

Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart

Forschungs- und Lehrgebiet
Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. T. Maier

Thomas Hampel

**Untersuchungen und Gestaltungshinweise
für adaptive multifunktionale Stellteile mit
aktiver haptischer Rückmeldung**

Bericht Nr. 594

Untersuchungen und Gestaltungshinweise für adaptive multifunktionale Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung

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

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Thomas Hampel
geboren in Ellwangen (Jagst)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier

Mitberichterin: Univ. Prof. Dr. phil. habil. Dr.-Ing. Birgit Spanner-Ulmer (TU Chemnitz)

Tag der Einreichung: 27.04.2011

Tag der mündlichen Prüfung: 18.07.2011

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

2011

D 93

ISBN: 978-3-922823-78-0

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon: +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: mail@iktd.uni-stuttgart.de

„Ich fühle mit sehendem Aug‘
und sehe mit fühlender Hand.“
(Johann Wolfgang von Göthe)

Für meine Familie.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design der Universität Stuttgart. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier für das entgegengebrachte Vertrauen und die Betreuung, die zum Gelingen dieser Arbeit entscheidend beigetragen hat. Desweiteren danke ich Frau Prof. Dr.phil.habil. Dr.-Ing. Birgit Spanner-Ulmer für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Die vorliegende Arbeit wurde durch eine Spende der Hilti AG ermöglicht. Beim Aufbau des Prüfstands erhielt ich Unterstützung von der EST Elektronische Schraub- + Steuerungstechnologie GmbH & Co. KG sowie von dem Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe (ILEA) der Universität Stuttgart. Allen drei Institutionen möchte ich für die Unterstützung meinen Dank aussprechen.

Desweiteren möchte ich Herrn Dipl.-Psych. Florian Wickelmaier, Ph.D. des Psychologischen Instituts der Eberhard Karls Universität Tübingen für die Beratung und Durchsicht der statistischen Auswertung meiner Ergebnisse danken.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts möchte ich mich für die fachlichen Diskussionen und Ratschläge bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Darüber hinaus gilt mein Dank den Mitarbeitern der Institutswerkstatt, ohne die die technische Realisierung der Prüfstände nicht möglich gewesen wäre.

Stuttgart, im Juli 2011

Thomas Hampel

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen und Einheiten	VII
Abstract.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Struktur und Zielsetzung der Arbeit	3
1.3 Abgrenzung zu anderen Arbeiten	5
2 Grundlagen zur Mensch-Maschine-Interaktion	7
2.1 Wahrnehmung und Kognition	7
2.1.1 Wahrnehmungsprozess	7
2.1.2 Tastsinn.....	8
2.1.3 Multimodalität	13
2.1.4 Psychophysische Grundlagen.....	13
2.1.4.1 Sensorische Schwellen	14
2.1.4.2 Methoden zur Schwellenmessung	15
2.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle	16
2.2.1 Stellteile.....	17
2.2.2 Passive und aktive Stellteile	19
2.2.3 Anzeigen	20
2.3 Empirische Versuche	21
3 Adaptive multifunktionale Stellteile – Stand der Technik und Forschung.....	23
3.1 Komponentenauswahl für adaptive multifunktionale Stellteile	23
3.1.1 Stellteile.....	24
3.1.2 Aktoren.....	24
3.1.3 Sensoren.....	27
3.1.3.1 Drehwinkelsensoren	28
3.1.3.2 Drehmomentsensoren	29
3.1.4 Weitere Komponenten.....	31
3.2 Forschungsschwerpunkte für ein adaptives multifunktionales Stellteil.....	33
3.2.1 Stellgenauigkeit	33
3.2.2 Komfortbereiche	36
3.2.3 Unterschiedsschwelle.....	39
3.3 Forschungsarbeiten zur aktiven haptischen Rückmeldung.....	42
3.3.1 Verarbeitungszeit der haptischen und taktilen Wahrnehmung	42
3.3.2 Lerneffekte der haptischen Wahrnehmung	42
3.3.3 Untersuchung zum optimalen Stellteildurchmesser.....	42

3.3.4	Untersuchungen zum Fehlen taktiler und haptischer Rückmeldungen...	43
3.3.5	Untersuchungen zur akustischen Rückmeldung bei Stellteilen	44
3.4	Stand der Technik aktiver Eingabegeräte	44
3.4.1	Multifunktionale Stellteile mit aktiver haptischer oder taktiler Rückmeldung.....	44
3.4.2	Rotatorische multifunktionale Stellteile mit aktiver Drehmomentrückmeldung	47
4	Adaptive Drehmomente zur Informationsübertragung	49
4.1	Veränderliche Parameter am Stellteilsystem	49
4.2	Aufbau der Prüfstände	52
4.2.1	Prüfstand mit passiver Drehmomenterzeugung.....	52
4.2.2	Prüfstand mit aktiver Drehmomenterzeugung	57
4.3	Versuchsparameter und -durchführung.....	58
5	Schwerpunktorientierte Untersuchungen	62
5.1	Untersuchung zur Stellgenauigkeit	62
5.1.1	Hypothesen	62
5.1.2	Versuchsbeschreibung	62
5.1.3	Versuchsergebnisse	65
5.1.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	70
5.2	Untersuchung zum Komfortbereich.....	71
5.2.1	Hypothesen	71
5.2.2	Versuchsbeschreibung	71
5.2.3	Versuchsergebnisse	74
5.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	78
5.3	Untersuchung zur Unterschiedsschwelle	79
5.3.1	Hypothesen	79
5.3.2	Versuchsbeschreibung	79
5.3.3	Versuchsergebnisse	83
5.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	90
6	Kombinierte Untersuchungen	93
6.1	Hypothesen.....	93
6.2	Versuchsbeschreibung.....	93
6.3	Versuchsergebnisse.....	97
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	109
7	Evaluation durch anwendungsorientierte Untersuchungen	113
7.1	Hypothesen.....	113
7.2	Allgemeine Versuchsbeschreibung.....	113

7.3	Aufgabengruppe 1 – Einfache Erkennungs- und Positionieraufgaben.....	116
7.3.1	Versuchsbeschreibung	116
7.3.2	Versuchsergebnisse	118
7.4	Aufgabengruppe 2 – Lernaufgaben	120
7.4.1	Versuchsbeschreibung	120
7.4.2	Versuchsergebnisse	123
7.5	Aufgabengruppe 3 – Dekodieraufgaben	127
7.5.1	Versuchsbeschreibung	127
7.5.2	Versuchsergebnisse	129
7.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	130
8	Gestaltungshinweise für multifunktionale Stellteile	132
9	Zusammenfassung	137
10	Ausblick	140
	Literatur	142
	Anhang	151
A1	Steuerungsplan und Bedienoberfläche des Prüfstands	151
A2	Fragebögen	154
A3	Erweiterte Auswertung der kombinierten Untersuchung	161
A3	Anwendungsorientierte Untersuchung – Drehmomentverläufe.....	164

Bezeichnungen und Einheiten

Abkürzungen

DMS	Dehnmessstreifen
Exp/Log	exponentiell/logarithmischer Drehmomentverlauf
FSZ	flacher sägezahnförmiger Drehmomentverlauf
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
SIN	sinusförmiger Drehmomentverlauf
SMS	Sensomotorisches System
SSS	Somatosensorisches System
SSZ	steiler sägezahnförmiger Drehmomentverlauf
VRK	Versuchsreihe zum Komfortempfinden
VRS	Versuchsreihe zur Stellgenauigkeit
VRU	Versuchsreihe zur Unterschiedserkennung
ZNS	Zentrales Nervensystem

Formelzeichen

Symbol	Einheit ¹	Erläuterung
α	°	steigender Flankenwinkel
A	Nm	Drehmomentamplitude
α_{BAK}	°	Winkel zur Bewertungskennzahl
β	°	fallender Flankenwinkel
BAK	%	Bewertungskennzahl für Amplitudenkombinationen
ΔM	Nm	Drehmomentdifferenz
ΔS	-	Reizzuwachs
ΔT	Nm	Reibungsversatz des Drehmoments
E	-	Empfindungsstärke
ER	%	Erkennungsrate
F_F	N	Anpresskraft der Feder
F_H	N	horizontal wirkende Kraft
F_N	N	Normalkraft
HEP	-	Human Error Probability
Incr.	-	Increments (Abstufungen)
ϑ	°	Rastwinkel
k	-	den Schwellenwert beschreibende Konstante nach Stevens
K	-	Weber Quotient
m	-	Sensortyp-spezifischer Exponent nach Stevens
M	Nm	Drehmoment
MW	-	Mittelwert

¹ Die angeführten Einheiten dienen nur der Veranschaulichung der zugehörigen Größen [DIN1304-1] und werden im weiteren Verlauf als dezimale Teile oder Vielfache davon mit Vorsätzen oder Vorsatzzeichen nach [DIN1302-2] dargestellt.

Symbol	Einheit	Erläuterung
N	-	Summe aufgetretener Fehler
n	-	Summe möglicher Fehler
p	-	Wahrscheinlichkeit
POS	-	Positioniervorgänge
POS _{korrekt}	-	korrekter Positioniervorgang
r	mm	Kurvenscheibenradius
R	N/m	Federrate
R	Ω	elektrischer Widerstand
S	-	Reizstärke
S ₀	-	Schwellenreizstärke
S _A	-	Reizstärke des Ausgangsreizes
S _V	-	Reizstärke des Vergleichsreizes
SD	-	Standard Deviation (Standardabweichung)
SF	-	Skalierungsfaktor
SG	%	Stellgenauigkeit
T	-	Teilung
U	mm	Kurvenscheibenumfang
U	V	elektrische Spannung
Umdr.	-	Umdrehung
US _{richtig}	-	richtig erkannter Unterschied
V _{SF}	-	Vergleiche bei einem Skalierungsfaktor
x	mm	Zahnhöhe

Abstract

The number of operable functions of a product is associated with the number of operating elements and displays. If there are too many elements and displays, the user friendliness is affected because of the increased complexity of this kind of human machine interface. To reduce this complexity, the substitution of many single operating elements by one adaptive multifunctional operating element is a possible solution of this problem. An adaptive multifunctional operating element is defined as an element for the operation of several functions. Because of its active components and the haptical feedback resulting from these components, an adaptive multifunctional operating element can be adapted to the situation, the user or the task. Therefore, with such an operating element, it is not only possible to haptically transmit information, which, up to now, are displayed visually but also to reduce operating errors (see Figure 1).

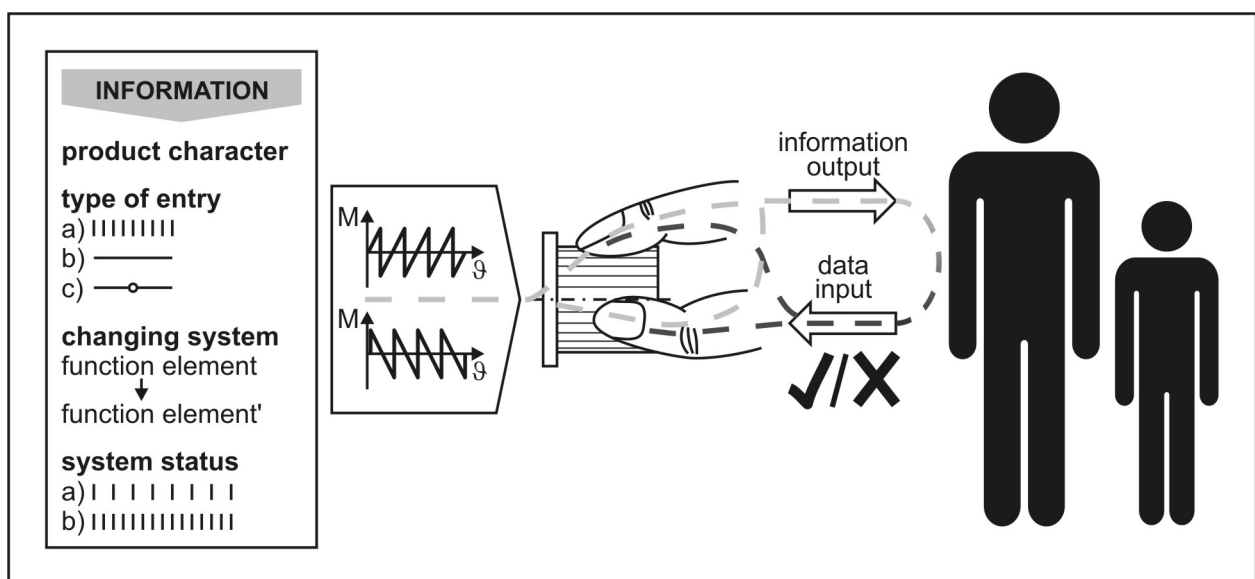


Figure 1: Scheme for the interaction of an adaptive multifunctional operating element with active haptical feedback [HAMPEL09C]

However, for an optimal design of an adaptive multifunctional operating element, the usage conditions must be examined and optimized according to the kind of the haptical feedback. A high positioning accuracy and the perception of the differences, which are among to these usage conditions, as well as the range of the operating forces or moments ensure that the users felt comfortable. Therefore, these three conditions (positioning accuracy, comfort ranges, perception of differences) were determined as the main topics of the following thesis.

A detailed research concerning the state of the art and the present state of knowledge proved that a rotary knob is the best operating element for an adaptive multifunctional element. The rotary movement of this kind of operating element provides an unlimited displacement. Furthermore, it offers the possibility to transmit a lot of different information by changing the torque function. For these reasons, a torque test bench for studies on inconstant torque paths was built up. With this test bench, the torque paths can be generated either passively by mechanics or actively by an electric motor and an open loop control. The test bench offers the possibility to change the kind of value input, the kind of torque paths and the torque path parameters.

In this thesis, mainly the discrete kind of value input was examined by analyzing a falling and a rising saw tooth-shaped torque function as well as a sine-shaped torque function. Also the torque amplitudes and the rotary angles were varied (see Figure 2).

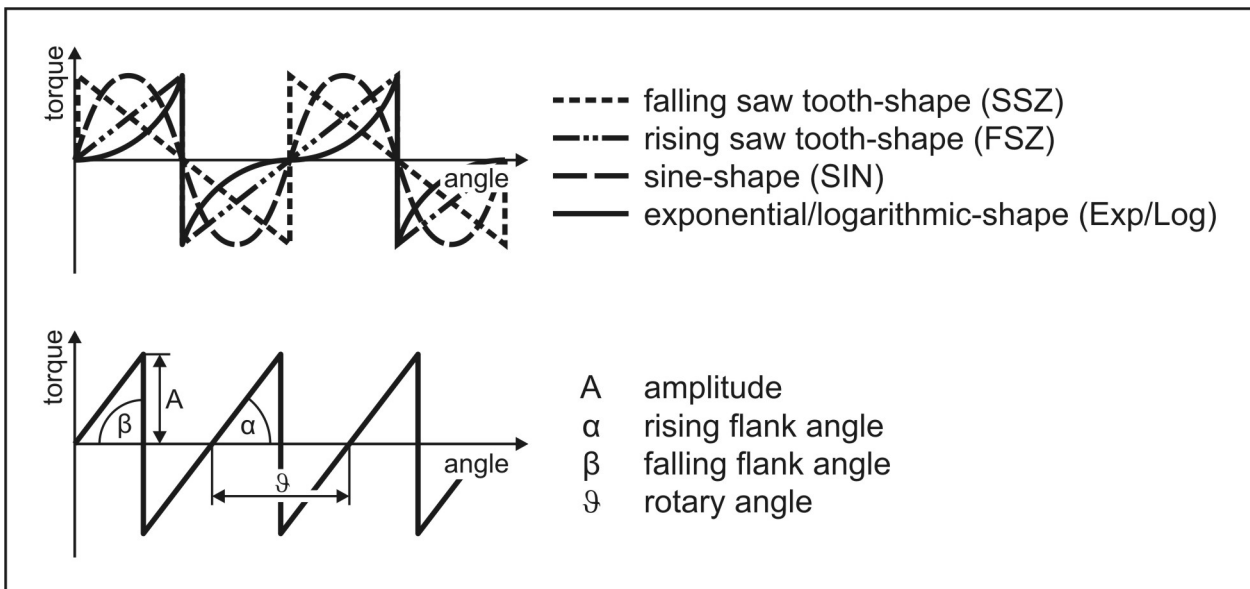


Figure 2: Different kind of torque functions and torque function parameters of a discrete value input

Five examinations were carried out sectioned in examinations of single and combined main topics and an application-oriented examination. A high external validity of the results could be reached by mostly using public places for the examinations. Moreover, the different places led to a group of subjects with a wide range of ages and heterogeneous occupation. This group was very suitable for an expanded data ascertainment.

The result of the first examination showed that a torque of at least 0.06 Nm and a minimum rotary angle of 20° with a discrete kind of value input are required for a high positioning accuracy. Furthermore, the kind of torque functions is rather unimportant. In

this examination, it could also be focused, that the positioning errors especially occurred in the first positioning movements.

In the second examination, it was determined that a torque amplitude is felt comfortable if it lies in the range between 0.07–0.17 Nm. The optimum torque amplitude of a rising saw tooth-shaped torque function was found at a value of 0.09 Nm. Compared with that, a small movement of this optimum to higher values of the torque amplitude resulted in a falling saw tooth-shaped torque function.

The examination concerning the perception of differences showed a clear influence of the initial torque amplitude. Therefore, compared to an initial torque amplitude of 0.08 Nm, the scale of an initial torque amplitude of 0.15 Nm must be smaller to make differences recognizable. However, an influence of the scaling direction (enlargement or reduction of the initial torque amplitude) could not be confirmed in this examination. A further result of this examination was the fact that the difference threshold with an initial torque amplitude of 0.08 Nm is reached at a scaling factor of 1.14 and that with an initial torque amplitude of 0.15 Nm a scaling factor of 1.10 is required.

In the next examination, the positioning accuracy and the perception of differences were analyzed with regard to their interdependency. Because of the very short operating displacement in this examination, higher scaling factors ($SF \geq 1.2$) had to be used to reach similarly high values of the difference perception as in the previous examination. The analysis of the results revealed that too big differences of the torque amplitudes influence the positioning accuracy negatively. However, small differences of the torque amplitudes and an additional friction in the system to which the operating element is connected to have a positive effect on the positioning accuracy. A well-balanced ratio between the perception of differences and the positioning accuracy could be ascertained with a scaling factor of 1.5.

At the end of this research project, all results of the previous examinations were implemented in selected examples in an application-oriented examination. The analysis of this examination led to controversial results. Only a part of the subjects was able to fulfill most of the tasks correctly. Furthermore, a high cognitive load could be ascertained with all subjects during the experiment. Therefore, recommendations for the use of an adaptive multifunctional operating element with active haptical feedback in a real application were formulated. For this purpose, the usage conditions and the requirements for the interaction must be determined to allow a pre-selection of the maximum number of different torque functions and function parameters.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Sowohl bei Produkten aus dem Konsum- als auch aus dem Investitionsgüterbereich ist der Trend erkennbar, dass die Anzahl bedienbarer Funktionen stetig zunimmt. Damit einher geht die wachsende Anzahl an Stellteilen und Anzeigen der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Eine Möglichkeit, diesem Problem entgegenzuwirken, ist das Ersetzen vieler Stellteile durch ein einzelnes, zentral angebrachtes Stellteil, mit dem mehrere Funktionen bedient werden können. Um Fehlinterpretationen bei der Betätigung dieses Stellteils zu vermeiden, darf dessen Form keine Zeigereigenschaft besitzen und muss sich in jeder Position gleich greifen lassen. Durch diese Reduzierung auf ein formneutrales, zentrales Bedienelement entfällt jedoch die Möglichkeit, dem Stellteil aufgrund seiner Position und Ausrichtung eine Funktion zuzuordnen zu können. Dieser Zielkonflikt aus Reduktion der Bedienvielfalt und dem Verlust an dargestellten Informationen lässt sich mit einer zusätzlichen visuellen Anzeige, auf der die gerade aktuellen Funktionen und Funktionswerte dargestellt werden, lösen. Gleichermäßen kann die verlorengangenen Informationen durch eine zusätzliche akustische Signalgebung ausgeglichen werden. Häufig sind beide Lösungswege wegen der Notwendigkeit, die visuelle Aufmerksamkeit auf andere Dinge zu richten, und wegen einer lauten Arbeitsumgebung, nicht möglich. Die einzig verbleibende Möglichkeit ist deshalb, die notwendigen, aber fehlenden Informationen über eine haptische Anzeige zu übermitteln (vgl. Bild 1.1).

