlige, sechsstufige Skala verwendet.

Da mehrere Urteiler die Objekte bewerten, werden die Messwerte je Urteiler mittels der z-Transformation normiert, was die Vergleichbarkeit verbessert (Bortz, 2003).

Bipolare Skalen erhöhen die Präzision der Urteile gegenüber unipolaren Skalen (Bortz, 2003, Kaplan, 1972, Trommsdorff, 1975). Die Polung der Skalen spielt nach Kane (1971) für die Ergebnisse keine Rolle, so dass Paarungen diesbezüglich vertauscht werden dürfen.

5.7.2 Identifikation der technischen Parameter

Gegenstand der Untersuchung ist die Rastung eines rotatorischen Bedienelementes. Zur Reduktion des Aufwandes ist es sinnvoll, nur relevante Parameter im Parameterfeld zu variieren. Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung des Rastverhaltens durch symmetrische Drehmoment-Drehwinkel-Darstellung (vgl. Kapitel 5.3). Anhand der Differenzierung nach Kapitel 2.5.4 wird das Parameterfeld weiter beschränkt, indem Reibungseinflüsse und dynamische Effekte konstant gehalten werden.

Ausgangsform für die Parametrisierung

Die in Abbildung 42 dargestellte Rechteckform der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie wird als Ausgangspunkt für die folgenden Überlegungen genommen. Durch Variation der Steigungen der beiden Flanken (Parameter SF und FF), können eckige Kurvenformen wie Sägezahn, Trapez und Dreieck abgeleitet werden. Diese Kennlinienformen variieren auch erfahrungsgemäß sehr stark in ihrer haptischen Charakteristik, weshalb diese Parametrisierung besonders günstig erscheint.

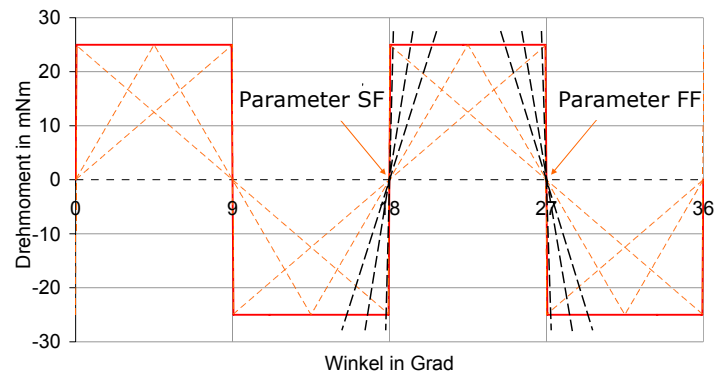
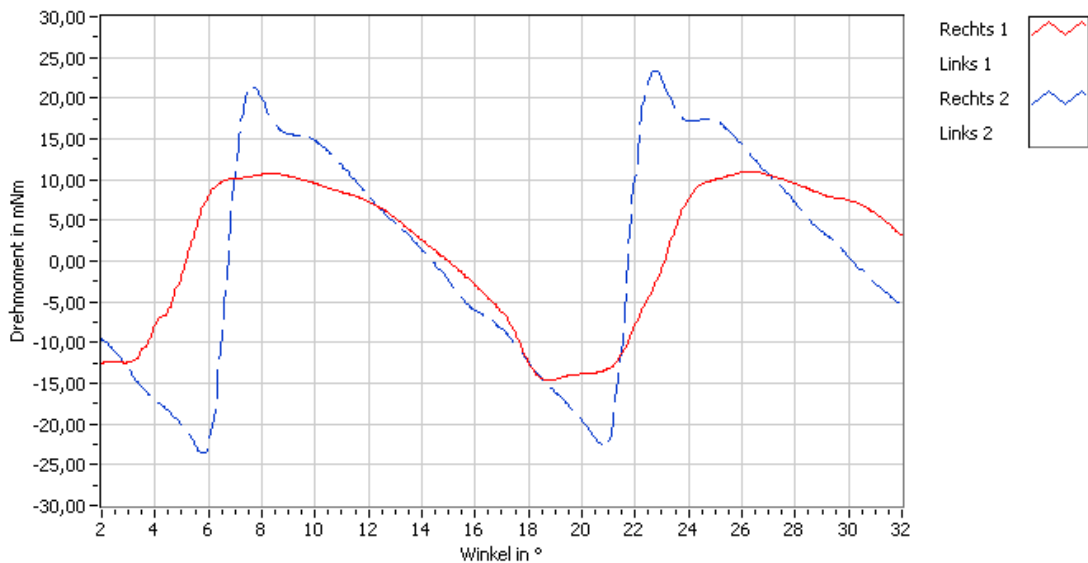


Abbildung 42: Grundlegende Parameter der Drehmomentkennlinie. Parameter SF ist die Steigung der ansteigenden Flanke, Parameter FF ist die Steigung der abfallenden Flanke.

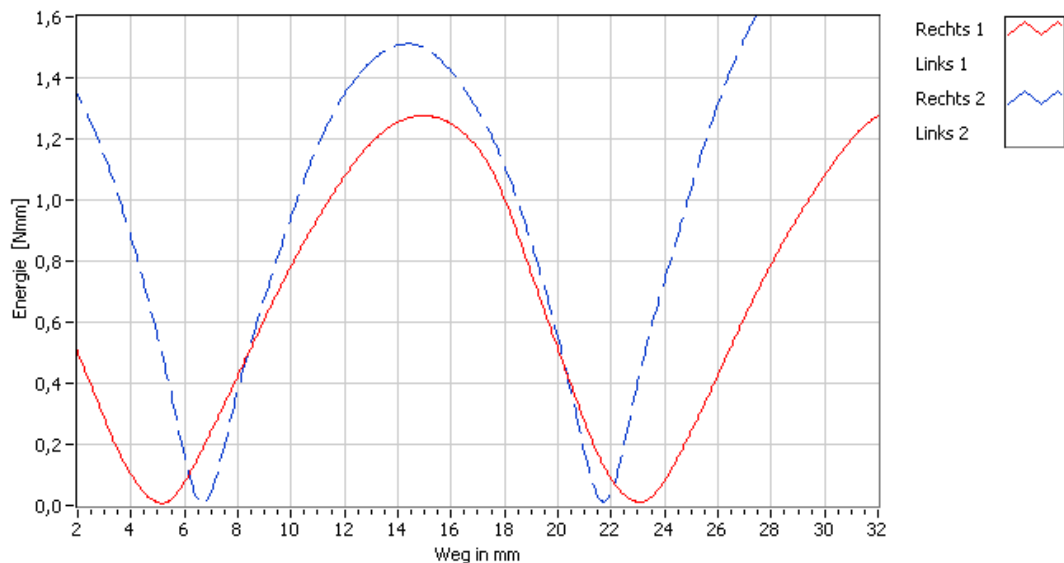
Vereinfachung der Parametrisierung

Bezüglich der Ausbildung von Ecken und Rundungen kann aufgrund der Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit (Kapitel 5.3.2 und 5.6.3) eine weitere maßgebliche Vereinfachung gemacht werden: Demnach ist es von untergeordneter Wichtigkeit, ob ein Bedienelement eine eher *spitze* oder eine eher *runde* Ausformung hat. Vergleichbare Kennlinien müssen in der Integraldarstellung übereinstimmen.

Im Versuch nach Kapitel 5.6.3 wird dies jedoch nicht explizit für Sägezahnformen untersucht. Allerdings zeigen reale Bedienelemente (Abbildung 43) ebenfalls grafische Unterschiede in der Kennlinie. Eine entsprechende haptische Unterscheidbarkeit wird jedoch aufgrund subjektiver Einschätzungen nicht als klar gegeben betrachtet. Aufgrund dieser Annahme wird von einer breiten Anwendbarkeit und Gültigkeit der Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit auch für Sägezahnformen ausgegangen. Dementsprechend wird eine Verrundung von Ecken nicht parametrisiert.

Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf

(a)

Integral-Verlauf

(b)

Abbildung 43: Vergleich zwischen den Messungen (Rechtsdrehung) zwischen dem iDrive des 5er BMW (Rechts 2) und dem MMI des Audi A8 (Rechts 1): (a) Drehmomentdarstellung; (b) Integraldarstellung.

Der BMW ist grafisch eher spitz ausgebildet, während der Audi eher runde Formen hat; die Rastung ist haptisch nicht dementsprechend klar zu unterscheiden. Aufgrund der Übersichtlichkeit sind die Linksdrehungen ausgeblendet. Die eingesetzten Amplitudendifferenzen sind auf unterschiedliche Kappendurchmesser zurückzuführen.

Weitere Parameter

Weitere Kennlinienparameter sind die maximale Amplitude des Drehmoments und die Schrittweite eines Detents. Sie besitzen einen skalierenden Einfluss auf die Parameter der Flankensteigung und beeinflussen die eigentliche Form der Kurve nur sekundär.

Verwendung und Wertebereich der Parameter

Amplitude und Detentwinkel

Die Parameter werden mit einer Amplitude von 25 mNm und wiederum 20 Detents, bzw. 18° pro Detent, festgesetzt und nur die beiden Flankensteigungen unabhängig voneinander variiert. Damit die Parametrisierung der Amplitude nicht unberücksichtigt bleibt, wird anhand einer Parameterkombination zusätzlich die Amplitude um $\pm 25\%$ variiert. Dieser Wert liegt über den in Kapitel 5.6.5 ermittelten Differenzenschwellen für Amplituden von rund 22%.

Flankensteigung

Die Flankensteigung wird als Anteil am Periodenwinkel eines Detent angegeben, nicht als absolute Steigung. Die auf den Periodenwinkel bezogene Größe ist aufgrund des beschränkten Wertebereiches von 0% bis 100% einfacher handhabbar, als Steigungswerte. Die Übertragung der Ergebnisse auf andere Kennlinien vereinfacht sich zudem.

Als Rahmenbedingungen werden folgende Übereinkünfte festgesetzt: Die Summe beider Winkelanteile darf 100% nicht überschreiten, ansonsten verringert sich der Parameter Amplitude, was nicht sinnvoll ist. Für sehr kleine Winkelanteile strebt die Steigung gegen unendlich, weshalb die maximale Steigung der Flanken auf 5% Winkelanteil beschränkt wird. Dies entspricht einer maximalen Steigung von 27,8 mNm/° bei einem absoluten Winkelanteil der Flanke von 0,9°.

Tabelle 7 zeigt die Parameter und deren verwendete Wertebereiche.

Tabelle 7: Verwendete Parameter mit Wertebereich.
*: die Amplitude wird an einer festen Kennlinienform variiert.

Parameter	von	bis
Steigende Flanke (SF)	5%	95%
Fallende Flanke (FF)	5%	95%
Amplitude	25 mNm (konstant); $\pm 25\%^*$	
Schrittweite	18° (konstant)	

Die Parameter der beiden Steigungen werden in den Abstufungen 5%, 25%, 50%, 75% und 95% den Probanden vorgestellt. Beide Parameter werden anhand eines 5 x 5 Schemas gepaart. Dabei werden einzelne Lücken aufgrund des hohen Versuchsaufwandes, zugunsten der Amplitudenvariationen, gelassen.

5.7.3 Pilotversuch zur Ermittlung bipolarer Adjektivpaarungen

Der Pilotversuch soll zur Bestimmung der für den Versuch einzusetzenden bipolaren Adjektivpaare beitragen und eine Orientierungshilfe bieten.

Vorgehen

Es werden verschiedenste Adjektive und Worte gesammelt, die mit der Haptik von Drehstellern in Verbindung gebracht werden können. Anhand von Kriterien, wie offensichtlicher Übereinstimmung mehrerer oder grober Unverständlichkeit, wird die Sammlung vorab aussortiert.

Fragebogen

Die Adjektive sind zur Bewertung für die VP in einem Fragebogen, siehe Anhang G.1 zusammengefasst. Zur Wertung der einzelnen Adjektive wird eine unipolare sechsteilige Rating-Skala mit den Abstufungen: „überhaupt nicht“, „fast nicht“, „eher nicht“, „eher doch“, „sehr“ und „extrem“ herangezogen. Überdies wird die Eignung des jeweiligen Adjektivs von den VPn abgefragt (100% entspricht dem Urteil „*sehr gut*“). Neben den Adjektiven wird das Gesamturteil des vorgestellten Bedienelementes erfragt.

Das Urteil *gut* – *schlecht* wird im Gegensatz zu den übrigen Kriterien stark von einer Erwartungshaltung und Kulturkreis geprägt eingestuft, da in einem anderen Zusammenhang oder Kulturkreis andere Anforderungen zu einem *besseren* Urteil führen können.

Daher sind die Ergebnisse auf den westlichen Kulturkreis bezogen und müssen im automobilen Kontext gesehen werden. Inwieweit Ergebnisse diesbezüglich übertragbar sind, ist nicht geklärt.

Durchführung

Insgesamt müssen je Fragebogen 45 Adjektive bzw. Worte bewertet werden. Die VPn werden außerdem aufgefordert eigene Adjektive zu notieren und in die Bewertung mit einzubeziehen. Von dieser Möglichkeit wurde jedoch kaum Gebrauch gemacht.

Insgesamt werden 13 variierte Kennlinien den sechs Probanden aus dem Hochschulumfeld vorgestellt.

Auswertung und Fragebogenerstellung

Die Daten werden zusammengefasst und mittels der Faktorenanalyse Gruppen mit gleichen und gegensätzlichen Paarungen ermittelt. Es werden verschiedene Adjektivpaarungen innerhalb der

Gruppen ausgewählt, immer mit der Zielsetzung möglichst eindeutige, polarisierende Paarungen zu schaffen.

Bestimmte differenzierende Kriterien bezüglich der Aussagekraft der Adjektivpaare sollen ebenfalls erfüllt werden. Dafür werden Wahrnehmungseigenschaften wie Beweglichkeit, Gefallen, Wertigkeit, Vermittlung von Wohlbefinden oder Präzision sowie kennlinienbezogene Größen wie Ruhelage und Übergangspunkt definiert.

Berücksichtigt werden neben den ermittelten Korrelationskoeffizienten, die Bewertung der Eignung, aber auch die häufige Verwendung der Begrifflichkeiten. Z. B. werden „*schwergängig* und *leichtgängig*“ gegenüber „schwer und leicht“ vorgezogen, obwohl diese die besseren Korrelationskoeffizienten und Eignungsbewertungen haben. Die Komponentenmatrix mit Werten zur Eignung ist in Anhang G.2 zu finden.

Einzelne Adjektive werden aufgrund von Hinweisen der VPn oder gegenseitigen Anpassung leicht abgeändert, wie z. B. „*rund* und *spitz*“. Die Paarung „*weit* und *eng geführt*“ wird zusätzlich aufgrund deren spezifischen Aussagekraft bezüglich der Ruhelage hinzugezogen. Außerdem wird die Paarung „klar – unklar“ mit den Adjektiven „*eindeutig* und *verschwommen*“ ergänzt. Es soll die VP bei der Einordnung der Bedeutung unterstützen.

Tabelle 8 zeigt die ermittelten bipolaren Adjektivpaare und die jeweilige erwartete Aussagekraft. Der fertige Fragebogen ist in Anhang G.3 abgebildet.

Tabelle 8: Ermittelte bipolare Adjektivpaare mit erwarteter Aussagekraft

Bipolares Adjektivpaar		Erwartete Aussagekraft
1	weich – hart	Beweglichkeit
2	schwergängig – leichtgängig	Beweglichkeit
3	widerspenstig – willig	Beweglichkeit
4	minderwertig – hochwertig	Gefallen/Wertigkeit
5	angenehm – unangenehm	Gefallen/Wohlbefinden
6	eindeutig / klar – verschwommen / unklar	Präzision
7	schwammig – präzise	Präzision
8	rund – spitz	Übergangspunkt
9	eng geführt – weit	Ruhelage, Spiel

5.7.4 Versuchsablauf

Die beiden Flanken-Parameter werden in jeweils fünfstufigen Variationen miteinander kombiniert. Dies ergibt mit den Rahmenbedingungen aus Kapitel 5.7.2 eine gültige Halbmatrix der in Tabelle 9 gezeigten Form. Die zweite Halbmatrix stellt den nicht erlaubten Bereich dar (Summe der Winkelanteile >100%).

Tabelle 9: Halbmatrix der zu bewertenden Parameterkombinationen.
Die Zahlen in den Feldern stellen die Abfolge der Kombinationen im Versuch dar.
*: Variation der Amplitude 8→75%; 9→100%; 10→125%

Abfolge der Kennlinien bezüglich der Parameterposition			Parameter B				
			fallende Flanke (FF)		steil		
Steigung	Winkelanteil	flach		steil			
		95%	75%	50%	25%	5%	
Parameter A	steil	5%	13	11	7		3
		25%		8, 9, 10*		12	4
		50%			1		14
		75%				2	6
steigende Flanke (SF)	flach	95%					5

Abfolge der Kennlinien

Die freien Felder sind Lücken zur Reduktion des Aufwandes, während die Zahlen in den Zellen die Abfolge der Parameter-Kombinationen im Versuch beschreiben. Die Lückenwerte werden durch Mittelwerte aus den direkt benachbarten Feldern ermittelt. Frei gelassene Lücken stören die Betrachtung der Diagramme stärker als der zu erwartende Fehler durch interpolierte Werte. Dies muss jedoch bei der Auswertung gesondert berücksichtigt werden.

Die Abfolge der Kennlinien wird aus technischen Gründen nicht permutiert, so dass mit von der Versuchsreihenfolge der Objekte abhängigen Urteilsverzerrungen gerechnet werden muss (Primacy-Recency-Effekt, Bortz, 2003, S.183). Diese Unschärfe wird jedoch aufgrund des Pilotcharakters der gesamten Untersuchung in Kauf genommen.

Versuchspersonen

Es haben 30 Versuchspersonen aus dem Hochschulumfeld teilgenommen, davon zur Hälfte Frauen und Männer im Alter von 18 bis 68 Jahren. Die Gruppe hat einen Altersdurchschnitt von 37,5 Jahren bei einer Streuung von 15,9 Jahren. Die Versuchsdauer beträgt jeweils etwa eine Stunde.

5.7.5 Versuchsergebnisse

Die Faktorenanalyse ermittelt zunächst Zusammenhänge zwischen den Paaren als Faktoren oder Gruppierungen. Um konkrete Aussagen über die Zusammenhänge zwischen technischen Parametern und Wahrnehmungseigenschaften zu erhalten, werden diese die Zusammenhänge für jede Paarung separat analysiert.

Faktorenanalyse: Gruppenbildung und Zusammenhänge

Zusätzlich zu den Aussagen der Urteiler anhand der Adjektivpaare, werden die Werte der technischen Parameter in die Analyse mit einbezogen. Die Resultate der Analyse sind in Abbildung 44 als rotiertes Komponentendiagramm dargestellt. Die zugehörige Korrelationsmatrix findet sich in Anhang H.

Gruppen- und Faktorenbildung

Die Faktorenanalyse ergibt zwei unabhängige Faktoren mit jeweils eindeutigen Paargruppierungen. Zwei weitere Paargruppierungen zeigen Abhängigkeiten von diesen Faktoren.

Der erste *Faktor (F1)* beschreibt mit den Paarungen *weich – hart* und *leichtgängig – schwergängig* die *Beweglichkeit* und die *Härte* des Bedienelementes. Der technische Parameter Amplitude korreliert ausschließlich mit diesem Faktor. Der Wert ist als unscharf zu betrachten, da wenige Variationen durchgeführt worden sind. Steigende Flanke SF und fallende Flanke FF korrelieren leicht mit diesem Faktor (zirka 1/3), zeigen also auch eine gewisse Abhängigkeit.

Der zweite *Faktor (F2)* beschreibt die *Wertigkeit (hoch- und minderwertig)*, das *Gefallen (sehr gut – sehr schlecht)* und das *Wohlbefinden (angenehm – unangenehm)*. Hohe Abhängigkeiten zeigen die technischen Parameter SF und FF, was auf einen starken Einfluss der Parameter hinweist. Die Amplitude zeigt keine Abhängigkeit. Dies kann auch daran liegen, dass keine Variation der Amplitude in Kombination mit den Flanken, durchgeführt worden ist, und den Flanken eine hohe Abhängigkeit mit dem Faktor zuzuschreiben ist.

Die erste *abhängige Gruppierung (A1)* beschreibt *Präzision, Klarheit und Spiel*. Bezüglich der Faktoren können die Adjektive *präzise, eindeutig/klar* und *eng geführt* den Einflüssen der Adjektive *angenehm, hochwertig, sehr gut* (F1) sowie *schwergängig* und *hart* (F2) zugeordnet werden. Der Parameter SF (flach – steil) liegt im selben Quadranten und hat dementsprechend gleichsinnige Abhängigkeiten. Aus dieser Gemeinsamkeit wird eine Zusammengehörigkeit zwischen A1 und der Ruhelage, in der SF liegt, zugesprochen.

Zur zweiten *abhängigen Gruppe (A2)* gehört, neben der *Gutmütigkeit* des Bedienelementes durch die Paarung *widerspenstig – willig*, die dem Übergangspunkt zugeordnete Paarung *spitz – rund*. Die Adjektive *willig* und *rund* hängen wie A1 ebenfalls von F1 *hochwertig, angenehm* und *sehr gut* ab; dagegen bezüglich F2 aber von *leichtgängig* und *weich* ab. Der Parameter FF (steil – flach) liegt auch im selben Quadranten, weshalb wie oben eine Zuordnung von *Übergang und Gutmütigkeit* gemacht wird.

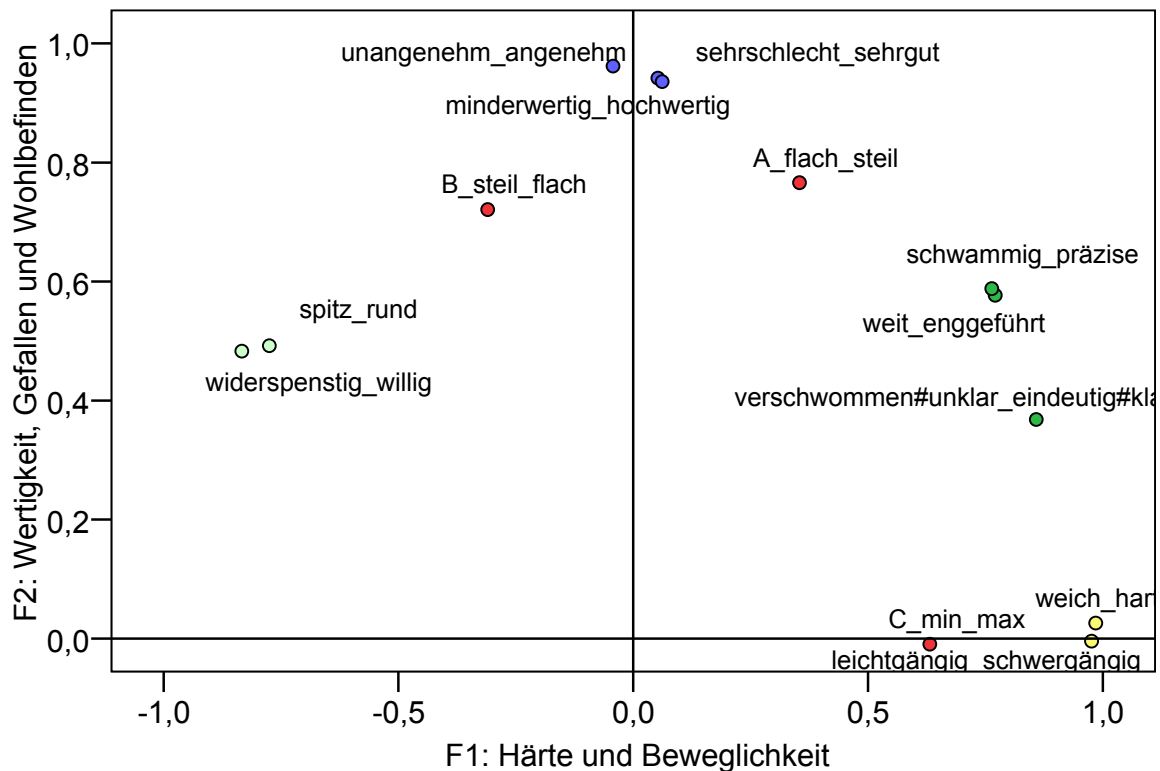


Abbildung 44: Komponentendiagramm im rotierten Raum. Die Paarungen sind so gepolt, dass keine gegenüberliegende Paare entstehen. Alle Werte versammeln sich nahezu vollständig in der oberen Halbebene. Die Polarisierung kann aus der Reihenfolge der Adjektive gelesen werden. Die technischen Parameter sind mit A: steigende Flanke, B: fallende Flanke und C: Amplitude gekennzeichnet.

Abhängigkeiten der technischen Parameter

Die technischen Parameter SF und FF liegen nahe dem Faktor F2. D.h. sie sind ausschlaggebend für das Gefallen des Bedienelementes mitverantwortlich. Ein leichter Einfluss auf F1 (*Härte, Beweglichkeit*) liegt vor.

Überblick

Generell muss von einer Wirkungsrichtung ausgehend von den technischen Parametern hin zu den subjektiven Eindrücken ausgegangen werden. D.h. die Veränderung eines Parameters bewirkt, eine Änderung des Eindrucks des Bedienelementes, sofern eine Abhängigkeit besteht.

Die Analyse zeigt, die Unabhängigkeit der beiden faktoriellen Wahrnehmungen voneinander und eine Abhängigkeit beider Größen von den Flanken als technische Parameter.

Gegenseitige Abhängigkeiten der subjektiven Eindrücke runden dies ab: D.h. ein Bedienelement muss, um *präzise* zu sein, *hochwertig* und *härter* eingestuft werden.

In Tabelle 10 sind die Adjektivpaarungen, sortiert nach den identifizierten Gruppierungen, sowohl Faktoren als auch abhängige Gruppen, dargestellt. Aufgeführt sind die jeweiligen Pole der Paarungen, d. h. die zusammengehörigen und gegensätzlichen Adjektive. Die Pole der technischen Parameter sind separat aufgeführt.

Zur Beeinflussung eines der Adjektiv-Pole in dessen Wirkung, kann einer der aufgeführten technischen Parameter verwendet werden. Z. B. Der Pol „hart“ kann durch die Flanken FF oder SF (steil) sowie die Amplitude (groß) beeinflusst werden. Der Gegenpol verhält sich gegenläufig.

Tabelle 10: Abhängigkeiten der Paarungen, Gruppierungen und technischen Parameter.
Erläuterungen siehe Text.

*: Die Aussagen zum Einfluss der Amplitude ist nur beschränkt verwertbar, da der Versuchsumfang nur gering angelegt ist.

**: Nur geringe Abhängigkeit der Flanken erkennbar. Korrelationskoeffizienten bei 1/3.

Faktor, Gruppierung; Zuordnung	Adjektive		Technische Parameter		Faktorielle Abhängig- keiten
	Pol	Gegenpol	Pol	Gegenpol	
F1: Härte und Beweglichkeit	hart, schwergängig	weich, leichtgängig	Amplitude groß* SF steil** FF steil**	Amplitude klein* SF flach** FF flach**	F1
F2: Wertigkeit, Gefallen und Wohlbefinden	hochwertig, sehr gut, angenehm	minderwertig , sehr schlecht, unangenehm	SF: steil FF: flach Amplitude unbek.*	SF flach FF steil Amplitude unbek.*	F2
A1: Präzision und Klarheit; Ruhelage	präzise, eng geführt, eindeutig/ klar	schwammig, weit, verschwom- men/ unklar	SF: steil	SF: flach	F1: Pol stark F2: Pol mittig
A2: Gutmütigkeit und Übergang; Übergangs- punkt	rund, willig	spitz, widerspenstig	FF:steil	FF: flach	F1: Gegenpol stark F2: Pol mittig

Abhängigkeit der Wertungen von technischen Parametern

Erste Aussagen bezüglich der Zusammenhänge zwischen Parametern und subjektiven Größen können bereits gemacht werden. Um jedoch konkrete quantitative Aussagen treffen zu können, werden im Folgenden die einzelnen Bewertungen über dem Parameterfeld aufgetragen und diskutiert.

Die Mittelwerte der Adjektivpaare sind normiert und werden anhand einer festen Skala von $\pm 120\%$ auf der Ordinate aufgetragen. Das erst genannte Adjektiv erhält den positiven, das zweit genannte den negative Skalenabschnitt. Um eine bessere Darstellung zu gewährleisten wird z. T.

die Ordinate invertiert, was einem Seitentausch der Adjektivpartner entspricht. Damit können Zusammenhänge zwischen den Bewertungen graphisch besser erkannt werden.

Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Bezeichnungen und die Koordinaten der Flanken folgendermaßen abgekürzt: steigende Flanke: SF; fallende Flanke: FF; Punkt der Parameterebene nach Tabelle 9: (S: x%, F: y%), mit S für steigende und F für fallende Flanke.

Paarung weich – hart

Die Ergebnisdarstellung der Paarung *weich – hart* ist in Abbildung 45 dargestellt. Sie ist ursprünglich der Gruppe Beweglichkeit zugeordnet.

Auffällig ist die maximale *Härte* in Punkt 3 (S: 5%, F: 5%). Hier sind beide Flanken maximal steil. Diese *Härte* nimmt von dort ausgehend in beide Richtungen ab. Besonders die SF wird sehr schnell *weicher*. Punkte maximaler *Weichheit* sind die extrem flachen Flanken (S: 5%, F: 95%) und (S: 95%, F: 5%).

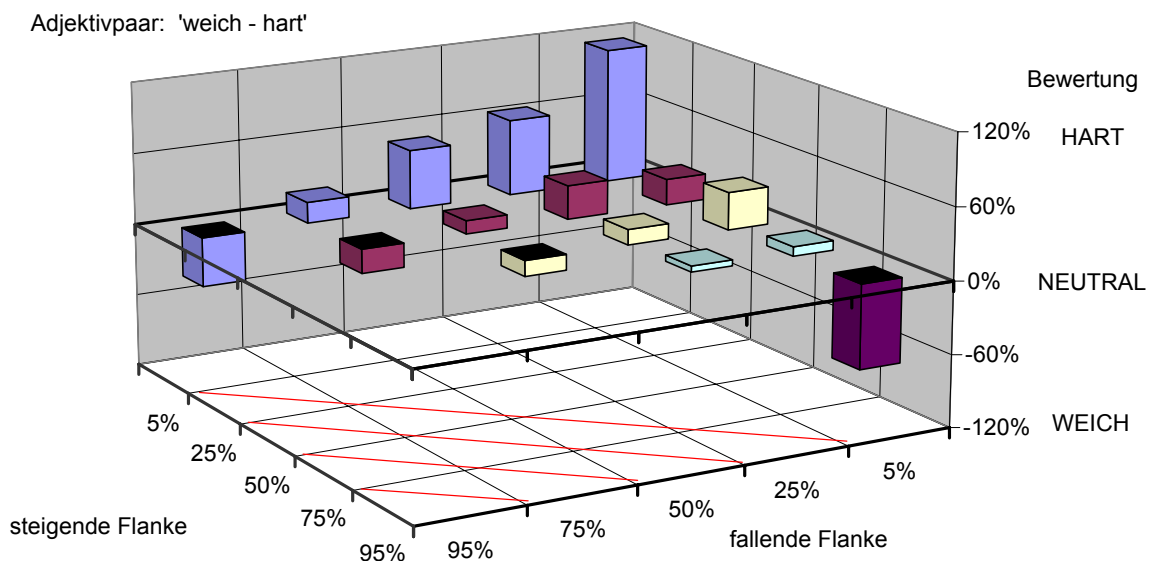


Abbildung 45: Adjektivpaar: weich-hart. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Die Lücken verursachen in dieser Darstellung keine Interpretationsprobleme. Dagegen bricht Punkt 4 (S: 25%, F: 5%) relativ stark ein. Dies könnte an der Versuchsabfolge liegen, da zuvor die *härteste* Kennlinie, Punkt 3 (S: 5%, F: 5%) kommt, während der Punkt (S: 50%, F: 5%) auf eine sehr *weich* bewertete Kennlinie (S: 5%, F: 95%) folgt.

Bei einer Erhöhung der Amplitude nimmt der *Härteeindruck* erwartungsgemäß zu.

Allgemein, kann jedoch von einem stärker abnehmenden Effekt bei der flacher werdender SF gesprochen werden. Eine flacher werdende FF fällt gleichmäßig, nahezu linear und etwas langsamer ab und kann die Eigenschaft dementsprechend feinfühlicher variieren.

Der Eindruck der *Härte* eines Bedienelementes kann demzufolge durch eine größere Steilheit der Flanken erhöht werden. Eine etwas flachere SF hat einen stärkeren Einfluss auf diese Dimension, während eine flacher gestaltete FF diese feinfühlig verringert.

Die hohe, aber gleichförmige Streuung der Werte ($\sigma=60\%$) deutet auf eine sehr aussagekräftige Adjektivpaarung hin. Die Qualitätsurteile für die Adjektive aus dem Pilotversuch bestätigen dies (100%).

Paarung schwergängig – leichtgängig

Das Ergebnis der Paarung *schwergängig – leichtgängig* ist in Abbildung 46 dargestellt. Sie ist von der Bedeutung her der Gruppe Beweglichkeit zugeordnet. Die Ordinate ist invertiert.

Der hohe Verwandtschaftsgrad mit der Paarung *weich-hart* ist gut ersichtlich. Es treten *sehr gut* vergleichbare Ergebnisse, wie auch Problemstellen auf. Auch hier ist eine Zunahme des *Härteeindrucks* durch eine Erhöhung der Amplitude eindeutig zu erkennen.

Die geringere Streuung der Werte ($\sigma=47\%$) deutet auf eine geringere Aussagekraft dieser Adjektivpaarung hin. Die Tendenz zur Mitte ist hier im direkten Vergleich stärker vorhanden, was auf eine größere Unsicherheit bei der Verwendung dieser Paarung hinweist. Dies deckt sich auch mit den Qualitätsurteilen für die Adjektive aus dem Pilotversuch (*schwergängig* 83%; *leichtgängig* 92%). Die Zuordnung zur selben Gruppe ist daher als richtig zu bewerten. Die Paarung *weich – hart* ist jedoch für Bewertungen durch VPn zu bevorzugen.

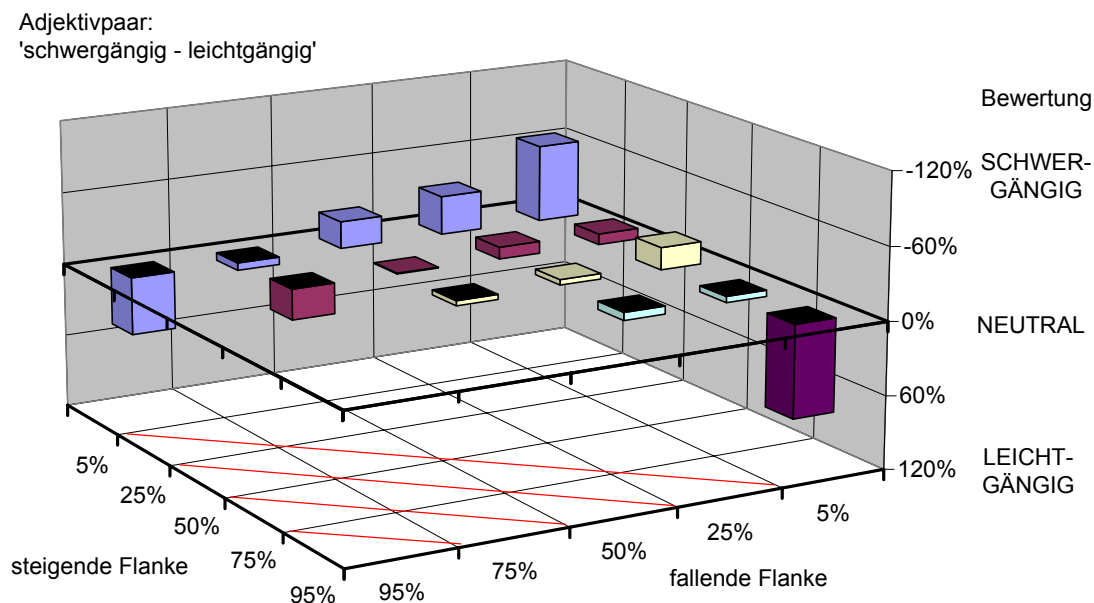


Abbildung 46: Adjektivpaar: schwergängig – leichtgängig. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Paarung widerspenstig – willig

Die Ergebnisdarstellung der Paarung *widerspenstig – willig* ist in Abbildung 47 dargestellt. Sie ist von der Bedeutung her ebenfalls der Gruppe Beweglichkeit zugeordnet. Die Faktorenanalyse deutet auf einen Zusammenhang mit der Paarung *rund – spitz* hin. Die Ordinate ist invertiert.

Die Aussagekraft dieses Diagramms ist wesentlich schlechter. Dies spiegelt sich sowohl in der Standardabweichung der Mittelwerte ($\sigma=36\%$), als auch in den Qualitätsurteilen des Pilotversuchs (*widerspenstig* 58%, *willig* 25%) wieder. Eine starke Tendenz zur Mitte ist hier ersichtlich.

Dennoch kann ein Zusammenhang mit den vorigen Paarungen erkannt werden. Nähere Betrachtungen werden jedoch nicht gemacht.

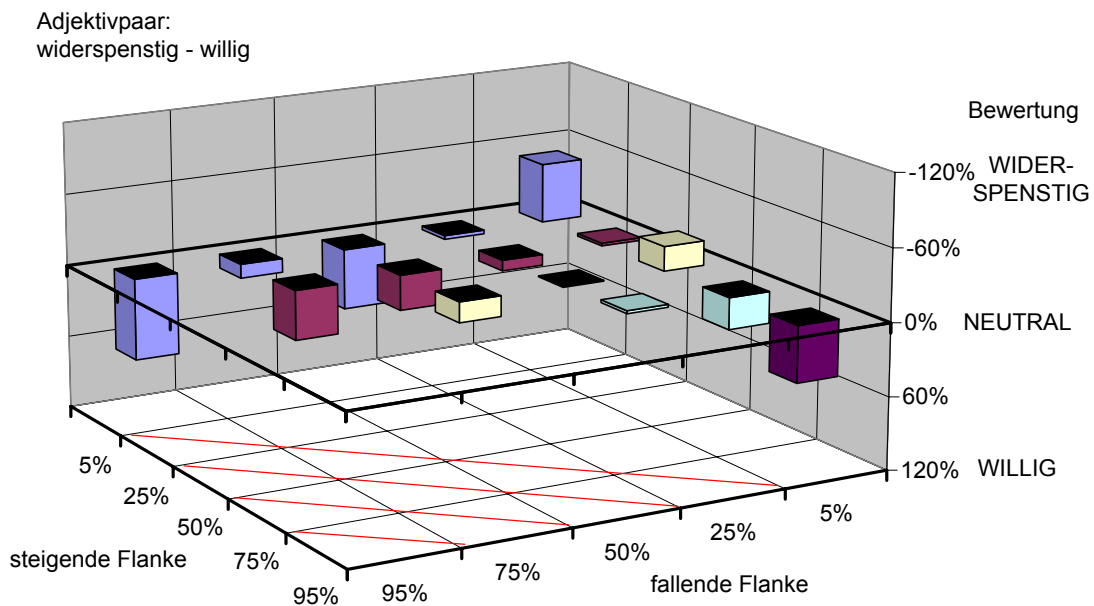


Abbildung 47: Adjektivpaar: widerspenstig – willig. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Paarung minderwertig – hochwertig

Die Ergebnisdarstellung der Paarung *minderwertig – hochwertig* ist in Abbildung 48 dargestellt. Sie ist von der Bedeutung her der Gruppe Gefallen/Wertigkeit zugeordnet.

Die Streuung ist mit $\sigma=29\%$ sehr gering. Allerdings kommen die qualitativen Urteile des Vorversuchs auf je 83%, was dem widerspricht und auf ein „Aufsparen“ der Extremwerte hinweist (Bortz, 2003). Eine Unsicherheit spielt in diesem Fall eine untergeordnete Rolle. Die VPn scheinen das Urteil *hochwertig*, aber auch *minderwertig* nur sehr zögerlich zu geben.

Die Ergebnisse sind auch als grafisch wenig verrauscht einzustufen, indem sie klare Tendenzen zeigen.

Eine sehr *hochwertige* Rastung wird bei sehr steiler SF, aber nur 50% FF gefunden. Dieser Eindruck nimmt um diesen Punkt nahezu ringförmig ab. Ein eher *minderwertiger* Eindruck wird bei sehr steiler FF hervorgerufen, während eine steile SF eher *hochwertig* erscheint.

Aufgrund der Nähe zum Maximum sind die beiden Lücken (S: 25%, F: 50% und S: 5%, F:25%) zu berücksichtigen, die Interpolation zeigt jedoch keine Auffälligkeiten im Gesamtbild.

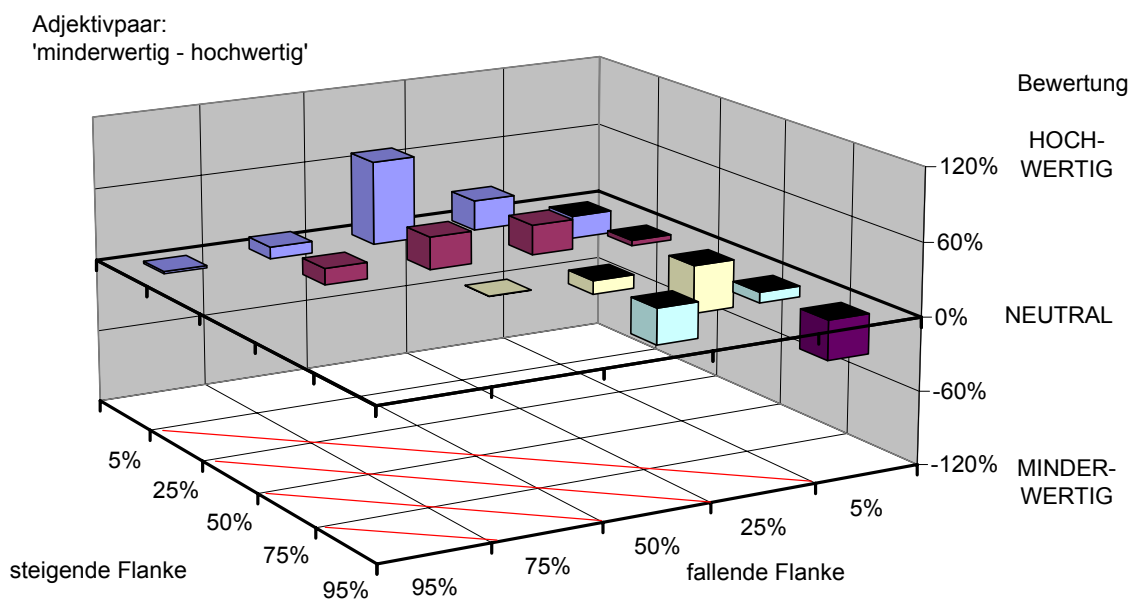


Abbildung 48: Adjektivpaar: minderwertig – hochwertig. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Paarung angenehm – unangenehm

Die Ergebnisdarstellung der Paarung *angenehm – unangenehm* ist in Abbildung 49 dargestellt. Sie ist von der Bedeutung her der Gruppe Gefallen/Missfallen zugeordnet. Die Ordinate ist invertiert.

Auch hier ist die Streuung mit $\sigma=28\%$ wie zuvor bei der Paarung *minderwertig – hochwertig* sehr gering. Ebenfalls kommen die qualitativen Urteile des Vorversuchs auf je 83%, was wie zuvor gegen eine Unsicherheit spricht. In diesem Sinne decken sich auch die übrigen Aussagen, so dass darauf verwiesen wird.

Es wird demzufolge *angenehm* mit *hochwertig* sowie *unangenehm* mit *minderwertig* gleich gesetzt. Ein bevorzugtes Adjektivpaar kann auf dieser Basis jedoch nicht gefunden werden.

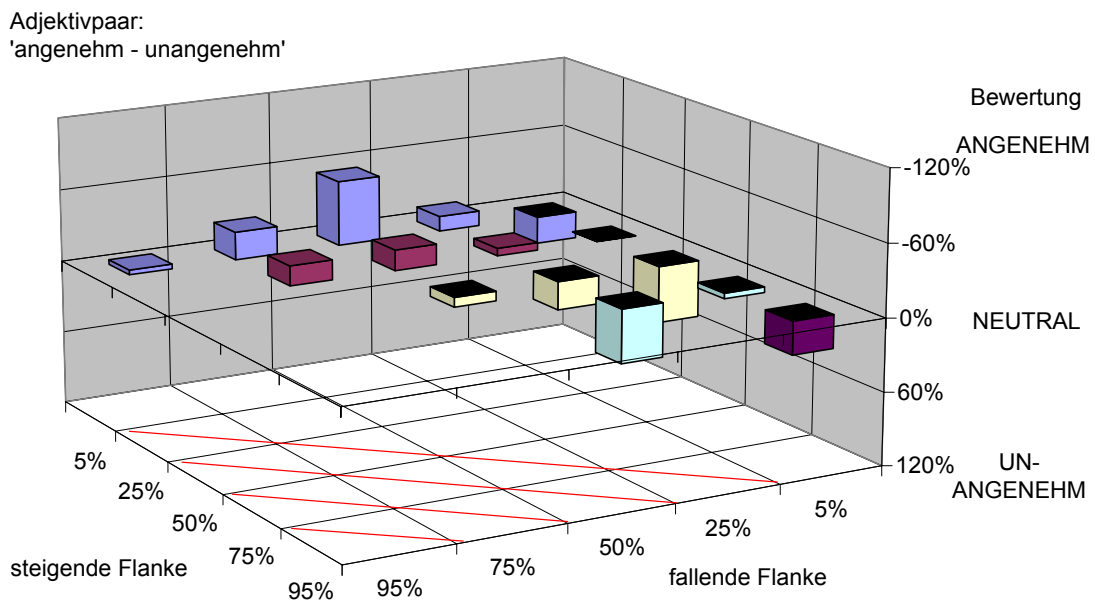


Abbildung 49: Adjektivpaar: angenehm – unangenehm. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Beurteilung sehr schlecht – sehr gut

Die Ergebnisdarstellung der Paarung *sehr schlecht – sehr gut* ist in Abbildung 50 dargestellt. Die Ordinate ist invertiert.

Diese Beurteilung fällt aus der Reihe heraus, da sie anhand von fünf Kategorien zu je vier Abstufungen, insgesamt also 20 Abstufungen ermittelt worden ist. Dies sollte nach Matell und Jacobi (1971) jedoch keinen Einfluss auf die Validität der Ergebnisse haben. Ebenso existieren keine Qualitätsurteile zu diesem Paar, jedoch fällt die Streuung mit $\sigma=39\%$ höher aus, als die anderen beiden Paare. Die Amplitude hat ihr Maximum bei allen drei vergleichbaren Paarungen bei 100%, ansonsten liegen die Bewertungen im ungünstigeren Bereich. Die gewählte Amplitude scheint im optimalen Gefallensbereich zu liegen.

Die Grafik selbst macht einen besseren Eindruck, da weniger Rauschen zu beobachten ist.

Demzufolge kann dieser Erhebung eine etwas bessere Qualität zugesagt werden, obgleich es nicht eindeutig den Adjektiven oder der Erhebungsmethode zugeordnet werden kann.

Letztlich können die Eigenschaften *minderwertig*, *unangenehm* und *sehr schlecht* sowie deren Gegenüber *hochwertig*, *angenehm* und *sehr gut*, gleichgesetzt werden.

Eine steile SF (S: 5%) wird generell als besser gewertet. Die FF hat ihr Optimum bei 50%. Eine steilere FF wird als stärker negativ empfunden, als eine flachere.

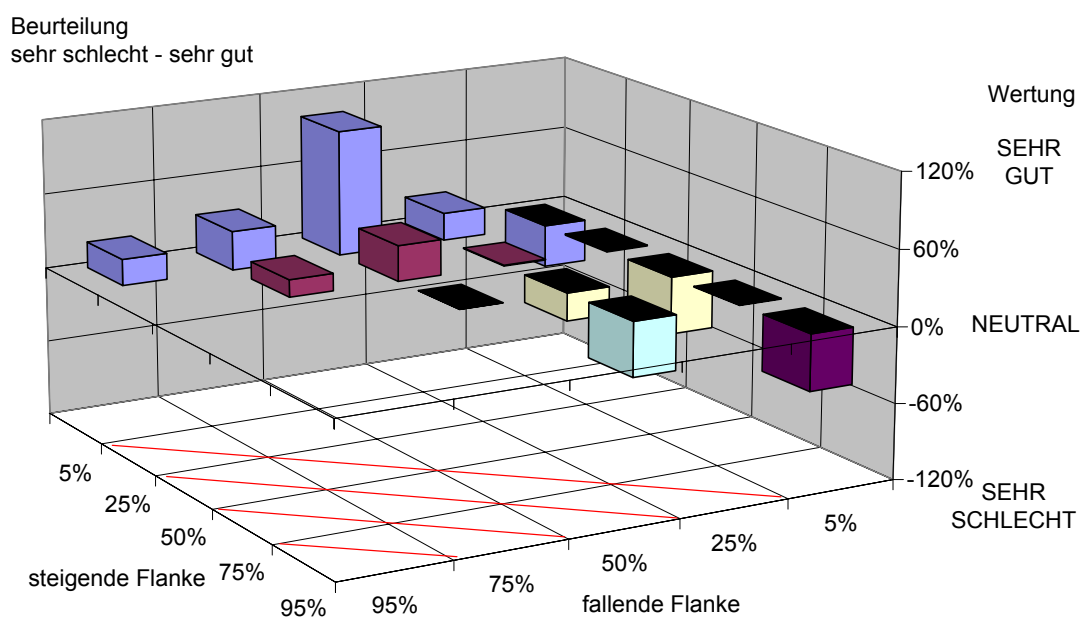


Abbildung 50: Bewertung: sehr gut – schlecht. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Paarung schwammig – präzise

Die Ergebnisdarstellung der Paarung *schwammig – präzise* ist in Abbildung 51 dargestellt. Sie ist von der Bedeutung her der Gruppe Präzision zugeordnet. Die Ordinate ist invertiert.

Die Streuung beträgt $\sigma=56\%$, das Qualitätsurteil ist sehr hoch (*präzise* 92%, *schwammig* 75%).

Ein Bereich hoher Präzision wird bei steiler SF festgestellt. Dabei liegt das Maximum bei FF bei einem Winkelanteil von 5..50% recht konstant. Mit flacher werdender SF nimmt sie konstant ab; ebenso für eine FF kleiner 50%.

Dies ist markant, da hier der Punkt bester Bewertung in den Vordergrund tritt. Er wird als höchst *präzise* und zugleich mit neutraler *Härte* gewertet. Man kann daraus folgern, dass der Punkt bester Bewertung hohe Präzision bei neutraler *Härte* verlangt.

Die Lücken (S: 25%, F: 50% und S: 5%, F:25%) erzeugen in diesem Fall Ungenauigkeiten, da die entsprechenden Punkte bei einer Messung durchaus stärker abweichen können. Es ist z. B. für S: 5%, F:25% durchaus davon auszugehen, dass hier zumindest das Niveau der benachbarten Punkte mit S: 5% erreicht wird, eventuell ein Maximum dort zu erwarten wäre. Aufgrund der geschilderten Querbeziehungen wird jedoch am ehesten von einem vergleichbaren Niveau ausgegangen.

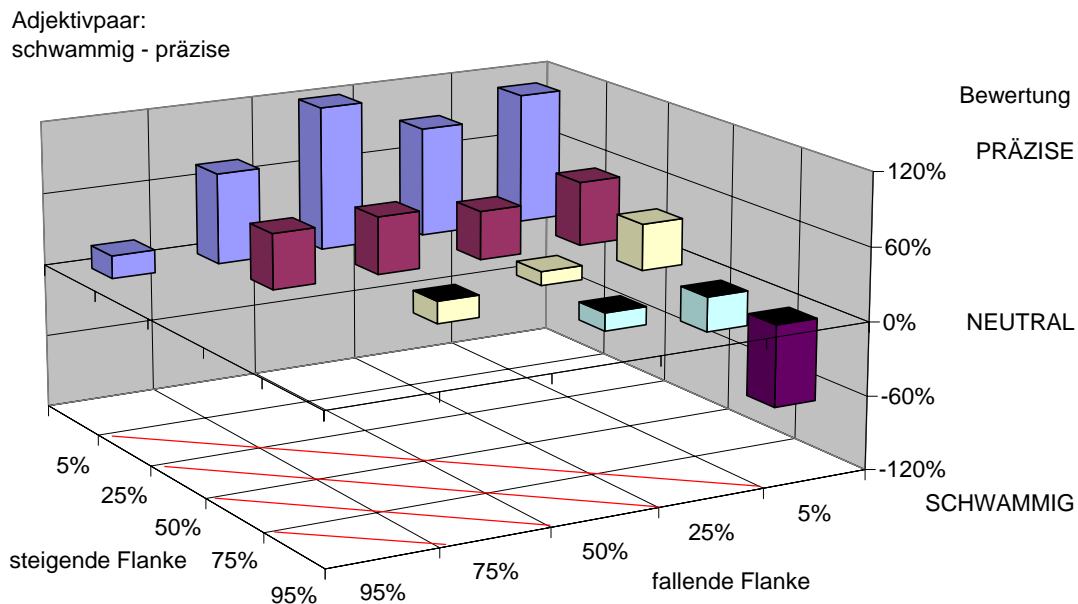


Abbildung 51: Adjektivpaar: schwammig – präzise. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Paarung eindeutig/klar – verschwommen/unklar

Die Ergebnisdarstellung der Paarung *eindeutig/klar – verschwommen/unklar* ist in Abbildung 52 dargestellt. Sie ist von der Bedeutung her der Gruppe Präzision zugeordnet. Die Ordinate ist invertiert.

Diese Paarung zeigt eine vergleichbare Charakteristik wie die Paarung *schwammig – präzise*. Mit einer Streuung von $\sigma=44\%$ und einem Qualitätsurteil für klar 42% ist diese schlechter einzustufen.

Auch hier kann ein Bezug zwischen *präzise* und *eindeutig/klar* sowie zwischen *schwammig* und *verschwommen/unklar* hergestellt werden.

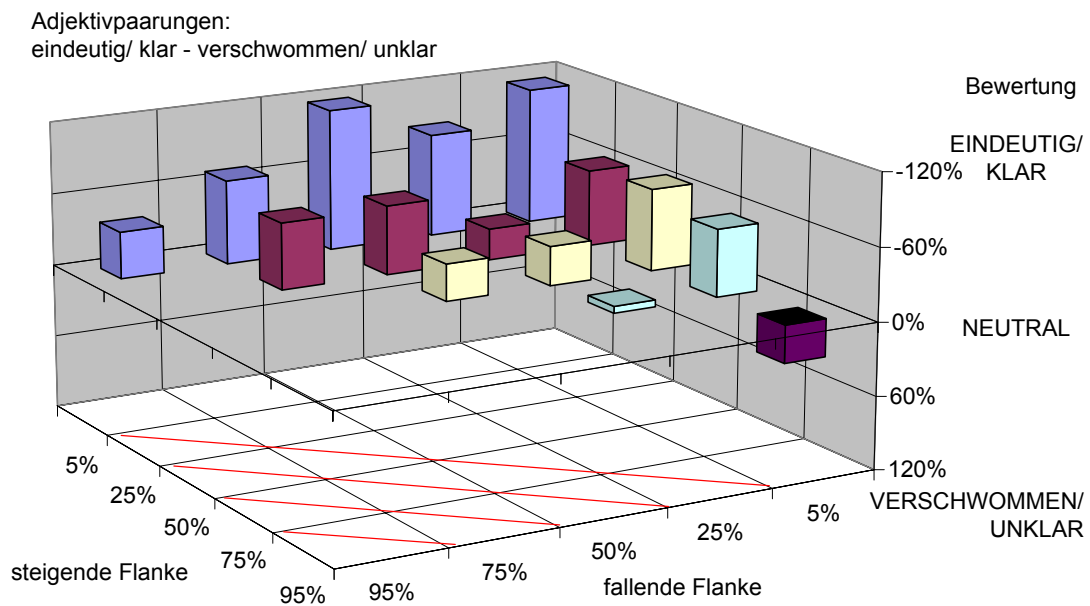


Abbildung 52: Adjektivpaar: eindeutig/ klar – verschwommen/ unklar. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Paarung eng geführt – weit

Die Ergebnisdarstellung der Paarung *eng geführt – weit* ist in Abbildung 53 dargestellt. Sie ist auf die Ruhelage und das Spiel bezogen. Die Ordinate ist invertiert.

Die Streuung ist mit $\sigma=38\%$ mäßig. Ein Qualitätsurteil existiert nicht. Das Ergebnis scheint dennoch eine geringe Streuung zu besitzen.

Eine starke Ähnlichkeit zeichnet sich mit der Paarung *schwammig – präzise* ab, was den Zusammenhang zwischen Präzision und dem Spiel der Ruhelage bestätigt. Die hohe Steigung lässt aufgrund der hohen Steifigkeit nur wenig Spiel zu.

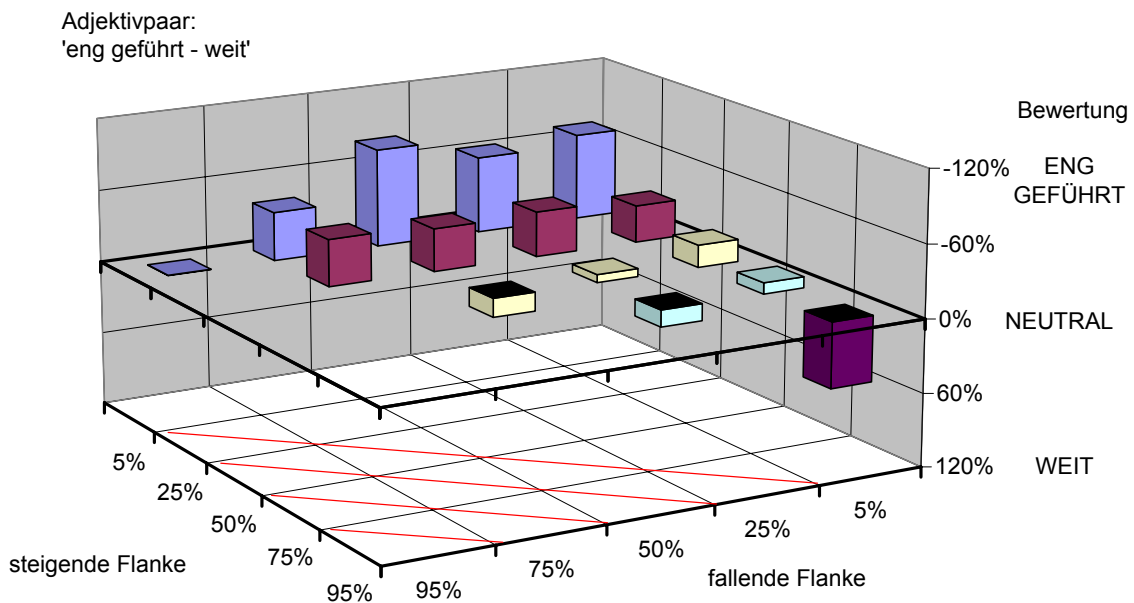


Abbildung 53: Adjektivpaar: eng geführt – weit. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Paarung rund – spitz

Die Ergebnisdarstellung der Paarung *rund – spitz* ist in Abbildung 54 dargestellt. Sie ist auf den Übergangspunkt bezogen.

Die Streuung (38%), wie auch das Qualitätsurteil (42%) sind mäßig. Die Darstellung zeigt ein hohes Rauschen und eine starke Tendenz zur Mitte. Die Paarung scheint nicht eindeutig definiert zu sein.

Auffällige Punkte sind (S: 5%, F: 5%) und (S: 50%, F: 5%), die tendenziell als *spitz* zu beurteilen wären. Auch eine leichte Tendenz abnehmend mit flacher werdender FF scheint vorhanden. Die Verwendung speziell in Bezug auf den Übergangspunkt ist eher in Frage zu stellen.

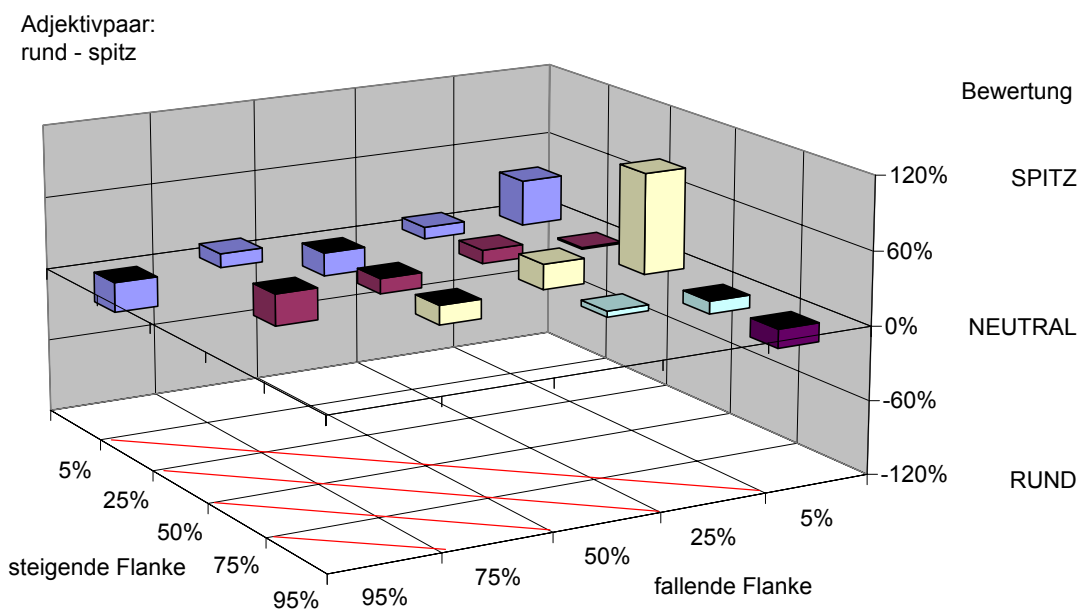


Abbildung 54: Adjektivpaar: rund – spitz. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.

Zusammenfassung

Adjektivgruppen

Zusammenfassend können vier subjektive Wahrnehmungsgruppen ermittelt werden: Voneinander unabhängig sind die Wahrnehmungen von *Härte*, bzw. *Gängigkeit* und die Wahrnehmung von *Wertigkeit*, *Gefallen*, bzw. *Wohlbefinden*. Die beiden anderen Gruppen hängen von diesen beiden ab.

Der Punkt maximaler *Härte* und *Schwegängigkeit* wird bei einer Rechteckform (S: 5%, F:5%) erreicht. Eine höhere Amplitude verstärkt diese Wirkung. Flacher werdende Flanken verringern

diesen Effekt, vor allem eine Abflachung der steigenden Flanke macht das Bedienelement schnell *weicher*.

Ein Bereich höchster Präzision, Klarheit und geringstem Spiel findet sich bei S: 5% und F: 5% bis 50%. Geringere Flankensteigungen bewirken eine Abnahme dieses Eindrucks. Dies entspricht einer steilen SF hohe Steifigkeit in Ruhelage und mittlere bis geringe Steifigkeit im Übergangspunkt.

Anhand der Faktorenanalyse lassen sich *spitz* und *widerspenstig* einander zuordnen. Stärkster gemeinsamer Punkt stellt (S: 50%, F: 5%) dar, gefolgt von (S: 5%, F: 5%). Der Eindruck *rund* oder *willig* nimmt, ausgehend davon, zu flacher werdenden Flanken hin zu.

Abhängigkeiten des Gefallens

Den Punkt höchsten Gefallens, Wertigkeit und Wohlbefindens zeigt Abbildung 55 und wird mit S: 5%, F: 50% erreicht. Dies entspricht dem Schnittpunkt von höchster Präzision (S: 5%, F: 5-50%) mit zugleich geringer *Härte* (F: < 5%).

Die Urteiler bevorzugen demzufolge einen geringen *Härteeindruck*, es muss dabei jedoch ein höchstmöglicher Präzisionseindruck erfüllt werden.

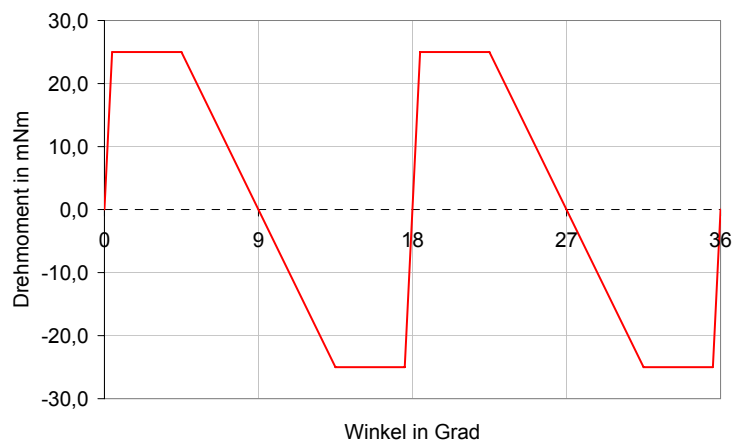


Abbildung 55: Im Versuch als hochwertigste, angenehmste und beste bewertete haptische Charakteristik. Sie vereinigt die höchste Präzision bei dabei geringst möglicher Härte.

5.7.6 Bezug der Ergebnisse zur Integraldarstellung

Anhand der Integraldarstellung einiger eingesetzter Charakteristika (vgl. Abbildung 56), können weitere Rückschlüsse auf die Wahrnehmung der Rastung gezogen werden.

Härte und Beweglichkeit

Die *Härte* hängt einerseits von der Amplitude ab und andererseits wird die Rechteckkurve als *härteste* identifiziert. Die Amplitude der Drehmomentdarstellung hängt linear mit der des Integrals zusammen. Aus Abbildung 56 ist ersichtlich, dass das Rechteck (S: 5%, F: 5%) zugleich die höchste Amplitude aller übrigen Kennlinien erreicht. Dies hängt mit der Winkelsumme der beiden Flanken zusammen. Sind sie gleich groß, ergibt sich immer dieselbe maximale Amplitude, da die Fläche unter der Drehmomentkurve gleich bleibt. Bei höherer Steigung wird das maximale Drehmoment schneller erreicht, bzw. erst später wieder abgebaut, was die Fläche erhöht.

Daraus kann geschlossen werden, dass die Fläche der Drehmomentdarstellung, bzw. das Maximum der Integraldarstellung, direkt mit der Empfindung von *Härte* oder *Schwinggängigkeit* zusammenhängt.

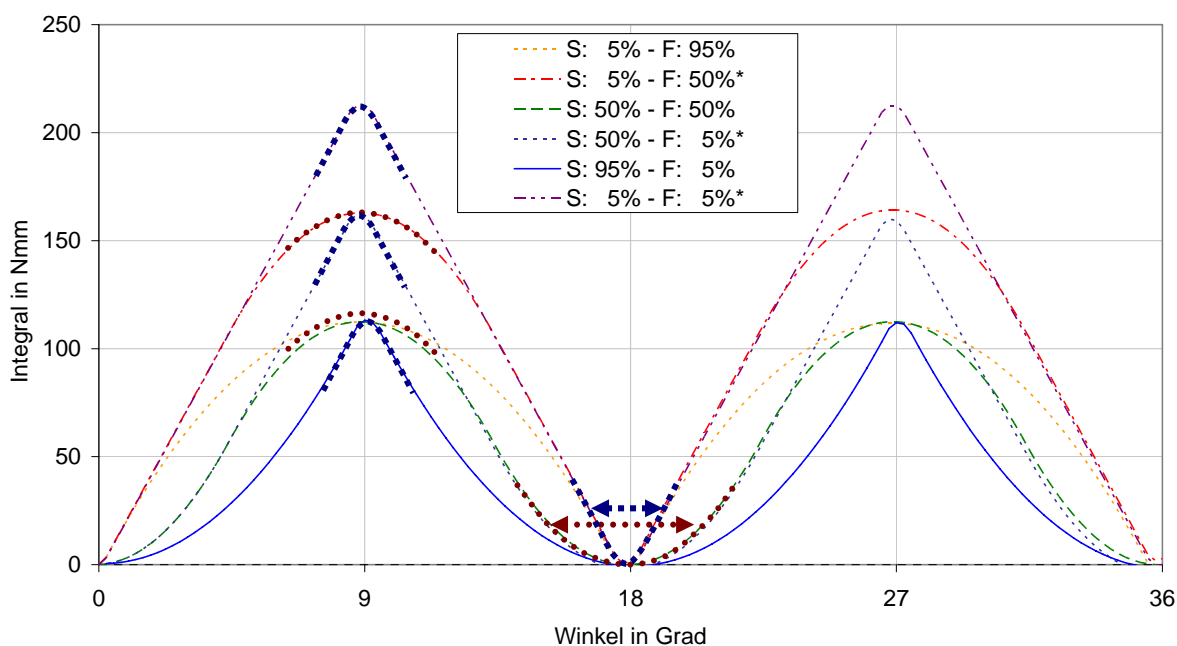


Abbildung 56: Integraldarstellungen verschiedener verwendeter Drehmomentkennlinien. Die punktierten Linien verdeutlichen die Bedeutung „spitz“ und „rund“, die punktierten Pfeile die „Weite“ oder „Enge“ der Ruhelage.

* Die Amplitudenüberhöhung kommt aus dem geringeren gesamten Winkelanteil der Flanken. Beide Steigungen sind größer und die maximale Amplitude wird früher erreicht, bzw. erst später reduziert. Daher ist die Fläche unter der Drehmomentdarstellung größer, was sich auf die Amplitude des Integrals auswirkt. Bei einer gleich bleibenden Winkelsumme der Flanken, bleibt die Amplitude des Integrals konstant.

Abbildung 57 verdeutlicht diesen Zusammenhang im Vergleich zu Abbildung 45 anhand der Winkelanteile der Flanken.

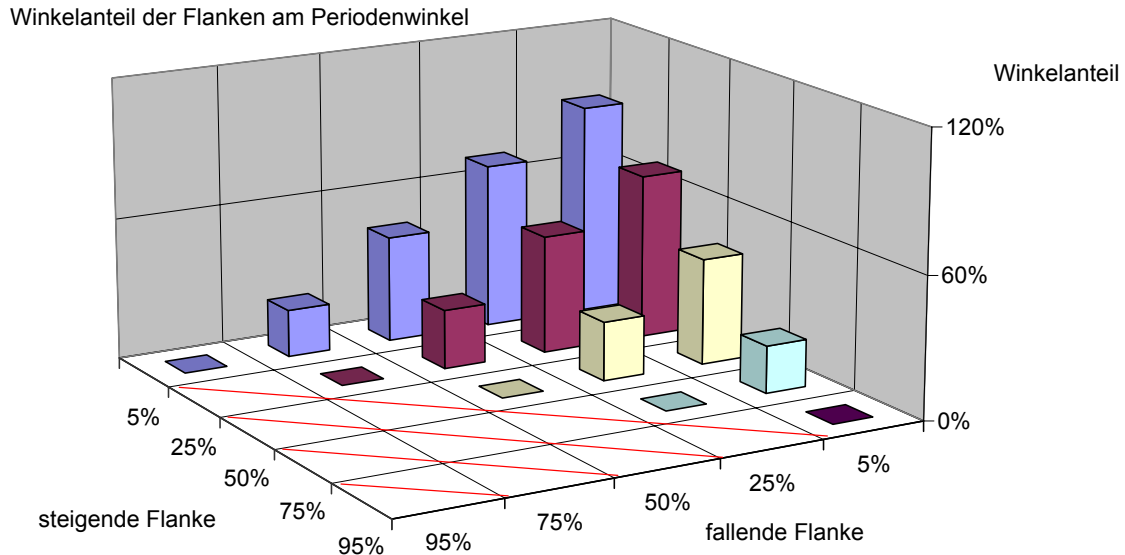


Abbildung 57: Summe der Winkelanteile am Periodenwinkel anhand der Versuchskonfiguration dargestellt.

Gutmütigkeit und Übergang

Die Begriffe „*spitz*“ und „*rund*“ kann man in Abbildung 56 in der Ausprägung der Kennlinien, im Übergangspunkt und der Ruhelage, wieder finden. Anhand von Abbildung 54 kann die Wirkung *spitz* am ehesten den Kennlinien mit F: 5% zugeordnet werden. Hier sind die Maxima der Integralkennlinien ebenfalls *spitz* ausgeprägt. Allerdings darf die Ausprägung der SF nicht zu flach werden, ansonsten scheint die dort ausgeprägte Rundung in den Vordergrund zu treten und das Urteil in Richtung „*rund*“ verschieben.

Präzision, Klarheit und Spiel

Die Präzision scheint eindeutig für S: 5% ihr Maximum zu besitzen. Nach Abbildung 56 kann das mit der Ausprägung der „*Weite*“ oder „*Engé*“ der Kennlinie in der Ruhelage (18°) in Übereinstimmung gebracht werden. Das kommt den Adjektiven „*weit*“ oder „*eng*“ der Befragung sehr nahe. Dies bestätigt, dass die Integraldarstellung einem „inneren Bild“ sehr nahe kommt.

Diese räumliche Zuordnung erlaubt es, die Begriffe des *Spiels* und der *Präzision* der Ausprägung der Ruhelage zuzuordnen.

5.7.7 Vergleich der „idealen“ Kennlinien mit realen Bedienelementen

Als Vergleichsobjekt zu der als ideal ermittelten Kennlinie wird der Audi-Drehsteller und die BMW-Kennlinie aus Abbildung 43 auf S.85 hinzugezogen. Der BMW entspricht einer S: 5%, F: 95% Kennlinie, die in eine positive Wertung fällt. Der Audi Drehsteller kommt, unter Berücksichtigung der Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit, der ermittelten *sehr guten* Kennlinienform (S: 5%, F: 50%) sehr nahe.

6 Untersuchung translatorischer Bedienelemente

Die vorangehende Untersuchung hat sich mit der Rastung von Drehstellern befasst. Die daraus gewonnene Erkenntnis bezüglich der intuitiven Wahrnehmung der Integralform erleichtert und die gewonnene Parametrisierung konkretisiert das Haptik-Design.

Aus diesem Kontext heraus stellt sich die Frage, inwiefern sich diese Erkenntnisse auch auf Drucktaster übertragen lassen. Zu diesem Zweck wird nach einer grundlegenden Einführung in die Beschreibung von Drucktastern, die Visualisierung für Drucktaster näher beleuchtet und eine Untersuchung der Parameter durchgeführt.

6.1 Technische Beschreibung translatorischer Bedienelemente: Kraft-Weg-Darstellung

Zur Beschreibung von Drucktastern wird, aufgrund der translatorischen Bewegung, ein Kraft-Weg-Diagramm verwendet. Untersuchungen von Weir et al. (2004) zeigen, dass bei der Betätigung von Drucktastern mit überwiegend coulombscher Reibung die Kraft-Weg-Darstellung nahezu unabhängig von der Betätigungsgeschwindigkeit ist und stellt damit eine solide Basis für eine Parametrisierung dar. Sobald dämpfende Eigenschaften in Form viskoser Reibung hinzukommen, treten Abweichungen auf. Abbildung 58 zeigt die Kraft-Weg-Darstellung eines Mikroschalters. Sie zeigt ebenso wie bei rotatorischen Bedienelementen die Hysterese zwischen Hin- und Rückweg aufgrund der vorwiegend coulombschen Reibungsverluste.

Die Darstellung von Geschwindigkeit über der Position hebt nach Weir et al. (2004) demgegenüber dynamische Effekte, z. B. Stick-Slip-Effekte, in Form von „Wacklern“ hervor. Dies unterstützt ebenso wie eine Bewertung von Beschleunigung die in Kapitel 2.5.4 getroffene technische Gliederung bezüglich dynamischer Reibung.

Die primäre technische Vorgabe der Bedienelemente stellt die Kraft-Weg-Darstellung dar (vgl. DIN EN 196000, 2002). Die Beschreibung des dynamischen Verhaltens und der Eigenschaften gewählter Materialpaarungen sind aktuell nicht näher spezifiziert. Sie erweitern das Feld der Parameter ungemein und sind mit einem wesentlich größeren messtechnischen Aufwand verbunden, weshalb zunächst der Fokus auf die reine Kraft-Weg-Darstellung gelegt wird. Die Lage des elektrischen Schaltpunktes ist ein weiterer Parameter, dessen Untersuchung jedoch auch nicht im Fokus dieser Arbeit liegt.

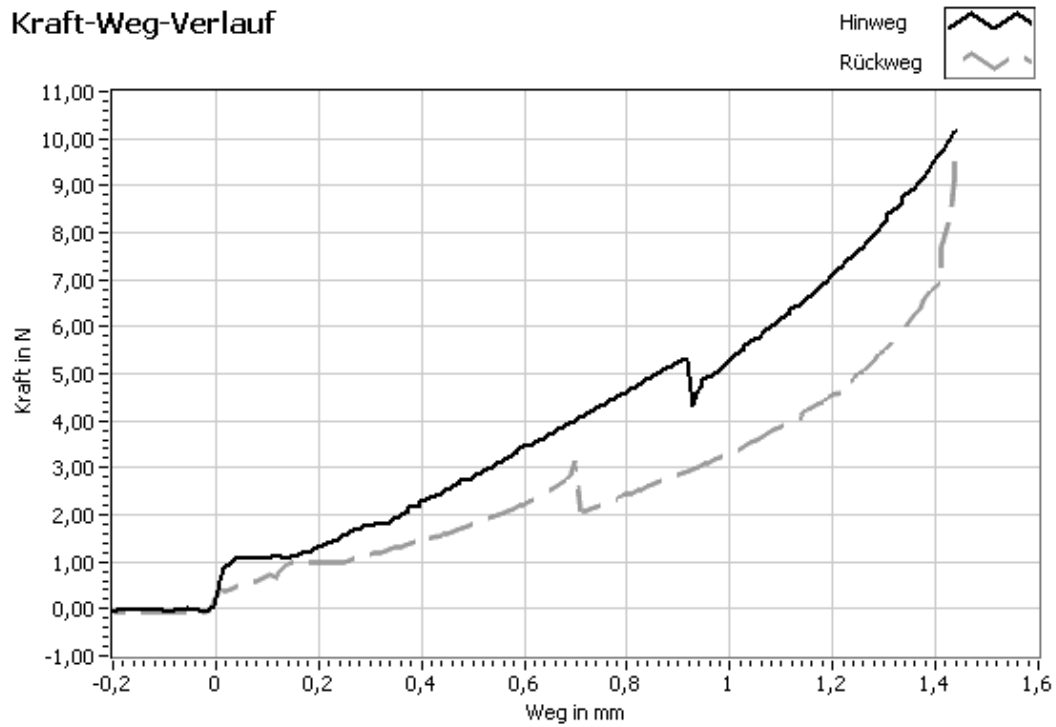


Abbildung 58: Kraft-Weg-Verlauf eines Drucktasters. Hier ein Mikroschalter.

6.1.1 Begriffe

Anhand Abbildung 59 werden gängige technische Bezeichnungen erläutert (nach Reisinger und Wild, 2007).

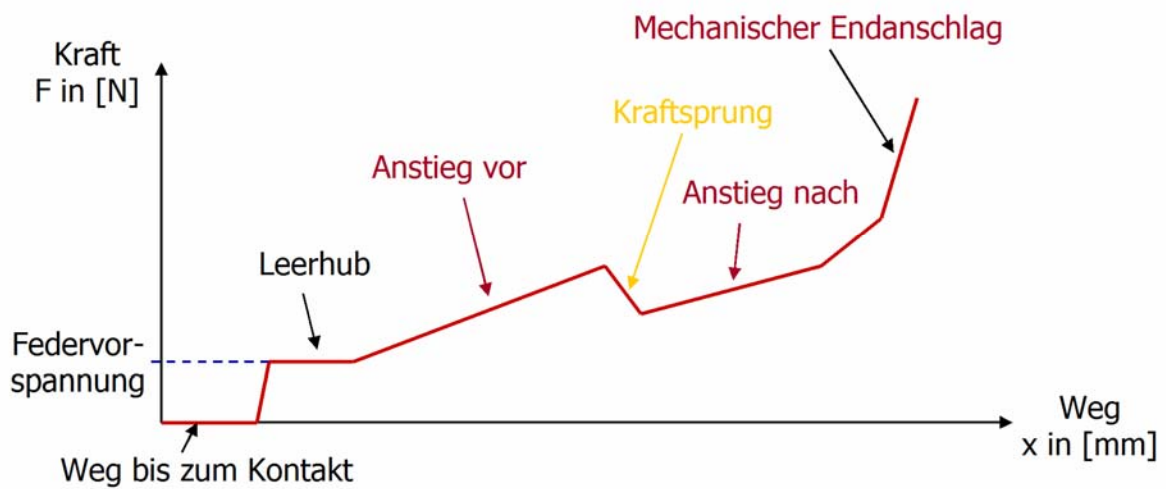


Abbildung 59: Systematische Darstellung einer Kraft-Weg-Kennlinie.

Weg bis zum Kontakt

Der Weg bis zum Kontakt ist messtechnisch der Weg des Messtasters bis zum Kontakt mit dem Bedienelement. Er ist keine das Bedienelement charakterisierende Größe.

Federvorspannung

Die Federvorspannung entsteht durch eine Beschränkung des Federweges und stellt einen Kraftwert dar, der erst überwunden werden muss, bevor sich das Bedienelement bewegt (Weir, 2004). Bubb (2001) bezeichnet den ersten Kraftanstieg als „Intensität der Berührung“ und die Steigung als „Anfangswiderstand“ („Initial response“ nach Osumi, 1990).

Leerhub

Der Leerhub kommt durch Toleranzketten zustande und ist am nahezu achsparallelen Verlauf der Kennlinie zu erkennen. Leerhub wird erfahrungsgemäß eher negativ eingestuft.

Kraftsprung

Der Kraftsprung bezeichnet den oftmals schlagartigen Abfall der Kraft bei einem bestimmten Kraftniveau. Das Maximum der Kurve stellt den Anfangspunkt des Kraftsprungs dar und dient meist der Spezifikation von Drucktastern. Nach Kosaka und Watanabe (1996) ist dessen Auslösekraft (peak) für die Mehrzahl der haptischen Eigenschaften verantwortlich. Zugleich sind der elektrische Schaltpunkt und damit die Auslösung der Funktion mit ihm verknüpft (DIN EN 196000, 2001). Bubb (2001) nennt das Verhältnis der Federvorspannung zum Kraftsprungniveau als Empfindlichkeit.

Anstieg vor und nach dem Kraftsprung

Die Flanken vor und nach dem Kraftsprung können in ihrer Form beliebig variieren. Es sind keine Arbeiten bekannt, welche deren Form untersucht haben. Erfahrungswerte deuten einen starken Einfluss der Flanken an. Sie können voneinander unabhängig konvex, konkav oder linear ausgeführt sein.

Mechanischer Endanschlag und Hub

Der mechanische Endanschlag begrenzt den Weg des Drucktasters und ist damit maßgeblich für dessen Hub. Er stellt meist den steilsten und steifsten Abschnitt der Kennlinie dar. Ein Überdrücken führt meist zur Zerstörung des Bedienelementes. Bei mehrstufigen Schaltern wird

zur Vermeidung des Überdrückens einzelner Stufen versucht, einen ähnlichen jedoch begrenzten Wahrnehmungseffekt nach jeder Stufe zu erreichen.

6.1.2 Messung von Drucktastern

Die Messung von Drucktastern erfolgt mit dem in Anhang B beschriebenen Prüfstand. Ein Stößel mit Kugelkopf betätigt das Bedienelement mittig.

6.1.3 Betätigung

Die Betätigung von Drucktastern erfolgt nach Bullinger (1994) im Kontaktgriff mit einem Finger (Zeigefinger) oder dem Daumen. Abbildung 60 zeigt verschiedene Kontakt-Griffarten.

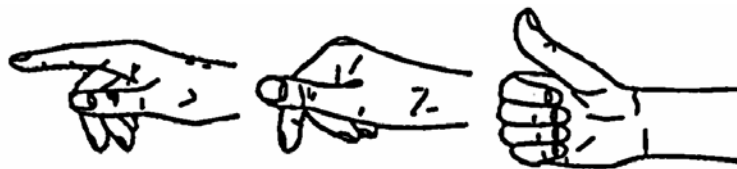


Abbildung 60: Verschiedene Kontakt-Griffarten bei Fingerbetätigung nach Bullinger (1994). Links: Zeigefinger gestreckt Betätigungsrichtung nach links, Mitte: Zeigefinger abgewinkelt, Betätigungsrichtung nach unten; Rechts: Daumenbetätigung, Betätigungsrichtung nach links.

Der Kontakt-Griff zeichnet sich vor allem durch seinen geringen Zeitbedarf bei der Betätigung und einen geringen Platzbedarf des Bedienelementes aus. Die Kappe in den anstehenden Versuchen hat einen Durchmesser von 15 mm und eine Kunstlederoberfläche.

6.1.4 Betrachtung realer Bedienelemente

Die Betrachtung realer Bedienelemente aus dem Markt ergibt eine Vielzahl an Varianten. Neben den drei Grundtypen, die im Massenmarkt eingesetzt werden, existieren beliebige Sonderformen (vgl. Kapitel 4.3). Abbildung 61 zeigt verschiedene Tastertypen, nicht nur aus dem Automobilbereich. Gut zu erkennen sind verschiedene Kraft-Weg-Verläufe. Die Typen 3. und 4. in der Abbildung verwenden Sondermechanismen.

Gemeinsam haben alle ein stets positives Kraftniveau, was eine dauerhafte Rückstellkraft bedeutet. Sie ist für nicht-rastende Bedienelemente charakteristisch. Zur Realisierung einer Rastung wird eine negative Kraft benötigt.

Nahezu alle Bedienelemente haben einen Kraftsprung, der jedoch stark in Höhe, Steilheit und Form variiert. Dabei scheint subjektiv ein breiter, runder Verlauf eher weicher und ein steiler, tiefer Kraftsprung eher schärfer zu wirken.

Kraft-Weg-Verlauf

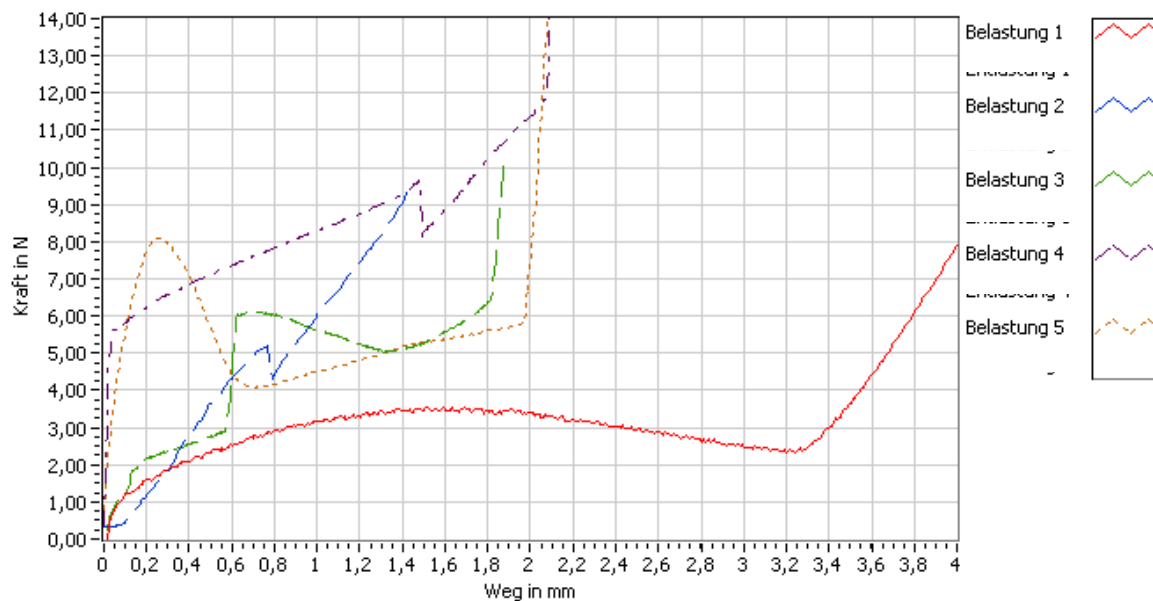


Abbildung 61: Kraft-Weg-Verlauf verschiedener Drucktaster bei Belastung (Hinweg):
 1. BMW Klima 3er (2005), 2. Audi A8 Hardkey-Taste (2004), 3. Taster Otto Engineering HP7,
 4. Taster Otto Engineering P3, 5. Taster Elobau 145MT

Der Gesamthub der Bedienelemente variiert in einem Bereich bis 5 mm. Der Großteil der Bedienelemente hat einen Gesamthub im Bereich von 1 - 2 mm. Die Lage des Schaltpunktes variiert zwischen sehr kurz (0,2 - 0,5 mm; „Knackfrosch“) und weit (bis über 2 mm; „Gummischaltmatte“). Den Schaltpunkt eines Mikroschalters findet man im Bereich von 0,5 bis 1,0 mm.

Die Steilheit, Ausprägung und Höhe des Schaltpunktes sowie die Flankenformen variieren offensichtlich.

Grundtypen

Die in Kapitel 4.3.2 erwähnten Grundtypen sind in Abbildung 62 exemplarisch dargestellt. Man kann hier die beschriebenen Eigenschaften gut erkennen: Der Knackfrosch mit kurzem Hub und steil abfallendem Schaltpunkt, der Mikroschalter mit mittlerem Hub und sehr scharf abfallendem Schaltpunkt und die Gummischaltmatte mit langem Hub, rundem Verlauf und großem, aber flachem Schaltpunkt. Der Mikroschalter hat einen nahezu linearen Kraftanstieg vor und nach dem Schaltpunkt.

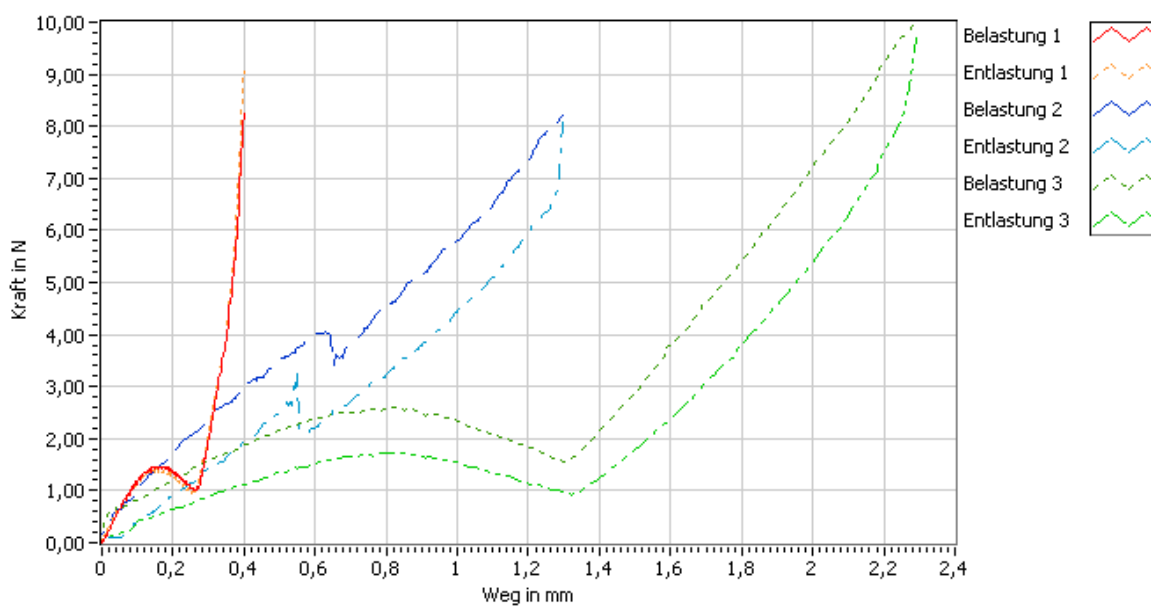


Abbildung 62: Beispiele zum Vergleich der Grundtypen nach Kapitel 4.3.2: 1. Knackfrosch, 2. Mikroschalter, 3. Gummischaltmatte.

Knackfrosch und Mikroschalter

Abbildung 63 zeigt den Einfluss eines Silikonstößels an einem Mikroschalter Racon 8 der Firma Rafi. Der Mikroschalter 1. ohne und 2. mit Stößel verdeutlicht dessen Einfluss und Funktion: Der Kraftsprung wird etwas geringer, jedoch durch die zusätzliche Federwirkung des Stößels kürzer und damit steiler. Der Hub verlängert sich abhängig von der Härte (in Shore) des verwendeten Materials vor und nach dem Kraftsprung. Die Hysterese wird aufgrund der, im Vergleich zu Metall hohen inneren Reibung im Silikon, größer. Es wird dadurch mehr Energie in Wärme umgesetzt, die bei der Rückwärtsbewegung nicht zur Verfügung steht.

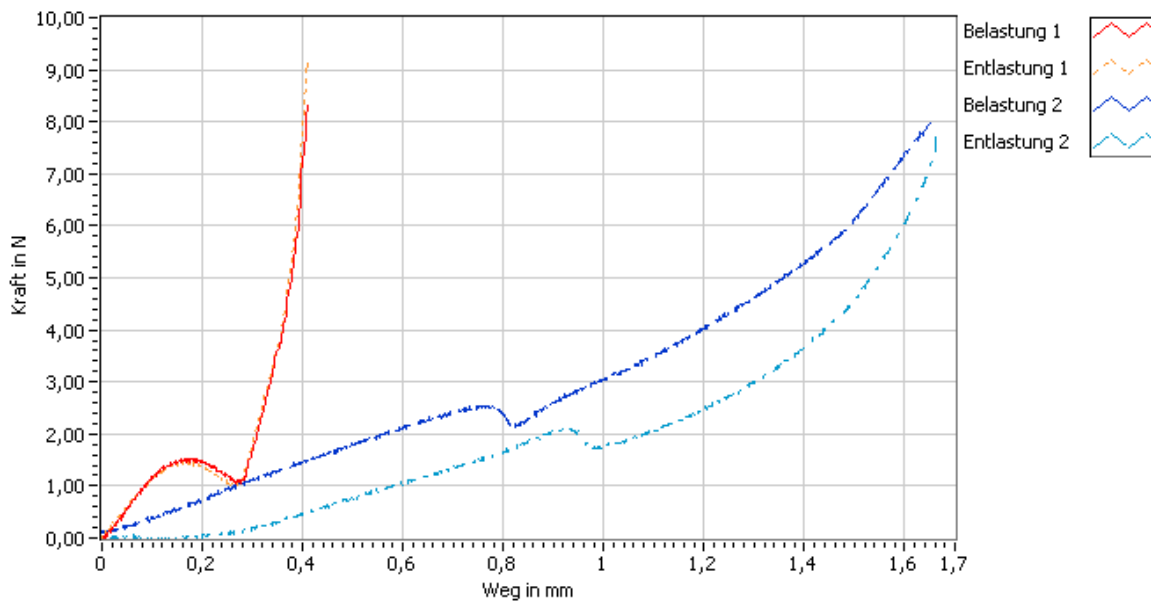


Abbildung 63: Einfluss des Silikonstößels. Unterscheidung zwischen 1. Knackfrosch und 2. Mikroschalter. Zu erkennen der schärfere, steilere und weniger tiefe Kraftsprung des Mikroschalter. Die Hysterese des Mikroschalters ist ebenfalls größer, was davon kommt, dass die Verformungsarbeit des Stößels, in Form innerer Reibung, Energie in Wärme umsetzt und diese nicht mehr in die kinetischen Größen eingeht.

6.1.5 Rückschlüsse und offene Fragen

Die starke Varianz von Hub und Kraft des Bedienelementes bezüglich Schaltpunkt, Ausprägung des Schaltpunktes und des Gesamthubs zeigt mögliche Parameter auf. Diese Bedienelemente zeigen auch subjektiv Unterschiede.

Zur Untersuchung der Abhängigkeiten von Parametern und subjektiven Eindrücken ist eine einheitliche Parametrisierung notwendig, die alle Kennlinienformen beschreiben oder zumindest vergleichbar annähern kann.

Hier stellt sich die Frage, inwiefern die Erkenntnisse aus den Versuchsreihen Erleichterung schaffen können. Die o. g. großen Einflüsse des Kraftsprungs stellen es in Frage, Rundungen durch Geradenstücke anzunähern, da dieser scheinbar wichtige Effekt durch die Integralbildung eher geglättet wird. Daher muss der Visualisierung besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

6.2 Identifikation haptischer Parameter

Die Identifikation der Drucktaster-Parameter stellt sich, aufgrund deren Vielfalt komplexer dar als die der Drehsteller. Anhand der aufgeführten Merkmale realer Bedienelemente und existierender Ansätze (Osumi et al., 1990; Kosaka und Watanabe, 1996; Bubb, 2001; DIN EN 19 6000) wird die im Folgenden beschriebene Parametrisierung definiert. Begriffe aus Kapitel 6.1.1 werden angewandt.

Der Einfluss von Ecken und Rundungen wird, aufgrund der Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit, als gering angenommen. Dies vereinfacht die Erzeugung synthetischer Kennlinien, muss aber in den Versuchsreihen separat nachgeprüft werden.

6.2.1 Federvorspannung

Die Federvorspannungskraft (Initial) wird von Kosaka und Watanabe (1996) als hauptverantwortliche Größe für die Wahrnehmung der „Tiefe“ eines Bedienelementes angeführt. Es wird, je höher die Federvorspannung ist, ein desto tieferes Eindringen (deep, vgl. Abbildung 65), d.h. ein größerer Hub, des Bedienelementes wahrgenommen.

Ein möglicher Zusammenhang zwischen Federvorspannungskraft und Hub kann anhand Abbildung 64 nachvollzogen werden: Ausgehend vom selben Endpunkt zweier Federkennlinien unterschiedlicher Steigung ergibt sich bei der Kennlinie mit der geringeren Kraft eine geringere Federvorspannung. Dies bedeutet einen geringeren möglichen Gesamthub der Feder, der offensichtlich in die Wahrnehmung mit eingeht.

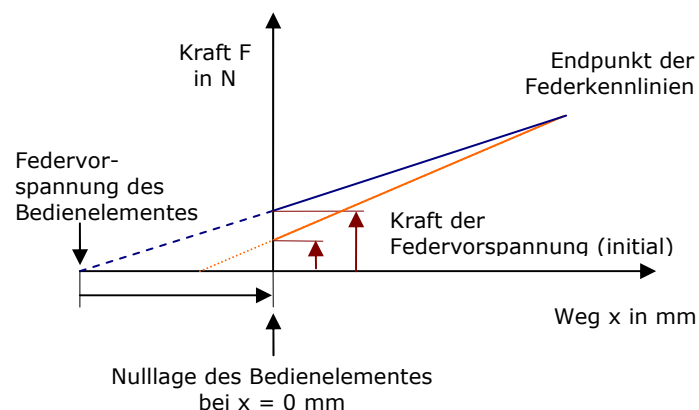


Abbildung 64: Entstehung der Federvorspannungskraft und möglicher Einfluss auf die wahrgenommene Tiefe des Bedienelementes.

6.2.2 Lage des Schaltpunktes in Kraft und Weg

Der Lage des Kraftsprungs kommt haptisch besonderes Augenmerk zu, da Kosaka und Watanabe (1996) der Schaltkraft (peak) einen besonderen Einfluss zusprechen. Sie variieren jedoch ausschließlich die Kräfte des Bedienelementes und verwenden konstante Wege. Dieser Punkt ist eindeutig von den, nach DIN EN 19600 (2001) definierten, elektrischen Schaltpunkten zu differenzieren.

Die eindeutige Unterscheidbarkeit der Grundtypen und die bisher fehlende Untersuchung empfiehlt die Verwendung der Startposition (Weg) des Kraftsprungs in Kombination mit der Maximalkraft als Parameter.

6.2.3 Höhe und Steigung des Kraftsprungs

Die Höhe und die Steigung des Kraftsprungs zeigen eine vergleichbare Variationsbreite wie dessen Lage. Kosaka und Watanabe (1996) untersuchen die Kraftdifferenz (drop) und ordnen ihm keine hauptsächliche Wirkung zu, jedoch zeigen ihre Untersuchungen einen hohen Einfluss in sämtlichen subjektiven Größen. Anhand von DIN EN 196000 (2001) wird pauschal eine Höhe des Kraftsprunges von mehr als 10% der Schaltkraft vorgeschlagen, wobei diesbezüglich Wege und Steigungen unberücksichtigt bleiben. Die Darstellung der Kraftsprunghöhe bezüglich F1 nach Kosaka und Watanabe (1996) bzw. Abbildung 66 ist an dieser Stelle sinnvoller als ein absoluter Kraftwert nach Norm, da ohne Umwege die Sprunghöhe angegeben wird.

6.2.4 Flanken vor und nach dem Kraftsprung

Von Kosaka und Watanabe (1996) grundsätzlich nicht untersucht wird der Verlauf, bzw. die Form der Kennlinie. Sie verwenden eine mikroschalterähnliche Kurvenform und variieren diese. Dies muss kritisch betrachtet werden, denn sie verformen dabei, wie in Abbildung 65 zu sehen, stark die Flanken und ordnen diesen Effekt letztlich nur der Höhe des Kraftsprunges zu. Eine eindeutige Aufgliederung und Zuordnung der Effekte zu den Parametern ist damit nicht möglich.

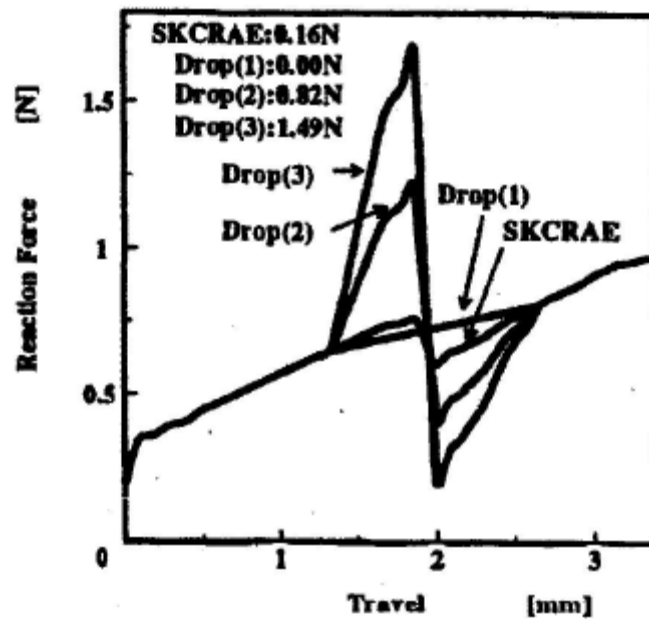


Abbildung 65: Reaktionskraft-Diagramm nach Kosaka und Watanabe (1996) für die Amplitude des Kraftsprungs (drop).

Abbildung 66 zeigt die Darstellungen der Kennlinien nach Bubb (2001) und nach Osumi et al. (1990). Sie zeigen nach der Federvorspannung einen konvexen Anstieg und einen Abfall auf ein niedriges Niveau, auf dem das Bedienelement bis zum Endanschlag bleibt. Der Anschlag steigt nahezu rechtwinklig senkrecht an. Die in Abbildung 61 und Abbildung 62 gezeigten Darstellungen zeigen jedoch eine weitaus größere Variabilität der Flanken, teilweise konkav ausgeprägt, so dass hier von weiteren Möglichkeiten der Parametrisierung ausgegangen werden muss.

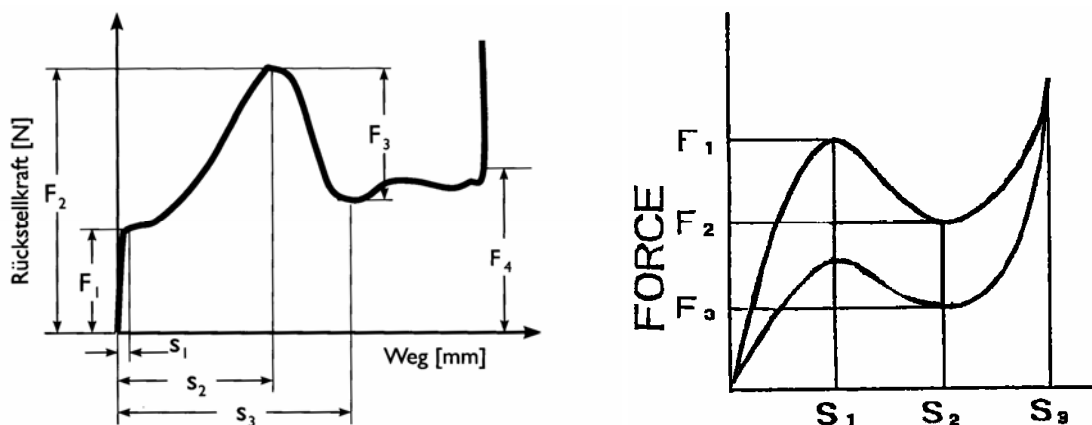


Abbildung 66: Kraft-Weg-Verlauf nach Bubb (2001) links und Osumi et al. (1990) rechts.

6.2.5 Endanschlag

Der Endanschlag stellt das begrenzende Element des Drucktasters dar und gibt damit die Gesamtlänge des Bedienelementes vor. Er ist durch eine sehr hohe Steigung und das höchste Kraftniveau gekennzeichnet. Nach DIN EN 196000 (2001) wird ein weiterer Kraftwert F_3 , s_3 eingeführt, der nicht mit den Abbildungen oben übereinstimmt, sondern im Endanschlag liegt. Die Position s_3 dient letztlich der Bestimmung von s_2' , an dessen Position der elektrische Schaltvorgang spätestens aktiviert sein muss. Demzufolge wurde hier ein haptischer Wert F_3 (F_1) gewählt, bis zu dem die Taste in der Regel durchgedrückt wird. Für F_3 wird als Maximum die 1,5-fache Kraft F_1 , also die 1,5-fache Schaltkraft gewählt.

Hier ist Vorsicht geboten, da F_3 in den verschiedenen Darstellungen drei unterschiedliche Bedeutungen hat! Bei Bubb (2001) und Kosaka und Watanabe (1996) wird die Höhe des Kraftsprungs mit F_3 bezeichnet, während F_3 bei Osumi et al. (1990) die Senke der Rückwärtsbewegung (Abbildung 66: F_3 , s_2) beschreibt.

6.2.6 Gewählte Parametrisierung

Die gewählte Parametrisierung setzt auf eine vollständige Beschreibung des Kraft-Weg-Verlaufs, indem Kräfte und Wege ausgewählter Punkte sowie die Form der Verbindungsstücke vorgegeben werden. Dabei werden zur Vereinfachungen Rundungen durch Geradenstücke angenähert.

Dynamische Parameter wie Massenträgheit und Reibungseffekte sind nicht berücksichtigt.

Die Parametrisierung nach Bubb (2001) wird aufgrund der am umfangreichsten definierten Kurvenform als Grundlage verwendet.

Da die Benennung der verschiedenen Darstellungen jedoch stark schwankt, werden neue Größenbezeichnungen eingeführt, die an der jeweiligen Funktion der Punkte orientiert sind und damit eine einheitliche Benennung mehrfacher Schaltpunkte ermöglicht. Aufgrund der Normung wird ein Bezug zur DIN EN 196000 (2001) hergestellt.

Die Kennlinie wird von sechs Punkten bestimmt (vgl. Abbildung 67 und Abbildung 68) und wird von links nach rechts anhand der Abbildungen im Folgenden durchgegangen:

Die Nulllage wird immer im Koordinatenursprung gesehen, weshalb sie nur der Vollständigkeit halber hier erwähnt wird.

Erster Punkt ist demnach die Federvorspannung F_F , x_F (vgl. Abbildung 66 links: F_1 / s_1).

Der zweite Punkt ist neu und charakterisiert die Ausprägung der steigenden Flanke F_v, x_v („v“ wie vor dem Schaltpunkt). Er ist in deren Mitte platziert. Ist die Flanke linear ausgeprägt, wird er nicht benötigt.

Die Lage des Schaltpunktes ist durch das Maximum F_s, x_s festgelegt (vgl. Abbildung 66 links: F_2 / s_2 ; nach DIN EN 196000: F1, s1).

Zur besseren Anschauung wird der Kraftabfall $\Delta F, \Delta x$ (vgl. Abbildung 66 links: F_3 / s_3 ; nach DIN: F2, s2) auch bezüglich der Positionsangabe relativ zur Lage des Schaltpunktes bezogen. Hintergrund ist, dass die Steigungseigenschaften des Kraftsprungs direkt angegeben werden können und nicht z. B. durch eine Verschiebung der Lage des Schaltpunktes variieren (vgl. Abbildung 66 links: s_2, s_3).

Der fünfte Punkt F_n, s_n wird ebenfalls wie F_v, s_v neu eingeführt und beschreibt die Flanke nach dem Schaltpunkt und charakterisiert wie der zweite Punkt die Flankenausprägung. Nach Abbildung 66 ist dieser Bereich nahezu waagrecht ausgelegt, die Messungen (vgl. Abbildung 61) zeigen jedoch mehrheitlich ansteigende Kennlinien.

Der abschließende Punkt F_E, x_E stellt das Erreichen des mechanischen Anschlags und damit verbunden den Gesamthub dar. Meist ist dieser Punkt mit dem Erreichen konstruktiver Grenzen verbunden, so dass die Kraft aufgrund der hohen Steigung schnell sehr hohe Werte erreicht und nahezu senkrecht verlaufen kann. Da die Bedienelemente teilweise so aufgebaut sind, dass durch die Flanke nach dem Schaltpunkt bereits so hohe Kraftniveaus erreicht werden (vgl. Abbildung 62, 2./3.), wird dieser Bereich bei der Betätigung meist nicht erreicht und eine haptische Auswertung erscheint daher nicht sinnvoll. Wie in DIN EN 196000 (2001) kann von einem zu erreichenden Kraftwert F_{max}, x_{ges} (nach DIN: F3) einer definierten Abschaltkraft als Endpunkt der Kennlinie ausgegangen werden. Eine Beschränkung nach DIN erfolgt jedoch nicht.

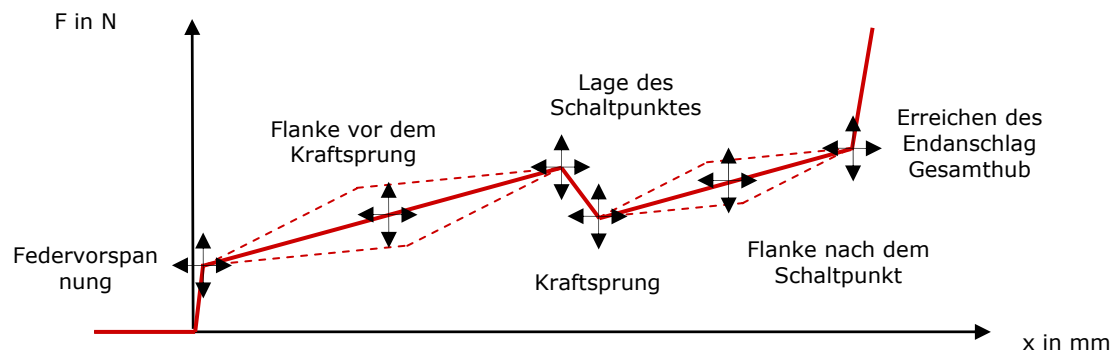
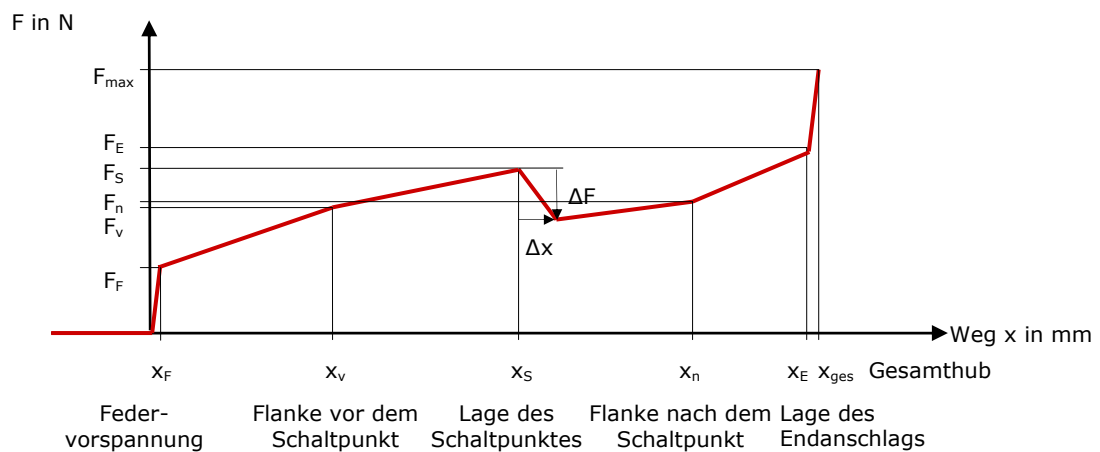


Abbildung 67: Parametrisierung der Kraft-Weg-Kennlinie. Die Parametrisierung beschreibt den gesamten Verlauf über 6 definierte Wertepaare (F, x)



Bezeichner nach DIN
EN 196000 (2001):

F1, s1 (F2, s2) F3, s3

Abbildung 68: Parametrisierung der Kraft-Weg-Kennlinie mit allen Bezeichnern.
Der Kraftsprung ΔF , Δx ist relativ zur Lage des Schaltpunktes definiert,
nicht wie nach DIN mit absoluten Werten (F2, s2).

6.3 Eignung der Kraft-Weg-Darstellung

Wie bereits erwähnt, ist eine Übertragung der Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit, und damit die Integraldarstellung, bei Drucktastern nicht ohne weiteres zu machen. Die glättende Wirkung eines Integrals reduziert den eindrücklichen Kraftsprung auf eine leichte Abflachung (Abbildung 69). Daraus ergibt sich die Frage, ob es ebenso eine Darstellungsmöglichkeit gibt, um den intuitiven Eindruck eines Drucktasters und dessen Schaltpunkt intuitiv widerzuspiegeln.

6.3.1 Integraldarstellung

Wie in Abbildung 69 zu erkennen ist, bildet die Integraldarstellung die steilen Kraftsprünge nur sehr schlecht ab. Die Kennlinienform der Gummischaltmatte zeigt die am meisten ausgeprägte Auffälligkeit, wogegen der Knackfrosch nahezu nicht unter den beiden anderen Kennlinien zu erkennen ist. Eine Vergleichbarkeit der Kennlinien ist nicht gegeben.

Trotzdem kann aufgrund einer im Vorfeld der Untersuchungen beobachteten hohen Ähnlichkeit zwischen eckigen und runden Kennlinien diese Darstellung nicht ausgeklammert werden. Es ist unklar, inwiefern hier die glättende Wirkung des Integrals zu bewerten ist.

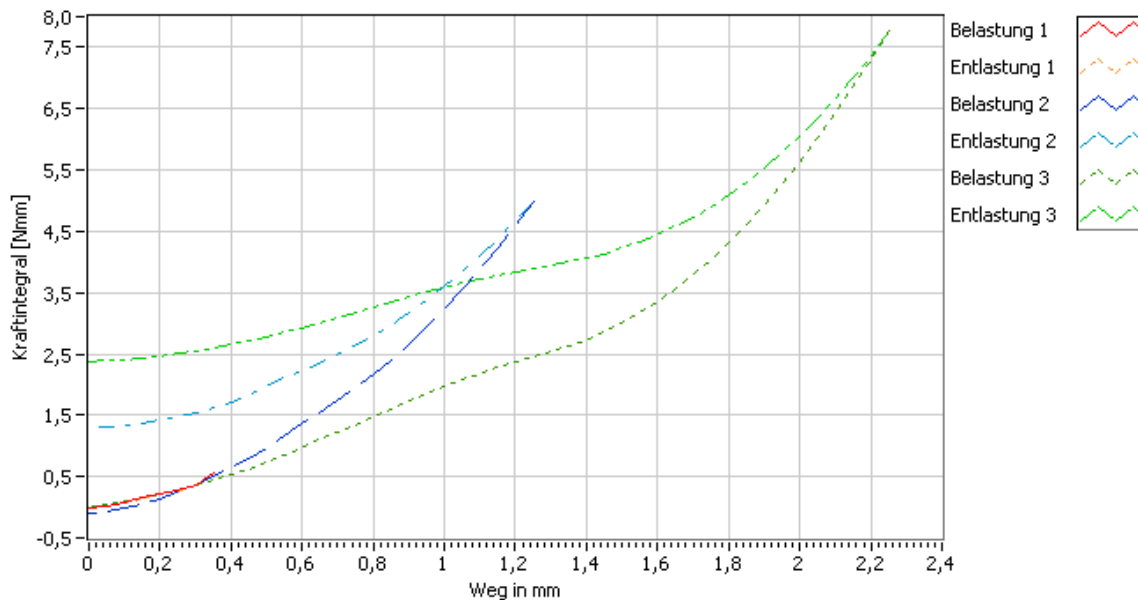


Abbildung 69: Integraldarstellung der drei Grundtypen nach Abbildung 62:

1. Knackfrosch, 2. Mikroschalter, 3. Gummischaltmatte. Der Kraftsprung des Mikroschalters ist nahezu nicht zu erkennen. Die Gummischaltmatte zeigt als einzige der Kennlinien einen merklichen Knick. Die Darstellung des Knackfrosch ist nur sehr kurz und hat aufgrund der geringen Hysterese nahezu denselben Hin- und Rückweg. Die Kennlinie wird von den anderen beiden nahezu verdeckt.

6.3.2 Kraft-Weg-Darstellung

Die Kraft-Weg-Darstellung lässt die Form der Schaltpunkte erkennen und bietet Raum der Interpretation. Es könnte demzufolge eine geeignete Darstellung sein.

6.3.3 Differentialdarstellung

Der Kraftsprung und dessen Lage haben eine signifikante Wirkung (Kosaka und Watanabe, 1996). Nach Kapitel 6.2 kann man darauf schließen, dass gerade Steigung und Höhe des Kraftsprungs wichtige Größen sind.

Aus physiologischer Sicht zeigen auch Mechanosensoren Empfindlichkeiten bezüglich der Differenzierung der mechanischen Größen (vgl. Kapitel 2.4.2). Sie reagieren auf die erste und zweite Ableitung, weshalb hier das Differential der Kraft-Weg-Kennlinie als Visualisierung in Frage kommt. Abbildung 70 zeigt die tiefpassgefilterten Differentialverläufe der drei Grundtypen. Sie können sehr gut voneinander unterschieden werden und bieten sich daher als Möglichkeit der Darstellung an.

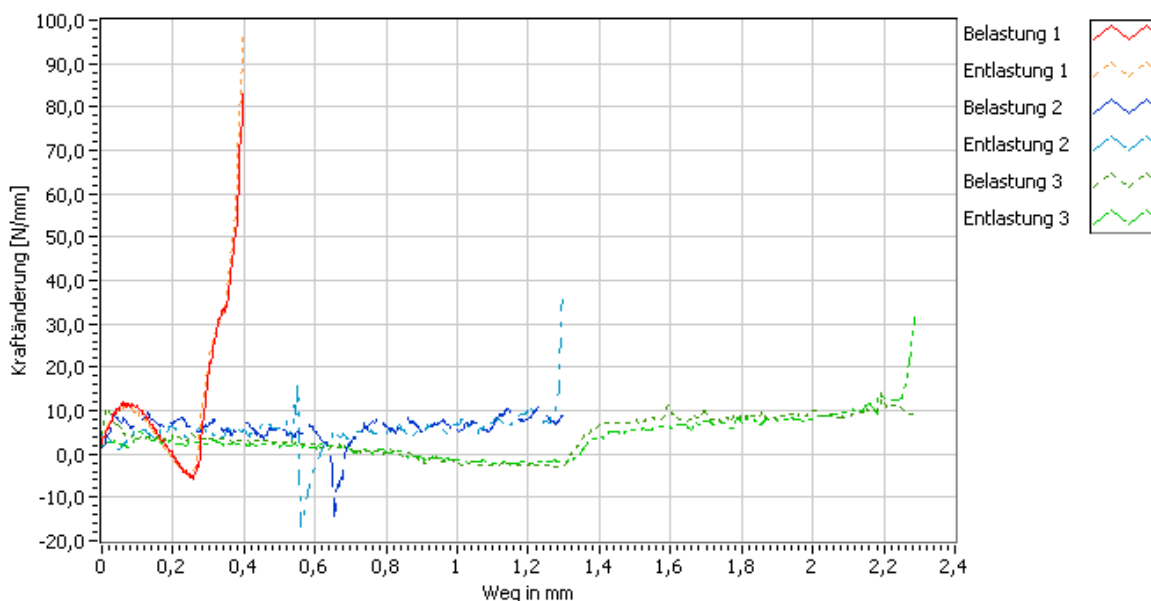


Abbildung 70: Differentialdarstellung der drei Grundtypen nach Abbildung 62.
1. Knackfrosch, 2. Mikroschalter, 3. Gummischaltmatte. Die Kennlinien sind mit einer Grenzfrequenz von einem Viertel der Abtastfrequenz Tiefpass gefiltert.

6.3.4 Gedämpfte Schwingung

Nach Kuchenbecker et al. (2005) nimmt der Mensch ereignisorientiert wahr. Er führt die Wahrnehmung einer Kollision als Ereignis auf die haptische Erkennung einer gedämpften

Schwingung (PT_2 -Glied) zurück. Dieser Ansatz kann als Kraft bzw. Beschleunigung über der Zeit dargestellt werden.

Ein mechanischer Impuls kann eine solche Schwingung verursachen. Betrachtet man den Kraftsprung, so wird die Kraftänderung den Impuls beeinflussen, wodurch eine Verbindung zu der Differentialdarstellung in Kapitel 6.3.2 herzustellen ist.

Physiologisch kann die Erkennung von Schwingungen den Pacini- und den Meissner-Körperchen zugeordnet werden (vgl. Kapitel 2.4.2 und Schmidt, 1995).

Abbildung 71 zeigt den Verlauf der Kraft über der Zeit eines Mikroschalters. Der erste Schwinger wird beim Hinweg, der zweite beim Rückweg am Schaltpunkt ausgelöst. Die haptische Reaktionszeit von ca. 50 ms ist gut zu erkennen (Schmidt, 1979). Sie entspricht der Zeitdauer vom Start der ersten Schwingung bis zum Erreichen des Kraft-Maximums.

Auch diese Visualisierung scheint möglich.

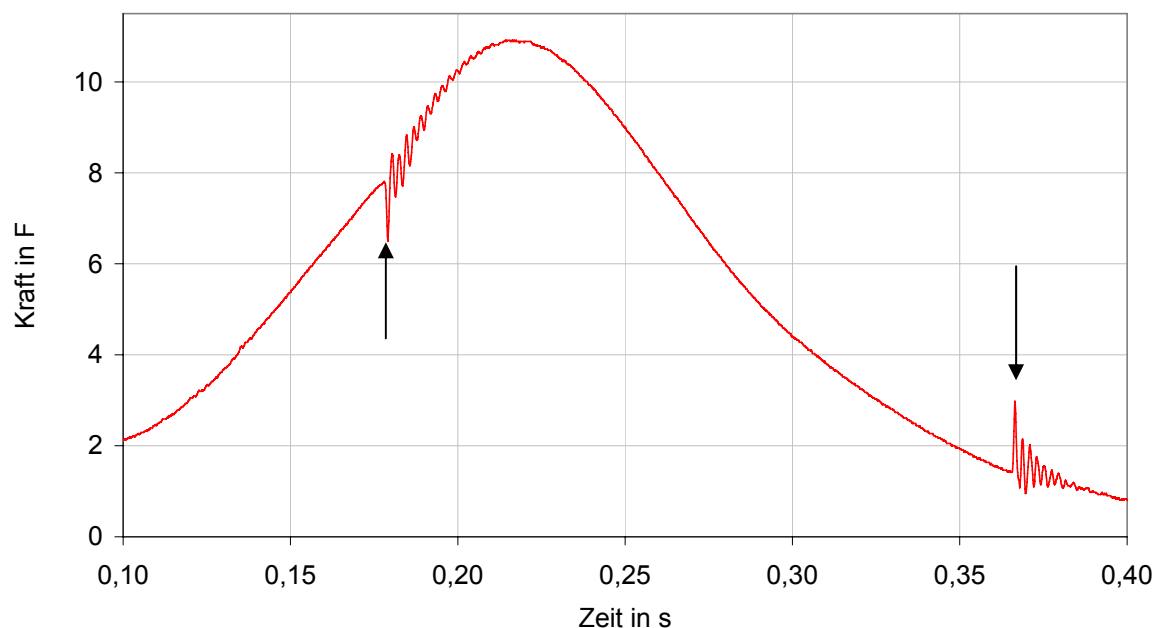


Abbildung 71: Impulsdarstellung eines Drucktasters mit Mikroschalter als Kraft-Zeit-Diagramm. Die durch den Schaltpunkt ausgelösten gedämpften Schwingungen sind gut erkenntlich (Hin- und Rückweg).

6.3.5 Zusammenfassung

Bezüglich der Ecken und Rundungen in Kennlinien scheint die Integralform gute Dienste leisten zu können. Jedoch scheitert sie bei der Darstellung der als prägnant einzustufenden Schaltpunkte. Sie werden nicht richtig abgebildet. Die Kraft-Weg-Darstellung, eine Differentiation oder eine Darstellung über der Zeit zeigt demgegenüber anschauliche Effekte. Die Erkennung eines haptischen Ereignisses kann dies erklären. Es scheinen demzufolge beide Effekte eine Berechtigung zu haben. Das Zusammenspiel der verschiedenen Visualisierungen ist nicht bekannt und wird in den folgenden Versuchsreihen näher untersucht.

6.3.6 Hypothesenbildung

Die dargestellten Überlegungen erweitern das Spektrum der Möglichkeiten im Vergleich zu den Versuchen zur Rastung von Drehstellern. Die Vorgehensweise hat sich in diesen Versuchen als brauchbar erwiesen und wird daher auch in diesem Fall eingesetzt werden.

Die Hypothesen (vgl. Kapitel 5.2.2) können teilweise angepasst übernommen werden. Andere entfallen vollständig, da eine Anwendung, speziell zur Bewertung von Rastungen, nur schwer auf die tastender Kennlinien, übertragbar ist.

Die Hypothese zur Ruhelage (R.1.) entfällt, da diese Bedienelemente nicht einrasten.

Die Hypothese zur Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit (R.2.) wird auf die Ähnlichkeit (R.2.a) reduziert, da zunächst die günstigste Annäherung des Kraftsprungs ermittelt werden muss:

T.2.a Ist eine Annäherung einer „runden“ Kurvenform durch einfache „eckige“ Näherungen möglich, so unterstützt dies die Integralform als bevorzugte Visualisierung.

Eine Asymmetrie kann nur bei Zufassungsgriff und bei einer Unterschreitung der Nulllinie bewertet werden, was beides in diesem Anwendungsfall nicht gegeben ist.

Damit reduzieren sich die grundlegenden Hypothesen auf die o. g. Hypothese T.2.a.

Der übergeordneten Hypothese R.4 (Kapitel 5.4) fällt in diesem Versuch die maßgebliche Beweisführung zu, da nur eine grundlegende Hypothese verbleibt. Sie ist bereits auf das vorgesehen Versuchsmuster beschränkt formuliert:

T.4. Intuitive haptische Kennlinien:

a. Wird von Probanden eine grafische Visualisierung signifikant bevorzugt ausgewählt, so ist dies die intuitivste Visualisierung der verwendeten Darstellungen.

Hypothese R.5 lässt sich, aufgrund der Ähnlichkeit des mechanischen Aufbauprinzips mit Keilwirkung von Drucktastern, anwenden, ist jedoch nur informativ zu betrachten:

T.5. Zusammenhänge haptischer und visueller Wahrnehmung:

a. Wird von Probanden eine der grafischen Visualisierungen signifikant bevorzugt ausgewählt, dann existiert eine haptische Vorstellung.

b. Wird von Probanden eine der grafischen Visualisierungen signifikant bevorzugt ausgewählt, dann gibt es eine Übereinstimmung zwischen haptischer und visueller Vorstellung.

6.4 Versuch zur Prüfung der Visualisierung bei Drucktastern

Anhand der Versuchsreihen sollen die im vorigen Kapitel erörterten Überlegungen, zur Visualisierung der Haptik von Drucktastern, geprüft werden. Die Versuche sind stark an den Tests aus Kapitel 5 orientiert und bestehen ebenfalls aus zwei Aufgaben. Anstelle des rotatorischen Simulators wird jedoch der in Anhang C erläuterte haptische Simulator für Drucktaster eingesetzt.

6.4.1 Versuchskonzept

Die Überprüfung der Hypothesen wird durch einen haptischen Paarvergleich und eine Zuordnungsaufgabe des haptischen Eindrucks zu grafischen Darstellungen durchgeführt.

Der haptische Paarvergleich soll zudem die Fragestellung zur Annäherung runder Kennlinien prüfen.

Aufgabentyp 1: Haptischer Paarvergleich

Den VPn werden am Simulator paarweise haptische Charakteristika vorgestellt. Die VPn kann wiederum beliebig zwischen den Partnern umschalten und hat die Aufgabe die Paarung als „gleich“ oder „ungleich“ zu identifizieren.

Hintergrund

Die Überprüfung von Hypothese T.2.a ergibt eine generelle Aussage, ob eine Annäherung runder Kennlinien durch eine aus mehreren Geraden bestehende Kennlinie möglich ist.

Allerdings stellt sich zudem die Frage, nach welcher Näherungsmethode die besten Ergebnisse erreicht werden können. Es gibt mehrere Möglichkeiten einer Näherung: Neben *Extrempunkten* können die *Flanken* beider Kennlinien bestmöglich angenähert werden, aber auch die *Methode der kleinsten Fehlerquadrate* kann dafür hinzugezogen werden. Darüber hinaus kann die *Anzahl der Stützpunkte* variiert werden.

Folgende Hypothesen können daraus formuliert werden:

T.6. Näherung runder Kennlinien

- a. Werden eckige haptische Kennlinien mit einer vergleichbaren Häufigkeit wie gleichartige Kennlinien als „gleich“ identifiziert, dann ist eine Annäherung runder Kennlinien durch eckige möglich.
- b. Werden aus verschiedenen eckigen Kennlinien einzelne Typen besonders häufig als „gleich“ ausgewählt, dann sind diese als bessere und zu bevorzugende Näherung einzustufen.

Findet eine Bestätigung im Sinne von Hypothese T.6.a statt, dann ist auch Hypothese T.2a bestätigt.

Methodik

Die Synthese runder Kennlinien ist wesentlich aufwändiger als die aus Geradenstücken bestehenden eckigen Kennlinien. Die Kennlinien der Grundtypen zeigen starke Unterschiede in der Ausprägung der Kraftsprünge. Aus diesem Grund wird versucht, zwei Extrembeispielen zu genügen: einem eher flachen, geschwungenen Kurvenverlauf, vergleichbar aber nicht identisch zum Typ *Gummischaltmatte* und einem, im *Schaltpunkt steil abfallenden*, runden Kurvenverlauf zu erzeugen. Abbildung 72 zeigt die „runden“ Kennlinienformen, die als Referenz dienen.

Die Lage des Schaltpunktes ist mit ca. 4 N und 0,6 mm an Werte aktueller Taster im Kfz-Bereich angelehnt. Diese weisen eine geringere Betätigungshäufigkeit wie z. B. Tasten auf PC-Tastaturen auf, weshalb der Richtwert für häufig betätigte Tasten von 2,4 N überschritten wird. Die Synthese erfolgt durch Aufsummierung einer Sinus-Kennlinie und einer linear ansteigenden Kennlinie. Der steile Kraftsprung der zweiten Kennlinie wird durch Erhöhung der Schrittweite des Sinus zwischen den beiden Extrempunkten ($0,6 \text{ mm} < x < 0,8 \text{ mm}$) erreicht, wodurch die Kennlinie im Schaltpunkt steil abfällt.

Diese beiden sinoiden Kennlinien werden angelehnt an die Untersuchungen bei Drehstellern im Folgenden mit *Sinus flach* und *Sinus steil* bezeichnet.

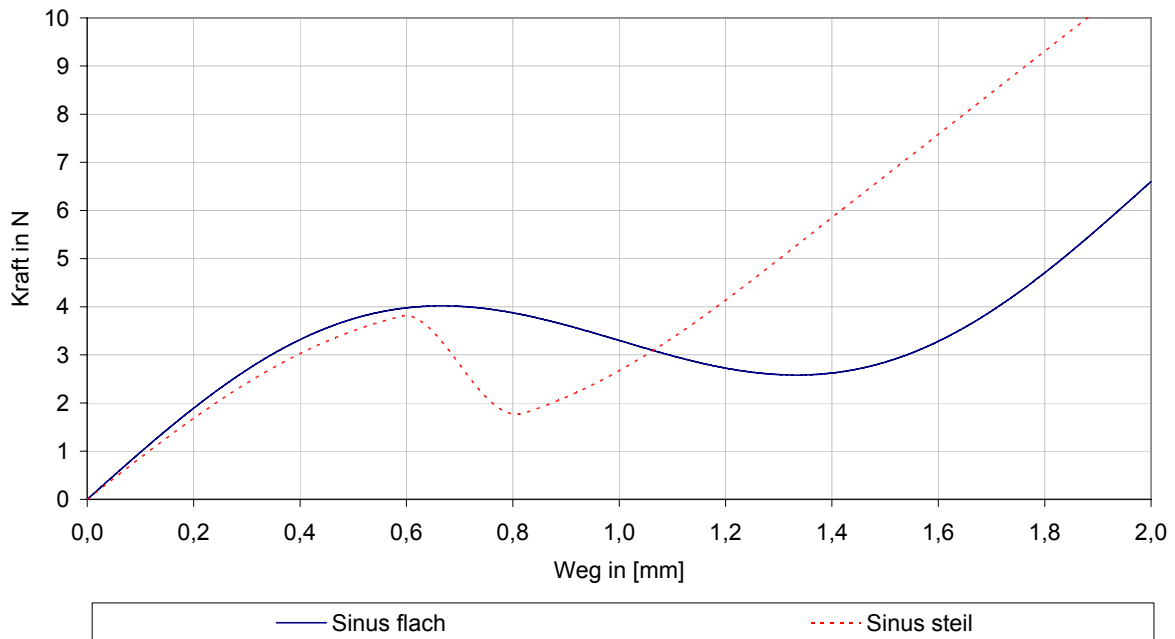


Abbildung 72: Runde Kennlinienformen, anhand deren die Möglichkeit zur Annäherung durch eckige Kennlinien geprüft wird.

Als Näherungsfunktionen werden drei sowie fünf Geradenstücke gewählt. Vier Methoden zur Näherung werden verwendet:

1. Überlagerung eines Dreiecks mit einer Geraden: Dies entspricht derselben Methode wie die Erzeugung der runden Sinusformen und ist an die Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit angelehnt. Dabei wird ein Dreieckverlauf mit einer ansteigenden Geraden überlagert. Die Parameter sind dieselben wie beim Sinus. Siehe Abbildung 73.

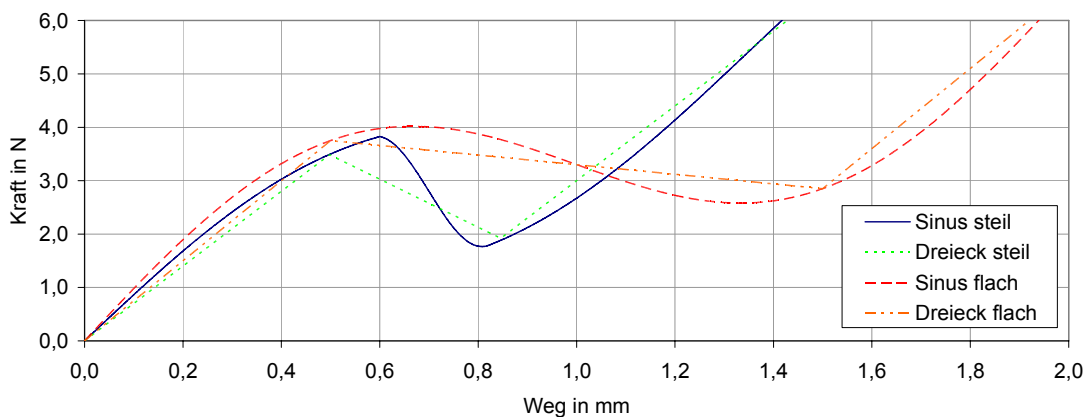


Abbildung 73: Näherung durch Überlagerung einer Dreieckfunktion. Jeweils für Sinus flach und Sinus steil. Es sind nur die Drei-Punkt-Varianten dargestellt.

2. Extrempunktorientierung: Es werden die Extrempunkte $(F_S/x_S, (F_S-\Delta F)/(x_S-\Delta x))$ der runden Kennlinien als Stützpunkte gewählt. Bei weiteren Stützpunkten werden diese mittig zwischen den benachbarten Stützpunkten auf der Kennlinie platziert. Die Extrempunkte stehen für die Lage, Höhe und in zweiter Hinsicht für die Steigung des Kraftsprungs. Siehe Abbildung 74.

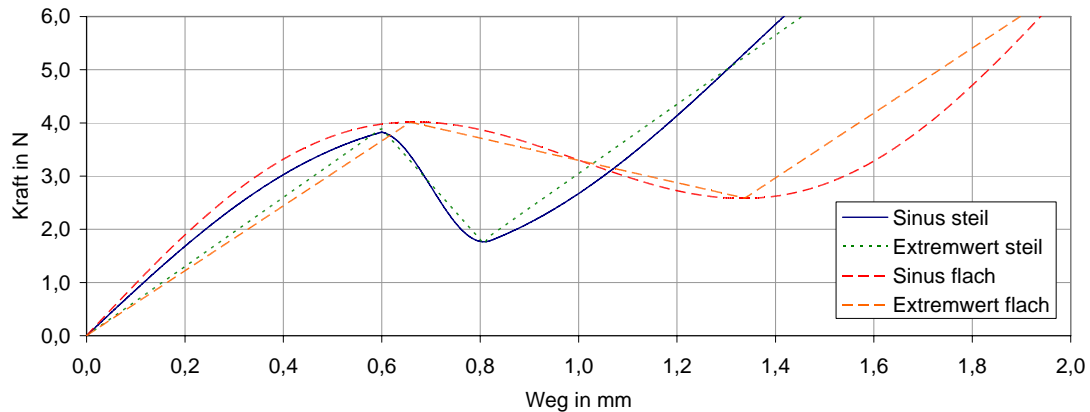


Abbildung 74: Näherung durch Orientierung an den Extrempunkten. Jeweils für Sinus flach und Sinus steil. Es sind nur die Drei-Punkt-Varianten dargestellt.

3. Kraftsprungorientierung: Die Flanke des Kraftsprungs wird bestmöglich durch die Geradenstücke angenähert. Die Stützpunkte werden so gelegt, dass sie nahe an der Kennlinie liegen. D.h. die Flankensteigung im Wendepunkt gibt die Steigung der Näherung vor. Die Stützpunkte dürfen nur gering von der Kennlinie abweichen. Siehe Abbildung 75.

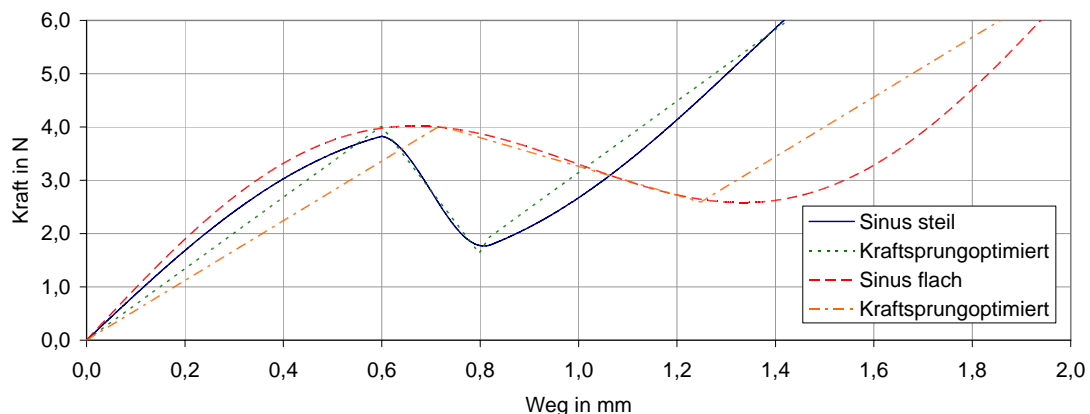


Abbildung 75: Näherung durch Orientierung an der Steigung der Flanke des Kraftsprungs. Jeweils für Sinus flach und Sinus steil. Es sind nur die Drei-Punkt-Varianten dargestellt.

4. Methode der kleinsten Fehlerquadrate: Die Stützpunkte werden mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an die Vorgabekennlinie angenähert. Die Startwerte des Verfahrens entsprechen den Werten der Extrempunktorientierung. Diese Methode soll eine möglichst geringe Abweichung der Kennlinie an die Kurvenform ergeben. Siehe Abbildung 76.

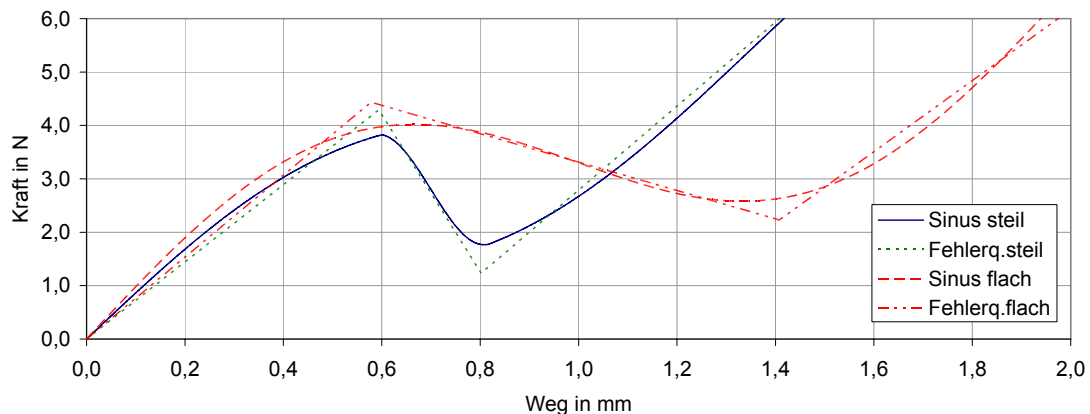


Abbildung 76: Näherung durch die Methode kleinster Fehlerquadrate. Jeweils für Sinus flach und Sinus steil. Es sind nur die Drei-Punkt-Varianten dargestellt.

Jede „runde“ Sinusform wird mit jedem Versuchspartner verglichen. Es sollen jedoch nicht nur die „runden“ Sinusformen als Vergleichsreferenz dienen, sondern auch eine möglichst gute Näherungsform dieselben Vergleiche durchlaufen. Es werden daraus Vergleichsmöglichkeiten erhofft, die weitere Rückschlüsse bzgl. Qualität der Näherung zulassen.

Zur Reduktion des Aufwandes müssen Einschränkungen bezüglich der Kombinationen getroffen werden: Erstens werden nur die runden Sinusformen und eine möglichst gut geeignete Kennlinie als Referenz hinzugenommen und nicht ein vollständiger Vergleich durchgeführt. Zum Zweiten wird die Auswahl der denkbaren Vergleichspartner eingeschränkt.

Da es unbekannt ist, welche der Näherungen die günstigste ist, wird im Vorfeld anhand subjektiver Einschätzung der Versuchsleiter der extrempunktorientierten Darstellungen die beste Eignung zugesprochen. Diese Werte sind zudem Hauptbestandteil gängiger Spezifikationen.

Auswertung

Die im Versuch ermittelten Aussagen der VPn werden nach Häufigkeiten sortiert aufgetragen. Als vollständige Übereinstimmung werden nach Erfahrungen in Kapitel 5 die Häufigkeitswerte der Referenzkennlinien angenommen. D.h. eine Näherungsform muss dieselbe Häufigkeit erreichen, um als vergleichbar zu gelten.

Neben den obigen Kombinationen sind weitere Vergleichspaarungen eingespielt, die der Bestimmung von Wahrnehmungsschwellen dienen. Diese werden, da sie keinen direkten Beitrag zur Identifikation der Visualisierung leisten, im Versuch zur Parametrisierung (Kapitel 6.5) näher erläutert.

Aufgabentyp 2: Grafische Zuordnung

Die VPn bekommen, wie bereits in Kapitel 5.5.1, zu einer haptisch vorgestellten Kennlinie sechs grafische Darstellungen geboten, von denen sie eine auswählen müssen. Die VPn sind außerdem aufgefordert, ihre Auswahl anhand der Grafiken zu erläutern. Die Aussagen werden auf Video dokumentiert und im Anschluss an den Versuch die Wortwahl interpretiert.

Eine Zuordnung zur Ruhelage wird aus o. g. Gründen nicht abgefragt.

Hintergrund

Die Überlegungen zur Visualisierung in Kapitel 6.3 und der Bezug zu den bei rotatorischen Bedienelementen erfolgten Untersuchungen (vgl. Kapitel 5.6) legen die Durchführung vergleichbarer Untersuchungen bei Drucktastern nahe.

Es sollen die Hypothesen T.4 bzw. T.5 nach Kapitel 6.3.6 überprüft werden. Entscheidender Unterschied zu den Versuchen an rotatorischen Bedienelementen sind weitere plausible Visualisierungen, zu denen sich jedoch nicht solche eindeutigen Aussagen aufgrund von Beobachtungen machen lassen:

Neben *Kraft-Weg-* und *Integraldarstellung* werden drei weitere Visualisierungen verwendet, welche die Impulshaftigkeit eines Schaltpunktes besser betonen: 1. Das *erstes Differential* (D) der Kraft über dem Weg, 2. das *zweite Differential* (D^2) der Kraft über dem Weg und 3. die Darstellung einer *gedämpften Schwingung* als der *Kraftverlauf über der Zeit* (t).

Als sechste Visualisierung wird eine als „*Senke*“ bezeichnete Kennlinie erzeugt, die von einem im Vorfeld beobachteten Eindruck des „Einrastens“ beim Drücken des Knopfes, abgeleitet ist und im hinteren Bereich eine „*Senke*“ hat. Damit wird versucht, grafisch ein Einrasten darzustellen, angelehnt an die Modellbetrachtung nach Kapitel 5.4. Sie wird aufgrund der Form im Folgenden „*Senke*“ genannt.

Damit besteht jeder Auswahlatz aus vier direkt von der echten Kennlinie abgeleiteten Visualisierungen sowie zwei weiteren plausibel erklärbaren Visualisierungen, die unabhängig von der Kennlinie erzeugt worden sind.

Die Aufgabenstellung muss von der rotatorischer Bedienelemente differenziert betrachtet werden, da die Anzahl direkt abhängiger Darstellungen größer ist, und keine beliebigen anderen Kennlinien zur Auswahl stehen. Dies setzt die Annahme voraus, dass eine der Darstellungen intuitiv häufiger gewählt werden wird. Ergebnisse bei den Drehstellern stützen diese Annahmen.

Außerdem können mehrere Darstellungen für die o. g. Impulshaftigkeit stehen, was zu einer höheren Gleichverteilung führen kann und zusätzlich analysiert werden muss. Unterschiede innerhalb der Gruppe müssen jedoch auch untersucht werden, ob hier z. B. Besonderheiten in der Kennlinienform vorliegen. Die eingesetzten Drucktaster-Kennlinien wiederum sind aufgrund der umfangreicheren Parametrisierung komplexer aufgebaut als die der Drehschalter, was die Anzahl möglicher Varianten und Abhängigkeiten erhöht.

Aus diesen Gründen wird ein erhöhter Interpretationsbedarf der Ergebnisse erwartet.

Methodik

Es werden die Häufigkeiten je Visualisierung und vorgestellter Charakteristik aufgetragen. Deren Signifikanz wird unter Berücksichtigung möglicher Gruppierungen mit einem χ^2 -Test auf Gleichverteilung geprüft. Das Antwortverhalten wird zudem mit einer Faktorenanalyse auf Korrelationen zwischen den Bewertungen der Charakteristika überprüft.

Die entstehenden Daten werden interpretiert und damit die aufgestellten Hypothesen bewertet. Die Erläuterungen der Probanden zu ihrer Auswahl sollen bei der Interpretation der Daten helfen, indem sie z. B. auf eine räumliche Betrachtung oder auf impulsartige Ereignisse der Kennlinie hinweisen.

Auswertung

Zur Überprüfung auf Gleichverteilung kommt wie bei der Prüfung der rotatorischen Visualisierung (vgl. Kapitel 5.6.1) die χ^2 -Methode mit exaktem Test zum Einsatz. Es wird aus denselben Hintergründen wie bei der Untersuchung von Drehstellern ein Signifikanzniveau von 10% festgesetzt. Die Faktoren werden mit der Hauptkomponentenmethode analysiert.

6.4.2 Versuchsaufbau

Es kommt dieselbe Versuchsumgebung zum Einsatz wie bei den rotatorischen Versuchen in Kapitel 5.6.2. Anstelle des senkrecht eingebauten rotatorischen Simulators wird waagrecht eingebaut der translatorischen Simulator verwendet. Weitere Details sind in Anhang D zu finden.

6.4.3 Versuchsdurchführung

Versuchsabfolge

Wie in der vorangehenden Versuchsreihe (Kapitel 5.6.4) wird die Versuchsreihenfolge durch einer Steigerung der Anforderungen festgelegt. Zunächst werden die haptischen Paarvergleiche, dann die Zuordnung von Haptik zu Grafik durchgeführt. Ein Versuchsabschnitt bei dem die VPn die haptische Empfindung zeichnerisch darstellen sollen, ist nicht enthalten.

Bei der Haptik-Grafik-Zuordnung wird zusätzlich eine einfache Videoauswertung der Kommentare der VPn durchgeführt.

Der Gesamttablauf (Abbildung 77) ist bis auf die oben genannten Änderungen identisch mit dem in Kapitel 5.5.4.

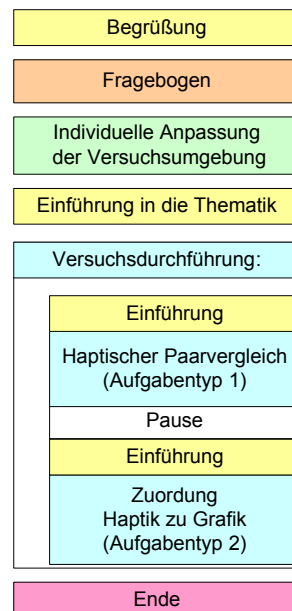


Abbildung 77: Versuchsablauf translatorische Bedienelemente

Versuchsabfolge Teilversuch 1

Der erste Teilversuch hat 59 Vergleichspaarungen, davon fünf Beispiele zur Einführung in die Thematik, die nicht mit ausgewertet werden. Dazu werden zwei identische, zwei stark unterschiedliche und ein leicht unterschiedliches Paar vorgestellt.

Es werden mit den Kennlinien *Sinus flach* bzw. *Sinus steil* alle anderen Kennlinien verglichen. Aufgrund vermuteter hoher Ähnlichkeiten zur Referenzkennlinie werden auch die 5-Punkte-*extrempunktorientierten* Kennlinien mit alle übrigen verglichen. Es werden zum Teil die einzelnen Kennlinien mit sich selbst gepaart, um die Anzahl objektiv gleicher Kennlinien zu erhöhen.

Tabelle 11 zeigt die eingesetzten Versuchspartner. Die *extrempunktorientierte* Kennlinie als geschätzte beste und die Fehlerquadrat-Annäherung als beste Annäherung an die Kurvenform sind mit drei und mit fünf Stützpunkten ausgeführt. Die zugehörigen Abbildungen der Kennlinien als Kraft-Weg-Diagramm sind in Anhang I.1 dargestellt.

Tabelle 11: Eingesetzte Versuchspartner.

Näherungsmethode	3 Stützpunkte	5 Stützpunkte
1. Überlagerung Dreieck	X	-
2. Extrempunktorientierung	X	X
3. Kraftsprungorientierung	X	-
4. Methode der kleinsten Fehlerquadrate	X	X

Die Versuchsreihe umfasst außerdem weitere Paarungen. Die gesamte Abfolge ist zufällig ausgewählt und in Anhang I.3 aufgeführt.

Versuchsabfolge Teilversuch 2

Die Haptik-Grafik-Zuordnung umfasst neun zuzuordnende Kennlinien (vgl. Anhang I.5). Es werden die Kraft $F(x)$, das *Integral* I , das *erste Differential* D , das *zweite Differential* D^2 sowie die *zeitabhängige Darstellung* $F(t)$ und die als *Senke* bezeichnete Darstellung grafisch zur Auswahl geboten.

Mit den Kennlinientypen wird versucht, ein möglichst breites Spektrum abzudecken. Dabei dienen zum einen die drei Grundtypen *Knackfrosch*, *Mikroschalter* und *Silikonschaltmatte* (vgl. Kapitel 4.3.2) als Vorbild. Zum anderen werden die Parameter gezielt variiert, um offene Lücken in der Parametrisierung zu schließen, wie z. B. die konvex/konkave Flankenform vor/nach dem Kraftsprung bei „*Flanken geschwungen*“ oder die Kraftsprunghöhe bei „*Sprung*“ und „*kleiner Sprung*“. Dabei betragen die Sprunghöhen $1/2$ bzw. $1/4$ von F_S . Der Typ „*vorne flach, hinten steil*“ variiert die Flankensteigungen vor und nach zueinander, während die restlichen linear ausgeführten Kennlinien parallele Flanken vor und nach dem Kraftsprung haben.

Die Sinus und Dreieck-Varianten sind aufgrund der einfachen Synthese und der Verwendung im Paarvergleich integriert. Die verwendeten *Kraft-Weg-Kennlinien* sind in Abbildung 78 dargestellt.

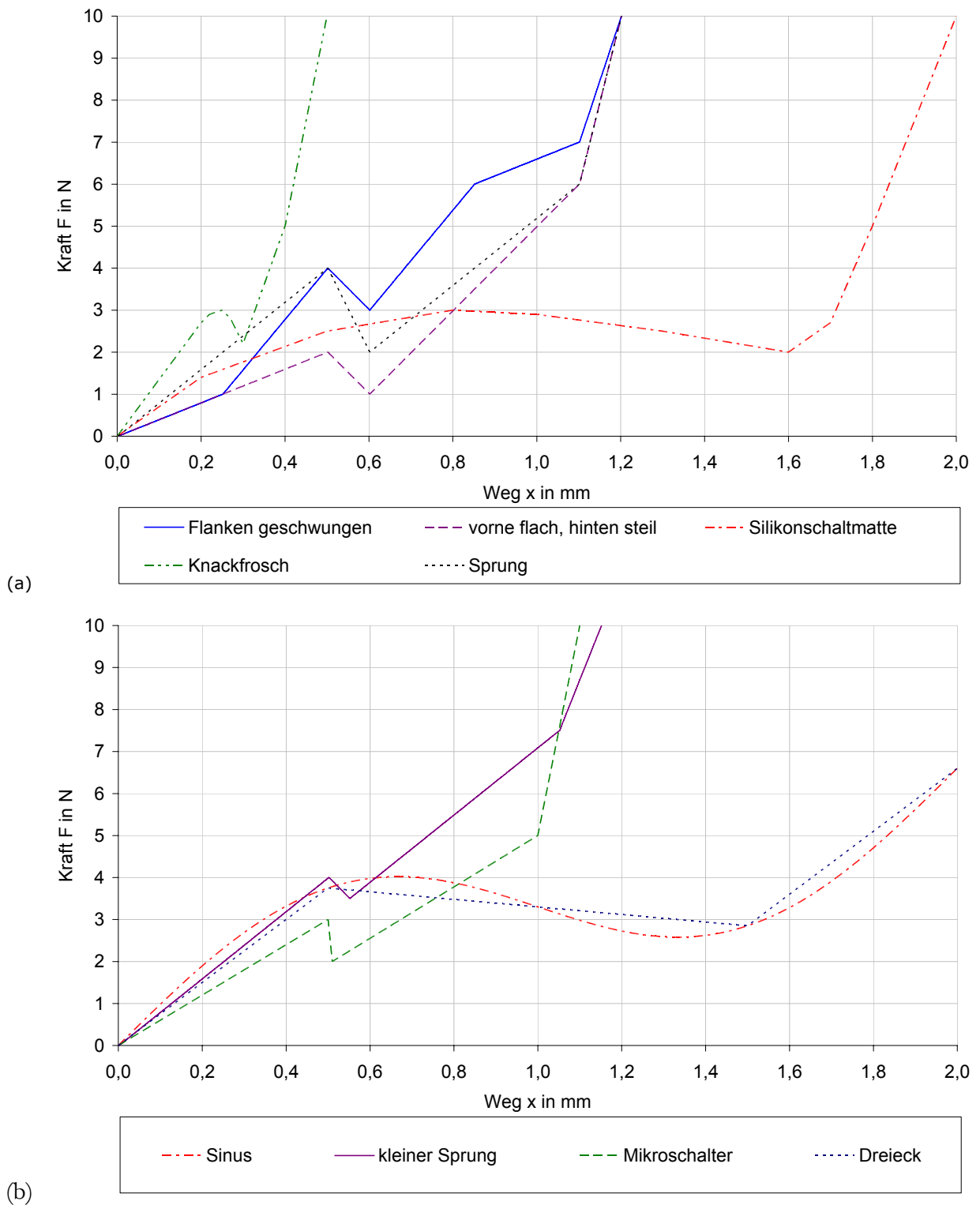


Abbildung 78: Beim Haptik-Gratik-Versuch eingesetzte Kraft-Weg-Verläufe.

Die Abfolge der Versuche ist in Anhang I.4 aufgeführt.

Versuchspersonenkollektiv

Bei den Versuchen haben 20 VPn, davon 5 weibliche und 15 männliche im Alter von 18 bis 59 Jahren, teilgenommen. Der Altersdurchschnitt beträgt 28 Jahre bei einer Streuung von 10,4 Jahren. Aus demselben Hintergrund wie schon bei den Versuchsreihen zu Drehstellern (Kapitel 5.6.3), ist es wichtig, dass keine Vorkenntnisse zur Thematik bei den VPn vorhanden sind, um eine Einflussnahme durch erlernte Zusammenhänge zu vermeiden.

6.4.4 Diskussion der Versuchsergebnisse

Teilversuch 1: Haptischer Paarvergleich

Die Ergebnisse werden zunächst nach „*Sinus flach*“ und „*Sinus steil*“ getrennt, anschließend gemeinsam bewertet. Die Häufigkeiten sind in Abbildung 79 aufgetragen. Orientiert an den zusammengefassten Ergebnissen sind die Häufigkeiten von links nach rechts absteigend angeordnet.

Beobachtungen

Ganz links ist der gleichpaarige Vergleich *Sinus – Sinus* aufgetragen, der erwartungsgemäß die höchste Übereinstimmung in beiden Vergleichsreihen erreicht.

Paarvergleiche flacher mit steilen Kennlinien wurden in keinem Fall als „gleich“ bewertet, was ein Hinweis auf einen großen Einfluss dieser Parameter ist. Dies deckt sich mit Beobachtungen bei rotatorischen Bedienelementen, wo die Winkelanteile der Flanken entscheidend die Unterscheidbarkeit beeinflussen.

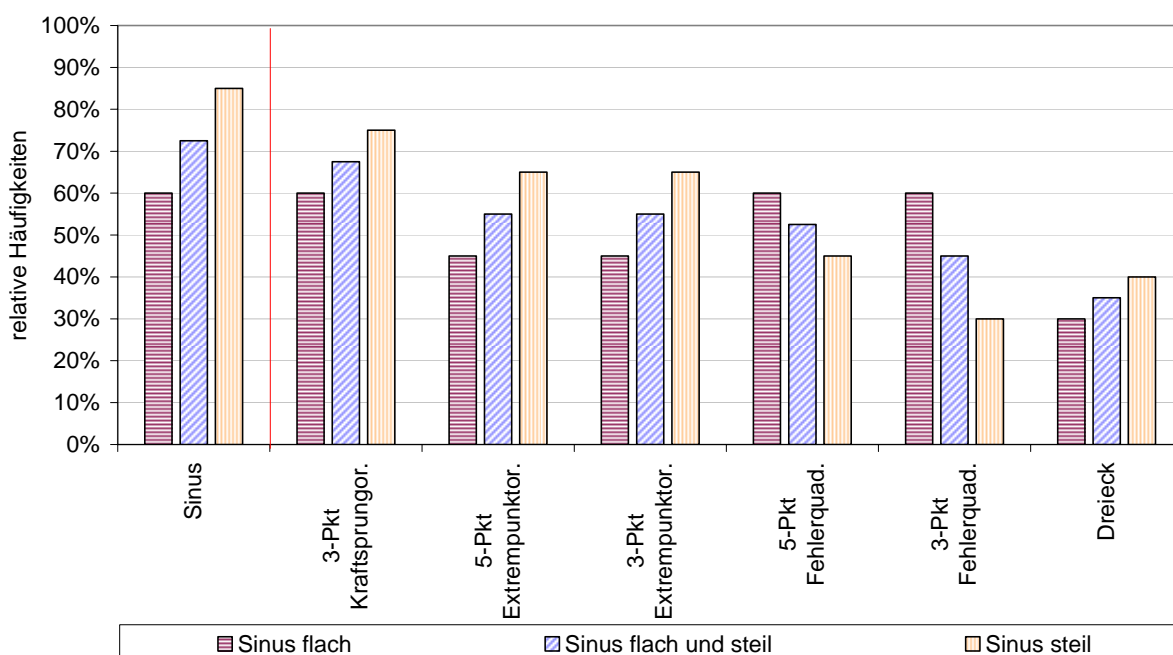


Abbildung 79: Häufigkeitsverteilung der „gleich“-Urteile von „Sinus flach“, „Sinus steil“ und beide zusammengefasst. Die Rubriken wurden jeweils mit der entsprechenden Sinusform verglichen. Die auf der linken Seite abgetrennte Rubrik ist die Referenzmessung der beiden Sinus-Kennlinien mit sich selbst.

Geeignete Näherungsverfahren

Das Vergleichsniveau des „*Sinus flach*“ mit sich selbst liegt mit 60% recht nieder. Dieses Niveau erreichen auch der *kraftsprungorientierte*, sowie beide *Fehlerquadratnäherungen*. Die *extrempunktorientierten* Kennlinien schneiden wesentlich schlechter ab, letztlich nur noch die Dreieckannäherung ist mit 30% schlechter.

Bei „*Sinus steil*“ werden die *extrempunktorientierten* Kennlinien wieder als ähnlicher eingeschätzt, jedoch ist auch hier die *kraftsprungorientierte* Kennlinie überlegen, erreicht jedoch nicht ganz das Niveau von „*Sinus steil*“. Eventuell könnte hier eine 5-Punkte Näherung der *kraftsprungorientierten* Näherung abhelfen.

Demzufolge ist nicht wie vorweg angenommen die *extrempunktorientierte* Näherung die günstigste Methode zur Näherung, sondern die *kraftsprungorientierte*. Sie erreicht sowohl bei flacher als auch bei steiler Ausprägung des Schaltpunktes die höchste Zustimmung. Aus diesem Grund wird die Vergleichsreihe der extremwertorientierten Kennlinie zurückgestellt und nicht näher bewertet. Diese Ergebnisse sind in Anhang I.6 aufgeführt.

Demzufolge ist die Berücksichtigung der Flanke der maßgebliche Bestandteil für eine Näherung runder Kennlinien. Auch die extremwertorientierte Kennlinie wird am besten durch die kraftsprungoptimierte Kennlinie angenähert.

Eine Betrachtung der Flanken der verschiedenen Kennlinien, anhand der Darstellungen in Anhang I.6.2, zeigt hier aussagekräftige Zusammenhänge:

Bei „*Sinus flach*“ stimmen die Steigungen von *Fehlerquadratorientierung* und *kraftsprungorientierten* Darstellungen nahezu überein, während die jeweiligen F_s leicht variieren. Die Steigungen der *extrempunktorientierten* Kennlinien verlaufen noch etwas flacher, die Dreieckform ist sehr flach.

Bei „*Sinus steil*“ fällt die 3-Punkt *fehlerquadratorientierte* Kennlinie sogar leicht steiler als die Sinuskennlinie aus. Die Steigung der *kraftsprungoptimierten* Kennlinie ist flacher, die Darstellungen des Kraftsprungs stimmen nahezu überein, während die jeweiligen F_s leicht variieren.