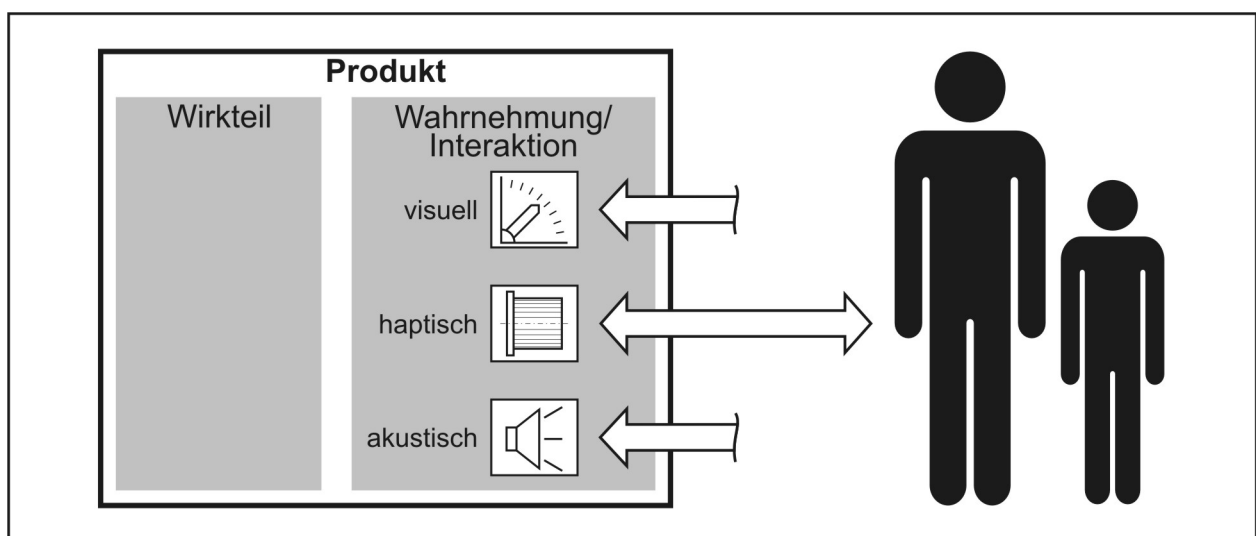


Bild 1.1: Mögliche Arten der Informationsübermittlung und Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Produkt, nach [HAMPEL09C]

Gleichzeitig ergeben sich durch die Verwendung einer haptischen Anzeige weitere Vorteile. Neben der Übermittlung von Informationen lassen sich durch geeignete Betätigungskräfte am Stellteil Eingabefehler reduzieren, indem die Kräfte individuell an jeden Benutzer angepasst werden. Auch eine unterschiedliche Produkthanmung ist zum Beispiel durch entsprechend „komfortable“ oder „sportlich“ empfundene Stellkräfte denkbar. Ein passendes Basisschema zur Mensch-Maschine-Interaktion ist in Bild 1.2 dargestellt. Darin abgebildet sind verschiedene Informationsarten, die durch unterschiedliche haptische Rückmeldungen an die Benutzer übertragen werden können. Wie im ursprünglichen Sinne dient das Stellteil als Eingabeelement. Durch die aktive haptische Rückmeldung wird es nun aber auch zu einem Ausgabeelement für Informationen.

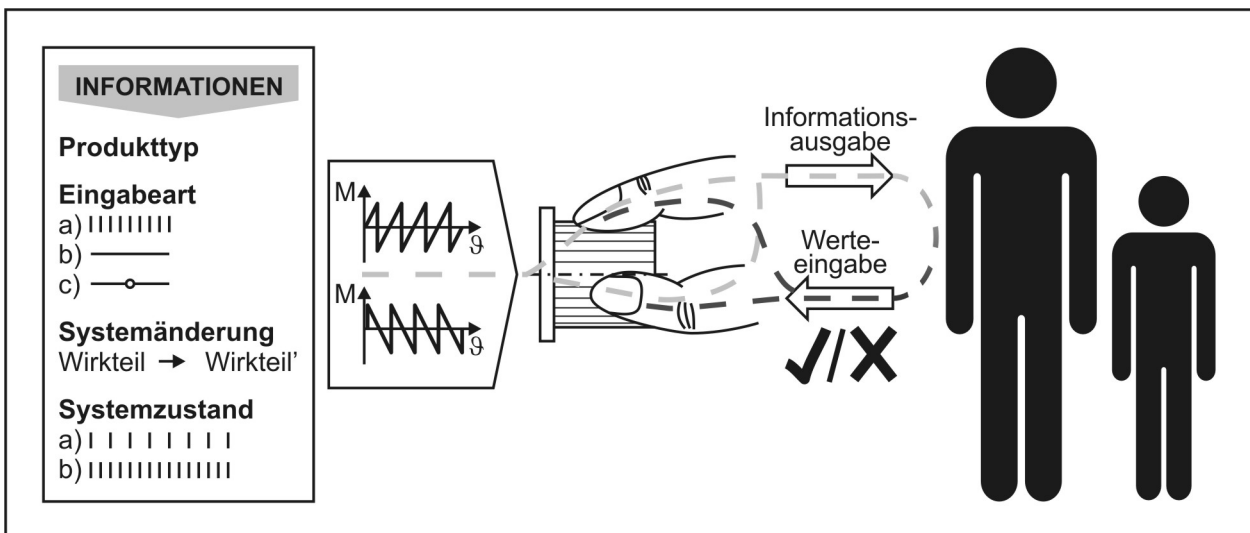


Bild 1.2: Basisschema zur Mensch-Maschine-Interaktion mittels eines adaptiven multifunktionalen Stellteils mit aktiver haptischer Rückmeldung, nach [HAMPEL09C]

Durch die Fähigkeit des Menschen, gleichzeitig unterschiedliche Informationen über verschiedene Sinne wahrzunehmen, können mehrere Informationen parallel an den Benutzer übertragen werden. Durch eine haptische Anzeige können dabei wichtige Systemkomponenten beobachtet werden, ohne die Bedienung aufgrund eingeschränkter visueller Kontrollmöglichkeit zu beeinträchtigen. Demzufolge wird durch eine haptische Anzeige die Blindbetätigung erleichtert. Gleichzeitig wird die insgesamt vom Benutzer aufnehmbare Informationsmenge (vgl. [KUNSCH97]) durch eine solche multimodale Informationsdarbietung (vgl. Kapitel 2.1.3) erhöht.

Der beste Ort für eine haptische Anzeige ist das Stellteil selbst. Durch unterschiedliche aktive haptische Rückmeldungen lassen sich dort wichtige Informationen direkt wäh-

rend der Betätigung an den Benutzer weiterleiten. Das Stellteil wird dadurch zu einem multifunktionalen Stellteil.

Einen der größten Einflussfaktoren auf die Erkennung haptisch unterschiedlich dargestellter Informationen und Eingabefehler stellt der Mensch selbst dar. Aus diesem Grund bieten sich adaptive multifunktionale Stellteile vor allem im Investitionsgüterbereich an, da hier die Benutzergruppen, ihre Fähigkeiten und Fertigkeiten weitestgehend bekannt sind. Auch wird bei Investitionsgütern eine höhere Akzeptanz adaptiver multifunktionaler Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung vermutet, da sich der zusätzliche Nutzen solcher Stellteile direkt in der Qualität und Dauer des damit durchgeführten Arbeitsprozesses zeigen kann.

Entscheidend für die Entwicklung multifunktionaler Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung ist die enge Zusammenarbeit der an der haptischen Forschung beteiligten Disziplinen (vgl. Bild 1.3). Demzufolge lässt sich die industrielle Fertigung und ein anwendungsbezogener Einsatz nur dann sinnvoll umsetzen, wenn die serviceorientierte Forschung, die angewandte Forschung und die Grundlagenforschung zu haptischen Themen ihre Produkte, ihre Anforderungen und ihr Wissen untereinander austauschen. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit die wichtigsten Aspekte aller drei Forschungsdisziplinen berücksichtigt und bearbeitet.

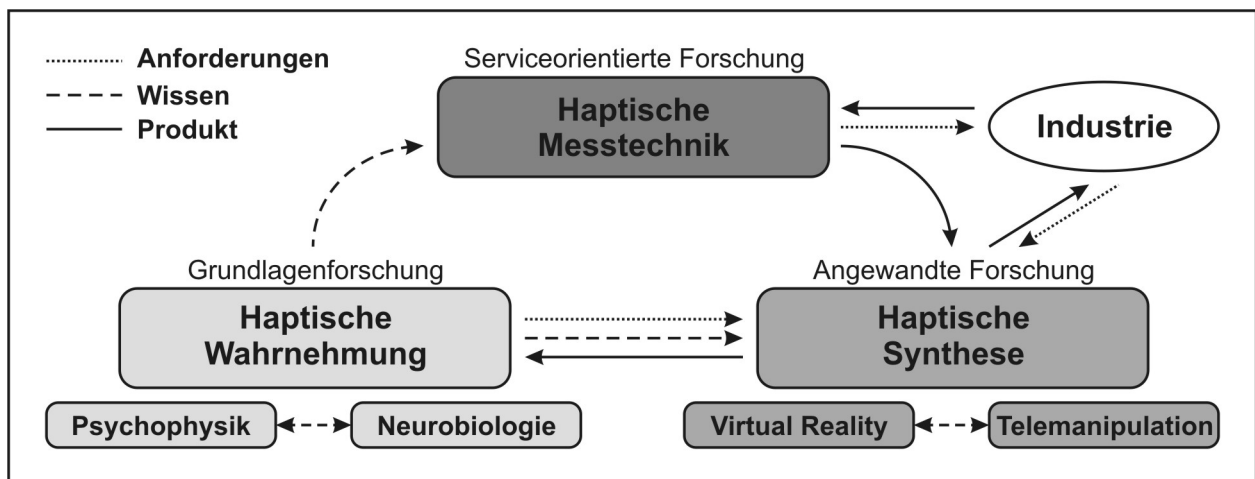


Bild 1.3: Beteiligte Disziplinen an der haptischen Forschung, nach [KERN09]

1.2 Struktur und Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Abschnitte, die in Bild 1.4 strukturiert dargestellt sind. Nach der bereits aufgeführten Ableitung der Problemstellung folgt die Beschreibung der Grundlagen. Zunächst werden dazu die allgemeinen Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion aufgeführt (Kapitel 2). Diese beinhalten vor allem Begriff-

lichkeiten zum Wahrnehmungsprozess, zur Mensch-Maschine-Schnittstelle und zu empirischen Versuchen. Die Grundlagen zu adaptiven multifunktionalen Stellteilen werden in Kapitel 3 näher beschrieben. Darin wird eine Vorauswahl der geeignetsten Komponenten für multifunktionale Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung vorgenommen. Außerdem werden darin die Forschungsschwerpunkte und der Stand der Technik vorgestellt.

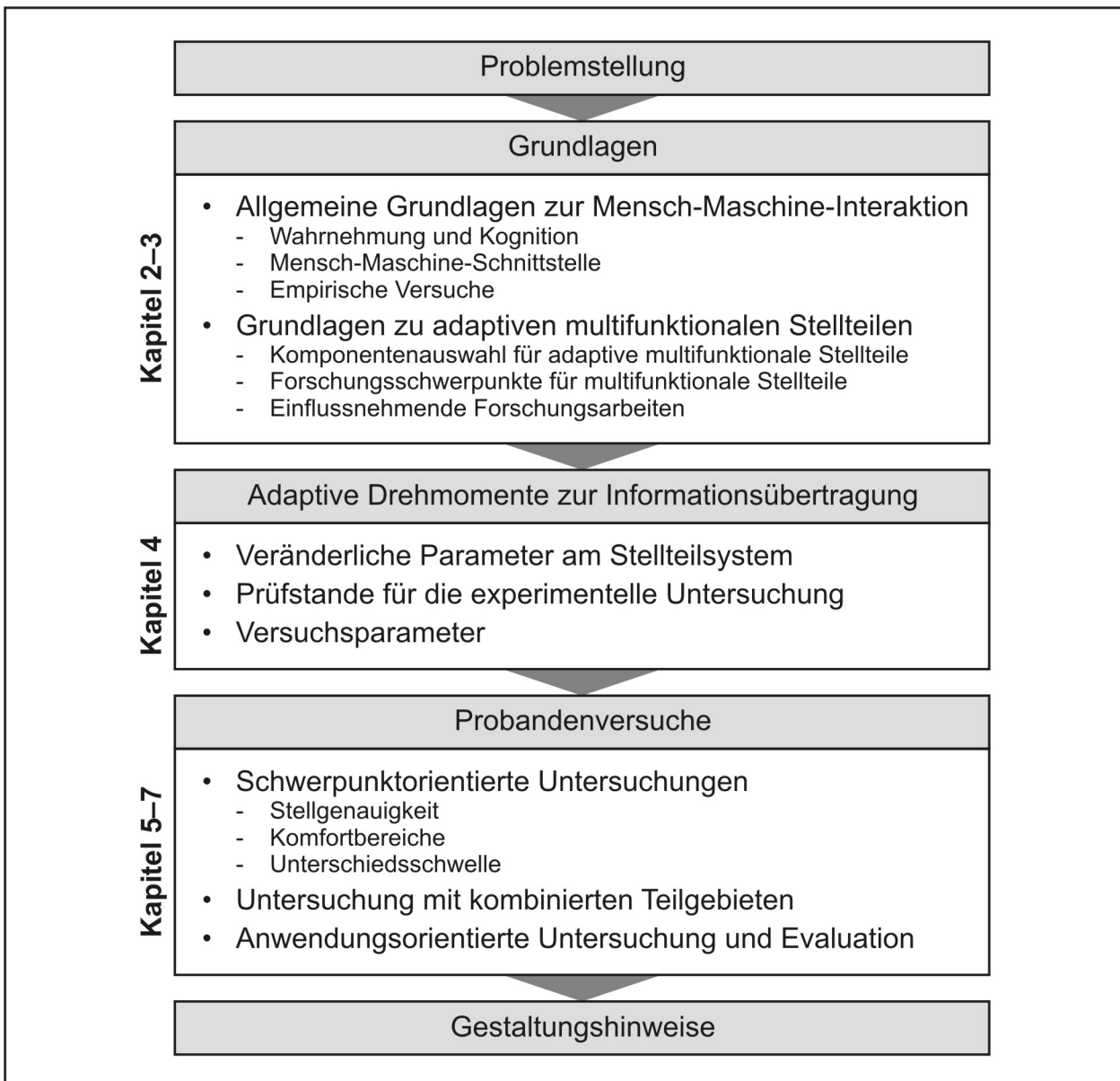


Bild 1.4: Struktur der Arbeit

Kapitel 4 beinhaltet die Beschreibung der veränderlichen Parameter im Stellteilsystem sowie eine detaillierte Beschreibung der eingesetzten Prüfstände. Zusätzlich werden die Versuchsparameter bei allen durchgeführten Untersuchungen beschrieben.

Die durchgeführten Probandenversuche werden in den nachfolgenden Kapiteln erörtert. Die Versuche teilen sich in schwerpunktorientierte Untersuchungen (Kapitel 5), in eine Untersuchung mit zwei kombinierten Forschungsschwerpunkten (Kapitel 6) sowie eine anwendungsorientierte Untersuchung (Kapitel 7) auf. In den schwerpunktorientierten Untersuchungen werden die Parameter am Stellteilsystem, die ein genaues Stellen, eine komfortable Eingabe oder die Erkennung von Unterschieden ermöglichen, ermittelt. In der daran anschließenden Untersuchung wird überprüft, welche Parameter die Voraussetzungen für ein genaues Stellen und gleichzeitig eine hohe Erkennung von Unterschieden schaffen. Die zuletzt durchgeführte anwendungsorientierte Untersuchung dient der Evaluation der zuvor ermittelten Ergebnisse anhand von Anwendungsbeispielen. Zum Schluss der Arbeit (Kapitel 8) werden allgemeine Gestaltungshinweise für adaptive multifunktionale Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung gegeben.

Das Ziel der hier vorliegenden Forschungsarbeit ist es, Empfehlungen für die optimale Auslegung von adaptiven multifunktionalen Stellteilen mit aktiver haptischer Rückmeldung hinsichtlich des Drehmomentverlaufs zu geben. Zu diesem Zweck werden bei den Untersuchung in den Kapiteln 5 und 6 direkt nach der Versuchsbeschreibung die Ergebnisse und eine Zusammenfassung widergegeben, um daraus eine kurze Empfehlung zur Gestaltung der haptischen Rückmeldung zu geben. Diese Empfehlungen werden in die jeweils nachfolgende Untersuchung eingebunden, können aber auch losgelöst davon als eigenständige Gestaltungsempfehlungen für den jeweils behandelten Forschungsschwerpunkt angesehen werden. Ferner können die zuletzt aufgeführten Gestaltungshinweise, die aus den Ergebnissen aller durchgeführten Untersuchungen systematisch abgeleitet werden, zur Auslegung adaptiver multifunktionaler Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung verwendet werden.

1.3 Abgrenzung zu anderen Arbeiten

In der vorliegenden Arbeit wird ein adaptives multifunktionales Stellteil aufgebaut und die damit verbundene aktive haptische Rückmeldung optimiert. Dabei stehen neben der Auswahl der geeigneten Komponenten vor allem die Einflussgrößen für die Erkennung von Unterschieden und die Reduzierung von Eingabefehlern im Vordergrund. Eine ebenfalls durchgeführte Untersuchung der Komfortbereiche dient weniger der Berücksichtigung individueller Benutzerwünsche als vielmehr der Eingrenzung einer

akzeptablen Betätigungskraft. Eine Beurteilung zum Qualitätseindruck oder der mit der haptischen Rückmeldung verbundenen Anmutung des Stellteils wird nicht durchgeführt. Neben der Einzelbetrachtung der oben genannten Forschungsschwerpunkte werden auch deren Wechselwirkung zueinander in einer kombinierten Untersuchung analysiert. Durch die Einzel- und kombinierten Untersuchungen werden Ergebnisse gewonnen, durch die sich die Wechselwirkungen der behandelten Forschungsschwerpunkte deutlich erkennen lassen. Eine systematische wissenschaftliche Behandlung dieser Schwerpunkte setzt die sinnvolle Eingrenzung der Vielfalt der haptischen Rückmelde-möglichkeiten und der Bedienelemente voraus. In der vorliegenden Arbeit wurde als Bedienelement ein Drehsteller und als Informationsrückmeldung vor allem eine diskrete Eingabeart (vgl. Kapitel 2.2.1) gewählt. Dadurch lassen sich für dieses Stellteil und diese Rückmeldeart konkrete Gestaltungshinweise ableiten. Eine solche Vorgehensweise ist in der bisherigen Forschung zur aktiven haptischen Rückmeldung einzigartig.

2 Grundlagen zur Mensch-Maschine-Interaktion

Um die Interaktion des Menschen mit einer Maschine genauer verstehen und untersuchen zu können, bedarf es einiger Grundlagen. Dazu werden im folgenden Kapitel neben den menschlichen Wahrnehmungsprozessen, den dafür notwendigen Rezeptoren und den Messarten von Wahrnehmungsschwellen auch die Grundlagen seitens des Stellteils beschrieben. Darüber hinaus wird die Vorgehensweise in der Forschung zu Themengebieten, deren Ergebnisse direkt durch die Fähigkeiten und Fertigkeiten des Menschen beeinflusst werden, erläutert.

2.1 Wahrnehmung und Kognition

Im Basisschema für Gebrauch und Mensch-Produkt-Beziehungen wird die Interaktion zwischen dem Benutzer und einem Produkt näher beschrieben [MAIER10]. Demnach stellt ein Produkt Informationen für den Benutzer bereit, der diese wiederum wahrnimmt, verarbeitet und dann eine Handlung durchführt. Die Wahrnehmung kann über einen einzelnen Sinn oder mehrere Sinne gleichzeitig erfolgen. Bei der darauffolgenden Handlung spielen der Tastsinn und dessen Leistungsfähigkeit eine wichtige Rolle. Die Leistungsfähigkeit kann durch die Messung von Schwellenwerten quantifiziert werden. Alle Aspekte dieses Basisschemas sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

2.1.1 Wahrnehmungsprozess

Der Wahrnehmungsprozess umfasst nicht nur die Erregung eines Sinnesnervs durch einen Reiz, sondern auch dessen Verarbeitung, Erkennung und die darauffolgende Handlung (vgl. [HAJOS72], [GOLDSTEIN08]). Da es sich um einen dynamischen Prozess handelt, der ständigen Veränderungen unterliegt, muss der Wahrnehmungsprozess als Kreislauf dargestellt werden (vgl. Bild 2.1). Er lässt sich in drei Prozessschritte unterteilen:

1. Prozess der Erregung eines Sensors durch einen Reiz
2. Verarbeitung des Reizes durch das Sinnesorgan und Weiterleitung an das Gehirn
3. Reaktion und Verhalten des Menschen in Abhängigkeit von dessen Wissen

Wahrnehmung als solche kommt demnach nie alleine vor, sondern ist immer auch mit der Erkennung, auch Kognition genannt, und der darauf folgenden Handlung gekoppelt.

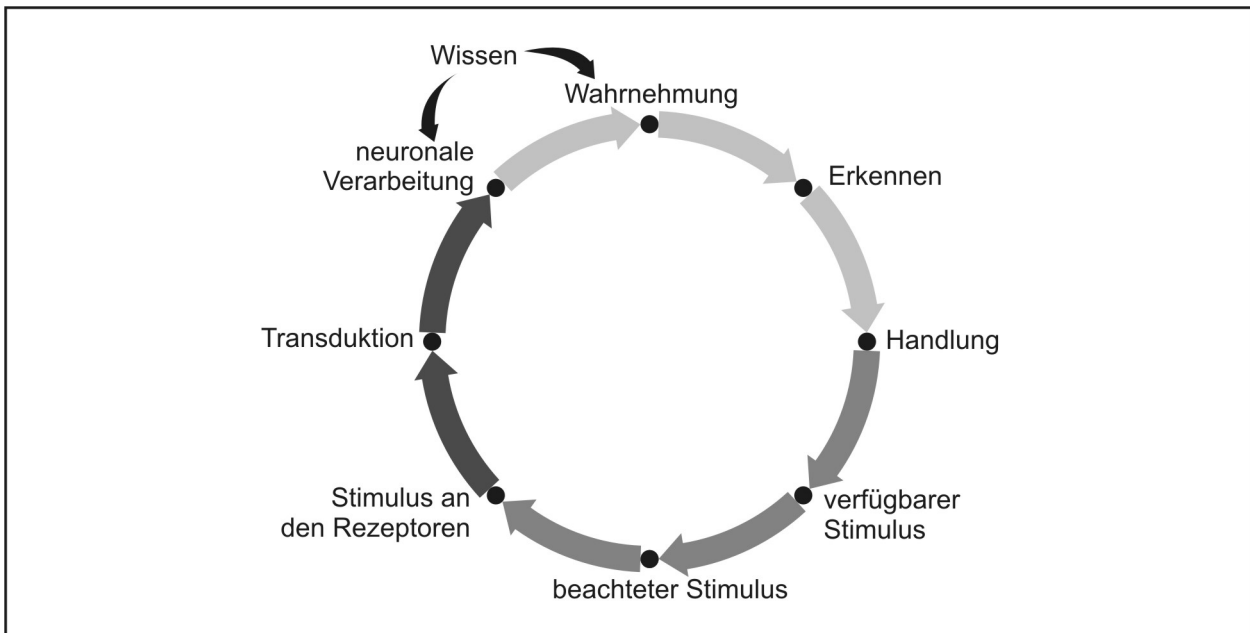


Bild 2.1: Kreislauf des Wahrnehmungsprozesses nach [GOLDSTEIN08]

2.1.2 Tastsinn

Der Tastsinn ist neben dem Hör-, Seh-, Geruchs-, und Geschmackssinn einer der klassischen fünf Sinne des Menschen, die auch als Modalitäten bezeichnet werden. Unter ihm werden alle Wahrnehmungen über die menschliche Haut verstanden. Der Begriff „Tastsinn“ wurde bereits in frühen wissenschaftlichen Arbeiten verwendet, jedoch wurde er erst spät durch Emil von Skramlik genau beschrieben und unterteilt. Hiernach lässt sich der Tastsinn in Druck-, Temperatur-, Schmerz- und Kraftsinn sowie in Kombination dieser Sinne unterteilen [SKRAMLIK37].

Häufig wird anstelle von „Tastsinn“ der Begriff „Haptik“ als Synonym verwendet [KRAIF07]. Diese Übersetzung ist jedoch nur teilweise richtig. Bei einer feineren Abgrenzung des Begriffs „Haptik“ müssen die Reize in der Art ihrer Wahrnehmung unterschieden werden [GRUNWALD01]. Ein passiver Reiz wird demnach durch eine Berührung der Haut durch einen Gegenstand verstanden, ohne dass eine motorische Bewegung des Körpers stattfindet. Synonym wird in diesem Fall der Begriff der taktilen Wahrnehmung verwendet. Ein aktiver Reiz erfordert hingegen den Einsatz der menschlichen Motorik. Diese Art der Wahrnehmung wird auch als Propriozeption bezeichnet. Nach Gibson können die Rezeptoren der Propriozeption vor allem der Muskeln und Gelenke jedoch auch passive Bewegungen registrieren [GIBSON73].

Die taktile und die haptische Wahrnehmung werden von zwei Wahrnehmungssystemen empfangen. Für die taktile Wahrnehmung ist dies das somatosensorische System, für die haptische Wahrnehmung das somatosensorische und das sensomotorische System

(vgl. Bild 2.2). Diese Einteilung impliziert, dass bei einer haptischen Wahrnehmung auch taktile Wahrnehmungsprozesse stattfinden.

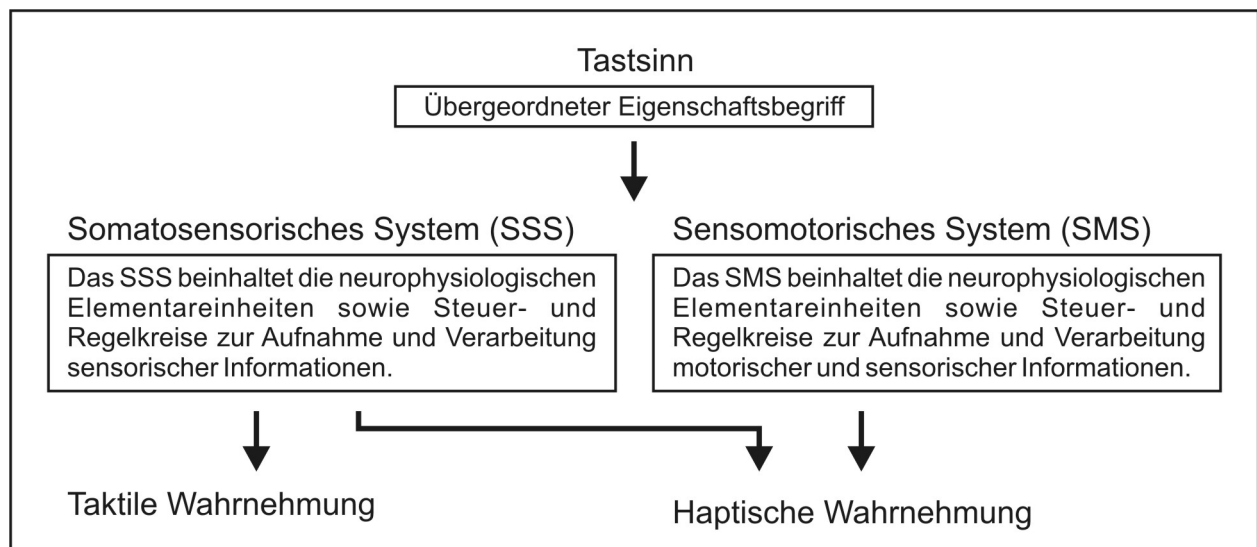


Bild 2.2: Gliederung des Tastsinns nach [GRUNWALD01]

Ähnlich wird der Begriff der Haptik auch von Hasser et al. definiert. Hier wird jedoch von der Unterscheidung abgesehen, ob der Reiz durch eine aktive Bewegung des Menschen oder durch eine rein passive Erregung entsteht [HASSER98].

Aus medizinischer Sicht der modernen Neurophysiologie wird auf eine Unterteilung in Sensomotorik und Somatosensorik weitestgehend verzichtet. Stattdessen werden unter dem Begriff der Somatosensorik alle Sinnesrezeptoren der Haut, der Gelenke, der Muskeln und Sehnen zusammengefasst, die mechanische, chemische oder thermische Signale aus der Umwelt oder aus dem Körper aufnehmen und an das zentrale Nervensystem weiterleiten können [BIRBAUMER06]. Die dafür zuständigen Sensoren werden wiederum in vier Gruppen eingeteilt:

- Mechanorezeptoren
- Propriozeptoren
- Thermorezeptoren
- Viszerosensoren

Die Mechanorezeptoren sind Sensoren für die Oberflächensensibilität, die auch als taktile Wahrnehmung bezeichnet wird. Die Mechanorezeptoren liegen in den verschiedenen Hautschichten und nehmen mechanische Reize aus der Umwelt auf. Die Qualitäten, also die Sinneseindrücke, die von diesen Rezeptoren aufgenommen werden können, sind Druck-, Berührung-, Kitzel- und Vibrationsempfindungen. Für die Reizver-

arbeitung besitzt der Mensch vier Sensorarten (vgl. Bild 2.3), die sich im Wesentlichen durch ihre Anzahl und Verteilung in der Haut sowie durch ihr zeitliches Reiz-Antwort-Verhalten unterscheiden.

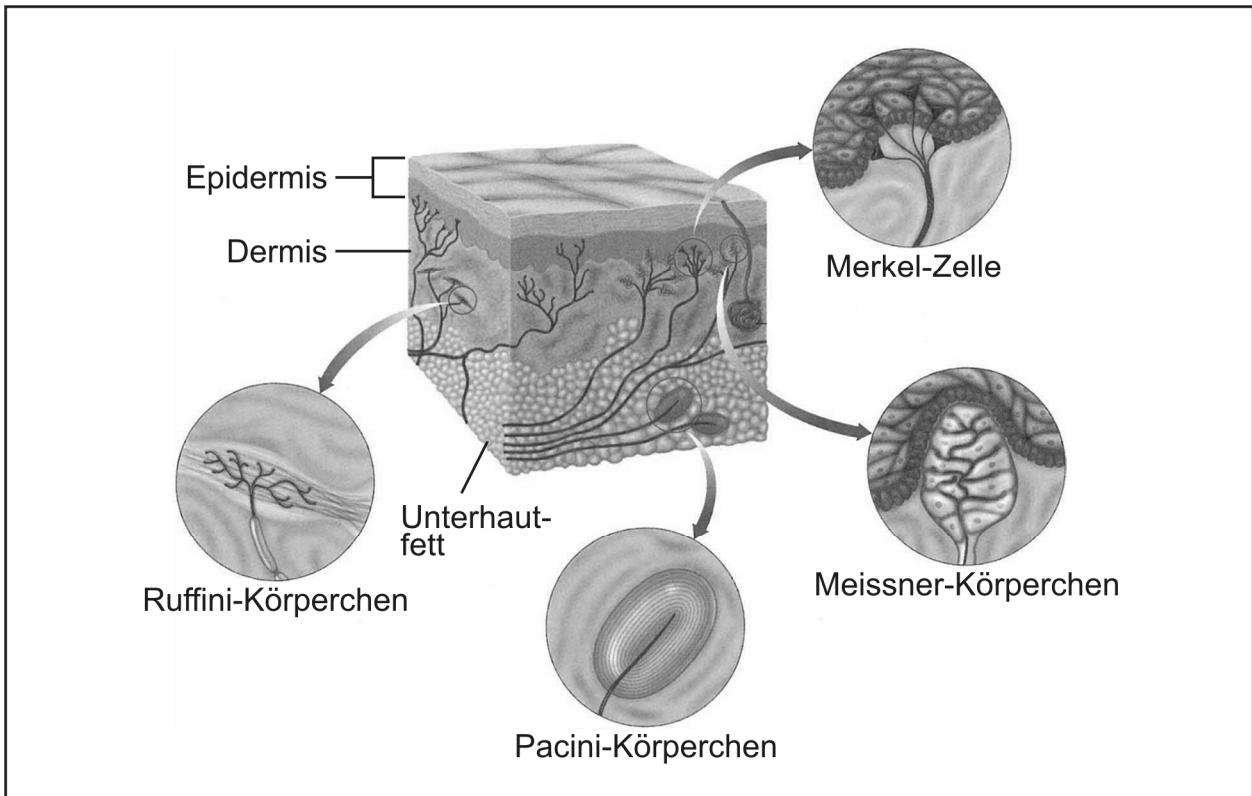


Bild 2.3: Aufbau der Haut samt Nervenzellen nach [GOLDSTEIN08]

Die so genannten Merkel-Zellen sitzen in der obersten Hautschicht, der Epidermis. Es handelt sich dabei um langsam adaptierende Zellen. Da sie nicht vollständig adaptieren, lassen sich durch sie neben Druck auch die Dauer eines Druckreizes wahrnehmen.

Die ebenfalls langsam adaptierenden Ruffini-Körperchen dienen ebenfalls zur Druckwahrnehmung, aber auch zur Wahrnehmung von Hautdehnungen sowohl bezogen auf die Stärke als auch auf die Richtung der Dehnung. Letzteres wird durch eine vermehrte Signalgebung bei einer Dehnung der Haut in eine einzige Richtung erreicht. Die Ruffini-Körperchen befinden sich in der nächsttieferen Hautschicht, der Dermis.

Die Meissner-Körperchen sind hingegen schnell adaptierend. Sie werden auch als Geschwindigkeitssensoren bezeichnet, da sie nur während einer Reizänderung Signale senden. Die Impulshäufigkeit dieser Signale hängt wiederum mit der Geschwindigkeit zusammen, mit der die Haut gedehnt wird. Sie befinden sich an der Grenze zwischen der Dermis und der Epidermis.

Im Unterhautfett befindet sich die letzte Art der Mechanorezeptoren. Die sehr schnell auf Einwirkungen auf die Haut adaptierenden Pacini-Körperchen werden auch als Beschleunigungssensoren bezeichnet. Sie geben nur am Anfang und am Ende eines Reizes ein Signal ab. Durch diese Eigenschaft lassen sich Vibrationen der Haut wahrnehmen. In Bild 2.4 ist das Reiz-Antwort-Verhalten der vier Mechanorezeptoren nochmals dargestellt.

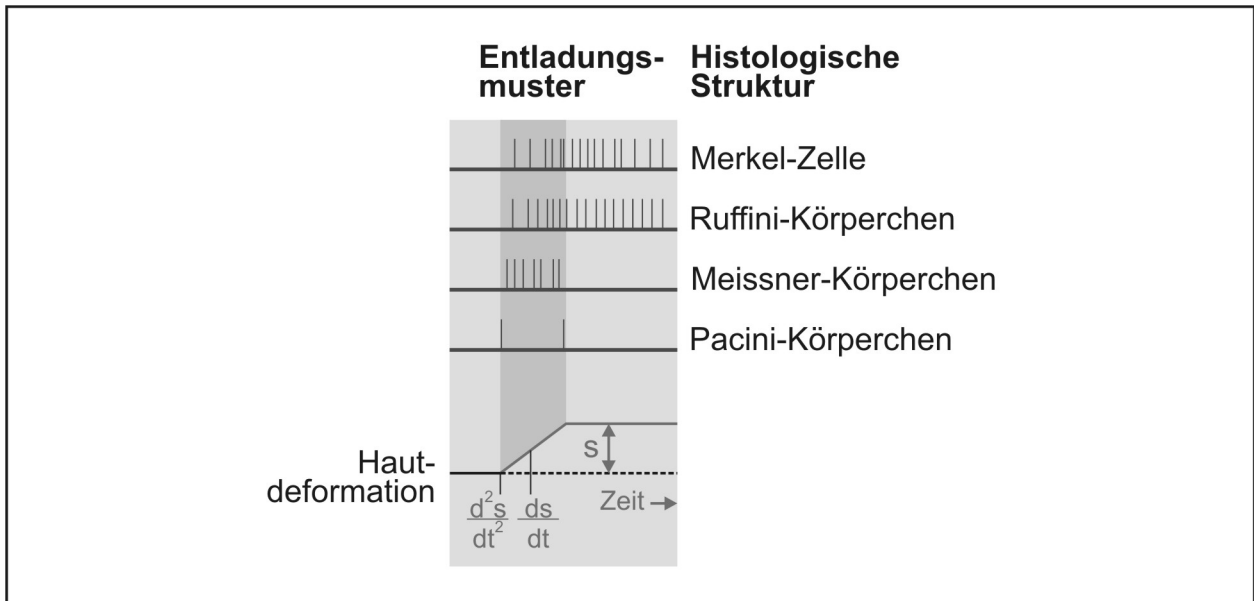


Bild 2.4: Reiz-Antwort-Verhalten der Mechanorezeptoren nach [BIRBAUMER06]

In Bild 2.5 ist die Zuordnung der Empfindung zum jeweiligen Mechanorezeptor dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass es auch zu Überschneidungen der Empfindungen kommen kann.

Rezeptor/Empfindung	Dehnung	Druck	Berührung	Vibration
Merkel-Zellen		-----		
Ruffini-Körperchen	-----			
Meißner-Körperchen			-----	
Pacini-Körperchen				-----

Bild 2.5: Empfindungseinteilung der Mechanorezeptoren nach [BEYER01]

Neben den genannten Mechanorezeptoren sind die Rezeptoren der Tiefensensibilität, auch Propriozeptoren genannt, die zweite Gruppe von Sensoren der Somatosensorik. Die Wahrnehmung durch Propriozeptoren wird in der Literatur auch als kinästhetische Wahrnehmung bezeichnet [KERN09]. Die Propriosensoren dienen zur Wahrnehmung von Stellungen, Bewegungen und Kräften. Die dazugehörigen Sensoren sind in den

Muskeln (Muskelspindel-Sensoren), Sehnen und Gelenken (Golgi-Sehnenorgane) zu finden (vgl. Bild 2.6) [SILBERNAGL07]. Die Sensoren der Muskelspindeln messen Gelenkstellungen und -bewegungen. Dabei wird zwischen zwei Sensorarten unterschieden. Die P-Sensoren liefern ein zum Reiz proportionales, konstantes Signal und geben damit Aufschluss über die aktuelle Gelenkstellung. Die D-Sensoren geben hingegen ein zum Reiz differentielles Signal mit hoher Impulsfrequenz weiter. Dadurch kann die Geschwindigkeit einer Stellungsänderung wahrgenommen werden. Die Golgi-Sehnenorgane befinden sich an den Muskel-Sehnen-Grenzen. Sie dienen vor allem der Regelung der Muskelspannung und können deshalb auch als Kraftsensoren bezeichnet werden [FRIEDRICH07]. Der Kraftsinn selbst zeichnet sich durch große Genauigkeit und präzise Reproduzierbarkeit aus [BIRBAUMER06].