Unabhängig von der Kennlinienform lässt sich Hypothese T.2.a als bestätigt einstufen.

Unterscheidung flach – steil

Die Bewertungen der flachen und steilen Näherungen zeigen Unterschiede in den Möglichkeiten zur Näherung. So erreichen die *Fehlerquadrat*-Näherungen bei flachen Kennlinien eine bessere Annäherung als, die für steile Kennlinien besser geeignete Extremwert-Näherungen. Interessanter Weise scheint es bei flachen Kraftsprüngen gleichgültig zu sein, ob drei oder fünf Punkte verwendet werden, während bei steilen Kraftsprüngen Differenzen entstehen.

Für die Parametrisierung von Kennlinien bedeutet dies, dass vor allem die Steigung des Kraftsprungs wesentlichen Einfluss auf das haptische Empfinden zeigt und hier geringere Differenzschwelle vorherrschen.

Teilversuch 2: Haptik-Grafik- Zuordnung

Zunächst werden die Ergebnisse auf Gleichverteilung geprüft. Die Ergebnisse der verbleibenden Gruppen werden weitergehend interpretiert.

Test auf Gleichverteilung

Wie bei rotatorischen Bedienelementen wird das Antwortverhalten mittels exaktem χ^2 -Test auf Gleichverteilung der Versuchsergebnisse, bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 10\%$, geprüft. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 12: Signifikanzwerte der Häufigkeitsverteilungen nach SPSS. Details in Anhang I.6.4.

Kennlinienform	exakte Signifikanz
Flanke geschwungen	0,194
Sinus	0,048
Vorne flach, hinten steil	0,125
Kleiner Sprung	0,025
Mikroschalter	0,005
Dreieck	0,000
Silikonschaltmatte	0,701
Knackfrosch	0,062
Normaler Sprung	0,005

Nach dem Test scheidet die Kennlinie „*Silikonschaltmatte*“ eindeutig aus, die Kennlinien *Flanke geschwungen* und „*Vorne flach, hinten steil*“ liegen im Indifferenzbereich. Da z. T. vergleichbare Darstellungen in den Karten vorhanden sind, werden dennoch alle Charakteristika analysiert. Dies kann dazu beitragen, Gruppen ähnlicher Aussage zu identifizieren.

Die folgende Betrachtung bezieht sich auf die als signifikant eingestuften Kennlinien.

Dabei stehen I für *Integral* der Kraft-Weg-Kennlinie, P für „*proportional*“, also die *Kraft-Weg-Kennlinie* selbst, D für *erstes Differential*, D^2 das *zweite Differential* und t für die *zeitabhängige Darstellung* einer gedämpften Schwingung. „*Senke*“ steht für die entsprechende Darstellung (vgl. Kapitel 6.4.1).

Die Video-Aussagen der VPn sind ebenfalls in die Auswertung mit einbezogen.

Flanken geschwungen

Tabelle 12 zeigt die Häufigkeitsverteilung dieser Bewertung. Die Verteilung ist aufgrund des Tests dem Indifferenzbereich zuzuordnen ($\alpha=18\%$).

Bei dieser Kennlinienform wird die *zeitabhängige Darstellung* t mit 35% am häufigsten gewählt.

Die *Kraft-Weg* P sowie die *Differentialdarstellung* D folgen mit je 20%. Die *Senke* mit 15% und das *Integral* I und das *zweite Differential* D^2 mit je 5%.

Auffällig ist der große Anteil der eher impuls-orientierten Darstellungen t , D und D^2 . Demgegenüber steht P und *Senke* als vergleichbare Blöcke, also einer *Kraft-Weg-Darstellung*. Die Integraldarstellung ist mit 5% auch nur eine Randerscheinung und wird als ‚nicht gewertet‘ interpretiert. Auffällig im grafischen Vergleich ist der, im Vgl. zu den Übrigen, flache Kanten- und Peak-freie Verlauf der Integraldarstellung. Die VPn fordern demzufolge eine Kante oder Ecke. Die D^2 -Darstellung besitzt wohl zu viele hohe Peaks, so dass diese als mehrfache Schaltpunkte identifiziert werden. Die Aussagen der VPn bestätigen durchgängig ein hartes, eckiges und kantiges Bedienelement mit einem klar erkennbaren Schaltpunkt.

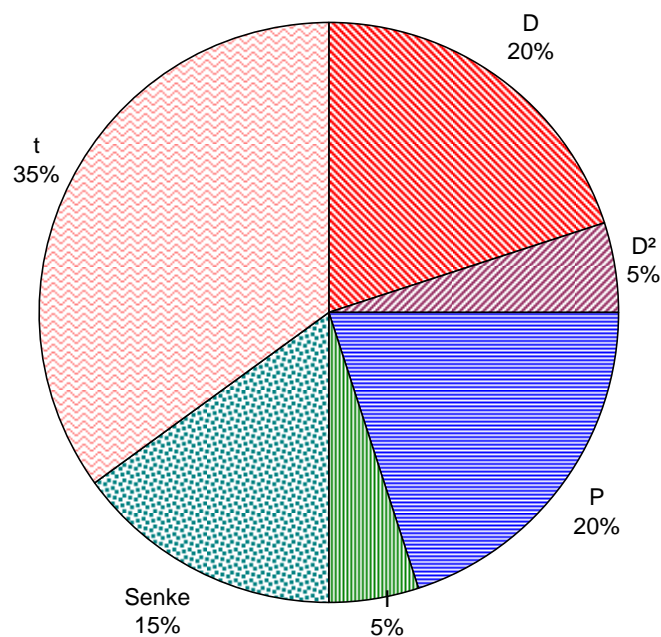


Abbildung 80: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 1 „Flanke geschwungen“ ($p=19,4\%$)

Sinus

Die Verteilung des *Sinus* ist sehr gleichmäßig auf D, P, I und *Senke* verteilt, wobei D und P mit 30% den höchsten Anteil haben. Die einzige in diesem Fall wirklich impulshafte Darstellung *t* wird nicht gewählt. Bei näherer Betrachtung der Auswahl stellt sich heraus, dass wie bei rotatorischen Bedienelementen die Integration und Differentiation von Sinus wiederum Sinusformen ergeben und somit eine starke Ähnlichkeit besteht. Impulshafte Darstellungen werden in diesem Fall nicht ausgewählt. Die Aussagen der VPn beschreiben durchgängig eine sehr weiche Charakteristik ohne klaren Peak oder Schaltpunkt, was sich mit der Auswahl deckt.

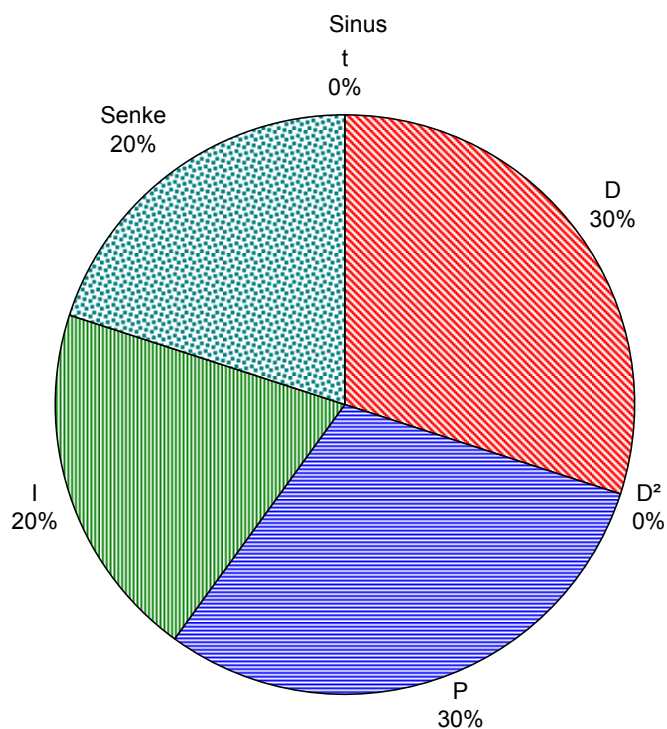


Abbildung 81: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 2 „Sinus“ (p=4,8%)

Vorne flach, hinten steil

Die Verteilung nach Abbildung 82 ist vergleichbar mit „*Flanken geschwungen*“ verteilt, jedoch sind hier die Anteile der kantigen, bzw. impulshaften Darstellungen größer. Auch diese Kennlinie scheint gleichverteilt mit $p=12,5\%$.

Wieder dominiert *t* mit 35%, gefolgt von *D* mit 25% und *D*² mit 10%. Den Gegenpol halten die *Senke* und die *Kraft-Weg-Darstellung P* mit je 15%. Das *Integral I* wird nicht ausgewählt.

Die VPn beschreiben einen harten Schaltpunkt sowie eine knackige, kantige oder ruckartige Ausprägung. Auch hier kann von einer klaren impulsorientierten Darstellung gesprochen werden. Die Gleichverteilung kann auf die Auswahl verschiedener Grafiken, mit vergleichbarem Charakter zurückgeführt werden.

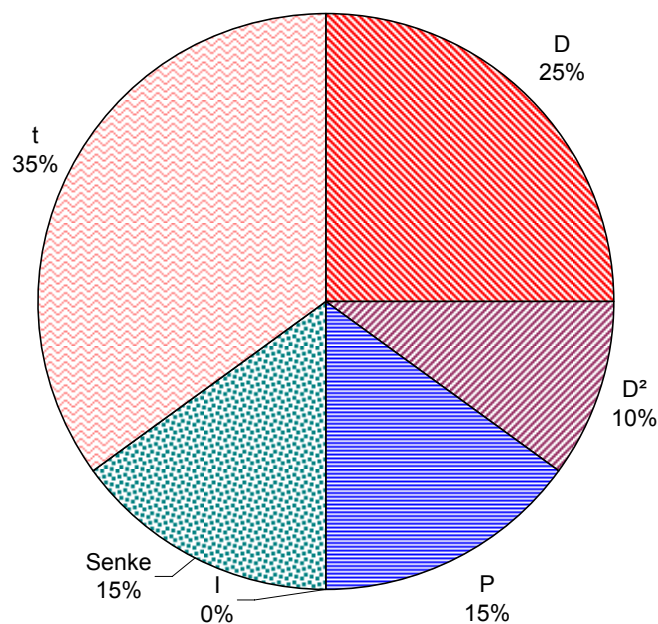


Abbildung 82: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 3 „vorne flach hinten steil“ ($p=12,5\%$)

Kleiner Sprung

Die Verteilung *kleiner Sprung* nach Abbildung 83 zeigt einen hohen Integral-Anteil, aber auch starke t- (25%), bzw. D-Anteile (5%) und P-(20%) und *Senke*-(10%) Anteile.

Nach den Aussagen der VPn wurde der I-Verlauf aufgrund seines gleichmäßigen, ruhigen Verlaufes gewählt. Teilweise wurde ein schwacher Schalterpunkt erwähnt, was auf die vorhandene Auswahl der t-Darstellung hinweist.

Die Kennlinie zeigt mit einem Sprung eindeutig einen impulshaften Charakter, der jedoch zu schwach ausgeprägt scheint, so dass von einem Großteil der Probanden doch eher ein *Integral* gewählt wird. Zutraglich zur Auswahl der t-Darstellung ist in diesem Fall eine Überlagerung des Integrals in der t-Darstellung, was für die Integraldarstellung mit einem Impuls spricht. Dieses Bedienelement zeigt dementsprechend beide Eigenschaften: die Wahrnehmung des Integrals mit einem Schalterpunkt in Form eines Schwingers.

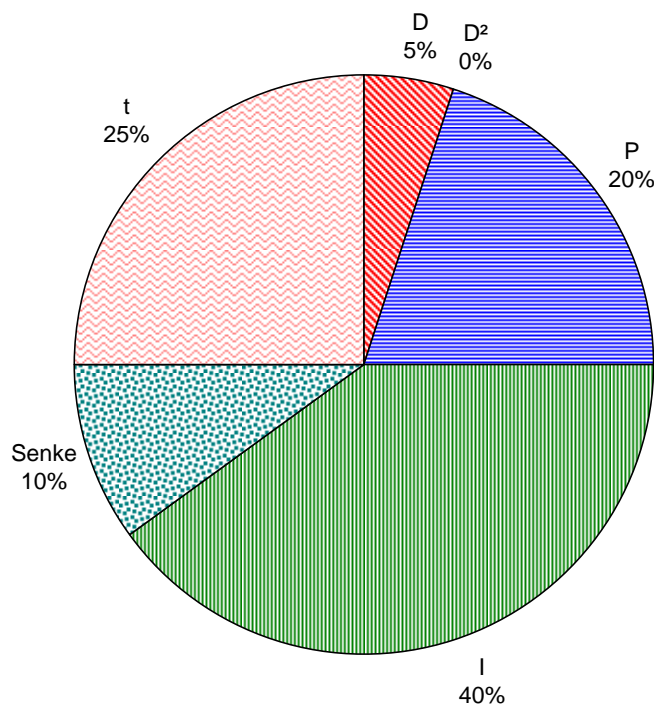


Abbildung 83: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 4 „kleiner Sprung“ (p=2,5%)

Mikroschalter

Die Verteilung *Mikroschalter* in Abbildung 84 zeigt einen starken D^2 Anteil (40%) und einen nahezu gleichstarken P-Anteil. Ordnet man *Senke* und P-Anteil sowie t, D und D^2 jeweils einer Gruppe zu, so ergibt sich ein 50%iges Verhältnis zwischen beiden Visualisierungen. Lediglich die I-Darstellung wird nicht gewählt.

Die VPn bezeichnen die Charakteristik als knackig, kantig und nicht-geschwungen.

Diese Darstellung zeigt eine klare impulshafte Eigenschaft. Es ist für die VPn jedoch schwierig diese Impulshaftigkeit grafisch zu beschreiben. Letztlich scheint eine steile Kante diese Impulshaftigkeit auszudrücken, sei dies in Form eines Peaks oder eines Sprungs.

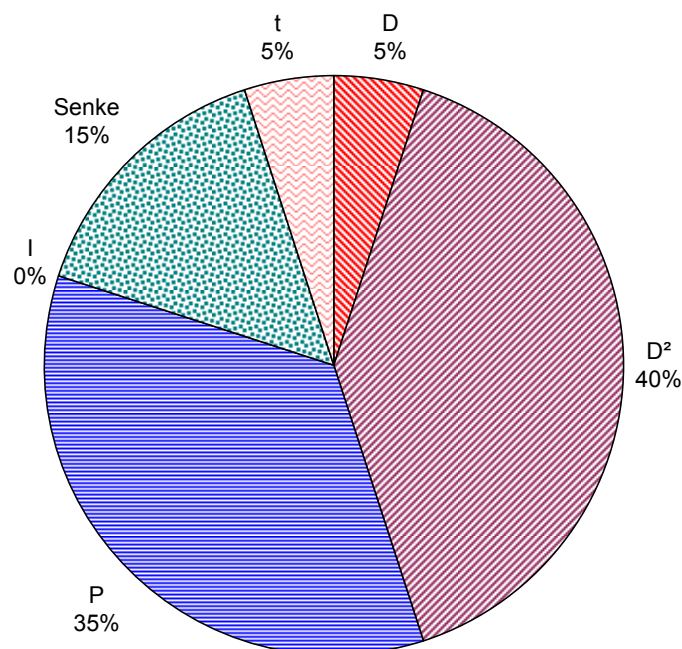


Abbildung 84: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 5 „Mikroschalter“ ($p=0,5\%$)

Dreieck

Die Verteilung des *Dreieck* (Abbildung 85) zeigt klare Bestimmung durch das *Integral I*. Die *Senke*, D und P werden auch häufig gewählt, zeigen in der Abbildung eine weite Darstellung, während die impulshaften Darstellungen t und D^2 nicht gewählt werden.

Die Charakteristik wird als weich und ohne Rastpunkt bezeichnet. Dies erfüllt die Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit, indem die Ecke nicht als solche erkannt wird.

Diese Darstellung vermittelt demzufolge wenig impulshaftes, eher einen weichen, weiten Eindruck.

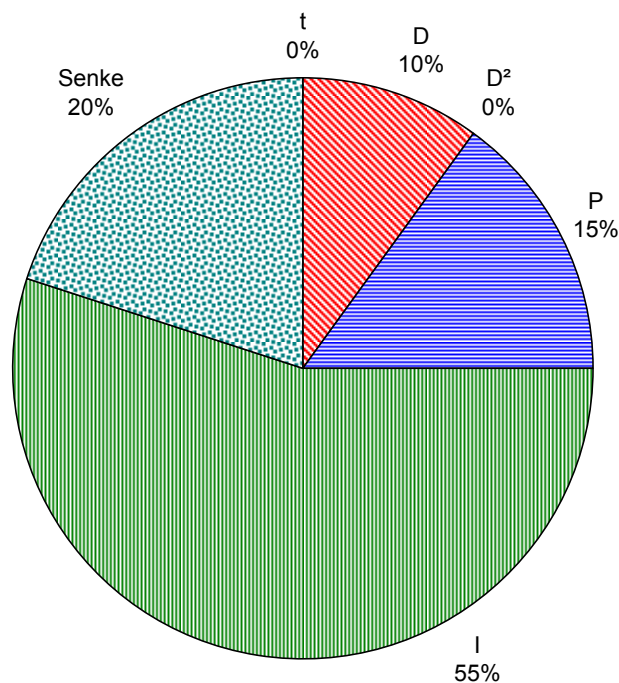


Abbildung 85: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 6 „Dreieck“ (p=0,0%)

Silikonschaltmatte

Die Kennlinie ist nach dem Test mit $p=70,1\%$ als gleichverteilt einzustufen.

Mit 25% haben die *Senke* und die *Kraft-Weg-Darstellung* die höchsten Anteile, gefolgt mit 20% von der I-Darstellung. Impulsbehaftete Darstellungen D, D^2 und t werden jeweils zu 10% ausgewählt. Impulshafte Darstellungen wie t oder D^2 werden kaum erkannt. Die D-Darstellung ist schwer einzuordnen, evt. etwas zu fremd. Die Favoriten *Senke*, *Kraft-Weg* und *Integral* können als ruhig und rund bezeichnet werden. Aussagen der VPn bestätigen einen weichen Kurvenverlauf, teilweise wird ein leichter Schaltpunkt erkannt, generell ist diese Kennlinie jedoch den impulsfreien Kennlinien zuzuordnen und die offensichtliche Gleichverteilung kann wieder auf ähnliche Darstellungen zurückgeführt werden.

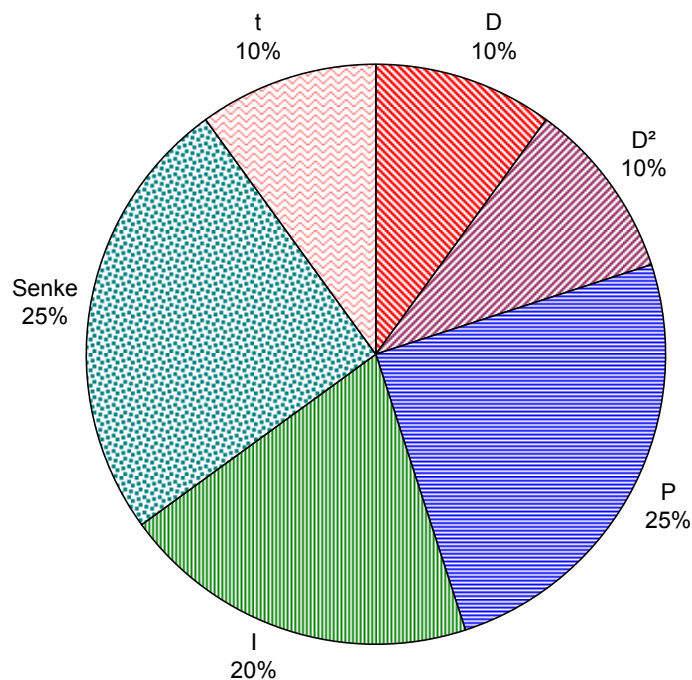


Abbildung 86: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 7 „Silikonschaltmatte“ ($p=70,1\%$)

Knackfrosch

Die Verteilung nach Abbildung 87 zeigt eine klare Tendenz zu D und D^2 -Darstellung mit 30%, bzw. 35%. P mit 15%, *Senke* und t mit je 10% sowie keinem Anteil der *Integraldarstellung I*.

Die Aussagen der VPn ergeben einen sehr kurzen, sehr harten Taster mit einem, z. T. mehreren harten Schaltpunkten.

Diese Charakteristik besitzt eine starke Impulshaftigkeit, was sich in der Wahl der *Differentialdarstellungen* widerspiegelt.

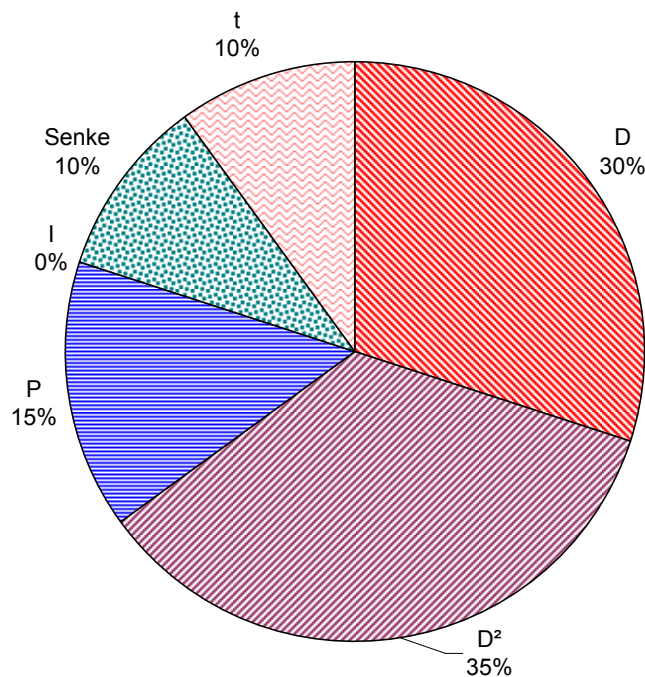


Abbildung 87: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 8 „Knackfrosch“ (p=6,2%)

Sprung

Die Auswahl in Abbildung 88 zeigt eine klare Dominanz von *Senke* (40%) und *Kraft-Weg-Anteil* (35%). *Integral* wird nicht gewählt, während *t* zu 15% und *D*, bzw. D^2 zu je 5% gewählt werden. Den Aussagen zufolge benötigt man viel Kraft und ein klarer Schaltpunkt ist vorhanden. Dieser klare Schaltpunkt kann in den meist gewählten Darstellungen *P* und *Senke* gut nachvollzogen werden. Das Bedienelement wird nicht als hart und kurz wie im vorigen Beispiel bezeichnet, was vermutlich die *D*- und *t*-Darstellungen etwas ins Hintertreffen geraten lässt.

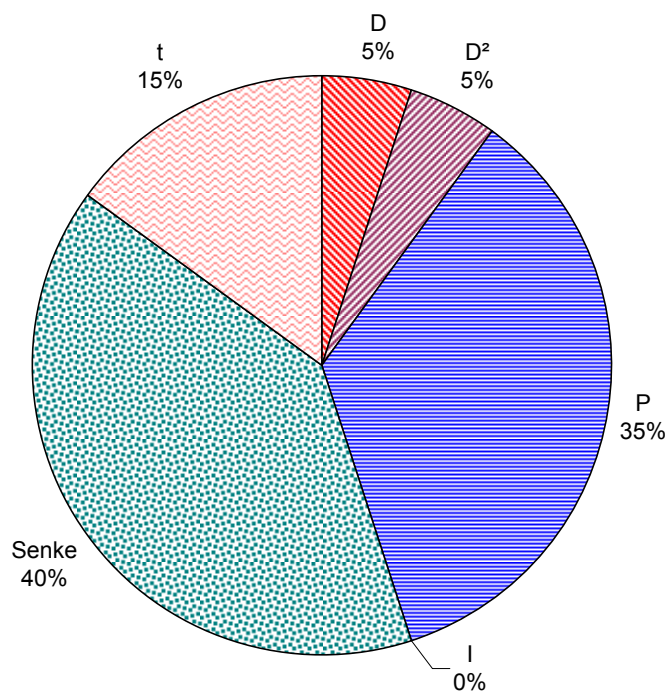


Abbildung 88: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 9 „Sprung“ (p=0,5%)

Vergleichbarkeit, übergeordnete Betrachtung der Bewertungen

Die Frage, welche Darstellung die geeignete zur Beschreibung von Drucktastern ist, lässt sich nicht eindeutig beantworten. Es kann jedoch klar festgestellt werden, dass es zwei bis drei Gruppen von Bedienelementen mit unterschiedlich bevorzugten Visualisierungen gibt (vgl. Tabelle 13):

Die *Integraldarstellung* scheint, zumindest für eine Gruppe eher als *weich* einzuschätzender Bedienelemente eine Beschreibung zu sein. Dazu gehören *Sinus*, *Dreieck*, *kleiner Sprung* und *Silikonschaltmatte*.

Mit zunehmender Ausprägung eines Schaltpunktes lösen die übrigen Visualisierungen die *Integraldarstellung* nahezu vollständig ab. Sie scheinen den Eindruck des Schaltpunktes besser zu vermitteln.

Die Darstellungen *Senke* und *Kraft-Weg* sprechen durchgängig einen Teil der VPn an. In den Charakteristika *Silikonschaltmatte* und *Sprung* dominieren beiden gemeinsam, was Grund zur Annahme gibt, dass beide Visualisierungen die Kennlinien in ihrer Charakteristik beschreiben können und nicht nur als „Rauschen“ der Antworten zu interpretieren sind.

Im Vergleich zu den Ergebnissen in Kapitel 5, scheint bei translatorischen Bedienelementen kein einheitliches inneres Bild über den Aufbau bzw. die Funktionsweise zu bestehen.

Zur Prüfung der Zusammenhänge werden die Ergebnisse von Tabelle 13 mittels einer Faktorenanalyse untersucht. Die rotierte Korrelationsmatrix ist in Anhang I.6.5 zu finden. Es ergeben sich drei Faktoren, die zunächst nicht näher benannt werden.

In der letzten Spalte von Tabelle 13 ist jeweils der stärkste Faktor aufgetragen. Die Markierungen durch hinterlegte Felder zeigen die wesentlichen Einflussgrößen der Faktoren. Zu beachten sind die Vorzeichen bei Faktor 1, die für eine gegensätzliche Bewertung stehen. Dies zeigt eine bipolare Konstellation der untersuchten Kennlinien, deutet also auf einen Faktor hin, dem mit hoher Wahrscheinlichkeit technische Parameter eindeutig zugeordnet werden können.

Tabelle 13: Gewählte Häufigkeiten der Visualisierungen zu den vorgestellten Kennlinien.
Die Auswahlhäufigkeit der Visualisierungen ist in Anhang I.6.3 aufgeführt.

Nr.	Kennlinie	F	I	D	D ²	F(t)	Senke	Faktoren
1	Flanken geschwungen	20%	5%	20%	5%	35%	15%	2
2	Sinus	30%	20%	30%	0%	0%	20%	3
3	vorne flach hinten steil	15%	0%	25%	10%	35%	15%	2
4	kleiner Sprung	20%	40%	5%	0%	25%	10%	1
5	Mikroschalter	35%	0%	5%	40%	5%	15%	-1
6	Dreieck	15%	55%	10%	0%	0%	20%	1
7	Silikonschaltmatte	25%	20%	10%	10%	10%	25%	3
8	Knackfrosch	15%	0%	30%	35%	10%	10%	-1
9	Sprung	35%	0%	5%	5%	15%	40%	3

Ereignisabhängige Visualisierung

Abbildung 89 zeigt das rotierte Komponentendiagramm der Faktoren. Es können die einzelnen Gruppierungen erkannt werden. An Faktor 2 können die den Darstellungen F(t) und D, an Faktor 1 die Darstellungen mit D² orientiert werden.

Im Teildiagramm der Faktor 1 und 2 kann ein Quadrant separiert werden. Dieser trennt die integralen Darstellungen von den übrigen ab. Vergleichbares ist auch in den übrigen Teildiagrammen möglich. Damit kann eine Trennung zwischen *integralen* und *nicht integralen Darstellungen* vollzogen werden.

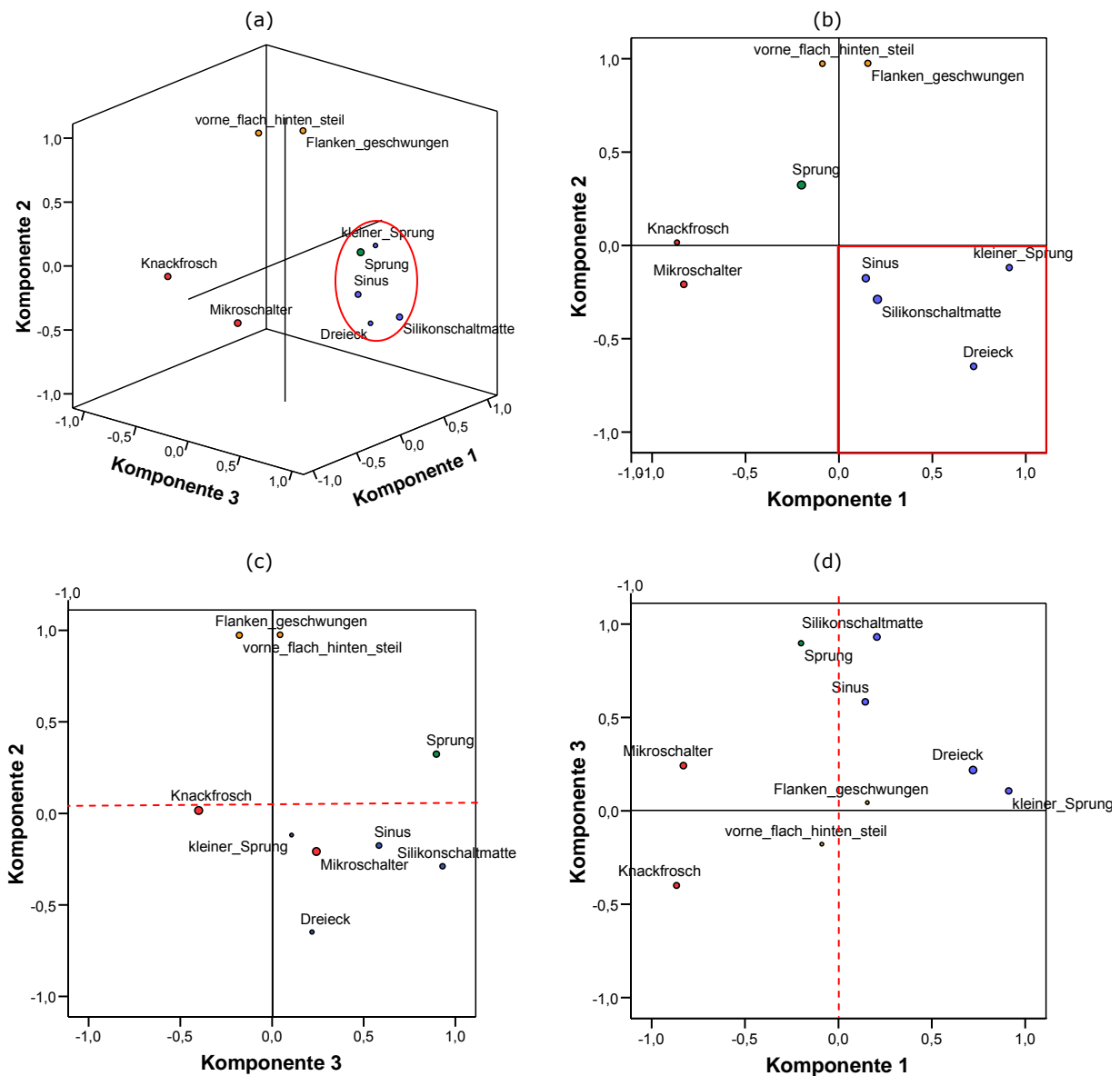


Abbildung 89: Faktorendiagramm im rotierten Raum. (a) 3D-Darstellung, (b) Teilansichten 1 und 2, (c) Teilansicht Faktoren 2 und 3, (d) Teilansicht Faktoren 3 und 1

Neben der Bewertung der Faktoren werden im Folgenden Auffälligkeiten und Ähnlichkeiten der Kennlinien diskutiert. Dies hilft Unklarheiten und Widersprüche im Kontext besser einzuordnen.

Voraussetzungen für die Zuordnung zu den Visualisierungen

In Abbildung 90 sind die Kennlinien als *Kraft-Weg-Darstellung* nach der Bewertung hauptsächlich *integrale Darstellungen* und hauptsächlich *nicht-integrale Darstellungen* sortiert aufgeführt.

Typische Eigenschaften *nicht-integraler* Kennlinien (Abbildung 90 (b)) sind ausgeprägte Ecken und Kanten und auf den ersten Blick ein kurzer Weg.

Nach Abbildung 90 (a) hat jedoch die Kennlinie „*kleiner Sprung*“ einen *kurzen Hub*, was den *Hub* als Unterscheidungskriterium ausschließt.

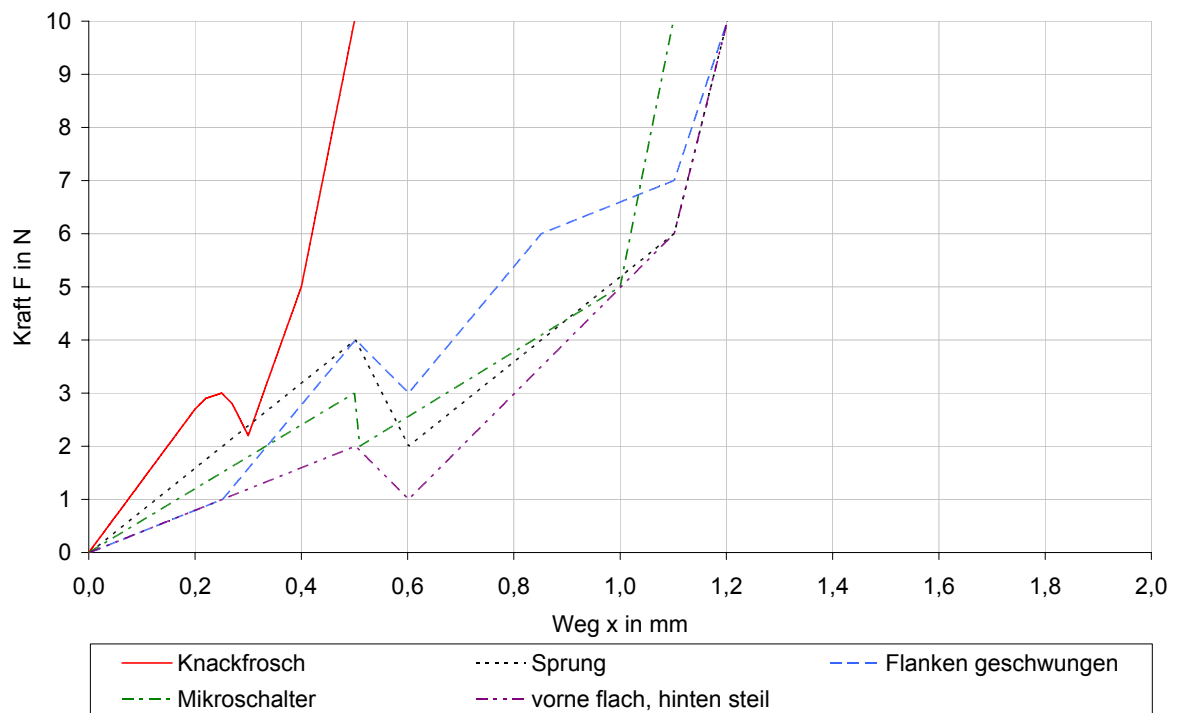
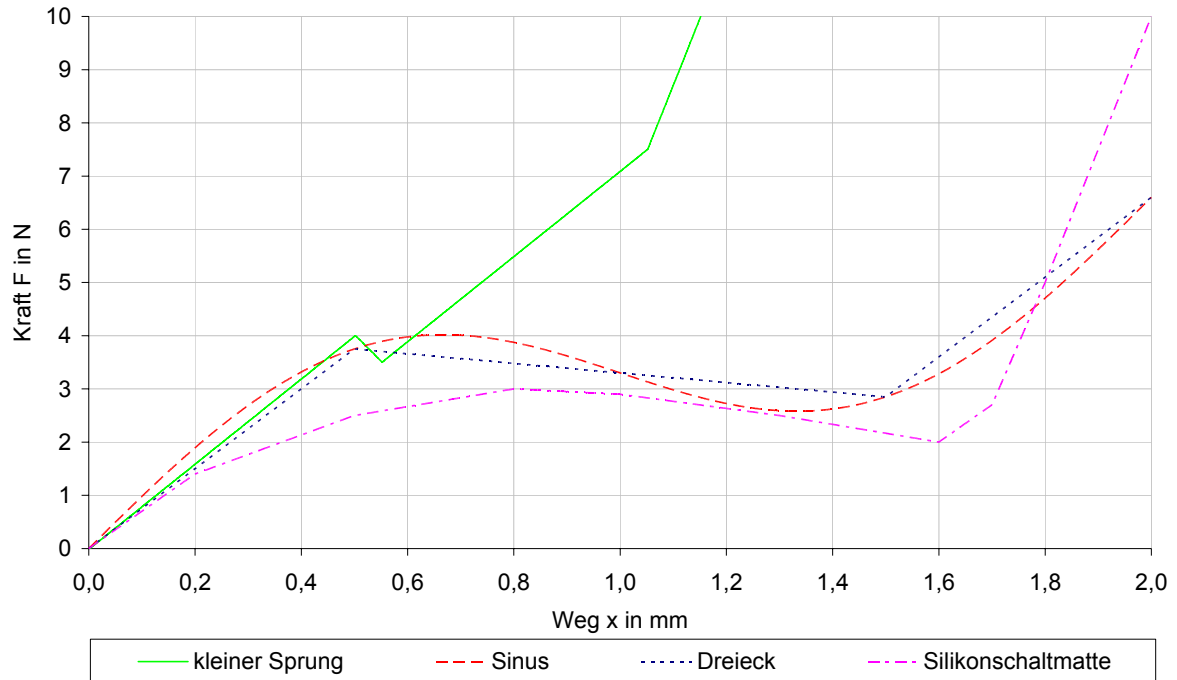


Abbildung 90: Kennlinien (a) integrale und (b) nicht-integrale Darstellungen.

Ausprägung des Kraftsprungs

Die Kennlinie *kurzer Sprung* besitzt ebenfalls einen Kraftsprung, der jedoch mit $\Delta F = 1/8 F_S$ (12,5%) verhältnismäßig klein ausfällt und wohl aus diesem Grund nicht als Kraftsprung wahrgenommen wird.

Die Kennlinie in Abbildung 90 (b) *Geschwungene Flanke* mit $\Delta F = 1/4 F_S$ (25%) wird dagegen offensichtlich wahrgenommen. Als weiterer Einfluss kann dabei eventuell die durch die Flankenform stärker ausgeprägte Spitze den Effekt vergrößern. Unabhängig davon kann jedoch die Wahrnehmungsschwelle in erster Näherung in den Bereich von 12,5% bis 25% geschätzt werden.

Nach DIN 196000 (2001) soll $\Delta F > 10\%$ von F_S sein, was nach den vorliegenden Ergebnissen als haptisch zu gering wahrnehmbar bewertet werden muss, soll ein Schaltpunkt in Form einer nicht-integralen Darstellung impulshaft wahrgenommen werden. Der Kraftsprung muss dazu größer als die Wahrnehmungsschwelle sein.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wird ein Kraftsprung von mindestens $25\% F_S$ empfohlen. Die Steilheit der Flanke wird nicht konkret untersucht. Es kann jedoch, angelehnt an die o. g. Kennlinie, von einer Steigung von mindestens 10 N/mm als Richtwert ausgegangen werden. Ob durch einen steileren Kraftsprung $\Delta F/\Delta x$ jedoch die Wahrnehmungsschwelle für ΔF geringer ausfällt, ist unbekannt.

Gruppe der nicht-integralen Visualisierungen

Die *nicht-integralen Visualisierungen* lassen sich weiter in drei Untergruppen aufteilen:

1. Bei *Knackfrosch* und *Mikroschalter* wird primär die D^2 -Darstellung gewählt. Sie besitzen die steilsten Kraftsprünge der Auswahl mit 20 N/mm und 100 N/mm und haben auch den schärfsten „Knick“ nach dem Kraftsprung.
2. Für *Flanken geschwungen* und *vorne flach, hinten steil* werden primär die $F(t)$ und die D -Darstellung ausgewählt. Sie haben flacher ausgeführte Kraftsprünge mit 10 N/mm Steigung. Die Flanken nach dem Kraftsprung scheinen nicht relevant, da der *Knackfrosch* ebenfalls eine steilere Flanke besitzt.
3. Die Kennlinie *Sprung* passt nicht in dieses Schema: Hauptsächlich die *Kraft-Weg-Darstellung* oder die *Senke* werden gewählt, obwohl Kanten und ein hoher Kraftsprung vorhanden sind, die nach vorangehenden Beobachtungen hin zu impulshaften Darstellungen tendieren. Vor allem korreliert sie mit *Sinus* und *Gummischaltmatte*, jedoch mit dem deutlichen Unterschied die *Integraldarstellung* überhaupt nicht in der Auswahl zu haben.

Die D - und t -Darstellungen werden nur gering ausgewählt, was allerdings auch durchaus als Tendenz in diese Richtung interpretiert werden kann, da in dieser Darstellung ebenfalls eindeutig Ecken vorkommen.

Sie korreliert vielmehr in Faktor 3 mit der Kraftdarstellung und „*Senke*“.

Bei geringer Ausprägung tritt diese demzufolge nicht mehr in Erscheinung. Letztlich kann damit auch die Zugehörigkeit von „*Sprung*“ geklärt werden.

Gruppe um Faktor 3

Die Kennlinien „Sinus“, „Silikonschaltmatte“ und „Sprung“ korrelieren stark mit Faktor 3. Ihnen wird durch die VPn ein eher weiches Verhalten zugesprochen, während das Fehlen des Schaltpunktes festgestellt wird. Ihnen gemeinsam ist ein sehr flacher, sehr kleiner oder eher unauffälliger Kraftsprung. Hauptsächlich die *Kraft-Darstellung* oder die *Senke* wird ausgewählt. Teilweise wird auch die Integraldarstellung erkannt. Die Integraldarstellung bildet den Kraftsprung jedoch offensichtlich zu schwach ab, die impulshaften Darstellungen dagegen zu stark. Es wird demzufolge ein klares, jedoch nicht schlagartiges Abfallen der Kennlinie erkannt.

Neben einer vergleichbaren Anfangssteigung besitzen alle drei Kennlinien einen recht hohen Schaltsprung (vgl. Abbildung 91). „Sprung“ ist dabei die einzig eckige Kurvenform und hat auch als einzige dieser drei Kennlinienformen keine einzige Auswahl im Integral, die beiden anderen immerhin 20%. Dies kann durchaus als Hinweis interpretiert werden, dass „Ecken“ im grafischen Kurvenverlauf nicht mit der geglätteten integralen Darstellung vereinbar sind, was sich mit der Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit bei Drehstellern deckt.

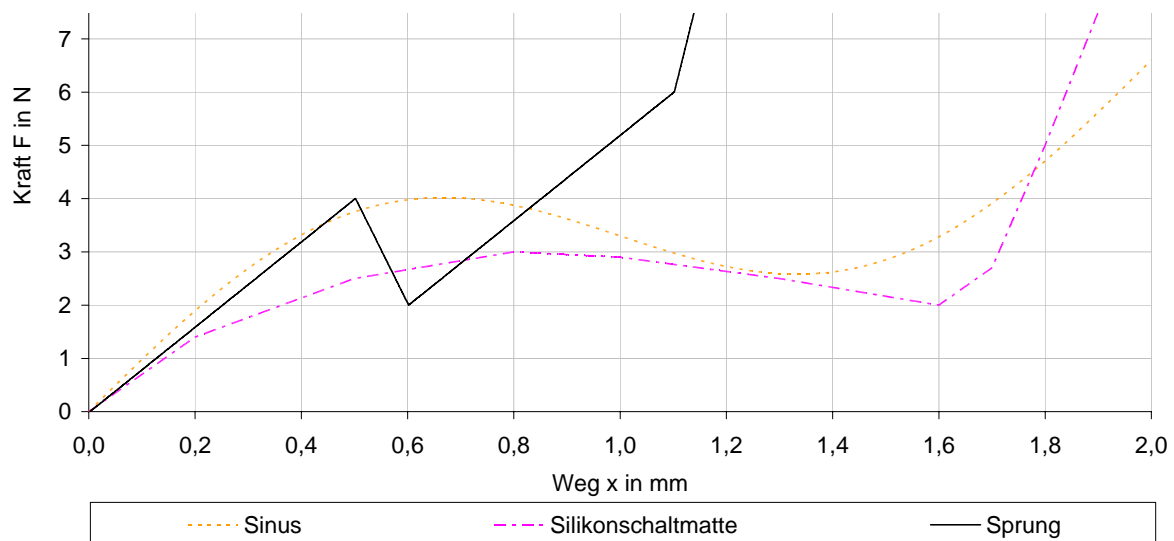


Abbildung 91: Kraft-Weg-Kennlinien der Kennlinien (v. l. n. r.) „Sinus“, „Silikon“ und „Sprung“. Sie korrelieren alle in Faktor 3, Kraft-Weg, Senke und Integral. Nur Sprung hat in der Integraldarstellung keine Übereinstimmung.

Sonderfall Sinus und Dreieck

Besonderes Augenmerk muss die Kennlinie *Dreieck* erhalten, da diese bereits bei den Drehstellerversuchen eindeutige Hinweise auf die Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit geliefert hat (vgl. Kapitel 5.6.5). Die Auswahl fällt wie bereits in diesem Versuch eindeutig auf die Integraldarstellung (Abbildung 92). Offensichtlich fehlen in der Auswahl „runde“ Alternativen. Auch die *Sinus* Kennlinie zeigt vergleichbare Ergebnisse wie bei den Drehstellerversuchen, indem keine eindeutig bevorzugte Auswahl getroffen wurde, ebenso wie die nicht unähnliche *Silikonschaltmatte*. Dies stützt die Hypothese T.2.a der Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit bei Drucktastern, dass auch hier davon auszugehen ist, dass Ecken und Kanten in gewissem Rahmen bei der Betrachtung der Haptik vernachlässigt werden können.

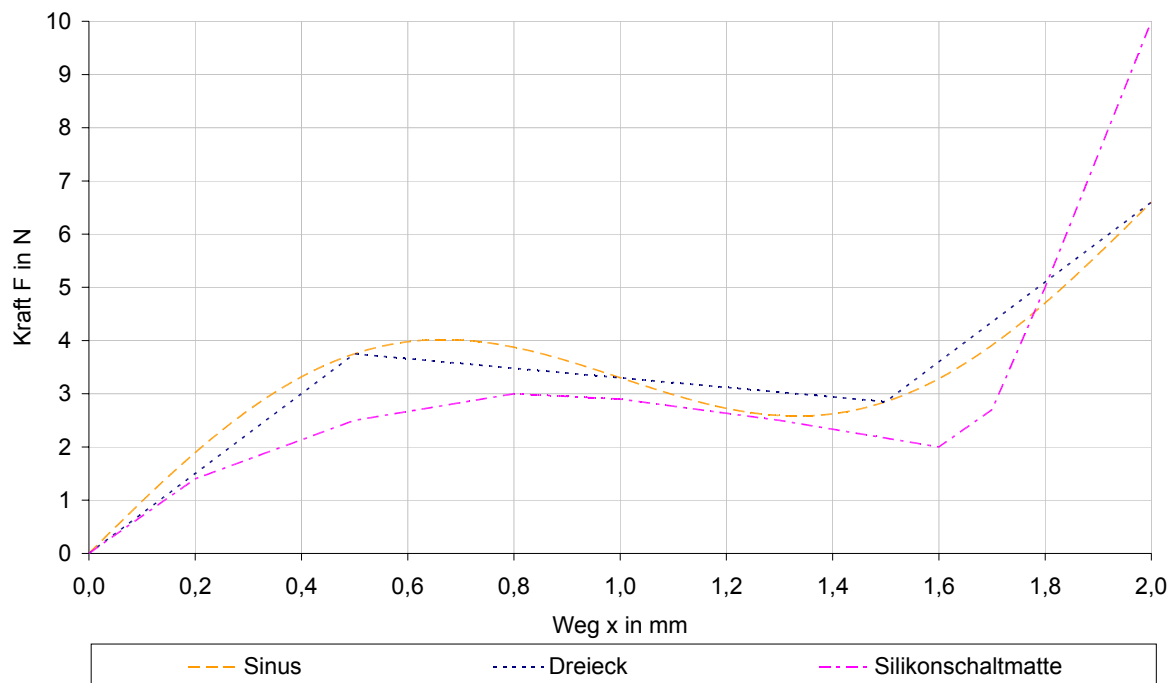


Abbildung 92: Kraft-Weg-Kennlinien der Kennlinien (v. l. n. r.) „Sinus“, „Dreieck“ und „Silikonschaltmatte“. Sie haben alle gemeinsam, dass sie als weich und ohne Kraftsprung bezeichnet werden. Sie haben einen flach abfallenden, weiten Kraftsprung.

Steigungsverhältnis der Flanken

Die Faktoren 1 und 2 kennzeichnen sich auffällig durch das Fehlen der Integraldarstellung, bzw. eine relativ hohe Auswahl bei anderem Vorzeichen des Faktors. Die Faktoren unterscheiden sich in der Auswahl von D-, D^2 - oder t-Darstellung. Scheinbar ergibt sich ein Zusammenhang zwischen „Flanke geschwungen“, „vorne flach, hinten steil“, „Knackfrosch“ haben alle eine steiler ausgeprägte Flanke nach dem Kraftsprung als am Beginn der Kennlinie, was mit der Auswahl der D-Darstellung korreliert (vgl. Abbildung 93).

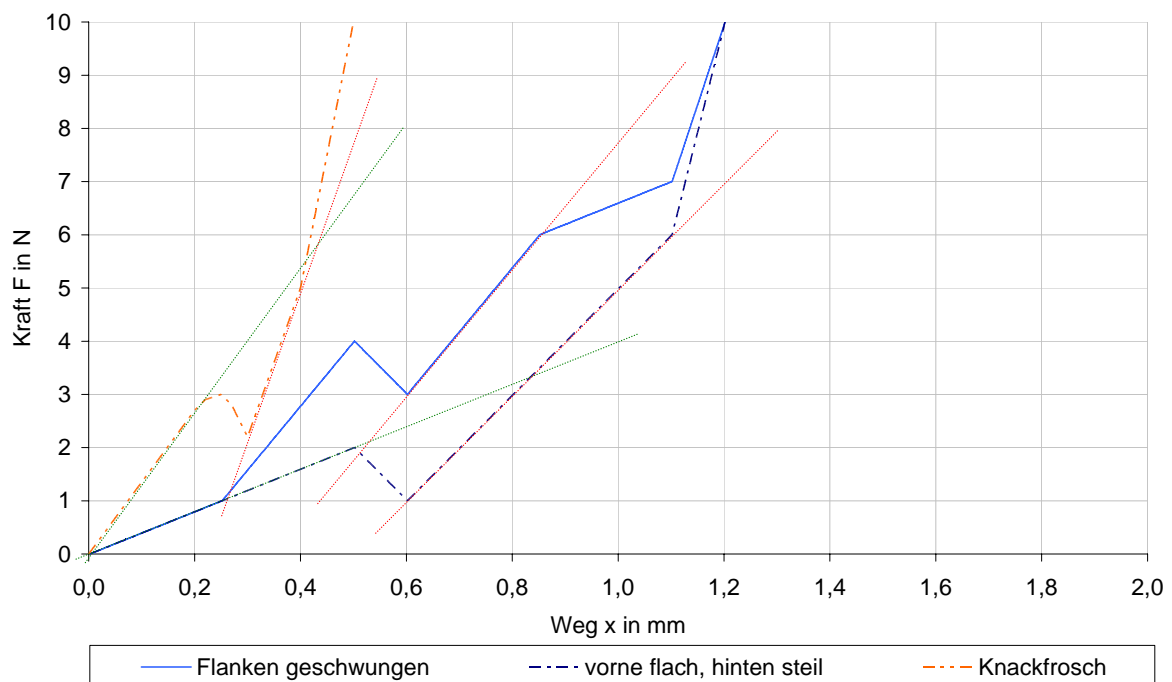


Abbildung 93: Kraft-Weg-Kennlinien der Kennlinien (v. l. n. r.) „Flanke geschwungen“, „vorne flach, hinten steil“ und „Knackfrosch“. Sie haben alle gemeinsam, dass die Flanke nach dem Kraftsprung steiler als die beginnende Kennlinie ist und die D-Darstellungen häufiger ausgewählt worden sind.

Knackfrosch und Mikroschalter

Die Charakteristika *Knackfrosch* und *Mikroschalter* zeigen beide ihren Schwerpunkt in der D^2 -Darstellung. Sie besitzen im Vergleich zu den anderen Kennlinien die steilsten Kraftsprünge. Abbildung 94 zeigt den Vergleich mit dem steilsten Kraftsprung der übrigen Kennlinien („*Sprung*“). Die Kennlinien „*Dreieck*“ und „*kleiner Sprung*“ sind faktorielle Gegensätze und haben wesentlich flacher ausgeprägte Kraftsprünge, was einen Zusammenhang zwischen Kraftsprung und Visualisierung unterstreicht.

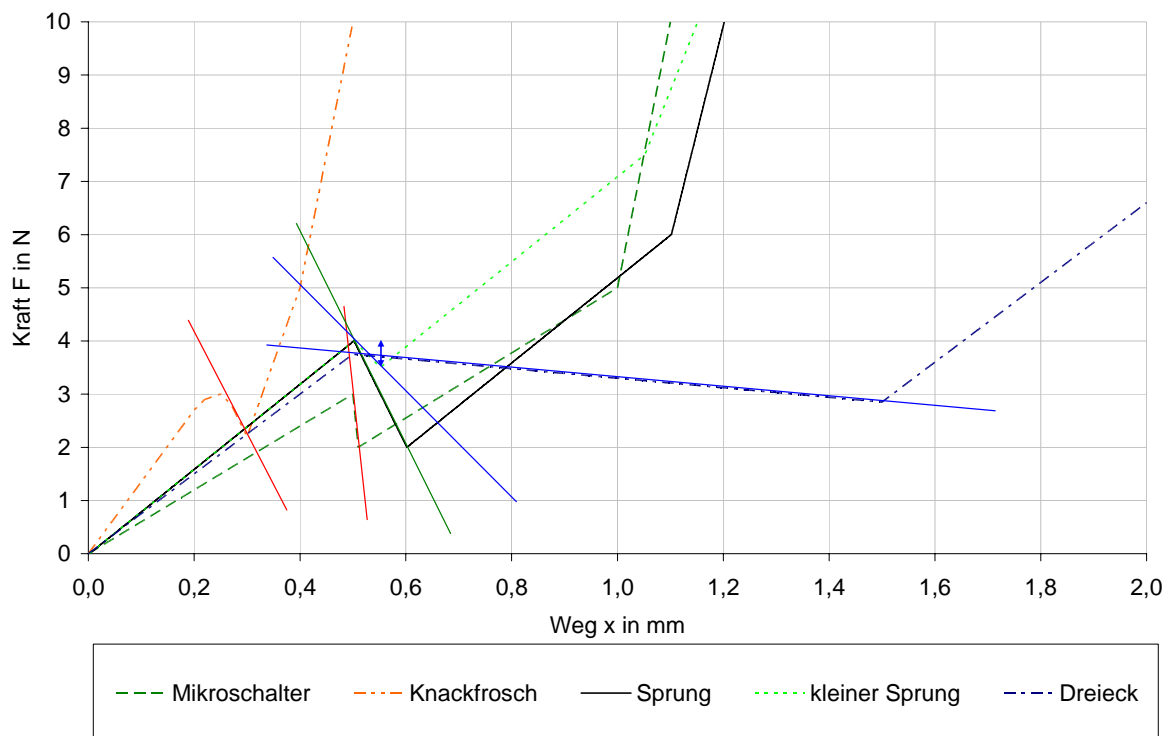


Abbildung 94: Kraft-Weg-Kennlinien der Kennlinien (v. l. n. r.) „Knackfrosch“ und „Mikroschalter“, „Sprung“ sowie „kleiner Sprung“ und „Dreieck“. Mit Ausnahme von „Sprung“ korrelieren alle mit Faktor 1. Es kann eine Abhängigkeit der Steigung und der Sprunghöhe erkannt werden.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich nicht eine einzelne Visualisierung zur grafischen Beschreibung des haptischen Verhaltens finden. Vielmehr zeigt sich eine Abhängigkeit zwischen der Ausprägung des Schaltpunktes und der gewählten Darstellung.

Die Integralform wird vor allem bei schwacher Ausprägung des Kraftsprungs gewählt, während bei zunehmend steilerem und höherem Kraftsprung proportionale und differentielle Darstellungen ausgewählt werden. Diese betonen die Ecken und Kanten im Kraft-Weg-Verlauf besser, was mit der Art des Ereignisses zusammenhängt.

Dieses Phänomen menschlicher Wahrnehmung beschreiben Kuchenbecker et al. (2005) als ereignisorientierte Wahrnehmung (*eventbased perception*). Demzufolge werden Kräfte solange gut abschätzbar wahrgenommen, bis ein Ereignis, z. B. in Form eines Schlages, eintritt und Information über eine Kollision vermittelt. In diesem Moment tritt die präzise Krafteinschätzung in den Hintergrund und ein Reflex wird ausgelöst. Zur Verdeutlichung kann das Biegen eines Astes hinzugezogen werden: Die Kraft, die der Ast bei einer Durchbiegung entgegensetzt, kann recht gut vom Menschen eingeschätzt werden. Sobald dieser Ast jedoch bricht, wird ein Knacken „spürbar“ und eine unmittelbare Reaktion zum Schutz des Organismus wird ausgelöst. Dies kann ein Fluchreflex sein, wenn man z. B. auf dem Ast steht und sich schnellstmöglich an einen sicheren Ort rettet, oder letztlich eine simple Reduktion der Kraft, um unkontrollierte Bewegungen zu vermeiden. Übertragen auf Bedienelemente werden Kraftverläufe „ertastet“ und wahrgenommen, bis ein relevantes Schalt-Ereignis auftritt, das ein Stoppen der Bewegung initiiert. Dieser Effekt scheint bei Drucktastern relevant zu sein, so dass je nach Ausprägung der eine oder andere Wahrnehmungsmodus angesprochen wird.

Eindeutig liegt eine Form der Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit bei Drucktastern vor. Die günstigste Näherung der Kennlinie wird in beiden untersuchten Fällen durch eine Orientierung am Kraftsprung erreicht. Dies zeigt erneut die Bedeutung der Ausprägung des Schaltpunktes für die haptische Wahrnehmung.

6.5 Versuch zur Parametrisierung translatorischer Bedienelemente

Im folgenden Versuch wird die Parametrisierung von Druck Tastern betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf Kurzhubtastern mit Schaltpunkten im Bereich von $x_S = 0,5 \text{ mm}$ bei einem Gesamthub von $x_{\text{ges}} = 1,1 \text{ mm}$.

Zunächst wird die Parametrisierung der Kennlinie und deren Variationsbereiche bestimmt. Nach der Erläuterung des Versuchs werden die Ergebnisse anhand einer Faktorenanalyse und einer Analyse des Antwortverhaltens bezüglich der technischen Parameter diskutiert.

6.5.1 Identifizierung und Festlegung der haptischen Parameter

Die Parametrisierung der Kennlinie orientiert sich an der Aufstellung in Kapitel 6.2.6.

Von zentralem Interesse sind der Schaltpunkt sowie die Flankenprägung, weshalb zur Aufwandsreduktion die Untersuchung der Federvorspannung F_F zurückgestellt wird. Reelle Bedienelemente sind durchaus ohne Federvorspannung ausgeführt. Außerdem hat nach Kapitel 6.2.1 die Federvorspannung nahezu ausschließlich Einfluss auf die Tiefenempfindung des Bedienelementes, weshalb dieser Parameter als unabhängig betrachtet wird. Daher werden $F_F = 0 \text{ N}$ und aus technischen Gründen (vgl. Anhang C) $F_{\text{max}} = 10 \text{ N}$ festgelegt.

Daraus ergibt sich die in Abbildung 95 dargestellte Parametrisierung mit fünf Punkten, bzw. sechs Sehnenstücken.

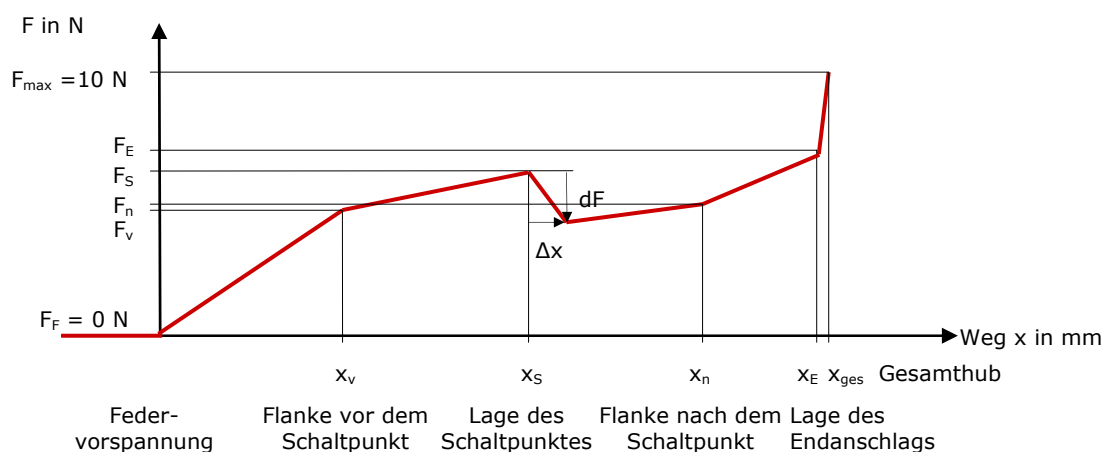


Abbildung 95: Verwendete Parametrisierung der Kraft-Weg-Kennlinie.

6.5.2 Versuchsumgebung

Es wird dieselbe Versuchsumgebung wie in Kapitel 6.4.2 eingesetzt.

6.5.3 Versuchskonzept

Ziel der Versuchsreihe ist die Zuordnung subjektiver Eigenschaften eines Bedienelementes zu objektiv messbaren technischen Parametern. Hierzu werden Parameter definiert verändert und durch VP anhand von Rating-Skalen bewertet. Im Vergleich zum Versuch mit Drehstellern werden jedoch mehr Parameter variiert. Dies legt eine Aufgliederung der Parameter in Gruppen nahe, die ausgehend von einer Ausgangskennlinie nur jeweils zwei Parameter variieren: Es werden die Lage des Kraftsprunges (F_s, x_s), der Kraftsprung selbst ($\Delta F, \Delta x$) und die Ausformung der Flanken (F_v, x_v und F_n, x_n), die auch in sich als logische Einheiten zu betrachten sind, als Parametergruppen festgelegt. Je Parameter werden drei Varianten geprüft, d. h. je Parametergruppe ergeben sich neun Variationen. Bei vier Gruppen also 36 durch die VP zu bewertende Varianten.

Variation der Parameter

Im Folgenden sind die zum Versuch angesetzten Parametervariationen gruppenweise aufgeführt. Als Ausgangspunkt wird eine in der Praxis bewährte Kennlinienform eines Mikroschalters gewählt, die durch lineare Kurvenabschnitte gut parametrisierbar ist. Die Lage des Schaltpunktes dafür wird bei $F_s = 3 \text{ N}$ und $x_s = 0,5 \text{ mm}$ festgelegt.

Ausführung der Flanken

Beim Parametersatz Ausführung der Flanken wird der Kraftsprung $\Delta F, \Delta x$ konstant gehalten, nur die Flanken werden ausgehend von einer linearen Ausprägung durch F_v und F_n mit $\pm 0,5 \text{ N}$ variiert. x_v und x_n werden nicht geändert und liegen mittig in der jeweiligen Flanke.

Die vordere Flanke kann tief, linear und hoch ausgeführt sein, während die hintere Flanke zu jeder Variation der vorderen Flanken auf die gleiche Weise variiert wird. Dies ergibt insgesamt neun Kombinationen, die anhand Abbildung 96 nachvollzogen werden können.

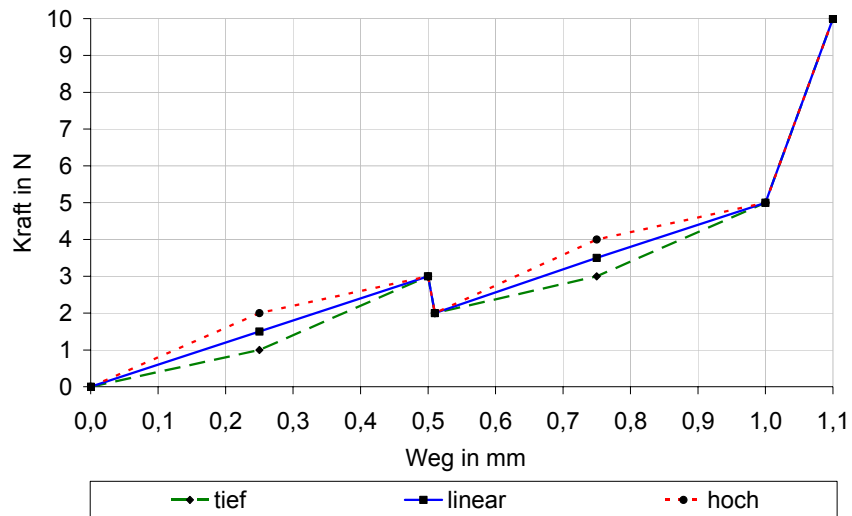


Abbildung 96: Variation der Flanken durch F_v , x_v und F_n , x_n .

Ausführung des Kraftsprungs

Abbildung 97 zeigt die Variationen des Kraftsprungs.

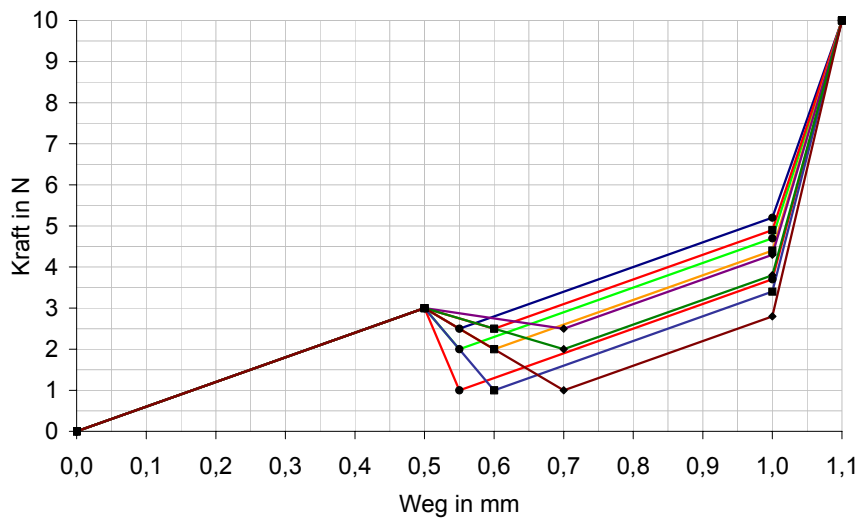


Abbildung 97: Variation des Kraftsprungs durch ΔF und Δx .

Die Kraftsprunghöhe ΔF wird mit 0,5 N, 1,0 N und 2,0 N variiert, was einem Verhältnis von 16%, 33% und 66% zur Schaltpunktlage F_s entspricht. Dieses relative Verhältnis des Kraftsprungs ΔF zu F_s wird nach Ergebnissen aus Kapitel 6.4 im Bereich des kaum wahrnehmbaren bis über die Hälfte der Schaltkraft F_s variiert, was als sinnvoller Variationsbereich angenommen wird.

Die Sprunglänge Δx wird mit 0,05 mm, 0,10 mm und 0,20 mm variiert, was Steigungen im Bereich zwischen 40 N/mm und 2,5 N/mm ergibt.

Die Schrittweiten verdoppeln sich, da daraus gleiche Flankensteigungen bei verschiedenen Varianten entstehen. Damit ergibt sich die Möglichkeit Abhängigkeiten der Flankensteigung $\Delta F/\Delta x$ besser zu erkennen.

Lage des Kraftsprungs

Die Lage des Kraftsprungs hängt besonders stark mit dem Verlauf der Kennlinie zusammen, was weitere Überlegungen erfordert: Es hängen der Verlauf der Flanken vor und nach dem Schaltpunkt sowie die Gesamtlänge des Bedienelementes unmittelbar an der Lage des Schaltpunktes F_s und x_s . Sollen beide Flanken parallel weiter verlaufen, so ist es nur in speziellen Fällen möglich, denselben Endpunkt zu erreichen: Ein kurzer hoch gelegener Schaltpunkt wird zwangsweise die Gesamtlänge verkürzen, während ein kurzer, schwacher Schaltpunkt eine Verlängerung des Schaltweges ergäbe. Soll dementsprechend derselbe Endpunkt erreicht werden, so verlaufen die Flanken meist nicht parallel. Abbildung 98 verdeutlicht diesen Zusammenhang anschaulich.

Um hier eine Vergleichbarkeit zu erreichen, werden zwei Variationsgruppen untersucht. Die erste Parametergruppe mit demselben Endpunkt, die zweite mit parallel verlaufenden Flanken. Beide sind in Abbildung 98 und Abbildung 99 dargestellt.

Der Hub wird bei $x_E = 1,0$ mm einheitlich beschränkt um den Gesamthub konstant zu halten.

Ausgehend von der Ausgangskennlinie wird die Schaltkraft F_s mit 2,0 N und 6,0 N sowie der Schaltweg x_s mit 0,25 mm und 0,75 mm variiert. Auch hier werden vergleichbare Kennliniensteigungen durch entsprechende ungleiche Schrittweiten erreicht.

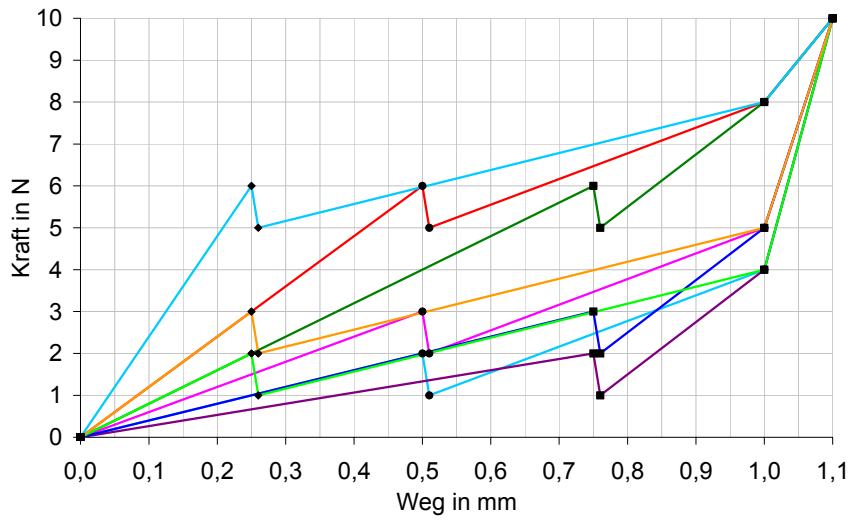


Abbildung 98: Variation der Lage des Schaltpunktes durch F_S und x_S . Alle Kennlinien haben denselben Endpunkt, weshalb die Flanken nicht parallel zueinander verlaufen.

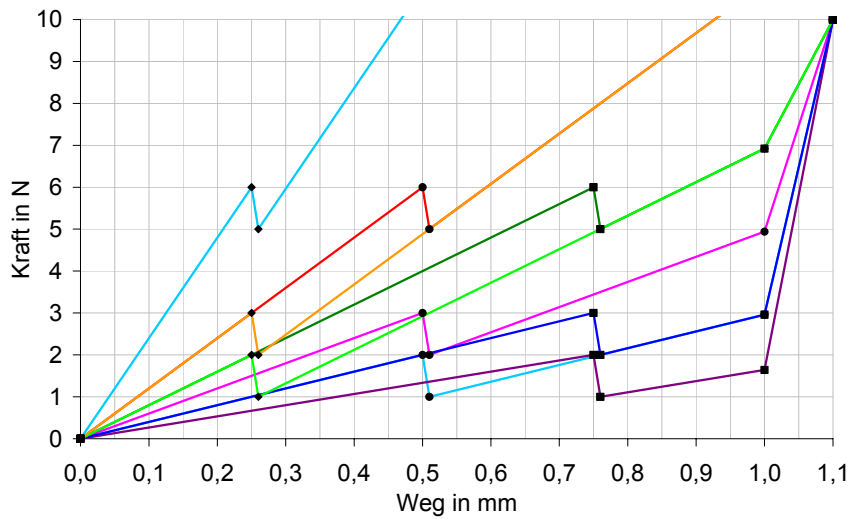


Abbildung 99: Variation der Lage des Schaltpunktes durch F_S und x_S . Die Flanken vor und nach dem Schaltpunkt verlaufen parallel.

6.5.4 Pilotversuch Adjektivfindung und Erstellung des Fragebogens

Vorgehen

Es ist nicht geklärt, wie stark sich subjektive Bewertungen von Drucktastern und Drehstellern gleichen. In Anlehnung an die Untersuchungen der Drehsteller werden daher in einem Pilotversuch bipolare Adjektivpaare für Drucktaster ermittelt.

Es werden jedoch von vorne herein bipolare Adjektivpaare eingesetzt. Neben gesammelten Adjektivpaaren, werden zusätzlich basierend auf den Ergebnissen zur Visualisierung (Kapitel 6.4.4) das Vorhandensein des Schaltpunktes und dessen Lage abgefragt. Der Fragebogen ist in Anhang J.2 zu finden.

Durchführung

Im Versuch werden 17 Kennlinien von 6 männlichen VP bewertet. Die Anzahl der Adjektivpaare wird aufgrund der hohen Parameterzahl reduziert. Dies geschieht auf Basis der Erfahrungen aus den Versuchen mit Drehstellern sowie der Faktorenanalyse.

Auswertung und Fragebogenerstellung

In der Faktorenanalyse ergeben sich die in Tabelle 14 aufgeführten vier Faktoren. Eine von Faktor 1 und Faktor 2 abhängige Gruppierung kann mit „Gefallen“ bezeichnet werden.

Aus diesen Faktoren werden starke Adjektivpaare für die Versuchsreihe ausgewählt.

Tabelle 14: Faktoren aus dem Pilotversuch mit Namen und zugehörigen Adjektivpaaren

Faktor	Name	Adjektivpaare
Faktor 1	Präzision, Klarheit und Wertigkeit	schwammig – präzise verschommen – klar minderwertig – hochwertig
Faktor 2	Gängigkeit und Härte	hart – weich schwergängig – leichtgängig
Faktor 3	Hub	kurz – lang
Faktor 4	Lage des Schaltpunktes	Lage: früh – mittig – spät
Abhängige Gruppe	Gefallen	Gut – schlecht angenehm – unangenehm

Es ergeben sich je Faktor ein bis zwei Adjektivpaare: *schwammig – präzise* und *minderwertig – hochwertig* (Faktor 1); *hart – weich* und *schwergängig – leichtgängig* (Faktor 2); *kurz – lang* (Faktor 3) und

die Abfrage von *Wahrnehmung* und *Lage des Schaltpunktes* (Faktor 4). Die abhängige Gruppe *Gefallen* wird in Form eines Gesamturteils abgefragt. Anhang J.4 zeigt den Fragebogen.

6.5.5 Versuchsablauf

Abfolge der Kennlinien

Die Abfolge der Kennlinien ist zufällig ermittelt, nicht nach Gruppen aufgeteilt und wird auch nicht zwischen den VP permutiert. Die Abfolge der Kennlinien ist in Anhang K.1 dokumentiert. Zu Beginn des Versuchs werden Kennlinien als Einführung in das Thema vorgestellt.

Versuchspersonenkollektiv

Es haben 20 VP aus dem Hochschulumfeld im Alter von 18 bis 28 Jahren teilgenommen. Davon 5 Frauen und 15 Männer. Die Gruppe hat einen Altersdurchschnitt von 24,8 Jahren bei einer Standardabweichung von 2,3 Jahren. Der Versuch dauert ca. 1 Stunde und 10 Minuten.

6.5.6 Versuchsergebnisse

Das Antwortverhalten der VP wird zunächst einer Faktorenanalyse unterzogen mit deren Hilfe Zusammenhänge zwischen den Adjektivpaaren ermittelt werden. Eine anschließende Beurteilung der Parameter ergibt Detailinformationen über die Zusammenhänge von subjektiv wahrgenommenen Größen und objektiv messbaren Parametern.

Korrelationen zwischen den Bewertungskriterien mittels Faktorenanalyse

Faktoren

Sehr gut vergleichbar mit den Ergebnissen bei Drehstellern (vgl. Kapitel 5) ergeben sich vergleichbare zwei Faktoren: *F1 – Wertigkeit und Gefallen* und *F2 – Gängigkeit und Härte* (vgl. Abbildung 100). Es ergibt sich ebenso eine von beiden Faktoren abhängige Paarung *schwammig – präzise*. Auch dieser Zusammenhang deckt sich sehr gut mit den Ergebnissen der rotatorischen Untersuchungen und bestätigt diese. Ein dritter Faktor wird als *F3: Hub und Schaltpunktlage* bezeichnet (vgl. Abbildung 101). Dieser Faktor ist im Pilotversuch zweigeteilt (vgl. Tabelle 14), hier jedoch zeigt sich, dass beide Wertungen korrelieren.

Bewertung der Beurteilungskriterien

Die Variable *kurz – lang* korreliert stark mit Gängigkeit und Härte, weshalb die Bezeichnung *Hub* in diese Komponente aufgenommen wird. Eine lange Kennlinie tendiert demzufolge zu den

Wahrnehmungen *weich* und *leichtgängig*, während demgegenüber „*kurz*“ eher *hartem* und *schwergängigem* Verhalten zuzuordnen ist.

Die hohe Korrelation widerspricht der im Pilotversuch als unabhängigen erkannten Faktoren. Dieser Widerspruch wird jedoch auf den geringen Stichprobenumfang des Pilotversuchs zurückgeführt, aufgrund dessen Fehlurteile einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse haben können.

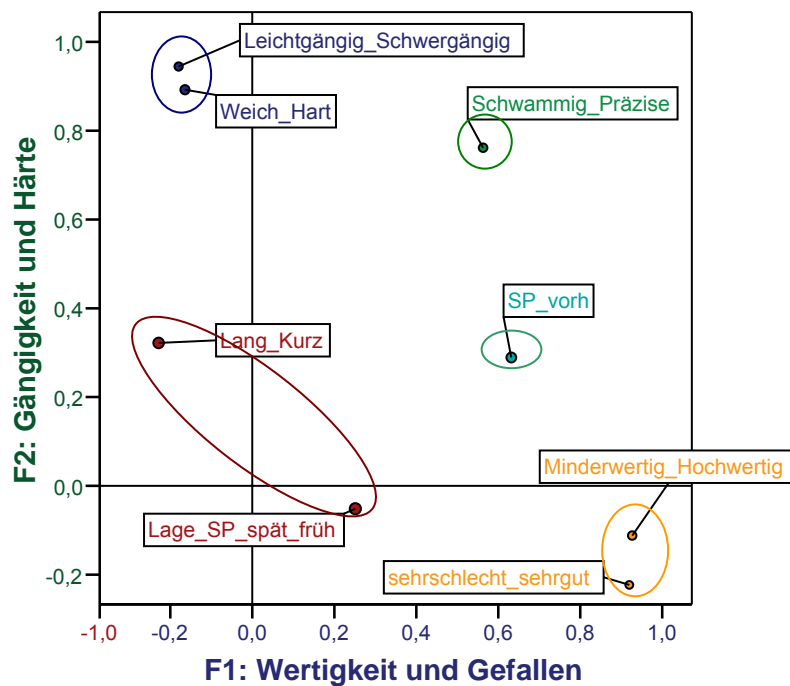


Abbildung 100: Komponentendiagramm der Faktoren F1 und F2 im rotierten Raum.

Wie bereits im Versuch mit Drehstellern korrelieren „*hochwertig*“ mit „*sehr gut*“ sowie „*hart*“ mit „*schwergängig*“. Das Urteil „*präzise*“ korreliert ebenfalls sowohl mit der *Härte* aber auch mit der *Hochwertigkeit*.

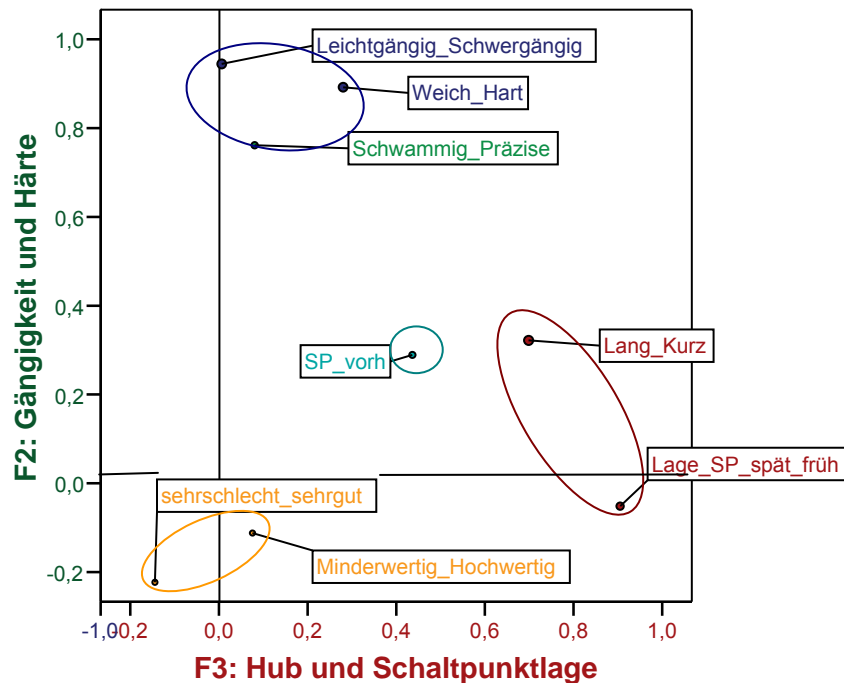


Abbildung 101: Komponentendiagramm der Faktoren F2 und F3 im rotierten Raum.