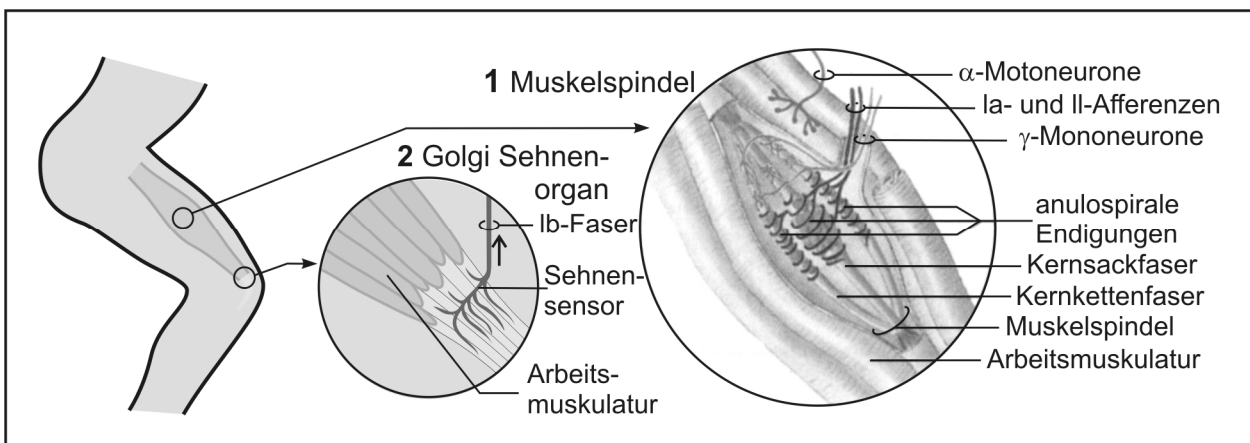


Bild 2.6: Muskelspindeln und Golgi-Organ nach [SILBERNAGL07]

Die dritte Sensorgruppe der Somatosensorik umfasst die Thermorezeptoren. Sie dienen zur Kälte- und Wärmewahrnehmung. Neben der Thermoempfindung dienen sie auch zur Temperaturregulierung des Körpers. Da für Stell- und Positionieraufgaben von Objekten jedoch nur die Mechanorezeptoren und die Propriozeptoren relevant sind, soll von einer näheren Beschreibung der Thermorezeptoren abgesehen werden.

Die Viszerosensoren bilden die letzte Gruppe an Sensoren der Somatosensorik. Sie dienen zur Wahrnehmung der Eingeweide. Zwar sind die Rezeptoren der viszeralen Wahrnehmung ähnlich oder gleich wie die der propriozeptiven Wahrnehmung aufgebaut, jedoch erfolgt die viszerale Wahrnehmung häufig unbewusst. Nach Grunwald ist deshalb eine Zusammenfassung der Viszero-, Mechano-, Proprio- und Thermorezeptoren zur Somatosensorik nicht sinnvoll [GRUNWALD01]. Deswegen soll im Folgenden für die Begriffe Somatosensorik und Haptik nur die Wahrnehmung der Propriozeption sowie der Mechanorezeption verstanden werden.

2.1.3 Multimodalität

Unter Multimodalität wird die Eigenschaft verstanden, gleiche oder verschiedene Reize über verschiedene Sinneskanäle nahezu zeitgleich wahrzunehmen [SCHOMAKER95]. Es konnte jedoch schon früh herausgefunden werden, dass die Stimuli sequenziell verarbeitet werden [WEBER05]. Der Zeitabstand, in dem der Mensch zwei gleichzeitig auftretende Reize registriert, ist jedoch so kurz, dass die Reize scheinbar gleichzeitig wahrgenommen werden.

Unter dem Begriff der Modalität wird häufig nur einer der fünf klassischen Wahrnehmungssinne verstanden. Gerade der Tastsinn kann aber feiner in Submodalitäten unterteilt werden [SCHMIDT07]. Bei gleichzeitiger Erregung zweier oder mehrerer Submodalitäten können dieselben positiven Effekte auftreten, wie bei einer herkömmlich verstandenen Multimodalität.

Es gibt einige Untersuchungen, die belegen, dass eine redundante Informationsdarbietung über mehrere Sinne die Anzahl an Bedienfehlern senkt und die Bediengeschwindigkeit steigert (vgl. [AKAMATSU94], [DEBUS02]). Cockburn et al. konnten diesen positiven Effekt der multimodalen Informationsdarbietung ebenfalls bestätigen. Sie weisen jedoch auch darauf hin, dass eine redundante Informationsdarbietung über mehrere Sinnesmodalitäten gleichzeitig den Benutzer in seinem Handeln beeinträchtigen oder überfordern könnte [COCKBURN05].

Durch die multimodale Fähigkeit des Menschen können aber auch unterschiedliche Informationen übermittelt und somit Wahrnehmungskanäle gezielt für eine höher priorisierte Aufgabe freigehalten werden. Diese Eigenschaft wird z.B. für das Steuern von Fahrzeugen, das die volle visuelle Aufmerksamkeit beansprucht, und dem gleichzeitigen, nahezu blinden Bedienen von Stellteilen genutzt. So konnte in Untersuchungen durch eine aktive haptische Rückmeldung der Stellteile die Blickabwendung von der Fahrbahn reduziert werden, was sich in der Spurhalteleistung und der Anzahl an Fehlbedienungen widerspiegelte (vgl. [ZEILINGER05], [SENDER08]).

2.1.4 Psychophysische Grundlagen

Der Begriff der Psychophysik wurde von Gustav T. Fechner 1860 eingeführt und von Ernst H. Weber weiter geprägt [FECHNER60], [WEBER05]. Er beschreibt die Wissenschaft, die sich mit den Wahrnehmungsfähigkeiten des Menschen befasst. Zur Psychophysik zählen neben den neurologischen auch die psychologischen Aspekte, sowie Ergebnisse der Verhaltensforschung [CAMPENHAUSEN93]. Die Messung von

Wahrnehmungsschwellen mit Hilfe verschiedener Messmethoden ist der zentrale Inhalt der Psychophysik. Hierbei sind einige Regeln zur Vorgehensweise der Messung zu beachten, die im Folgenden näher beschrieben werden.

2.1.4.1 Sensorische Schwellen

In der Psychophysik wird zwischen zwei Arten von Schwellen unterschieden. Die Absolutschwelle, auch Reizlimen genannt, beschreibt die minimale Größe eines Reizes, die nötig ist, damit der Reiz von einer der Sinnesmodalitäten wahrgenommen wird.

Die Unterschiedsschwelle, auch Differenzlimen genannt, beschreibt die Differenz zweier Reize, die gerade noch wahrgenommen werden kann. Die Größe dieser Differenz beruht auf dem Weber'schen Gesetz, das besagt, dass eine geometrische Stufung eines Reizzuwachses einen als gleich (arithmetisch) wachsend empfundenen Betrag der Sinneswahrnehmung hervorruft. Als Formel ausgedrückt steht der Weber'sche Quotient K für den Stufensprung, der sich aus dem Reizzuwachs ΔS im Verhältnis zum Reizstärke S_A des Ausgangsreizes berechnet. Der Reizzuwachs ΔS lässt sich dabei als Differenz zwischen der Reizstärke des Vergleichsreizes S_V und des Ausgangsreizes S_A darstellen.

$$K = \frac{\Delta S}{S} = \frac{S_V - S_A}{S_A} = \frac{S_V}{S_A} - 1 \quad (2.1)$$

Neben dem Weber'schen Quotienten wird häufig der Skalierungsfaktor als Maß für die Unterschiedsschwelle angegeben. Dieser beschreibt den Wert, mit dem der Ausgangsreiz multipliziert wird, um die Größe des Vergleichsreizes zu erhalten. Der Skalierungsfaktor SF kann aus dem Weberschen Quotienten K gebildet werden.

$$SF = \frac{S_V}{S_A} = K + 1 \quad (2.2)$$

Im Gegensatz zum Weber'schen Quotienten K kann der Skalierungsfaktor auch Werte zwischen null und eins annehmen. Um eine korrekte Umrechnung des Skalierungsfaktors in den Weber'schen Quotienten zu gewährleisten, muss bei Werten zwischen null und eins des Skalierungsfaktors dessen Kehrwert gebildet werden.

Das Weber'sche Gesetz trifft auf die meisten Sinne des Menschen zu, solange sich der Standardreiz nicht in unmittelbarer Nähe zur Reizschwelle bewegt [GESCHIEDER76]. In diesem Bereich muss die Stufung meist deutlich größer ausfallen, damit Unterschiede erkannt werden können.

Fechner formulierte aus dieser Beziehung einen mathematischen Zusammenhang zwischen der Empfindungsstärke und der dafür notwendigen Reizstärke. Hiernach ist die Empfindungsstärke E proportional zum Logarithmus der Reizstärke S (vgl. Gleichung 2.3). Eine Reizverdopplung führt demnach nicht auch zu einer Verdopplung der Empfindungen [FECHNER60].

$$E = \log S \quad (2.3)$$

Dass diese Funktion nur für bestimmte Bereiche der Reizwahrnehmung gilt, fand Stevens heraus. Für sehr große Reize und für Reize nahe der Reizschwelle konnte er sehr große Abweichungen zu dieser Beziehung feststellen, weshalb er diese umformulierte und als Potenzfunktion darstellte [STEVENS75].

$$E = (S - S_0)^m \text{ oder } E = k \cdot S^m \quad (2.4)$$

Danach ist die Empfindungsstärke proportional zur um m potenzierten Reizstärke S abzüglich der Schwellenreizstärke S_0 . Anders formuliert ist die Empfindungsstärke E proportional zum Produkt aus einer den Schwellenwert beschreibenden Konstanten k und der um m potenzierten Reizstärke S . In jedem Fall beschreibt der Exponent m einen für jeden Sensortyp spezifischen Wert.

2.1.4.2 Methoden zur Schwellenmessung

Nach Hajos gibt es im Wesentlichen drei Arten zur Schwellenmessung, die – unter anderer Bezeichnung – alle ihren Ursprung in den Forschungsarbeiten Fechners haben [HAJOS72]. Mit allen drei Arten können sowohl die Reiz- als auch die Unterschiedsschwelle ermittelt werden.

In der Grenzwertmethode werden dem Versuchsteilnehmer nacheinander ansteigende oder schwächer werdende Reize dargeboten. Die Aufgabe des Probanden ist es, die Grenze anzugeben, ab der er bei einer Reizschwellenuntersuchung den Reiz gerade nicht mehr wahrnehmen oder bei einer Untersuchung zur Unterschiedsschwelle den Unterschied zweier Reize gerade noch feststellen kann. Der Versuch wird einige Male mit jedem Probanden wiederholt und dabei die Richtung der Reizänderung (Verstärkung oder Abschwächung) gewechselt. Die Reiz- oder Unterschiedsschwellen lassen sich im Anschluss der Untersuchung aus den Angaben aller Versuchsteilnehmer bilden. Dazu wird aus den aufgezeichneten Schwellen aller Probanden der Mittelwert gebildet.

Bei der Herstellungsmethode wird der Reiz nicht wie in der Grenzwertmethode in Schritten sondern kontinuierlich verändert. Die Änderung des Reizes kann entweder durch den Versuchsleiter oder durch die Versuchsperson selbst erfolgen. Verändert die Ver-

suchsperson den Reiz selbst, so muss sie dies bis zu einem für ihn merklichen Unterschied tun oder solange, bis sie den Reiz gerade noch wahrnehmen kann.

Die Konstanzmethode sieht zur Ermittlung der Reizschwelle einen Reiz in unterschiedlichen Intensitäten vor. Der Proband soll für jeden dieser Reize angeben, ob er diesen wahrnehmen kann. Für die Ermittlung der Unterschiedsschwelle werden hingegen immer zwei Reize miteinander verglichen. Die Intensität eines Reizes ist stets konstant. Dieser Reiz wird auch als Standard- oder Ausgangsreiz bezeichnet. Der Proband gibt in diesem Fall an, ob er den Vergleichsreiz größer oder kleiner als den Standardreiz empfindet oder ob er keinen Unterschied erkennen kann.

Die Methoden unterscheiden sich neben dem Versuchsablauf vor allem in der Versuchsdauer und in der Genauigkeit der Ergebnisse. Die Herstellungsmethode benötigt am wenigsten Zeit, ist aber auch am ungenauesten. Die Konstanzmethode liefert hingegen die genauesten Werte für die Schwellen, benötigt aber die meiste Zeit.

Bei allen drei Methoden wird der Schwellenwert üblicherweise an der Grenze festgelegt, an der 50% der Reize oder der Reizänderungen richtig erkannt werden [GESCHEIDER76]. Diese Vorgehensweise rührt von der Verteilung der Ergebnisse her. Schwellenmessungen zeigen typischerweise eine Gauß'sche Normalverteilung der Ergebnisse. Die höchste Anzahl richtiger Antworten bei einem einzuschätzenden Reiz entspricht hierbei dem Hochpunkt der Gauß'schen Normalverteilung. Bis zu diesem Punkt oder genauer dieser Reizintensität sollten bereits in 50% aller Versuche korrekte Antworten gegeben werden.

Es gibt noch weitere Methoden zur Schwellenwertmessung. Sie lassen sich aber immer einer der genannten drei Methoden in abgeänderter Weise zuordnen.

2.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Nach Schmauder werden unter einer Mensch-Maschine-Schnittstelle alle Komponenten eines Arbeitssystems verstanden, die der funktionellen Interaktion zwischen Mensch und Maschine dienen [SCHMAUDER96]. Eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) besteht aus mindestens einer Anzeige, die dem Benutzer Informationen übermittelt und einem Stellteil, mit dem der Benutzer auf die Maschine Einfluss nehmen kann. Eine Eingabe kann die dargestellten Informationen beeinflussen, wodurch die MMS als Regelkreis gekennzeichnet wird.

Nach DIN EN 894-1 erfordert die optimale Gestaltung der MMS die Erfüllung folgender Aspekte:

- **Aufgabenangemessenheit**
Die MMS muss eine sichere und effiziente Aufgabenerfüllung ermöglichen.
- **Selbsterklärungsfähigkeit**
Anzeigen und Stellteile sollten leicht verständlich sein, um so das benutzerseitige Eingreifen in den Arbeitsprozess zu erleichtern.
- **Steuerbarkeit**
Die Kontrolle des Systems obliegt dem Benutzer. Eine Einflussnahme seitens des Systems auf den Benutzer muss vermieden werden.
- **Erwartungskonformität**
Die dargestellten Informationen sowie die Art der Eingabe durch ein Stellteil müssen der Erwartung des Benutzers entsprechen.
- **Fehlerrobustheit**
Bei einer offensichtlichen Fehlbetätigung soll das System den gewünschten Wert mit geringen oder keinen Korrekturen erreichen.
- **Anpassbarkeit und Erlernbarkeit**
Eine MMS soll sich an die demografischen sowie psychografischen Eigenschaften der Benutzer anpassen lassen.

Darüber hinaus muss eine Mensch-Maschine-Schnittstelle dem Benutzer eine ausreichende und sinnvolle Rückmeldung geben. Zu diesen Rückmeldungen zählen Informationen, ob und in welchem Maße eine Bedienaufgabe erfolgreich durchgeführt wurde, sowie Warn- und Fehlermeldungen bei falscher und unvollständig ausgeführter Bedienaufgabe [DIN EN 614-2].

2.2.1 Stellteile

Stellteile dienen der Veränderung eines Systems. Bei elektronischen Geräten werden mit ihnen Informationen in Form von Variablen vom Menschen an das System weitergegeben [BAUMANN98]. Bei rein mechanischen Arbeitssystemen können damit auch anstelle von Informationen Energien weitergeleitet werden [NEUDÖRFER81]. Alternativ zum Begriff „Stellteil“ werden in der Literatur auch die Begriffe „Bedienteil“ oder „Bedienelement“ verwendet.

Es gibt verschiedene Arten der Einteilung von Stellteilen. In der Norm DIN EN 894-3 werden Stellteile nach ihrer Bewegungsart (translatorisch/rotatorisch) und nach der Kontinuität der Bewegung (kontinuierliche/diskrete Stellbewegung) unterschieden. Die Auswahl eines geeigneten Stellteils aus dieser Gruppe hängt von den allgemeinen aufgabenbezogenen Anforderungen, den spezifischen aufgabenbezogenen Anforderungen, den Bewegungsmerkmalen und den Greifmerkmalen ab. Die allgemeinen aufgabenbezogenen Anforderungen umfassen die Stellgeschwindigkeit, Stellgenauigkeit und Stellkraft. In den spezifischen aufgabenbezogenen Anforderungen werden Aspekte wie Sicht- und Tastkontrolle oder unbeabsichtigtes Stellen berücksichtigt. Zu den Bewegungsmerkmalen zählen die Bewegungsart, -achse und -richtung sowie Kontinuität der Bewegung. Greifmerkmale sind die Greifart, der zur Kraftaufbringung verwendete Teil der Hand, und die Art der Kraftaufbringung.

In einer anderen Einteilung wird unterschieden, ob mit dem Stellteil vorrangig Informationen oder Energien übertragen werden sollen [NEUDÖRFER81]. Erst danach wird nach der zu verwendenden Extremität, der Wirkrichtung und schließlich nach der Form unterschieden. Statt Vorschläge für die Auswahl eines Stellteils zu geben, gibt Neudörfer Empfehlungen für die am Stellteil wirkende Kraft und den Bewegungsumfang. Die Unterteilung, ob mit dem Stellteil Informationen oder Energien übertragen werden sollen, führt hier vor allem zu unterschiedlichen Stellteilgrößen. Kleine Stellteile eignen sich demnach eher für feinmotorische, informationsübertragende Aufgaben, große Stellteile hingegen zur Übertragung von Energien.

Für informationsübertragende Stellteile gibt es drei Eingabearten (vgl. Bild 2.7). Bei einer kontinuierlichen Eingabe ist die Kraft oder das Drehmoment am Stellteil konstant, unabhängig vom Stellweg bzw. -winkel. Der Benutzer muss diese Kraft aufbringen, um das Stellteil zu bewegen. Definierte Ruhepunkte gibt es bei dieser Eingabeart keine. Das Stellteil bleibt in der Position stehen, in der es losgelassen wird.

Eine diskrete Eingabeart wird durch eine vorgegebene Anzahl von mindestens zwei Ruhepunkten gekennzeichnet. Beim Bewegen und anschließendem Loslassen des Stellteils rastet dieses von alleine in die nächstgelegene Ruheposition ein. Der Stellweg bzw. -winkel ist üblicherweise konstant. Die Kraft oder das Drehmoment steigen vom Ruhepunkt aus an, ändern dann am Umkehrpunkt ihre Richtung und werden schließlich zum nächsten Ruhepunkt hin wieder kleiner.

Bei einer monostabilen Eingabeart gibt es exakt eine Ruheposition. Wird das Stellteil bewegt, kehrt es beim Loslassen in diese Position zurück. Die Kraft oder das Drehmoment steigen bei dieser Eingabeart von der Ruheposition aus stetig an.