Vorhandensein eines Schaltpunktes

Neu hinzu kommt die Korrelation mit dem Vorhandensein eines Schaltpunktes, woraus geschlossen werden kann, dass für *hochwertiges* Verhalten ein Schaltpunkt wahrnehmbar sein muss. Darüber hinaus bestehen schwächere Korrelationen zwischen Gängigkeit und Härte und dem Vorhandensein von Schaltpunkten sowie der Paarung *lang – kurz*. Daraus kann geschlossen werden, dass das Vorhandensein eines Schaltpunktes tendenziell mit einer härteren Wahrnehmung des Bedienelementes zusammenhängt. Ebenso hängen offenbar Härte und eine als „*kurz*“ zu bezeichnende Wahrnehmung des Bedienelementes zusammen.

Offenbar korrelieren nur die Paarungen *lang – kurz* und Lage des Schaltpunktes (Lage_SP) sowie das Vorhandensein eines Schaltpunktes (SP_vorh) mit F3. Die Paarung *weich – hart* korreliert noch leicht. Die übrigen Paarungen können als nicht korrelierend eingestuft werden. Die Lage des Schaltpunktes, bzw. die Wahrnehmung des Hubes sind demzufolge unabhängig von *Härte*, *Präzision* und *Wertigkeit* des Bedienelementes. Das Vorhandensein eines Schaltpunktes hängt auch mit der Längenwahrnehmung des Bedienelementes und dem Wahrnehmungszeitpunkt des Schaltpunktes zusammen.

Korrelationen zwischen Bewertungskriterien und Parametern

Da die technischen Parameter der vorgestellten Kennlinien bekannt sind, wird eine weitere Faktorenanalyse mit Adjektivpaaren und diesen technischen Parametern durchgeführt. Damit werden konkrete Einflüsse objektiver Größen auf deren subjektiv wahrnehmbare Eigenschaften ersichtlich. Aufgrund der Komplexität wird die Analyse anhand der rotierten Komponentenmatrix in Anhang K.2 durchgeführt und auf eine grafische Darstellung verzichtet.

Technische Parameter

Die in Kapitel 6.5.1 definierten technischen Parameter je Kennlinie werden ermittelt und in die Faktorenanalyse mit einbezogen. Zusätzlich werden die Steigungen der Flanken vor (F_S/x_S) und nach ($(F/x)_n$) dem Schaltsprung sowie die Steigung des Kraftsprunges ($\Delta F/\Delta x$) als abgeleitete Parameter verwendet. Die Steigung nach dem Schaltpunkt $(F/x)_n$ berechnet sich nach Gleichung 20. Diesbezüglich werden jedoch die Flankenformen (F_v, F_n) nicht berücksichtigt.

$$(F/x)_n = \frac{F_E - (F_S - dF)}{x_E - (x_S + dx)} \quad \text{Gleichung 20}$$

Diskussion der Zusammenhänge

Die Ergebnisse der Faktorenanalyse sind in Anhang K.2.2 aufgeführt und werden im folgenden Abschnitt diskutiert. Es ergeben sich drei Gruppen von Korrelationen: Jeweils Bewertungskriterien oder technischen Parametern getrennt und gemischte zwischen beiden Gruppen. Dabei drücken die Korrelationen rein technischer Natur, z. B. einfache physikalische Zusammenhänge wie Amplitude mit zugehöriger Steigung, aus und dienen allenfalls zur Überprüfung des Verfahrens. Korrelationen zwischen Bewertungskriterien wurden bereits zuvor festgestellt und sollten im Idealfall diese Ergebnisse stützen. Von besonderem Interesse sind daher die Beziehungen zwischen beiden Domänen.

Größten Einfluss auf *F2 – Gängigkeit und Härte* haben die Parameter Höhe des Schaltpunktes F_S sowie Steigung vorne F_S/x_S und das Kraftniveau des Endanschlags F_E . Ein Einfluss der Steigung nach dem Schaltsprung kann ebenfalls erkannt werden. Einen geringen Einfluss auf die Härte zeigen die Länge Δx und Steigung $\Delta F/\Delta x$ des Kraftsprunges.

Die *Wahrnehmung des Schaltpunktes* und dessen *Lage* hängen wie im vorangehenden Versuch bereits vermutet stark von dessen Länge Δx und Steigung $\Delta F/\Delta x$ ab. Die Kraftsprunghöhe ΔF beeinflusst die Wahrnehmung zusätzlich, während die Flankenformen F_v, F_n geringen Einfluss auf Lage und Wahrnehmung des Schaltpunktes hat.

Die Wahrnehmung der *Präzision* wird bestimmt durch Länge Δx und Steigung $\Delta F/\Delta x$ des Kraftsprungs, die Schaltkraft F_S sowie die Endlage F_E . Geringen Einfluss zeigen die Steigungen vor und nach dem Schaltpunkt sowie die Höhe ΔF des Kraftsprungs und die Längen x_S und x_E .

Die Wahrnehmungsgrößen von *F1 – Wertigkeit und Gefallen* zeigen neben der Präzision die meisten oftmals auch sehr geringen Abhängigkeiten von technischen Parametern. Hierbei ist vor allem die Lage des Schaltpunktes F_S und x_S von Bedeutung. Ebenfalls korrelieren die vordere Flankensteigung F_S/x_S , die Lage des Endpunktes F_E , x_E und die Parameter des Kraftsprungs: ΔF , Δx und $\Delta F/\Delta x$. Ein sehr geringer Einfluss kann noch der Flankenform F_n nach dem Schaltpunkt zugesprochen werden.

Die Wertung ob ein Bedienelement *lang* oder *kurz* empfunden wird, korreliert am stärksten mit dem Kraftsprung ΔF . Etwas schwächer korrelieren Δx , $\Delta F/\Delta x$, die Lage F_E , x_E des Endanschlags. Die Schaltkraft F_S und die Steigungen vor (F_S/x_S) und nach dem Schaltpunkt $(F/x)_n$ korrelieren schwach, die Flankenform nach dem Schaltpunkt F_n sehr schwach.

Zusammenfassung

Erwartungsgemäß decken sich die Korrelationen der Wertungen mit den Parametern weitestgehend mit den Korrelationen zwischen den Bewertungen.

In Tabelle 15 sind die relevanten Parameter den entsprechenden Wertungen zugeordnet. Die Korrelationen unterstreichen die Bedeutung des Schaltpunktes in Lage und Ausprägung für die Wahrnehmung des Bedienelementes.

Tabelle 15: Zusammenfassung der Abhängigkeiten zwischen Parametern und Wertungen nach Korrelationen mit den Komponenten geordnet. Die stärksten Parameter stehen links.

Wertung: Adjektivpaar	Korrelation		
	stark	ersichtlich	schwach
<i>Leichtgängig - Schwergängig</i>	$F_S ; F_S/x_S ; F_E$	$(F/x)_n$	
<i>Weich – Hart</i>	$F_S ; F_S/x_S ; F_E$	$(F/x)_n$	$\Delta x ; \Delta F/\Delta x$
<i>Schaltpunkt vorhanden? nein – ja</i>	$\Delta x ; \Delta F/\Delta x$	$\Delta F ; F_v$	
<i>Lage Schaltpunkt spät – früh</i>	$\Delta x ; \Delta F/\Delta x ; F_v$		ΔF
<i>Schwammig - Präzise</i>	$\Delta x ; \Delta F/\Delta x ; F_S ; F_E ;$	$F_S/x_S ; (F/x)_n$	$x_S ; x_E ; F_n$
<i>sehr schlecht - sehr gut</i>	$F_S ; x_S$	$F_S/x_S ; \Delta F ; F_E ;$	$\Delta x ; \Delta F/\Delta x ; (F/x)_n ; x_E ; F_n$
<i>Minderwertig - Hochwertig</i>	$F_S ; x_S ; \Delta x ; \Delta F/\Delta x$	$F_S/x_S ; F_E$	$(F/x)_n ; \Delta F ; x_E ; F_n$
<i>Lang – Kurz</i>	$\Delta F, \Delta x, \Delta F/\Delta x$	$F_E ; x_E ; F_{S,r}$	$F_S/x_S ; x_S ; (F/x)_n ; F_n$

Die in Tabelle 15 aufgeführten Beziehungen werden mittels der folgenden Betrachtung des Antwortverhaltens bei Variation der Parameter überprüft und konkretisiert, so dass genauere Aussagen dazu gemacht werden können.

Veranschaulichung weiterer technischer Parameter

Die vorgesehene Darstellung der Versuchsergebnisse trägt die Bewertungen der VPn über jeweils zwei technischen Parametern auf. Dabei werden jedoch nicht abhängige Parameter wie Steigungen oder spezielle Kraftwerte direkt berücksichtigt.

Um Abhängigkeiten der Versuchsergebnisse zu veranschaulichen, werden die o. g. abhängigen Parameter im Folgenden über den später verwendeten technischen Parameterfeldern aufgetragen. Damit wird es einfacher möglich, vergleichbares Verhalten zwischen abhängigen technischen Parametern und den im Versuch eingesetzten Bewertungskriterien zu erkennen.

Die in diesem Abschnitt folgenden Abbildungen beinhalten dementsprechend *nur technische Parameter* und liefern daher noch *keine Aussagen zu Versuchsergebnissen*.

Die Steigungen der Flanken (a) *vor* und (b) *nach* dem Schaltpunkt zeigt Abbildung 102, während Abbildung 103 die Steigung des Kraftsprungs darstellt.

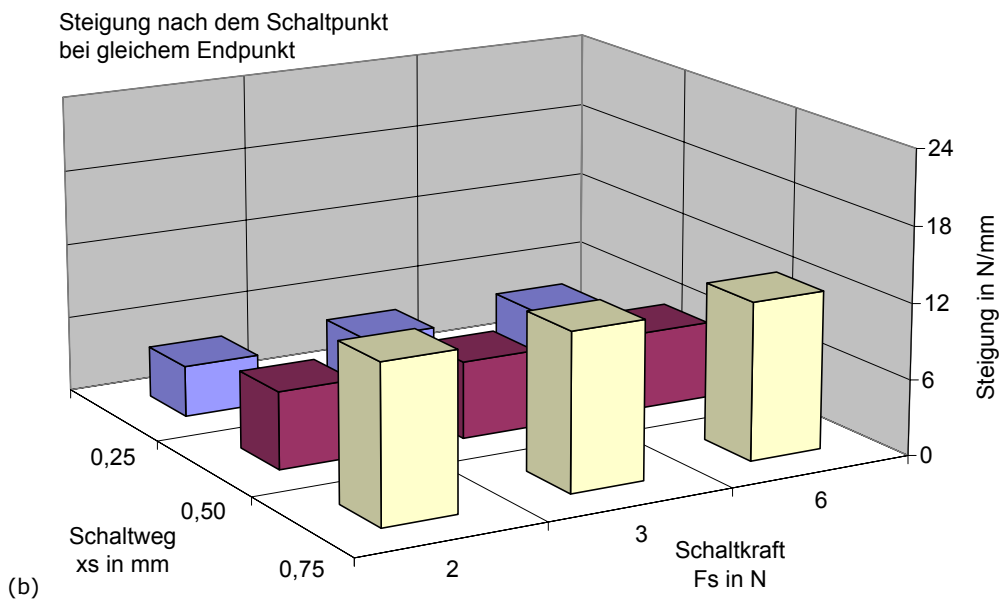
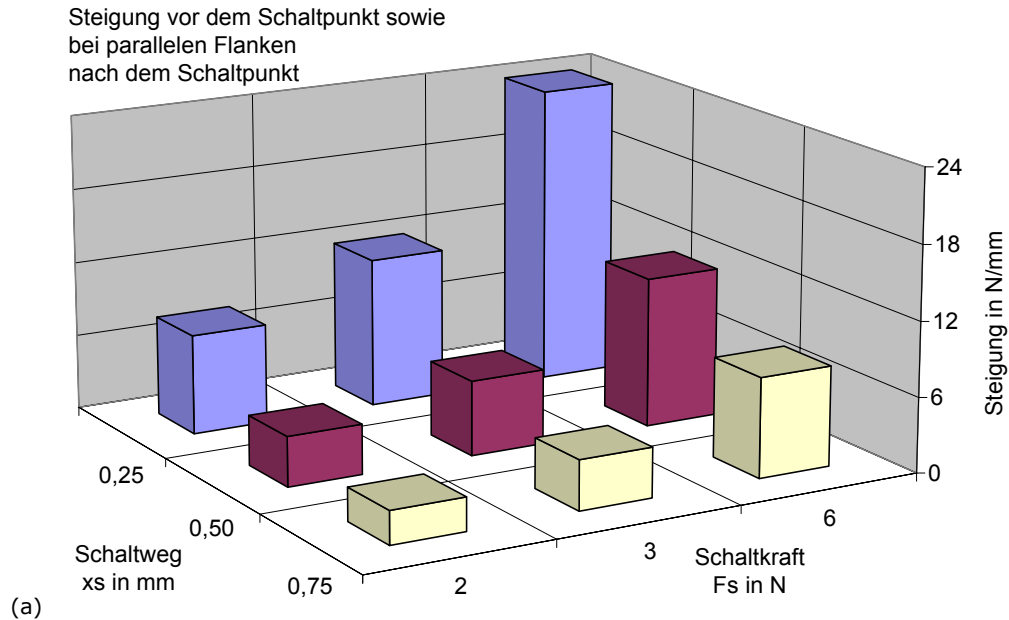


Abbildung 102: Steigung der Flanke (a) vor dem Schaltpunkt und (b) nach dem Schaltpunkt bei gleichem Endpunkt über der Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s aufgetragen. Bei parallelem Flanken ist die Flanke nach dem Schaltpunkt gleich der vorderen.

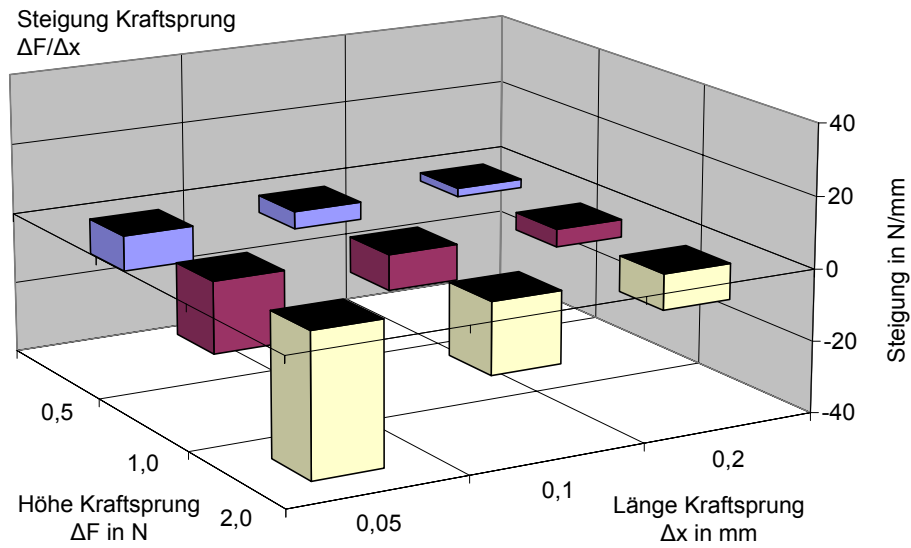


Abbildung 103: Produkt aus Kraftsprunghöhe ΔF und Steigung $\Delta F/\Delta x$ über Kraftsprung ΔF und Sprunglänge Δx aufgetragen.

Das Kraftniveau bei Erreichen des Endanschlags F_E ist in Abbildung 104 aufgetragen. Dabei ist bei (a) parallelen Flanken sehr gut der Zusammenhang von F_E mit den Flankensteigungen zu erkennen. Lediglich die systematische Begrenzung von F_E auf 10 N bedingt eine Abweichung der Darstellungen voneinander.

Bei (b) gleichem Endpunkt ist ein eindeutiger Zusammenhang mit der Schaltkraft F_S ersichtlich.

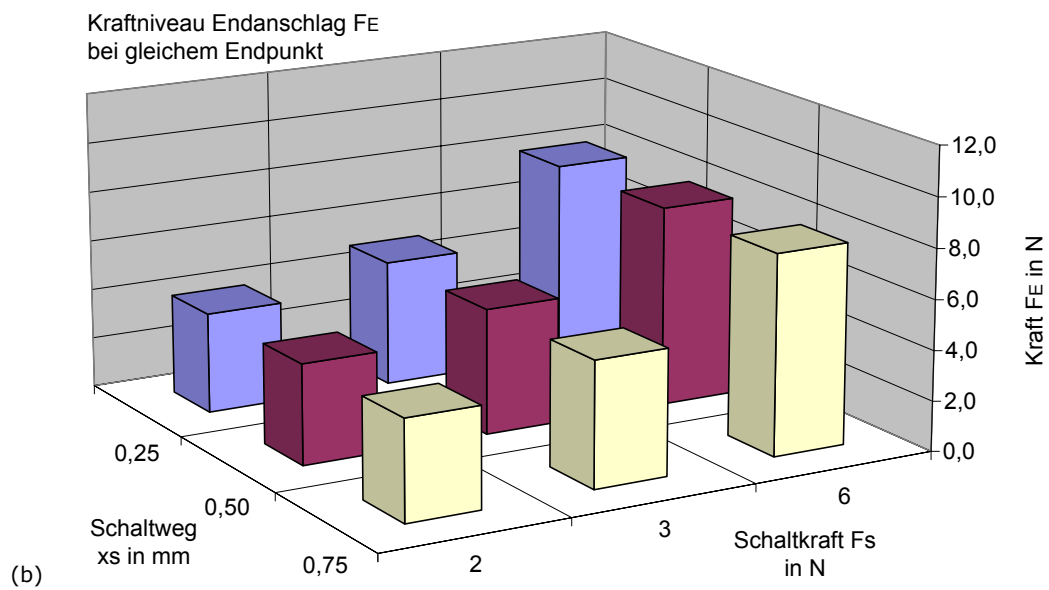
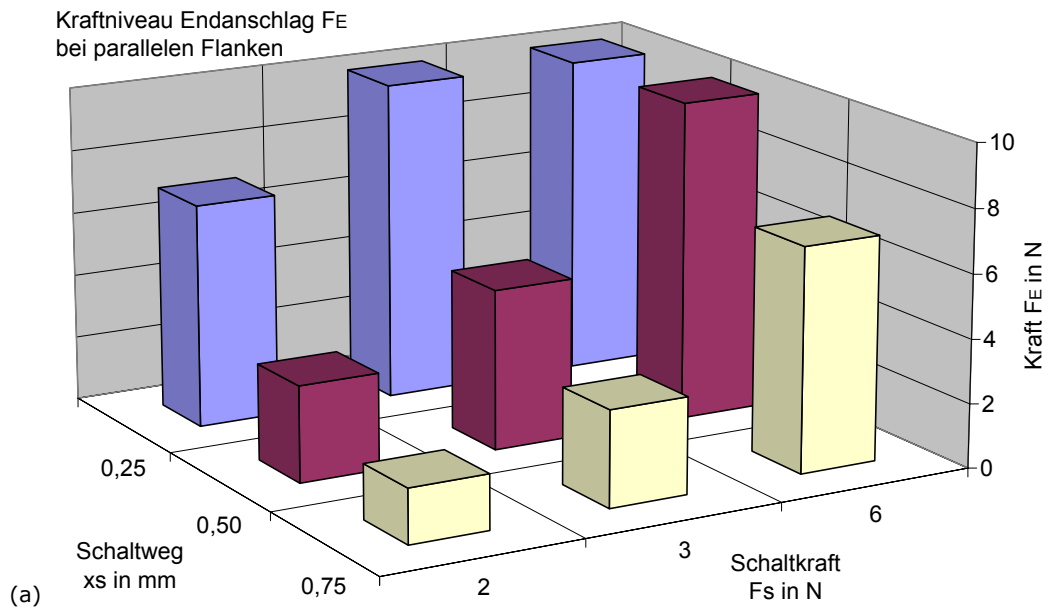


Abbildung 104: Niveau bei Erreichen des Endanschlags F_E (a) bei gleichem Endpunkt und (b) bei parallelen Flanken über der Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S aufgetragen.

Quantifizierung der Parameter

Im folgenden Schritt werden die vier Parametrisierungsgruppen anhand des Antwortverhaltens und den technischen Parametern quantifiziert. Dabei wird das Antwortverhalten in Form der normierten Mittelwerte über den variierten technischen Parametern aufgetragen. Abhängigkeiten werden damit direkt ersichtlich und die Ergebnisse der Faktorenanalyse können separat verifiziert werden.

Zum direkten Vergleich der Parameter werden diese nach subjektiven Beurteilungskriterien geordnet untersucht. Die anhand der Faktorenanalyse gefundenen Abhängigkeiten werden jeweils *kurz* aufgegriffen (vgl. Tabelle 15).

Da die einzelnen Bewertungen systematisch bedingten Schwankungen, durch vorangehende Kennlinien, unterliegen, werden vorrangig Tendenzen über dem gesamten Parameterbereich interpretiert. Die Zahlenwerte sind in Anhang K.3 dargestellt.

Hart – Weich

Die Paarung *hart – weich* wird laut Faktorenanalyse durch die Schaltkraft F_S und die Lage des Endanschlages F_E bestimmt. Eine Zunahme der Härte mit F_S ist sowohl bei parallelen Flanken (Abbildung 105), als auch bei gleichem Endpunkt (Abbildung 106) ersichtlich.

Analyse

Ein leichter Einfluss der Steigung F_S/x_S ist nahe F_S und F_E ebenfalls auszumachen (vgl. hierzu Abbildung 102 (a)) und damit indirekt der Schaltpunktlage x_S . Eine mittige Lage von x_S scheint eher einen *weicheren* Eindruck zu hinterlassen.

Statt der Steigung kann auch der Einfluss von F_E , wie in Abbildung 102 dargestellt, hinzugezogen werden. Eine begrenzende Wirkung durch eine Beschränkung von F_E könnte in einem gewissen Rahmen möglich sein. Dabei wird jedoch entweder die Lage des Endanschlages oder die Steigung nach dem Schaltpunkt verändert. Allerdings liefern die Untersuchungen hierzu keine konkreten Aussagen, so dass eher von einer Abhängigkeit von F_E von F_S ausgegangen wird.

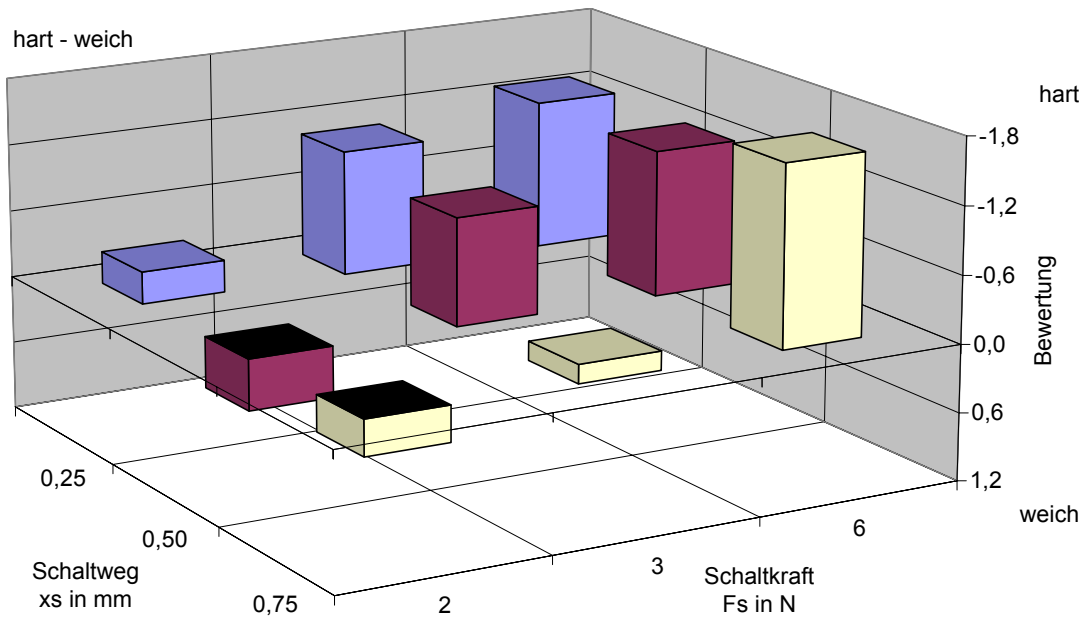


Abbildung 105: Adjektivpaar hart – weich. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei parallelen Flanken.

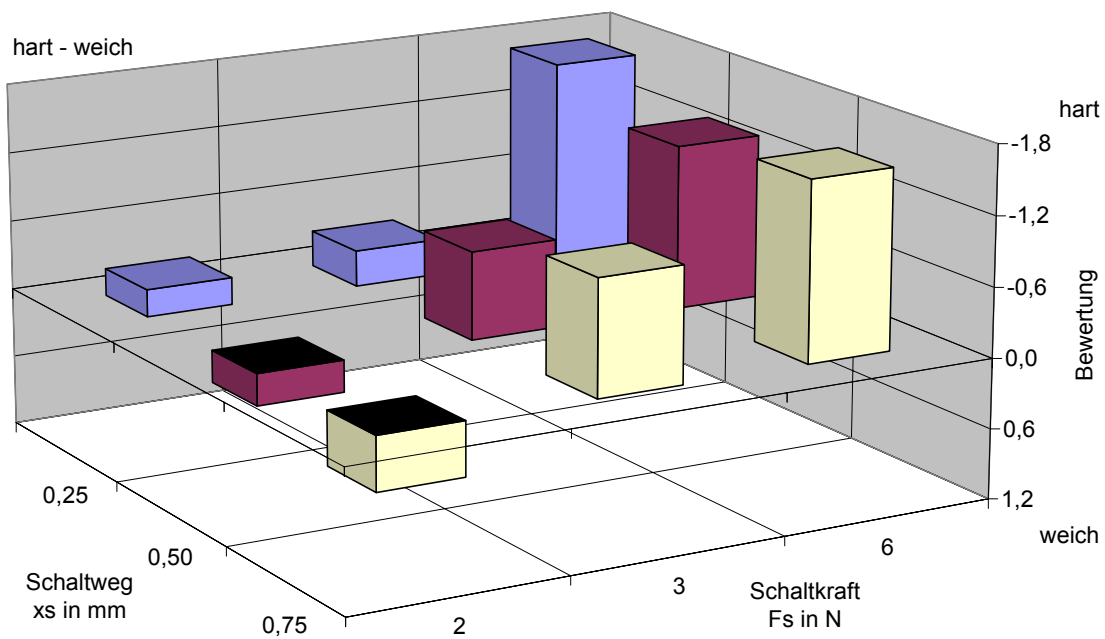


Abbildung 106: Adjektivpaar hart – weich. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei gleichem Endpunkt.

Zusammenfassend kann eine starke Abhängigkeit von der Schaltkraft F_s erkannt werden. Eine Erhöhung der Schaltkraft erbringt in jedem Fall eine Steigerung des Härteeindrucks.

Ein leichter Einfluss der Steigungen F_S/x_S , und damit der Schaltpunktlage x_S , kann auch festgestellt werden. Abhängigkeiten von F_E können sich auf den Härteeindruck auswirken, beschränken dabei jedoch Gesamtweg oder Steigungen.

Ein Einfluss des Kraftsprungs Kraft ΔF und Weg Δx ist anhand der Faktorenanalyse nicht eindeutig zu erkennen. Auch Abbildung 107 zeigt ein uneinheitliches Bild. Während ein Kraftsprung mit $\Delta F = 2 \text{ N}$ einen deutlichen Effekt zeigt, zeigen die übrigen Kraftsprünge keine einheitlichen Abhängigkeiten.

An dieser Stelle lohnt es, den Effekt der ereignisbasierten Wahrnehmung zu berücksichtigen (Vgl. Kapitel 6.3.4): Kraftsprünge werden durch das Integral unterschlagen und nicht als impulsartiges Ereignis wahrgenommen. Es muss also ein anderer Wahrnehmungseffekt das plötzliche Auftreten des Härteeindrucks nach vorherigem Ausbleiben erklären.

Dies kann erklären, weshalb keine ausreichend hohe Korrelation bei der Faktorenanalyse festgestellt wurde: Da das Ereignis erst ab einer bestimmten Schwelle auftritt, zeigt das Bewertungskriterium unterhalb dieser keine Abhängigkeit von den Parametern. Wird die Schwelle überschritten, so zeigen sich Abhängigkeiten. Da nur ein Teil der Parametrisierung Abhängigkeiten zeigt, fallen die Korrelationen entsprechend gering aus.

Dieser zusätzliche Einfluss des Kraftsprungs ΔF kann mit einer Erweiterung der in Abbildung 103, S. 173 dargestellten Flankensteigung $\Delta F/\Delta x$ erklärt werden. Wird die Sprunghöhe, wie in Abbildung 108 dargestellt, durch Multiplikation der Steigung mit der Sprunghöhe ΔF stärker bewertet, so kann der Effekt sogar mathematisch nachvollzogen und erklärt werden.

Demzufolge beeinflusst das Produkt aus Sprunghöhe und Flankensteigung die wahrgenommene Härte.

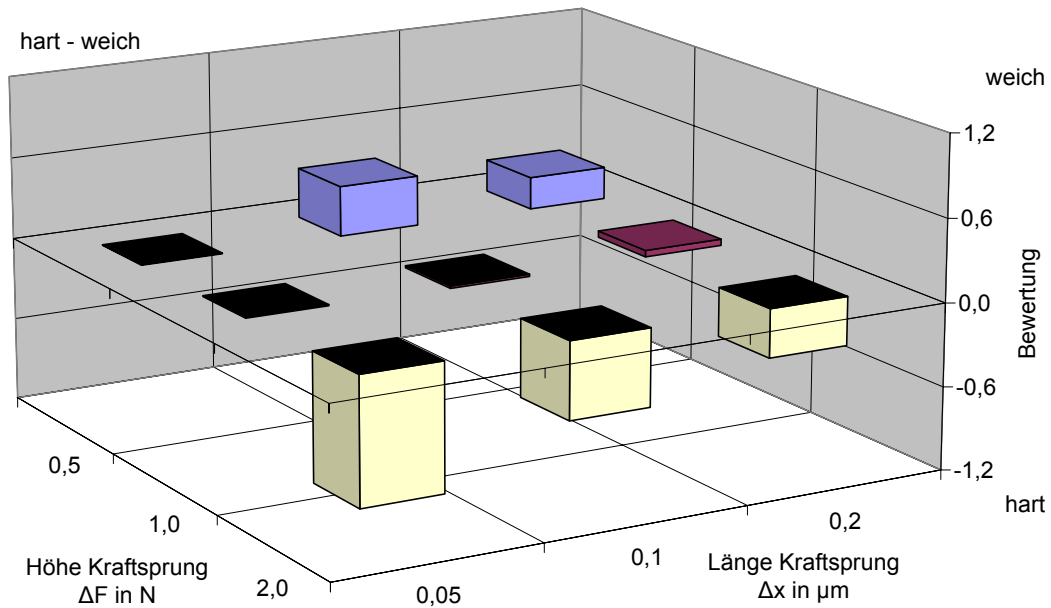


Abbildung 107: Adjektivpaar hart – weich. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx .
Achtung: die Größenachse ist bezüglich der Wertung getauscht hart oben \rightarrow weich oben!

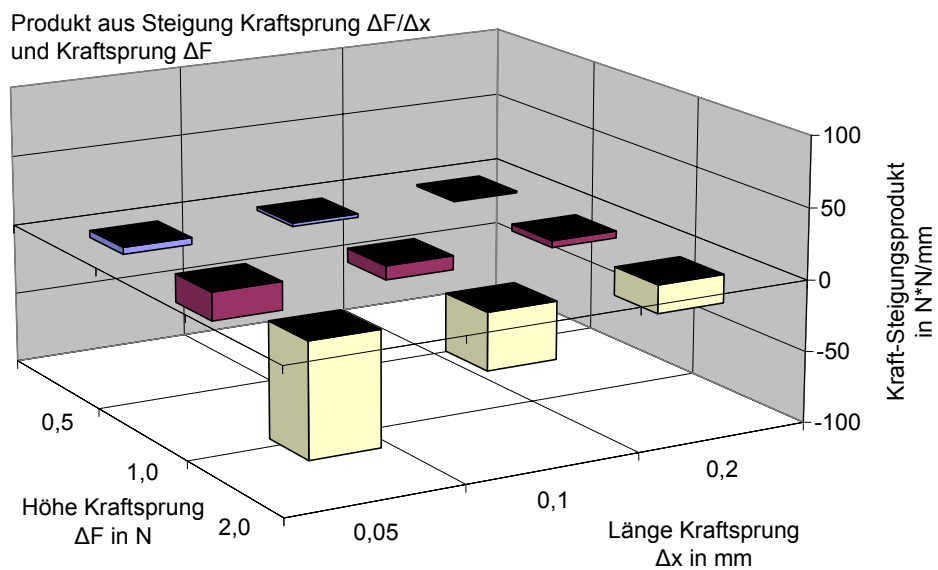


Abbildung 108: Produkt aus Kraftsprunghöhe ΔF und Steigung $\Delta F/\Delta x$ über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx aufgetragen. Es wird ein verstärkter Einfluss des Kraftsprungs ΔF dargestellt.

Die Parametrisierung der Flankenformen dient der Beschreibung der Flanke und steht stellvertretend für verschiedene Parameter in Form von Kennlinienabschnitten mit Strecken und

Steigungen. Daher werden die Eigenschaften der jeweiligen Ausprägungen gesondert interpretiert.

Auffällig in Abbildung 109 ist die als *hart* zu bezeichnende Wertung sobald eine der beiden Flanken hoch, also nach oben gewölbt ausgeprägt ist. Der erste Abschnitt der Flanken ist dabei steiler ausgeprägt. Interessanter Weise scheinen hier der erste Kontakt beim Antasten und die Ausprägung nach dem Schaltpunkt relevant zu sein.

Die tiefe Ausprägung der vorderen Flanke scheint einen ähnlichen Eindruck zu hinterlassen, da auch hier eine härtere Einstufung zu beobachten ist, die nur durch eine zusätzliche tiefe hintere Flanke verringert wird.

Eine steile Flanke vor dem Schaltpunkt scheint den Härteeindruck zu verstärken, wie dies in Abbildung 110 dargestellt ist. Da eine lineare Flanke im gesamten die geringste maximale Steigung hat, wird sie als *weichste* Ausprägung empfunden.

Nach dem Kraftsprung scheint sowohl die Steigung, dem jedoch übergeordnet der Abstand bis zur nächsten steilen Flanke den Eindruck zu bestimmen: Die linear ansteigende Flanke wird trotz einer höheren hinteren Steigung als *weicher* eingestuft, was sich auf den flachen Abschnitt bis zur Knickstelle zurückführen lässt.

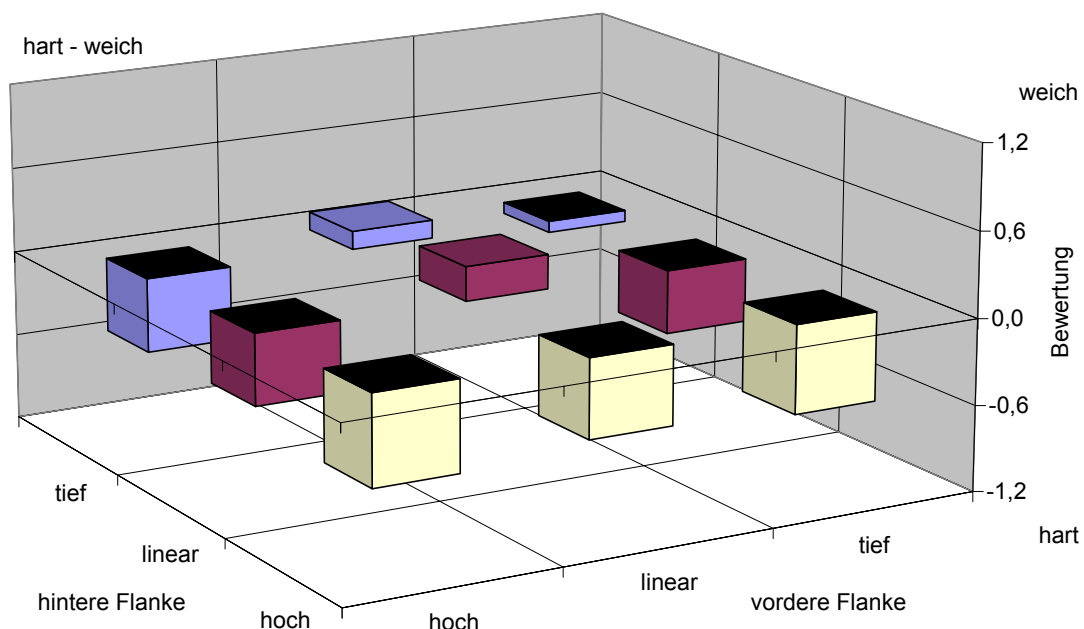


Abbildung 109: Adjektivpaar hart – weich. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n .
Achtung: die Größenachse ist bezüglich der Wertung getauscht hart oben \rightarrow weich oben!

Abbildung 110 zeigt die Parametereinflüsse anhand der Kraft-Weg-Kennlinie. Pfeile zeigen in Richtung „härter“. Ein Ausrufezeichen bedeutet, dass diese Richtung den Eindruck erzwingt. Punktirierte Linien sind *weicher*, gestrichelte Linien härter einzustufen. Die Strich-Punkt-Linie ist zwar steil, bewirkt diesen Effekt jedoch nicht. Eventuell deshalb, weil sie einem Endanschlag ähnelt und daher nicht in die Wertung einfließt.

Zwei lineare Flanken scheinen wie bereits erwähnt das „*weichste*“ Niveau zu erreichen.

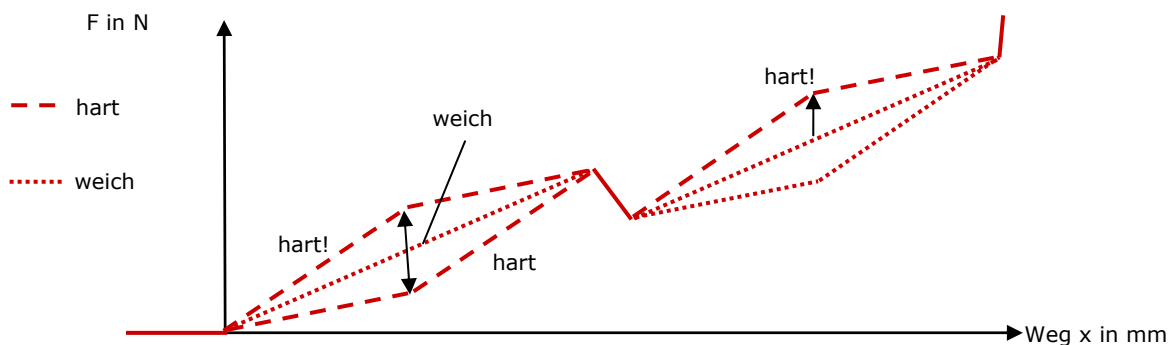


Abbildung 110: Einfluss der Kantenausprägung auf die Wahrnehmung der Härte. Die Kombination zweier linearer Flanken erzeugt demzufolge den weichsten Eindruck. Ein Ausrufezeichen bedeutet, dass dieser Parameter zwingend auf die übrigen wirkt.

Zusammenfassung hart – weich

Den stärksten Einfluss auf die Paarung hat die Schaltkraft F_S . Die Schaltpunktlage beeinflusst dies gering, scheint jedoch mittig angeordnet ein gemäßigtes Verhalten zu begünstigen. Das Kraftniveau des Endanschlages scheint den Härteeindruck begrenzen zu können.

Der Kraftsprung dF selbst kann bei entsprechend starker Ausprägung den Härteeindruck beeinflussen, ein kurzer Kraftsprung Δx verstärkt den Eindruck. Dies kann als Hinweis auf eine ereignisbasierte Wahrnehmung des Kraftsprunges gewertet werden.

Die Ausprägung der Flanken beeinflusst auch den Härteeindruck. Dabei bewirken nach oben gewölbte Flanken unabhängig von der jeweils anderen Flanke eine Verstärkung des Härteeindrucks. Lineare Flanken oder eine nach unten gewölbte hintere Flanke begünstigen einen *weichen* Eindruck.

Leichtgängig – schwergängig

Die Paarung *leichtgängig* – *schwergängig* gehört nach Faktorenanalyse auch dem Faktor Gängigkeit und Härte an. Die Parameter des Kraftsprungs zeigen allerdings in dieser Paarung keine Korrelationen.

Analyse

Auch in Abbildung 111 und Abbildung 112 ist der Einfluss von F_S klar erkennbar. Eine Abhängigkeit von F_S/x_S , bzw. x_S ist dagegen nicht zu erkennen.

Bei parallelen Flanken scheint die Begrenzung von F_E im steilsten Fall ($x_S = 0,25$ mm, $F_S = 6$ N) die *Schwergängigkeit* sogar zu reduzieren.

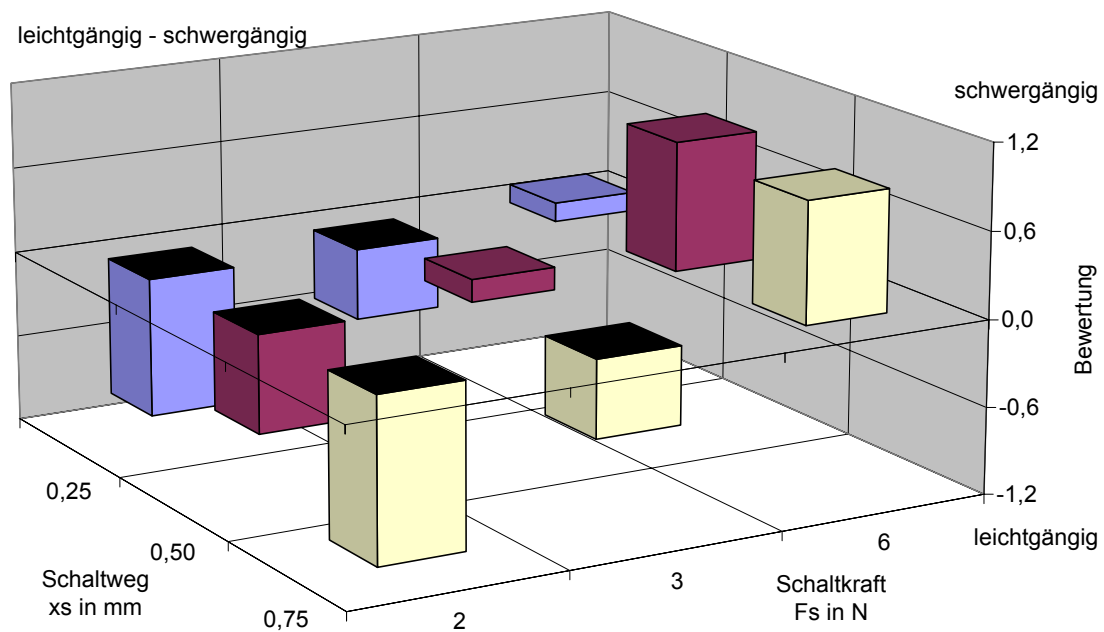


Abbildung 111: Adjektivpaar schwergängig – leichtgängig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S parallelen Flanken.

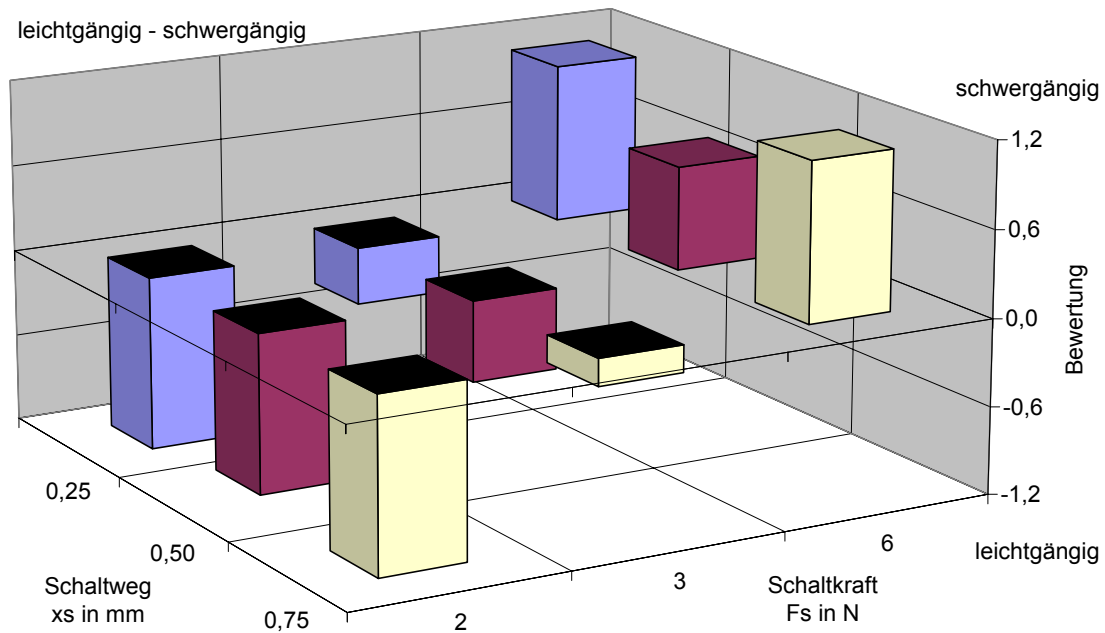


Abbildung 112: Adjektivpaar schwergängig – leichtgängig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei gleichem Endpunkt.

Die Kraftsprungparameter in Abbildung 113 zeigen schwache, uneinheitliche Tendenzen, die kaum Aussagen zulassen. Eine schwache Tendenz zu einer *schwergängigeren* Wahrnehmung mit steigender Kraftsprunghöhe ΔF kann gemacht werden. Die Kraftsprunglänge Δx zeigt keinen gleichförmigen Einfluss. Ein gleichmäßig als leichtgängig bewerteter Einfluss ist bei einer Kraftsprunghöhe $dF = 1 \text{ N}$ zu erwarten, am leichtgängigsten wird das Bedienelement bei $\Delta F = 0,5 \text{ N}$ und $\Delta x = 0,1 \text{ mm}$.

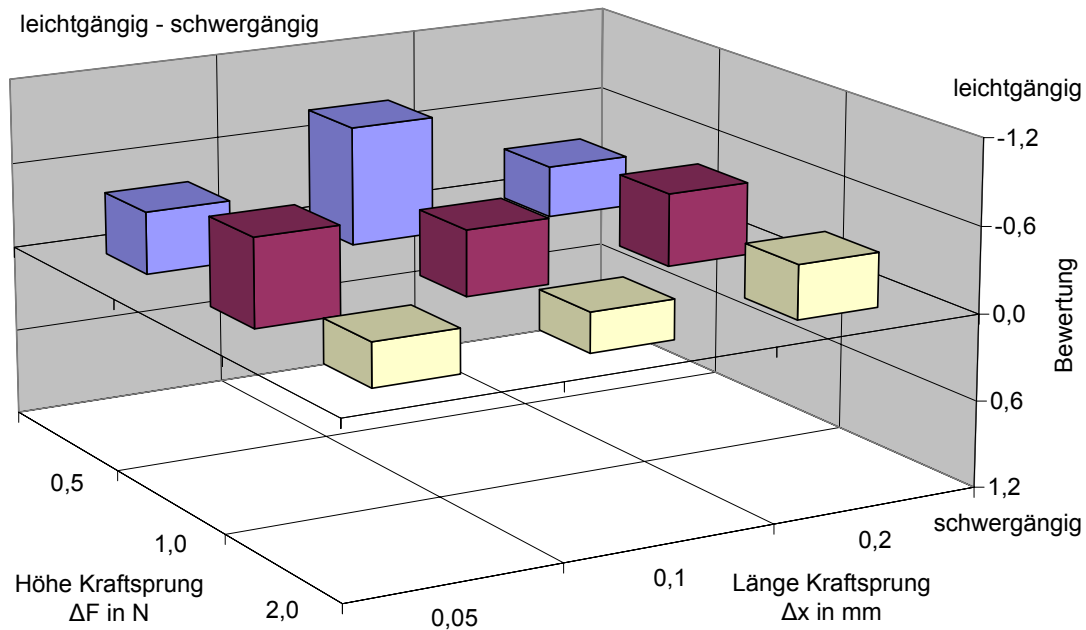


Abbildung 113: Adjektivpaar schwergängig – leichtgängig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx .
Achtung: Die Größenachse ist bezüglich der Wertung vertauscht schwergängig oben \rightarrow leichtgängig oben!

Die Flankenausprägung in Abbildung 114 zeigt für eine lineare vordere Flanke leichtgängige Eigenschaften. Zwei hoch ausgeprägte Flanken erzeugen das *schwergängigste*, zwei tief ausgeprägte das *leichtgängigste* Verhalten. Betrachtet man die Fläche unter der Kurve, so können Parallelitäten zur Bewertung von Drehstellern gefunden werden: Es wird ein Zusammenhang zwischen Gängigkeit und Härte mit der Amplitude der Integraldarstellung festgestellt (Kapitel 5.6.5), so dass deren maximale Amplitude als Indikator für die Härte eines Bedienelementes hinzugezogen werden kann. Für die Beurteilung leichtgängig kann dies auch physikalisch nachvollzogen werden, da die Fläche unter dem Kraft-Weg-Diagramm dem Energieaufwand entspricht.

Linear ausgeprägte Flanken scheinen Leichtgängigkeit zu begünstigen. Generell nimmt die *Schwergängigkeit* von tiefer zu hoher Ausprägung hin zu.

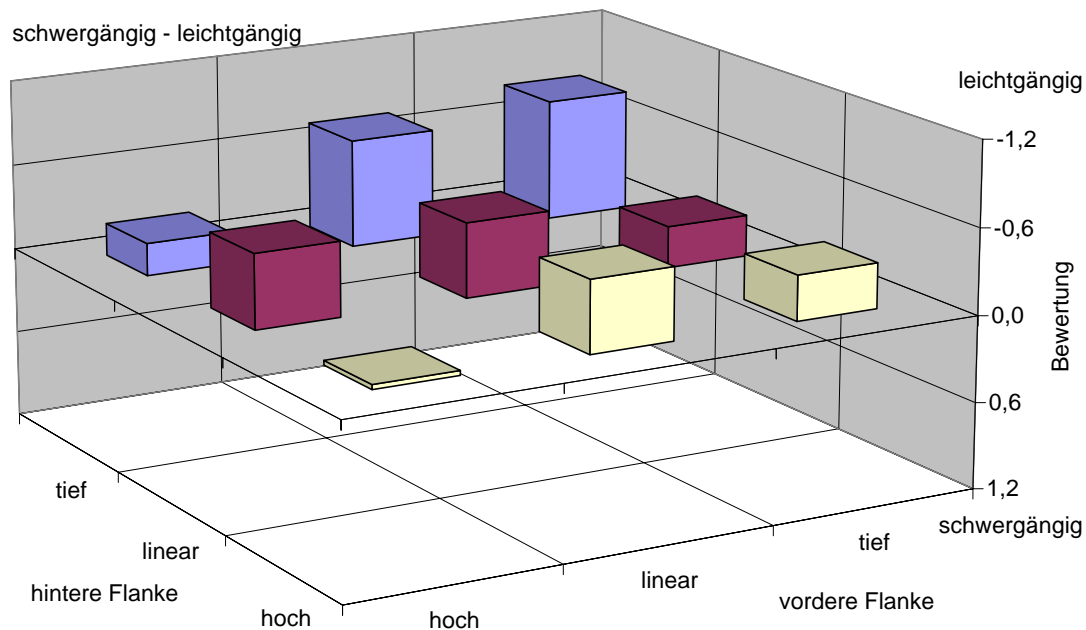


Abbildung 114: Adjektivpaar schwergängig – leichtgängig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n . Achtung: Die Größenachse ist bezüglich der Wertung vertauscht hart – weich \rightarrow weich – hart!

Zusammenfassung leichtgängig - schwergängig

Der Eindruck *schwergängig* – *leichtgängig* unterscheidet sich nur leicht von dem von *hart* – *weich*. Auffällig ist, dass hier das gesamte Antwortspektrum ausgenutzt wird, während im anderen Fall der Bereich „*weich*“ kaum berührt wird. Demzufolge sind leichtgängige Bedienelemente nicht zugleich als „*weich*“ einzustufen.

Ebenso spielt die Ausprägung des Kraftsprungs hier eine vergleichsweise geringe Rolle: Dies kann eventuell damit zusammenhängen, dass ein Kraftsprung etwas mit einem Impuls (vgl. Kapitel 6.3) zu tun hat. Ein Impuls kann „*hart*“ sein, jedoch nicht „*leicht-* oder *schwergängig*“.

Die Flankenform zeigt von tiefer nach hoher Flanke eine Zunahme der *Schwergängigkeit*, was vergleichbar mit Beobachtungen bei Drehstellern auf die Fläche unter der Kurve, bzw. die Amplitude der Integraldarstellung bezogen werden kann.

Schwammig – Präzise

Die Bewertung von *schwammig* – *präzise* korreliert mit sämtlichen untersuchten Parametern, zum Teil jedoch nur sehr schwach, hauptsächlich jedoch mit Kraftsprung (ΔF , Δx), Schaltkraft F_S und Kraftniveau des Endanschlags F_E .

Analyse

Eine Steigerung der Schaltkraft F_S erhöht nach Abbildung 115 offensichtlich das Präzisionsgefühl.

Bei parallelen Flanken scheint der Eindruck nahezu unabhängig von x_S zu sein. Bei gleichem Endpunkt zeigt zudem die Steigung nach dem Schaltpunkt Auswirkungen, wie dies ein Vergleich von Abbildung 116 mit einem Rechenbeispiel in Abbildung 117 zeigt. Dabei wird die Schaltkraft F_S mit der Steigung nach dem Schaltpunkt multipliziert.

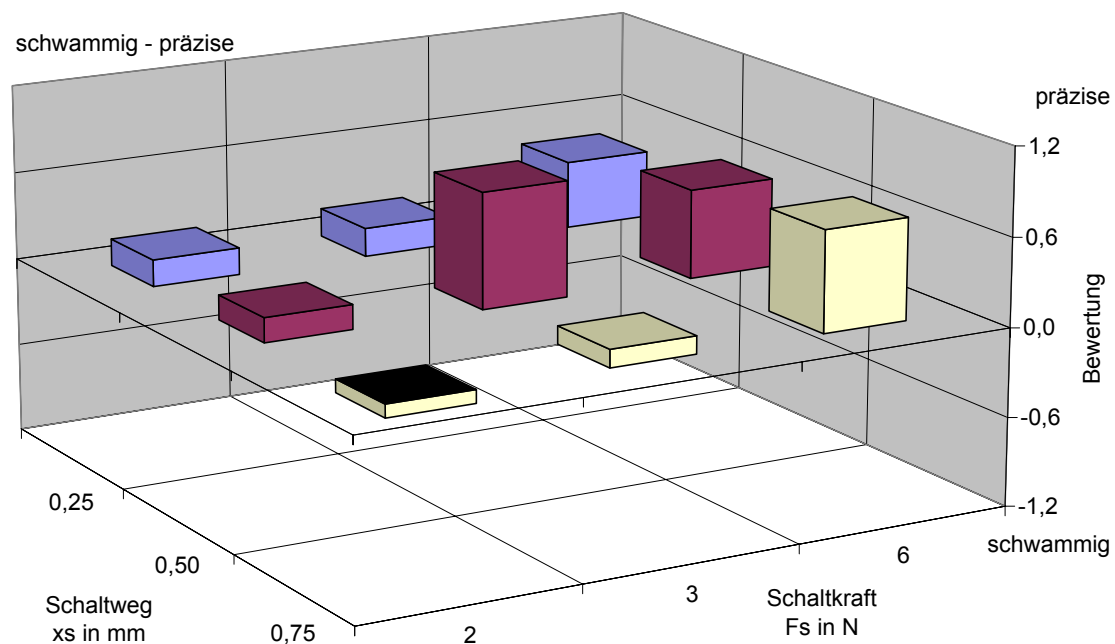


Abbildung 115: Adjektivpaar präzise – schwammig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei parallelen Flanken.

Auffällig ist jeweils der Punkt mit mittlerem Weg ($x_S = 0,5$ mm) und mittlerer Schaltkraft ($F_S = 3$ N). Er erreicht den höchsten Präzisionseindruck bei parallelen Flanken und ein sehr hohes Niveau bei gleichem Endpunkt, womit er bei einem Kraftniveau von $F_S = 3$ N durchgängig höchste Präzision erreicht, wozu ansonsten ein höheres Schaltkraftniveau F_S notwendig wäre. Dies zeigt den Einfluss der Lage des Schaltpunktes auf, wonach der mittig zu x_E gelegene Schaltpunkt x_S eine besondere Rolle spielt.

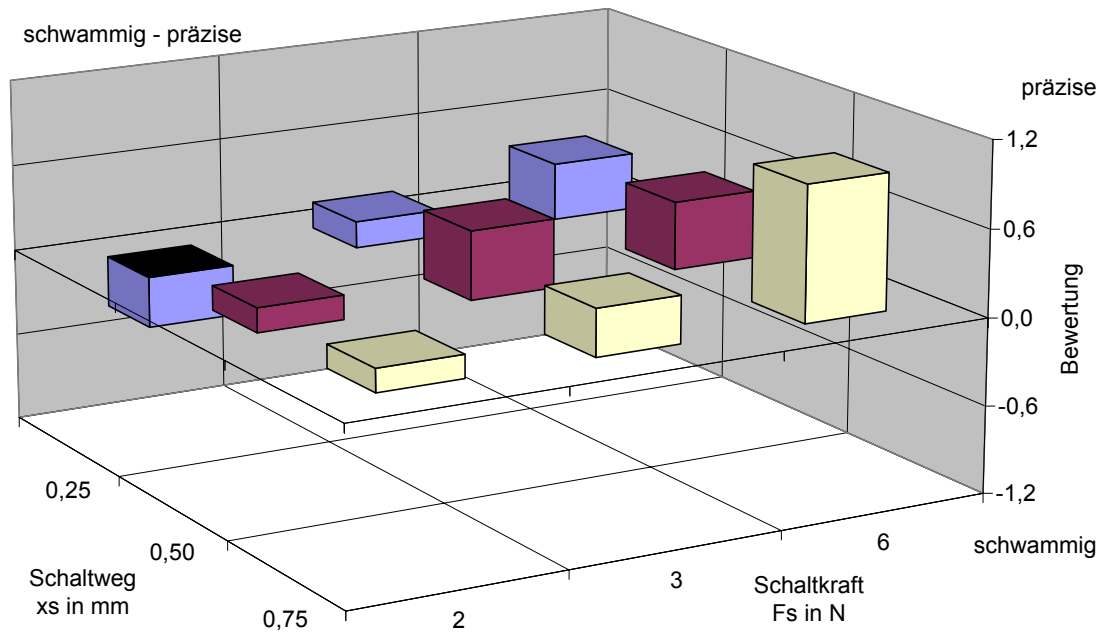


Abbildung 116: Adjektivpaar präzise – schwammig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei gleichem Endpunkt.

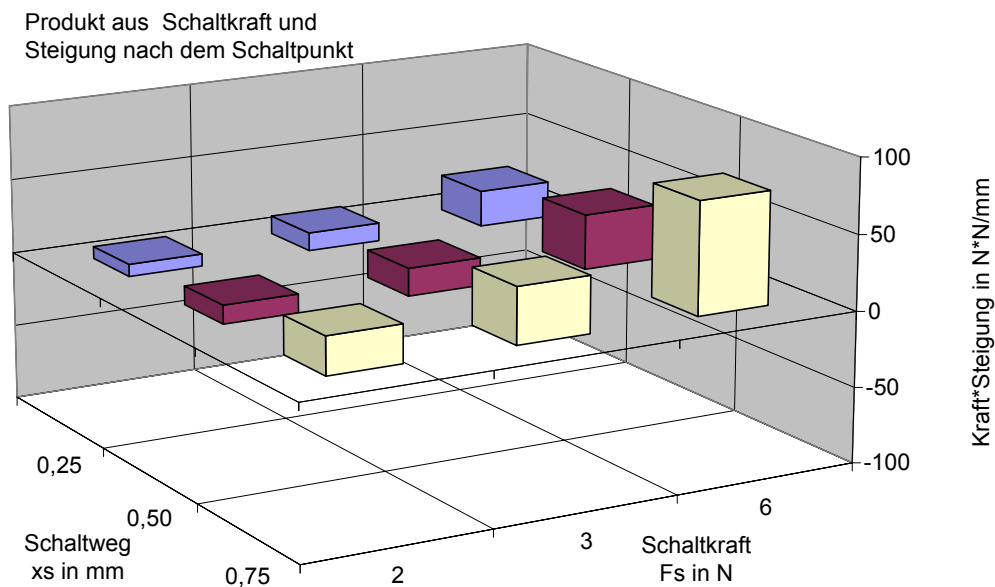


Abbildung 117: Darstellung des Produkts von Kraft F_s und Steigung nach dem Schaltpunkt (F/x) über den Parametern Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei gleichem Endpunkt.

Der Einfluss der Kraftsprungparameter zeigt auch in der Faktorenanalyse starke Korrelationen. Abbildung 118 zeigt einen Einfluss der Kraftsprunghöhe ΔF , während Δx nur schwer interpretierbar ist.

Auch hier kann ein Einfluss der ereignisbasierten Wahrnehmung Ursache dafür sein, dass ein nicht wahrgenommener Kraftsprung den Eindruck *schwammig* begünstigt, während das Vorhandensein ein Präzisionsgefühl unterstützt.

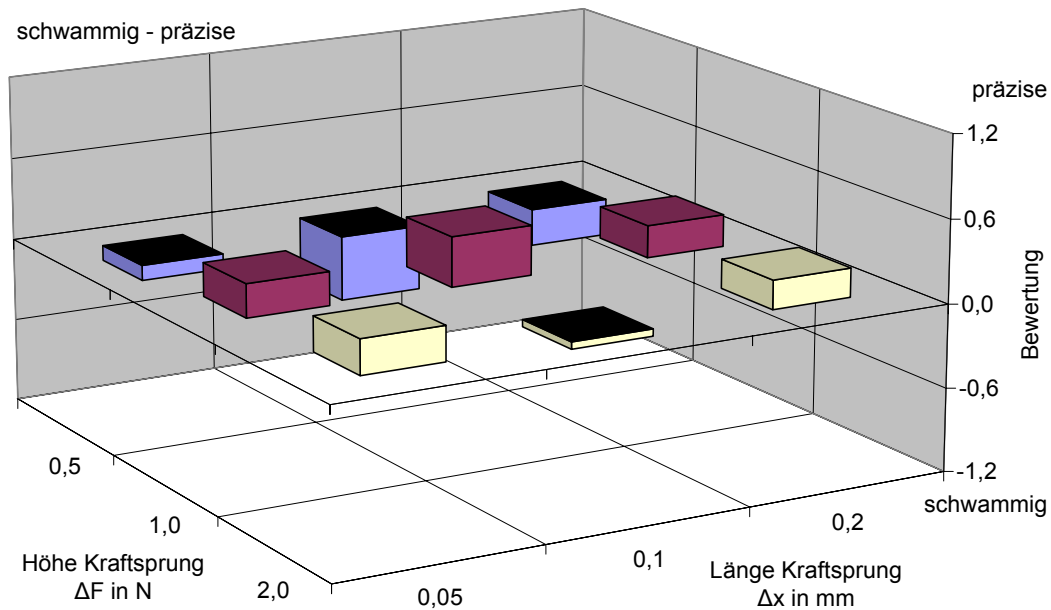


Abbildung 118: Adjektivpaar präzise – schwammig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx .

Der Einfluss der Flankenformen ist gering, jedoch vorhanden. Generell wird *präzise* geurteilt, *schwammig* tritt nicht auf.

Eine eher *schwammige* Bewertung ist bei hoch ausgebildeter vorderer Flanke zu erwarten. Linear und tief ausgebildet ist eher von einem *präziseren* Eindruck auszugehen. Die Interpretation der hinteren Flanke kann am ehesten dahingehend gemacht werden, dass eine tiefe hintere Flanke einen *schwammigen* Eindruck begünstigt.

In Abbildung 120 sind zu erwartende Einflüsse aufgetragen. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Winkel sowohl oben und unten im Kraftsprung den Präzisionseindruck bestimmen. Dies entspräche den jeweiligen Steigungsänderungen, wie sie im Haptik-Grafikversuch in Kapitel 6.4 als Abbildungen D und D² der Ableitungen eingesetzt worden sind.

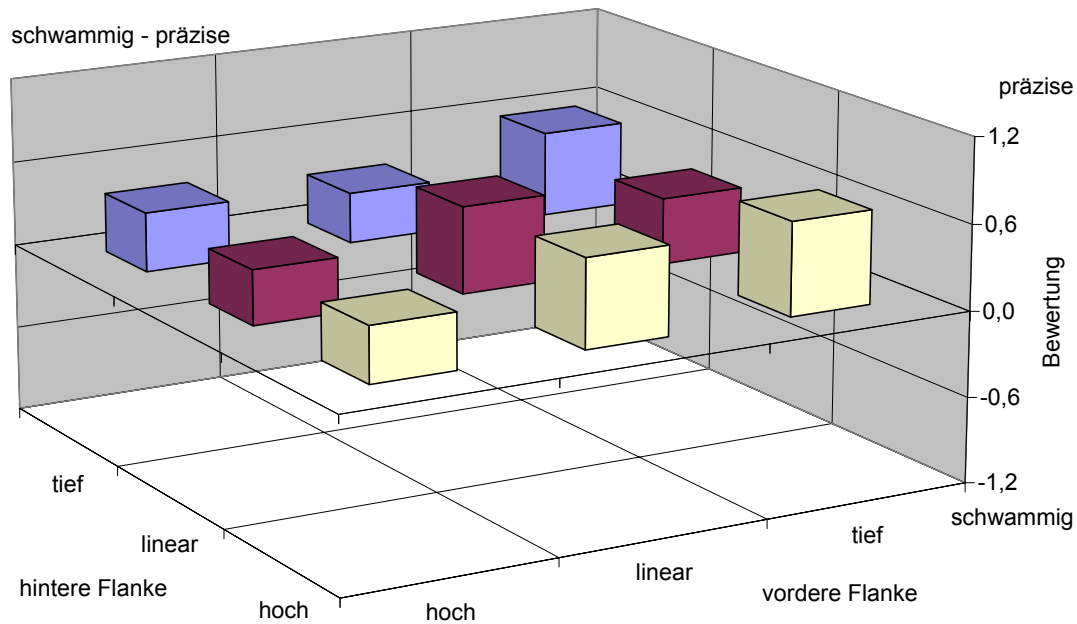


Abbildung 119: Adjektivpaar präzise – schwammig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n .

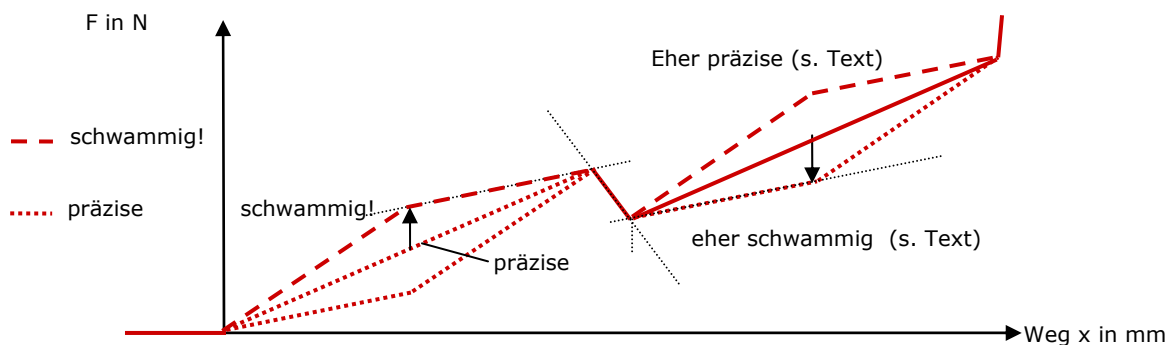


Abbildung 120: Einfluss der Kantenausprägung auf die Wahrnehmung der Präzision. Ein Ausrufezeichen bedeutet, dass dieser Parameter zwingend auf die übrigen wirkt.

Zusammenfassung präzise – schwammig

Hohen Einfluss auf den Eindruck *präzise – schwammig* hat die Schaltkraft F_S . Verlaufen die Flanken nicht parallel, so gewinnt die Flankensteigung nach dem Schaltpunkt an Einfluss. Eine Ausnahme stellt jedoch die mittige Lage ($x_S = 0,5$ mm) bei $F_S = 3$ N dar. Sie bietet durchgängig einen hohen Präzisionseindruck.

Der Kraftsprung scheint, beinahe digital, ein gewisses Niveau erreichen zu müssen, um den Eindruck von Präzision zu bewirken. Ebenso kann ein Bezug zu den Differentialdarstellungen

aus den Haptik-Grafik-Vergleichen gezogen werden, was insgesamt für eine ereignisbasierte Wahrnehmung spricht.

Die Bewertung der Flankenform ist vergleichsweise schwach vorhanden jedoch gut interpretierbar: Eine hoch ausgeformte vordere Flanke und tiefe hintere Flanke bewirken eher einen *schwammigen* Eindruck. Lineare Flankenverläufe unterstützen dagegen eher ein *präzises* Schaltgefühl.

Kurz – lang

Die Bewertung *kurz* – *lang* korreliert nach Faktorenanalyse sowohl sehr gut mit Parametern des Kraftsprungs, als auch gut mit Kraftsprung und der Lage des Endanschlags in F_E und x_E .

Analyse

Generell werden die vorgestellten Bedienelemente nicht als „*lang*“ beurteilt, was vermutlich auf die kurze Ausführung der Bedienelemente als Kurzhubtaster zurückzuführen ist.

Die Korrelation mit F_S und x_S wird anhand der Faktorenanalyse eher mittelmäßig bis schwach bewertet. Abbildung 121 und Abbildung 122 zeigen jedoch einen starken und gleichförmigen Einfluss.

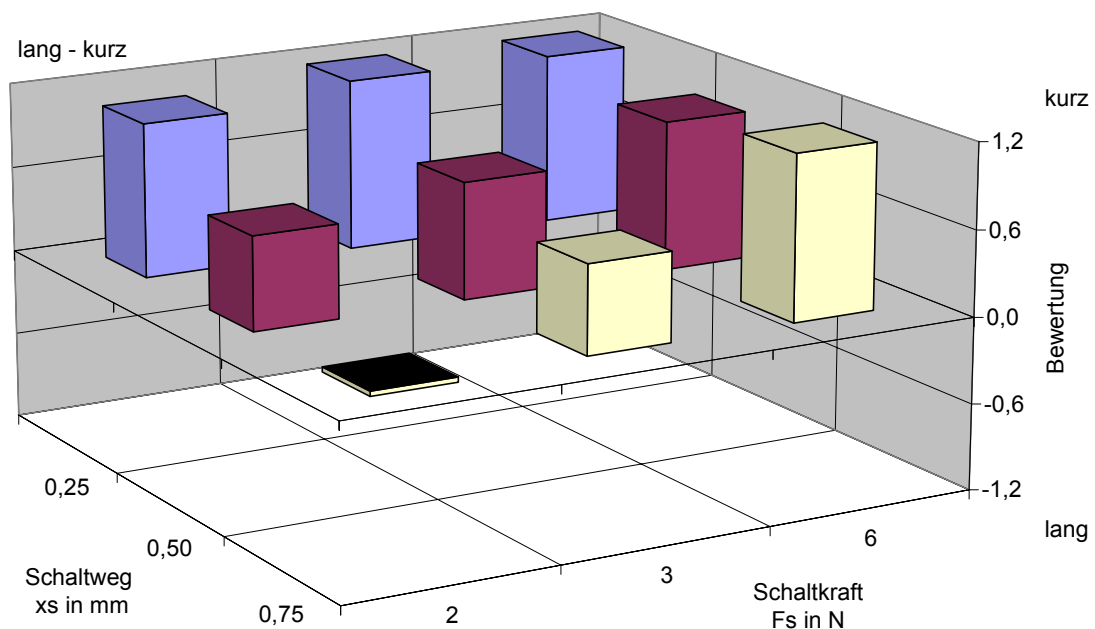


Abbildung 121: Adjektivpaar lang – kurz. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei parallelen Flanken.

Das Antwortverhalten bei parallelen Flanken ist gut mit der Steigung der vorderen Flanke (F_S/x_S , Abbildung 102 (a), S.172) vergleichbar. Dabei ist das Urteil jedoch nur begrenzt vergleichbar; ähnlich F_E bei *hart – weich*.

Dem gegenüber bestimmt der Schaltweg x_S indirekt die Länge des Bedienelementes, weshalb ein kurzes x_S auch durchgängig einen *kurzen* Eindruck erzeugt. Wird x_S größer, so gewinnt auch F_S zunehmend einen Einfluss, indem hohe Kräfte einen kürzeren Eindruck bewirken als niedrige.

Bei gleichem Endpunkt ist ein ungleichmäßiges Verhalten festzustellen. Eine kurze bis mittlere Schaltpunktlage ($x_S = 0,25 - 0,5$ mm) nimmt gleichförmig mit der Schaltkraft F_S zu. Bei spätem x_S scheint sich das Verhältnis zu drehen und mit sinkender Schaltkraft F_S anzusteigen.

Dieser Effekt kann durch den Flankenverlauf und die Steigung des Endanschlags erklärt werden. So fällt die Steigung nach dem Schaltpunkt flacher als die Steigung vor dem Endanschlag aus. Lediglich bei $x_S = 0,25$ mm und $F_S = 2$ N ist die Steigung geringfügig größer; allerdings auch deren Urteil eher steiler.

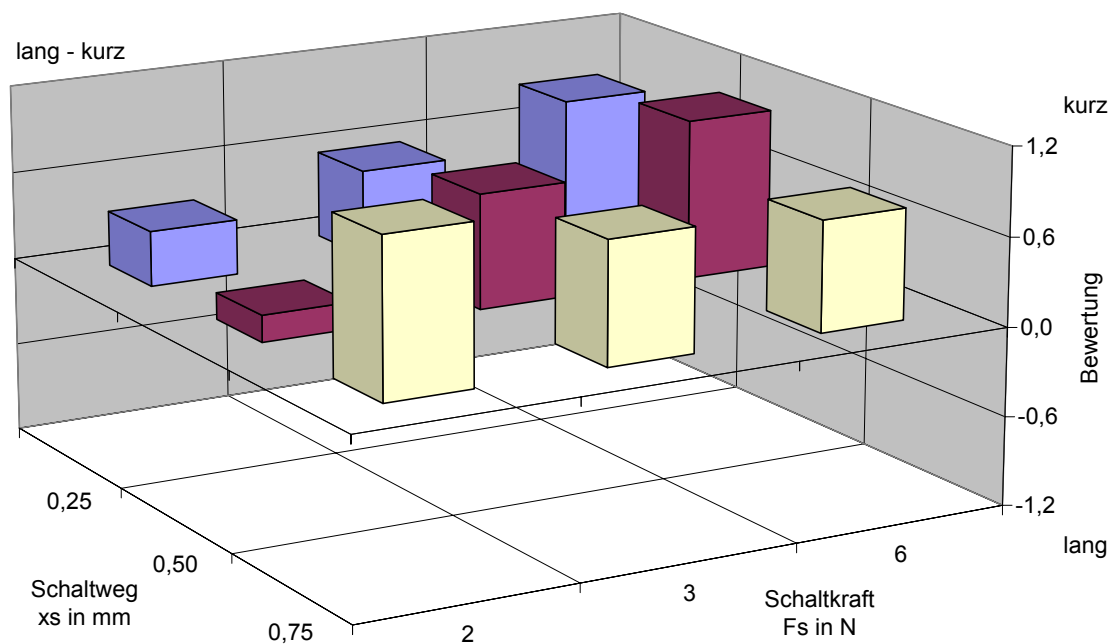


Abbildung 122: Adjektivpaar lang – kurz. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei gleichem Endpunkt.

Abbildung 123 zeigt eine mögliche Verknüpfung, die dem Antwortverhalten sehr nahe kommt. Dabei werden die beiden Steigungen gewichtet verglichen und der jeweils höhere Steigungsanteil aufgetragen (Abbildung 102, S. 172). Die Steigung vor dem Schaltpunkt wird um den Faktor 1,6 schwerer gewichtet als die Steigung nach dem Schaltpunkt.

Damit kann gezeigt werden, dass die Flankensteigungen je nach Ausprägung in den Vordergrund treten können und den Effekt *lang* – *kurz* beeinflussen, wobei hohe Steigungen den Eindruck „*kurz*“ vermitteln.

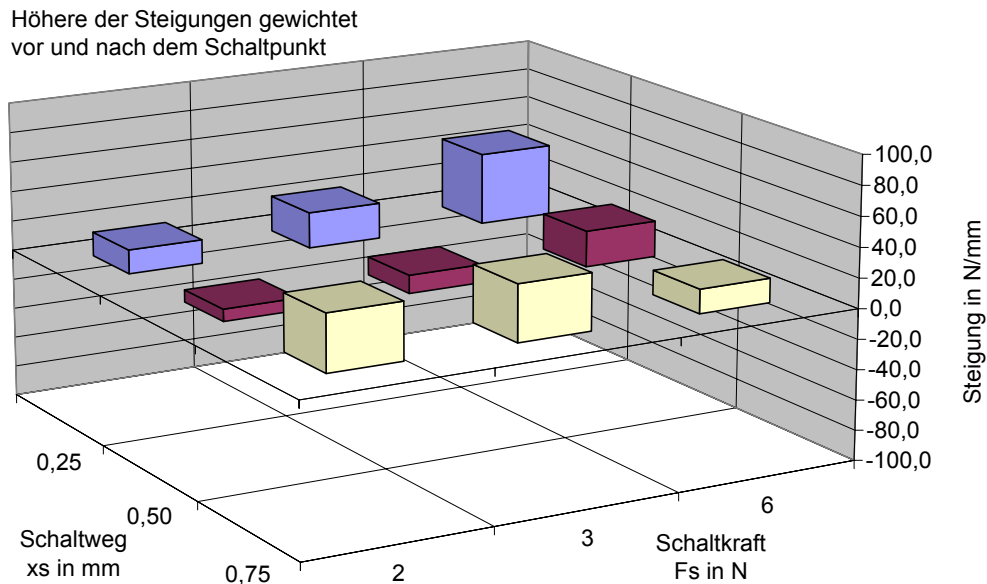


Abbildung 123: Auftragung der höheren Steigung. Die Steigung vor dem Schaltpunkt wird mit dem Faktor 1,6 höher gewichtet als die nach dem Schaltpunkt.

Der Einfluss des Kraftsprungs wirkt laut Faktorenanalyse sehr stark auf die Längenwahrnehmung, was auch in Abbildung 124 gut ersichtlich ist. Die Tendenzen fallen recht klar aus und gehen mit wachsendem Δx und ΔF von *kurz* zu *lang* hin über. Ein hoher flacher Kraftsprung wird demzufolge als länger empfunden als ein niedriger, steiler. Der Effekt ist unerwartet stark ausgeprägt. Dies kann durchaus daran liegen, dass das Kraftniveau bei einem hohen Kraftsprung entsprechend niedriger ausfällt. Auch hier wird die Wertung *lang* nur zögerlich vergeben, was ebenfalls auf die recht kurze Ausführung der vorgestellten Kennlinien zurückzuführen ist.

Die Beurteilung der Flanken zeigt das Urteil „*kurz*“ für eine hohe hintere Flanke und „*weniger kurz*“ für eine tiefe hintere Flanke. Dies kann auf die Position des Kraftanstiegs nach dem Kraftsprung zurückgeführt werden.

Eine tiefe vordere Flanke bewirkt ebenfalls einen *kurzen* Eindruck, sofern die hintere Flanke nicht auch tief ausgeführt ist. Eine lineare hintere Flanke bewirkt einen längeren Eindruck, eine lineare vordere ordnet sich der hinteren Flanke unter. Demzufolge ist die hintere Flanke maßgeblich für das Verhalten.

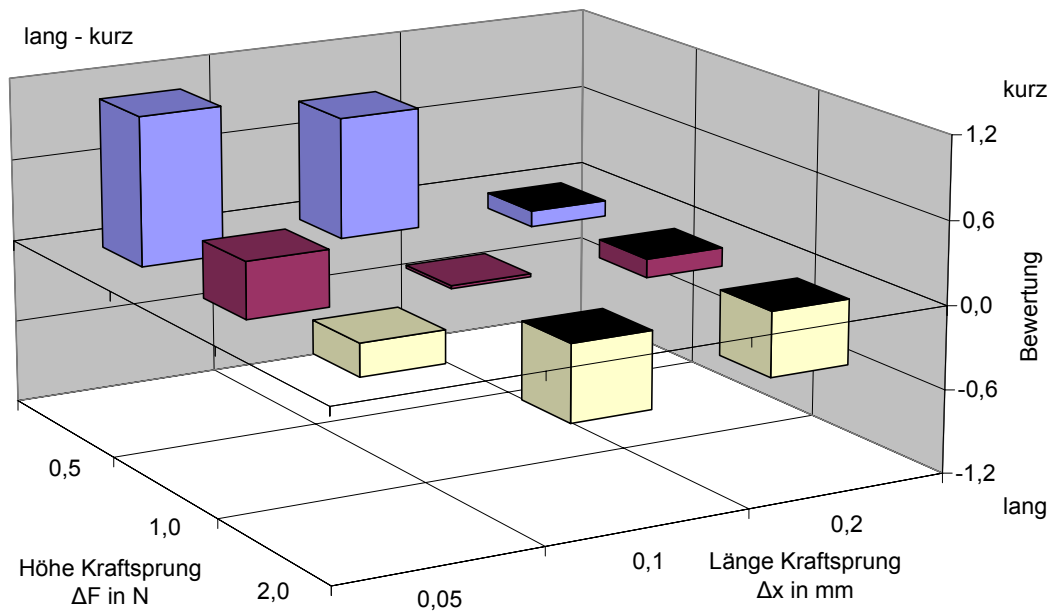


Abbildung 124: Adjektivpaar lang – kurz. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx .