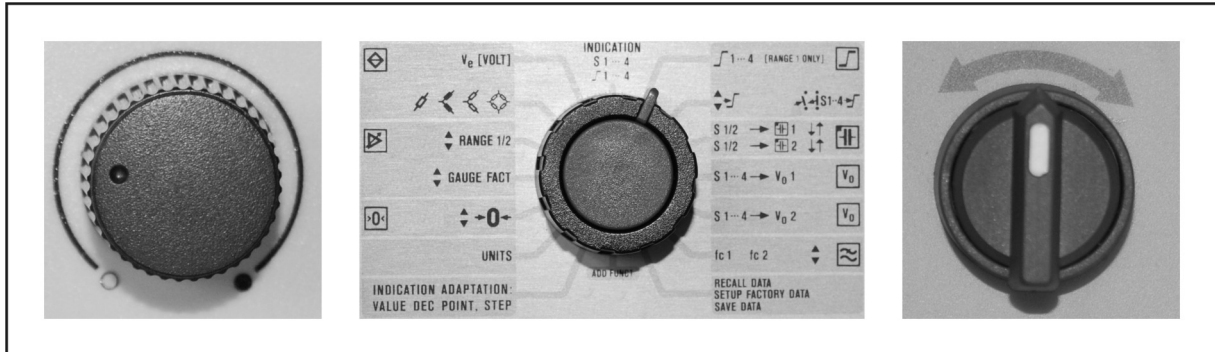


Bild 2.7: Kontinuierliche, diskrete und monostabile Eingabearten (von links nach rechts) am Beispiel von Drehstellern [HAMPEL09B]

2.2.2 Passive und aktive Stellteile

Die Stellkräfte eines passiven Stellteils werden allein durch die Mechanik erzeugt, mit der das Stellteil mit dem dazugehörigen Wirkteil verbunden ist. Im Gegensatz dazu benötigen aktive Stellteile externe Energiequellen zur haptischen Informationsdarstellung. Durch diese Energiequellen werden wiederum Aktoren und Sensoren versorgt, mit denen die Stellkräfte künstlich erzeugt werden [KERN09]. Somit dient ein aktives Stellteil neben der Eingabe von Informationen durch den Benutzer auch zur Ausgabe von für die Stellaufgabe relevanten Informationen an den Benutzer [BUBB04].

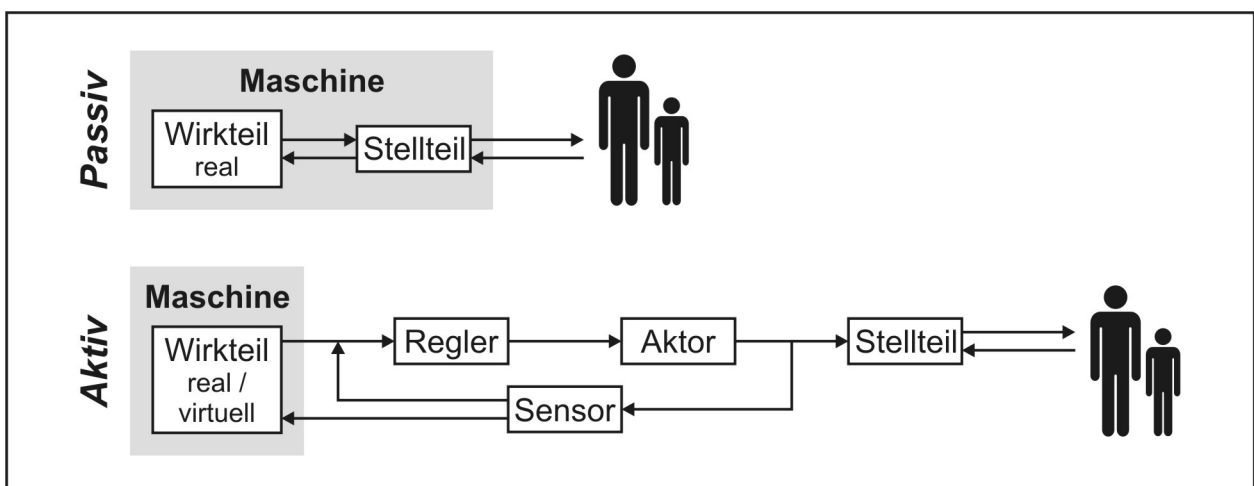


Bild 2.8: Schemata eines passiven Stellteils und eines aktiven Stellteils mit Regelung

Ein aktives Stellteil kann bei einer fehlenden Mechanik zwischen Wirk- und Stellteil losgelöst von der zu bedienenden Maschine platziert werden. Die Verbindung zwischen dem Stellteil und der Maschine erfolgt in diesem Fall kabelgebunden oder kabellos.

Aktive Stellteile werden dann eingesetzt, wenn es kein reales sondern nur ein virtuelles Wirkteil gibt oder keine direkte mechanische Verbindung zwischen Stellteil und Wirkteil möglich ist. Die fehlende haptische Rückmeldung am Stellteil wird in diesen Fällen künstlich über die Aktorik erzeugt. Weiterhin können aktive Stellteile eingesetzt werden, um zusätzliche Informationen über das Stellteil an den Benutzer weiterzuleiten.

Aktive Stellteile werden vorwiegend für Mensch-Maschine-Schnittstellen in der virtuellen Realität eingesetzt. Von hier stammt auch der Begriff „Force-Feedback“. Er beschreibt die Rückmeldung oder Simulation von Gewicht oder Widerstand in der virtuellen Realität [CYBEREDGE10]. Nach Burdea lassen sich Force-Feedback-Systeme in drei Kategorien unterteilen [BURDEA96]. Stationäre Force-Feedback-Systeme sind fest mit dem Boden oder einer Arbeitsfläche verbunden. Hierzu zählen stiftbasierte Eingabegeräte oder Joysticks. Der Gruppe der körperfesten Eingabegeräte können Exoskelette und Datenhandschuhe zugeordnet werden. Sie sind fest mit der Hand oder dem Körper verbunden. Die letzte Gruppe umfasst Anzeigen und Oberflächen, die vorwiegend eine taktile Rückmeldung ermöglichen. Dazu zählen aktive Eingabegeräte für Blinde oder Bildschirme mit taktile Rückmeldung z.B. durch Vibrationen.

Ein Stellteil kann auch als aktiv bezeichnet werden, wenn es neben der Übertragung von Informationen über Kräfte auch seine Form verändern kann. Solche Stellteile werden auch als „adaptiv variabel“ bezeichnet [SENDER08]. Ziel dieser Stellteilart ist es, dem Benutzer wichtige Informationen über eine sich ändernde Form des Stellteils taktile zu übermitteln.

2.2.3 Anzeigen

Anzeigen dienen der Darstellung von Informationen. Die Darstellung kann visuell, akustisch oder durch Berührung erfolgen [DIN EN 894-2]. Sollen Informationen durch Berührung übertragen werden, so muss unterschieden werden, ob dies passiv oder aktiv geschieht. Eine taktile Anzeige übermittelt Informationen passiv allein durch Ihre Form, die von den Fingern berührt wird. Als haptische Anzeige versteht man ein Element, das Informationen aktiv durch Betasten und Bewegen übermittelt und somit den Einsatz von Muskelkraft erfordert. Die Informationsmenge, die von taktilen und haptischen Anzeigen übertragen werden kann, hängt von der Art des Reizes ab. Geringe

Informationsmengen wie einfache Warnungen können z.B. durch Vibrationen der Anzeige übertragen werden. Bei einer größeren Informationsmenge wie dem Darstellen eines sich verändernden Wertes oder der gerade betätigten Funktion kann dies über veränderliche Kraft-Weg-Verläufe beim Bewegen der Anzeige geschehen.

Auch Stellteile können als Anzeigen fungieren. Der Zustand der Stellteile gibt den gerade aktuellen Wert einer eingegebenen Variablen wieder. Bei Stellteilen kann dieser Zustand entweder visuell über die Form des Stellteils, auditiv über zusätzliche Tonsignale, taktil über ein fühlbares Zeigerelement oder haptisch über entsprechende Kraft-Weg-Verläufe an den Benutzer übertragen werden.

2.3 Empirische Versuche

Empirische Versuche dienen dem Zweck, Erkenntnisse aus Erfahrungen zu ermitteln [KRAIF07]. Erfahrungen werden in dieser Arbeit durch Versuche mit Probanden ermittelt. Die Erfüllung vorgegebener Bedienaufgaben sowie die Beurteilung über das Stellteilsystem werden zu diesem Zweck aufgezeichnet.

Für die Durchführung von Versuchen, die von Personen abhängig sind, müssen einige Voraussetzungen geschaffen und Bedingungen erfüllt werden. Nach Bortz et al. müssen für die Durchführung empirischer Versuche wissenschaftliche und ethische Kriterien erfüllt sein [BORTZ06]. Zu den wissenschaftlichen Kriterien zählen eine präzise Problemformulierung, ein für empirische Versuche geeignetes Thema und die praktische Anwendbarkeit der aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse. Unter den ethischen Kriterien werden Anforderungen verstanden, die dem Schutz und der Würde des Menschen dienen. Überdies besteht eine Informationspflicht den Versuchsteilnehmern gegenüber. Der wissenschaftliche Hintergrund einer Untersuchung zählt dazu ebenso, wie die Ergebnisse des einzelnen Versuchsteilnehmers.

Robles-De-La-Torre empfiehlt, dem Probanden keinen Einblick auf die Komponenten eines Prüfstands zu ermöglichen, um ihn bei seiner Aussage zum Versuch nicht zu beeinflussen [ROBLES08]. Weiterhin schlägt er vor, dem Probanden bei Versuchen zu haptischen Interfaces eine Einlernzeit zu ermöglichen und nicht durch eine auditive Rückmeldung der haptischen Bedienschnittstelle Einfluss auf seine Antworten zu nehmen.

Bei einer Bedienaufgabe mit hoher kognitiver Belastung der Probanden empfehlen viele Autoren, die Untersuchung im Interviewverfahren durchzuführen (s. [BORTZ06], [PORST09], [WOTTAWA93], u.a.). Dabei liest der Moderator die Fragen laut vor und trägt

die Antworten des Probanden in den Fragebogen ein. Dadurch wird der Proband weniger von der Stellaufgabe abgelenkt, er kann bei Unklarheiten Fragen stellen und die Fragebögen werden einheitlich ausgefüllt. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass der Moderator die Fragen und Aufgaben allen Probanden gleich wiedergibt.

Da fast nie die Gesamtheit aller Menschen bei einer Befragung erreicht werden kann, muss ein ausreichend großes und möglichst heterogenes Probandenkollektiv ausgewählt werden. Nach Bortz et al. entstehen Fehler bei der Auswertung der Ergebnisse, wenn ein stark homogenes Probandenkollektiv, z.B. bestehend aus Studenten mit ähnlichem Alter, für eine Befragung eingesetzt wird [BORTZ06].

Nach Hajos ist jeder Versuch, der auf den Ergebnissen und Erfahrungen von Menschen beruht, fehlerbehaftet [HAJOS74]. Um diese Fehler so gering wie möglich zu halten, empfiehlt er, Versuche genügend oft zu wiederholen und Mittelwerte samt Streuungsbereich aus allen erhaltenen Ergebnissen zu bilden. Darüber hinaus soll man mögliche Ursachen von Fehlern ermitteln, um diese so gut wie möglich auszuschließen.

Weitere Fehler können durch den Ort entstehen, an dem die Versuche stattfinden. Untersuchungen im Labor weisen andere Ergebnisse auf als Felduntersuchungen. Die ermittelten Ergebnisse müssen deshalb nach diesem Kriterium entsprechend beurteilt werden.

3 Adaptive multifunktionale Stellteile – Stand der Technik und Forschung

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen zu adaptiven multifunktionalen Stellteilen erläutert. Dazu werden neben den geeigneten Komponenten auch der Stand der Forschung und der Technik für diese Stellteile vorgestellt.

Adaptiv sind aktive Stellteile, wenn sie sich an den Nutzungskontext anpassen können [AKYOL01]. Dabei wird zwischen drei Anpassungsarten unterschieden. Die Situationsadaptivität beschreibt die Anpassung an Einflüsse aus der Umwelt. Eine Anpassung an die psychografischen und demografischen Merkmale des Benutzers wird als Benutzeradaptivität verstanden. Passt sich ein aktives Stellteil an die gerade betätigte Funktion oder Bedienaufgabe an, so wird dies als Aufgabenadaptivität bezeichnet.

Bei multifunktionalen Stellteilen spielt die Aufgabenadaptivität eine besonders wichtige Rolle. Nur wenn sich das Stellteil anpasst, lassen sich verschiedene Zustände und Änderungen des Systems an den Benutzer übertragen. Als Alternative zur visuellen Darstellung dieser Informationen über eine sich ändernde Anzeige bietet sich besonders die haptische Darstellung an [HAMPEL08]. Hiermit ist es dem Benutzer möglich, wichtige Systemkomponenten zu überwachen, ohne den Blick auf ein separates Display abwenden zu müssen. Eine taktile Darstellung dieser Informationen über die Formgebung solcher Stellteile, z.B. einen fühlbaren Zeiger, ist bei dieser Stellteilart nicht möglich. Dies könnte z.B. beim Wechsel zwischen zwei Funktionen zu Fehlinterpretationen der aktuellen Stellteilausrichtung seitens des Benutzers führen.

3.1 Komponentenauswahl für adaptive multifunktionale Stellteile

Um eine optimale Informationsübertragung vom Stellteil zum Menschen zu gewährleisten, muss auf eine Auswahl geeigneter Komponenten geachtet werden. Ein Eingabesystem für adaptive multifunktionale Stellteile setzt sich aus dem Stellteil selbst, den antreibenden oder abbremsenden Aktoren, Sensoren und der regelungs- oder steuerungstechnischen Ausstattung zusammen. Für die hier durchgeführten Versuche wurde des Weiteren ein Messsystem eingesetzt, um die wirkenden Stellmomente, die Drehgeschwindigkeit und die Drehwinkel aufzeichnen zu können.

3.1.1 Stellteile

Für den Einsatz eines multifunktionalen Stellteils eignet sich zur Darstellung vieler Informationen ein rotatorisches Stellteil in Form eines Drehknopfes besonders [HAMPEL09C]. Stellteile zum Drehen erlauben einen unendlich langen Stellweg und somit das Übertragen vieler aufeinanderfolgender Informationen. Der Stellweg ist hier nicht, wie bei Stellteilen mit translatorischer Bewegung, begrenzt. Mit Drehstellern lassen sich Werte sowohl kontinuierlich als auch diskret eingeben [DIN EN 894-3]. Durch die große Anzahl an veränderlichen Parametern, bezogen auf den Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf bei einer Drehbewegung, lassen sich zahlreiche Informationen unterschiedlich darstellen (vgl. Kap 4.1).

Eine greifneutrale Formgebung ohne Richtungsweisung kann durch die Wahl eines Drehknopfes anstelle eines Drehknebels erreicht werden (vgl. Bild 3.1).

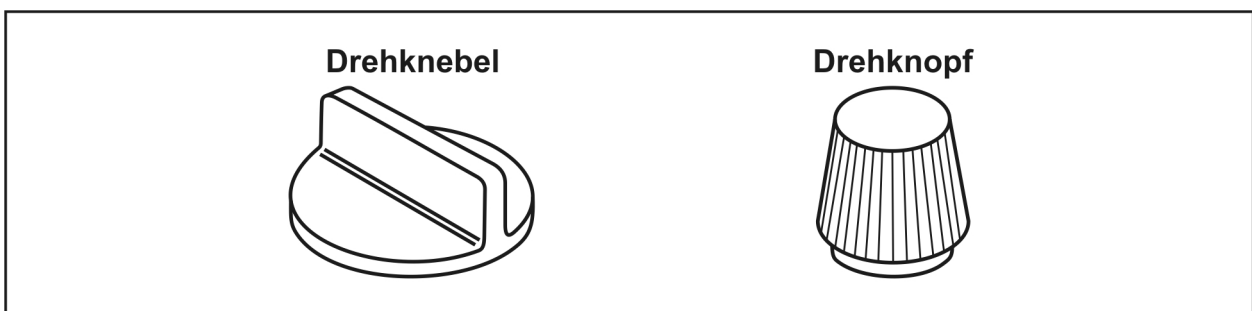


Bild 3.1: Beispielhafte Form eines Drehknebels und eines Drehknopfs

Die greifneutrale Formgebung ermöglicht außerdem die Betätigung mit der rechten oder linken Hand. Unter der Voraussetzung einer variablen Anordnung zum Benutzer spielt somit die Händigkeit bei Drehknöpfen eine untergeordnete Rolle.

3.1.2 Aktoren

Für die Auswahl eines passenden Aktors können der Bewegungsumfang, die notwendige Kraft oder das Moment am Stellteil und die Reaktionsgeschwindigkeit des Aktors herangezogen werden. Die Kenngrößen verschiedener Aktoren sind in Bild 3.2 dargestellt. Demnach haben Piezoaktoren die kürzeste Stellzeit bei gleichzeitig sehr hohen Stellkräften. Jedoch lassen sich mit ihnen nur sehr kleine Stellwege realisieren. Bei allen anderen Aktoren hängen die Stellkraft, der Stellweg und die Stellzeit stark von deren Konstruktion ab. Die beiden in Bild 3.2 dargestellten Zusammenhänge zwischen Stellkraft und Stellweg bzw. -zeit dürfen deshalb nicht als miteinander verknüpft angesehen werden. Vielmehr führt ein optimaler Zusammenhang zwischen Stellkraft und

Stellweg häufig zu einem ungünstigen Zusammenhang zwischen Stellkraft und Stellzeit und umgekehrt. Die Auswahl eines Aktors muss deshalb individuell erfolgen.

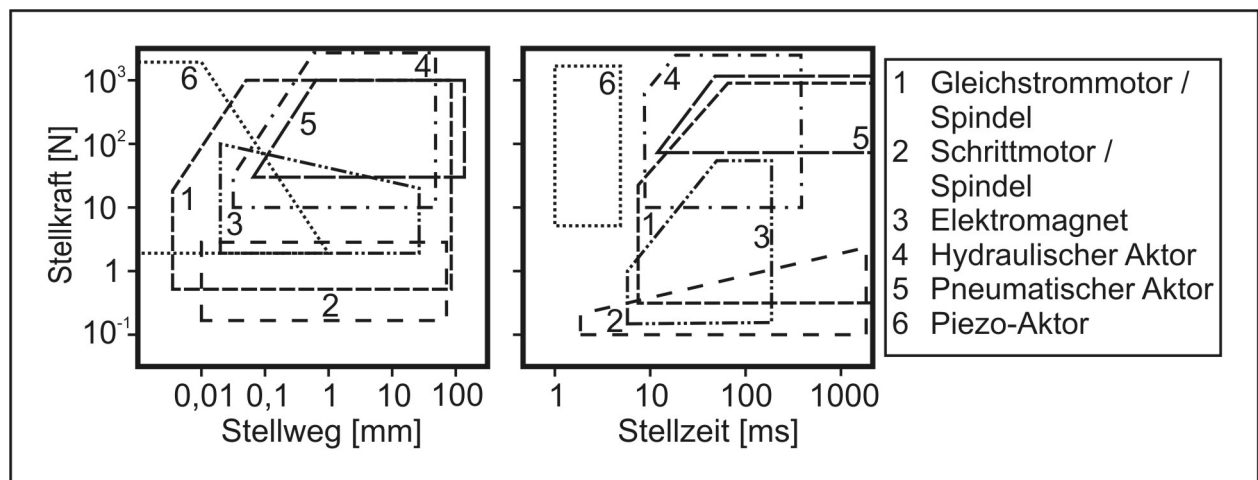


Bild 3.2: Zusammenhang zwischen Stellkraft und Stellweg bzw. -zeit verschiedener Aktoren [HEIMANN07]

Da sich, wie bereits in Kapitel 3.1.1 erörtert, ein Stellteil mit rotatorischer Bewegung am besten für ein multifunktionales Stellteil mit aktiver haptischer Rückmeldung eignet, bietet sich für die Auswahl eines Aktors ebenfalls eine rotatorische Funktionsweise an. Dieser muss einen möglichst unbegrenzten Stellweg aufweisen und dabei Drehmomente zum Beschleunigen und Abbremsen des Stellteils aufbringen, die in etwa denen der vom Benutzer aufgebrauchten Drehmomente entsprechen. Alle diese Punkte sprechen für einen Gleichstrommotor als Aktor eines multifunktionalen Stellteils mit aktiver haptischer Rückmeldung.

Für die Auswahl eines geeigneten Motors als Aktor für ein haptisches Rückmeldesystem können folgende Kriterien als Auswahlhilfe dienen [KAPUSCINSKI97]:

- Art der Kommutierung
- Unerwünschte Drehmomentschwankungen auf Grund der Motorbauweise
- Größe und Masse des Motors
- Nenndrehmoment und benötigtes Drehmoment

Ein Gleichstrommotor basiert auf einem drehbaren Element „Anker“, der in einem unbeweglichen Element „Stator“ bewegt wird (vgl. Bild 3.3). Der Stator kann als Elektromagnet oder Permanentmagnet ausgelegt sein. Die Bewegung des Ankers wird durch eine Bestromung der Ankerwicklungen erzeugt, die zu einer Lorenzkraft im Magnetfeld des Stators führen. Damit der Anker nicht stehen bleibt, müssen dessen

Wicklungen ständig umgepolt werden, damit die Lorenzkraft stets wirken und den Anker bewegen kann.