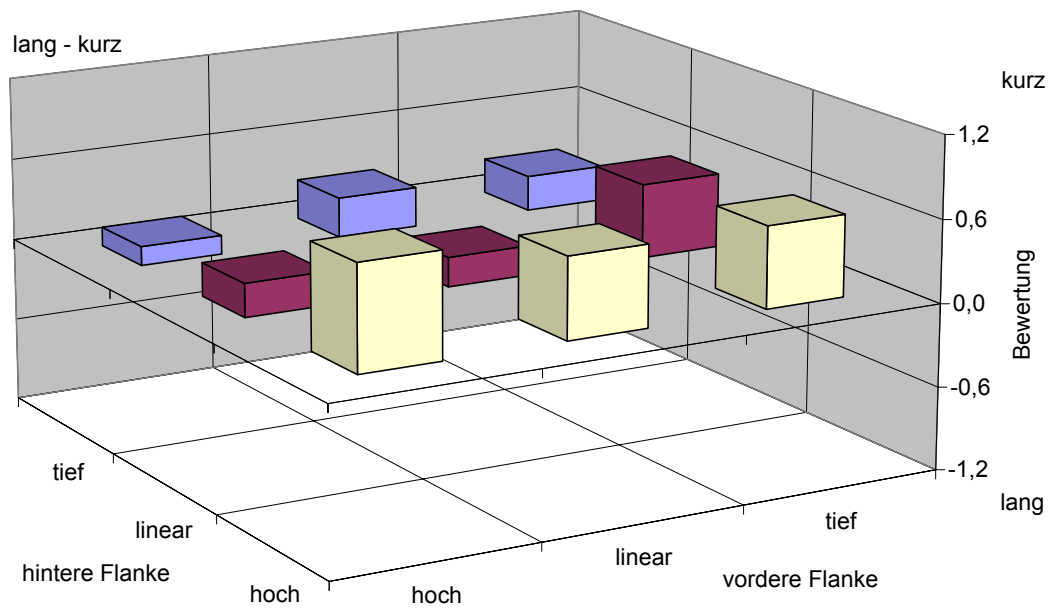


Abbildung 125: Adjektivpaar lang – kurz. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n .

Abbildung 126 stellt die Wirkung der Flanken anhand der Kraft-Weg-Kennlinie dar.

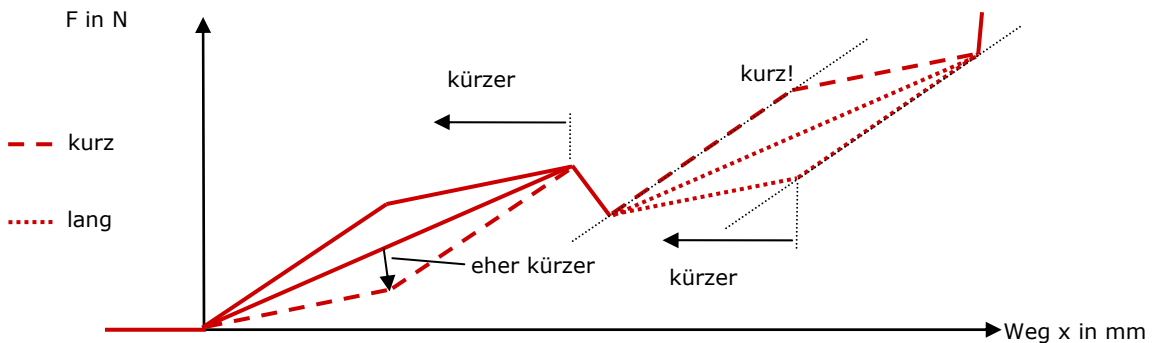


Abbildung 126: Einfluss der Kantenausprägung auf die Wahrnehmung der Paarung lang - kurz. Ein Ausrufezeichen bedeutet, dass dieser Parameter zwingend auf die übrigen wirkt.

Zusammenfassung kurz – lang

Maßgeblich für die Wahrnehmung *kurz* – *lang* ist wiederum die Lage des Schaltpunktes, vor allem aber der Kraftsprung. Die Flankenform zeigt einen vergleichsweise kleinen Einfluss.

Bei der Lage des Schaltpunktes können Korrelationen mit den Flankensteigungen gefunden werden. Dabei tritt jedoch je nach Kurvenform die steilere der beiden Flanken vor und nach dem Schaltpunkt in den Vordergrund. Die vordere Flanke wird dabei offensichtlich stärker gewichtet.

Vorhandensein des Schaltpunktes

Die höchste Auswirkung auf die Wahrnehmung des Schaltpunktes zeigt in Abbildung 127 die Ausprägung des Kraftsprungs mit Höhe ΔF und Weg Δx . Dabei zeigt vor allem die Höhe ΔF des Kraftsprunges den maßgeblichen Einfluss, allerdings auch dessen Länge Δx und damit die Steigung. Tabelle 16 zeigt die Steigungen des Kraftsprunges im Versuch (vgl. Abbildung 103, S. 173). Dies deckt sich mit den Feststellungen in Kapitel 6.4.4, wonach eine gewisse minimale Ausprägung des Schaltpunktes notwendig ist um diesen als impulshaftes Ereignis wahrzunehmen. Eine Wahrnehmungsschwelle ist hier demzufolge vorhanden.

Der Effekt ist auch bei der Bewertung *präzise* – *schwammig* zu beobachten, was den direkten Schluss zulässt, dass die Wahrnehmung eines Schaltpunktes unmittelbar den Präzisionseindruck eines Bedienelementes erhöht.

Tabelle 16: Steigungen $\Delta F/\Delta x$ der einzelnen Versuchskennlinien

Steigung in N/mm			Länge Δx des Kraftsprungs in mm		
			0,05	0,1	0,2
Höhe ΔF des Kraftsprungs in N	0,5	17% F_S	10	5	2,5
	1	33% F_S	20	10	5
	2	67% F_S	40	20	10

Ein χ^2 -Test zeigt, dass der einzige nicht signifikant gleichverteilte Parametersatz der des Kraftsprungs ΔF , Δx in Abbildung 127 ist (vgl. Anhang K.3.5). Die übrigen sind als gleichverteilt zu betrachten. Die Erkennung des Schaltpunktes hängt demzufolge nur vom Parametersatz des Kraftsprungs ab.

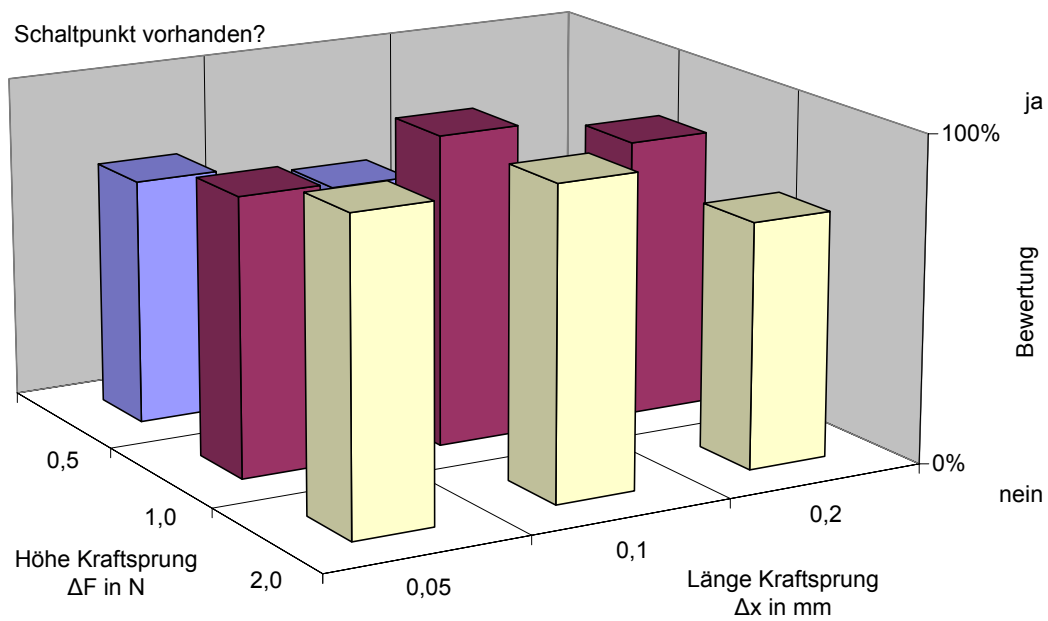


Abbildung 127: Antwortverhalten zum Vorhandensein eines Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx .

Lage des Schaltpunktes

Die Lage des Schaltpunktes x_S beeinflusst dessen Wahrnehmung bei gleichem Endpunkt. D.h. die relative Position von x_S zu x_E ist eine relevante Größe. Die Schaltkraft zeigt bei der mittleren Kraft von 3 N eine Überhöhung des als *früh* wahrgenommenen Schaltpunktes. Die Ursache hierfür ist unbekannt.

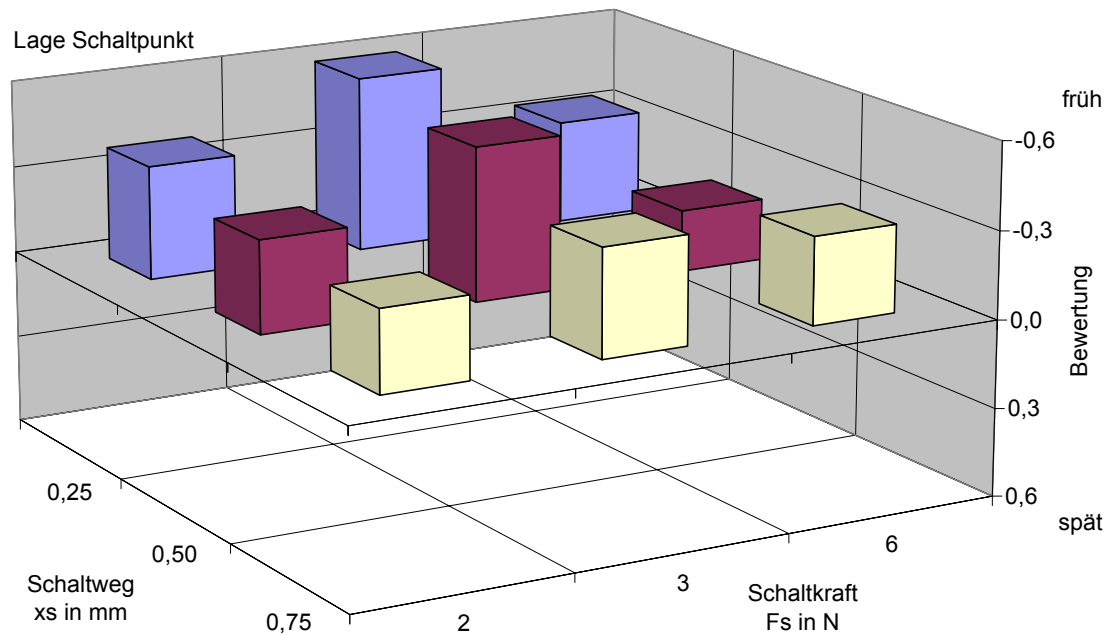


Abbildung 128: Antwortverhalten zur Lage des Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei parallelen Flanken.

Der Parametersatz der Schaltpunktlage bei parallelen Flanken zeigt auch uneinheitliches Verhalten. Ein Einfluss der Schaltkraft F_S kann erkannt werden, indem höhere Kräfte einen *späteren* Eindruck bewirken. Zudem kann hier das Verhältnis x_S/x_E hinzugezogen werden, demzufolge ein mittig orientierter Parameter eine *frühe* Schaltpunktwahrnehmung bewirkt.

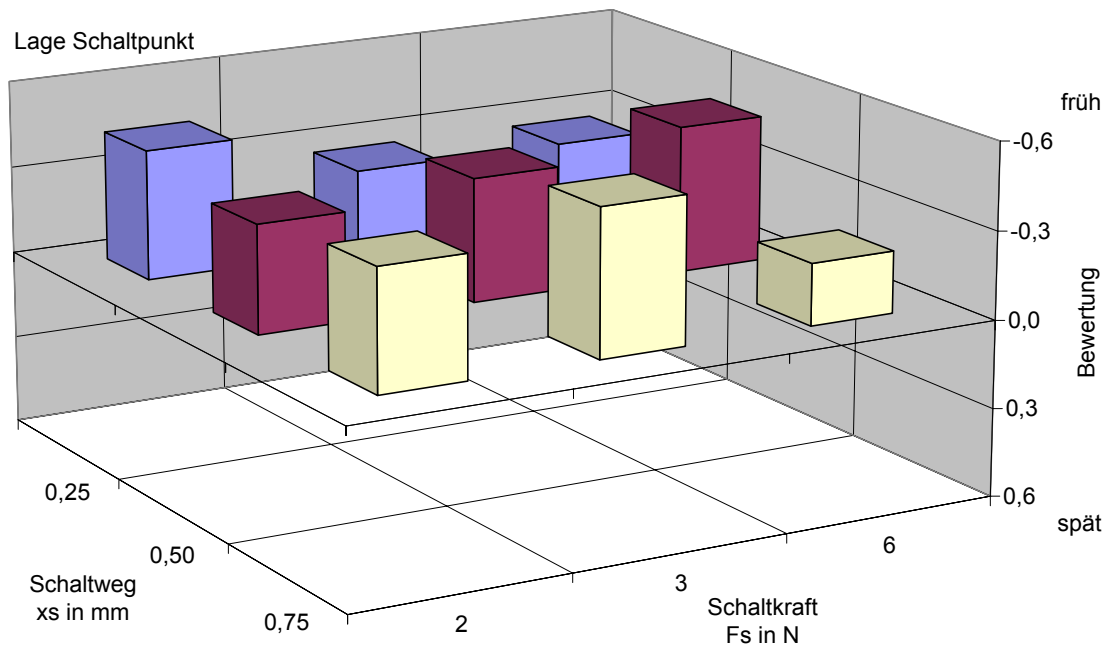


Abbildung 129: Antwortverhalten zur Lage des Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern Schalkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei gleichem Endpunkt x_E .

Ein gleichmäßiges Antwortverhalten bezüglich der Lage des Schaltpunktes wird ebenfalls von den Parametern des Kraftsprungs gegeben. Demzufolge beeinflusst die Länge des Kraftsprungs Δx die Wahrnehmung so, dass ein kürzerer Kraftsprung einen *früheren* Schaltpunkt suggeriert, obwohl der Startpunkt F_s , x_s gleich bleibt.

Die Höhe ΔF des Kraftsprungs tendiert uneinheitlich, während Δx klar eine *frühere* Lage für einen kürzeren Schaltpunkt bewirkt. Allerdings kann auch eine erschwerte Wahrnehmung (vgl. Kapitel 6.4.4) aufgrund der geringen Höhe und der flachen Steigung bei $\Delta x = 0,2 \text{ mm}$ / $\Delta F = 0,5 \text{ N}$ die auffällig *spätere* Wahrnehmung des Schaltpunktes verursachen.

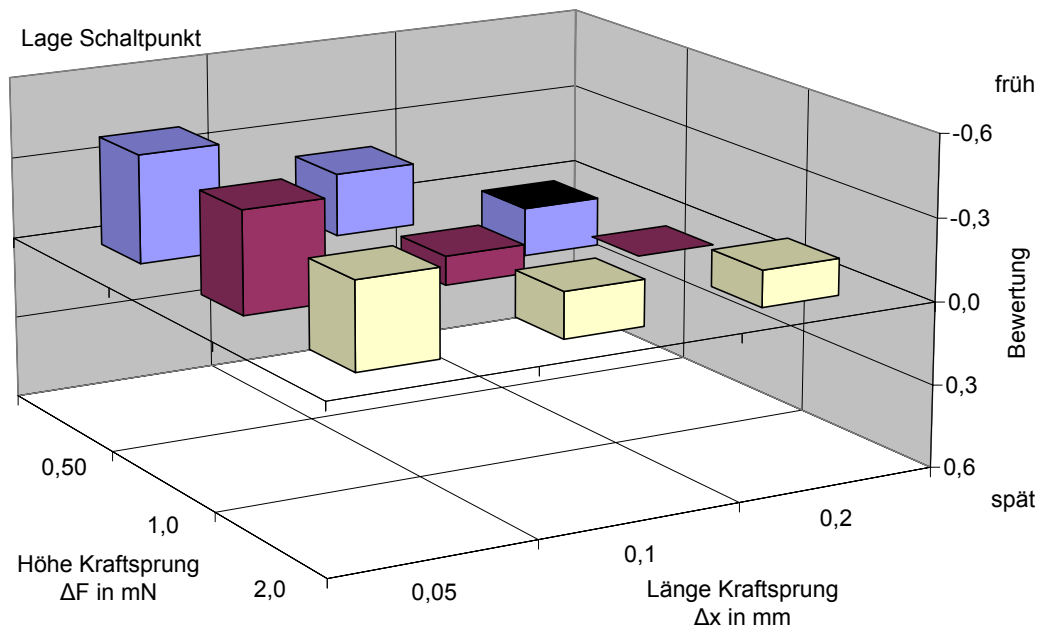


Abbildung 130: Antwortverhalten zur Lage des Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprunges ΔF und Δx .

Das Antwortverhalten bei variierten Flanken (Abbildung 131) zeigt ebenfalls ein uneinheitliches Verhalten. Am stärksten ähnelt es einer Sattelfläche. Maxima bei gegensätzlicher Flankenausprägung (hoch/ tief, tief/ hoch) bewirken einen „frühen“, Minima bei gleichförmiger Ausprägungen (hoch/ hoch, tief/ tief) bewirken einen eher „späteren“ Eindruck, der jedoch als mittig oder *früh* einzustufen ist.

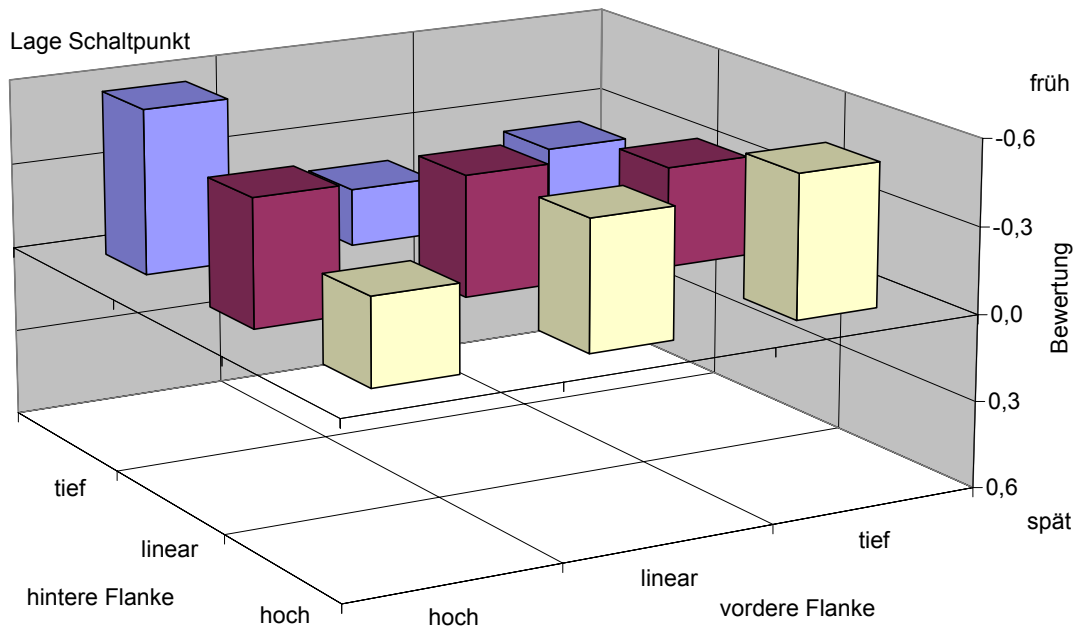


Abbildung 131: Antwortverhalten zur Lage des Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltspunkt F_v und F_n .

Zusammenfassung Erkennung und Lage des Schaltpunktes

Der Schaltpunkt wird bei der untersuchten Kennlinienform erkannt und nur die Tendenz der Parameter festgestellt, die dazu führen, den Schaltpunkt nicht zu erkennen. Eine ähnliche Tendenz zeigt sich bei der Abfrage der Lage des Schaltpunktes, die generell als eher kurz eingestuft wird, was letztlich auf den Gesamthub zurückzuführen ist.

Die Erkennung des Schaltpunktes hängt nur von den Schaltpunktparametern ab und zeigt das Verhalten einer Wahrnehmungsschwelle. Andere Einflussgrößen tragen nicht zu dessen Erkennung bei. Dieselbe Wahrnehmungsschwelle ist ebenfalls bei der Untersuchung des Präzisionseindrucks zu erkennen, was auf einen direkten Zusammenhang beider Größen schließen lässt und letztlich eine Erhöhung des Präzisionseindrucks durch den Schaltpunkt nahe legt.

Die Lage des Schaltpunktes zeigt Abhängigkeiten von allen untersuchten Parametern, besonders von denen des Kraftsprungs und dem Schaltweg. Generell ist das Verhalten jedoch nur beschränkt zu beeinflussen.

Minderwertig – hochwertig

Die Bewertung *minderwertig* – *hochwertig* wird anhand der Faktorenanalyse durch sämtliche Größen beeinflusst. Dies würde bedeuten, dass die Wertigkeit des Bedienelementes von vielen Faktoren der Kennlinie abhängt. Es dominieren Schaltpunktlage und Kraftsprungparameter.

Analyse

Die Lage des Schaltpunktes bei parallelen Flanken in Abbildung 132 zeigt ein recht eindeutiges Bild: das mittlere Kraftniveau von $F_s = 3$ N und ein mittlerer bis langer Schaltweg x_s die *hochwertigsten* Urteile. Zu niedrige oder zu hohe Schaltkräfte, aber auch ein kurzer Schaltweg bewirken eher einen *minderwertigen* Eindruck.

Kennlinien mit gleicher Flankensteigung und unterschiedlicher Schaltpunktlage zeigen kein einheitliches Verhalten (0,25 mm/3 N und 0,5 mm/6 N; 0,25 mm/2 N und 0,75 mm/6 N; 0,50 mm/2 N und 0,75 mm/3 N). Demzufolge besteht kein direkter Zusammenhang.

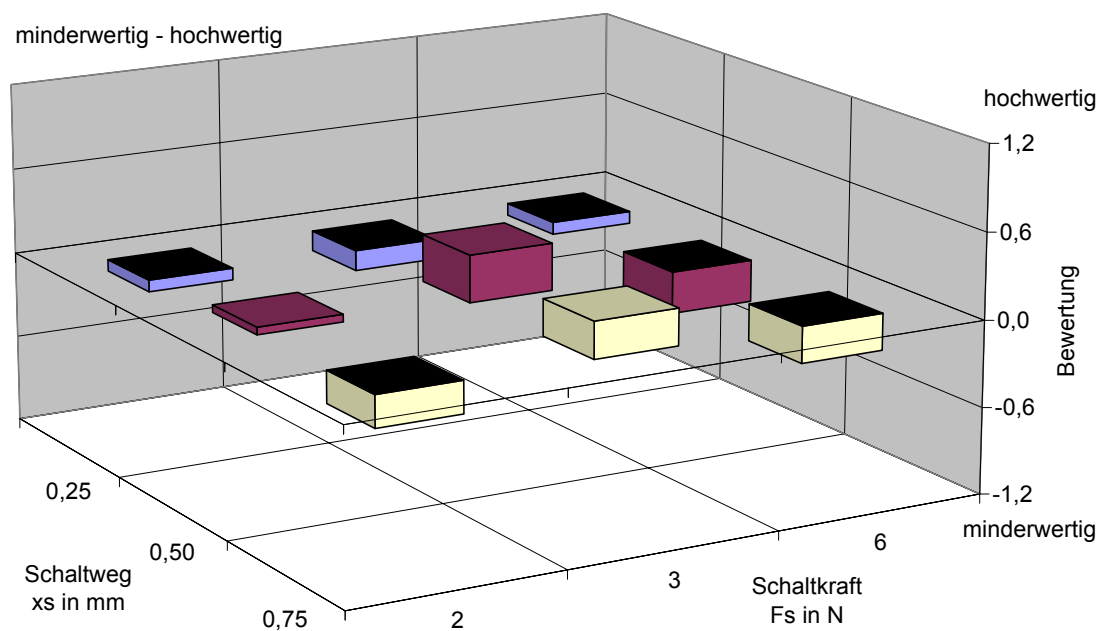


Abbildung 132: Adjektivpaar minderwertig – hochwertig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei parallelen Flanken.

Bei gleichem Endpunkt in Abbildung 133 zeigt sich nahezu dasselbe Verhalten, wie bei parallelen Flanken. Allerdings schneiden hier die kurzen Schaltwege durchweg deutlich schlechter ab. Dies kann auf die flache Flanke nach dem Schaltpunkt zurückgeführt werden.

Die langen Schaltwege ($x_s = 0,75$ mm) fallen im Vergleich weniger extrem aus, was ebenfalls auf die in diesem Fall eher steilere Flankensteigung nach dem Schaltpunkt zurückgeführt werden kann.

Beide Parametersätze bewerten einen mittleren Schaltweg bei einer mittleren Schaltkraft von $F_s = 3 \text{ N}$ als die *hochwertigsten* Kennlinien, wobei sich zeigt, dass x_s auch weiter hinten liegen darf.

Dies kann zunächst auf die vorgegebene Parametrisierung bezogen werden, die die Abweichung von der Ausgangskennlinie parametrisiert. Schlüsse auf absolute Zahlenwerte sind daher mit Vorsicht zu ziehen.

Da bei parallelen Flanken die kurzen Schaltwege ebenfalls mittige Schaltpunkte aufweisen und deren Wertungen im Vergleich zu denen mit gleichem Endpunkt als *höherwertiger* ausfallen, kann eine mittige Lage des Schaltpunktes als *höherwertig* bezeichnet werden und zugleich ein kurzer Schaltweg als *minderwertiger*.

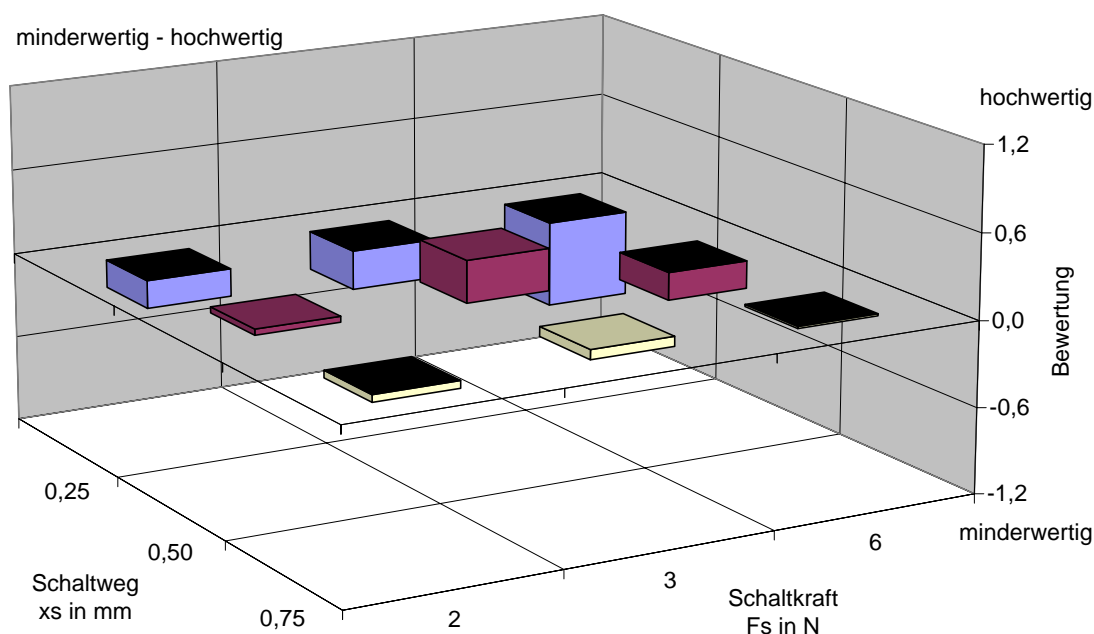


Abbildung 133: Adjektivpaar minderwertig – hochwertig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei gleichem Endpunkt.

Der Kraftsprung zeigt klare Tendenzen bezüglich der Wertigkeit: Nur bei einem Kraftsprung von einem Drittel der Schaltkraft $F_s = 3 \text{ N}$ wird ein *hochwertiges* Schaltgefühl erzeugt. Abweichungen tendieren unabhängig von der Länge des Kraftsprungs Δx zu einem *minderwertigen* Eindruck.

Im Vergleich mit anderen Bewertungen kann festgestellt werden, dass für $\Delta F < 1/3 F_s$ vermutlich der Präzisionseindruck und Wahrnehmung des Schaltpunktes zu schwach wird und für $\Delta F > 1/3 F_s$ ein zu *harter* Eindruck entsteht und die Wertigkeit beeinflusst. Diese Zusammenhänge decken sich ebenfalls mit den Ergebnissen bei Drehstellern (vgl. Kapitel 5.6.5)

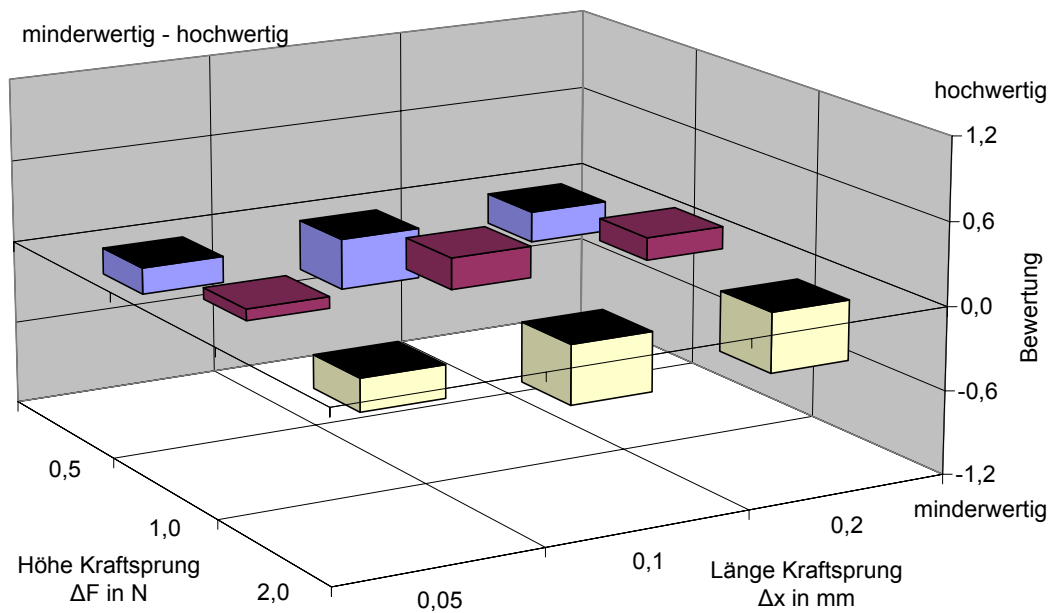


Abbildung 134: Adjektivpaar minderwertig – hochwertig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx .

Die Flankenform zeigt bei linearem Verlauf beider Flanken das *hochwertigste* Verhalten. Vor allem eine lineare vordere Flanke bewirkt diesen Einfluss. Die lineare Ausprägung der hinteren Flanke zeigt dagegen, mit Ausnahme der o. g. Kombination, eher *minderwertiges* Verhalten. Zwei tief ausgeprägte Flanken erreichen ebenfalls ein höherwertiges Schaltgefühl.

Die vordere Flanke soll demzufolge für einen *hochwertigen* Eindruck linear und zugleich die hintere nicht-tief ausgeprägt sein.

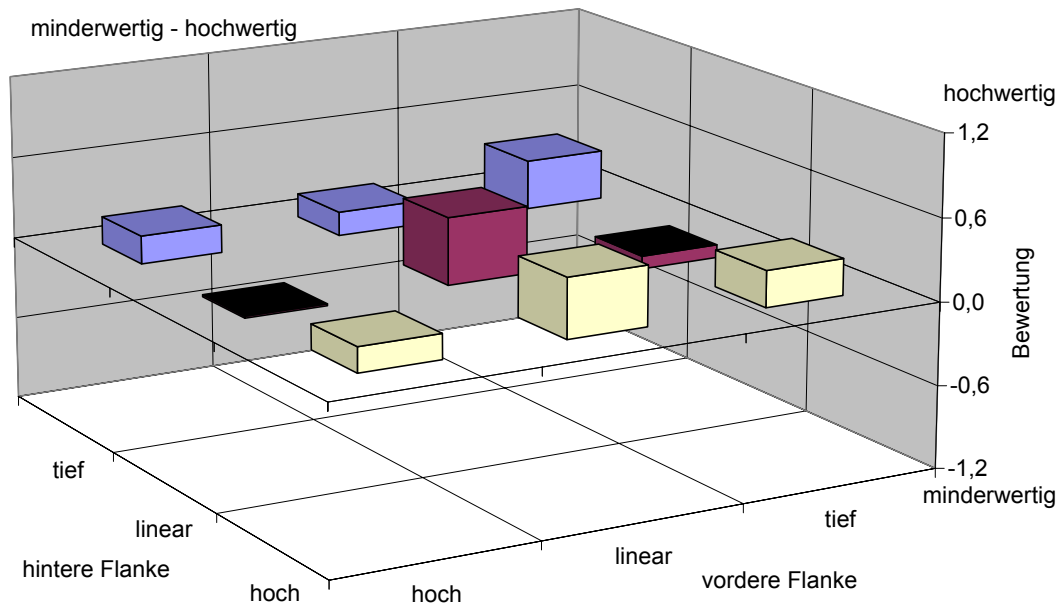


Abbildung 135: Adjektivpaar minderwertig – hochwertig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n .

Zusammenfassung minderwertig – hochwertig

Die anhand der Faktorenanalyse gezeigte Abhängigkeit von vielen Parametern wird klar bestätigt. Es gibt keine einzelnen, auffällig großen Einflüsse einzelner, sondern gleichmäßig starke Einflüsse aller Parameter. Dies bedeutet, dass die Wertigkeit vom gesamten Kurvenverlauf bestimmt wird.

Ein *hochwertiger Eindruck* des Kraftsprungs F_s , x_s sollte mittig bei einem Kraftniveau von 3 N liegen und einen Kraftsprung von rund einem Drittel der Schaltkraft haben. Lineare Flanken sind einem *hochwertigen Eindruck* zuträglich.

Beurteilung sehr gut – sehr schlecht

Die Bewertung *sehr gut* – *sehr schlecht* korreliert stark mit der Bewertung der Wertigkeit. Dies kann auch an der Ähnlichkeit der Ergebnisse erkannt werden. Daher werden im Folgenden vor allem Differenzen und Querbeziehungen zu anderen Paarungen gezogen.

Analyse

Das Antwortverhalten gleicht dem der Beurteilung der Wertigkeit. Für die Schaltpunktlage F_s , x_s wird vor allem die kurze Schaltpunktlage und das hohe Kraftniveau von F_s „*schlecht*“ bewertet. Die Kraftniveaus von 2-3 N zeigen eine eher *gute* Bewertung, was im Bereich des von Osumi et al., 1990 als optimal befunden Kraftwertes von $F_s = 2,4$ N liegt, allerdings zeigt sich eine Abhängigkeit vom Schaltweg x_s .

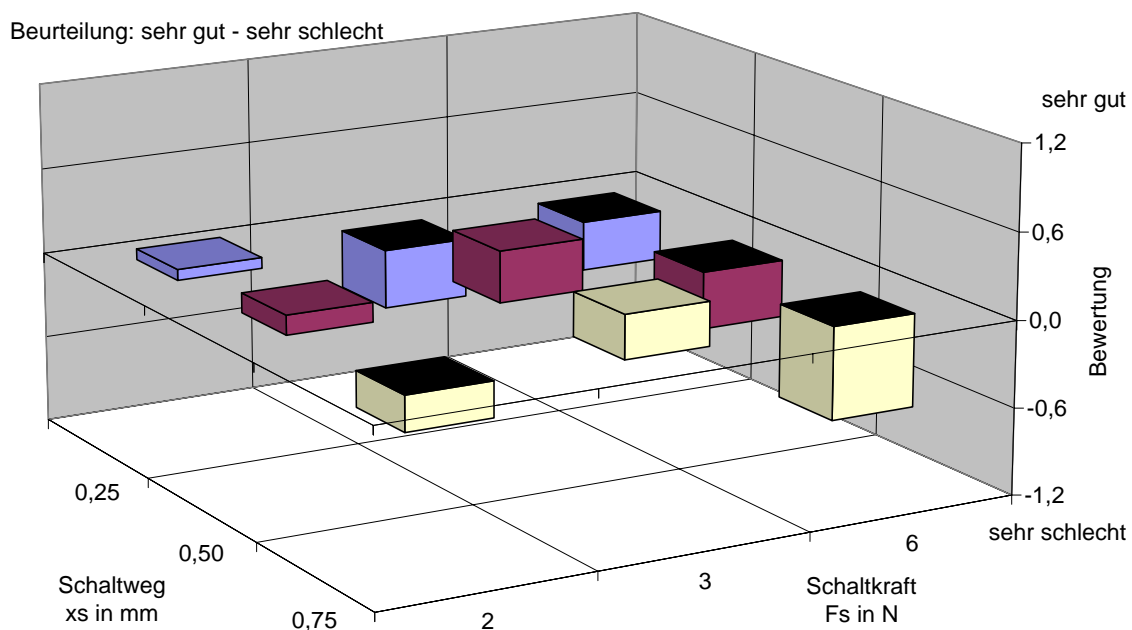


Abbildung 136: Adjektivpaar sehr gut – sehr schlecht. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei parallelen Flanken.

Es können dieselben Abhängigkeiten von Wertigkeit, Härte und Vorhandensein eines Schaltpunktes gefunden werden und sind auch mit der Beurteilung bei den Drehstellern vergleichbar.

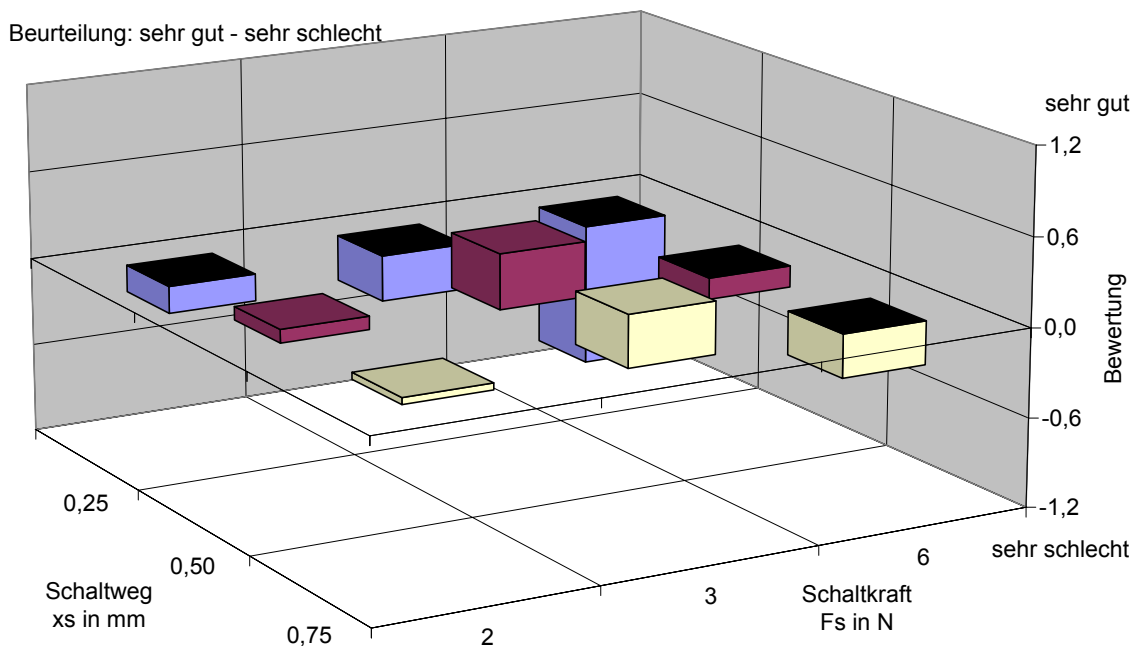


Abbildung 137: Adjektivpaar sehr gut – sehr schlecht. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_s und Schaltpunktlage x_s bei gleichem Endpunkt.

Die Bewertung des Kraftsprungs zeigt auch die beste Bewertung bei $1/3 F_s$. Ein längerer Kraftsprung verbessert einen positiven Eindruck. Die zuvor festgestellten Zusammenhänge werden auch hier bestätigt und eine fehlende Wahrnehmung des Kraftsprungs oder geringe Präzision wird, wie auch ein zu *harter* Kraftsprung, negativ aufgefasst.

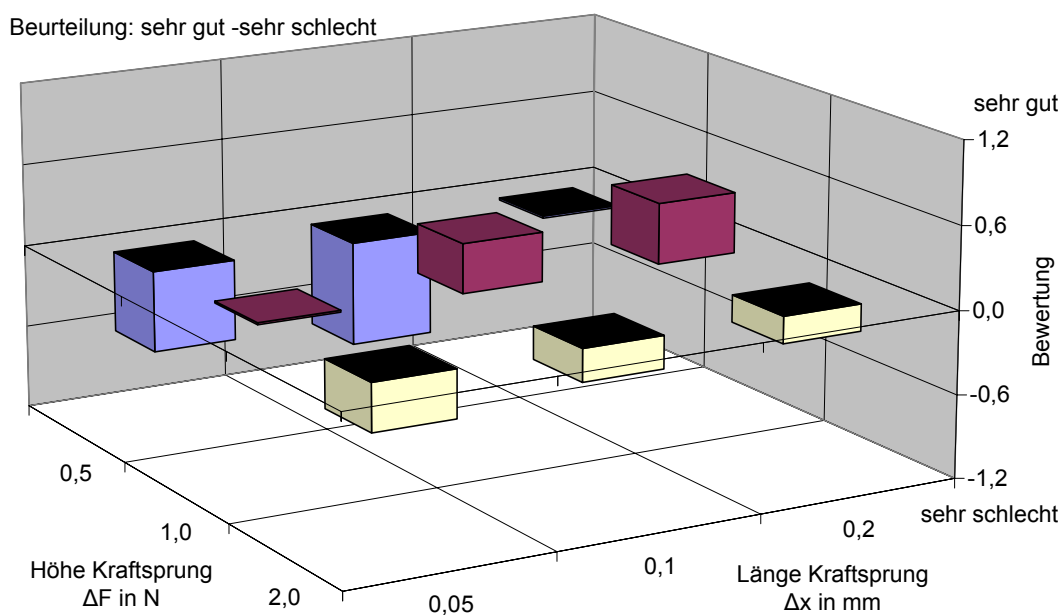


Abbildung 138: Adjektivpaar sehr gut – sehr schlecht. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx .

Auch die Flankenform korreliert stark mit der Wertigkeit. Generell wird ein eher positives Urteil gefällt, wenn beide Flanken linear oder die hintere Flanke „hoch“ ausgeprägt sind. Die Bewertung des *Gefallens* unterscheidet sich leicht zu der Beurteilung der *Wertigkeit*. Aber auch hier zeigen sich *Präzision* und *Weichheit* Voraussetzung für einen *positiven* Eindruck.

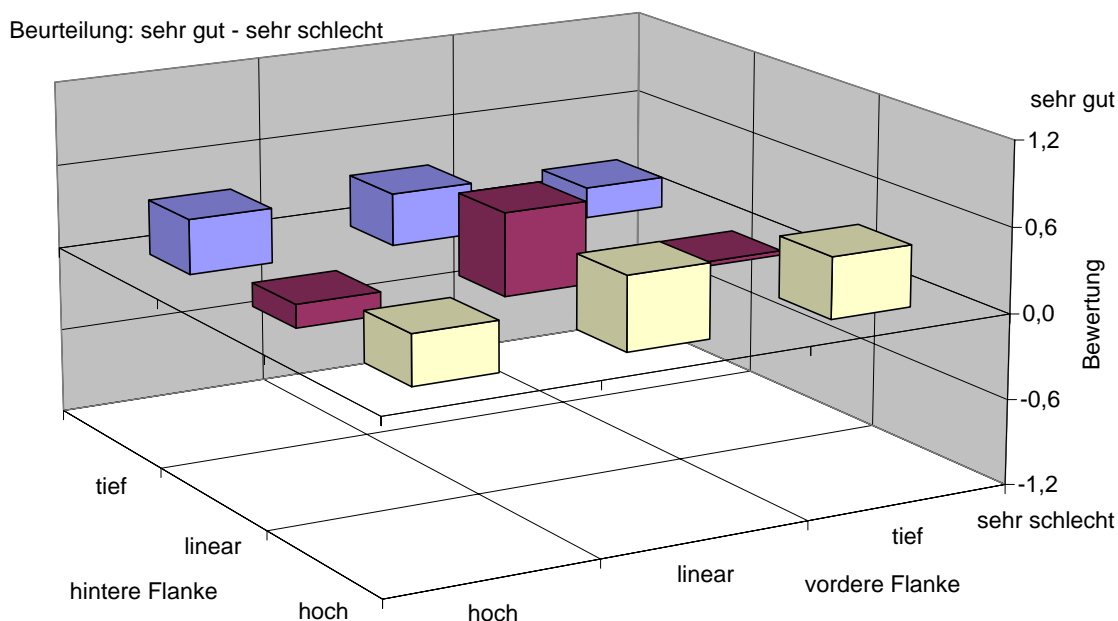


Abbildung 139: Adjektivpaar sehr gut – sehr schlecht. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n .

Zusammenfassung sehr gut – sehr schlecht

Die Beurteilung *sehr gut* – *sehr schlecht* korreliert sehr stark mit der Beurteilung der Wertigkeit, so dass von einer sehr hohen Übereinstimmung beider Urteile in diesem Fall gesprochen werden kann.

Es stellt sich hier, wie bereits bei der Bewertung von Drehstellern (vgl. Kapitel 5.6.5), eine starke Abhängigkeit von *Präzision* und zugleich möglichst *weichem* Verhalten dar. Auch das *Vorhandensein* eines Schaltpunktes trägt zur Verbesserung bei, was wiederum direkt auf den Zusammenhang mit einer Erhöhung der *Präzision* zurückzuführen ist.

In diesem Zusammenhang kann eine mit linearen Flanken ausgeführte Kennlinie mit einem mittig gelegenen Schaltweg von $x_s = 0,5$ mm bei einem Schaltkraftniveau von $F_s = 3$ N als *beste* Ausführungsform beurteilt werden. Der Schaltweg darf dabei eher länger als kürzer ausgeführt sein. Kurze Schaltwege x_s sind nicht zu empfehlen. Hohe Schaltkräfte im Bereich von $F_s = 6$ N werden als „*schlecht*“ bewertet.

Der Kraftsprung ist bei $\Delta F = 1 \text{ N}$ zu finden, was rund einem Drittel der Schaltkraft bei $F_s = 3 \text{ N}$ entspricht. Da die Wahrnehmung von Kraft-Differenzenschwellen nach Weber im Verhältnis zum Kraftniveau steht, scheint für die Kraftsprunghöhe ΔF ein Drittel der Schaltkraft F_s als erste Näherung sinnvoll zu sein. Ein geringerer Wert kann als zu schwach wahrnehmbar, ein höherer als zu *hart* und damit *schlecht* gewertet werden. Inwieweit der relative Wert als Richtlinie gewählt werden kann, muss anhand weiterer Versuche geklärt werden.

Eine lineare Ausprägung beider Flanken ist am günstigsten. Allerdings sind die Urteile der übrigen Varianten, mit Ausnahme einer linearen Ausprägung der hinteren Flanke bei nichtlinearer Ausprägung der vorderen Flanke, ebenfalls gut.

6.5.7 Diskussion der Versuchsergebnisse

Bedeutung und faktorielle Zusammenhänge

Anhand einer Faktorenanalyse werden vier subjektive Wahrnehmungsgruppen gefunden. Wie bei Drehstellern (Kapitel 5.6) werden zwei unabhängige Faktoren „*Gängigkeit und Härte*“ sowie „*Wertigkeit und Gefallen*“ gefunden. Von diesen hängt die Präzision ab. Diese Zusammenhänge werden größtenteils auch durch die Analyse des Antwortverhaltens bezüglich der Parameter bestätigt.

Dabei stellt sich jedoch ein Unterschied in der Bedeutung zwischen „*Härte*“ und „*Gängigkeit*“ heraus, indem die Ausprägung des Schaltpunkts nur die Wahrnehmung der „*Härte*“, nicht aber der „*Gängigkeit*“ beeinflusst. Dies lässt sich damit erklären, dass die Impulshaftigkeit des Kraftsprungs nichts mit der Beweglichkeit des Bedienelementes zu tun hat.

Der Zusammenhang zwischen „*Wertigkeit*“ und „*Gefallen*“ hat sich wie bereits bei Drehstellern bestätigt.

Dieser Zusammenhang ist bei unterschiedlichen Gruppen bei unterschiedlichen haptischen Aufgaben wiederholt eingetreten, weshalb hier von einem grundlegenden Zusammenhang ausgegangen werden kann.

Kosaka und Watanabe (1996) finden ebenfalls zwei unabhängige Faktoren, der erste Faktor mit *deutlich / klar (clear)*, *glatt / geschmeidig (smooth)*, *hart / scharf (stiff)* und *klickend (clicking)*. Dieser Faktor zeigt eine hohe Übereinstimmung mit dem im Versuch gefundenen Faktor „*Gängigkeit und Härte*“ und bestätigt zugleich die hohe Korrelation des Eindrucks *klar/eindeutig* mit der Bewertung *präzise*. Der zweite Faktor beschreibt den Eindruck des Endanschlags (*arriving shock*), der in den vorliegenden Untersuchungen nicht berücksichtigt ist.

Ein weiterer unabhängiger Faktor, der bei Drucktastern hinzukommt, wird als „*Hub und Schaltpunktlage*“ bezeichnet. Er zeigt keinen Einfluss auf die Wertigkeit. Ein Zusammenhang zwischen *Wertigkeit und Gefallen* mit der *Schaltpunktlage* oder der Bewertung *kurz – lang* ist nicht ersichtlich. Dies darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass ein kurzer Hub (x_S, x_E) *schlechter* bewertet wird.

Ideale Kennlinie

Das Urteil der besten Bewertung bekommt eine Kennlinie mit linearen Flanken bei einer Schaltpunktlage von $F_S = 3 \text{ N}$ und einem mittleren Weg von $x_S = 0,5 \text{ mm}$, bezogen auf die Lage

des Endanschlags. Dabei bestätigt sich, wie bereits bei Drehstellern, der Zusammenhang von höchster Präzision mit geringst möglicher Härte als Voraussetzung für ein positives Urteil.

Der Kraftbereich von $F_s = 3 \text{ N}$ deckt sich mit Angaben in der Literatur (Schmidtke und Rühmann, 1989; Osumi et al., 1990; Bubb, 2001). Die Wahrnehmung eines nicht zu *harten* Schaltpunktes wird als zuträgliches positives Kriterium festgestellt. Dabei wird eine Kraftsprunghöhe $\Delta F = 1 \text{ N}$ als günstig ermittelt, was rund einem Drittel der Schaltkraft F_s entspricht.

Parameterabhängigkeiten

Verschiedenen technischen Parametern können subjektive Einflüsse zugeordnet werden: Der Härteeindruck wird durch das Produkt von Höhe (ΔF) und Steigung ($\Delta F/\Delta x$) des Kraftsprungs beeinflusst. Der Präzisionseindruck hängt bei verschiedenen Flankensteigungen vom Produkt der Schaltkraft (F_s) mit der Steigung vor dem Schaltpunkt (F_s/x_s) zusammen.

Das Erkennen eines Schaltpunktes hängt ausschließlich von den Parametern des Kraftsprungs, Höhe ΔF und Weg Δx , ab und wird erst ab einer gewissen Ausprägung als solcher wahrgenommen. Dies unterstreicht, speziell in Bezug auf Präzision und Wertigkeit, die Bedeutung des Kraftsprungs bei Drucktastern.

Die Flankenformen beeinflussen ebenfalls die Wahrnehmung, speziell Härte, Länge und Wertigkeit des Bedienelementes.

Tabelle 17 stellt die Parameterabhängigkeiten nach Stärke des Einflusses geordnet dar. Dabei wird die Bandbreite des Antwortverhaltens als Orientierung verwendet.

Wahrnehmungseffekte

Im Versuch zu Visualisierungen konnte der Effekt der ereignisbasierten Wahrnehmung nach Kuchenbecker et al. (2005) speziell im Zusammenhang mit dem Kraftsprung festgestellt werden: Die Wahrnehmung eines Schaltpunktes und der Härteeindruck treten erst ab einer bestimmten Ausprägung des Kraftsprungs hervor. Die Impulshaftigkeit des Kraftsprungs wird auch von Kosaka und Watanabe (1996) beschrieben, indem sie den plötzlichen Kraftwechsel als Schlag (shock) erläutern und ihn als Klick (clicking) bezeichnen. Die Kraftänderung wird anhand der Ableitungen des Kraft-Weg-Verlaufs, wie sie in den Versuchen zur Visualisierung verwendet werden, beschrieben.

Ein Zusammenhang mit der Integraldarstellung kann im Fall der „*Gängigkeit*“ erkannt werden: Die Ausformung der Flanken hängt mit der Fläche unter dem Kraft-Weg-Verlauf zusammen und zeigt dabei physikalisch nachvollziehbare Zusammenhänge mit *Leicht-* bzw. *Schwergängigkeit*.

Die beobachteten Effekte sind ebenfalls in Tabelle 17 aufgeführt und ergänzen, bzw. korrigieren die Angaben aus Tabelle 15. Zusammenhänge bei Ereignisorientierung des Parameters sind mit * bzw. mit ** bei offensichtlichen Bezügen zur Integraldarstellung gekennzeichnet.

Tabelle 17: Abhängigkeiten zwischen Parametern und Wertungen anhand der Parameteranalyse. Die Parameter sind nach Stärke der Einflüsse sortiert aufgeführt.

*: Zeigt Eigenschaften ereignisbasierter Wahrnehmung.

** : Zeigt Ansätze zur Interpretation mittels Integraldarstellung .

Wertung: Adjektivpaar	Abhängigkeiten anhand der Parameteranalyse		
	stark	ersichtlich	schwach
Weich – Hart*	Schaltkraft F_S ; Kraftsprung* ΔF ; Steigung des Kraftsprungs $\Delta F/\Delta x$	Flankenform vor F_V / nach F_N dem Kraftsprung	
Leichtgängig – Schwergängig**	Schaltkraft F_S	Flankenform** vor F_V / nach F_N dem Kraftsprung	Kraftsprung ΔF , Δx , ($\Delta F/\Delta x$)
Schwammig – Präzise*	Schaltkraft F_S ; Flankensteigung nach dem Schaltpunkt (F/x) _n	Kraftsprung* ΔF ;	Schaltweg x_S ; Flankenform vor F_V / nach F_N dem Kraftsprung
Lang – Kurz	Kraftsprung ΔF , Δx ; Flankensteigungen (F_S/x_S) oder (F/x) _n	Flankenform vor F_V / nach F_N dem Kraftsprung	
Schaltpunkt vorhanden? nein – ja*	Kraftsprung* ΔF , $\Delta F/\Delta x$		
Lage Schaltpunkt spät – früh		Kraftsprung ΔF , Δx ;	Flankenform vor F_V / nach F_N dem Kraftsprung; Lage des Schaltpunktes F_S , x_S
Minderwertig - Hochwertig	Schaltkraft F_S ; x_S ;	Kraftsprung ΔF , Δx ; Flankenform vor F_V / nach F_N dem Kraftsprung	
sehr schlecht - sehr gut	Schaltkraft F_S ; x_S ; Kraftsprung ΔF , Δx	Flankenform vor F_V / nach F_N dem Kraftsprung	

Vergleich mit Parameterangaben aus der Literatur

In der Literatur sind derzeit keine Veröffentlichungen zum Einfluss der Kurvenform bekannt, die vorliegenden Untersuchungen zeigen jedoch deren Einflusspotential auf.

Verschiedene Größen zeigen gute Übereinstimmungen: So ordnen Osumi et al. (1990) der Schaltkraft die „Intensität der Berührung“ (*touch of heaviness*) als stärkste Einflussgröße zu, was in den vorliegenden Untersuchungen „Gängigkeit und Härte“ entspricht. Ebenso wird beim Verhältnis von Kraftsprung (hier: $F_S-\Delta F$) zu Schaltkraft (F_S)“ von einem „Gefühl bei Schaltkraftwechsel“ (*sense of turning of operating force*) gesprochen, was der Wahrnehmung des Schaltpunktes nahe kommt.

Die Steigung F_s/x_s wird als *Anfangsantwort*, besser *Anfangswiderstand* (*Initial Response*) bezeichnet. Sie beeinflusst demzufolge auch die Wahrnehmung des Gesamthubs (vgl. Kapitel 6.2.1).

Der ebenfalls aufgeführte Gesamthub (*length of displacement*) wird an $x_s+\Delta F$ sowie x_E gebunden, was trivial erscheint. Hier ergänzen die vorliegenden Untersuchungen jedoch den Einfluss des Schaltpunktes ΔF und Δx sowie der Flankensteilheit, wonach die steilere Flanke den Eindruck bestimmt.

Nach Kosaka und Watanabe (1996) ist vor allem die Schaltkraft F_s (*Peak*) von Bedeutung. Dies bestätigt sich in den vorliegenden Versuchen. Allerdings ordnen sie der Kraftsprunghöhe ΔF (*drop*) keinen nennenswerten Einfluss zu. Die Versuche zeigen jedoch einen breiten Einfluss auf verschiedene Kriterien. Vor allem die Wahrnehmung der Länge, dem Kraftsprung selbst, der *Präzision* und der *Wertigkeit*. Eine genauere Analyse der Ergebnisse von Kosaka und Watanabe zeigen jedoch, dass sie für die Kraftsprunghöhe ΔF (*drop*) ebenfalls höhere Korrelationen und damit einen größeren Einfluss finden. Sie erwähnen jedoch nur die stärkste Einflussgröße weshalb diese nicht erwähnt wird.

6.5.8 Zusammenfassung

Neben den direkten Einflüssen und Zusammenhängen von objektiven Parametern mit subjektiven Wahrnehmungsgrößen können Hinweise auf ereignisorientiertes Verhalten und in diesem Zusammenhang die Visualisierung gefunden werden.

Die Untersuchungen stellen einen ersten Schritt in Richtung einer umfassenden Beschreibung der Kraft-Weg-Kennlinie dar. Dabei geht das Versuchskonzept von einer Ausgangskennlinie aus, von der aus verschiedene Parameter unabhängig variiert werden. Dabei werden nicht alle Zusammenhänge zwischen Parametern vollständig untersucht:

Die gewählte Parametrisierung bewegt sich im Bereich der Kurzhubtaster. Aus diesem Grund wird die Länge der Kennlinien vornehmlich als „*kurz*“ bewertet. Eine Erweiterung des Gesamthubes x_{ges} , bzw. x_E bietet weitere Untersuchungsmöglichkeiten zur Längenempfindung bezüglich x_{ges} und x_E .

In diesem Kontext kann dann auch die Kraftsprunglänge Δx erweitert werden und nahe liegend eine eher *schwammige* Bewertung der vornehmlich als „*präzise*“ bewerteten Bedienelemente erreicht werden.

Die o. g. Ausgangskennlinie wird im Versuch nicht verändert, d.h. alle Parameteränderungen starten bei derselben Kennlinie. Von Interesse wären daher vergleichbare Untersuchungen bei verschiedenen Ausgangskennlinien. Damit können die festgestellten Effekte überprüft und

absolute Kennwerte verschiedener Ausgangskennlinien verglichen werden, z. B. die Überprüfung des Einflusses des mittig gelegenen Schaltpunktes oder der „idealen“ Kennlinienform.

7 Zusammenfassung und Diskussion

7.1 Visualisierung

Die vorliegenden Untersuchungen umfassen rotatorische und translatorische Bedienelemente bei Fingerbetätigung. Ausgehend von einer statischen Beschreibung des Schaltverhaltens in Form der Kraft-Weg-Darstellung, bzw. der Drehmoment-Drehwinkel-Darstellung kann gezeigt werden, dass diese Art der Beschreibung zur haptischen Interpretation ungeeignet ist und stattdessen das Integral des Drehmomentes über dem Drehwinkel das haptische Verhalten des Bedienelementes anschaulich beschreibt. Die technische Bedeutsamkeit der Drehmoment-Drehwinkel-Darstellung bleibt davon unberührt, ist sie doch die physikalisch am nächsten stehende Beschreibung. Die Ableitung der Wahrnehmung von der Rastkurve des Bedienelementes stützt die Theorie der Gestaltwahrnehmung, wird doch aus der Summe der haptischen Qualitäten die Gestalt als Ganzes erkannt.

7.2 Ereignisorientierung der Visualisierung

Diese Ergebnisse lassen sich zum Teil auch auf Drucktaster übertragen: Die Integraldarstellung wird auch bei gewissen Kurvenformen nachgewiesen, allerdings ergibt sich eine Abhängigkeit zwischen der Ausprägung des Kraftsprunges und der Visualisierung. Bei stärker ausgeprägtem Kraftsprung treten Differential-Darstellungen der Kraft-Weg-Kennlinie in den Vordergrund, welche die Impulshaftigkeit eines Ereignisses klarer ausdrücken. Eine Erklärung für dieses Phänomen liefern Kuchenbecker et al. (2005) mit der Theorie der ereignisbasierten Wahrnehmung. Übertragen auf Bedienelemente nimmt der Mensch zunächst die „Gestalt“ des Bedienelementes als Form wahr (vgl. Kapitel 5.4). Diese wird anhand der Versuchsergebnisse am günstigsten durch die Integraldarstellung beschrieben. Bei einem impulsartigen Ereignis tritt dieser Wahrnehmungseindruck jedoch abrupt in den Hintergrund und das als gedämpfte Schwingung beschreibbare Ereignis wird vordergründig wahrgenommen. Beide Versuchsreihen zur Visualisierung und zur Parametrisierung des Kraftsprunges bestätigen diese Abhängigkeit.

Im Zusammenhang mit Drehstellern werden Kraftsprünge nicht explizit untersucht, so dass diesbezüglich nur Abschätzungen möglich sind. Da der Effekt der ereignisbasierten Wahrnehmung nicht auf einen Anwendungsfall beschränkt zu sein scheint und auch nicht von einer Richtungsabhängigkeit des Effektes auszugehen ist, ist dieser Effekt auch bei Drehstellern zu erwarten, z. B. bei Drehtastern ohne rastende Eigenschaft.

Daraus kann dann auf gemeinsame haptische Effekte für Drehschalter und Drucktaster geschlossen werden. Eine Betrachtung getrennt nach Rastung in Form einer Gestalt- bzw. Objektwahrnehmung mit positionsabhängigem, statischem Charakter $F(x)$ oder in Form eines haptischen Ereignisses etwa eines Impulses mit zeitabhängigem, dynamischem Charakter $F(t)$.

Die Trennung in „Drehschalter“ und „Drucktaster“ kann synonym zu der Trennung nach „Rastung“ und „Tastung“ erfolgen. Eine die Freiheitsgrade übergreifende Betrachtung mit der Unterscheidung nach „rastend“ und „tastend“ ergibt neue Wege und Möglichkeiten in der Übertragbarkeit von Erkenntnissen. Dieser ereignisorientierte Charakter befasst sich mit dem gewünschten Effekt anstelle der Bewegungsrichtung und ermöglicht damit eine Übertragung der Erkenntnisse auf verschiedenste andere Bedienelementarten, z. B. mehrdimensionale Kinematiken mit Hand-Armbetätigung.

In übertragenem Sinne können diese Gesetzmäßigkeiten, wie z. B. die Gestalt der Rastung und die Art der Ereignisse, auf sämtliche Bedienelemente übertragen und in vergleichbarer Weise gestaltet werden. Es ist naheliegend, dass die Wahrnehmungsmechanismen der verschiedenen menschlichen Gliedmaßen zwar über eine unterschiedliche Leistungsfähigkeit verfügen, z. B. das Auflösungsvermögen und der Arbeitsbereiche, dennoch ist es naheliegend, von vergleichbaren Grundmechanismen in der Wahrnehmung auszugehen.

7.3 Parametrisierung

Basierend auf dieser wahrnehmungsorientierten Interpretation können Parametrisierungen für Drehsteller und Drucktaster abgeleitet werden, die einen maßgeblichen Einfluss auf den Gesamteindruck des Bedienelementes haben. Die Einflüsse von Masse, Dämpfung, Reibung und Reibpaarungen werden dabei nicht explizit berücksichtigt und konstant gehalten, nur die Form der Rastkurve wird variiert.

Aufgrund der integralen Darstellungsform kann die Parametrisierung stark vereinfacht ausgelegt werden, da Rundungen durch Geradenstücke angenähert werden können. Diese als Sinus-Dreieck-Ähnlichkeit benannte Eigenschaft ist sowohl bei Drehstellern, als auch bei Drucktastern nachweisbar. Und auch hier zeigt sich die ereignisbasierte Wahrnehmung, indem der Kraftsprung eine gewisse Schwelle überschreiten muss, um entsprechend impulshaft wahrgenommen zu werden.

Zum Einrasten eines Bedienelementes muss immer das Nullkraftniveau in einem stabilen Zustand erreicht werden. Zur Beschreibung werden dabei die Flankensteigungen der Ruhelage

und des Übergangspunktes sowie der Gesamtamplitude verwendet. Die Flanke im Übergangspunkt kann dabei theoretisch auch die Wirkung eines Kraftsprungs erreichen, was allerdings nicht explizit untersucht worden ist. Die Tastung benötigt ein Ereignis, in Form einer impulsartigen Kraftänderung. Sie wird statisch durch die Lage, sowie Länge und Höhe des Schaltpunktes beschrieben.

Die in Kapitel 5.6.5 ermittelten *Unterschiedsschwellen* bezüglich der Amplitudendifferenzen zwischen gleichförmigen Kennlinien deckt sich mit Untersuchungen, die auf das Zusammenwirken von Kraft und Weg in der Wahrnehmung schließen lassen. Für den Vergleich von Sinus- und Dreieck-Kennlinien liegt die Schwelle wesentlich niedriger, was bedeutet, dass Bedienelemente entsprechend unterschiedlicher Kennlinienformen als gleich beurteilt werden, jedoch Abweichungen stärker differenzierend wirken.

Die Beschreibung der dynamischen Eigenschaften mit Hilfe der Ableitung des Kraft-Weg-Verlaufes ist nicht vollständig. Dabei wird nur die Kraftänderung in Abhängigkeit der Position berücksichtigt. Die zeitliche Komponente hängt allerdings direkt von der Betätigungsgeschwindigkeit und letztendlich von den dynamischen Größen des Bedienelementes wie Masse und Dämpfung ab, die zu einer vollständigen Beschreibung hinzugezogen werden müssen. Daher läge es nahe, dynamische Eigenschaften zeitabhängig, z. B. über Frequenz und Dämpfung zu beschreiben.

7.4 Subjektive Beschreibung

Die subjektive Beschreibung der Bedienelemente ermöglicht die Zuordnung der Eigenschaften zu technischen Parametern. Dabei kann primär der steigenden Flanke bei Drehstellern der Präzisionseindruck zugeordnet werden. Der Härteeindruck dagegen wächst mit der Amplitude und der Steilheit beider Flanken. Mit Hilfe der integralen Interpretation der Kennlinie kann der Härteeindruck bestimmt werden, da ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Amplitude der Integraldarstellung und dem Härteeindruck besteht.

Beide, *Härteeindruck* und *Präzision*, hängen maßgeblich mit dem Wertigkeitseindruck und darüber hinaus in diesem Kontext mit dem Gefallen des Bedienelementes zusammen. Dieser Zusammenhang hat sich bei unterschiedlichen Versuchsgruppen und sowohl bei Drehstellern als auch Drucktastern behauptet.

Eine hohe Wertigkeit erfordert einen maximalen Präzisionseindruck und zugleich einen geringst möglichen Härteeindruck. Diesbezüglich scheint der Benutzer „Härte“ zu erleiden und Präzision als Komfort zu empfinden.

Die gewonnenen Beziehungen erlauben gezielte Änderungen oder Neuauslegungen haptischen Designs. Die Integraldarstellung bietet aufgrund ihrer anschaulichen Darstellung eine hilfreiche Ergänzung, die für Spezifikation und Toleranzen menschliche Wahrnehmungseigenschaften entsprechend berücksichtigt, so dass eine hohe Ähnlichkeit von Integralkennlinien eine hohe haptische Ähnlichkeit bedeutet. Durch die auf einen Detent bezogene Definition der Parameter, lassen sich Zusammenhänge skalieren und übertragen

Einer erhöhten Präzision kann unterstellt werden, dass diese besser blind bedient und damit einen wesentlichen Beitrag zur Bediensicherheit leistet. Nebenbei wird die Wertanmutung gesteigert. Abhängig von Anwendung und Erwartungshaltung kann der gewünschte Härteeindruck angepasst werden, um das bestmögliche Ergebnis zu erzielen.

7.5 Lageabhängigkeit und Abstützung

Bleibt letztlich noch die Abhängigkeit der Lage der Bedienelemente. Dazu stellt Reisinger (2008) das Vorhandensein einer haptischen Konstanzleistung bei Drehstellern fest. Sie beschreibt in diesem Fall die menschliche Fähigkeit, Bedienelemente unabhängig von dessen Lage oder einer Abstützung des Armes differenzieren zu können. Störeinflüsse werden vom menschlichen Wahrnehmungsapparat erkannt und berücksichtigt. Demzufolge können Bedienelemente auch unter störenden äußeren Einflüssen klar differenziert werden. Es bleibt jedoch zu berücksichtigen, dass durch entsprechende Haltung des Armes Diskomfort stärker oder schwächer ausgeprägt ist, so dass der Gesamteindruck beeinträchtigt werden kann. Eine Differenzierbarkeit des Bedienelements ist möglich, allerdings können eventuell veränderte Eigenschaften des Bedienelementes dem Diskomfort entgegenwirken und einen besseren Gesamteindruck vermitteln. Gerade bei Drucktastern scheint diese Frage relevant zu sein und ist bisher ungeklärt.

7.6 Ausblick

Neben der Betrachtung dynamischer Eigenschaften wie coulombsche Reibung, Dämpfung und Massenträgheit, vor allem die Auswirkung der Lagereigenschaften beweglicher Teile, wie Spiel und Stick-Slip, eine sinnvolle Fortführung wissenschaftlicher Betrachtung zur Betätigungshaptik dar.

Der Lageeinfluss speziell bei translatorischen Bedienelementen ist noch ungeklärt. Darauf aufbauend wäre eine Betrachtung der Betätigungshaptik, eingebunden in anthropometrische Bewertungsverfahren der Körperhaltung denkbar.

Eine konsequente Anwendung der ereignisorientierten Wahrnehmungseffekte ermöglicht neuartige Bedienelemente und birgt Optimierungspotential für bestehende Bedienelementkonzepte.