Gleichstrommotoren werden in der Art ihrer Kommutierung in elektronisch und mechanisch kommutierte Elektromotoren unterschieden. Bei letzteren liegen Bürsten am Kommutator an und leiten so den Strom in die Ankerwicklungen. Bei einer Drehbewegung wird die Stromrichtung durch die wechselnden Kontakte des Kommutators in den Ankerwicklungen umgepolt und so eine ständig wirkende Lorenzkraft und eine damit verbundene Drehbewegung erzeugt [BEUTH04].

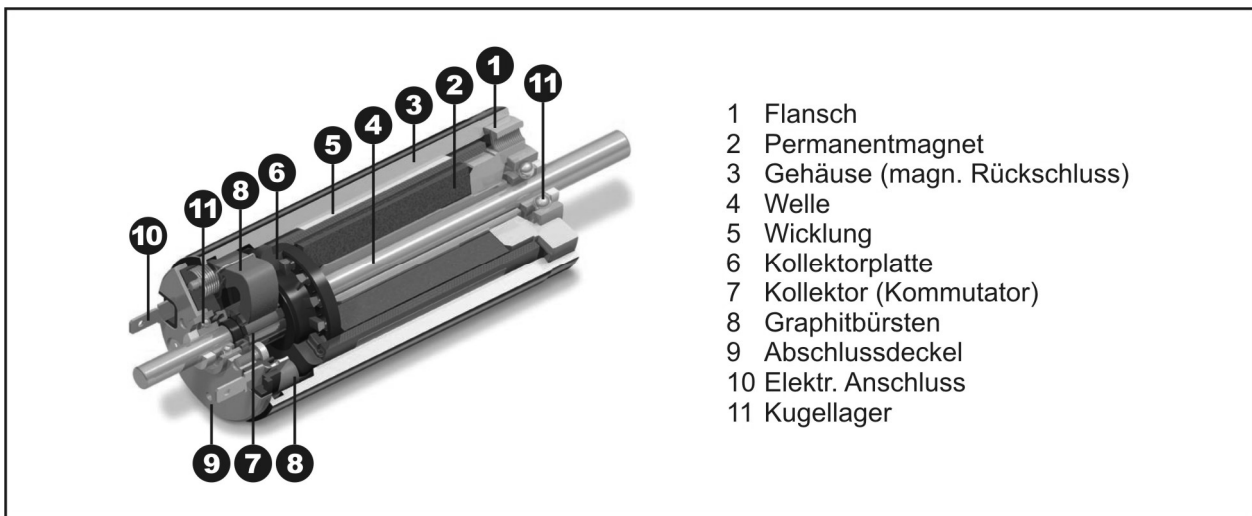


Bild 3.3: Schematischer Aufbau eines Gleichstrommotors [MAXON08]

Bei elektronisch kommutierten Gleichstrommotoren werden die Bürsten durch eine Elektronik ersetzt, die für eine kontaktlose Umpolung sorgt. Dadurch arbeiten solche Motoren mit Ausnahme der Lager nahezu reibungs- und verschleißfrei. Jedoch ist ein gleichmäßiger Anlauf des Motors von einer guten Motorsteuerung abhängig und die Rückgewinnung der aktuellen Betriebsdaten, wie dem Ankerstrom, deutlich aufwändiger.

Der klassische Aufbau eines Gleichstrommotors bringt den Nachteil eines ungleichmäßigen Rundlaufs und eines schwankenden Drehmoments mit sich. Da der stromdurchflossene Anker meist im Kern aus Eisen besteht, bildet dieser neben dem Stator ein zweites Magnetfeld aus. Beide Magnetfelder beeinflussen sich gegenseitig, was zu Drehmomentschwankungen, sogenanntes „torque ripple“, und Drehzahlschwankungen führen kann. Dieser Effekt tritt besonders bei kleinen Drehzahlen auf. Nicht bestromt bleibt die Motorwelle in Abhängigkeit von der Gestaltung des Ankers nur in bestimmten Positionen stehen, sogenanntes „cogging“. Eine Abhilfe zu diesen Effekten kann auf unterschiedliche Art geschaffen werden. Eine Möglichkeit bieten eisenlose

Anker, sogenannte Glockenanker. Eine weitere Möglichkeit ist, die Anzahl der Ankerwicklungen und die der Statormagnete ungleichzahlig auszulegen. Desweiteren können die Magnete schräg positioniert oder mit kleinen Schlitzfenstern versehen werden [Guo09].

Alle Maßnahmen zur Verringerung des ungleichmäßigen Drehmoments und der Drehzahl sind kostenintensiv und wirken sich entsprechend auf die Preise der Elektromotoren aus.

Ein weiterer Punkt, der bei der Auswahl eines geeigneten Elektromotors eine wichtige Rolle spielt, ist die Motorengröße und das -gewicht im Zusammenhang mit Motorleistung und -drehmoment. Eine hohe Motorleistung und ein damit verbundenes hohes Drehmoment führen gleichzeitig zu einem hohen Motorgewicht [KERN09]. Soll ein multifunktionales aktives Stellteil mobil sein, müssen aus diesem Grund Einschränkungen in Bezug auf das maximal aufzubringende Drehmoment in Kauf genommen werden. Eine hohe Motormasse führt gleichzeitig zu einer großen Massenträgheit. Diese ist vor allem bei schnellen Anfahr- und Abbremsbewegungen zu beachten.

Anhand der oben aufgeführten Analyse sollte es sich bei dem Aktor zur Erzeugung einer aktiven haptischen Rückmeldung um einen ausreichend groß dimensionierten Gleichstrommotor handeln, dessen Aufbau keine Drehmomentschwankungen erzeugt. In Prüfständen mit adaptiven multifunktionalen Stellteilen bietet sich eine mechanische Kommutierung bei Gleichstrommotoren besonders an, da sie eine einfache Regelung oder Steuerung des Motors und eine einfache Überprüfbarkeit des anliegenden Drehmoments durch Messung des Ankerstroms ermöglicht.

3.1.3 Sensoren

Der Auswahl der Sensoren muss aus zwei Gründen besondere Beachtung geschenkt werden. Zum einen dienen die Sensoren zur Messung der Drehwinkel sowie der am Stellteil wirkenden Kräfte und Momente. Um sicherstellen zu können, dass die untersuchten Drehmomentverläufe den vordefinierten Verläufen entsprechen, müssen diese vor jeder Untersuchung gemessen und gegebenenfalls kalibriert werden. Zum anderen wird durch die Sensoren die Regelung oder die Steuerung der Aktoren maßgeblich beeinflusst. In beiden Fällen hängt die Höhe der notwendigen Messgenauigkeit von den vom Menschen wahrnehmbaren Reiz- und Unterschiedsschwellen ab. Sowohl die Auflösung des Drehgebers als auch des Drehmomentsensors müssen deshalb ausreichend hoch sein, dass die vom Benutzer erkennbaren Unterschiede bei Schwankungen des Drehwinkels oder der Drehmomentamplitude sowie bei einem un stetigen Drehmo-

mentverlauf bereits in der Messwertaufzeichnung sichtbar sind. Angaben für solche Schwellenwerte von Drehwinkeln sind in Kapitel 3.2.3 aufgelistet. Demnach muss ein Drehwinkelsensor eine Auflösung von mindestens $0,2^\circ$ besitzen, was 1800 Messpunkten pro Umdrehung entspricht. Der Drehmomentsensor sollte, ausgehend vom zu untersuchenden Drehmomentbereich, eine Auflösung von mindestens $0,0048 \text{ Nm}$ aufweisen².

Weiterhin sollten sowohl die Sensoren für die Drehmomentmessung als auch für die Drehwinkelmessung eine möglichst geringe Reibung und Massenträgheit aufweisen, um die Drehbewegung nicht ungewollt zu beeinflussen. Für beide Messparameter bieten sich aus diesem Grund berührungslos arbeitende Sensoren an.

3.1.3.1 Drehwinkelsensoren

Die Drehwinkelmessung kann durch ein optisches, magnetisches oder mit Ultraschalltechnik unterstütztes Messverfahren erfolgen. Bei dem einfachsten optischen Messverfahren dient eine Scheibe als Messstrecke, auf der in gleich großen Abständen Teilungen aufgebracht sind. Diese Teilungen, auch Inkremente genannt, werden durch ein photoelektrisches Verfahren abgetastet, gezählt und daraus ein relativer Messwert ermittelt. Die absolute Position kann bei diesem inkrementalen Messverfahren nur durch eine Referenzmarke, die zusätzlich zu den Inkrementen angebracht ist, oder durch einen vor einer Messung frei gesetzten Nullpunkt ermittelt werden [HOFFMANN07]. Bild 3.4 zeigt exemplarisch den Aufbau eines inkrementalen Drehgebers.

Alternativ zum inkrementalen Messverfahren können codierte Messscheiben eingesetzt werden. Durch die Codierung wird jeder Position ein eindeutiges Signal zugeordnet. Dadurch ist eine absolute Positionsangabe stets möglich.

Magnetische Messverfahren werden vor allem dann eingesetzt, wenn bereits ein Magnetfeld durch einen Aktor vorhanden ist, mit dessen Bewegung die Position bestimmt werden kann. Dabei wird zwischen Verfahren mit statischen Magnetfeldern und zeitlich veränderlichen Magnetfeldern unterschieden [KERN09]. Der Vorteil magnetischer Wegmessverfahren liegt vor allem in der Robustheit bei starker Schwankung des Temperaturbereichs oder extremen Umweltbedingungen [PROFOS94]. Bei einem nicht

² Die Berechnung der Mindestauflösung des Drehmomentsensors bezieht sich auf eine Drehmomentamplitude von $0,08 \text{ Nm}$ und einem Stufensprung von $1,06$. Der Stufensprung entspricht der Weberschen Konstante und kann von einem Fachmann wahrgenommen werden [KIENZLE50].

direkt mit dem Aktor gekoppelten Sensor dieses Typs kann sich ein zusätzliches Magnetfeld nachteilig auf einen stetigen Drehmomentverlauf auswirken.

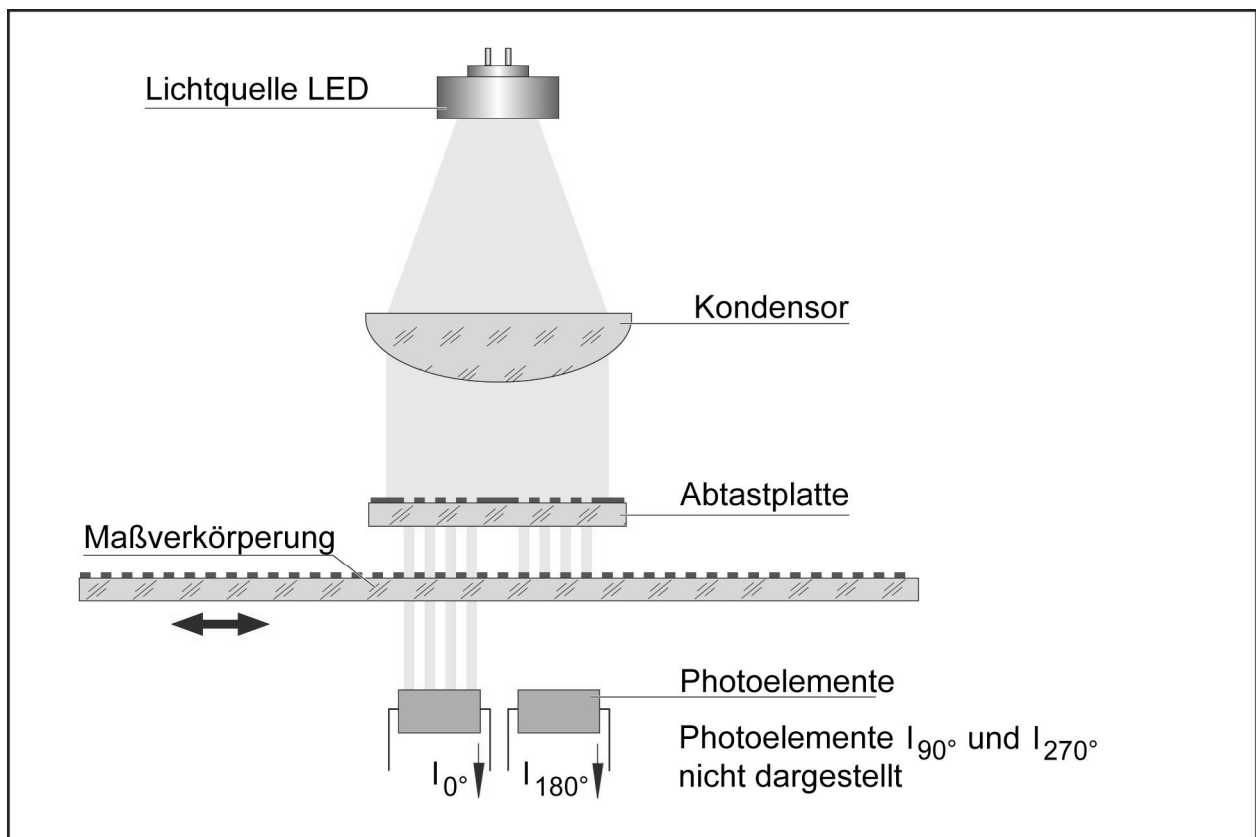


Bild 3.4: Schematischer Aufbau eines inkrementalen Winkelsensors [HEIDENHAIN10]

Des Weiteren können auch Messverfahren mit Ultraschalltechnik zum Einsatz kommen. Dabei wird ein Ultraschallsignal gesendet, an einer Grenzfläche reflektiert und von einem Empfänger verarbeitet. Für Längen- und Winkelmessungen werden Verfahren mit Ultraschalltechnik jedoch selten angewandt.

Für ein adaptives multifunktionale Stellteil spielt die Art der Drehwinkelmessung eine untergeordnete Rolle, solange sie keinen Einfluss auf den Drehmomentverlauf nimmt und eine ausreichend genaue Messung ermöglicht. In manchen Fällen kann es notwendig sein, dass eine absolute Positionsangabe zur Verfügung steht. In diesen Fällen sind Messverfahren auszuwählen, die diese Eigenschaft besitzen.

3.1.3.2 Drehmomentsensoren

Zur Messung von Drehmomenten kommen Dehnmessstreifen (DMS) oder magnetische Verfahren zum Einsatz, wobei DMS häufiger Anwendung finden [HOFFMANN07]. Über sie werden Längenänderungen, die bei einer Torsion der Welle entstehen, in elektrische Widerstandsänderungen umgewandelt und so gemessen. Temperaturschwankungen

stellen bei diesem Messverfahren einen großen Einflussfaktor dar, da sie Längenänderungen der Welle und des DMS, sowie Änderungen dessen elektrischen Widerstandes bewirken. Um diese Effekte auf ein Minimum zu reduzieren, werden deshalb mehrere DMS in einer Halb- oder Vollbrücke zusammengeschaltet (vgl. Bild 3.5).

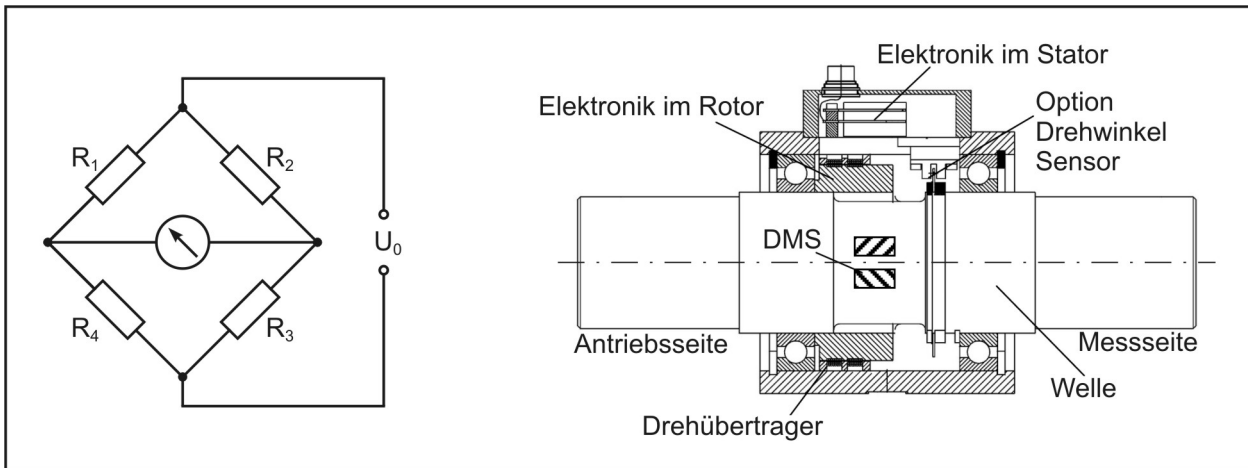


Bild 3.5: Vollbrücke (links) [HOFFMANN07] und Aufbau eines vorgefertigten Drehmomentsensors (rechts) [LORENZ06]

Zur Messung von Drehmomenten rotierender Wellen kommen aufgrund ihres einfachen Einbaus vorwiegend vorgefertigte Messwellen zum Einsatz. Diese lassen sich mit einfachen Mitteln in das zu messende System integrieren. Ein weiterer Vorteil vorgefertigter Sensoren ist die Möglichkeit, das Messsignal schleifringlos und somit reibungsfrei zu übertragen. Weiterhin lassen sich in die Gehäuse, in denen die Elektronik zur Signalerfassung und -weiterleitung verbaut ist, auch Drehwinkelsensoren integrieren.

Magnetisch können Drehmomente über induktive oder kapazitive Verfahren ermittelt werden. Beide Verfahren ähneln sich im konstruktiven Aufbau stark, lediglich die Sensoren zur Drehmomentenerfassung unterscheiden sich. Zur Messung werden auf die Welle eine Scheibe und eine Hülse aufgebracht (vgl. Bild 3.6).

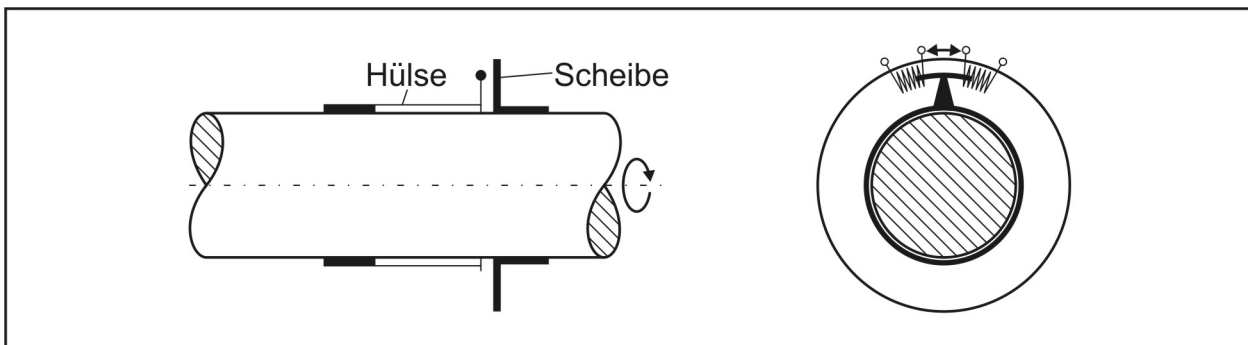


Bild 3.6: Induktive Drehmomentmessung nach [HOFFMANN07]

Wird die Welle tordiert, ändert sich die Ausrichtung der Scheibe relativ zur drehmomentfreien Hülse. Diese Differenz lässt sich mit kapazitiven oder induktiven Wegsensoren in ein Drehmoment umrechnen. Ein Drehmomentsensor ist für ein adaptives multifunktionales Stellteil nicht zwingend notwendig, vor allem dann nicht, wenn das vom Aktor aufzubringende Drehmoment durch eine Steuerung vorgegeben wird. In einem Prüfstand, in dem zur Überprüfung das tatsächlich am Stellteil wirkende Drehmoment stets gemessen werden muss, sowie bei adaptiven multifunktionalen Stellteilen, deren haptische Rückmeldung eine Regelung voraussetzt, sind Drehmomentsensoren jedoch zwingend notwendig. In beiden Fällen sollte der Drehmomentsensor eine genaue Drehmomentmessung ermöglichen und dabei einfach zu verarbeitende Messdaten ohne zeitliche Verzögerung bereitstellen. Aus allen oben genannten Gründen bieten sich DMS mit schleifringloser Messsignalübertragung besonders an. Für einen Prüfstand mit adaptiven multifunktionalen Stellteilen sind darüber hinaus vor allem vorgefertigte Drehmomentsensoren mit DMS wegen ihrer einfachen Einbindung in das Mess- und Regelungssystem zu bevorzugen.