Quellenverzeichnis

- Badescu, M.;
Mavroidis, C. (2002) *Rotary knob for vehicular instrument control*, Proceedings of the 10th symposium on Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems (Haptics'02), 2002
- Beyer, L. ; Weiss, T. (2001) *Elementareinheiten des somatosensorischen Systems als physiologische Basis der taktil-haptischen Wahrnehmung*, in M.Grunwald, L.Beyer (Hrsg.): "Der bewegte Sinn", Birkhäuser, ISBN 3-7643-6516-1, 2001
- Börschlein, E.-M. (1994) *Untersuchung zum haptischen Komforteindruck ausgewählter Handstellteile in verschiedenen Personenkraftwagen*, Diplomarbeit KU Eichstätt, 1994
- Bortz, J.; Döring, N. (2002) *Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler*, 3. überarb. Auflage. - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio: Springer, 2002
- Bortz, J.; Lienert, G.A. (2003) *Kurzgefaßte Statistik für die klinische Forschung : Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben*, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Hongkong; London; Mailand; Paris ; Tokio : Springer, 2003
- Bortz, J. (2005) *Statistik: Für Human- und Sozialwissenschaftler*, 6. Auflage, Springer, Berlin; ISBN 3-5402-1271-X, 2005
- Bronstein, I.N.;
Semendjajew, K.A (2001) *Taschenbuch der Mathematik*, Harri Deutsch, 5. überarbeitete und erweiterte. Aufl., ISBN 3-8171-2005-2, 2001
- Bubb, H. (Hrsg) (1992) *Menschliche Zuverlässigkeit*, Landsberg/Lech: ecomed, 1. Auflage, ISBN 3-609-69000-3, 1992
- Bubb, H. (1995) *Ergonomie in Mensch-Maschine-Systemen*, Tagungsbeitrag HdT, Essen, 1995
- Bubb, H. (2001) *Haptik im Kraftfahrzeug*, in Th. Jürgensohn und K.-P. Timpe (Hrsg.) „Kraftfahrzeugführung“, Springer, ISBN 3-540-42012-6, 2001
- Bubb, H. (2007) *Ergonomie und Design*, In: Automobildesign und Technik, Teil 3, pp. 240-263, Vieweg, ISBN 978-3-8348-9411-3 , 2007

- Bullinger, H.J. (1994) *Ergonomie : Produkt und Arbeitsplatzgestaltung*, Stuttgart : Teubner, ISBN 3-519-06366-2, 1994
- Burdea, G. (1996) *Force and touch feedback for virtual reality.*, A Wiley-Interscience publication. Wiley, New York [u.a.], 1996
- Deetjen, P.; Speckmann, E.J.; Hescheler, J. (Hrsg.) (2005) *Physiologie*, 4. vollständig überarb. Auflage, Elsevier, München, ISBN 3-437-41317-1, 2005
- Deml, B.; Mihalyi, A.; Hannig, G. (2006) *Development and Experimental Evaluation of a Thermal Display*, In: Proceedings of EuroHaptics 2006 (EHC2006). Paris, France, pp.257-262, 2006
- Die Zeit 2004/17 *Schalter sollen leise knacken*, Die Zeit, Nr. 17, Hamburg, 15.4.2004
- DIN 33402 *DIN 33402: Körpermaße des Menschen*, Deutsche Industrie Norm, Beuth-Verlag
- DIN EN 196000 (2001) *DIN EN 196000:1992/A1:2001*, Deutsche Industrie Norm, Beuth-Verlag, 2001
- Dörrer, C. (2003) *Entwurf eines elektromechanischen Systems für flexibel konfigurierbare Eingabefelder mit haptischer Rückmeldung*, Dissertation, TU Darmstadt, 2003
- Eckstein, L. (2000) *Sidesticks im Kraftfahrzeug - ein alternatives Bedienkonzept oder Spielerei?*, In Bubb, H. (Hrsg.) *Ergonomie und Verkehrssicherheit*. Beiträge der Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Herbert Utz Verlag, München. Pp65-96, 2000
- EHC, 2004 *Proceedings of Eurohaptics 2004 (EHC2004)*, 5.-7.6.2004, München, Germany, ISBN 3-9809614-0-0, 2004
- EHC, 2006 *Proceedings of Eurohaptics 2006 (EHC2006)*, 3.-6.7., Paris, France, 2006
- von Ehrenfels, Chr. (1890) *Über Gestaltqualitäten.*, In: Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Philosophie, 14 (1890), S. 249-292, 1890

-
- Ernst, M.; Banks, M. (2002): *Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion*, Aus: letters to nature, Macmillan Magazines Ltd, Nr. 415, Monat January, 2002
- B. Färber (1980) *Perzeptive Organisation : vergleichende experimentelle Untersuchungen haptischer Leistungen Geburtsblinder und optischer, bzw. haptischer Leistungen Normalsichtiger an Täuschungsmustern*, Regensburg, Univ., Fachbereich Psychologie u. Pädagogik, Diss., 1980
- Forcedimension (2007) *Forcedimension*, <http://www.forcedimension.com>, Lousanne, Switzerland, 2007
- GfA, 2006 *Bericht zum 52. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften*, 20.-22.3., Stuttgart, Germany, ISBN 3-936804-03-6, 2006
- GfA, 2007 *Bericht zum 53. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften*, 28.2.-2.3., Magdeburg, Germany, ISBN 978-3-9636804-04-1, 2007
- Gibson, J.J. (1962) *Observation on active touch*, Psychological Bulletin, No.69, pp477-491, 1962
- Gibson, J.J. (1979) *Wahrnehmung und Umwelt. Der ökologische Ansatz in der visuellen Wahrnehmung.*, München, Wien, Baltimore: Urban & Schwarzeberg, 1982 (Original 1979)
- Gillet, G. (1998) *Ergonomische Optimierung eines Aktiven Stellteils*, Dissertation, TU München, 1998
- Goldstein, E.B. (2002) *Wahrnehmungspsychologie*, Hrsg. von Manfred Ritter. Aus dem Amerikan. übers. von Gabriele Herbst und Manfred Ritter. - 2. dt. Aufl.. - Heidelberg ; Berlin : Spektrum, Akad. Verl., ISBN 3-8274-1083-5, 2002
- Götz, M. (2007) *Die Gestaltung von Bedienelementen unter dem Aspekt ihrer Kommunikativen Funktion*, Dissertation, TU München, 2007
- Grane, C.; Bengtson, P. (2005) *Menu selection with a rotary device founded on haptic and/or graphic information*, In: Proceedings of Worldhaptics Conference 2005 (WHC2005), 18.-20.3., Pisa, Italy, ISBN 0-7695-2310-2, 2005

- Gregory, R.L. (1970) *The intelligent eye*, New York: McGraw-Hill Book, 1970
- Grunwald, M. (2001) *Änderungen hirnelektrischer Aktivität bei haptischer Reizverarbeitung*, in M.Grunwald, L.Beyer (Hrsg.): "Der bewegte Sinn", Birkhäuser, ISBN 3-7643-6516-1, 2001
- Hannaford, B.; Venema, S. (1995) *Kinesthetic Displays for Remote and Virtual Environments.*, Kap. 10, S. 415–436. In: BARFIELD, W.; FURNESS, T. A. [3], 1995
- Haptex (2005) *Proceedings of the HAPTEX'05 Workshop on Haptic and Tactile Perception of Deformable Objects*, Hanover, Dec. 2005
- Haption (2007) *Haption*, <http://www.haption.com>, Haption S.A., Soulgé Sur Ovette, France, 2007
- Harwin, W.; Wall, S.A. (1999) *Mechatronic Design of a High Frequency Probe for Haptic Interaction*, Proc. 6th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, 1-3 Sept., METU, Ankara, Turkey, pp. 111-118, 1999
- Hayward, V.; Astley, O.R. (1996) *Performance Measures for Haptic Interfaces*, In: Robotics Research: The 7th Int. Symposium (1996), 1, Ed., vol. 1, Springer Verlag, pp. 195–207, 1996
- Hayward, V. (2004) *Displays of Haptic Shape at Different Scales*, In: Proceedings of EuroHaptics 2004, Munich Germany, pp. 20-27, June 5-7, 2004
- Howe, R.D. (2004) *The Shape of Things to Come: Pin-Based Tactile Shape Displays*, In: Proceedings of EuroHaptics 2004, Munich Germany, pp. 2-10, June 5-7, 2004
- Jandura, L.; Srinivasan, M.A. (1994) *Experiments on Human Performance in Torque Discrimination and Control*, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Dynamic Systems and Control, DSC-Vol. 55-1, pp. 369–375, 1994.
- John, M. (2001) *Historisch-philosophischer Exkurs über den Tastsinn*, in M.Grunwald, L.Beyer (Hrsg.): "Der bewegte Sinn", Birkhäuser, ISBN 3-7643-6516-1, 2001

-
- Jones, L.A.; Hunter, I.W. (1990) *A perceptual analysis of stiffness.*, Experimental Brain Research 79, pp. 150-156., 1990
- Jones, L.A.; Hunter, I.W. (1993) *A perceptual analysis of viscosity.*, Experimental Brain Research 94, pp. 343-351, 1993
- Jungnitsch, G. (1984) *Vergleichende Untersuchung bei vollsinnigen und geburtsblinden Personen an einer Form der Symmetrietauschung.* Dissertation, Universität Regensburg, ISBN 3-445-02342-5, 1984
- Kane, R.B. (1971) *Minimizing Order Effects in the Semantic Differential.* Educational and Psychological Measurement, 31, pp. 137-144, 1971
- Kaplan, K.J. (1972) *On the Ambivalence-indifference Problem in Attitude Theory and Measurement. A suggested Modification of the Semantic Differential Technique.*, Psychological Bulletin 77, pp. 361-372, 1972
- Kosaka, H.; Watanabe, K. (1996) *Reaction Forces of Switches and Push Feeling.*, Automotive Design Avancements in Human Factors: Improving Drivers' Comfort and Performance. SAE, Warrendale, Publication N0.SP-1155, pp. 169-174, 1996
- Krause, W. (1989) *Konstruktionselemente der Feinmechanik.* München; Wien: Hanser, ISBN 3-446-15332-2, 1989
- Krewany, A. (2005) *Hierarchie der Sinne.* <http://www.literaturkritik.de>, Rezensionforum Philipps-Universität Marburg, 2007
- Kuchenbecker, K.; Fiene, J.; Niemeyer, G. (2005) *Event-based haptics and acceleration matching: Portraying and assessing the realism of contact.* Aus: Proc. IEEE World Haptics Conference., Monat March, pp. 381-387, 2005
- Lederman, S.; Klatzky, R. (2004) *Multisensory Texture Perception.* In: The handbook of multisensory processes. The MIT Press, ISBN 0-262-03321-6, Kapitel 7, pp. 107-122, 2004
- Levitt, H. (1971) *Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics.*, The journal of the acoustical Society of America, American Institute of Physics (AIP), Volume 49, Number 2 (Part 2), pp. 467-477, 1971

- Loomis, J.M.(1990) *A model of Character recognition and legibility*, Journal of Experimental Psychology, Human Perception 16, pp106-120, 1990
- Makino, Y.; Shinoda, H. (2005) *Selective stimulation to superficial mechanoreceptors by temporal control of suction pressure*, In: Proceedings of the first world haptics conference, Pisa,18.-20.3.2005, pp 229-234, ISBN: 0-7695-2310-2, 2005
- Martín, J.; Savall, J. (2005) *Mechanisms for haptic torque feedback*, In: Proceedings of the first world haptics conference, Pisa, 18.-20. March, 2005.
- Matell, M.S.; Jacoby, J. (1971) *Is there an optimal number of alternatives for Likert scale Items? Study I: Reliability and Validity*, Educational and Psychological Measurement, 31, pp. 657-674, 1971
- Metzger, W. (1954) *Sehen, Hören und Tasten in der Lehre von der Gestalt*, Schweizerische Zeitschrift für Psychologie 13, pp. 199-198, 1954
- Michelitsch, G.; Osen, M.; Williams, J.; Jimenez, B.; Rapp, S. (2004) *Haptic Chameleon*, In: Proceedings of EuroHaptics 2004, Munich Germany, pp. 340-343, June 5-7, 2004
- Morgan, M.J. (1977) *Molyneux's question*, New York: Cambridge University Press, 1977
- Neumann, J.; Timpe, K.P. (1970) *Arbeitsgestaltung. Psycho-physiologische Probleme bei Überwachungs- und Steuerungstätigkeiten.*, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1970
- Osumi, Y.; Inuzuka, Y.; Ito, H. (1990) *Operability of Car Audio Controls*, In Countdown to the 21st Century. Proceedings of the Human Factors Society 34th Annual Meeting, Orlando (USA). The human Factors Society , Santa Monica, California, Vol. 1, pp. 618-622, 1990
- Pang, X.D.; Tan, H.Z.; Durlach, N.I. (1991) *Manual Discrimination of Force Using Active Finger Motion*, Perception & Psychophysics, Vol. 49,Nr. 6, pp. 531–540, 1991
- Papyrus.li (2007) *Papyrus.li*, <http://papyrus.li> und <http://www.gratis-forum.de/forum/?fnr=31521&enr=508494&show1=1&modus=1>

-
- Raskin, J. 2000 *The Humane Interface. New Directions for Designing Interactive Systems*, - Addison-Wesley Longman, Amsterdam, ISBN 0-2013-7937-6, April, 2000
- Reisinger, J.; Wild, J.; Mauter, G.; Bubb, H. (2005) *Mechatronic Tools in haptic research for automotive applications*, Proceedings of REM2005, pp. 293 - 298, 30.6.-1.7., Annecy, France, 2005
- Reisinger, J. (2006) *Haptik von Bedienelementen*, In: Ergonomie aktuell, Ausgabe 7, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, pp. 29-33, Sommer 2006
- Reisinger, J.; Wild, J.; Mauter, G.; Bubb, H. (2006) *Haptical feeling of rotary switches*, Proceedings of Eurohaptics 2006 (EHC2006), pp.49 - 55, 3.-6.7., Paris, France, 2006.
- Reisinger, J.; Wild, J.; Mauter, G.; Bubb, H. (2007) *Haptische Optimierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle Bedienelement*, Bericht zum 53. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften, pp. 361 - 364, 28.2.-2.3., Magdeburg, Germany, ISBN 978-3-9636804-04-1, 2007
- Reisinger, J.; Wild, J. (2007) *Haptische Bedienschnittstelle*, Kap. 6 in: A. Meroth und B. Tolg, "Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug. Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen", Vieweg, 1. Auflage, Oktober, ISBN 978-3-8348-0285-9, 2007
- Reisinger, J. (2008) *Haptische Konstanzleistung bei Drehstellern*, Ergonomie aktuell, Ausgabe 8, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, pp. 40-44, 2008
- Revesz, G. (1950) *Psychology and art of the blind*, Longmans green, New York, 1950
- Rudel, J. (2005) *Entwicklung, Aufbau und Durchführung eines Versuchs zur Untersuchung der Haptik von Kraftfahrzeug-Bedienelementen*, Diplomarbeit an der Hochschule Heilbronn, Mechatronik und Mikrosystemtechnik, 2005
- Rühmann, H.P. (1993) *Stellteilgestaltung*, in Schmidtke (Hrsg.): Ergonomie, Carl Hanser Verlag, 1993; ISBN 3-446-16440-5

- Schmidt, R.F. (Hrsg.) (1979) *Grundriß der Neurophysiologie*, Springer Verlag Berlin - Heidelberg - New York, 1979
- Schmidt, R.F. (1995) *Physiologie des Menschen*, Springer-Verlag, Berlin, 26. Aufl., ISBN 3-540-58034-4, 1995
- Schmidtke, H.; Rühmann, H.P. *Kräfte an Fußstellteilen*, In: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (Hrsg.) Handbuch der Ergonomie, Abschnitt B-4.5.1, 2. Auflage, Carl-Hanser-Verlag, München
- Scholz, P. (2004) *Konzeption, Konstruktion und Aufbau eines Simulators für rotatorische Bedienelemente im Kraftfahrzeug*, Diplomarbeit an der Hochschule Heilbronn, Mechatronik und Mikrosystemtechnik, 2004
- Sensables (2007) *www.sensables.com*, 2007
- Spanner, B. (1993) *Einfluß der Kompatibilität von Stellteilen auf die menschliche Zuverlässigkeit*, Dissertation, TU München, 1993
- Swaboda, Ch. (2006) *Entwicklung von chemisch und mechanisch widerstandsfähigen Oberflächen von Dekorfolien auf Papierbasis zur Erweiterung der Einsatzgebiete auf der Grundlage nanopartikelhaltiger Lackaufbauten*, Projektabschlussbericht 2006, ihd Dresden gGmbH, <http://www.ihd-dresden.de/index.php?id=218&L=0>
- Tan, H.Z.; Srinivasan, M.A.; Ebermann, B.; Cheng, B. (1994) *Human Factors for the Design of Force-Reflecting Haptic Interfaces*, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting: Dynamic Systems and Control, DSC Vol. 55-1, pp. 353–359, 1994
- Tan, H.Z.; Durlach, N.I.; Beauregard, G.L.; Srinivasan, M.A. (1995) *Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues*, Perception & Psychophysics, Vol. 57, No. 4, pp. 495-510, 1995
- Thews, G.; Mutschler, E.; Vaupel, P. (1999) *Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen*, Stuttgart : Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, ISBN 3-8047-1616-4, 1999
- Trommsdorf, V. (1975) *Die Messung von Produktimages für das Marketing. Grundlagen und Operationalisierung*, Köln, 1975
- US-Patent 6,867,680 B1 (2005) *Dual Magnet Hall Effect Switch*, US 6,867,680 B1; 2005

-
- Wall, S.A.; Harwin, W.S. (1999) *Modelling Of Surface Identifying Characteristics Using Fourier Series*, Proc. ASME Dynamic Systems and Control Division (Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperators), DSC Vol. 67, 1999, pp. 65-71
- Warlo., I.; Krummenauer, F.; Dick, H.B. (2005) *Rotationsstabilität monofokaler Intraokularlinsen mit C-Haptik versus Z-Haptik nach Kataraktchirurgie : Prospektiver randomisierter Vergleich*, Ophthalmologie 2005, Springer Medizin Verlag, online publiziert 23. März 2005
- Weir, D.; Colgate, J.; Peshkin, M. (2004) *The Haptic Profile: Capturing the Feel of Switches*, Aus: Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'04), ISBN 0-7695-2112-., 69, 2004
- WHC 2005 *Proceedings of Worldhaptics Conference 2005 (WHC2005)*, 18.-20.3., Pisa, Italy, ISBN 0-7695-2310-2, 2005
- WHC 2007 *Proceedings of Worldhaptics Conference 2007 (WHC2007)*, 22.-24.3., Tsukuba, Japan, ISBN 0-7695-2738-8, 2007
- White, B.W.; Saunders, F.A.; Scadden, L.; Bach-y-Rita, P.; Collins, C.C. (1970) *Seeing with the skin*, Perception and Psychophysics, Vol 7(1), 1970, pp 23-27.
- Wilky, S. (2005) *Charakterisierung von Bedienelementen am Haptik-Prüfstand*, Studienarbeit, Hochschule Heilbronn, 2005
- Witte, W. (1975) *Haptische Täuschungen bei sehenden und Geburtsblinden*, In: G.B. Flores D' Arcais (Hrsg.): Studies in perception. Ilano: Martello, pp. 312-325, 1975
- Zimbardo, P.G.; Gerrig, R.J. (2004) *Psychologie*, Pearson Studium; Auflage: 16., aktualis. Auflage, ISBN 3-8273-7056-6, 2004
- Zimmer, A. (2001) *Gestaltpsychologische Ansätze zur Analyse der haptischen Wahrnehmung*, in M.Grunwald, L.Beyer (Hrsg.): "Der bewegte Sinn", Birkhäuser, ISBN 3-7643-6516-1, 2001
- Zinchenko, V.P.; Lomov, B.F. (1960) *The function of hand and eye movements in the process of perception*, Problems in Psychology 1, pp. 12-26, 1960
-

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
α	[1]	Signifikanzniveau; α -Fehler-Niveau; Irrtumswahrscheinlichkeit:
β	[1]	β -Fehler-Niveau; Wahrscheinlichkeit eine richtige Alternativhypothese H1 zu verwerfen
φ	[°]	Drehwinkel
μ		Mittelwert einer theoretischen Verteilung oder einer Population
σ		Standardabweichung/Varianz
π		Theoretischer (realer) Wahrscheinlichkeitswert
φ	[°] ; [rad]	Drehwinkel
χ^2_k		(Griech.: Chi) χ^2 -Variable mit k Freiheitsgraden
φ_i	[°]	Drehwinkel an Position i; i = 1...n
0	[mNm]	Nulllage einer gemessenen Drehmoment-Kennlinie;
$0'$	[mNm]	Reibungs-Offset und Nulllage der Rastung bei rotatorischen Bedienelementen; entspricht M_R .
$1-\beta$		Teststärke
a	[1]	Amplituden-Parameter der Regressionsfunktion
c	[N/mm]	Federkonstante, Federsteifigkeit
$\Delta\varphi$	[°] ; [rad]	Winkeldifferenz
ΔF	[N]	Höhe des Kraftsprungs
$\Delta F/\Delta x$	[N/mm]	Steigung des Kraftsprungs
ΔM	[mNm]	Drehmomentdifferenz
Δx	[mm]	Weg des Kraftsprungs
Δx	[mm]	Differenz der Federauslenkung
$d\varphi$	[°] ; [rad]	infinitesimal kleine Winkeländerung
dl	[mm]	infinitesimal kleine Änderung der Bogenlänge
dx	[mm]	infinitesimal kleine Änderung der Federauslenkung
F_φ	[N]	tangentiale Kraft

$F(F/x)_n$	[N/mm]	Steigung der Flanke nach dem Kraftsprung
$f(x)$		Funktion f in Abhängigkeit von x
$f'(x)$		Erste Ableitung der Funktion f (x) nach x
$F_1, F_2, F_3,$ F_4	[N]	Kraft-Parameter unterschiedlicher Definitionen nach Osumi (1990), Bubb (2001) und DIN EN 196000 (2001)
F_E	[N]	Parameterwert Kraftwert bei Erreichen des Endanschlages
F_F	[N]	Federkraft
F_F	[N]	Parameterwert Federvorspannung
$F_F(\varphi)$	[N]	Federkraft in Abhängigkeit vom Drehwinkel φ
F_{F0}	[N]	konstant angenommene Federkraft
F_{max}	[N]	Parameterwert Maximalkraft
F_n	[N]	Parameterwert Kraft, Flanke nach dem Schaltpunkt
F_S	[N]	Parameterwert Schaltkraft
F_S/x_S	[N/mm]	Steigung der Flanke vor dem Schaltpunkt
F_v	[N]	Parameterwert Kraft, Flanke vor dem Schaltpunkt
$I(\varphi)$	[Nm]	Integral der Drehmomentfunktion M(φ) über φ
l	[mm]	Bogenlänge
M	[mNm]	Amplitudenwert einer gemessenen Drehmoment-Kennlinie
$M(\varphi)$	[mNm]	Funktion Drehmoment M in Abhängigkeit vom Drehwinkel φ
$M_\varphi(\varphi)$	[mNm]	Rastmoment in Abhängigkeit vom Drehwinkel φ
M'	[mNm]	Drehmoment Amplitudenwert bezogen auf 0'
M_{max}	[mNm]	Größtes Drehmoment bei
$M_{max1,i}$	[mNm]	Maximale Amplitudenwerte des Vergleichsobjektes 1 bei Vergleich i
$M_{max2,i}$	[mNm]	Maximale Amplitudenwerte des Vergleichsobjektes 2 bei Vergleich i
M_{min}	[mNm]	Kleinstes Drehmoment
M_R	[mNm]	Reibmoment oder Reibungsoffset; entspricht 0'
M_{S-S}	[mNm]	Spitze-Spitze-Wert einer Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie.
p	[1]	von probabilité; statistische Wahrscheinlichkeit

		Wahrscheinlichkeit, geschätzt über die relative Häufigkeit: nA/n
r	[mm]	Radius
$r(\varphi)$	[mm]	Radius in Abhängigkeit vom Drehwinkel φ
S_1, S_2, S_3	[mm]	Wegdefinitionen nach Osumi (1990)
s_1, s_2, s_3	[mm]	Wegdefinitionen nach Bubb (2001) und DIN EN 196000 (2001)
t	[1]	Integrationsvariable der Gaußschen Normalverteilung
x	[mm]	Weg, Hub
x	[mm]	Federauslenkung
$x(\varphi)$	[mm]	Federauslenkung in Abhängigkeit vom Drehwinkel φ
x_E	[mm]	Parameterwert Weg bei Erreichen des Endanschlages
x_F	[mm]	Parameterwert der Federvorspannung
x_i	[1]	Abszissenwert von Vergleich i
x_{max}	[mm]	Parameterwert Weg bei Maximalkraft
x_n	[mm]	Parameterwert Weg, Flanke nach dem Schaltpunkt
x_S	[mm]	Parameterwert Schaltweg
x_p	[mm]	Parameterwert Weg, Flanke vor dem Schaltpunkt

Indizes

i	Zähler der Versuchsreihen
min	Minimalwert
max	Maximalwert
S-S	Spitze-Spitze-Wert

Abkürzungen

A1, A2	Von mehreren Faktoren abhängige Gruppierung von Adjektivpaaren
ACC	Automotive Competence Center an der Hochschule Heilbronn
AR	Augmented Reality/ erweiterte Realität
BE	Bedienelement
CCS	Texas Instruments Code Composer Studio; Software zur Programmierung von Texas Instruments Signalprozessoren
COMAND	Marke des zentralen Bedienkonzeptes der Daimler AG. Abkürzung. für „Cockpit Management and Data System“.
D / D ²	Erstes / zweites Differential
DIO	Datenein-Ausgabe-Modul (Data-Input-Output)
DMS	Dehn-Messstreifen
DSP	Digitaler Signal Prozessor
F: y%	Winkelanteil y in % der fallenden Flanke
F1, F2, F3, F4	Faktoren 1, 2, 3, 4 einer Faktorenanalyse
FA I/II	Fast adapting 1/2
FF	fallende Flanke
FH	Fachhochschule
I	Integral
-I-	Integraldarstellung
iDrive	Marke des zentralen Bedienkonzeptes der BMWAG. Abkürzung. für „Intelligent Drive“.
Kfz	Kraftfahrzeug
lat.	Lateinisch
-M-	Drehmomentdarstellung
MMI	1. Allgemein steht es für Mensch-Maschine-Interaktion; 2. Marke des zentralen Bedienkonzeptes der Audi AG.. Abkürzung. für „Multi-Media-Interface“.
P	Proportional
PC	Pacini Corpuscle
RA	Rapidly Adapting
S: x%	Winkelanteil x in % der steigenden Flanke
SA I/II	Slowly adapting 1/2

SF	steigende Flanke
TI	Firmenkürzel der Firma Texas Instruments
TU	Technische Universität
VL	Versuchsleiter
VP(n)	Versuchsperson(en)
VR	Virtuelle Realität
ZNS	Zentrales Nervensystem
χ^2	Chi-Quadrat; Methode für Signifikanztests auf Gleichverteilung

Begriffe

Die Modalität, die Modalitäten	Eine Sinneswahrnehmung, z.B. Optik, Akustik, Haptik.
Die Qualität, die Qualitäten	Wahrnehmungsgröße einer Modalität, z.B. Lichtwellenlänge, Intensität, Schalldruck, Frequenz.
multimodal	Zeitgleiche Wahrnehmung mehrerer Modalitäten..
crossmodal/ intermodal	Beziehungen zwischen verschiedenen Wahrnehmungsmodalitäten
unimodal	Ein Wahrnehmungsvorgang konzentriert sich auf nur eine einzelne Modalität.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften und Zuordnung haptischer Qualitäten zu den verschiedenen Mechanosensoren ¹ und deren typisches Übertragungsverhalten ²	10
Tabelle 2: Bauarten und Auswertungsprinzipien von Bedienelementen	27
Tabelle 3: Abfolge der Teilversuche.....	64
Tabelle 4: Signifikanzwerte der Häufigkeitsverteilungen nach SPSS. Details in Anhang F.6.1.	68
Tabelle 5: Tabellarischer Vergleich der im Test erbrachten Häufigkeiten	76
Tabelle 6: Vergleich der Parameter der Regressionsgeraden	78
Tabelle 7: Verwendete Parameter mit Wertebereich. *: die Amplitude wird an einer festen Kennlinienform variiert.	86
Tabelle 8: Ermittelte bipolare Adjektivpaare mit erwarteter Aussagekraft	89
Tabelle 9: Halbmatrix der zu bewertenden Parameterkombinationen. Die Zahlen in den Feldern stellen die Abfolge der Kombinationen im Versuch dar. *: Variation der Amplitude 8→75%; 9→100%; 10→125%	89
Tabelle 10: Abhängigkeiten der Paarungen, Gruppierungen und technischen Parameter. Erläuterungen siehe Text. *: Die Aussagen zum Einfluss der Amplitude ist nur beschränkt verwertbar, da der Versuchsumfang nur gering angelegt ist. **: Nur geringe Abhängigkeit der Flanken erkennbar. Korrelationskoeffizienten bei 1/3. .	93

Tabelle 11: Eingesetzte Versuchspartner.	134
Tabelle 12: Signifikanzwerte der Häufigkeitsverteilungen nach SPSS. Details in Anhang I.6.4.	139
Tabelle 13: Gewählte Häufigkeiten der Visualisierungen zu den vorgestellten Kennlinien. Die Auswahlhäufigkeit der Visualisierungen ist in Anhang I.6.3 aufgeführt.	150
Tabelle 14: Faktoren aus dem Pilotversuch mit Namen und zugehörigen Adjektivpaaren	165
Tabelle 15: Zusammenfassung der Abhängigkeiten zwischen Parametern und Wertungen nach Korrelationen mit den Komponenten geordnet. Die stärksten Parameter stehen links.	171
Tabelle 16: Steigungen $\Delta F/\Delta x$ der einzelnen Versuchskennlinien	194
Tabelle 17: Abhängigkeiten zwischen Parametern und Wertungen anhand der Parameteranalyse. Die Parameter sind nach Stärke der Einflüsse sortiert aufgeführt. *: Zeigt Eigenschaften ereignisbasierter Wahrnehmung. **: Zeigt Ansätze zur Interpretation mittels Integraldarstellung	210

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Propriozeptoren: Das Golgie-Sehnenorgan liefert Information über Muskelkräfte. Muskelspindeln liefern Informationen über die Ausdehnung des Muskels und damit die Position des entsprechenden Gliedmaßes. Bild nach Deetjen (2005, S. 239)	7
Abbildung 2: Mechanosensoren in der unbehaarten Haut. Sie ist aufgrund der finger- oder handorientierten Betätigung für Bedienelemente relevant. Die einzelnen Mechanosensoren sind separat nach Schmidt (1995, S. 218) dargestellt.....	8
Abbildung 3: Antwortverhalten der Mechanosensoren auf eine Hautdeformation nach Schmidt (1995, S. 218). Die Bezeichner RA stehen hier alternativ für FA I, bzw. PC für FA II.	9
Abbildung 4: Einordnung der Sinnesorgane und deren haptische Sinnesqualitäten im Kontext des Handhabungsgefühls. * kennzeichnet die Trennung zwischen Kinästhetik und Propriozeption mittels der gestrichelten Verbindung.	12
Abbildung 5: Verteilung der Mechanosensoren auf der Hand nach Deetjen (2005, S. 65).....	13
Abbildung 6: Radiale Wirkrichtung von Federelementen: (a) Außen liegend mit Blattfeder; (b) Innenliegend mit Spiralfeder.....	28
Abbildung 7: Gängige Prinzipien haptischen und elektrischen Feedbacks bei Drucktastern mit typischen Merkmalen: (a) Silikonschaltmatte; (b) Federscheibe; (c) Mikroschalter als Kombination aus Federscheibe mit Silikonstößel	29
Abbildung 8: Messung eines Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs mit Rechts- und Linksdrehung.....	32
Abbildung 9: Systematische Darstellung einer Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie. Es sind zwei Detents mit Ruhelagen und Übergangspunkten abgebildet. Die Lage der Ruhelage bzw. Übergangspunkte lässt sich anhand der Wirkrichtungen von Benutzer und Bedienelement bzw. des Nulldurchgangs des Drehmoments erklären....	32
Abbildung 10: Zusammenhänge der Parameter Reibung, maximales Drehmoment und Spitze-Spitzwert.....	33
Abbildung 11: Kappe des zylindrischen Audi-MMI-Drehstellers (linke Abbildung) und typische Griffarten (rechte Abbildung) nach Bullinger (1994). Zufassung mit zwei (links) oder drei (rechts) Fingern.	35
Abbildung 12: Vergleich verschiedener Kennlinien: 1. Audi MMI A8 (2004), 2. BMW iDrive 5er (2004), 3. Volvo Klima V50 (2004). Es ist eine vereinfachte Kennlinienform mit typischen Merkmalen gängiger Bedienelemente überlagert (Strich-Punkt-Linie). Sie zeigt die typisch steile ansteigende und die flach abfallende Flanke der untersuchten Bedienelemente. Alle Kennlinien sind reibungsfrei dargestellt.....	36

Abbildung 13: Systematische Darstellung einer Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie. Die Position der Ruhelage bzw. Übergangspunkte lässt sich anhand der Wirkrichtungen von Benutzer und Bedienelement und des Nulldurchgangs des Drehmoments erklären.	38
Abbildung 14: Problematik der Ruhelage bei Verwendung der Drehmomentkennlinie. Auffällig wird häufig die Ruhelage intuitiv falsch gewählt.	39
Abbildung 15: Applizierte Kurvenverläufe I: Rechteck (a), Sägezahn steil (b), Sägezahn flach (c), Sinus (d), Dreieck (e)	40
Abbildung 16: Applizierte Kurvenverläufe II: (a) Sinusverlauf aus der Nulllage nach oben verschoben, (b) Sinus mit breiterer Ausprägung der unteren Halbwelle.....	40
Abbildung 17: Integraldarstellung von Sinusform und Dreieckform. Beide haben große Form-Ähnlichkeit. Die Dreieckform hat eine geringere Höhe, was sich mit den Beobachtungen der haptischen Wahrnehmung deckt.	44
Abbildung 18: Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinien mit zugehörigen Potentialen: Intergal-Kennlinie: (a) Sinus, (b) Dreieck, (c) Sägezahn steil, (d) Sägezahn flach, (e) Rechteck.....	45
Abbildung 19: Drehmomentdarstellung einer asymmetrischen Kennlinie. Die Flächen oberhalb und unterhalb der Abszisse haben unterschiedliche Größe.....	46
Abbildung 20: Integraldarstellung einer asymmetrischen Kennlinie. Sie fällt nach rechts hin ab, hat die Ruhelage in den jeweiligen lokalen Minima.	46
Abbildung 21: Asymmetrische Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinien mit zugehörigen Potentialen: (a) Sinus mit Offset, (b) Sinus mit breiterer Ausprägung der unteren Halbwelle.....	47
Abbildung 22: Schematische Darstellung eines rotatorischen Bedienelementes zur mechanischen Modellbildung. Die Feder wirkt über einen Gleitstein mit der Kraft F_F auf die Rastscheibe. Diese Anpresskraft verursacht eine Kraft F_ϕ tangential zur Rastscheibe, die letztendlich das wirkende und spürbare Drehmoment erzeugt.	49
Abbildung 23: Schematische Darstellung der Rastung mit punktförmiger Abtastung. Die Normalkraft F_n steht senkrecht auf der Rastkurve und kann in Federkraft F_F und wirksame Kraft F_ϕ zerlegt werden. Sie ist für die Reibung des Gleitsteines verantwortlich, die für die folgenden Betrachtungen jedoch nicht berücksichtigt wird.	50
Abbildung 24: Abhängigkeit der Bogenlänge l von Radius r und von Drehwinkel ϕ	52
Abbildung 25: Verhältnis der Kennlinienamplituden.....	56
Abbildung 26: Auftragung der Messpunkte und Regressionsfunktion	57
Abbildung 27: Zuordnung zwischen Aufgabentypen und Hypothesen.....	59
Abbildung 28: Sitzbox mit integriertem rotatorischem Simulator	60
Abbildung 29: Versuchsablauf rotatorische Bedienelemente	63
Abbildung 30: Im Versuch eingesetzte Kennlinientypen: (a) Sinusform, (b) Dreiecksform, (c) flach ansteigende Sägezahnform, (d) steil ansteigende Sägezahnform, (e) Trapez-/Rechteckform, (f) asymmetrische Sinusform.	65
Abbildung 31: Verteilung der Zuordnungspunkte bezüglich der Ruhelage.....	67
Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „flacher Sägezahn“ ($M_{max} = 30 \text{ mNm}$; $p=0,5\%$)	69
Abbildung 33: 2. Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „Dreieck“ ($M_{max} = 20 \text{ mNm}$; $p=0,0\%$)	70
Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „Rechteck“ ($M_{max} = 30 \text{ mNm}$; $p=5,0\%$).....	71
Abbildung 35: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „asymmetrischer Sinus“ ($M_{max} = 40 \text{ mNm}$; $p=2,5\%$)	72
Abbildung 36: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „Sinus“ ($M_{max} = 40 \text{ mNm}$; $p=39,6\%$).....	73

Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung bei Kennlinie „steiler Sägezahn“(Mmax = 40 mNm; p=1,6%; nur 8 VPn)	74
Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung aller Messungen gemeinsam	75
Abbildung 39: Auftragung der Messwerte für die Differenzschwellen der Sinusform	77
Abbildung 40: Auftragung der Messwerte für die Differenzschwellen zwischen Sinus- und Dreiecksform. Die Verschiebung des Maximum ist klar ersichtlich. Als Regressionsfunktion wird eine Gaußsche Normalverteilung hinzugezogen. Sie dient lediglich der Feststellung des Punktes maximaler Übereinstimmung.....	78
Abbildung 41: Vergleich der Regressionsfunktionen der Differenzschwellen bei Sinusform, flachem und steilem Sägezahn sowie bei Sinus- und Dreieckform mit korrigierter Abszisse.	79
Abbildung 42: Grundlegende Parameter der Drehmomentkennlinie. Parameter SF ist die Steigung der ansteigenden Flanke, Parameter FF ist die Steigung der abfallenden Flanke.	84
Abbildung 43: Vergleich zwischen den Messungen (Rechtsdrehung) zwischen dem iDrive des 5er BMW (Rechts 2) und dem MMI des Audi A8 (Rechts 1): (a) Drehmomentdarstellung; (b) Integraldarstellung.....	85
Abbildung 44: Komponentendiagramm im rotierten Raum. Die Paarungen sind so gepolt, dass keine gegenüberliegende Paare entstehen. Alle Werte versammeln sich nahezu vollständig in der oberen Halbebene. Die Polarisierung kann aus der Reihenfolge der Adjektive gelesen werden. Die technischen Parameter sind mit A: steigende Flanke, B: fallende Flanke und C: Amplitude gekennzeichnet.....	92
Abbildung 45: Adjektivpaar: weich-hart. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.....	94
Abbildung 46: Adjektivpaar: schwergängig – leichtgängig. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.	96
Abbildung 47: Adjektivpaar: widerspenstig – willig. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.....	97
Abbildung 48: Adjektivpaar: minderwertig – hochwertig. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.	98
Abbildung 49: Adjektivpaar: angenehm – unangenehm. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.	99
Abbildung 50: Bewertung: sehr gut – schlecht. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.....	100
Abbildung 51: Adjektivpaar: schwammig – präzise. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.....	101
Abbildung 52: Adjektivpaar: eindeutig/ klar – verschwommen/ unklar. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.....	102
Abbildung 53: Adjektivpaar: eng geführt – weit. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.....	103
Abbildung 54: Adjektivpaar: rund – spitz. Darstellung normierter Mittelwerte der Bewertungen über den Parameterachsen.....	104
Abbildung 55: Im Versuch als hochwertigste, angenehmste und beste bewertete haptische Charakteristik. Sie vereinigt die höchste Präzision bei dabei geringst möglicher Härte.	105
Abbildung 56: Integraldarstellungen verschiedener verwendeter Drehmomentkennlinien. Die punktierten Linien verdeutlichen die Bedeutung „spitz“ und „rund“, die punktierten Pfeile die „Weite“ oder „enge“ der Ruhelage. * Die Amplitudenüberhöhung kommt aus dem geringeren gesamten Winkelanteil der Flanken. Beide Steigungen sind größer und die maximale Amplitude wird früher erreicht, bzw. erst später reduziert. Daher ist die Fläche	

unter der Drehmomentdarstellung größer, was sich auf die Amplitude des Integrals auswirkt. Bei einer gleich bleibenden Winkelsumme der Flanken, bleibt die Amplitude des Integrals konstant. 106

Abbildung 57: Summe der Winkelanteile am Periodenwinkel anhand der Versuchskonfiguration dargestellt. . 107

Abbildung 58: Kraft-Weg-Verlauf eines Drucktasters. Hier ein Mikroschalter. 110

Abbildung 59: Systematische Darstellung einer Kraft-Weg-Kennlinie. 110

Abbildung 60: Verschiedene Kontakt-Griffarten bei Fingerbetätigung nach Bullinger (1994). Links: Zeigefinger gestreckt Betätigungsrichtung nach links, Mitte: Zeigefinger abgewinkelt, Betätigungsrichtung nach unten; Rechts: Daumenbetätigung, Betätigungsrichtung nach links..... 112

Abbildung 61: Kraft-Weg-Verlauf verschiedener Drucktaster bei Belastung (Hinweg): 1. BMW Klima 3er (2005), 2. Audi A8 Hardkey-Taste (2004), 3. Taster Otto Engineering HP7, 4. Taster Otto Engineering P3, 5. Taster Elobau 145MT 113

Abbildung 62: Beispiele zum Vergleich der Grundtypen nach Kapitel 4.3.2: 1. Knackfrosch, 2. Mikroschalter, 3. Gummischaltmatte. 114

Abbildung 63: Einfluss des Silikonstößels. Unterscheidung zwischen 1. Knackfrosch und 2. Mikroschalter. Zu erkennen der schärfere, steilerer und weniger tiefe Kraftsprung des Mikroschalter. Die Hysterese des Mikroschalters ist ebenfalls größer, was davon kommt, dass die Verformungsarbeit des Stößels, in Form innerer Reibung, Energie in Wärme umsetzt und diese nicht mehr in die kinetischen Größen eingeht. 115

Abbildung 64: Entstehung der Federvorspannungskraft und möglicher Einfluss auf die wahrgenommene Tiefe des Bedienelementes. 116

Abbildung 65: Reaktionskraft-Diagramm nach Kosaka und Watanabe (1996) für die Amplitude des Kraftsprungs (drop). 118

Abbildung 66: Kraft-Weg-Verlauf nach Bubb (2001) links und Osumi et al. (1990) rechts. 118

Abbildung 67: Parametrisierung der Kraft-Weg-Kennlinie. Die Parametrisierung beschreibt den gesamten Verlauf über 6 definierte Wertepaare (F, x)..... 121

Abbildung 68: Parametrisierung der Kraft-Weg-Kennlinie mit allen Bezeichnern. Der Kraftsprung ΔF , Δx ist relativ zur Lage des Schaltpunktes definiert, nicht wie nach DIN mit absoluten Werten (F_2 , s_2). 121

Abbildung 69: Integraldarstellung der drei Grundtypen nach Abbildung 62: 1. Knackfrosch, 2. Mikroschalter, 3. Gummischaltmatte. Der Kraftsprung des Mikroschalters ist nahezu nicht zu erkennen. Die Gummischaltmatte zeigt als einzige der Kennlinien einen merklichen Knick. Die Darstellung des Knackfrosch ist nur sehr kurz und hat aufgrund der geringen Hysterese nahezu denselben Hin- und Rückweg. Die Kennlinie wird von den anderen beiden nahezu verdeckt..... 122

Abbildung 70: Differentialdarstellung der drei Grundtypen nach Abbildung 62. 1. Knackfrosch, 2. Mikroschalter, 3. Gummischaltmatte. Die Kennlinien sind mit einer Grenzfrequenz von einem Viertel der Abtastfrequenz Tiefpass gefiltert..... 123

Abbildung 71: Impulsdarstellung eines Drucktasters mit Mikroschalter als Kraft-Zeit-Diagramm. Die durch den Schaltpunkt ausgelösten gedämpften Schwingungen sind gut erkenntlich (Hin- und Rückweg). 124

Abbildung 72: Runde Kennlinienformen, anhand deren die Möglichkeit zur Annäherung durch eckige Kennlinien geprüft wird. 128

Abbildung 73: Näherung durch Überlagerung einer Dreieckfunktion. Jeweils für Sinus flach und Sinus steil. Es sind nur die Drei-Punkt-Varianten dargestellt. 128

Abbildung 74: Näherung durch Orientierung an den Extrempunkten. Jeweils für Sinus flach und Sinus steil. Es sind nur die Drei-Punkt-Varianten dargestellt. 129

Abbildung 75: Näherung durch Orientierung an der Steigung der Flanke des Kraftsprungs. Jeweils für Sinus flach und Sinus steil. Es sind nur die Drei-Punkt-Varianten dargestellt.	129
Abbildung 76: Näherung durch die Methode kleinster Fehlerquadrate. Jeweils für Sinus flach und Sinus steil. Es sind nur die Drei-Punkt-Varianten dargestellt.	130
Abbildung 77: Versuchsablauf translatorische Bedienelemente	133
Abbildung 78: Beim Haptik-Grafik-Versuch eingesetzte Kraft-Weg-Verläufe.	135
Abbildung 79: Häufigkeitsverteilung der „gleich“-Urteile von „Sinus flach“, „Sinus steil“ und beide zusammengefasst. Die Rubriken wurden jeweils mit der entsprechenden Sinusform verglichen. Die auf der linken Seite abgetrennte Rubrik ist die Referenzmessung der beiden Sinus-Kennlinien mit sich selbst.	137
Abbildung 80: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 1 „Flanke geschwungen“ (p=19,4%)	140
Abbildung 81: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 2 „Sinus“ (p=4,8%)	141
Abbildung 82: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 3 „vorne flach hinten steil“ (p=12,5%)	142
Abbildung 83: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 4 „kleiner Sprung“ (p=2,5%)	143
Abbildung 84: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 5 „Mikroschalter“ (p=0,5%)	144
Abbildung 85: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 6 „Dreieck“ (p=0,0%)	145
Abbildung 86: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 7 „Silikonschaltmatte“ (p=70,1%)	146
Abbildung 87: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 8 „Knackfrosch“ (p=6,2%)	147
Abbildung 88: Häufigkeitsverteilung bei Charakteristik 9 „Sprung“ (p=0,5%)	148
Abbildung 89: Faktorendiagramm im rotierten Raum. (a) 3D-Darstellung, (b) Teilansichten 1 und 2, (c) Teilansicht Faktoren 2 und 3, (d) Teilansicht Faktoren 3 und 1	151
Abbildung 90: Kennlinien (a) integrale und (b) nicht-integrale Darstellungen.	152
Abbildung 91: Kraft-Weg-Kennlinien der Kennlinien (v. l. n. r.) „Sinus“ „Silikon“ und „Sprung“. Sie korrelieren alle in Faktor 3, Kraft-Weg, Senke und Integral. Nur Sprung hat in der Integraldarstellung keine Übereinstimmung.	155
Abbildung 92: Kraft-Weg-Kennlinien der Kennlinien (v. l. n. r.) „Sinus“, „Dreieck“ und „Silikonschaltmatte“. Sie haben alle gemeinsam, dass sie als weich und ohne Kraftsprung bezeichnet werden. Sie haben einen flach abfallenden, weiten Kraftsprung.	156
Abbildung 93: Kraft-Weg-Kennlinien der Kennlinien (v. l. n. r.) „Flanke geschwungen“, „vorne flach, hinten steil“ und „Knackfrosch“. Sie haben alle gemeinsam, dass die Flanke nach dem Kraftsprung steiler als die beginnende Kennlinie ist und Die D-Darstellungen häufiger ausgewählt worden sind.	157
Abbildung 94: Kraft-Weg-Kennlinien der Kennlinien (v. l. n. r.) „Knackfrosch“ und „Mikroschalter“, „Sprung“ sowie „kleiner Sprung“ und „Dreieck“. Mit Ausnahme von „Sprung“ korrelieren alle mit Faktor 1. Es kann eine Abhängigkeit der Steigung und der Sprunghöhe erkannt werden.	158
Abbildung 95: Verwendete Parametrisierung der Kraft-Weg-Kennlinie.	160
Abbildung 96: Variation der Flanken durch F_v , x_v und F_n , x_n	162
Abbildung 97: Variation des Kraftsprungs durch ΔF und Δx	162
Abbildung 98: Variation der Lage des Schaltpunktes durch F_S und x_S . Alle Kennlinien haben denselben Endpunkt, weshalb die Flanken nicht parallel zueinander verlaufen.	164
Abbildung 99: Variation der Lage des Schaltpunktes durch F_S und x_S . Die Flanken vor und nach dem Schaltpunkt verlaufen parallel.	164
Abbildung 100: Komponentendiagramm der Faktoren F_1 und F_2 im rotierten Raum.	167

Abbildung 101: Komponentendiagramm der Faktoren F2 und F3 im rotierten Raum.....	168
Abbildung 102: Steigung der Flanke (a) vor dem Schaltpunkt und (b) nach dem Schaltpunkt bei gleichem Endpunkt über der Schaltkraft FS und Schaltpunktlage xS aufgetragen. Bei parallelem Flanken ist die Flanke nach dem Schaltpunkt gleich der vorderen.	172
Abbildung 103: Produkt aus Kraftsprunghöhe ΔF und Steigung $\Delta F/\Delta x$ über Kraftsprung ΔF und Sprunglänge Δx aufgetragen.	173
Abbildung 104: Niveau bei Erreichen des Endanschlags FE (a) bei gleichem Endpunkt und (b) bei parallelen Flanken über der Schaltkraft FS und Schaltpunktlage xS aufgetragen.....	174
Abbildung 105: Adjektivpaar hart – weich. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft FS und Schaltpunktlage xS bei parallelen Flanken.....	176
Abbildung 106: Adjektivpaar hart – weich. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft FS und Schaltpunktlage xS bei gleichem Endpunkt.....	176
Abbildung 107: Adjektivpaar hart – weich. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx . Achtung: die Größenachse ist bezüglich der Wertung getauscht hart oben \rightarrow weich oben!	178
Abbildung 108: Produkt aus Kraftsprunghöhe ΔF und Steigung $\Delta F/\Delta x$ über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx aufgetragen. Es wird ein verstärkter Einfluss des Kraftsprungs ΔF dargestellt.	178
Abbildung 109: Adjektivpaar hart – weich. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt Fv und Fn. Achtung: die Größenachse ist bezüglich der Wertung getauscht hart oben \rightarrow weich oben!	179
Abbildung 110: Einfluss der Kantenausprägung auf die Wahrnehmung der Härte. Die Kombination zweier linearer Flanken erzeugt demzufolge den weichsten Eindruck. Ein Ausrufezeichen bedeutet, dass dieser Parameter zwingend auf die übrigen wirkt.	180
Abbildung 111: Adjektivpaar schwergängig – leichtgängig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft FS und Schaltpunktlage xS parallelen Flanken.....	181
Abbildung 112: Adjektivpaar schwergängig – leichtgängig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft FS und Schaltpunktlage xS bei gleichem Endpunkt.	182
Abbildung 113: Adjektivpaar schwergängig – leichtgängig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx . Achtung: Die Größenachse ist bezüglich der Wertung vertauscht schwergängig oben \rightarrow leichtgängig oben!	183
Abbildung 114: Adjektivpaar schwergängig – leichtgängig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt Fv und Fn. Achtung: Die Größenachse ist bezüglich der Wertung vertauscht hart – weich \rightarrow weich – hart!	184
Abbildung 115: Adjektivpaar präzise – schwammig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft FS und Schaltpunktlage xS bei parallelen Flanken.	185
Abbildung 116: Adjektivpaar präzise – schwammig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft FS und Schaltpunktlage xS bei gleichem Endpunkt.	186
Abbildung 117: Darstellung des Produkts von Kraft FS und Steigung nach dem Schaltpunkt $(F/x)^n$ über den Parametern Schaltkraft FS und Schaltpunktlage xS bei gleichem Endpunkt.	186
Abbildung 118: Adjektivpaar präzise – schwammig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx	187

Abbildung 119: Adjektivpaar präzise – schwammig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n	188
Abbildung 120: Einfluss der Kantenausprägung auf die Wahrnehmung der Präzision. Ein Ausrufezeichen bedeutet, dass dieser Parameter zwingend auf die übrigen wirkt.	188
Abbildung 121: Adjektivpaar lang – kurz. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei parallelen Flanken.	189
Abbildung 122: Adjektivpaar lang – kurz. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei gleichem Endpunkt.	190
Abbildung 123: Auftragung der höheren Steigung. Die Steigung vor dem Schaltpunkt wird mit dem Faktor 1,6 höher gewichtet als die nach dem Schaltpunkt.	191
Abbildung 124: Adjektivpaar lang – kurz. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx	192
Abbildung 125: Adjektivpaar lang – kurz. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n	192
Abbildung 126: Einfluss der Kantenausprägung auf die Wahrnehmung der Paarung lang - kurz. Ein Ausrufezeichen bedeutet, dass dieser Parameter zwingend auf die übrigen wirkt.	193
Abbildung 127: Antwortverhalten zum Vorhandensein eines Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx	194
Abbildung 128: Antwortverhalten zur Lage des Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei parallelen Flanken.	195
Abbildung 129: Antwortverhalten zur Lage des Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei gleichem Endpunkt x_E	196
Abbildung 130: Antwortverhalten zur Lage des Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx	197
Abbildung 131 Antwortverhalten zur Lage des Schaltpunktes. Darstellung des Antwortverhaltens in Form der Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n	198
Abbildung 132: Adjektivpaar minderwertig – hochwertig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei parallelen Flanken.	199
Abbildung 133: Adjektivpaar minderwertig – hochwertig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei gleichem Endpunkt.	200
Abbildung 134: Adjektivpaar minderwertig – hochwertig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx	201
Abbildung 135: Adjektivpaar minderwertig – hochwertig. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n	202
Abbildung 136: Adjektivpaar sehr gut – sehr schlecht. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei parallelen Flanken.	203
Abbildung 137: Adjektivpaar sehr gut – sehr schlecht. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern Schaltkraft F_S und Schaltpunktlage x_S bei gleichem Endpunkt.	204
Abbildung 138: Adjektivpaar sehr gut – sehr schlecht. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern des Kraftsprungs ΔF und Δx	204
Abbildung 139: Adjektivpaar sehr gut – sehr schlecht. Darstellung des Antwortverhaltens in Form normierter Mittelwerte über den Parametern der Flankenform vor und nach dem Schaltpunkt F_v und F_n	205

Anhang

A	Elektrische Auswertung bei Bedienelementen.....	A-1
B	Haptik Prüfstand zur Vermessung von Drehstellern und Drucktastern	B-1
C	Haptik-Simulatoren für Drehsteller und Drucktaster.....	C-1
D	Versuchsumgebung.....	D-1
E	Pilotversuch: Vergleichbarkeit Haptik-Grafik bei rotatorischen Bedienelementen	E-1
F	Versuch: Untersuchung der Darstellungsart für rotatorische Bedienelemente.....	F-1
G	Pilotversuch: Ermittlung von Adjektivpaarungen für rotatorische Bedienelemente	G-1
H	Versuch: Parametrisierung der rotatorischen Kennlinie	H-1
I	Versuch: Untersuchung der Darstellungsart für translatorische Bedienelemente	I-1
J	Pilotversuch: Adjektivfindung für translatorische Bedienelemente.....	J-1
K	Versuch: Parametrisierung der translatorischen Kennlinie.....	K-1

A Elektrische Auswertung bei Bedienelementen

Die elektrische Auswertung unterscheidet sich in erster Linie in der Art des elektrischen Signals. Aus der Analogtechnik bekannt sind Drehsteller in Form von Potentiometern, die eine stellungsproportionale elektrische Spannung liefern. Mit dem Einzug der Digitaltechnik wurde dieses Prinzip zunächst übernommen, indem die anliegende Spannung mittels A/D-Wandler digitalisiert wurde. Aufgrund des hohen technischen Aufwandes dieser A/D-Wandler haben sich jedoch so genannte Encoder, welche zwei digitale Signale (A-B-Signal) für Richtung und Schrittweite liefern durchgesetzt. Haptisch haben diese Encoder den Vorteil, dass z. T. sie auch kontaktlos ausgelesen werden können und damit der Parameter Reibung weitere Freiheitsgrade hat. Auf Potentiometer wird im Folgenden nicht näher eingegangen.

Zur Realisierung des elektrischen Feedbacks von Encodern finden primär drei Prinzipien Anwendung: Zum einen durch, auch bei Potentiometern eingesetzte, elektromechanische Schleifer, die in diesem Fall jedoch über ein elektrisch kodierte Gegenstück gleiten. Zum Zweiten mittels Hallsensoren, welche ohne mechanischen Kontakt durch ein entsprechend magnetisch aufpolarisiertes Gegenstück seine Information erhält. Und schließlich eine optische Auswertung, welche durch zwei Lichtschranken und ein strichweise lichtdurchlässiges Gegenstück die entsprechenden Signale erzeugt. Abbildung 1 zeigt die drei Prinzipien schematisch.

Die haptische Rückwirkung der drei Prinzipien unterscheidet sich durch die eingesetzten physikalischen Effekte. Der Schleifer der mechanischen Lösung erzeugt, vergleichbar mit einem Potentiometer, Reibungseffekte. Durch magnetische Wechselwirkungen können bei dieser Art der Auswertung auch haptische Rückwirkungen in Form von Rastungen auftreten. Lediglich die optische Auswertung erfolgt ohne haptisches Feedback.

Der technische Aufwand im Bedienelement selbst ist bei mechanischen Encodern gering und benötigt lediglich eine HIGH-Spannung und liefert zwei Signalleitungen, welche ausgewertet werden. Die beiden übrigen Prinzipien benötigen zudem eine definierte Versorgungsspannung zum Betrieb der Signalwandler.

Bei Drucktastern überwiegen im Massenmarkt mechanische Kontaktierungen. Im Bereich geringerer Stückzahlen und besonderer Anforderungen bezüglich Lebensdauer und Umgebungsbedingungen finden jedoch auch magnetische oder optische Auswertungsprinzipien Anwendung (US-Patent 6,867,680 B1, 2005).

Letztendlich ergibt sich auch hierbei ein klassischer Spagat zwischen Kosten und Qualitätsanforderungen.

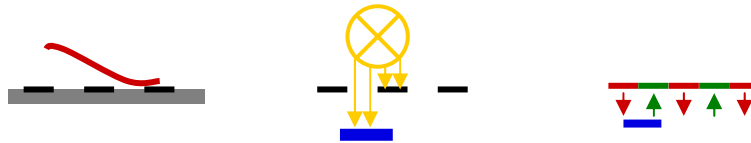


Abbildung 1: Prinzipien des elektrischen Feedbacks bei Encodern:
(1) mechanischer Abgriff über Schleifer; (2) optischer Abgriff mittels Lichtschranke;
(3) magnetischer Abgriff mittels Hallensensoren

B Haptik Prüfstand zur Vermessung von Drehstellern und Drucktastern

Zur Vermessung von Bedienelementen kommt ein speziell entwickelter Prüfstand zum Einsatz. Das System verfügt über zwei unabhängige Messachsen für Drehsteller und Drucktaster. Die Datenerfassung erfolgt zeitgesteuert, womit zeitbezogene Auswertungen möglich sind. Die Bedienelemente sind auf einem Positioniertisch waagrecht angeordnet und werden damit vor der entsprechenden Messeinheit positioniert. Die Messanordnung ist in Abbildung 2 dargestellt. Sie ist für Drehsteller und Drucktaster gleich aufgebaut: Über einen Greifer oder Taster ist das Bedienelement mit dem Antrieb gekoppelt. Zwischen Greifer und Antrieb sind die Messeinheiten geschaltet. Der Antrieb verändert die Position, während zugleich Positions- und Kraftwerte über die Messdatenerfassung eingelesen werden.

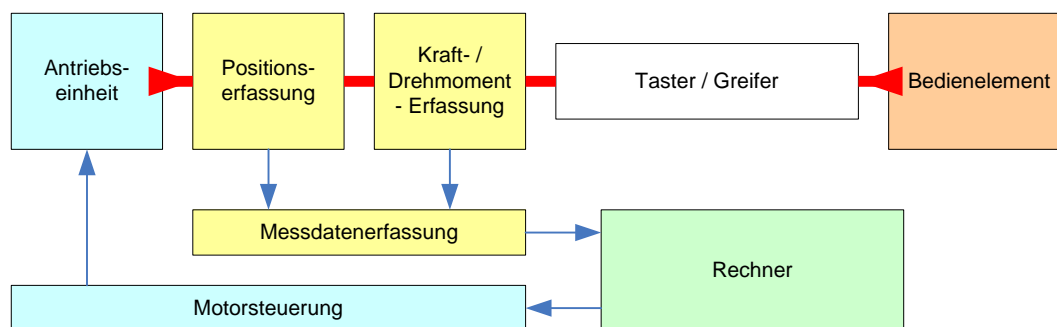


Abbildung 2: Grundprinzip der Vermessung von Bedienelementen.

B.1 Drucktaster

Zur Messung von Drucktastern wird ein Stößel mit Rundkopf gegen den Schalter bewegt. Der Stößel ist reibungs- und stick-slip-frei gelagert. Eine Kraftmessdose erfasst die Kraft, die Position wird über Inkrementalgeber eingelesen. Die Messeinheit verfügt über folgende technische Daten:

Kraftbereich:	0 ... 50 N
Kraftauflösung:	± 0,1 N im Bereich von 0 ... 15N
	± 0,2 N im Bereich von 15 ... 30N
	± 0,5 N im Bereich von 30 ... 50N
Messweg:	0 ... 60 mm
Schrittweite:	0,01 mm (Genauigkeit 10% bei 0,01 mm)
	Abschaltung bei einstellbarer Kraft- und Wegschwelle
Vorschubgeschwindigkeit:	stufenlos einstellbar von 0,2 ... 5mm/s

B.2 Drehschalter

Zur Messung von Drehschaltern wird das Bedienelement mittels eines Dreifinger-Zentrischgreifers gefasst. Eine exakte Ausrichtung der Achsflucht ist dafür erforderlich, ansonsten werden Störkräfte und erhöhte Reibungskräfte überlagert. Zur Kompensation von verbleibenden Achsversätzen und Verkippungen bei Drehstellern werden ausgleichende Maßnahmen wie Kupplungen eingesetzt, die eine sehr hohe kraft- und winkeltreue und sehr geringe Störkräfte in den übrigen Freiheitsgraden aufweisen. Dies verhindert Störkräfte durch erhöhte Reibung und Kraftschwankungen durch Achsversatz. Ein Drehmomentsensor und ein Inkrementalgeber erfassen die Daten.

Drehmomentbereich:	0 ... 500 mNm
Genauigkeit:	± 1 mNm im Bereich von 0 ... 50 mNm
	± 2 mNm im Bereich von 50 ... 100 mNm
	± 5 mNm im Bereich von 100 ... 500 mNm
Drehwinkelbereich:	0 ... 360°
Vorschubgeschwindigkeit:	stufenlos einstellbar von 1 ... 90°/s
kleinste Schrittweite:	0,5° (Genauigkeit 10% bei 0,5°)
	Abschaltung bei einstellbarer Drehmoment- und Winkelschwelle

C Haptik-Simulatoren für Drehsteller und Drucktaster

Die Haptik-Simulatoren für Drehsteller und Drucktaster sollen eine variable Krafrückmeldung dieser Bedienelemente ermöglichen. Es wird dazu nur ein Freiheitsgrad, eben translatorisch oder rotatorisch, wiedergegeben. Es besteht die Möglichkeit das System sowohl als Kraft- als auch Positionsreflektierendes aktives Stellteil auszulegen, wie es nach Gillet (1998) in Abbildung 3 dargestellt ist. So spiegelt ein kraftreflektierendes Stellteil dem Bediener die aktuell wirkende Kraft am Manipulator dem Bediener wider, während ein positionsreflektierendes Stellteil dem Bediener die aktuelle Position des Manipulators ‚reflektiert‘.

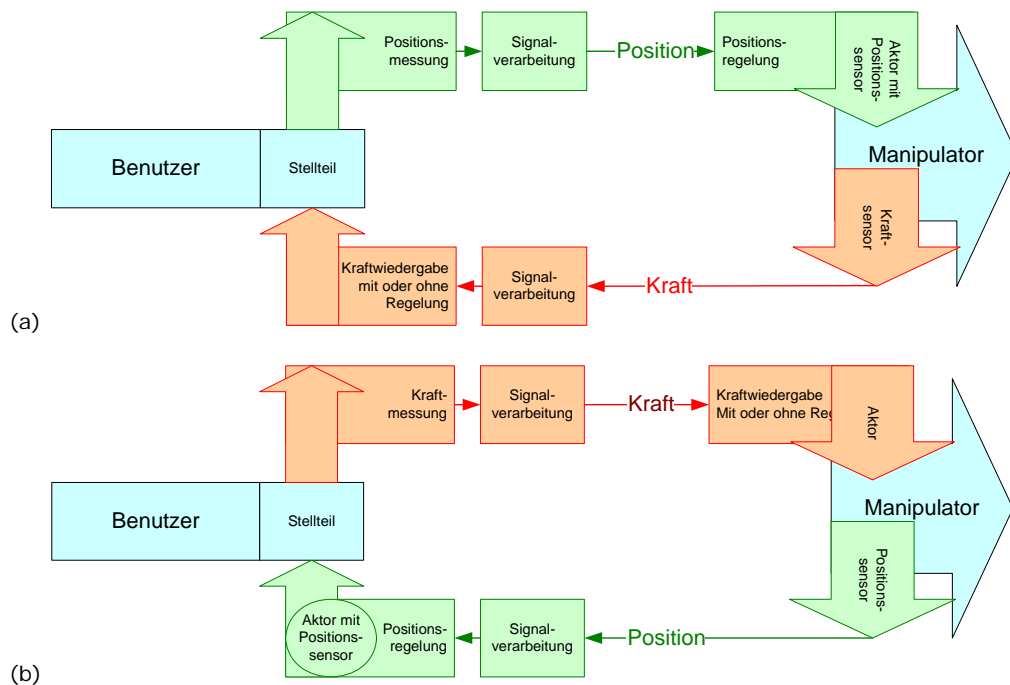


Abbildung 3: Funktionsprinzip von aktiven Stellteilen bei Teleoperationssystem zur Steuerung von Maschinen (nach Gillet1998): (a) Kraftreflektierendes Stellteil; (b) Positionsreflektierendes Stellteil.

Zur Simulation des haptischen Verhaltens von Bedienelementen könnte nun dieser Manipulator ein reelles Bedienelement betätigen und das Verhalten dessen, dem Benutzer zurückmelden. Das Ziel ist jedoch nicht der Entwurf eines geeigneten Teleoperationssystems, das ein reales Bedienelement über eine virtuelle Schnittstelle wieder in die Realität abbildet, sondern ein System, das die Unabhängigkeit von mechanischen Prototypen ermöglicht. Zu diesem Zweck wird die elektromechanische Einheit durch eine softwareseitige, virtuelle Charakteristik $F(x)$ oder $x(F)$ ersetzt. Da reelle Bedienelemente typischerweise durch Kraft-Weg-Diagramme der Form $F(x)$

dargestellt werden, aber auch die Darstellung von $x(F)$ mehrfache Lösungen hat, wird ein kraftreflektierendes Prinzip eingesetzt, wie es in Abbildung 4 skizziert ist.

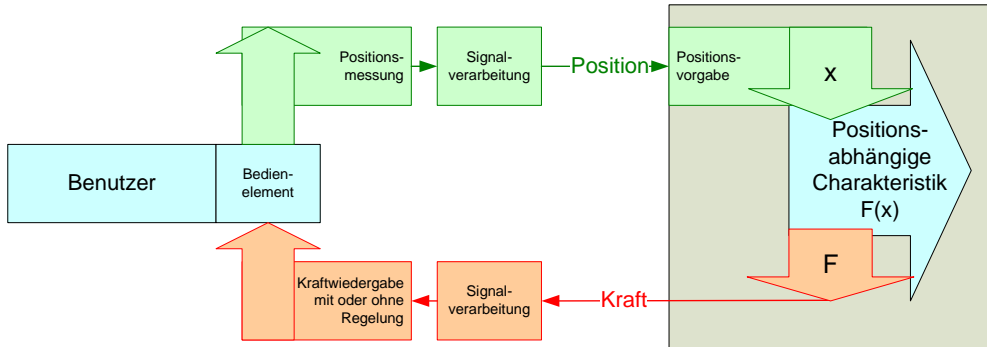


Abbildung 4: Kraftreflektierendes Stellteil zur Simulation von Bedienelementen. Der Manipulator wird durch eine softwareseitige Charakteristik $F(x)$ ersetzt und bildet damit eine eindeutige positionsabhängige Charakteristik ab.

Das System ist in Abbildung 5 dargestellt. Es kommt im Gegensatz zu den von Badescu (2002) und Doerrer (2003) aufgebauten Systemen ein Kraft-Regelkreis zum Einsatz, um eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen und Nichtlinearitäten zu erreichen.

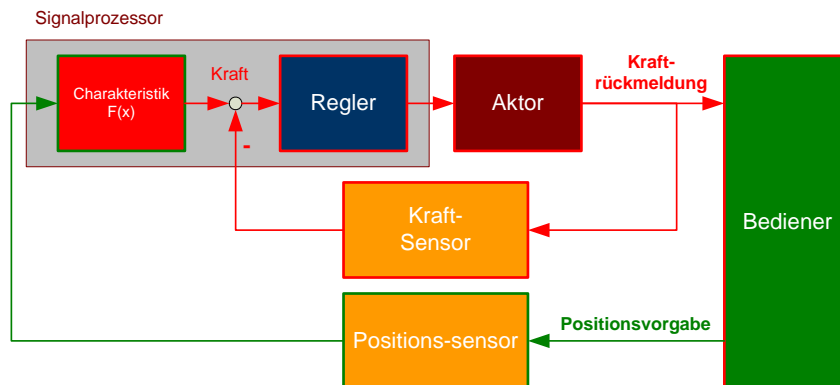


Abbildung 5: Aufbau der haptischen Simulatoren.

Das Prinzip ist wie folgt: Der Bediener gibt eine Position vor, die vom Signalprozessor über den Positionssensor eingelesen wird. Anhand dieser Position und der vorgegebenen Charakteristik $F(x)$ wird die Sollkraft ermittelt. Der Regelalgorithmus regelt die Istkraft als Krafterückmeldung für den Bediener ein.

C.1 Simulator-Elektronik

Als Kern beider Systeme, sowohl für translatorische, als auch rotatorische Simulation, wird ein digitaler Signalprozessor (DSP) mit einem Prozessortakt von 150 MHz, eingesetzt.

Die Ansteuerung der Aktoren erfolgt pulsweitenmoduliert (PWM) mit einer Auflösung von 3000 PWM-Abstufungen. Die Auflösung der Analog-Digital-Wandler beträgt 12 Bit. Die Messung wird jeweils bei der Initialisierung abgeglichen. Hardwareinformationen zu spezifischen rotatorischen oder translatorischen Komponenten sind in den jeweiligen folgenden Kapiteln 0 und C.3 sowie weiter gehende Details zum Aufbau der Simulatoren bei Scholz (2004) und Rudel (2005) nachzulesen.

Mit einer Regelfrequenz von 30 kHz erfüllt das System die bei Burdea (1996) und Hayward und Astley (1996) empfohlenen Anforderungen von über 10 kHz und überdies ist eine gute Abbildung hochfrequenter zeitabhängiger Signale $F(t)$ möglich.

In den Simulator können zeitgleich 16 verschiedene Kennlinien gespeichert werden, die, mit Wahlschaltern oder rechnergesteuert, spontan umgeschaltet werden können. Abbildung 6 zeigt das Elektronickrack des Haptik-Simulators.



ABBILDUNG 6: ELEKTRONIK DES HAPTİK-SIMULATORS

C.2 Haptik-Simulator für rotatorische Bedienelemente

Die Position des Drehknopfes beim rotatorischen Simulator wird über einen Inkrementalsensor ermittelt und kann direkt ohne zusätzlichen softwareseitigen Aufwand über zwei Quadraturencodereingänge auf dem DSP eingelesen werden. Es werden 30000 Inkremente je Umdrehung erreicht ($0,012^\circ/\text{Inkrement}$). Dies entspricht einer tangentialen Schrittweite von weniger als $4\ \mu\text{m}$ je Inkrement bei 35,5 mm Durchmesser der Kappe. Das entsprechende DSP-

Register ist auf diese Größe beschränkt, so dass der Drehwinkel und die Registerwerte immer synchron laufen. Als Kappe wird eine im Audi A8 MMI eingesetzte Aluminiumdruckgusskappe mit einem Durchmesser von 35,5 mm und einer partiellen Kreuzrändelung verwendet. Die Kappe hat eine nahezu zylindrische Grundform und ist gut im Zwei- oder Dreifingergriff greifbar (Bullinger, 1994; Rühmann, 1993). Überdies besitzt sie eine als gut zu bewertende qualitative Anmutung, was eine positive Grundhaltung der Versuchspersonen unterstützt.

Zur Messung des Drehmomentes kommt ein Drehmomentsensor mit $\pm 0,2$ Nm mit einem geringen Massenträgheitsmoment zum Einsatz. Der Aktor ist ein eisenloser Gleichstrommotor und wird mit einer Versorgungsspannung von 12 V betrieben.

Der Simulator hat keine Drehwinkelbeschränkung. Es wird im Normalfall ein Detent in einem Array abgebildet. Dieser einzelne Detent wird auf den gesamten Drehwinkelbereich wiederholt abgebildet, so dass sich eine durchgängige Rastung ergibt. Abbildung 7 zeigt den Simulator für rotatorische Bedienelemente ohne zugehörige Elektronik.

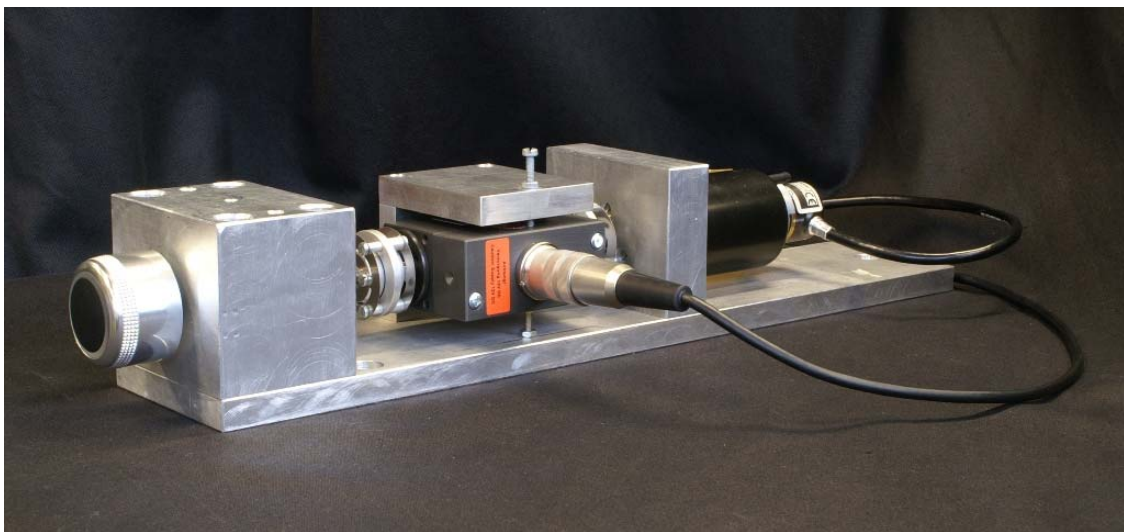


Abbildung 7: Haptik-Simulator für rotatorische Bedienelemente (Darstellung ohne Ansteuerungselektronik).

C.3 Haptik-Simulator für translatorische Bedienelemente

Die Position der Kappe beim translatorischen Simulator wird über einen Inkrementalmesstaster mit $1 \mu\text{m}/\text{Inkrement}$ ermittelt. Da hier ein beschränkter Arbeitsbereich vorliegt und der gesamte Bewegungsbereich mit Werten abgedeckt werden soll, wird die Positionsauswertung zur Reduktion des Speicherplatzes auf $4 \mu\text{m}$ Schrittweite reduziert. Damit entspricht die Schrittweite in etwa dem des rotatorischen Simulators (Kap. 0).

Das System hat drei Arbeitsbereiche wie in Abbildung 8 dargestellt:

- (1) Einen vorderen Anschlag, der den durch die Kennlinie nicht definierten Bereich einstellt und eine stabile Ruhelage des Simulators gewährleistet.
- (2) Die Kennlinie $F(x)$, welche den eigentlichen Untersuchungsgegenstand darstellt.
- (3) Einen mechanischen Endanschlag, der einen echten, harten Endanschlag ohne die Möglichkeit des ‚Überdrückens‘ gewährleistet. Zu Beginn der Simulation muss dessen Position exakt abgeglichen werden, um eine Instabilität der Kraft-Regelung in Arbeitsbereich (2) durch den Kontakt mit dem mechanischen Anschlag zu vermeiden.

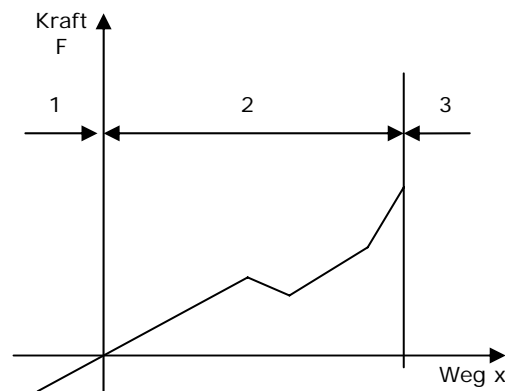


Abbildung 8: Arbeitsbereiche des Simulators:

(1) Vorderer Anschlag; (2) Kennlinie; (3) Hinterer Anschlag (mechanisch).

Zur Kraftmessung wird mit einer Kraft-Messdose mit einem Messbereich ± 10 N, verwendet. Die theoretische Kraft-Auflösung bei 12 Bit ist $< 0,5$ mN.

Als Aktor kommt ein modifiziertes Tauchspulensystem der Firma Ehmann&Partner zum Einsatz. Abbildung 9 zeigt den Aktor. Das System besitzt keine akustische Membrane, dafür wird über zwei weit auseinander liegende Zentriermembranen eine steife und verdrehsichere Führung erreicht. Ein Verkleben der Stahlkugeln einer Kugel-Linearführung im Magnetkreis, wie sie bei Doerrer (2003) zu erwarten wäre, ist hier auszuschließen.

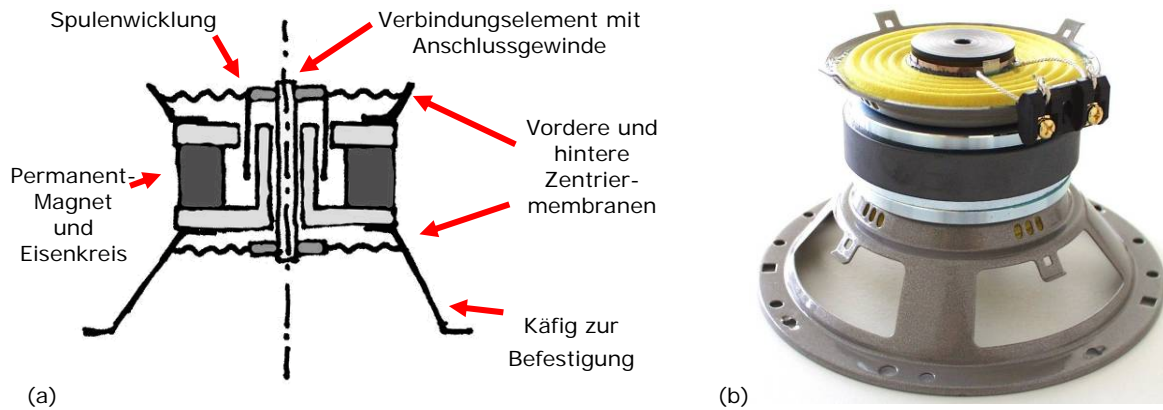


Abbildung 9: Modifizierter Aktor der Firma Ehmann&Partner: (a) Aufbauschema; (b) fertiger Aktor

Das System zeigt lineares Verhalten bei PWM-Ansteuerung in einem Kraftbereich von ± 12 N an konstanter Position. Darüber hinaus ergibt sich bis zu einer maximalen Kraft von ± 20 N durch Sättigungseffekte ein nichtlineares Verhalten, das jedoch durch die Kraftregelung weitgehend kompensiert werden kann. Die Federwirkung der Membranen wird durch entsprechende Positionierung des Tasters unterstützend für eine maximal mögliche Kraftwirkung eingesetzt, so dass im endanschlagnahen Bereich, die auch dort benötigten höheren Kräfte erzeugt werden können. Der Aktor wird mit 18 V PWM Versorgungsspannung betrieben. Das aufgebaute System ist in Abbildung 10 dargestellt.

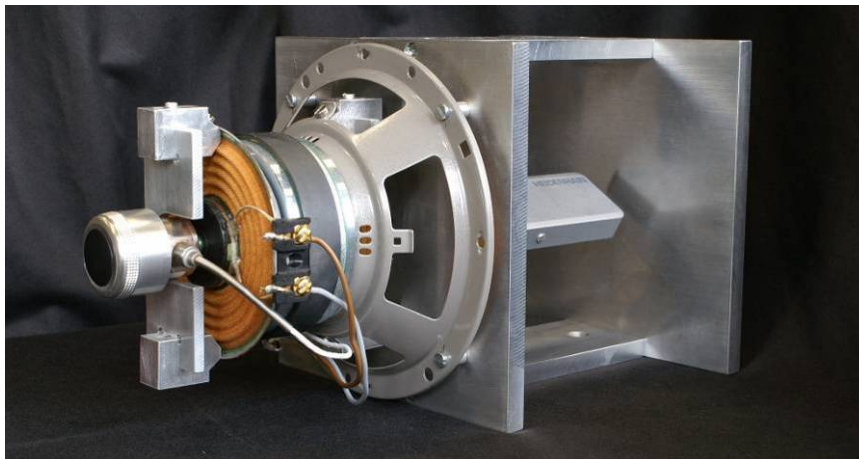


Abbildung 10: Fertig aufgebauter translatorischer Simulator ohne Steuerelektronik.

D Versuchsumgebung

Die im Folgenden beschriebene Versuchsumgebung ist aufgrund der Themenstellung am Kraftfahrzeug orientiert. Dabei wird jedoch die Nachahmung dessen auf haltungsbasierte grundlegende Elemente reduziert. Als zentrale Komponente kommt hierfür jeweils ein Pkw-Sitz zum Einsatz, der durch eine Fußstütze die Haltung eines Fahrers bewirken soll.

Die Steuerung des Versuchsablaufes erfolgt automatisiert, so dass der Versuchsleiter den Ablauf lediglich überwacht und sich auf den Probanden konzentrieren kann.

D.1 Sitzbox

Für Versuchsreihen mit Versuchspersonen (VPn) zur Untersuchung des haptischen Feedbacks an einem Simulator kommt eine Sitzbox zum Einsatz. Sie verfügt über die Möglichkeit Simulatoren in der Mittelkonsole sowohl senkrecht von oben bedienbar, also auch waagrecht frontal bedienbar zu integrieren (Abbildung 11). Es können sowohl rotatorische, als auch translatorische Simulatoren integriert werden.

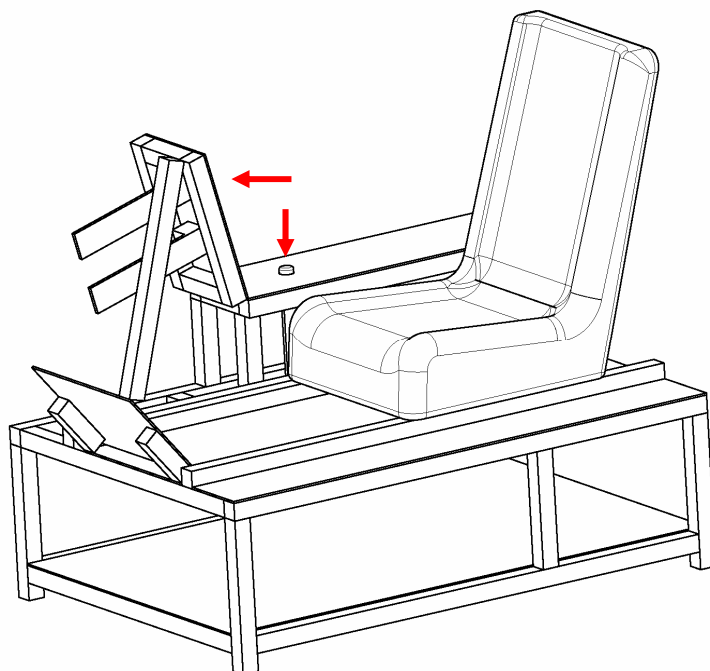


Abbildung 11: Sitzbox 1. Integration senkrechter von oben bedienbarer, aber auch waagerechter, von vorn bedienbarer Bedienelemente.

Der Aufbau der Sitzbox erfolgt mit Aluminiumprofilschienen sowie Aluminium-Tränenblech als Trittpläche. Die Verkleidung der Mittelkonsole besteht aus Kunststoffplatten und ist mit Kunstleder überzogen.

Zur Ermittlung der günstigsten Positionierung des Sitzes in der Sitzbox wurden anthropometrischer Maßtabellen (DIN 33402) und Komfortwinkel (SAE) hinzugezogen. Damit soll eine möglichst optimale Einstellbarkeit für alle Versuchspersonen erreicht werden. Eine Aufsummierung der Körpermaße Länge Ober- und Unterschenkel sowie die Verwendung von Komfortwinkeln (Abbildung 12) wird als Richtwert herangezogen. Aufgrund einfacher Gegebenheiten des Aufbaus, wie etwa fehlende Pedalerie und Lenkung, vor allem aber aufgrund der reinen Ausrichtung der Probanden auf die zu bewertenden Bedienelemente, wird darauf zurückgegriffen.

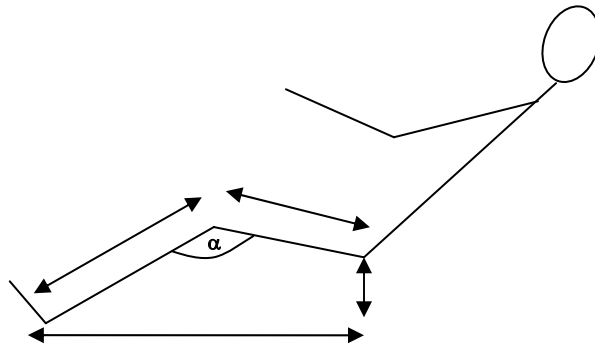


Abbildung 12: Positionierung des Sitzes. Hinzugezogen werden anthropometrische Maßtabellen von Ober- und Unterschenkel sowie SAE-Komfortwinkel α .

Aufgrund des weiten Verstellbereiches des Sitzes in horizontaler und vertikaler Richtung ist es möglich, über die Anforderungen von 5. Perzentil Frau und 95. Perzentil Mann von 863 mm bis 1078 mm Abstand von Hüftpunkt bis Fuß zu kommen. Es wird einen Verstellbereich von 816 mm bis 1126 mm, also insgesamt über 310 mm erreicht.

Die Positionierung des Bedienelementes wurde am Audi A8 orientiert und bezüglich einer mittleren Sitzposition ausgerichtet. Dabei werden ein Abstand des Bedienelementes von 410 mm zur Sitzmitte sowie ein Abstand von 787,5 mm zur Mitte der Fußstütze als Fixpunkt gewählt. Die Höhe der Mittelkonsole beträgt 265 mm über der Bodenplatte.

Die waagerechte Anordnung wird mit einem Abstand der senkrechten Trägerplatte von 593 mm zur Fußstütze und einer Höhe von 460 mm zur Bodenplatte (195 mm zur Mittelkonsole) gewählt. Abbildung 13 zeigt Details der Anordnung.

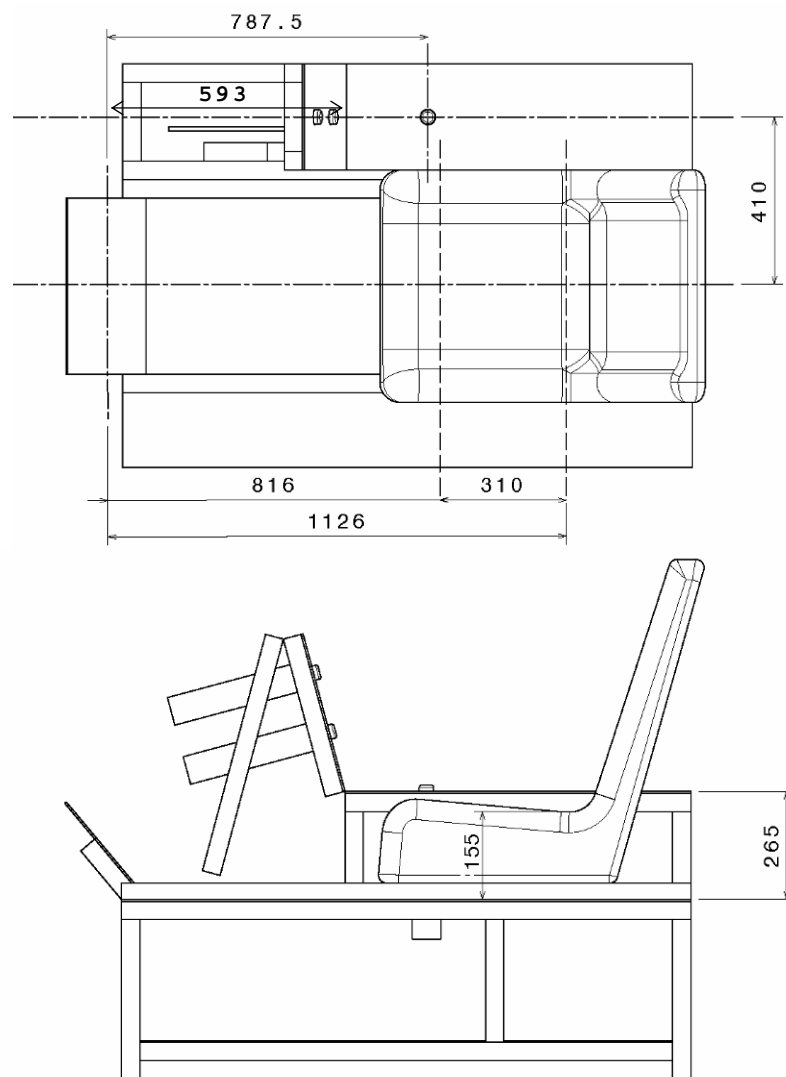


Abbildung 13: Position der Bedienelemente

Die Sitzbox verfügt über ein Eingabepaneel mit 8 Tastern das vor den VPn im Bereich eines Lenkrades, gut sicht- und erreichbar angebracht ist. Abbildung 14 zeigt das Paneel mit zugehörigen Tastennummerierungen: 1 = gleich/ ja (grün); 2 = verschieden/ Nein (rot); 3-8 = Tasten für Haptik-Grafik-Zuordnung (blau), jeweils neben Feldern welche mittels am Paneel einhängbaren Karten mit Grafiken oder Beschriftungen versehen werden können.

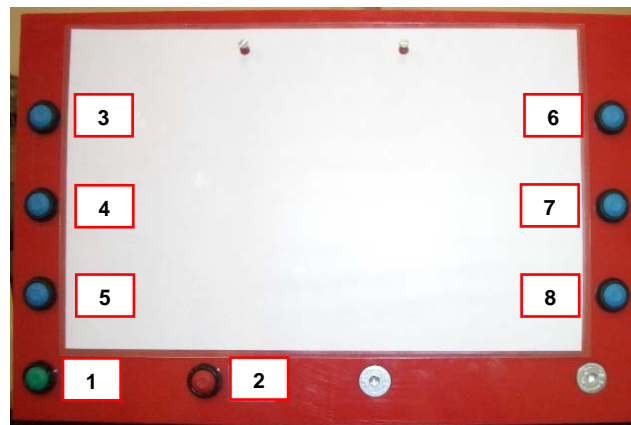


Abbildung 14: Eingabepaneel an Sitzbox 1

D.2 Ablaufsteuerung der Versuchskonfiguration

Für die Durchführung von Versuchsreihen ist es praktikabel, einen festen Ablauf des Versuchs zu haben. Dies verringert systematische Schwankungen.

Der Versuchsleiter (VL) kann sich besser auf die Betreuung der Probanden (VPn) konzentrieren. Durch die hauptsächlich monotone Tätigkeit während des Versuchs unterliegt der Versuchsleiter einer geringeren Fehlergefahr. Zudem ist davon auszugehen, dass Versuchsleiterartefakte verringert werden, da der Versuchsleiter nicht auf die Daten und die Ergebnisse achten, sondern lediglich den Ablauf verfolgen muss oder kann, um den Versuch zu steuern.

Für alle Versuche wird dieselbe Software eingesetzt. Einzige Unterscheidung der Ablaufsteuerung ist die Hardwareumgebung von Versuchen mit einem oder zwei Simulatoren. Diese hat Eingriffe in die Software, z. B. durch die Einbindung von Ethernet oder anderer Daten-Ein- und Ausgabe-Hardware (DIO), erfordert.

D.2.1 Struktur

Das Gesamtsystem wird mit einer LabView-Oberfläche bedient. Diese Oberfläche stellt die Benutzerschnittstelle für den Versuchsleiter dar. Sie kontrolliert weitere Software auf dem Rechner, wie das TI Code-Composer-Studio (CCS), welches den Signalprozessor des Simulators steuert und Excel. Der gesamte Versuchsablauf wird in einer Excel-Vorlage programmiert. In dieser Vorlage sind die Namen der auf den Signalprozessor zu ladenden Kennlinien sowie deren Abfolge, Informationen oder Instruktionen für den Versuchsleiter und Kommandos für LabView, wie Versuchs-Pausen mit oder ohne Versuchsleiter-Bestätigung und der Upload von Kennliniensätzen (16 Kennlinien), hinterlegt.

Diese Vorlage wird geladen und dient neben der Steuerung auch der Dokumentation des Versuches. In ihr werden, neben den Daten der Probanden auch dessen Antworten über das Eingabepaneel mit der entsprechenden Uhrzeit gespeichert. Die Vorlage selbst (*.xlt) wird dabei jedoch nicht überschrieben.

Es wird eine Excel-Datei (*.xls) mit Namen der VPn und dem Versuchsdatum generiert. Zudem wird die aktuelle Versuchsnummer im Namen eingebunden. Dies hat den Zweck, eventuelle Systemabstürze abzufangen und einen Verlust der Versuchsdaten zu vermeiden, indem jeweils die aktuellste Versuchsdatendatei mit aktueller Nummer gespeichert und erst anschließend die vorhergehende Datei mit der vorangehenden Nummer gelöscht wird. Somit lässt sich außerdem auch anhand des Dateinamens erkennen, ob verschiedene Datensätze konsistent und bis zum Ende des Versuchs durchgeführt worden sind.

Die Interaktions-Struktur des gesamten Systems, d. h. wie die Softwarepakete untereinander zusammenhängen und wie die Akteure (VPn und VL) auf das System einwirken können, ist in Abbildung 15 dargestellt.

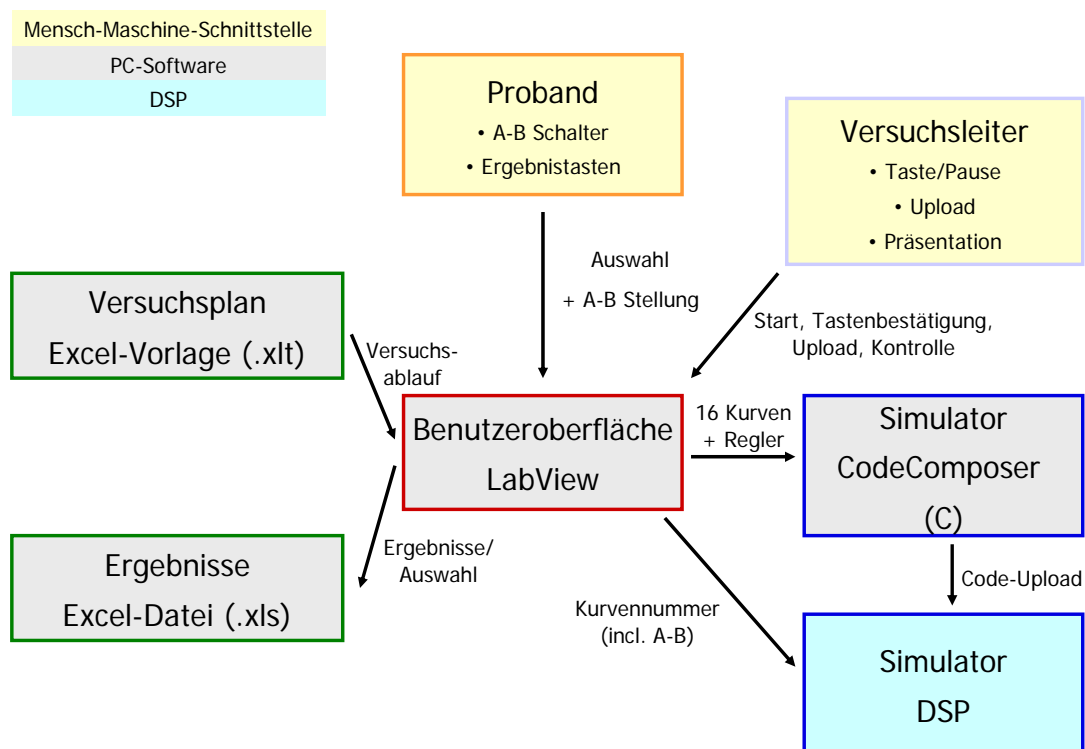


Abbildung 15: Interaktions-Struktur der Versuchsumgebung

Der Ablauf ist wie folgt: Der Versuchsplan wird geladen und als Ergebnisdatei gespeichert. Der Simulator wird über CCS gestartet. Eine Ampel informiert den Probanden über den Status des Versuchs: Rot bedeutet der Versuch ist gestoppt und die Bedienelemente sollten nicht berührt

werden; Grün bedeutet, der Versuch ist gestartet und nicht pausiert. Nach dem Start wird das erste Kennlinienpaar am Simulator angelegt, von welchem durch den Probanden mit einem Umschalter (A-B-Schalter) einer der beiden ausgewählt werden kann. Der Proband bearbeitet die gestellte Aufgabe, kann dabei beliebig oft zwischen den beiden Kennlinien umschalten und schließlich seine Antwort am Eingabepaneel mit den Ergebnistasten eingeben. Das Ergebnis wird in einer neuen Excel-Datei gespeichert. Die Ampel geht auf rot, ein neues Kennlinienpaar wird eingestellt, ggf. programmierte Pausen gemacht und anschließend die Ampel wieder auf grün geschaltet. Die nächste Bewertung kann durchgeführt werden.

D.2.2 Versuchsaufbau mit einem Simulator

Durch Versuchsreihen an nur einem Simulator sind sämtliche Parameter als konstant zu betrachten. Die zu vergleichenden Charakteristika sind maximal identisch und variieren ausschließlich in den gewünschten Parametern. Die Kennlinien werden am Simulator mit einem Umschalter (A-B) gewechselt.

Das System (vgl. Kap. D.2.1) besteht aus dem Steuerrechner mit DIO-Hardware und dem entsprechenden Simulator (Kap. A). Es ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt. Die Softwarepakete unterscheiden sich dabei zwischen translatorischen und rotatorischen Systemen nur auf Ebene der Simulatorssoftware (CCS). Benutzeroberfläche ist für alle Versuche gleich.

Vorbereitet werden der Ablaufplan nach Kapitel D.2.3 sowie die entsprechend benötigten Kennlinien. Der Ablauf erfolgt wie in Kapitel D.2.1 beschrieben. Die Simulatorssoftware wird über den Parallelport mit dem CCS übertragen. Die Auswahl der anzulegenden Kennlinie erfolgt mittels DIO-Schnittstelle. Sie erzeugt 4 Bit, welche die 16 Kennlinien für den DSP kodieren. Die Eingabe der Auswahl der VPn erfolgt über das jeweils angeschlossene Paneel, welches über die DIO-Schnittstelle eingelesen wird.

D.2.3 Versuchsplanung

Die Versuchsplanung erfolgt in einer Excel-Vorlage. Sie enthält mindestens drei Tabellenblätter. Das erste Tabellenblatt enthält persönliche Daten der Versuchsperson, u. a. die Eintragungen eines Fragebogens. Im zweiten Tabellenblatt sind der eigentliche Versuchsablauf und später die Antworten der VPn enthalten, während in den folgenden Tabellenblättern die Kennliniensätze hinterlegt sind. Die Programmierung des Versuchsablaufes ermöglicht Pausen und Tastenbestätigungen sowie den Upload von Datensätzen.

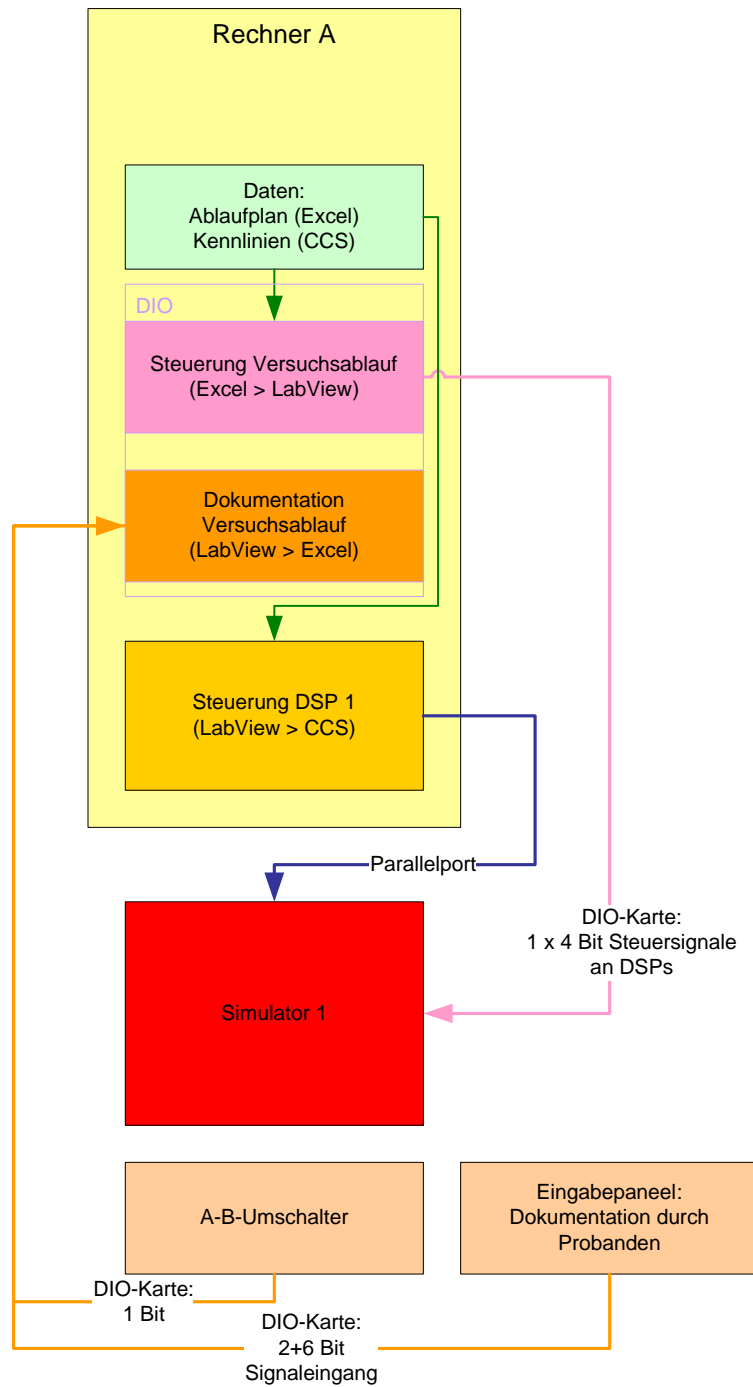


Abbildung 16: Prinzipskizze der Einbindung des Simulators im Versuch mit Steuerung und Datenerfassung

E Pilotversuch: Vergleichbarkeit Haptik-Grafik bei rotatorischen Bedienelementen

E.1 Verwendetes Bedienelement

Der zu bewertende Versuchsgegenstand, ein MMI-Modul des Audi A8 ist in Abbildung 17 zu sehen.



Abbildung 17: Versuchsgegenstand.

E.2 Fragebogen zum Pilotversuch

Der Fragebogen zum Versuch besteht aus drei Seiten: 1. Persönliche Angaben, 2. Aufgabe Teil 1: Eigene grafische Wiedergabe der haptischen Empfindung und 3. Aufgabe Teil 2: Zuordnung einer haptischen Darstellung zu einer aus acht Grafiken. Die zweite Aufgabe, Teil 3 des Fragebogens, wird erst nach Beendigung der ersten Aufgabe (Fragebogen Teil 2) an die VPn ausgehändigt, um eine Prägung durch die vorgegebenen Kennlinien in Teil 3 zu vermeiden.

Fragebogen

Zur Durchführung der Versuche benötigen wir noch einige Angaben von Ihnen.

1. Geschlecht: männlich weiblich
2. Händigkeit: Linkshänder Rechtshänder
3. Alter: _____
4. In welchem Beruf sind sie tätig? _____
- 4a. Welche Arten von ‚Hand‘ - Arbeiten führen sie dort aus? _____

6. Schätzen Sie sich selbst als ‚technisch versiert‘ ein? Ja Nein
5. Welche Hobbys/Sportarten üben Sie aus? _____

6. Haben/Hatten Sie bereits Kontakt mit haptischem Design? Ja Nein
- 6a. Wenn Ja, in welcher Form? _____
7. Benutzen Sie ein Kraftfahrzeug? Ja Nein
- 7a. Wenn Ja, Marke und Modell: _____
8. Spielen Sie ein Musikinstrument? Ja Nein
- 8a. Wenn Ja, welches? _____
9. Nationalität: _____

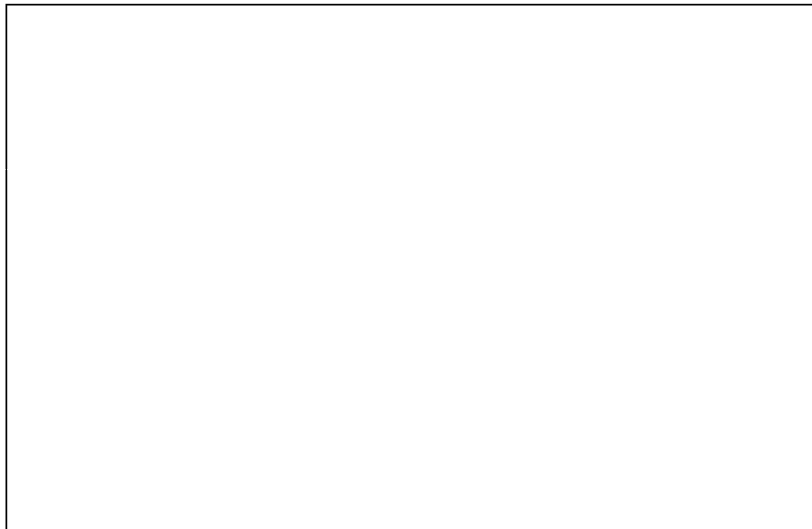
Abbildung 18: Fragebogen zu persönlichen Angaben.

Darstellung einer haptischen Kennlinie

Wie würden Sie die haptische Charakteristik des Bedienelements darstellen?

Wie fühlt es sich an?

Versuchen Sie dies im Kasten unten grafisch darzustellen:



- Bitte auch Ruhelagen (Rastpunkte) des Bedienelements einzeichnen.
- Bitte mehr als einen Schritt (Detent) einzeichnen.

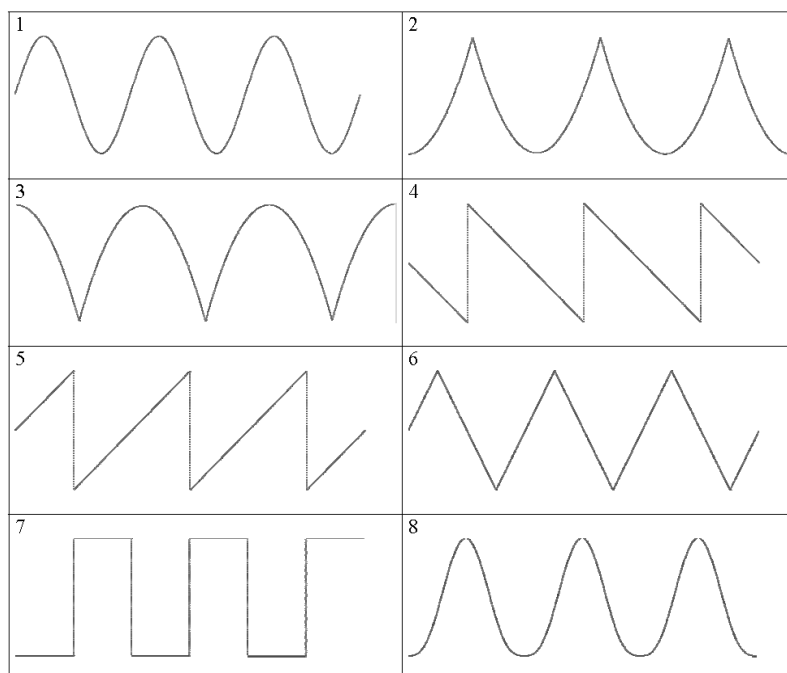
Abbildung 19: Aufgabe Teil 1: Eigene grafische Wiedergabe der haptischen Empfindung

Zuordnung zur Kennlinie
Ordnen Sie Ihren haptischen Eindruck zu.

1. Welche der Kennlinien unten entspricht am ehesten Ihrem Gefühl am Bedienelement?

Nr. ___

2. Wo befinden sich Ihrer Meinung nach die Ruhelagen (Rastpunkte)?



- Zeichnen Sie bitte wiederum die Ruhelagen (Rastpunkte) in die gewählte Kennlinie ein.

Abbildung 20: Aufgabe Teil 2: Zuordnung einer haptischen Darstellung zu einer aus acht Grafiken.

E.3 Ergebnis Pilotversuch

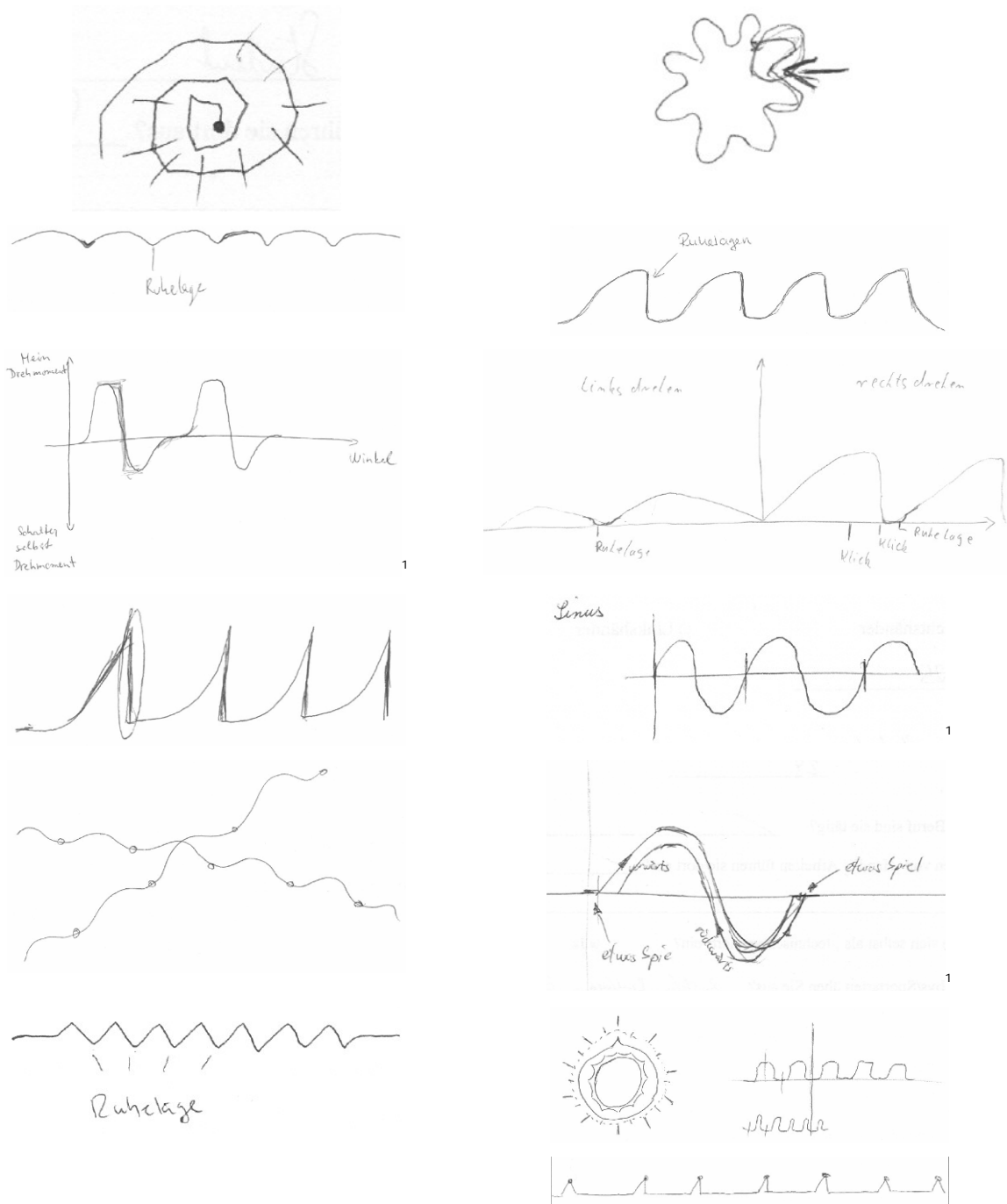


Abbildung 21: Grafische Darstellung der haptischen Charakteristik.
¹ VPn mit haptischer Vorbildung

Vorversuch grafische Darstellung

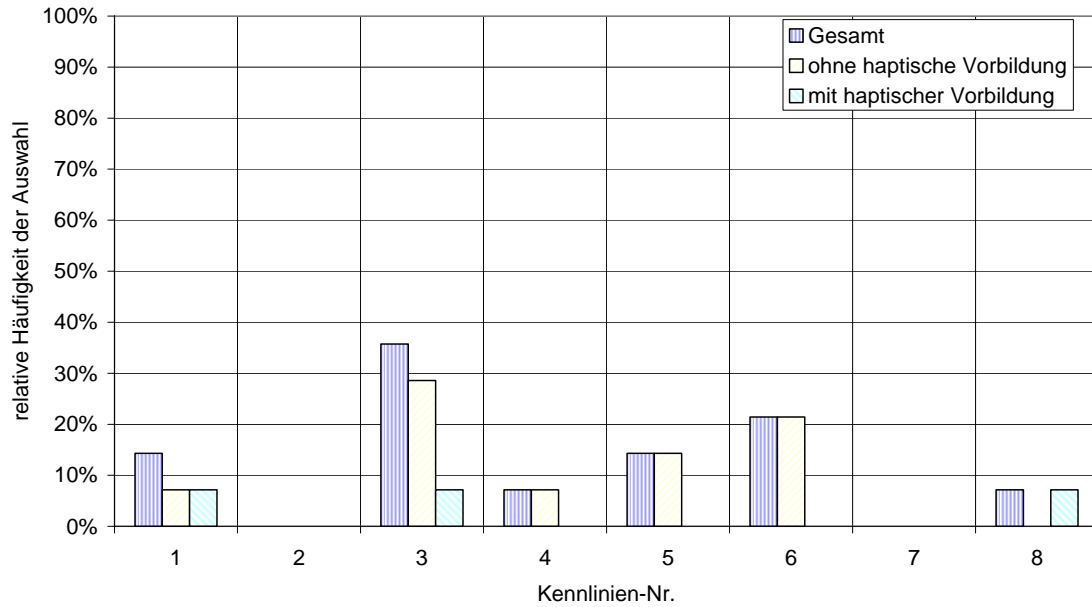


Abbildung 22: Häufigkeiten der gewählten Kennlinien. Nr. 3 kommt der Integralkennlinie des Bedienelementes sehr nahe, Nr. 4 der entsprechenden Drehmoment-Drehwinkeldarstellung. Vgl. hierzu Abbildung 20.

Vermutung Ruhelage

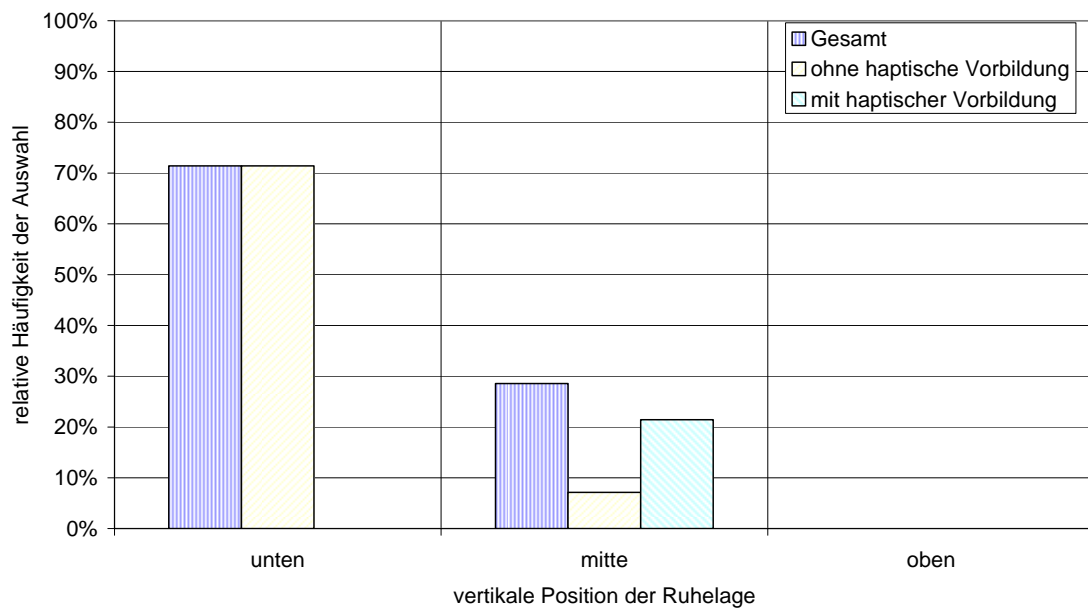


Abbildung 23: Häufigkeiten der gewählten Ruhelagen. Eine klare Tendenz zur Position unten ist erkennbar.

E.4 Signifikanztest auf Gleichverteilung

Tabelle 1: Ergebnis des Signifikanztests für die Zuordnung der Grafiken zu einer haptischen Kennlinie. Drei getrennte Auswertungen: (1) die alle VPn (gesamt), (2) nur VPn ohne haptische Vorprägung (ohne_HV).

	gesamt	ohne_HV
Chi-Quadrat(a,b,c)	11,143	11,545
df	7	7
Asymptotische Signifikanz	,133	,117
Exakte Signifikanz	,146	,135
Punkt-Wahrscheinlichkeit	,051	,059

a Bei 8 Zellen (100,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet. Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 1,8.

b Bei 8 Zellen (100,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet. Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 1,4.

Tabelle 2: Ergebnis des Signifikanztests für die Zuordnung der Position der Ruhelage zu einer haptischen Kennlinie in einem Graphen; zwei getrennte Auswertungen:

(1) die alle VPn (gesamt), (2) nur VPn ohne haptische Vorprägung (ohne_HV).

	gesamt	ohne_HV
Chi-Quadrat(a,b,c)	10,857	16,545
df	2	2
Asymptotische Signifikanz	,004	,000
Exakte Signifikanz	,003	,000
Punkt-Wahrscheinlichkeit	,001	,000

a Bei 3 Zellen (100,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet. Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 4,7.

b Bei 3 Zellen (100,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet. Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 3,7.

F Versuch: Untersuchung der Darstellungsart für rotatorische Bedienelemente

F.1 Versuchspersonenkollektiv

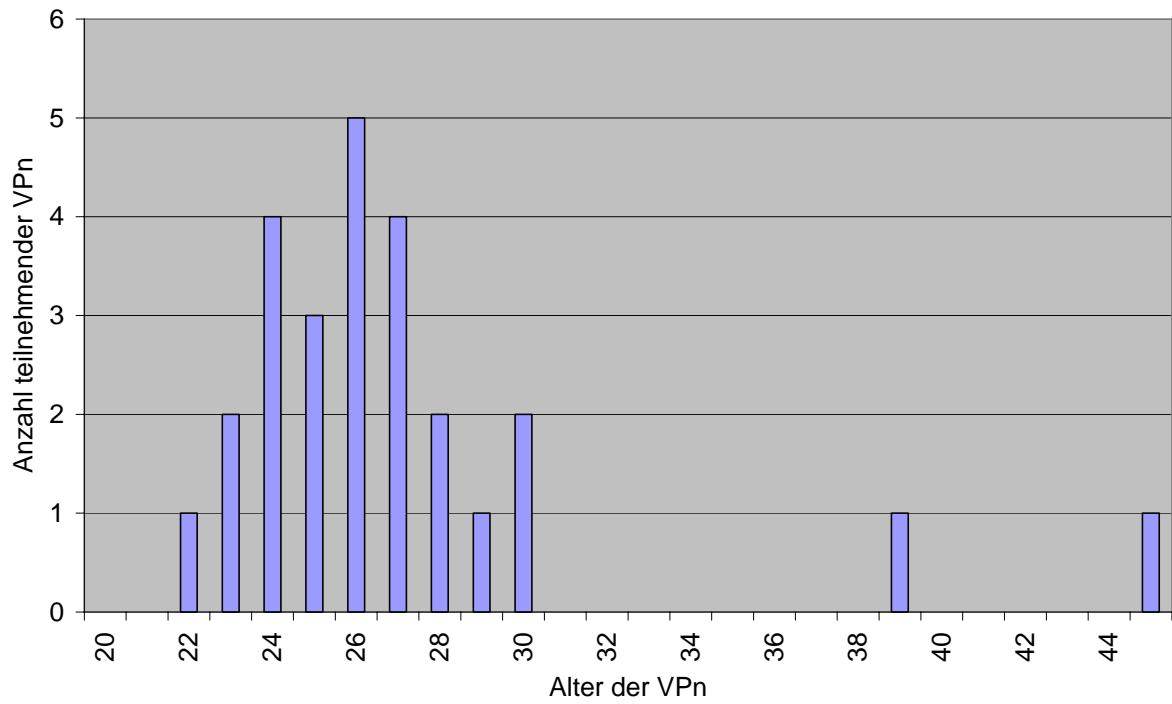


Abbildung 24: Altersverteilung der Versuchspersonen

F.2 Persönlicher Fragebogen

Neben Fragen zu Herkunft, Geschlecht, Alter und Händigkeit werden Fragen zu Aktivitäten im täglichen Leben gestellt. Überdies werden auch haptische Vorprägungen abgefragt.

Ergeben sich Unstimmigkeiten, so können diese Daten zur Klärung eventueller Zusammenhänge hinzugezogen werden.

Fragebogen (persönliche Daten)

Zur Durchführung und Auswertung der Versuche benötigen wir einige persönliche Daten von Ihnen.

Ihre Daten werden nur für Auswertungszwecke benutzt und wie im Datenschutzgesetz vorgeschrieben, nicht an dritte Personen weitergegeben.

1. Geschlecht: männlich weiblich
2. Händigkeit: Linkshänder Rechtshänder
3. Alter: _____
4. Nationalität: _____
5. In welchem Beruf sind sie tätig? _____
6. Welche Arten von ‚Hand‘ - Arbeiten führen sie dort aus? _____

7. Schätzen Sie sich selbst als ‚technisch versiert‘ ein? Ja Nein
8. Welche Hobbys/Sportarten üben Sie aus? _____

9. Haben/Hatten Sie bereits Kontakt mit haptischem Design? Ja Nein
10. Wenn Ja, in welcher Form? _____
11. Benutzen Sie ein Kraftfahrzeug? Ja Nein
12. Wenn Ja, Marke und Modell: _____
13. Spielen Sie ein Musikinstrument? Ja Nein
14. Wenn Ja, welches? _____

Abbildung 25: Persönlicher Fragebogen

F.3 Versuchsabfolge haptischer Paarvergleich

F.3.1 Paarvergleich Abfolge: Abschnitt 1

Nr.	Objekt A	Objekt B	Relative Differenz
1	Sinus 20 mNm	Sägezahn flach 20 mNm	0%
2	Sägezahn flach 20 mNm	Sägezahn steil 20 mNm	0%
3	Dreieck 40 mNm	Sinus 10 mNm	75%
4	Sinus 20 mNm	Trapez 30 mNm	33%
5	abg. Sinus 40 mNm	Dreieck 40 mNm	0%
6	Sinus 30 mNm	Sinus 30 mNm	0%
7	Sinus 15 mNm	Dreieck 30 mNm	50%
8	Dreieck 26 mNm	Sinus 20 mNm	23%
9	Sinus 40 mNm	Sinus 15 mNm	63%
10	Trapez 10 mNm	Sägezahn steil 40 mNm	75%
11	Sinus 20 mNm	Dreieck 20 mNm	0%
12	Dreieck 38 mNm	Sinus 30 mNm	21%
13	Dreieck 20 mNm	Sägezahn flach 40 mNm	50%
14	Trapez 30 mNm	Dreieck 10 mNm	67%
15	Sinus 40 mNm	Trapez 15 mNm	63%
16	Sinus 30 mNm	Dreieck 30 mNm	0%
17	Sinus 15 mNm	Sinus 35 mNm	57%
18	Dreieck 38 mNm	Sinus 30 mNm	21%
19	Dreieck 15 mNm	Sägezahn steil 40 mNm	63%
20	Sinus 20 mNm	Dreieck 26 mNm	23%
21	Trapez 30 mNm	Dreieck 30 mNm	0%
22	Sinus 40 mNm	Sinus 30 mNm	25%
23	Sägezahn flach 30 mNm	Sägezahn steil 30 mNm	0%
24	Dreieck 20 mNm	Dreieck 26 mNm	23%
25	Sinus 20 mNm	Dreieck 20 mNm	0%
26	Dreieck 26 mNm	Sinus 20 mNm	23%
27	Trapez 35 mNm	Trapez 30 mNm	14%
28	Dreieck 38 mNm	Sinus 30 mNm	21%
Differenzenschwellen:			
29	Sinus 20 mNm	Sinus 14 mNm	30%
30	Sinus 20 mNm	Sinus 16 mNm	20%
31	Sinus 20 mNm	Sinus 18 mNm	10%
32	Sinus 20 mNm	Sinus 20 mNm	0%
33	Sinus 20 mNm	Sinus 22 mNm	9%
34	Sinus 20 mNm	Sinus 24 mNm	17%
35	Sinus 20 mNm	Sinus 26 mNm	23%
36	Sinus 20 mNm	Sinus 28 mNm	29%

37	Sinus 20 mNm	Sinus 30 mNm	33%
38	Sinus 20 mNm	Sinus 28 mNm	29%
39	Sinus 20 mNm	Sinus 26 mNm	23%
40	Sinus 20 mNm	Sinus 24 mNm	17%
41	Sinus 20 mNm	Sinus 22 mNm	9%
42	Sinus 20 mNm	Sinus 20 mNm	0%
43	Sinus 20 mNm	Sinus 18 mNm	10%
44	Sinus 20 mNm	Sinus 16 mNm	20%
45	Sinus 20 mNm	Sinus 14 mNm	30%
46	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 19 mNm	24%
47	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 21 mNm	16%
48	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 23 mNm	8%
49	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 25 mNm	0%
50	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 27 mNm	7%
51	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 29 mNm	14%
52	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 31 mNm	19%
53	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 33 mNm	24%
54	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 35 mNm	29%
55	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 33 mNm	24%
56	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 31 mNm	19%
57	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 29 mNm	14%
58	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 27 mNm	7%
59	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 25 mNm	0%
60	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 23 mNm	8%
61	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 21 mNm	16%
62	Sägezahn flach 25 mNm	Sägezahn flach 19 mNm	24%

F.3.2 Paarvergleich Abfolge: Abschnitt 2

Nr.	Objekt A	Objekt B	Relative Differenz
1	Sinus - M20	Sinus - M25	20%
2	Sinus - M20	Sinus - M33,3	40%
3	Sinus - M20	Dreieck - M44,4	55%
4	Sinus - M20	Dreieck - M36,4	45%
5	Sinus - M20	Dreieck - M33,3	40%
6	Sinus - M20	Dreieck - M30,8	35%
7	Dreieck - M28,6	Sinus - M20	30%
8	Dreieck - M23,5	Sinus - M20	15%
9	Dreieck - M22,2	Sinus - M20	10%
10	Sinus - M20	Dreieck - M21,1	5%
11	Sinus - M20	Dreieck - M20,0	0%
12	Dreieck - M21,1	Sinus - M20	5%
13	Dreieck - M22,2	Sinus - M20	10%
14	Sinus - M20	Dreieck - M23,5	15%
15	Sinus - M20	Dreieck - M25,0	20%
16	Dreieck - M26,7	Sinus - M20	25%
17	Dreieck - M28,6	Sinus - M20	30%
18	Dreieck - M30,8	Sinus - M20	35%
19	Sinus - M20	Dreieck - M36,4	45%
20	Sinus - M20	Dreieck - M33,3	40%
21	Dreieck - M40,0	Sinus - M20	50%
22	Dreieck - M44,4	Sinus - M20	55%
23	Sinus - M30,0	Dreieck - M42,9	30%
24	Sinus - M30,0	Dreieck - M40,0	25%
25	Sinus - M30,0	Dreieck - M37,5	20%
26	Sinus - M30,0	Dreieck - M35,3	15%
27	Sinus - M30,0	Dreieck - M33,3	10%
28	Sinus - M30,0	Sinus - M30,0	0%
29	Sinus - M30,0	Dreieck - M30,0	0%
30	Sinus - M30,0	Sinus - M30,0	0%
31	Sinus - M30,0	Dreieck - M33,3	10%
32	Sinus - M30,0	Dreieck - M35,3	15%
33	Sinus - M30,0	Dreieck - M37,5	20%
34	Dreieck - M40,0	Sinus - M30,0	25%
35	Dreieck - M42,9	Sinus - M30,0	30%
36	Sinus - M30,0	Dreieck - M40,0	25%
37	Sinus - M30,0	Dreieck - M50,0	40%
38	Sinus - M30,0	Sägezahn flach- M31,3	20%
39	Sägezahn flach- M25,0	Sägezahn flach- M25,0	0%

40	Sägezahn flach- M27,8	Sägezahn flach- M25,0	10%
41	Sägezahn flach- M31,3	Sägezahn flach- M25,0	20%
42	Sägezahn flach- M25,0	Sägezahn flach- M35,7	30%
43	Sägezahn flach- M25,0	Sägezahn flach- M38,5	35%
44	Sägezahn flach- M41,7	Sägezahn flach- M25,0	40%
45	Sägezahn flach- M62,5	Sägezahn flach- M25,0	60%
46	Sägezahn flach- M25,0	Sägezahn flach- M41,7	40%
47	Sägezahn flach- M25,0	Sägezahn flach- M38,5	35%
48	Sägezahn flach- M35,7	Sägezahn flach- M25,0	30%
49	Sägezahn flach- M31,3	Sägezahn flach- M25,0	20%
50	Sägezahn flach- M27,8	Sägezahn flach- M25,0	10%
51	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M25,0	0%
52	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M26,3	5%
53	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M27,8	10%
54	Sägezahn steil- M29,4	Sägezahn steil- M25,0	15%
55	Sägezahn steil- M31,3	Sägezahn steil- M25,0	20%
56	Sägezahn steil- M33,3	Sägezahn steil- M25,0	25%
57	Sägezahn steil- M38,5	Sägezahn steil- M25,0	35%
58	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M45,5	45%
59	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M62,5	60%
60	Sägezahn steil- M45,5	Sägezahn steil- M25,0	45%
61	Sägezahn steil- M38,5	Sägezahn steil- M25,0	35%
62	Sägezahn steil- M33,3	Sägezahn steil- M25,0	25%
63	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M31,3	20%
64	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M29,4	15%
65	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M27,8	10%
66	Sägezahn steil- M27,8	Sägezahn steil- M25,0	10%
67	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M25,0	0%
68	Sägezahn steil- M23,8	Sägezahn steil- M25,0	5%
69	Sägezahn steil- M22,5	Sägezahn steil- M25,0	10%
70	Sägezahn steil- M21,3	Sägezahn steil- M25,0	15%
71	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M20,0	20%
72	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M18,8	25%
73	Sägezahn steil- M17,5	Sägezahn steil- M25,0	30%
74	Sägezahn steil- M16,3	Sägezahn steil- M25,0	35%
75	Sägezahn steil- M17,5	Sägezahn steil- M25,0	30%
76	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M20,0	20%
77	Sägezahn steil- M21,3	Sägezahn steil- M25,0	15%
78	Sägezahn steil- M22,5	Sägezahn steil- M25,0	10%
79	Sägezahn steil- M25,0	Sägezahn steil- M23,8	5%

F.4 Versuchsmaterialien Vergleich Haptik – Grafik

F.4.1 Zuordnung einer Kennlinie – Grafische Darstellungen

Zuordnungskarten für die Zuordnung der haptischen Wahrnehmung des Bedienelementes zu einer aus sechs grafischen Darstellungen. Sie werden während des Versuches wie in Abbildung 14 dargestellt eingehängt.

Die einzelnen Karten sind in Abbildung 27 bis Abbildung 32 dargestellt. In diesen Darstellungen sind die Schalternummerierung (3 - 8) nach Anhang D sowie die Kennzeichnung der Drehmomentdarstellung mit dem Buchstaben M und der Integraldarstellung mit dem Buchstaben I eingefügt. Die den Probanden vorgelegten Karten haben diese Angaben nicht enthalten.

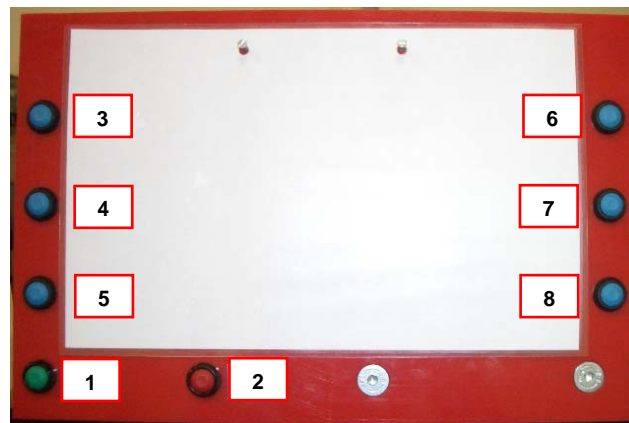


Abbildung 26: Eingabepaneel mit eingehängter Karte

Versuch 3 Block 1

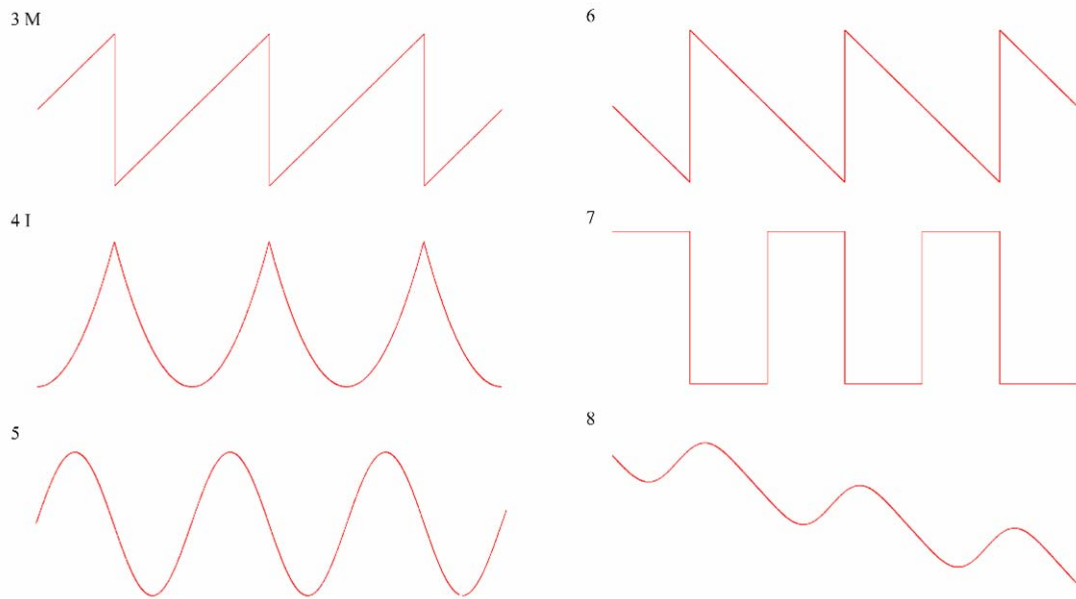


Abbildung 27: Zuordnungskarte 1 für die Zuordnung der Haptik zur Grafik. Mit Schalternummerierung (3-8) sowie Kennzeichnung der Drehmomentdarstellung (M) und der Integraldarstellung (I)

Versuch 3 Block 2

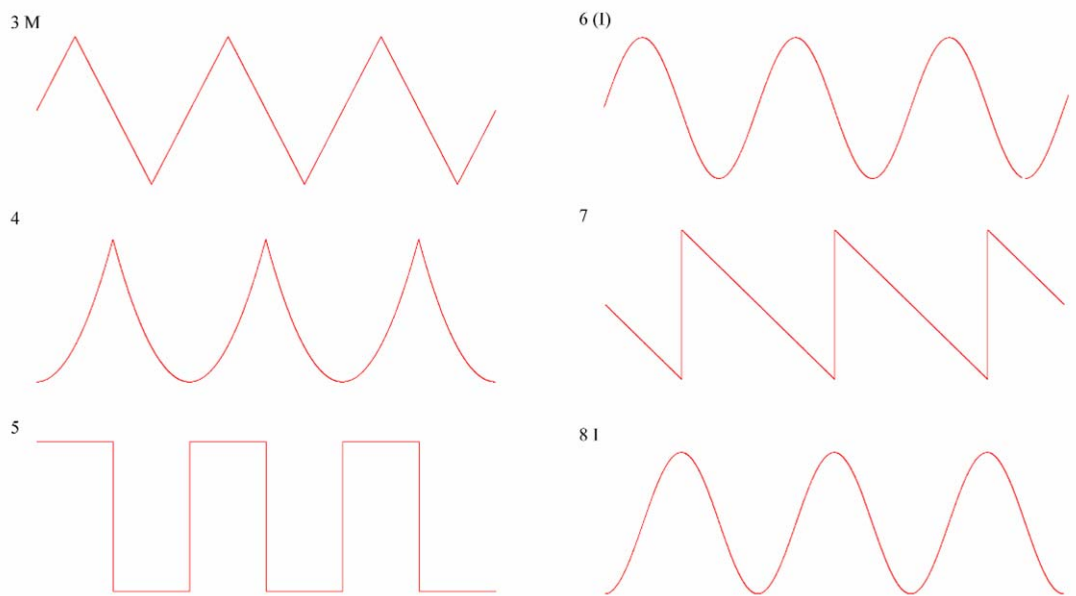


Abbildung 28: Zuordnungskarte 2 für die Zuordnung der Haptik zur Grafik. Mit Schalternummerierung (3-8) sowie Kennzeichnung der Drehmomentdarstellung (M) und der Integraldarstellung (I)

Versuch 3 Block 3

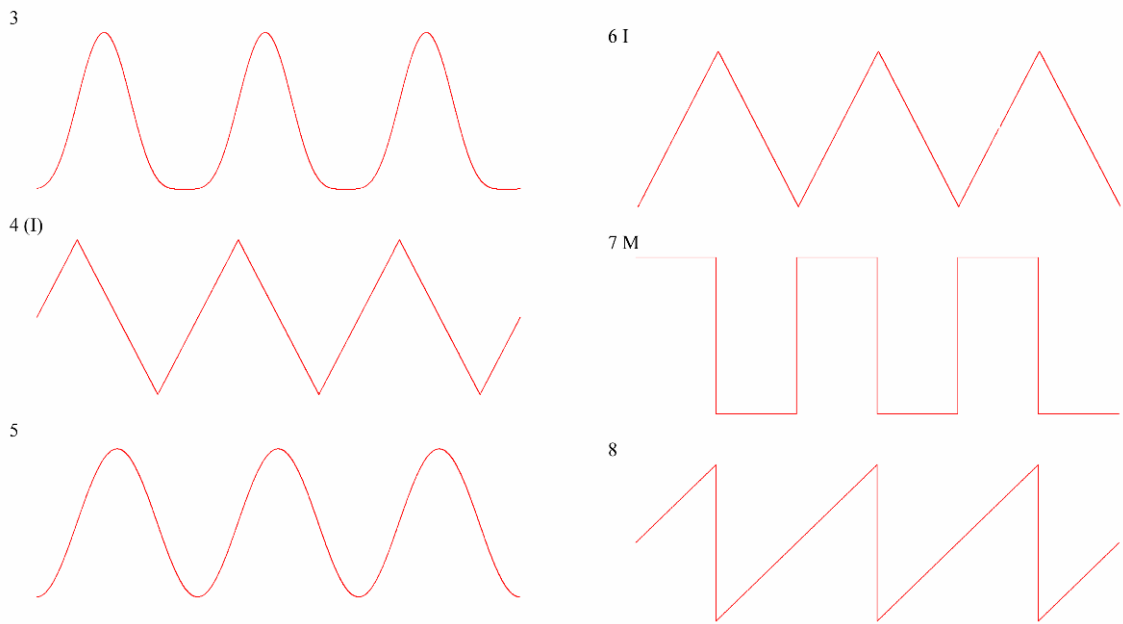


Abbildung 29: Zuordnungskarte 3 für die Zuordnung der Haptik zur Grafik. Mit Schalternummerierung (3-8) sowie Kennzeichnung der Drehmomentdarstellung (M) und der Integraldarstellung (I)

Versuch 3 Block 4

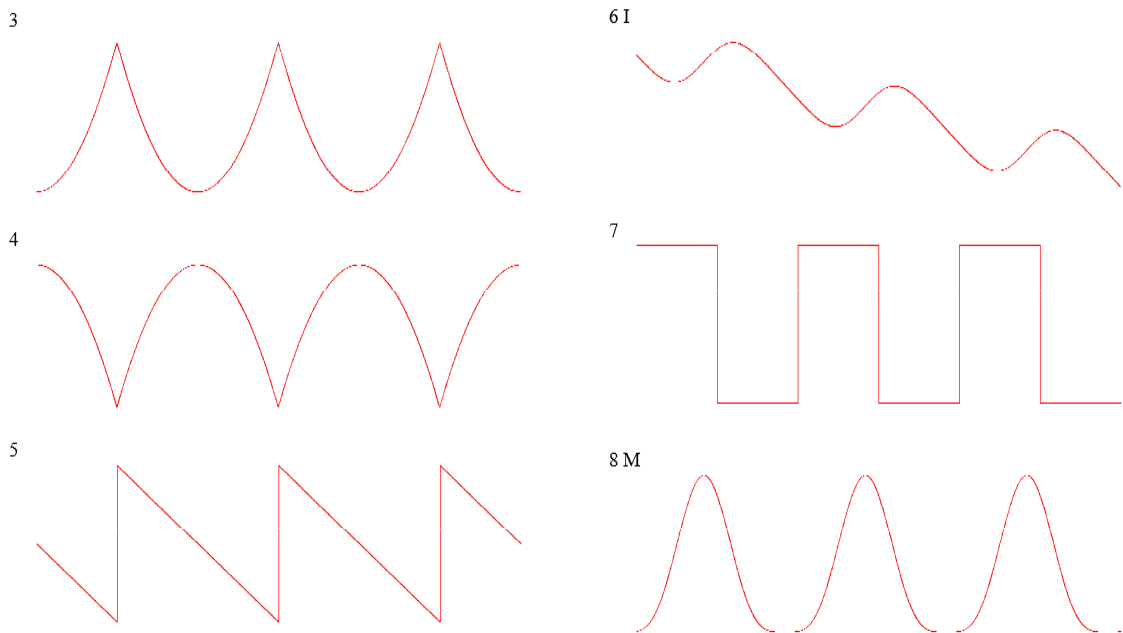


Abbildung 30: Zuordnungskarte 4 für die Zuordnung der Haptik zur Grafik. Mit Schalternummerierung (3-8) sowie Kennzeichnung der Drehmomentdarstellung (M) und der Integraldarstellung (I)

Versuch 3 Block 5

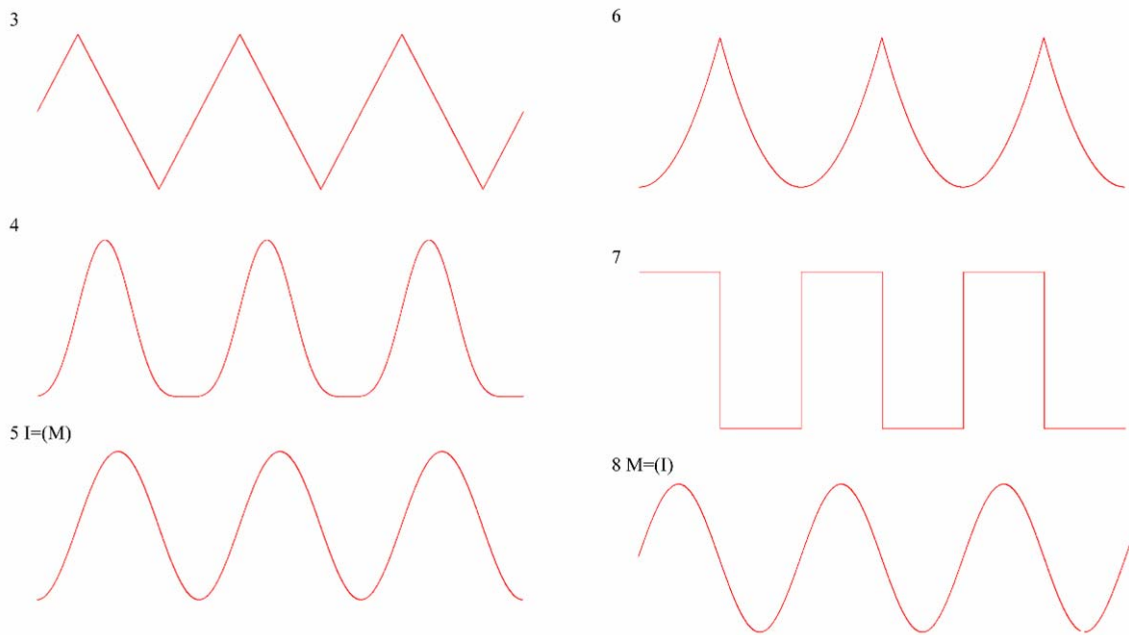


Abbildung 31: Zuordnungskarte 5 für die Zuordnung der Haptik zur Grafik. Mit Schalternummerierung (3-8) sowie Kennzeichnung der Drehmomentdarstellung (M) und der Integraldarstellung (I)

Versuch 3 Block 6

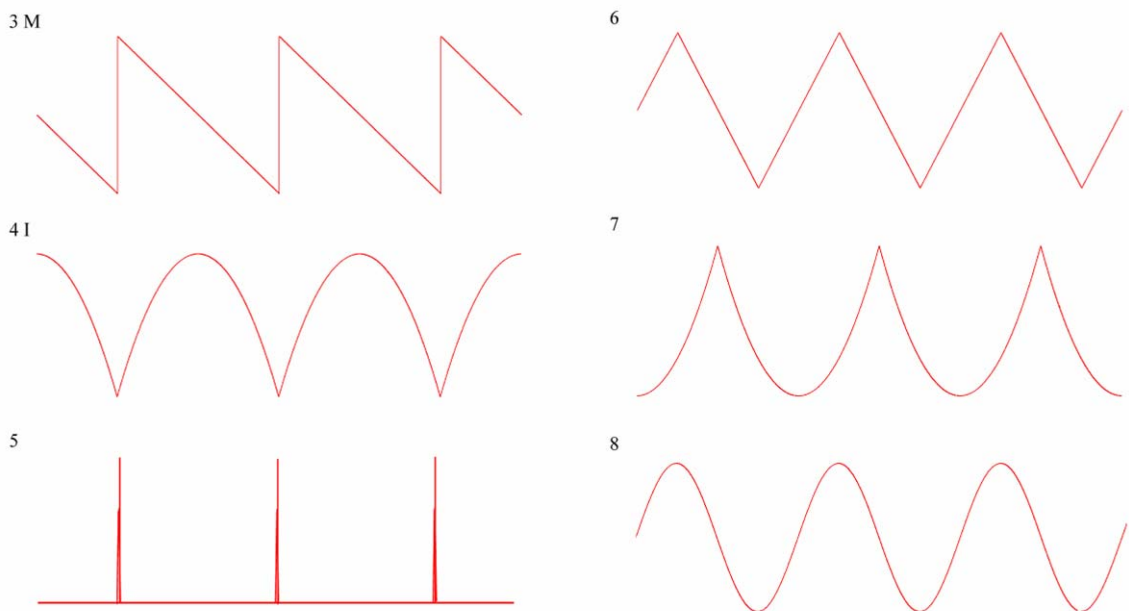


Abbildung 32: Zuordnungskarte 6 für die Zuordnung der Haptik zur Grafik. Mit Schalternummerierung (3-8) sowie Kennzeichnung der Drehmomentdarstellung (M) und der Integraldarstellung (I)

F.5 Einordnung der Ruhelage

Die Zuordnung der Ruhelage wird anhand der in Abbildung 33 dargestellten Grafik gemacht. Die VPn tragen die Position selbst im Diagramm ein.

Die den VPn vorgelegten Karten beinhalten jedoch nur die Vorgabepunkte, nicht die Nummerierung. Sie dient Auswertungszwecken.

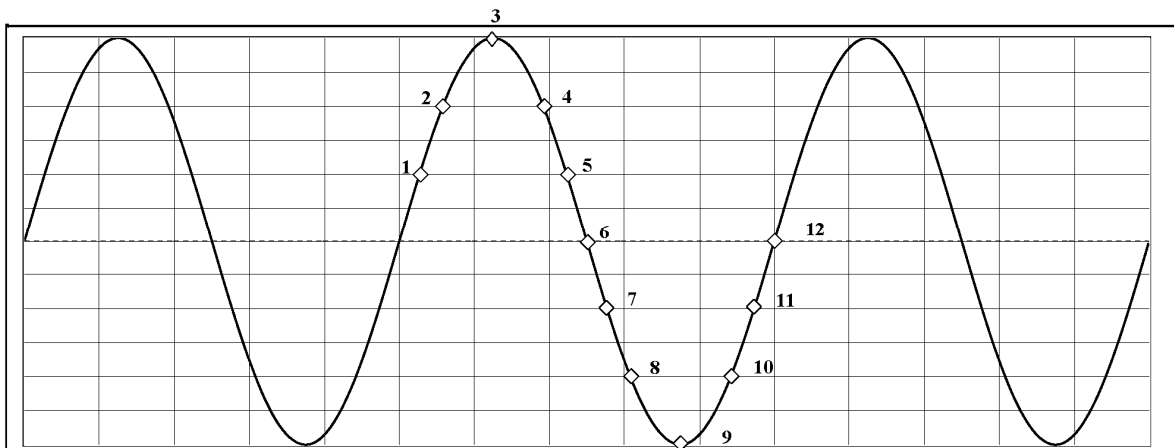


Abbildung 33: Einordnung der Ruhelage in ein Kennliniendiagramm. Die Nummerierung

F.6 Ergebnisse

F.6.1 Vergleich von Haptik mit Grafik

Ruhelage

SPSS-Ausgabe zum Chi-Quadratstest. Es wurde neben der asymptotischen Ermittlung der Signifikanz aufgrund der geringen erwarteten Häufigkeiten auch die exakte Berechnung durchgeführt.

Häufigkeiten

	Wahl_der_Ruhelage			
	Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum
1	3	1	2,3	-1,3
2		0	2,3	-2,3
3	5	2	2,3	-,3
4	6	6	2,3	3,7
5	7	1	2,3	-1,3
6		0	2,3	-2,3
7	9	11	2,3	8,7
8		0	2,3	-2,3
9	11	1	2,3	-1,3
10	12	1	2,3	-1,3
Gesamt		23		

Statistik für Test

	Wahl_der_Ruhelage
Chi-Quadrat(a)	48,739
df	9
Asymptotische Signifikanz	,000
Exakte Signifikanz	,000
Punkt-Wahrscheinlichkeit	,000

a Bei 10 Zellen (100,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet. Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 2,3.

Grafische Kennlinie

SPSS-Ausgabe zum Chi-Quadrattest. Es wurde neben der asymptotischen Ermittlung der Signifikanz aufgrund der geringen erwarteten Häufigkeiten auch die exakte Berechnung durchgeführt.

Häufigkeiten

Form	flache_Sägezahnform				Dreieckform			
	Nr.	Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum	Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl
1	3	7	4,2	2,8	3	2	4,2	-2,2
2	4	10	4,2	5,8	4	2	4,2	-2,2
3	5	3	4,2	-1,2	5	2	4,2	-2,2
4		0	4,2	-4,2	6	1	4,2	-3,2
5	7	4	4,2	-,2	7	4	4,2	-,2
6	8	1	4,2	-3,2	8	14	4,2	9,8
Gesamt		25				25		

Rechteckform				asymmetrische_Sinusform			
Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum	Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum
3	4	4,2	-,2	3	7	4,2	2,8
4	3	4,2	-1,2	4	2	4,2	-2,2
	0	4,2	-4,2	5	6	4,2	1,8
6	6	4,2	1,8	6	8	4,2	3,8
7	3	4,2	-1,2		0	4,2	-4,2
8	9	4,2	4,8	8	2	4,2	-2,2
	25				25		

Sinusform				steile_Sägezahnform			
Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum	Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum
3	5	4,2	,8		0	1,3	-1,3
4	4	4,2	-,2	4	5	1,3	3,7
5	3	4,2	-1,2		0	1,3	-1,3
6	8	4,2	3,8	6	1	1,3	-,3
7	3	4,2	-1,2	7	2	1,3	,7
8	2	4,2	-2,2		0	1,3	-1,3
	25				8		

Statistik für Test

	flache_ Sägezahnf orm	Dreieckfor m	Rechteckf orm	asymmetrische _ Sinusform	Sinusfo rm	steile_ Sägezahnf orm
Chi-Quadrat(a,b)	17,000	29,000	11,240	12,680	5,480	14,500
df	5	5	5	5	5	5
Asymptotische Signifikanz	,004	,000	,047	,027	,360	,013
Exakte Signifikanz	,005	,000	,050	,025	,396	,016
Punkt-Wahrscheinlichkeit	,001	,000	,011	,003	,069	,012

a Bei 6 Zellen (100,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet. Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 4,2.

b Bei 6 Zellen (100,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet. Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 1,3.

F.7 Ergebnisse haptischer Paarvergleich

F.7.1 Auftragung der Messergebnisse

In Abbildung 34 bis Abbildung 38 sind die Ergebnisse der Paarvergleiche zu den Differenzschwellen der Amplituden dargestellt. Neben den Messwerten sind die Regressionsfunktionen aufgetragen. Zum besseren Überblick sind die zugehörigen Drehmomentdarstellungen rechts oben grafisch dargestellt.

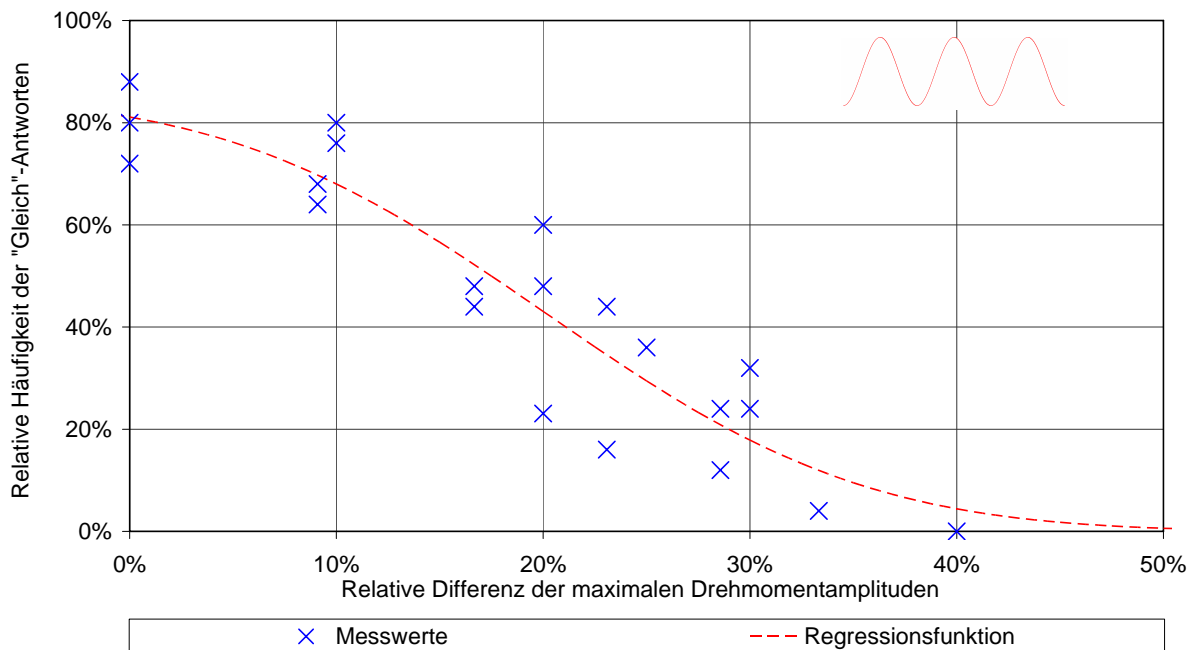


Abbildung 34: Auftragung der Messwerte für die Differenzschwellen der Sinusform

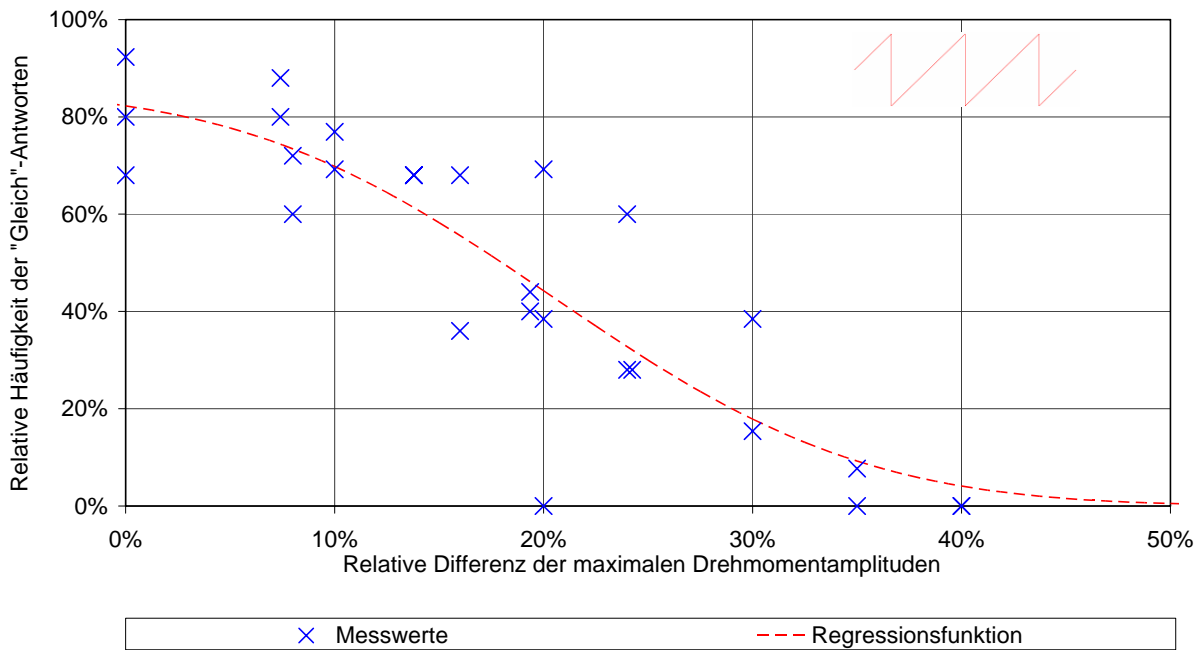


Abbildung 35: Auftragung der Messwerte für die Differenzschwellen der flachen Sägezahnform

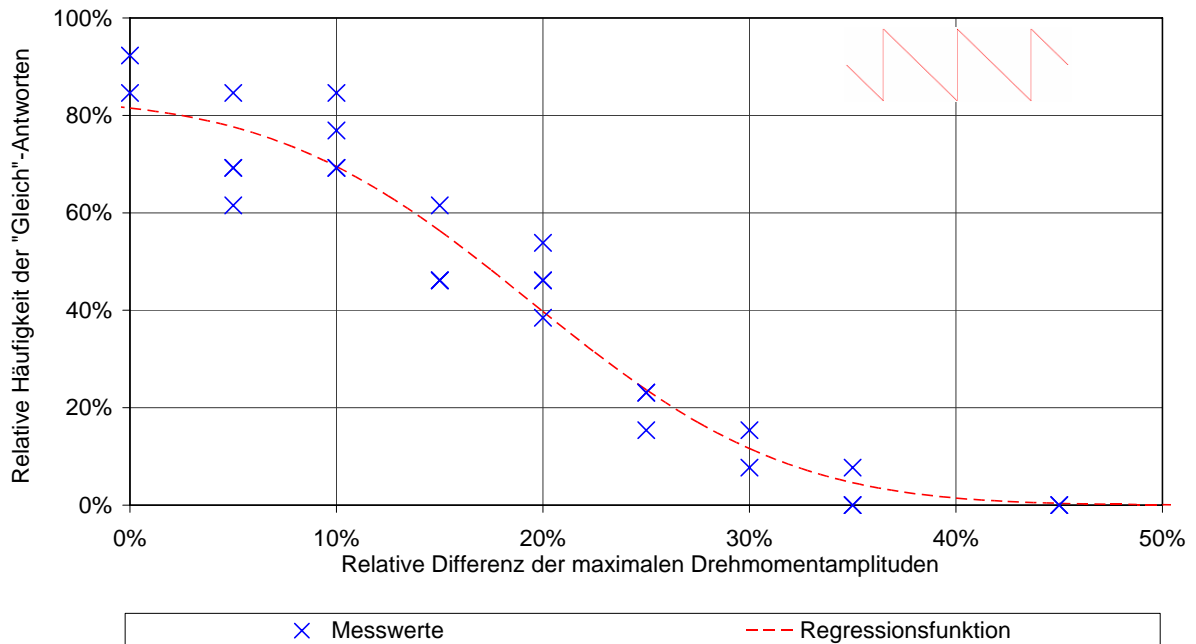


Abbildung 36: Auftragung der Messwerte für die Differenzschwellen der steilen Sägezahnform

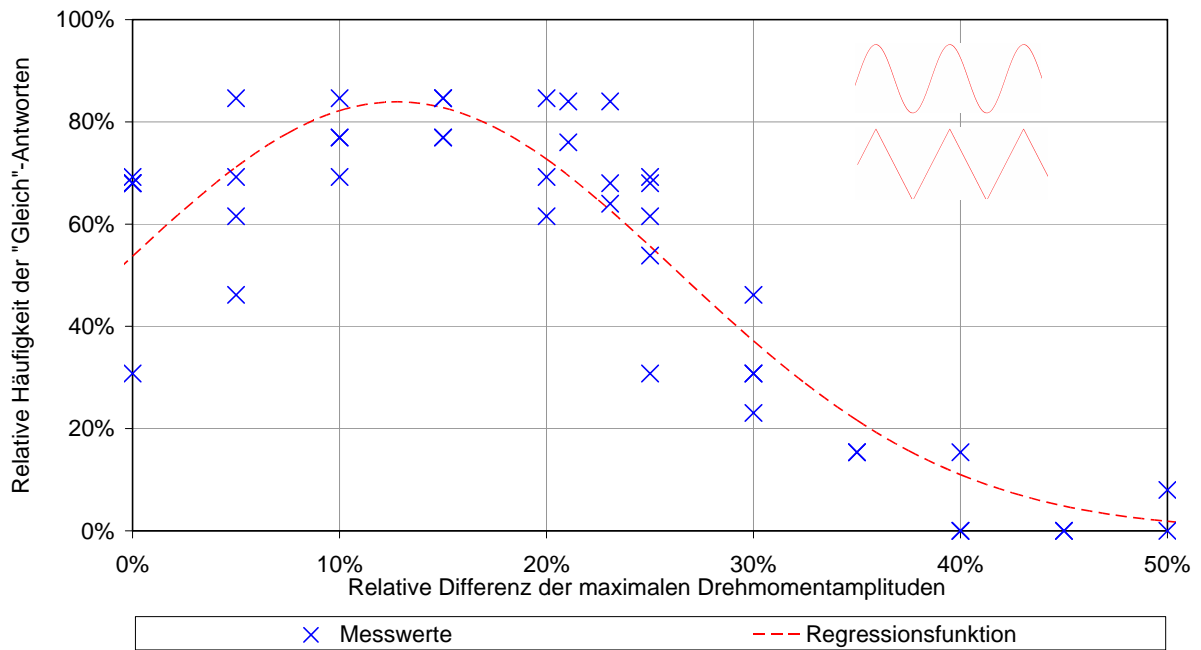


Abbildung 37: Auftragung der Messwerte für die Differenzschwellen zwischen Sinus- und Dreiecksform. Die Verschiebung des Maximum ist klar ersichtlich. Als Regressionsfunktion wird eine Gauß'sche Normalverteilung hinzugezogen. Sie dient lediglich der Feststellung des Punktes maximaler Übereinstimmung.

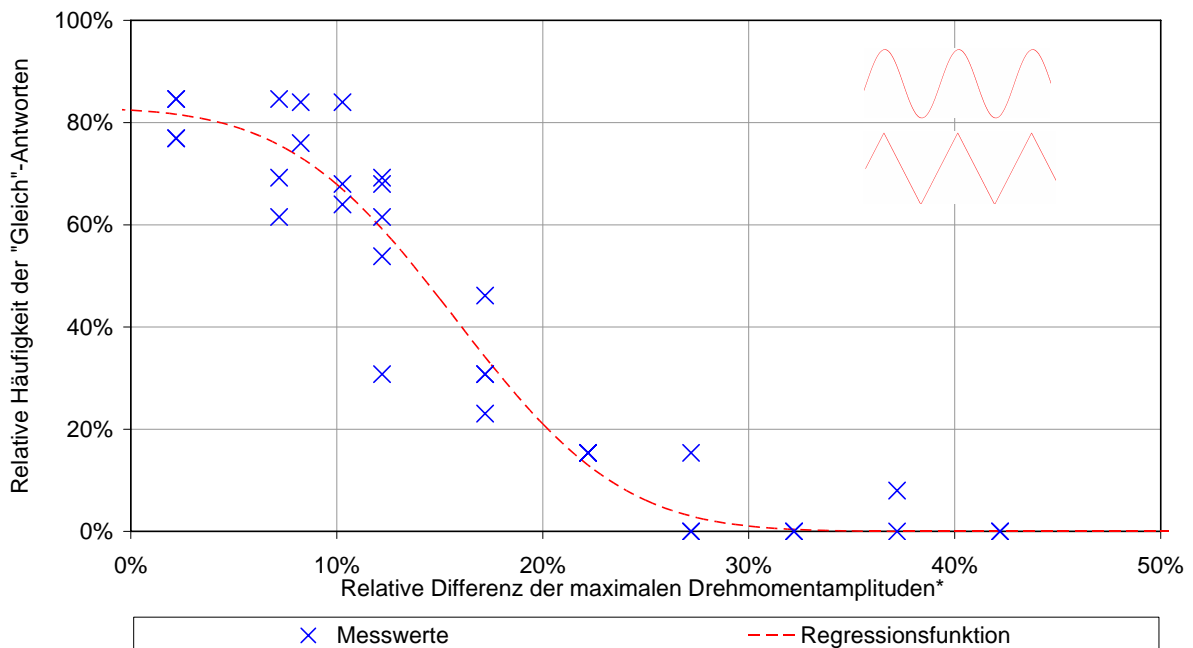


Abbildung 38: Auftragung der Messwerte für die Differenzschwellen zwischen Sinus- und Dreiecksform.
 * Die Abszisse ist anhand des zuvor ermittelten Versatzes korrigiert worden. D.h. der Nullpunkt der relativen Differenz ist um 12,8% nach rechts verschoben; damit liegt der Punkt maximaler Übereinstimmung nun dort und es ist möglich eine Regressionsfunktion in Form einer kumulierten Gauß'schen Verteilung zu ermitteln. Die Werte Links des neuen Nullpunktes werden vernachlässigt. Die Parameter dieser Funktion sind nun vergleichbar mit den Parametern der übrigen Regressionsfunktionen.

G Pilotversuch: Ermittlung von Adjektivpaarungen für rotatorische Bedienelemente

G.1 Fragebogen zum Pilotversuch

Name: _____

Kennlinie Nr.: _____

Beschreibung der gefühlten Bedienelement-Charakteristik

Bitte bewerten Sie die Bedienelemente anhand der folgenden Adjektive:

		überhaupt nicht	fast nicht	eher nicht	eher doch	sehr	extrem	Qualität des Adjektivs (--/-/0/+/++) =schlecht... gut)
1	weich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	leicht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	ungenau	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	angenehm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	schwammig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	widerspenstig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	billig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	sportlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	seriös	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	Economy-class	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	wackelig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	sanft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	flüssig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14	schwergängig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
15	schnippig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
16	hart	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
17	schwer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
18	präzise	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
19	unangenehm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
20	exakt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
21	willig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
22	teuer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
23	unsportlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
24	unseriös	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
25	Business-class	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Abbildung 39: Unipolarer Fragebogen Seite 1

Name: _____ Kennlinie Nr.: _____

		überhaupt nicht	fast nicht	eher nicht	eher doch	sehr	extrem	Qualität des Adjektivs (--/0/+/++) =schlecht... gut)
26	fest	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
27	kratzig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
28	zäh	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
29	leichtgängig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
30	rund	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
31	spitzig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
32	spritzig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
33	schnappend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
34	rauh	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
35	ruppig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
36	scharf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
37	schneidend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
38	klar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
39	sicher	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
40	unsicher	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
41	geil	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
42	hochwertig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
43	minderwertig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
44	voll	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
45	vollwertig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
46		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
47		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
48		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
49		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
50		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Gesamturteil über das vorliegende Bedienelement:

bitte ankreuzen

Schlecht	eher schlecht	mittelmäßig	eher gut	sehr gut
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 40: Unipolarer Fragebogen Seite 2

G.2 Korrelationen der Adjektivpaare durch Faktorenanalyse

Tabelle 3: Rotierte Komponentenmatrix(a) nach SPSS mit Bewertung der Eignung. Je höher der Wert, desto besser ist er nach Meinung der VPn geeignet. Die Zusammensetzung der Gruppen ist farbig markiert. Einzelne hohe gruppenübergreifende Korrelationen sind ebenfalls farbig markiert.
 Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung. Die Rotation ist in 10 Iterationen konvergiert.

	Komponente								Wertung der Eignung 100%: gut 0%: schlecht
	1	2	3	4	5	6	7	8	
leichtgängig	-,895	-,092	-,149	-,069	,080	,043	,094	,010	92%
<i>schwer</i>	,885	,163	,188	,060	,145	-,118	-,134	-,085	100%
schwergängig	,878	,198	,176	,169	,170	-,020	-,047	-,071	83%
hart	,768	,017	,442	,227	-,010	,029	-,052	-,041	100%
widerspenstig	,759	,258	,117	,321	,065	,092	,158	,074	58%
<i>ruppig</i>	,740	,202	,185	,297	-,041	,345	-,001	,058	50%
<i>leicht</i>	-,739	,026	-,106	,134	-,087	,004	,126	,449	100%
<i>zäh</i>	,728	,435	,118	,052	,025	-,149	,047	,155	67%
unangenehm	,703	,487	,188	,160	-,165	-,165	,098	-,105	83%
<i>fest</i>	,659	-,010	,531	,051	,175	-,197	-,067	,074	75%
<i>teuer</i>	-,659	-,490	-,104	,045	,193	,042	-,038	,194	58%
<i>Bussiness_class</i>	-,571	-,380	-,251	-,168	,329	,443	,037	,046	33%
<i>kratzig</i>	,569	,242	,309	,223	,038	,344	-,031	,376	75%
weich	-,564	,432	-,261	-,133	,012	-,025	,078	,205	100%
angenehm	-,548	-,464	-,017	,019	-,052	,082	-,320	,217	83%
<i>schnappend</i>	,546	-,425	-,057	,103	-,279	-,114	,071	,335	67%
<i>flüssig</i>	-,497	,102	-,203	-,445	,107	-,264	,322	,228	58%
<i>exakt</i>	-,049	-,905	,096	-,022	-,059	-,118	,051	,024	100%
präzise	-,030	-,879	-,017	,053	-,169	-,125	,013	-,024	92%
klar	-,078	-,842	,136	-,061	,112	,000	,321	-,050	42%
<i>sicher</i>	-,134	-,836	,070	,095	-,036	-,017	-,018	-,158	58%
schwammig	,015	,813	,204	,113	,149	,010	-,070	-,094	75%
<i>ungenau</i>	-,021	,806	,087	,336	,129	,019	,123	,076	92%
<i>unsicher</i>	,344	,782	,028	,263	,244	,063	-,043	,003	58%
minderwertig	,328	,677	,481	,084	,027	-,049	,016	-,166	83%
<i>seriös</i>	-,389	-,648	-,139	-,157	,199	,366	-,051	,124	50%
<i>billig</i>	,371	,638	,163	,120	,064	,098	,132	-,303	58%
<i>wackelig</i>	,182	,617	,214	,379	,100	,232	-,143	,088	50%
hochwertig	-,322	-,522	-,498	,020	,106	,031	-,201	,127	83%
<i>scharf</i>	,373	-,165	,740	,107	-,016	-,290	-,174	-,068	50%
<i>schneidend</i>	,292	,189	,734	,173	,176	,046	-,111	-,119	42%
<i>rau</i>	,440	,161	,684	,079	-,064	,362	,123	,115	58%
<i>spritzig</i>	,220	,275	,213	,773	,209	-,086	,146	-,009	17%
<i>schnippig</i>	,527	,158	,077	,655	,142	,058	,235	,051	42%
willig	,141	,384	-,048	,639	,352	,026	,331	,142	25%
spitzig	,283	-,136	,471	,502	-,472	-,065	,048	,097	42%
<i>geil</i>	,147	,090	-,059	,168	,878	-,138	-,147	,118	33%
<i>vollwertig</i>	-,026	,077	,107	,116	,670	,586	,076	-,094	17%
rund	-,112	,406	,253	,247	,652	-,075	,183	-,152	42%

Economy_class	-,284	,062	-,221	,007	-,092	,828	-,161	-,064	42%
unseriös	,326	,312	,418	-,028	-,063	,605	,153	-,036	33%
voll	,121	-,017	,010	,212	,264	,171	,861	,089	17%
unsportlich	-,206	-,148	-,123	,070	-,266	-,161	,769	-,005	25%
sportlich	-,239	-,188	,040	,190	-,264	-,186	,490	,476	42%
sanft	-,509	,062	-,296	-,014	,253	-,076	,184	,533	67%

G.3 Entwickelter Fragebogen

Bitte beurteilen Sie die folgenden Bedienelemente anhand der vorgegebenen Adjektive:

Name _____

Generelle Beurteilung

Beurteilen Sie das Bedienelement allgemein:

	extrem	ziemlich	ein wenig	ein wenig	ziemlich	extrem	
weich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	hart
schwergängig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	leichtgängig
minderwertig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	hochwertig
angenehm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unangenehm
eindeutig/ klar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	verschwommen/ unklar

Ruhelage

Beurteilen Sie die Rastposition/Ruhelage des Bedienelements:

	extrem	ziemlich	ein wenig	ein wenig	ziemlich	extrem	
schwammig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	präzise
eng geführt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weit

Übergang zwischen den Ruhelagen

Beurteilen Sie den Übergang zwischen zwei Rastungen. D.h. Wie fühlt sich das Bedienelement an, wenn sie von einer zur nächsten Rastung drehen.

	extrem	ziemlich	ein wenig	ein wenig	ziemlich	extrem	
widerspenstig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	willig
rund	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	spitz

Gesamturteil über das vorliegende Bedienelement:

Bitte ankreuzen:

schlecht				eher schlecht				mittelmäßig				eher gut				sehr gut			
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 41: Entwickelter bipolarer Fragebogen

H Versuch: Parametrisierung der rotatorischen Kennlinie

H.1 Faktorenanalyse des Antwortverhaltens

Gemeinsam mit den technischen Parametern wird das Antwortverhalten der Bewertungskriterien einer Faktorenanalyse unterzogen. Vgl. Tabelle 4.