3.1.4 Weitere Komponenten

Zu den weiteren Komponenten eines adaptiven multifunktionalen Stellteils zählen die Welle, die Lagerung, die Regelungs- oder Steuerungstechnik und, falls benötigt, ein Getriebe.

Die Welle, auf der das Stellteil aufgebracht und die vom Aktor angetrieben oder abgebremst wird, muss einen möglichst kleinen Durchmesser besitzen, um die bewegten Massen und deren Trägheiten klein zu halten. Der Durchmesser der Welle muss jedoch ausreichend groß sein, damit es beim Drehen zu keiner Verdrillung der Welle kommt. Einer Verdrillung kann auch durch geeignete Materialauswahl vorgebeugt werden.

Als Lagerung der Welle sollten Rillenkugellager oder Rollenlager eingesetzt werden. Ihr Vorteil liegt im Vergleich mit hydrodynamischen Gleitlagern in dem nahezu reibungsfreien Lauf. Zudem ist bei diesen der sogenannte Stick-Slip-Effekt nahezu ausgeschlossen. Dieser tritt auf beim Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung, bewirkt einen ungleichmäßigen Anlaufvorgang und kann bei langsamen Drehbewegungen zu einer ungleichmäßigen Drehgeschwindigkeit aufgrund sich ständig ändernder Reibmomente führen [MUHS07].

Für die Signalausgabe an den Aktor muss ein Regelungs- oder Steuerungssystem eingesetzt werden. Für ein aktives Stellteil, das sich an alle Systemänderungen und

Benutzerverhalten selbstständig anpassen soll, ist eine Regelung notwendig. Sollen sich die Drehmomente eines Stellteils hingegen nur auf einfache, vorbestimmbare Parameter (vgl. Kapitel 4.1), wie unterschiedliche Funktionen oder präferierte Werte, anpassen lassen, so ist eine Steuerung zu bevorzugen. Im Gegensatz zu einer Regelung lässt sich diese im Allgemeinen einfacher aufbauen und programmieren. Bild 3.7 zeigt die Schemata einer Regelung und einer Steuerung eines aktiven Stellteils. Daraus ist ersichtlich, dass für eine Regelung eine ständige Überprüfung des Ist-Drehmoments am Drehknopf mit dem Soll-Drehmoment notwendig ist.

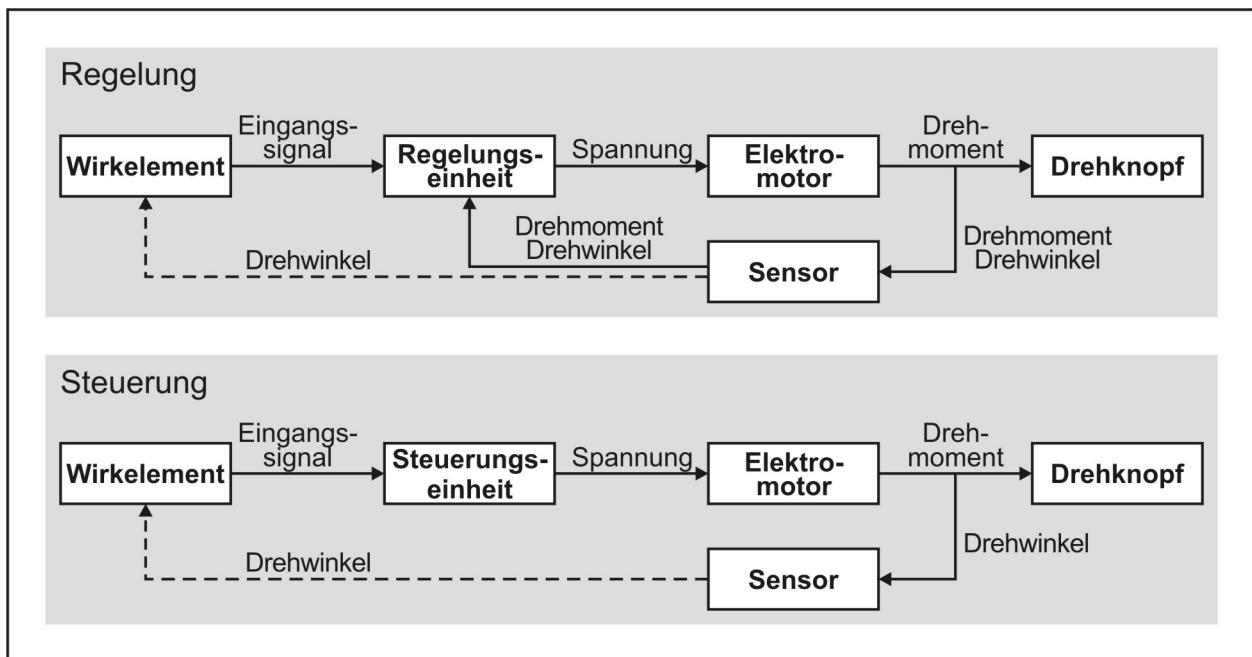


Bild 3.7: Schemata einer Regelung (oben), nach [HAMPEL09A], und einer Steuerung aktiver Stellteile

Die Wirkelemente bekommen in beiden Fällen ein elektronisches Signal über die gerade aktuelle Ausrichtung des Drehknopfes und ändern dementsprechend ihren Zustand. Im Zusammenhang mit der Regelung oder Steuerung ist die Reaktionszeit des gesamten Systems eines aktiven Stellteils von Bedeutung, da diese mit der Dialogsituation übereinstimmen muss. Die Zeit darf nicht größer sein als der „psychische Moment“ (vgl. Kapitel 3.2.3). Nach dieser Zeit muss die Regelung oder die Steuerung das Eingangssignal des Funktionselements verarbeitet, das Signal entsprechend umgewandelt und an den Motor weitergeleitet haben, damit dieser das für das neue Eingangssignal passende Drehmoment aufbringen kann.

Zur Erhöhung der Drehmomente und Erhaltung einer kleinen Motormasse können Getriebe eingesetzt werden. Hier ist jedoch zu beachten, dass die Getriebe möglichst

spielfrei arbeiten müssen, um keine unerwünschten Nebeneffekte wie Drehmomentstöße bei Lastwechsel am Stellteil zu erhalten. Spielfreie Getriebe sind allerdings immer stark reibungsbehaftet und können damit die Untersuchung beeinflussen.

3.2 Forschungsschwerpunkte für ein adaptives multifunktionales Stellteil

Neben den in Kapitel 2.2 genannten allgemeinen Anforderungen an eine Mensch-Maschine-Schnittstelle müssen gerade bei multifunktionalen Stellteilen mit aktiver haptischer Rückmeldung folgende drei Grundaspekte berücksichtigt werden:

- der Komfort bei der Bedienung von Stellteilen,
- die Genauigkeit oder die Fehlerhäufigkeit bei Positionieraufgaben,
- die Unterscheidbarkeit von haptisch dargebotenen Informationen.

Alle drei Aspekte gilt es separat und kombiniert zu untersuchen, um Empfehlungen zur Auslegung eines adaptiven multifunktionalen Stellteils geben zu können.

Im Folgenden soll deshalb der Stand der Forschung sowie Richtlinien und Empfehlungen aus der Literatur zu allen drei Forschungsschwerpunkten dargestellt werden.

3.2.1 Stellgenauigkeit

Der erste wichtige Forschungsschwerpunkt für ein adaptives multifunktionales Stellteil ist die Stellgenauigkeit. Die Stellgenauigkeit SG wird durch die Summe korrekter Positioniervorgänge $POS_{korrekt}$ im Verhältnis zu allen durchgeführten Positioniervorgängen POS eines Stellteils beschrieben (vgl. 3.1):

$$SG = \frac{\sum POS_{korrekt}}{\sum POS} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Häufig wird zur Berechnung jedoch nicht die Stellgenauigkeit sondern die Fehlerhäufigkeit herangezogen. Diese kann wiederum als die Summe der gesamten Positionierungen abzüglich aller korrekten Positionierungen im Verhältnis zur Summe aller Positionierungen dargestellt werden. Einen ähnlichen Wert stellt die „Human Error Probability“ (HEP) dar [NEUDÖRFER05]. Sie berechnet sich aus der Summe der gemachten Fehler N durch die Summe der möglichen Fehler n.

$$HEP = \frac{N}{n} = \frac{\sum POS - \sum POS_{korrekt}}{\sum POS} \quad (3.2)$$

Neudörfer gibt an, dass dem Menschen zwangsläufig Fehler beim Bedienen von Mensch-Maschine-Schnittstellen unterlaufen, vor allem bei Zeitdruck, emotionaler Belastung und äußerer Belastung. Für das Einstellen eines Drehschalters mit diskreter Werteingabe gibt er eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 0,01%–1% an, ohne dabei diese Angaben zu begründen.

Die Einflussfaktoren auf die Stellgenauigkeit lassen sich in zwei Gruppen gliedern: die benutzerseitigen und die stellteilseitigen Einflussfaktoren. Die benutzerseitigen Faktoren beschreiben alle Einflüsse, die direkt vom Menschen stammen. Dazu zählen alle Faktoren, die auf demografischen und psychografischen Merkmalen beruhen. Bei den demografischen Merkmalen spielen vor allem das Alter, die Händigkeit und die feinmotorischen Fähigkeiten eine wichtige Rolle. Nach Biermann et al. verschlechtert sich die Feinmotorik mit dem Alter [BIERMANN03]. Aussagen zum Einfluss der Händigkeit auf die Feinmotorik sind hingegen widersprüchlich. Nach Stein kann die Händigkeit die Feinmotorik beeinflussen [STEIN06]. Demnach fällt es Personen schwer, feinmotorische Aufgaben mit der nichtdominanten Hand korrekt zu erfüllen. Porac et al. berichten hingegen von einer Studie über einen Geschicklichkeitstest, in der die Aufgabenerfüllung mit nichtdominanter Hand in 20% der Fälle bei Rechtshändern und in 26% der Fälle bei Linkshändern zu besseren Ergebnissen führte [PORAC81].

In beiden Fällen muss davon ausgegangen werden, dass mit einer Verschlechterung der feinmotorischen Fähigkeiten eine Verschlechterung der Stellgenauigkeit einhergeht. Ein weiterer benutzerseitiger Einflussfaktor kann die Drehgeschwindigkeit sein. Hohe Drehgeschwindigkeiten treten häufig bei langen Stellwegen zur groben Positionierung des Stellteils auf. Dabei ist die Stellgenauigkeit deutlich geringer als bei langsamen Bewegungen (vgl. [JENKINS50]).

Die Greifart und der daraus resultierende Kopplungsgrad zwischen Hand und Stellteil können sich ebenfalls auf die Stellgenauigkeit auswirken. Bild 3.8 zeigt die möglichen Arten, mit denen ein Stellteil gegriffen werden kann. Nach Bullinger et al. muss bei reibschlüssiger Kraftübertragung mehr Kraft vom Benutzer auf ein Stellteil übertragen werden als bei formschlüssiger [BULLINGER79]. Dementsprechend erhöht sich bei reibschlüssiger Greifart auch die Gefahr des Abrutschens und die Wahrscheinlichkeit der Fehlpositionierung steigt. Durch eine geeignete Oberflächen- und Materialwahl des Stellteils kann diesem Effekt entgegen gewirkt werden.

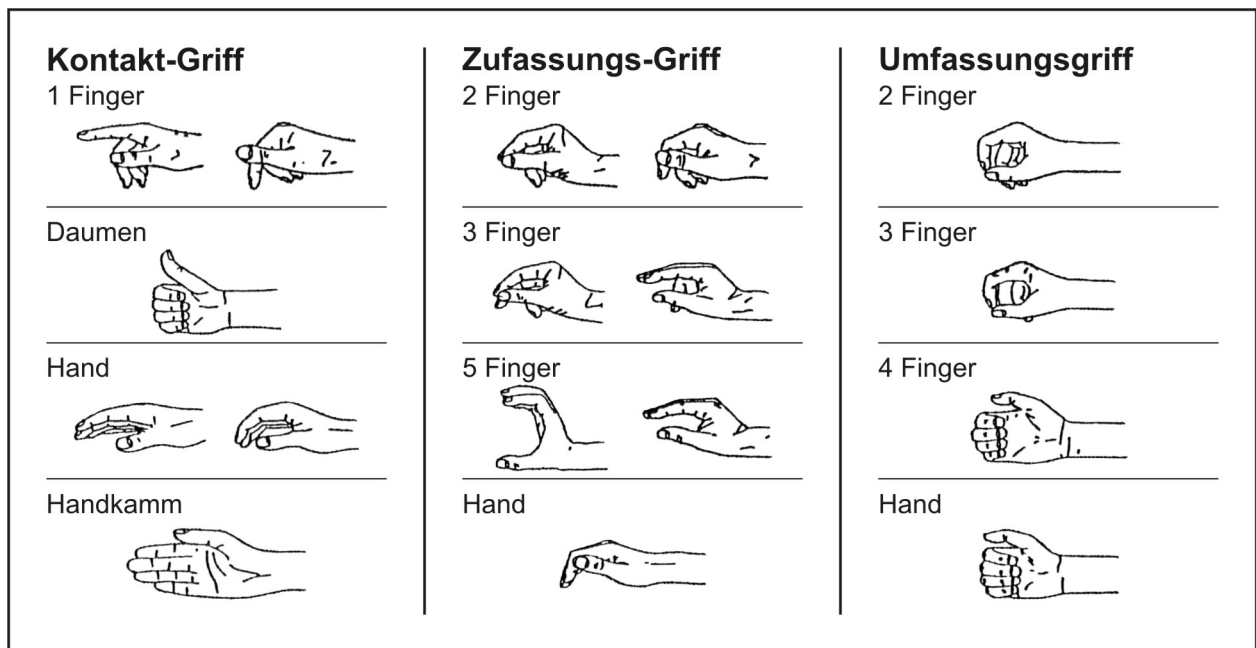


Bild 3.8: Greifarten der Hand [BULLINGER94]

Die Stellgenauigkeit hängt stark vom Trainiertheitsgrad und der Lernfähigkeit des Benutzers ab. Bei längerer Bedienung kann sich der Benutzer auf das zu bedienende System einstellen und weiß durch häufige Wiederholung einer Stellteilpositionierung die benötigten Kräfte einzuschätzen. Dieser Effekt ist in der Versuchsplanung in Form einer Einlernphase zu berücksichtigen.

Zu den stellteilseitigen Einflussfaktoren zählen alle Faktoren, die sich nicht direkt vom Menschen bei der Betätigung des Stellteils beeinflussen lassen, sondern vom Aufbau und den Komponenten des Stellteilsystems herrühren.

Ein stellteilseitiger Einflussfaktor auf die Stellgenauigkeit ist die Massenträgheit. Rühmann fasst mehrere Untersuchungen, die den Einfluss der Massenträgheit auf die Stellgenauigkeit bei Drehknöpfen und Handrädern behandeln, zusammen [RÜHMANN89]. Er kommt zum Ergebnis, dass eine hohe Massenträgheit gerade für kontinuierliche Drehbewegungen, z.B. um eine konstante Drehzahl zu halten, Einflüsse der Coulomb'schen Reibung minimiert. Aussagen über den direkten Einfluss der Massenträgheit auf die Stellgenauigkeit kann er aufgrund widersprüchlicher Untersuchungsergebnisse nicht machen.

Ein weiterer Faktor, der die Stellgenauigkeit beeinflussen kann, ist die Reibung innerhalb eines Stellteilsystems. Für mechanische Stellteilsysteme ist Reibung ein natürlicher Effekt, der je nach konstruktiver Lösung des Systems unterschiedlich stark ausfallen kann. Bei einem gelagerten Stellteilsystem führt Reibung zu einer Verschiebung des gesamten Drehmomentverlaufs aufgrund von Gleit- oder Rollreibung und zu

Drehmomentspitzen zu Beginn einer Stellbewegung aufgrund von Haftreibung. Schmidtke analysiert dazu mehrere Untersuchungen und kommt zu der Schlussfolgerung, dass Reibung bei Drehknöpfen einen negativen Einfluss auf die Stellgenauigkeit hat, wenn hohe Stellgeschwindigkeiten gefordert sind oder der Stellweg und die Stellteilmasse sehr klein sind [SCHMIDTKE89D]. Vorteilhaft können sie hingegen sein, wenn unbeabsichtigte Handbewegungen am Stellteil, z.B. durch Vibration oder Stöße, vermieden werden sollen.

Schmidtke analysiert in weiteren Untersuchungen den Einfluss von Spiel auf Drehschalter [SCHMIDTKE89E]. Er fasst zusammen, dass ein Spiel im Stellteilsystem im Vergleich zur Reibung deutlich weniger Einfluss auf die Stellgenauigkeit hat. Die Feineinstellung eines spielbehafteten Stellteils kann sich jedoch ebenfalls verschlechtern.

Zur Erhöhung der Stellgenauigkeit empfiehlt die DIN EN 894-3 eine Informationsrückkopplung für den Benutzer über den aktuellen Wert der gesteuerten Variablen [DIN EN 894-3]. Dies kann z.B. visuell über eine deutliche Beschriftung oder eine entsprechende Anordnung des Stellteils geschehen. Empfehlungen zu einer haptischen Informationsrückmeldung werden nicht gegeben.

Für eine diskrete Eingabeart gibt es verschiedene Empfehlungen für die Rastwinkelgröße, um eine hohe Stellgenauigkeit zu gewährleisten. Baumann et al. geben dafür einen Winkelbereich zwischen 15° – 30° pro Rastung an [BAUMANN98]. Schmidtke empfiehlt hingegen einen Bereich zwischen 15° – 45° pro Rastung. Ferner gibt er an, die Anzahl der Raststellungen auf zwölf pro Umdrehung zu begrenzen, wenn keine Sichtkontrolle auf das Stellteil möglich ist [SCHMIDTKE89B].

3.2.2 Komfortbereiche

Gerade bei einem adaptiven multifunktionalen Stellteil müssen die vom Benutzer aufzubringenden Kräfte oder Drehmomente in einem als komfortabel angesehenen Bereich liegen. Nur wenn dies der Fall ist, können solche Mensch-Maschine-Schnittstellen auch bei einer Dauerbetätigung eingesetzt werden und eine Akzeptanz bei den Benutzern bewirken.

Weiterhin sind die Oberfläche und das Material von Stellteilen weitere Faktoren, die es für Komfortuntersuchungen zu beachten gilt. Mit beiden Faktoren lassen sich die übertragbaren Kräfte und die Qualitätsempfindung eines Stellteils beeinflussen. Bei rauer Oberfläche oder gummiartigem Material erhöht sich beispielsweise die übertragbare

Kraft bei gleicher Stellteilgröße [BULLINGER79]. Desweiteren wird eine leicht raue Stellteilerfläche qualitativ höher bewertet als eine glatte [BÖRSCHLEIN97].