Tabelle 4: Rotierte Komponentenmatrix. Die Paarungen sind so gepolt, dass keine gegenüberliegende Paare entstehen. Alle Werte versammeln sich nahezu vollständig in der oberen Halbebene. Die Polarisierung kann aus der Reihenfolge der Adjektive gelesen werden. Die technischen Parameter sind mit A: steigende Flanke, B: fallende Flanke und C: Amplitude gekennzeichnet.

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung. Die Rotation ist in 3 Iterationen konvergiert.

	Komponente	
	F1	F2
weich_hart	,985	,026
leichtgängig_schwergängig	,976	-,004
verschommen#unklar _eindeutig#klar	,858	,368
widerspenstig_willig	-,833	,483
spitz_rund	-,775	,492
schwammig_präzise	,771	,577
weit_enggeführt	,764	,588
C_min_max	,632	-,010
unangenehm_angenehm	-,043	,962
sehrschlecht_sehr gut	,053	,942
minderwertig_hochwertig	,062	,936
A_flach_steil	,354	,766
B_steil_flach	-,310	,721

I Versuch: Untersuchung der Darstellungsart für translatorische Bedienelemente

I.1 Kennlinien zur Annäherung runder Kennlinien durch eckige

Kennlinien zur Untersuchung der optimalen Annäherung runder Drucktaster-Kennlinien durch Geradenstücke.

I.1.1 Vergleich flacher und steiler Kennlinie

Runde Ausgangsformen der Kennlinien mit flachem und steilem Kraftsprung.

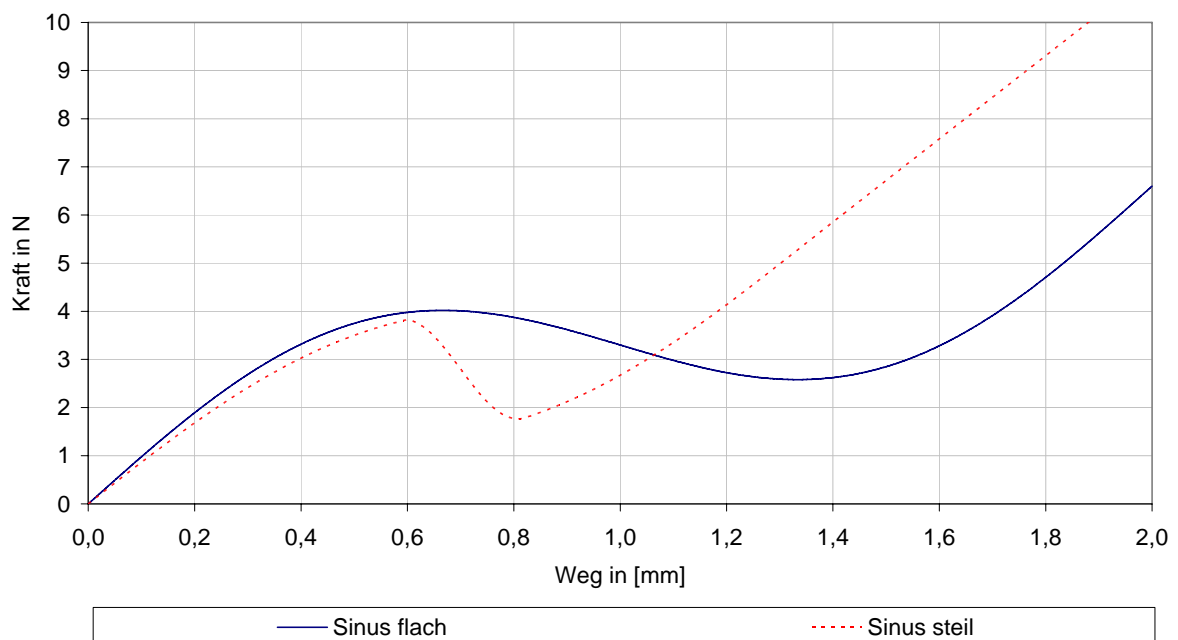


Abbildung 42: Runde Kennlinienformen, anhand deren die Möglichkeit zur Annäherung durch eckige Kennlinien geprüft wird.

I.1.2 Flache Kurvenform

Eingesetzte Näherungsvarianten für die Variante flacher Kraftsprung.

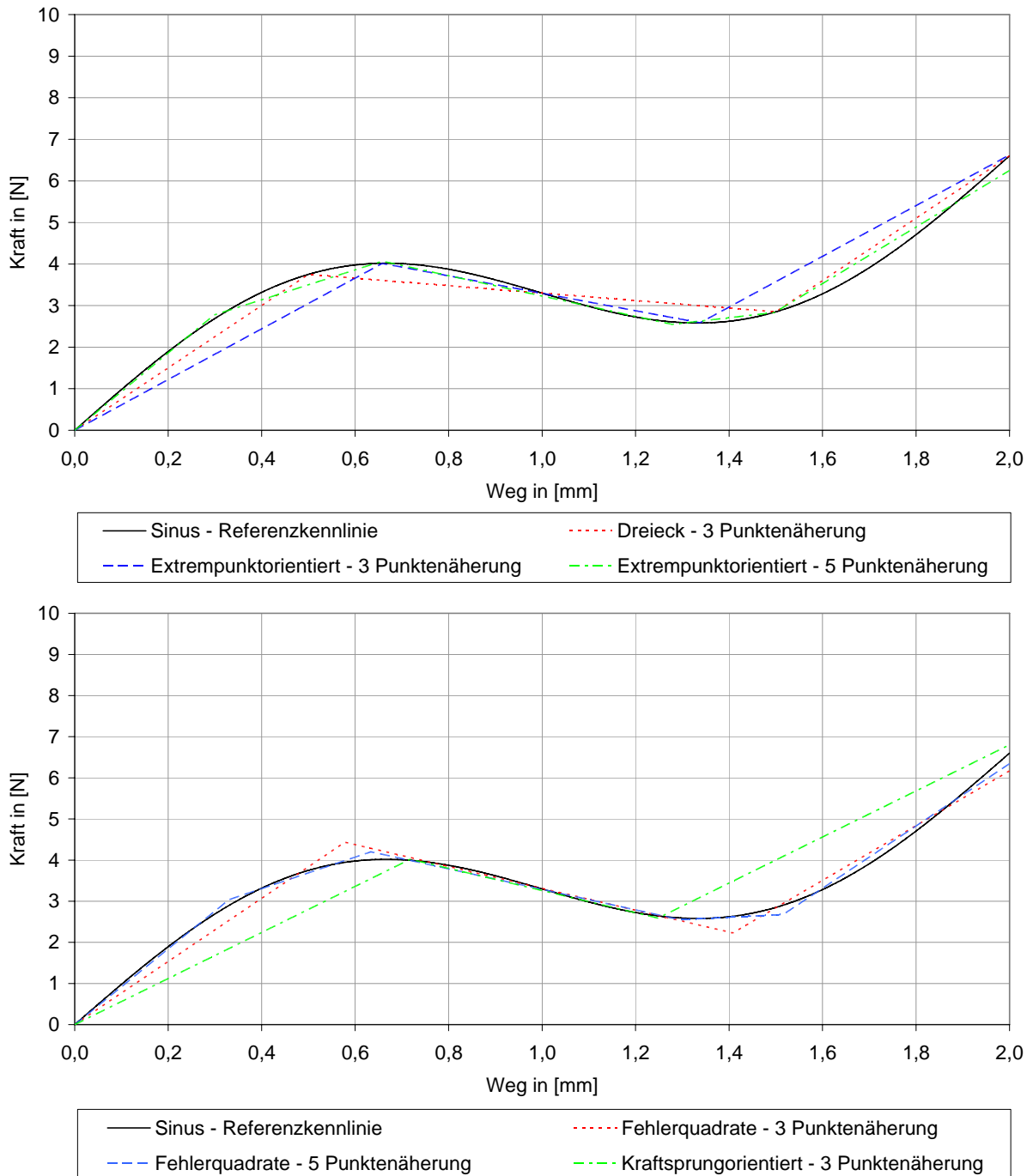


Abbildung 43: Näherungsvarianten für die flache Sinus-Form. Die Kennlinien sind aufgrund der besseren Übersichtlichkeit auf zwei Diagramme verteilt. Erläuterungen siehe Text.

I.1.3 Steile Kurvenform

Eingesetzte Näherungsvarianten für die Variante flacher Kraftsprung.

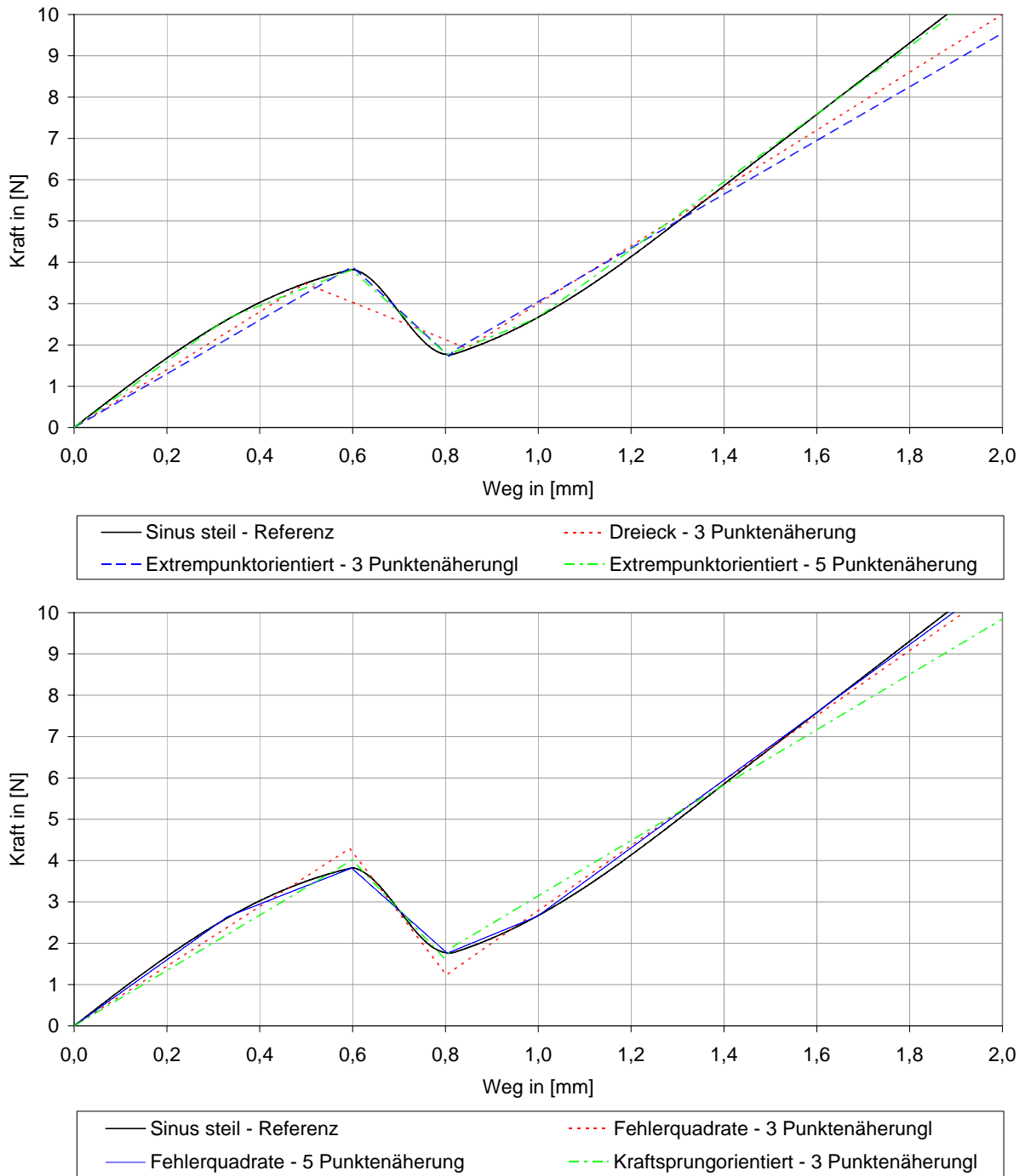


Abbildung 44: Näherungsvarianten für die steile Sinus-Form. Die Kennlinien sind aufgrund der besseren Übersichtlichkeit auf zwei Diagramme verteilt. Erläuterungen siehe Text.

I.2 Versuchsabfolge translatorischer Paarvergleich

Tabelle 5: Abfolge des Paarvergleichs für Drucktasten. Die Bezeichner stehen für Kennlinien des ersten Versuchs zur Annäherung runder durch eckige Kennlinien. Die Zahlenwerte stehen für Kennlinien des zweiten Versuchs und beschreiben den Kraftsprung Weg–Höhe

Nr	A	B
1	Sinus steil	Sinus-steil
2	Kraftsprungopt	Sinus-steil
3	250–1500	150–1500
4	250–1000	150–1000
5	5-Pkt.Extrma	Sinus
6	5-Pkt.Extrma	5-Pkt.Extrema-steil
7	50–1500	150–1500
8	Fehlerquadrate	Sinus-steil
9	Dreieck	5-Pkt.Extrema-steil
10	50–1000	50–1000
11	5-Pkt.Extrma	Sinus-steil
12	Kraftsprungopt	Sinus
13	250–1500	250–1500
14	250–1500	200–1500
15	Sinus	Sinus
16	250–1000	250–1000
17	250–1000	100–1000
18	Kraftsprungopt	5-Pkt.Extrema
19	Dreieck	5-Pkt.Extrema
20	Extramaopt.	Sinus-steil
21	5-Pkt-Fehlerquad	5-Pkt.Extrema
22	250–1500	50–1500
23	250–1000	200–1000
24	Fehlerquadrate	5-Pkt.Extrema-steil
25	50–1000	100–1000
26	5-Pkt-Fehlerquad	5-Pkt.Extrema-steil
27	50–1000	150–1000
28	Extramaopt	5-Pkt.Extrema-steil
29	Dreieck	Sinus-steil
30	150–500	150–750
31	Sinus steil	5-Pkt.Extrema-steil
32	250–1000	50–1000
33	Extramaopt	5-Pkt.Extrema
34	50–1500	50–1500
35	5-Pkt.Extrma	5-Pkt.Extrema
36	50–1000	250–1000
37	Dreieck	Sinus

38	150–500	150–500
39	250–1500	100–1500
40	Fehlerquadrate	5-Pkt.Extrema
41	50–1000	200–1000
42	150–500	150–1250
43	50–1500	250–1500
44	Kraftsprungopt.	5-Pkt.Extrema-steil
45	Fehlerquadrate	Sinus
46	50–1500	100–1500
47	5-Pkt-Fehlerquad	Sinus
48	Sinus	5-Pkt.Extrema
49	Extramaopt	Sinus
50	5-Pkt-Fehlerquad	Sinus-steil
51	50–1500	200–1500
52	Sinus	Sinus-steil
53	150–500	150–1500
54	150–500	150–1000

I.3 Versuchsabfolge translatorische Haptik-Grafik-Zuordnung

Die Abfolge der Versuche ist in Tabelle 6 aufgeführt. Die hinteren Spalten zeigen die Zuordnung der möglichen Darstellungsarten zu den Auswahltastern auf den Karten im Anschluss.

Tabelle 6: Abfolge der vorgestellten Kennlinien mit der Zuordnung der Darstellungsarten zu den jeweiligen Schaltersnummern (3-8).

Nr.	Kennlinie	F	I	D	D ²	F(t)	Senke
1	Flanken geschwungen	4	7	3	5	8	6
2	Sinus	5	7	8	6	3	4
3	vorne flach hinten steil	7	6	4	8	5	3
4	kleiner Sprung	8	3	5	6	4	7
5	Mikroschalter	7	4	5	6	8	3
6	Dreieck	3	4	6	8	7	5
7	Silikonschaltmatte	8	3	5	7	4	6
8	Knackfrosch	3	8	4	5	6	7
9	Sprung	7	8	3	5	6	4

I.4 Graphische Darstellungen zur Auswahl

Folgende graphische Darstellungen werden den VPnn zur Auswahl angeboten.

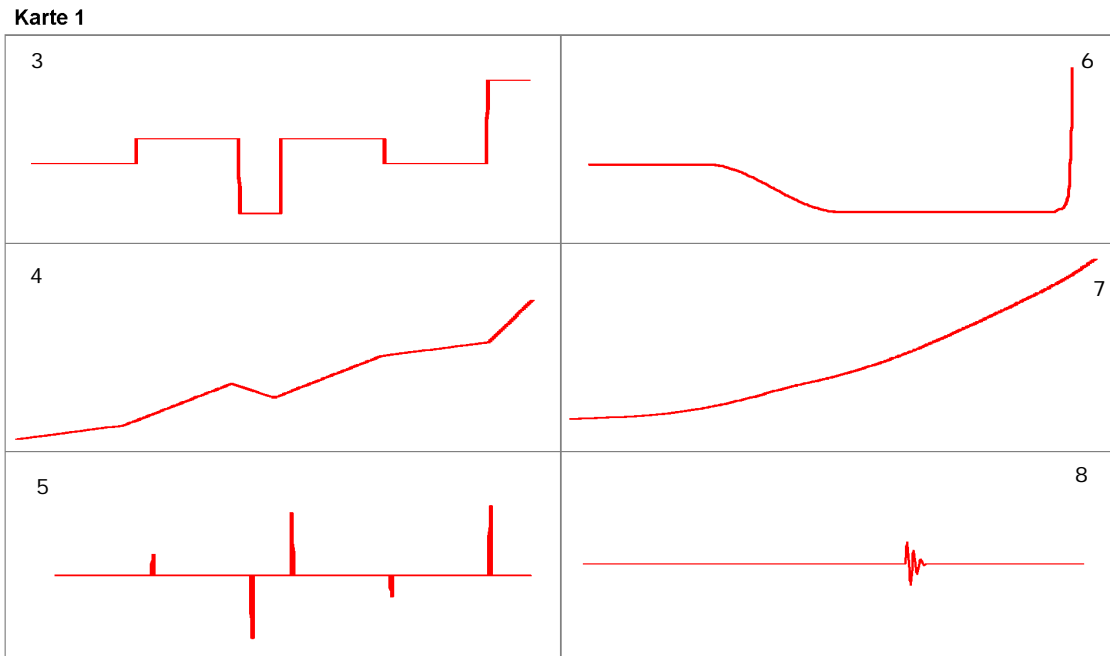


Abbildung 45: Zuordnungskarte 1. Die Nummerierung entspricht den Nummern der Auswahltaster.

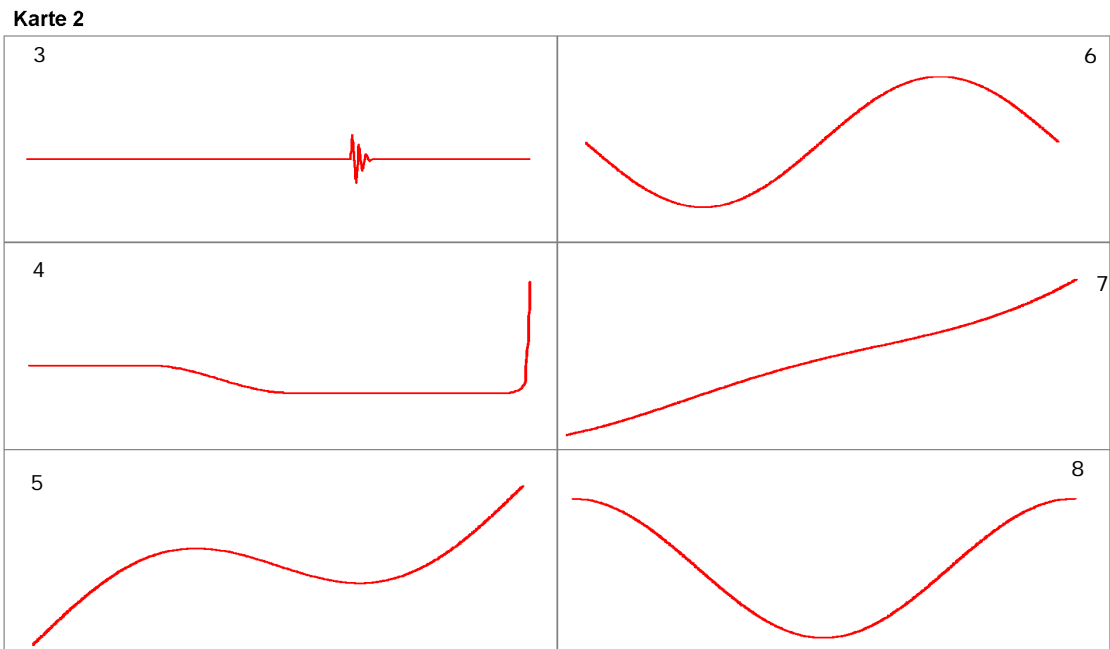


Abbildung 46: Zuordnungskarte 2. Die Nummerierung entspricht den Nummern der Auswahltaster.

Karte 3

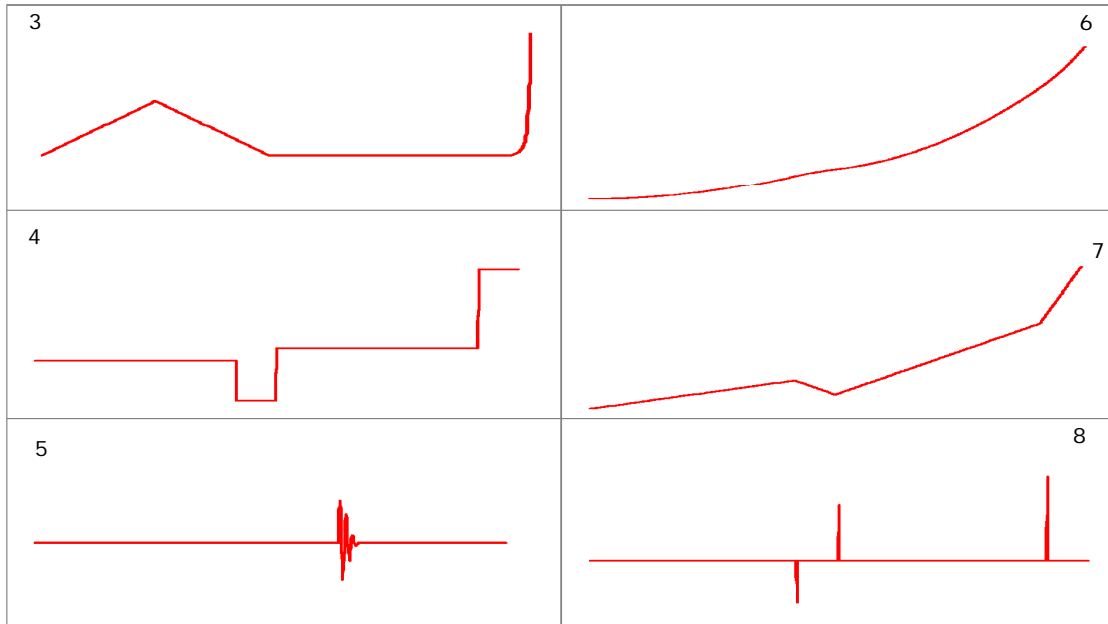


Abbildung 47: Zuordnungskarte 3. Die Nummerierung entspricht den Nummern der Auswahltaster.

Karte 4

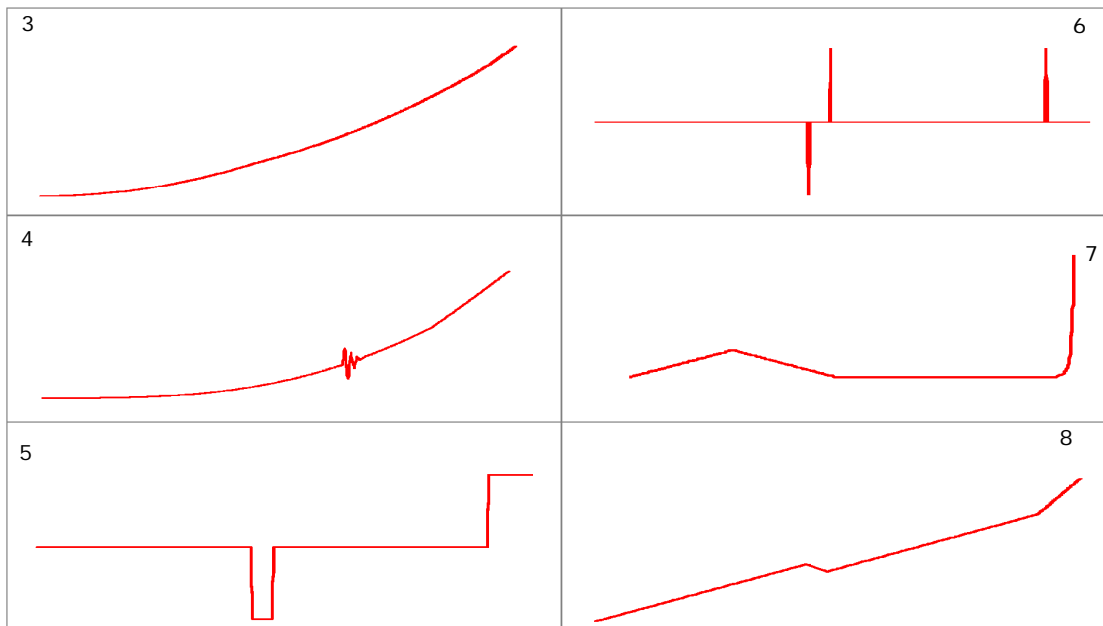


Abbildung 48: Zuordnungskarte 4. Die Nummerierung entspricht den Nummern der Auswahltaster.

Karte 5

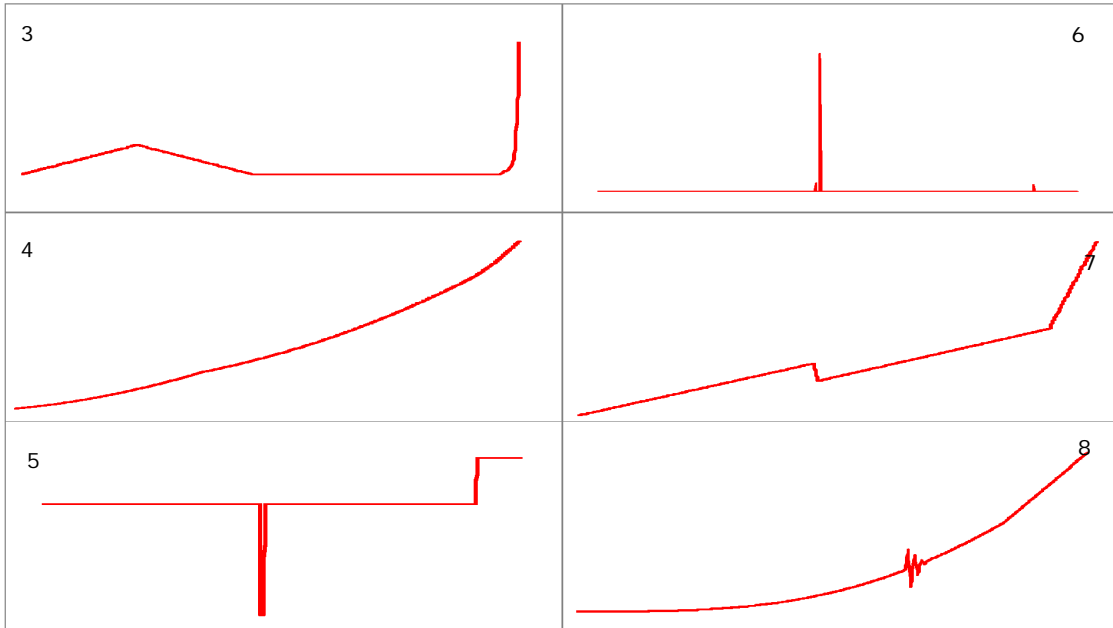


Abbildung 49: Zuordnungskarte 5. Die Nummerierung entspricht den Nummern der Auswahl-taster.

Karte 6

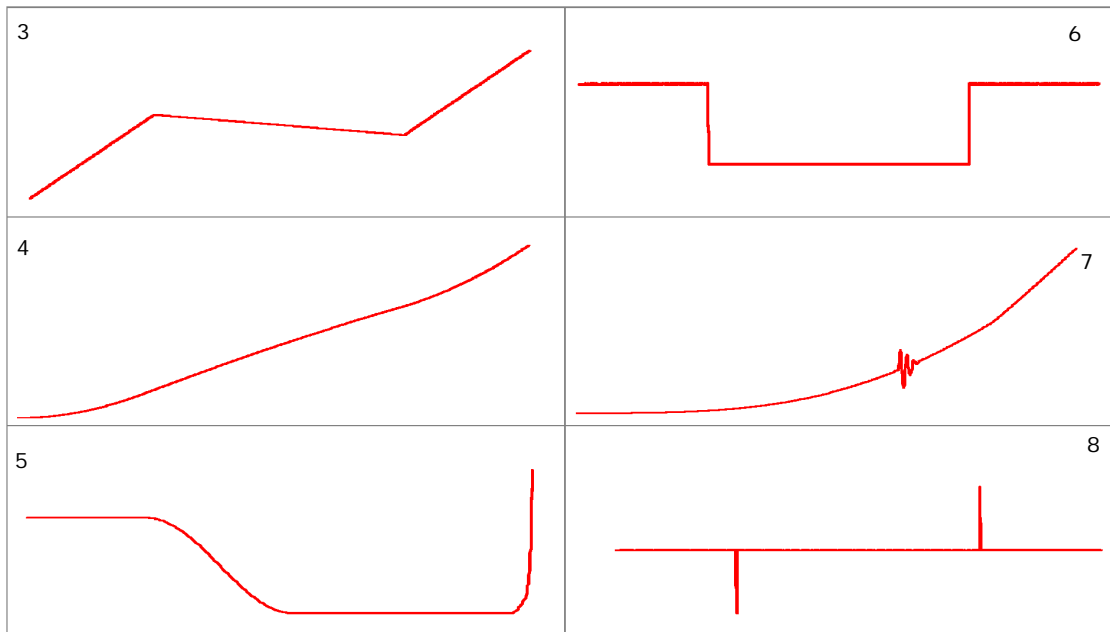


Abbildung 50: Zuordnungskarte 6. Die Nummerierung entspricht den Nummern der Auswahl-taster.

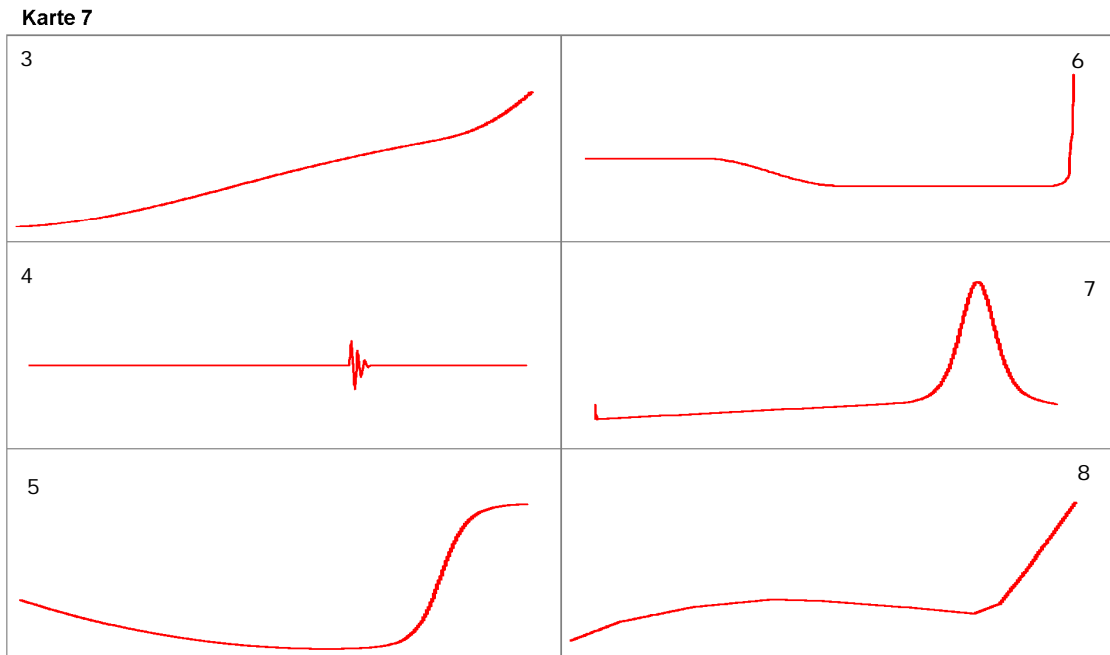


Abbildung 51: Zuordnungskarte 7. Die Nummerierung entspricht den Nummern der Auswahltaster.

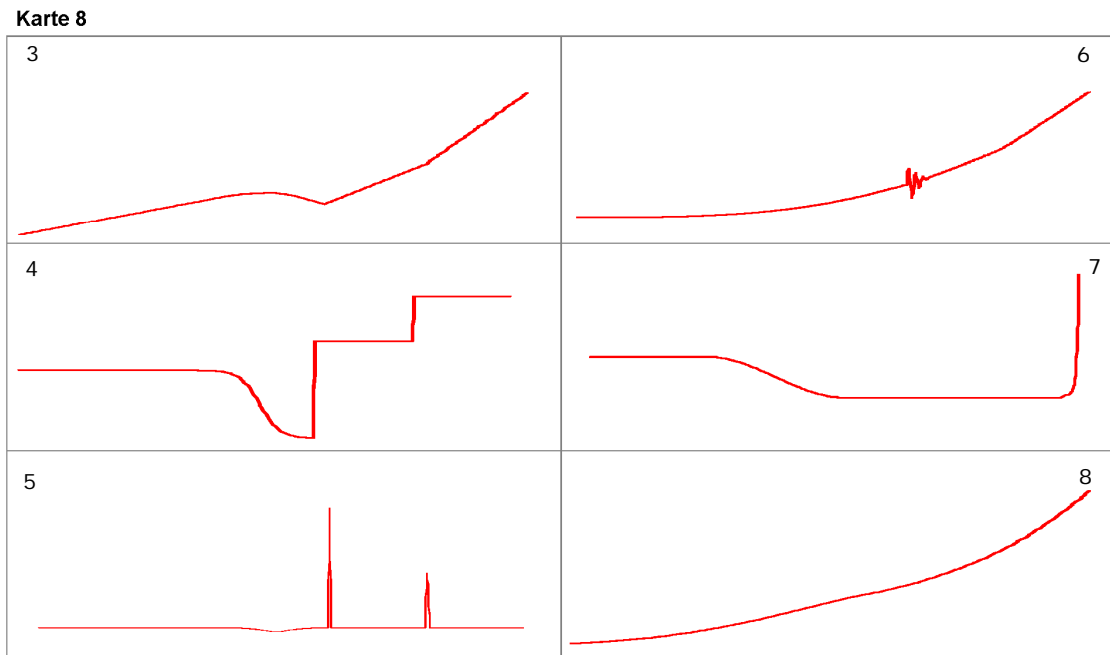


Abbildung 52: Zuordnungskarte 8. Die Nummerierung entspricht den Nummern der Auswahltaster.

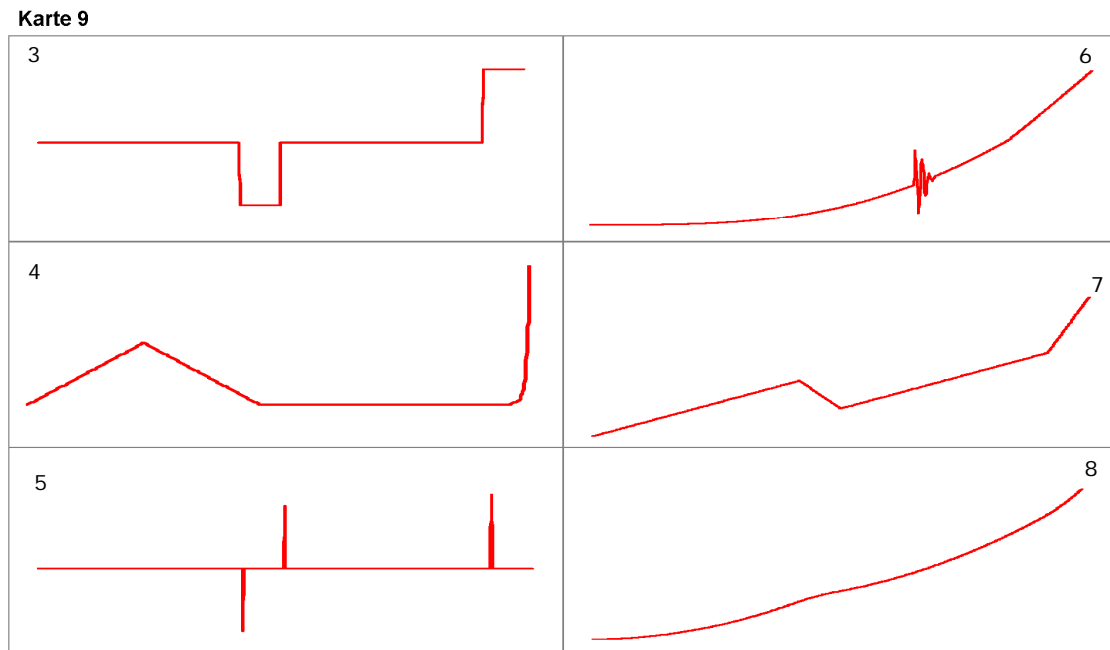


Abbildung 53: Zuordnungskarte 9. Die Nummerierung entspricht den Nummern der Auswahlmuster.

I.5 Ergebnisse haptischer Paarvergleich translatorisch

I.5.1 Vergleich 5-Punkt-Extremwertorientierte mit anderen Kennlinien

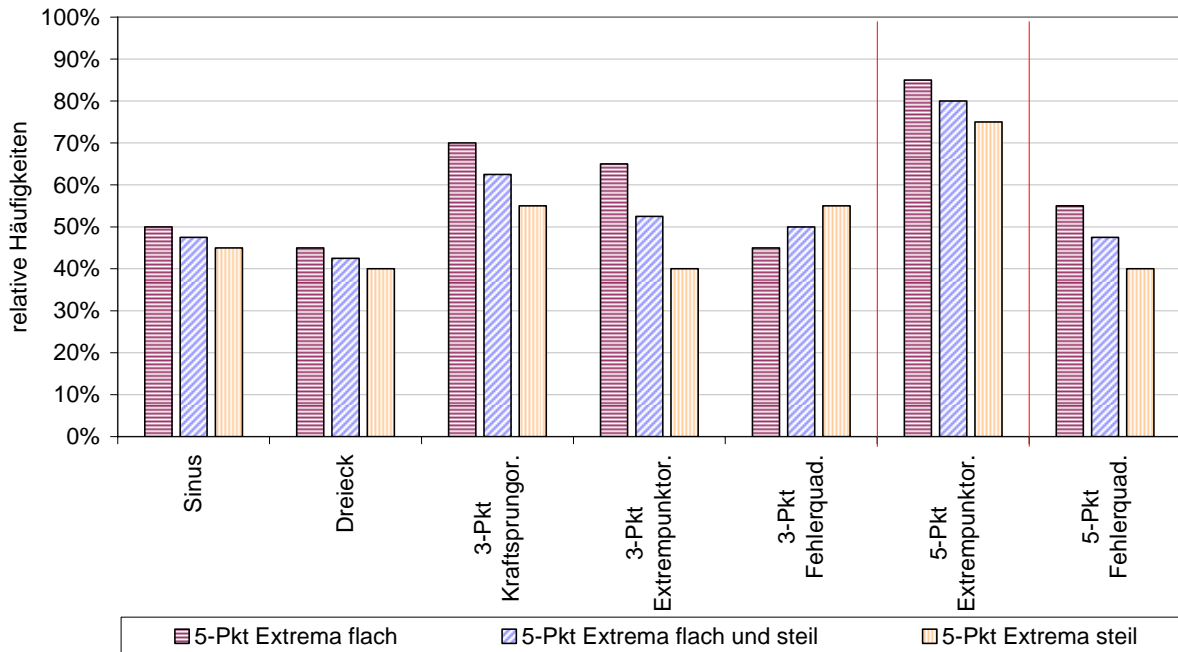


Abbildung 54: Häufigkeitsverteilung der ‚gleich‘-Urteile von 5-Punkt-Extremwertorientierter Kennlinie flach, steil und beide zusammengefasst. Die Rubriken wurden jeweils mit der Kennlinienform verglichen. Die rot markierte Rubrik ist die Referenzmessung gleichförmiger Kennlinien.

I.5.2 Steigungen der Kraftsprünge

In Tabelle 7 sind die Steigungen der Kraftsprünge der verwendeten Kennlinien aufgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen die zugehörigen Kennlinien.

Tabelle 7: Steigungen der Kraftsprünge in N/mm.

	Kennlinie	Sinus	Kraftsprungorientiert	3-Punkte Fehlerquadrat	5-Punkte Fehlerquadrat	5-Punkte Extrempunkt	3-Punkte Extrempunkt	Dreieck
Steigung in N/mm	flach	3,2	2,7	2,6	2,5	2,3	2,1	0,9
	steil	14,5	12,0	15,0	10,0	10,4	10,4	4,38

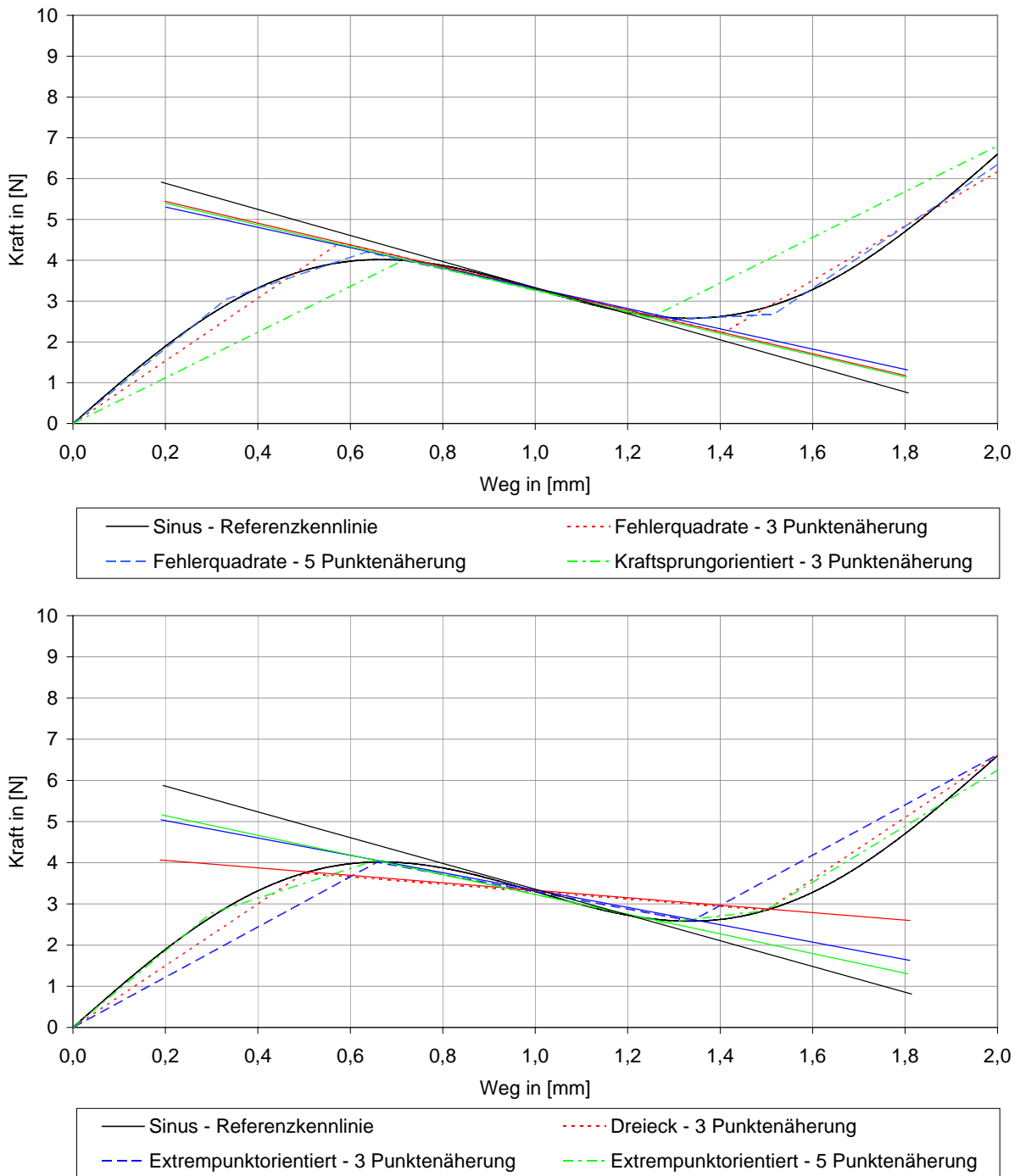
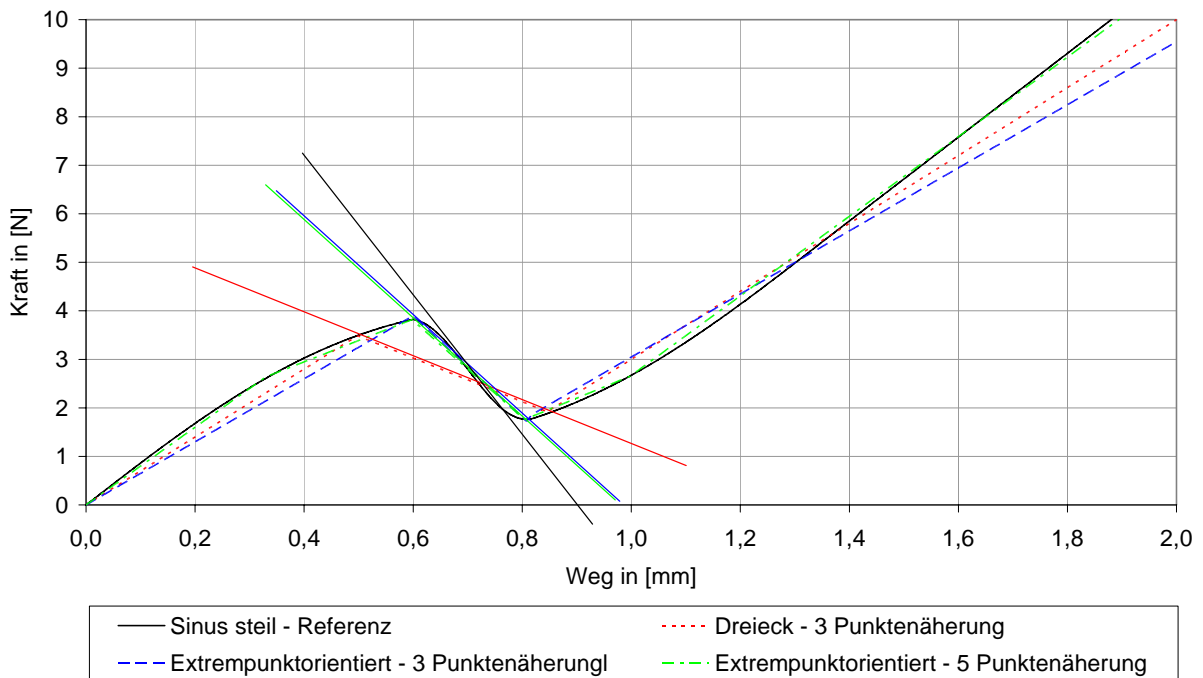
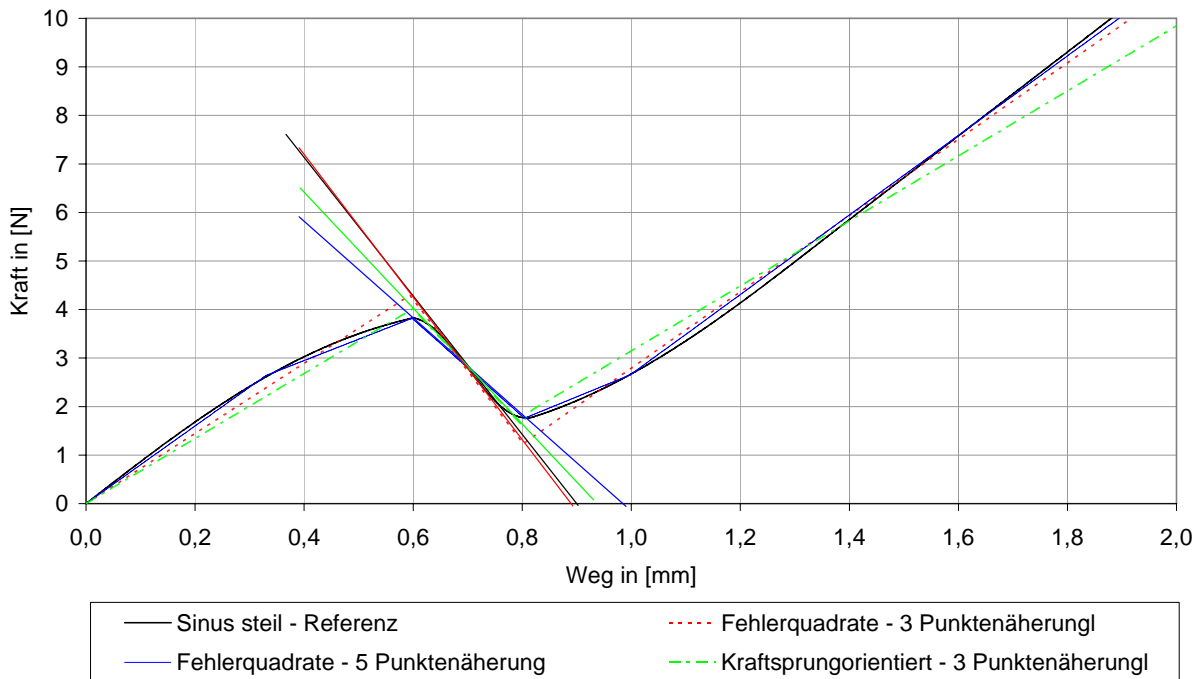


Abbildung 55: Betrachtung der Kraftsprung-Steigungen der Näherungsformen



I.5.3 Ergebnisse der Haptik Grafik Zuordnung

Beobachtete Auswahlhäufigkeiten im Test.

Tabelle 8: Beobachtete Häufigkeiten zum Chiquadrat Test.

	Flanke geschwungen				Sinus			
	Kategorie	Beobachtet etes N	Erwartete Anzahl	Residuum	Kategorie	Beobachtet etes N	Erwartete Anzahl	Residuum
1	3	4	3,3	,7		0	3,3	-3,3
2	4	4	3,3	,7	4	4	3,3	,7
3	5	1	3,3	-2,3	5	6	3,3	2,7
4	6	3	3,3	-,3		0	3,3	-3,3
5	7	1	3,3	-2,3	7	4	3,3	,7
6	8	7	3,3	3,7	8	6	3,3	2,7
Gesamt		20				20		

Vorne flach hinten steil				Kleiner Sprung			
Kategorie	Beobachtet etes N	Erwartete Anzahl	Residuum	Kategorie	Beobachtet etes N	Erwartete Anzahl	Residuum
3	3	3,3	-,3	3	8	3,3	4,7
4	5	3,3	1,7	4	5	3,3	1,7
5	7	3,3	3,7	5	1	3,3	-2,3
	0	3,3	-3,3		0	3,3	-3,3
7	3	3,3	-,3	7	2	3,3	-1,3
8	2	3,3	-1,3	8	4	3,3	,7
	20				20		

Mikroschalter				Dreieck			
Kategorie	Beobachtet etes N	Erwartete Anzahl	Residuum	Kategorie	Beobachtet etes N	Erwartete Anzahl	Residuum
3	3	3,3	-,3	3	3	3,3	-,3
	0	3,3	-3,3	4	11	3,3	7,7
5	1	3,3	-2,3	5	4	3,3	,7
6	8	3,3	4,7	6	2	3,3	-1,3
7	7	3,3	3,7		0	3,3	-3,3
8	1	3,3	-2,3		0	3,3	-3,3
	20				20		

Silikonschalter				Knackfrosch			
Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum	Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum
3	4	3,3	,7	3	3	3,3	-,3
4	2	3,3	-1,3	4	6	3,3	2,7
5	2	3,3	-1,3	5	7	3,3	3,7
6	5	3,3	1,7	6	2	3,3	-1,3
7	2	3,3	-1,3	7	2	3,3	-1,3
8	5	3,3	1,7		0	3,3	-3,3
	20				20		

Normaler Sprung			
Kategorie	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum
3	1	3,3	-2,3
4	8	3,3	4,7
5	1	3,3	-2,3
6	3	3,3	-,3
7	7	3,3	3,7
	0	3,3	-3,3
	20		

I.5.4 Ergebnisse Signifikanztest auf Gleichverteilung des Haptik-Grafik-Versuch

Tabelle 9: Signifikanzprüfung durch Chi-Quadrat Test. Prüfung auf Gleichverteilung der Haptik-Grafik-Zuordnung für Druckschalter. Ausgabe von SPSS.

(a) Bei 6 Zellen (100,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet.
Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 3,3.

	Flanke geschwungen	Sinus	Vorne_flach hinten_steil	Kleiner Sprung	Mikroschalter
Chi-Quadrat(a)	7,600	11,200	8,800	13,000	17,200
df	5	5	5	5	5
Asymptotische Signifikanz	,180	,048	,117	,023	,004
Exakte Signifikanz	,194	,048	,125	,025	,005
Punkt-Wahrscheinlichkeit	,037	,010	,026	,006	,001

	Dreieck	Silikonschalter	Knackfrosch	Normaler Sprung
Chi-Quadrat(a)	25,000	3,400	10,600	17,200
df	5	5	5	5
Asymptotische Signifikanz	,000	,639	,060	,004
Exakte Signifikanz	,000	,701	,062	,005
Punkt-Wahrscheinlichkeit	,000	,099	,014	,001

I.5.5 Faktorenanalyse zur Darstellungsart bei Drucktastern

Tabelle 10: Rotierte Komponentenmatrix der Faktorenanalyse zeigt Zusammenhänge im Antwortverhalten.
 Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: Equamax mit Kaiser-Normalisierung.
 Die Rotation ist in 5 Iterationen konvergiert.

Abfolgennummer	Kennlinie	Komponente		
		1	2	3
4	kleiner Sprung	,912	-,119	,107
8	Knackfrosch	-,866	,016	-,400
5	Mikroschalter	-,830	-,208	,242
6	Dreieck	,721	-,648	,218
1	Flanken geschwungen	,155	,975	,044
3	vorne flach hinten steil	-,088	,973	-,178
7	Silikonschaltmatte	,206	-,289	,930
9	Sprung	-,200	,323	,897
2	Sinus	,144	-,176	,583

J Pilotversuch: Adjektivfindung für translatorische Bedienelemente

J.1 Versuchsabfolge

Die Abfolge der Kennlinien ist in den folgenden Tabellen aufgeführt.

Tabelle 11: Abfolge der Kennlinien bezüglich der Parametrisierung der Flankenform.

Flankenform		Flanke nach dem Kraftsprung		
		tief	linear	hoch
Flanke vor dem Kraftsprung	tief	36	24	34
	linear	27	13	23
	hoch	9	18	20

Tabelle 12: Abfolge der Kennlinien bezüglich der Parametrisierung des Kraftsprungs.

Kraftsprung		d_F in N		
		0,5	1	2
d_x in mm	0,05	30	12	4
	0,10	22	8	17
	0,20	32	15	2

Tabelle 13: Abfolge der Kennlinien bezüglich der Parametrisierung der Lage des Kraftsprungs bei gleichem Endpunkt.

gleicher Endpunkt		Schaltkraft F_S in N		
		2	3	6
Schaltweg x_S in mm	0,25	14	28	10
	0,50	29	1	11
	0,75	5	16	21

Tabelle 14: Abfolge der Kennlinien bezüglich der Parametrisierung der Lage des Kraftsprungs bei parallelen Flanken.

Parallele Flanken		Schaltkraft F_S in N		
		2	3	6
Schaltweg x_S in mm	0,25	31	33	26
	0,50	6	7	35
	0,75	21	3	25

J.2 Eingesetzter Fragebogen zum Pilotversuch

Bitte beurteilen Sie die folgenden Bedienelemente anhand der vorgegebenen Adjektive:

Name _____

Generelle Beurteilung

	extrem	ziemlich	ein wenig	ein wenig	ziemlich	extrem		Eignung Paarung Schulnoten		
weich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	hart			
schwergängig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	leichtgängig			
minderwertig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	hochwertig			
angenehm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unangenehm			
eindeutig/ klar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Verschwommen / unklar			
widerspenstig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	willig			
prägnant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	indifferent			
schlagend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	lasch			
knautschig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	knackig			
hell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	dunkel			
scharf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	dumpf			
schwammig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	präzise			
lang	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	kurz			
schnell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	langsam			
Nehmen Sie den ‚Klick‘ / ‚Schaltpunkt‘ wahr?							JA <input type="checkbox"/>	NEIN <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	
Wenn ‚JA‘, WO nehmen Sie ihn wahr?							früh <input type="checkbox"/>	mittig <input type="checkbox"/>	spät <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>

Gesamturteil über das vorliegende Bedienelement:

Bitte ankreuzen:

schlecht				eher schlecht				mittelmäßig				eher gut				sehr gut			
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bedienelement Nr. _____

Abbildung 56: Bipolarer Fragebogen zum Pilotversuch zur Ermittlung geeigneter Adjektivpaare für Drucktaster.

J.3 Faktorenanalyse

Tabelle 15: Rotierte Komponentenmatrix der Faktorenanalyse. Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung. Die Rotation ist in 6 Iterationen konvergiert. Die Bewertung der Eignung basiert auf Schulnoten und ist normiert dargestellt. Dabei ist ein positiver hoher Wert als sehr gut geeignet einzustufen.

	Komponente				Eignung
	1	2	3	4	
eindeutigklar_verschwo mmenunklar	,920	,052	,203	-,029	-0,15
minderwertig_hochwertig	-,871	-,087	-,094	,097	-0,09
schwammig_präzise	-,858	,107	-,260	-,228	0,13
schlagend_lasch	,802	-,270	,081	,257	0,01
scharf_dumpf	,783	-,270	,215	,246	0,16
prägnant_indifferent	,782	-,087	,109	-,130	0,00
Wertung_SCHLECHT_GUT	-,769	-,513	-,123	-,153	Nicht bewertet
knautschig_knackig	-,753	,252	-,335	-,012	0,08
angenehm_unangenehm	,680	,679	,032	,198	0,10
widerspenstig_willig	,007	-,946	-,009	-,159	0,09
weich_hart	-,450	,842	-,152	,053	0,02
schwergängig_leichtgängig	,160	-,722	-,041	,092	0,05
hell_dunkel	,182	,469	,280	-,391	-0,29
lang_kurz	-,113	,144	-,926	,023	0,10
schnell_langsam	,479	,243	,722	,339	-0,18
Schaltpunkt_JA_NEIN	,463	,240	,521	,156	-0,02
LageSP_früh_spät	,143	,116	,185	,920	0,00

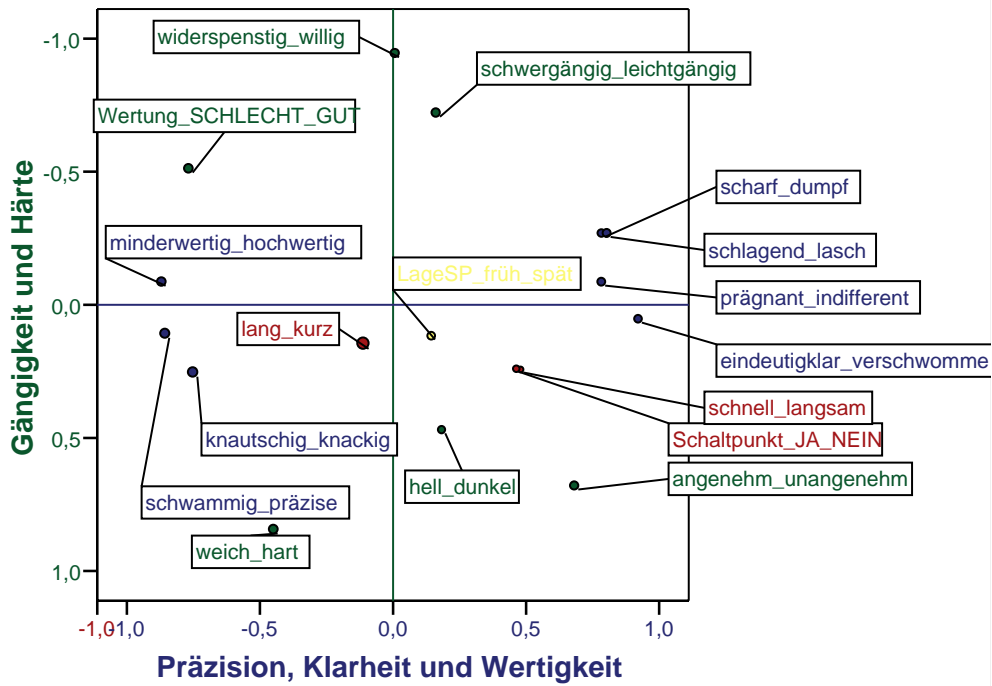


Abbildung 57: Komponentendiagramm im rotierten Raum. Komponenten Gängigkeit und Härte sowie Präzision, Klarheit und Wertigkeit.

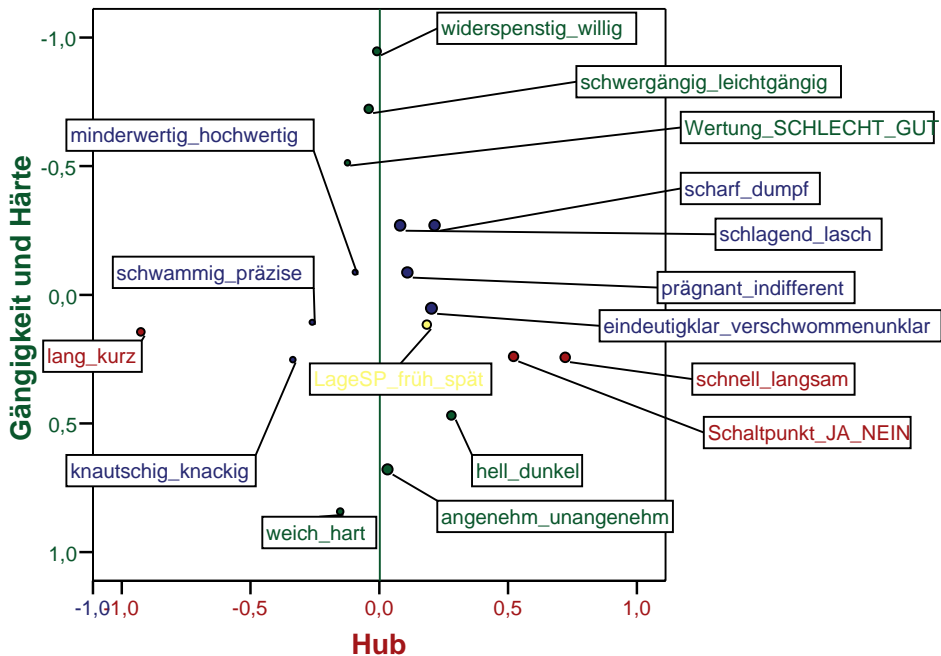


Abbildung 58: Komponentendiagramm im rotierten Raum. Komponenten Gängigkeit und Härte sowie Hub.

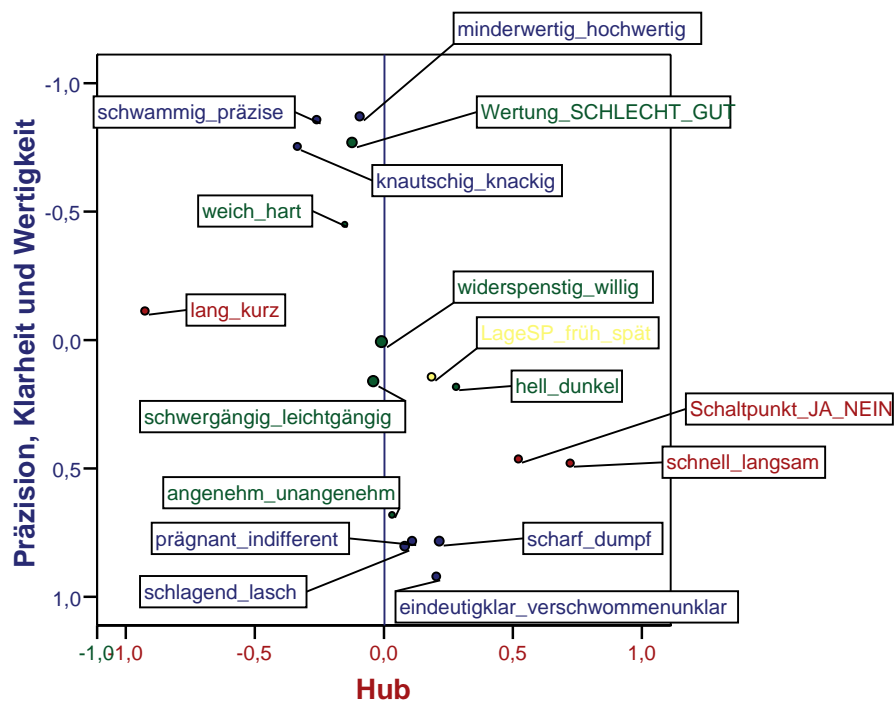


Abbildung 59: Komponentendiagramm im rotierten Raum. Komponenten Hub sowie Präzision, Klarheit und Wertigkeit.

J.4 Fragenbogenentwurf aus Pilotversuch

Im Pilotversuch entwickelter Fragebogen.

Bitte beurteilen Sie die folgenden Bedienelemente anhand der vorgegebenen Adjektive:

Name _____

Generelle Beurteilung

	extrem	ziemlich	ein wenig	ein wenig	ziemlich	extrem	
hart	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weich
leichtgängig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	schwergängig
minderwertig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	hochwertig
schwammig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	präzise
lang	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	kurz

Nehmen Sie den ‚Klick‘ / ‚Schaltpunkt‘ wahr? JA NEIN

Wenn ‚JA‘, WO nehmen Sie ihn wahr? früh Mitte spät

Gesamturteil über das vorliegende Bedienelement:

Bitte ankreuzen:

schlecht				eher schlecht				mittelmäßig				eher gut				sehr gut			
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 60: Fragebogen zum Hauptversuch zur Parametrisierung verschiedener Kennlinien.

K Versuch: Parametrisierung der translatorischen Kennlinie

K.1 Versuchsabfolge der zu bewertenden Charakteristika

Tabelle 16: Abfolge der Kennlinien zur Parametrisierung von Drucktastern. Die zugehörigen Kennlinien sind in Kapitel 6 zu aufgeführt.

Nr.	Kennlinie
1	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,50 mm / 3N
2	Kraftsprung 0,20 mm / 2N
3	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 0,75 mm / 3N
4	Kraftsprung 0,05 mm / 2N
5	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,75 mm / 2N
6	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 0,50 mm / 2N
7	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 0,50 mm / 3N
8	Kraftsprung 1,0 mm / 100N
9	variierende Flanken vorne hoch hinten tief
10	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,25 mm / 6N
11	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,50 mm / 6N
12	Kraftsprung 0,05 mm / 1N
13	variierende Flanken normal
14	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,25 mm / 2N
15	Kraftsprung 0,20 mm / 1N
16	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,75 mm / 3N
17	Kraftsprung 100N / 2N
18	variierende Flanken vorne hoch
19	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 0,75 mm / 2N
20	variierende Flanken vorne hoch hinten hoch
21	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,75 mm / 6N
22	Kraftsprung 0,10 mm / 0,5N
23	variierende Flanken hinten hoch
24	variierende Flanken vorne tief
25	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 0,75 mm / 6
26	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 0,25 mm / 6N
27	variierende Flanken hinten tief
28	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,25 mm / 3N
29	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,50 mm / 2N
30	Kraftsprung 0,05 mm / 0,5N
31	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 0,25 mm / 2N
32	Kraftsprung 0,20 mm / 0,5N
33	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 0,25 mm / 3N
34	variierende Flanken vorne tief hinten hoch

- 35 parallele Flanken, Schaltpunkt bei 0,50 mm / 6N
- 36 variierende Flanken vorne tief hinten tief

K.2 Faktorenanalyse des Antwortverhaltens

K.2.1 Faktorenanalyse ausschließlich Bewertungskriterien

Tabelle 17: Rotierte Komponentenmatrix der Bewertungskriterien nach SPSS. Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung. Die Rotation ist in 5 Iterationen konvergiert

	Komponente		
	1	2	3
Minderwertig - Hochwertig	,927	-,112	,076
sehr schlecht - sehr gut	,920	-,223	-,144
Schaltpunkt vorhanden?	,632	,289	,436
Leichtgängig - Schwergängig	-,180	,944	,006
Weich - Hart	-,164	,892	,280
Schwammig - Präzise	,563	,761	,081
Lage Schaltpunkt spät - früh	,251	-,051	,905
Lang - Kurz	-,229	,322	,699

K.2.2 Faktorenanalyse Bewertungskriterien und technischen Parameter

Die Bewertungskriterien werden im Folgenden gemeinsam mit dem Verhalten grundlegender technischen Parameter analysiert. Zur besseren Übersicht in der Komponentenmatrix sind hohe Korrelationen, aber auch die jeweils größten Korrelationen einer Eigenschaft fett hervorgehoben. Die subjektiven Bewertungsgrößen sind kursiv, die technischen Parameter normal dargestellt. Komponenten die keine Beziehung zu subjektiven Größen haben, sind mit (*) gekennzeichnet. Die Faktoren F1 und F2 aus der vorigen Faktorenanalyse sind ebenfalls zugeordnet.

Tabelle 18: Rotierte Komponentenmatrix von Bewertungskriterien und Parametern nach SPSS. Adjektivpaare sind kursiv dargestellt. Die mit (*) gekennzeichneten Komponenten beschreiben rein technische Zusammenhänge.
Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung. Die Rotation ist in 29 Iterationen konvergiert.

	Komponente						
	1 – F2	2 – F2	3(*)	4	5	6	7(*)
<i>Leichtgängig - Schwergängig</i>	,950	,048	,080	,079	,043	,007	-,075
Höhe Schaltpunkt F _s klein – groß	,920	,027	,277	-,008	-,070	,028	,062
<i>Weich – Hart</i>	,868	,270	,169	-,134	,063	-,054	-,124
Höhe gesamt F _E klein – groß	,648	,170	,527	-,222	-,282	,033	-,001
<i>sehr schlecht - sehr gut</i>	-,549	,394	,153	,522	,316	,100	-,154
Länge Kraftsprung dx kurz – lang	-,115	-,862	,064	,103	,342	,015	-,054
Steigung Kraftsprung dF/dx flach – steil	,129	,858	,025	-,034	-,242	,070	,058
<i>Schaltpunkt vorhanden?</i> <i>nein – ja</i>	,134	,765	-,068	,204	,365	-,222	-,022
<i>Lage Schaltpunkt</i> <i>spät – früh</i>	-,062	,639	,036	-,119	-,120	-,568	-,114
<i>Schwammig - Präzise</i>	,486	,594	,240	,372	,216	,253	-,087
<i>Minderwertig - Hochwertig</i>	-,443	,546	,250	,533	,113	,137	-,136
Steigung nach SP (F/x) _n weniger – mehr	,307	-,040	,874	,064	-,109	-,044	,016
Länge gesamt x _E kurz – lang	-,150	-,008	-,849	,313	,068	,027	-,030
Länge Schaltpunkt x _s kurz – lang	,084	-,049	-,244	,863	-,088	-,074	,069
Steigung vor SP F _s /x _s flach – steil	,571	,064	,426	-,623	-,055	,032	,030
Höhe Kraftsprung dF klein – groß	,092	-,064	-,078	-,084	,884	-,035	-,012
<i>Lang – Kurz</i>	,357	,363	,261	-,158	-,695	-,047	-,169
Vordere Flanke F _v hoch – tief	-,018	-,002	-,039	-,061	-,056	,900	-,013

Hintere Flanke F_n hoch – tief	-,068	,015	,042	,006	,047	,017	,978
-------------------------------------	-------	------	------	------	------	------	-------------

K.3 Ergebnisse aus dem Hauptversuch

Die Tabellen zeigen das Antwortverhalten der Versuchsreihe in Form der normierten Mittelwerte. Die erste Spalte zeigt die Nummer der Kennlinienabfolge im Versuch. Die Beschreibung der Kennlinienform ist in der letzten Spalte aufgeführt.

K.3.1 Variation der Schaltpunktlage F_s , x_s bei parallelen Flanken

Tabelle 19: Ergebniswerte in Form normierter Mittelwerte der einzelnen Bewertungen bei Variation der Lage des Kraftsprungs mit F_s , x_s bei parallelen Flanken.

Nr.	hart - weich	leichtgängig - schwergängig	minderwertig - hochwertig	lang - kurz	schwammig - präzise	Beurteilung	SP vorhanden	Lage SP	Kennlinie Variation x_s / F_s
34	-0,2871	-0,9637	-0,0823	1,0808	0,1827	0,0765	0,90	-0,39	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 250/2
36	-1,1142	-0,4986	-0,1438	1,2976	0,1949	-0,4115	0,75	-0,60	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 250/3
29	-1,3276	0,1344	-0,0869	1,3010	0,4620	-0,3499	0,85	-0,35	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 250/6
6	0,4509	-0,6770	0,0527	0,6518	0,1662	0,1357	0,95	-0,32	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 500/2
7	-0,9581	0,1561	0,3290	0,8154	0,7881	0,3570	0,95	-0,53	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 500/3
38	-1,2942	0,9041	-0,2933	1,0433	0,6053	-0,4003	0,95	-0,21	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 500/6
21	0,3156	-1,1315	-0,2216	-0,0346	-0,0890	-0,2429	0,90	-0,28	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 750/2
3	-0,1656	-0,5343	0,2545	0,6183	0,1212	0,3015	0,95	-0,37	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 750/3
28	-1,6149	0,8455	-0,2556	1,1566	0,6881	-0,6427	1,00	-0,30	parallele Flanken, Schaltpunkt bei 750/6

K.3.2 Variation der Schaltpunktlage F_S , x_S bei gleichem EndpunktTabelle 20: Ergebniswerte in Form normierter Mittelwerte der einzelnen Bewertungen bei Variation der Lage des Kraftsprungs mit F_S , x_S bei gleichem Endpunkt.

Nr.	hart - weich	leichtgängig - schwergängig	minderwertig - hochwertig	lang - kurz	schwammig - präzise	Beurteilung	SP vorhanden	Lage SP	Kennlinie Variation x_S / F_S
5	0,4609	-1,4191	-0,0508	1,0645	0,1588	0,0451	0,85	-0,41	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,75 mm / 2 N
17	-0,9959	-0,1867	0,0681	0,8283	0,3244	0,3480	1,00	-0,50	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,75 mm / 3 N
23	-1,5495	1,0973	-0,0147	0,7493	0,9378	-0,2943	0,95	-0,21	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,75 mm / 6 N
32	0,2738	-1,0927	0,0416	0,1791	0,1674	0,0894	0,95	-0,37	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,50 mm / 2 N
1	-0,7538	-0,5589	0,2963	0,7744	0,4752	0,3737	0,95	-0,42	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,50 mm / 3 N
11	-1,4071	0,7161	-0,1965	1,0746	0,4698	-0,1454	0,95	-0,50	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,50 mm / 6 N
15	-0,2356	-1,2423	-0,1958	0,3748	-0,3482	-0,1836	0,90	-0,44	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,25 mm / 2 N
31	-0,3108	-0,3990	-0,2764	0,5927	0,1855	-0,3152	0,90	-0,28	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,25 mm / 3 N
10	-1,7291	1,1031	-0,6076	0,8936	0,3999	-0,9698	0,90	-0,28	gleicher Endpunkt, Schaltpunkt bei 0,25 mm / 6 N

K.3.3 Variation der Schaltpunktlage F_S , x_S bei gleichem EndpunktTabelle 21: Ergebniswerte in Form normierter Mittelwerte der einzelnen Bewertungen bei Variation der Flanken mit F_v , F_n .

Nr.	hart - weich	leichtgängig - schwergängig	minderwertig - hochwertig	lang - kurz	schwammig - präzise	Beurteilung	SP vorhanden	Lage SP	Kennlinie Variation F_v / F_n
39	-0,0815	-0,8523	0,3640	0,2581	0,6029	0,2219	1,00	-0,25	variierende Flanken

30	0,1303	-0,7556	0,1750	0,2935	0,3580	0,3752	1,00	-0,20	vorne tief hinten tief variierende Flanken hinten tief
9	-0,5217	-0,2267	0,2041	0,1380	0,4182	0,3923	0,95	-0,58	vorne hoch hinten tief variierende Flanken
26	-0,4477	-0,2902	-0,0940	0,5385	0,4647	0,0314	1,00	-0,35	vorne tief variierende Flanken
14	0,2410	-0,5214	0,4887	0,2134	0,6099	0,5885	0,95	-0,42	normal variierende Flanken
20	-0,5011	-0,5205	-0,0139	0,2421	0,3831	0,1640	0,90	-0,44	vorne hoch variierende Flanken
37	-0,6205	-0,3171	0,2645	0,5930	0,6575	0,4342	1,00	-0,50	vorne tief hinten hoch variierende Flanken
25	-0,5534	-0,5021	0,4330	0,5901	0,6217	0,5205	1,00	-0,45	hinten hoch variierende Flanken
22	-0,6312	-0,0329	0,1798	0,7596	0,3896	0,3504	1,00	-0,30	vorne hoch hinten hoch variierende Flanken

K.3.4 Variation des Kraftsprungs dF, dx

Tabelle 22: Ergebniswerte in Form normierter Mittelwerte der einzelnen Bewertungen bei Variation des Kraftsprungs mit dF, dx.

Nr.	hart - weich	leichtgängig - schwergängig	minderwertig - hochwertig	lang - kurz	schwammig - präzise	Beurteilung	SP vorhanden	Lage SP	Kennlinie Variation dF / xS
33	-0,0044	-0,4368	-0,1914	1,0884	-0,1093	-0,5851	0,75	-0,40	Kraftsprung 0,50 N / 0,05 mm
24	0,3695	-0,8374	-0,3725	0,8889	-0,4738	-0,7569	0,65	-0,23	Kraftsprung 0,50 N / 0,10 mm
35	0,2390	-0,3643	-0,2260	-0,1181	-0,2712	-0,0158	0,55	0,18	Kraftsprung 0,50 N / 0,20 mm
13	-0,0078	-0,6189	0,0821	0,4083	0,2426	0,0143	0,85	-0,38	Kraftsprung 1,0 N / 0,05 mm
8	-0,0156	-0,4623	0,2278	0,0221	0,3613	0,3584	0,95	-0,11	Kraftsprung 1,0 N / 0,10 mm
16	0,0461	-0,5115	0,1644	-0,1359	0,2342	0,4436	0,85	0,00	Kraftsprung

									1,0 N / 0,20 mm
4	-0,9180	-0,3020	-0,2304	0,2300	0,2491	-0,3428	0,95	-0,32	Kraftsprung 2,0 N / 0,05 mm
18	-0,5595	-0,2748	-0,4219	-0,5548	-0,0510	-0,2342	0,95	-0,17	Kraftsprung 2,0 N / 0,10 mm
2	-0,3530	-0,3787	-0,4337	-0,4718	0,2098	-0,1947	0,75	-0,13	Kraftsprung 2,0 N / 0,20 mm

K.3.5 Signifikanztest auf Gleichverteilung bei Bewertung Schaltpunkt vorhanden

Die Ergebniswerte für die Bewertung über das Vorhandensein des Schaltpunktes der vier Parametersätze aus Tabelle 19 bis Tabelle 22 werden mittels χ^2 -Test auf Gleichverteilung geprüft. Es wird ein exakter Test bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ durchgeführt. Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse des Tests. Nur der Kraftsprung erfüllt den mit $p = 50,8\%$ Test nicht und ist damit nicht als gleichverteilt zu betrachten.

Tabelle 23: Statistik für Test Bei 2 Zellen (100,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet.
Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 4,5.

	Parallele_ Flanken	gleicher_ Endpunkt	Kraftsprung	Flankenform
Chi-Quadrat(a)	5,444	5,444	1,000	9,000
df	1	1	1	1
Asymptotische Signifikanz	,020	,020	,317	,003
Exakte Signifikanz	,039	,039	,508	,004
Punkt-Wahrscheinlichkeit	,035	,035	,328	,004