Zu den von Benutzern aufzubringenden Kräften und Momenten gibt es einige Angaben und Empfehlungen in der Literatur, z.B. für Drehmomente an rotatorischen Stellteilen (vgl. Tabelle 3.1). Häufig werden jedoch nur die maximalen Drehmomentamplituden angegeben. Empfehlungen zur Form des Drehmoment-Drehwinkelverlaufes werden hingegen nur selten gegeben. Die Angaben für empfohlene Drehmomente eines Drehstellers variieren stark und hängen von der Greifart, dem Geschlecht des Benutzers, der Bedienebene und der Eingabeart ab. Es lassen sich Angaben mit einer großen Streuung zwischen 0,02–1,0 Nm in der Literatur finden, die ebenfalls an einen Stellteildurchmesser gekoppelt sind. Die folgenden Angaben sollen deshalb nur als grobe Richtwerte für die nachfolgende Untersuchung dienen.

Stellteilbeschreibung	Empfohlener Drehmomentbereich [Nm]	Empfohlener Durchmesserbereich [mm]	Quelle
Drehknopf Durchmesser : Breite >1	0,2–0,8	20–100	[NEUDÖRFER81]
Drehknopf Durchmesser : Breite <1	0,1–0,5	20–80	[NEUDÖRFER81]
Drehknopf	0,03–1,0	15–60	[VDI VDE 2258]
Drehknopf vertikale Bedienebene, Frauen	0,02–0,1	50 ³	[SCHMIDTKE89C]
Drehknopf vertikale Bedienebene, Männer	0,02–0,27	50 ³	[SCHMIDTKE89C]
Drehknopf Zufassungsgriff, kontinuierliche Eingabe	0,02–0,1 (Optimum: 0,035)	10–50 (Optimum: 25)	[SCHMIDTKE89A]
Drehschalter diskrete Eingabe	0,125–0,7 (Optimum: 0,15)	25–100 (Optimum: 30)	[SCHMIDTKE89B]
Drehknopf mit Rändelung kontinuierliche Eingabe	< 0,5	7–80	[DIN EN 894-3]

Tabelle 3.1: Angaben zu Drehmomenten und dazugehörigen Durchmessern für Stellteile mit Rotationsbewegung

³ Der Durchmesser bezieht sich auf das zur Ermittlung der Drehmomente eingesetzte Stellteil.

Weitere Angaben zu empfohlenen Drehmomentbereichen hängen vorwiegend von den Stellteilmaßen und der Stellteilform ab. Nach Bullinger ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem Drehmoment und dem Stellteildurchmesser [BULLINGER94]. Danach wächst das empfohlene maximale Drehmoment mit größer werdendem Durchmesser bis zu einer bestimmten Obergrenze an (vgl. Bild 3.9).

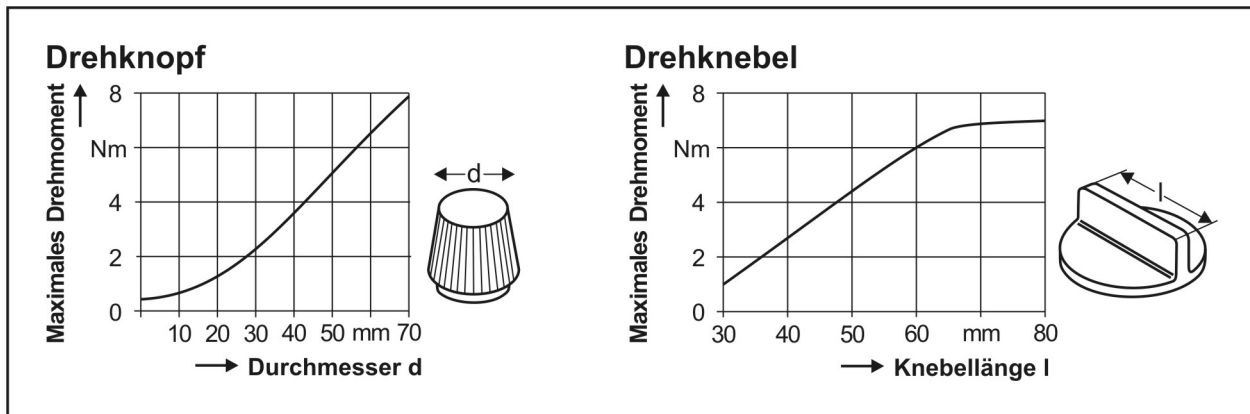


Bild 3.9: Zusammenhang zwischen Stellteilgröße und Drehmoment [BULLINGER94]

In unterschiedlichen Forschungsarbeiten wurden desweiteren verschiedene Faktoren untersucht, die Einfluss auf den Komforteindruck und die Wertanmutung von Stellteilen nehmen und damit auch Auswirkungen auf die am Stellteil wirkenden Drehmomente nehmen können. Nach Börschlein sind für Komfortuntersuchungen an Stellteilen deren Form, das Material und das Betätigungsgefühl zu untersuchende Aspekte [BÖRSCHLEIN97]. Diese können weiter unterteilt werden, um so u.a. Aussagen für möglichst komfortable und hochwertig anmutende Geometrien, Oberflächen, Betätigungskräfte, Stellgeräusche und Betätigungswege zu erhalten. Alle Faktoren ergeben dann ein Gesamtbild des Komforteindrucks eines Stellteils. Gleichzeitig kann ein Qualitätseindruck des Stellteils gewonnen werden, indem der Weg, die Kraft oder das Moment und das Geräusch von den Probanden zu Adjektiv-Paaren wie billig/teuer oder klapprig/stabil zugeordnet werden.

Anguelov untersuchte ebenfalls die haptische aber auch die akustische Rückmeldung von Stellteilen, um damit Aussagen zu deren Komforteindruck machen zu können [ANGUELOV09]. Im Hinblick auf die Haptik stellten in dieser Untersuchung vor allem die Rastpositionenanzahl und die Drehmomentamplitude wichtige, einflussnehmende Faktoren dar. Zu diesem Zweck wurden 19 reale, reibungsbehaftete Drehschalter mit diskreter Werteingabe untersucht und verglichen. Die Untersuchung ergab, dass von diesen 19 Stellteilen diejenigen mit einem Rastwinkel zwischen 10° – 15° und einer

Drehmomentamplitude von ca. 0,03–0,04 Nm am besten von den Probanden beurteilt wurden.

Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Forschungsarbeiten untersuchte Reisinger Aussagen zu einem hochwertig anmutenden und komfortabel empfundenen Drehmoment in Abhängigkeit von dessen Verlaufsform [REISINGER09]. Er variierte dazu die ansteigende und abfallende Flanke eines diskreten Drehmomentverlaufs (vgl. Kapitel 4.1) und ließ diese von Probanden beurteilen. Die Drehmomentamplituden und die Rastwinkel hielt er in diesen Versuchen mit Werten von 0,025 Nm und 18° stets konstant. Nach Reisinger werden eine steil ansteigende Drehmomentflanke und eine moderat fallende Flanke als besonders wertig empfunden. Das Gefühl der Härte, das ein Stellteil aufgrund seines Drehmomentverlaufs vermittelt, hängt hingegen vor allem von der steigenden Flanke ab. Je steiler diese ist, umso härter wird der Drehmomentverlauf empfunden.

3.2.3 Unterschiedsschwelle

Den dritten wichtigen Forschungsschwerpunkt stellt die Unterschiedsschwelle dar. Um dem Benutzer die Erkennung unterschiedlicher Funktionen zu ermöglichen, müssen deren Drehmomentverläufe am Stellteil haptisch unterscheidbar sein. Die haptische Unterscheidbarkeit stellt nach Bubb auch einen Einflussfaktor auf die Stellgenauigkeit dar [BUBB01]. Demnach ist es für die Bediensicherheit wichtig, dass die haptische Wiedererkennung gegeben ist.

Da Unterschiedsschwellen nur empirisch ermittelt werden können, ist mit keinen festen allgemeingültigen Werten für die Schwelle zu rechnen. Aus diesem Grund wird nach Gescheider die Unterschiedsschwelle zweier unterschiedlicher Reize an der Grenze festgelegt, ab der in 50% der Probandenaussagen dieser Unterschied richtig erkannt wird [GESCHEIDER76].

Neben der Unterschiedsschwelle wird in dieser Arbeit auch die Erkennungsrate ER zur Beurteilung der Ergebnisse herangezogen. Die Erkennungsrate berechnet sich aus der Anzahl richtig erkannter Unterschiede US_{richtig} im Verhältnis zu der Anzahl aller bei einem Skalierungsfaktor durchgeführten Vergleiche V_{SF} .

$$ER = \frac{\sum US_{\text{richtig}}}{\sum V_{\text{SF}}} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Die Größe der Unterschiedsschwelle hängt von der Reizart und der dazugehörigen Modalität sowie vom einzelnen Individuum selbst ab. Für die Unterschiedsschwelle

lassen sich in der Literatur unterschiedliche Angaben finden. Als Maß für die Unterschiedsschwelle wird häufig der Skalierungsfaktor herangezogen. Kienzle setzt als sichere Voraussetzung für ein erinnerungsmäßiges Unterscheiden diese Grenze ab einem Skalierungsfaktor von 1,25 des Ausgangsreizes [KIENZLE50]. Weiterhin gibt er den Skalierungsfaktor für einen Geübten mit 1,12 und für einen Fachmann mit 1,06 an. Rodenacker gibt im Vergleich dazu etwas höhere Werte an [RODENACKER91]. Hier wird der Skalierungsfaktor, der kaum merkliche Unterschiede hervorruft, auf einen Wert von 1,12 festgelegt. Ab einem Faktor von 1,25 seien Unterschiede gerade noch feststellbar, ab einem Wert von 1,6 erkennen selbst wenig Geschulte Unterschiede. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die akzeptierbaren Unterschiede eines Normalverbrauchers wesentlich größer als die gerade feststellbaren Unterschiede sind⁴.

In weiteren Forschungsarbeiten wurden Schwellenwerte gezielt für spezielle Sinnesmodalitäten ermittelt. Für Untersuchungen an Drehstellern sind vor allem die Schwellenwerte für die Drehmomente und Kräfte sowie der Drehwinkel des Hand-Arm-Systems von Belang.

Tan et al. ermittelten in einer Untersuchung das Auflösungsvermögen verschiedener Gelenke. Sie stellten fest, dass die Auflösung der körpernahen (proximalen) Gelenke feiner ist, als die der weiter von der Körpermitte entfernten (distalen) Gelenke. Die Unterschiedsschwelle liegt demnach bei Fingergliedern bei 2,5°, bei den Hand- und Ellenbogengelenken beträgt sie 2°. Mit dem Schultergelenk können Winkelunterschiede von 0,8° erkannt werden [TAN94].

Ähnliche Werte gibt auch Schmidt an. Allerdings wird hier darauf hingewiesen, dass das Auflösungsvermögen neben der Entfernung der Gelenke zur Körpermitte auch von der Winkelgeschwindigkeit abhängt. Der Schwellenwert für proximale Gelenke beträgt hier 0,2° bei einer Winkelgeschwindigkeit von 0,3°/s, für distale Gelenke ist er deutlich größer und beträgt z.B. bei den Fingergliedern 1,2° bei einer Winkelgeschwindigkeit von 12,5°/s [SCHMIDT07].

Untersuchungen zu Schwellenwerten von Drehmomenten führten u.a. Jandura et al. durch. An einem Drehknopf sollten Probanden ein konstantes Ausgangsdrehmoment von 0,06 Nm mit einem um mehrere Faktoren skalierten Drehmoment vergleichen. Anschließend mussten sie angeben, ob sie das skalierte Drehmoment kleiner oder

⁴ Beide Quellenangaben beziehen sich auf Untersuchungen zur visuellen Wahrnehmung. Es wird aber darauf hingewiesen, dass die Werte auch auf andere Wahrnehmungsarten übertragen werden können.

größer als das Ausgangsdrehmoment empfanden. Dabei konnten gerade noch merkliche Unterschiede ab einer Skalierung von 12,7% des Ausgangsdrehmoments festgestellt werden [JANDURA94].

In einer anderen Untersuchung konnten diese Werte nicht bestätigt werden [REISINGER09]. Bei unterschiedlichen Arten von Drehmomentverläufen wurde hier ein gemittelter Wert von 20% für die Unterschiedsschwelle ermittelt⁵.

Die Angaben der Skalierungsfaktoren für Drehmomente sind deutlich größer als die von Untersuchungen zu Unterschiedsschwellen von Kräften. Schmidt et al. geben für die Unterschiedsschwelle von Kräften einen Wert von 5% an. Pang et al. ermittelten ähnliche Werte [PANG91]. Hier mussten in einem Versuchsaufbau Kräfte mittels Zweifinger-Zufassungsgriff unterschieden werden. Unabhängig von zahlreichen Faktoren, wie der Fingerspannweite oder der Ausgangskraft, konnte die Unterschiedsschwelle bei 5%–10% der Ausgangskraft festgestellt werden. Diese im Vergleich mit den Unterschiedsschwellen von Drehmomenten deutlich kleineren Werte bestätigen die Warnung von Cockburn et al. (vgl. Kapitel 2.1.3) [COCKBURN05]. Danach ist das Erkennen von Drehmomentunterschieden immer gekoppelt mit der Wahrnehmung weiterer kinästhetischer und taktiler Reize, bei der nicht nur die Hand sondern das ganz Hand-Armsystem beteiligt ist. Diese multisubmodale Informationsübermittlung führt demzufolge bereits zu einer Verschlechterung der Wahrnehmungsleistung.

Eine weitere Schwelle, die für die Bedienung aktiver Stellteile von Bedeutung ist, ist das zeitliche Auflösungsvermögen des Menschen. Diese wird auch als „psychischer Moment“ oder „subjektives Zeitquant“ bezeichnet. Für dieses Zeitquant gibt es unterschiedliche Angaben. Frank et al. geben dafür einen Wert von ungefähr 1/16 Sekunde an, ab der zwei optische, akustische oder taktile Reize miteinander verschmelzen [FRANK97]. Burdea gibt für das Auflösungsvermögen zweier aufeinanderfolgender Reize auf der Haut einen deutlich geringeren Wert von 5 ms an [BURDEA96]. Dieser Wert ist bedeutend kleiner im Vergleich zu dem ebenfalls in dieser Arbeit angegebenen Wert für visuelle Reize. Zwei visuelle Reize können demnach erst ab einem Abstand von 25 ms unterschieden werden.

⁵ Die Untersuchung fand mit kleinen Drehmomentamplituden (<0,06 Nm) statt. Das Ausgangsdrehmoment wurde je nach Verlaufsart variiert und lässt sich deshalb nicht explizit angeben.

3.3 Forschungsarbeiten zur aktiven haptischen Rückmeldung

Im Folgenden sollen Forschungsarbeiten vorgestellt werden, deren Inhalt Einfluss auf die Gestaltung einer aktiven haptischen Rückmeldung nehmen kann. Dazu zählen neben Forschungsarbeiten zur taktilen und haptischen Wahrnehmung auch Arbeiten zur akustischen Wahrnehmung.

3.3.1 Verarbeitungszeit der haptischen und taktilen Wahrnehmung

Der Grund für den häufigen Einsatz einer aktiven taktilen oder haptischen Rückmeldung zur Warnung oder Informationsübertragung besteht in der sehr kurzen Verarbeitungszeit solcher Reize im Vergleich mit anderen Sinnen. Durch einen Unterregelkreis des zentralen Nervensystems werden Aktionen nicht vom Gehirn sondern vom Rückenmark direkt verarbeitet. Dadurch können Reize von Körperbewegungen bis zu viermal so schnell wie auditive oder visuelle Reize verarbeitet werden [SCHMIDT87].

3.3.2 Lerneffekte der haptischen Wahrnehmung

Die Grenzen der taktilen und kinästhetischen Wahrnehmung sind keineswegs fest, sondern können trainiert werden [DINSE08]. Dieser Lerneffekt wird auch als Plastizität bezeichnet. Demnach besitzt das zentrale Nervensystem des Menschen die Fähigkeit, sich an veränderte Umweltbedingungen und Beanspruchungen anzupassen. Dadurch können sowohl die absolute Schwelle als auch die Unterschiedsschwelle gesenkt und die Geschwindigkeit der Erkennung vergrößert werden. Die Lerneffekte treten bereits nach wenigen Minuten einer Bedienung eines haptischen Ein- oder Ausgabegeräts ein. Auf Dauer festigen können sie sich nach 3-6 Wochen intensiven Trainings. Erklärt werden kann der Lerneffekt durch Umstrukturierung und Neuordnung der vorhandenen Nervenzellen [WEISS01].

3.3.3 Untersuchung zum optimalen Stellteildurchmesser

Durch den Stellteildurchmesser werden das maximale sowie das als komfortabel empfundene Drehmoment bestimmt. Der optimale Stellteildurchmesser selbst hängt wiederum vom Aufbau des Stellteilsystems als auch von den für die Betätigung relevanten Bedingungen ab. Sollen etwa Benutzer aller Körpergrößengruppen den Drehknopf mit einer Hand betätigen können, so wird ein maximaler Durchmesser von 50 mm empfohlen [SCHMIDTKE89A].

Bradley untersuchte desweiteren den optimalen Stellteildurchmesser in Abhängigkeit von der Reibung, die im Stellteilsystem vorhanden ist [BRADLEY69]. Die Aufgabe der

Probanden in dieser Untersuchung bestand darin, einen Drehknopf bei verschiedenen Reibmomenten und Stellteildurchmessern möglichst schnell zu greifen und auf eine vorgegebene Position zu drehen. In dieser Untersuchung konnte festgestellt werden, dass bei dem Auftreten von Reibung die Stellgenauigkeit und die Positioniergeschwindigkeit durch den Stellteildurchmesser beeinflusst werden können. Zusammenfassend konnten Durchmesser für verschieden starke Reibung angegeben werden. Bei einem durch starke Reibung erzeugten Drehmoment von 176 inch-grams (entspricht 0,0438 Nm), wird demzufolge ein Durchmesser von 2 inch (entspricht 50,8 mm) empfohlen. Bei moderater Reibung mit einem Drehmoment von 81 inch-grams (entspricht 0,0201 Nm), wirkt sich der Stellteildurchmesser nicht stark auf die Stellgenauigkeit und die Positioniergeschwindigkeit aus. Optimale Durchmesser liegen nach Bradley in einem Bereich von 1-3,25 inch (entspricht 25,4-82,55 mm).

3.3.4 Untersuchungen zum Fehlen taktiler und haptischer Rückmeldungen

Die meisten Untersuchungen zum Einsatz von Stellteilen mit aktiver taktiler oder haptischer Rückmeldung sind bei Mensch-Maschine-Schnittstellen für Computer und die Virtual-Reality zu finden. Hier werden häufig die Betätigungsdauer und die Anzahl der Fehler bei der Erfüllung einer Betätigungsaufgabe als Beurteilungsmaß herangezogen. Dennerlein et al. verglichen in diesem Zusammenhang den Einsatz sowie das Fehlen einer aktiven haptischen Unterstützung einer PC-Maus bei einer Eingabe am Computer [DENNERLEIN00]. Danach konnte beim Einsatz einer Maus mit aktiver haptischer Unterstützung in Abhängigkeit vom Aufgabentyp eine Reduzierung der Eingabezeit um 25%–50% ermittelt werden, verglichen mit demselben Eingabegerät ohne aktive haptische Rückmeldung.

Weitere Forschungsarbeiten, die die taktile Rückmeldung bei Touchscreens behandeln, kamen zu dem Ergebnis, dass eine fühlbare Rückmeldung von den Benutzern erwünscht wird (vgl. [BREWSTER07], [CHANG05], [SERAFIN07]). Gleichzeitig wird angegeben, dass bei einer händischen Eingabe eines Wertes eine mechanische Rückmeldung von den Probanden erwartet wird.

Diese und weitere Untersuchungen lassen darauf schließen, dass der Einsatz von Mensch-Maschine-Schnittstellen mit aktiver haptischer oder taktiler Rückmeldung den Komforteindruck eines Stellteils, die Betätigungsgeschwindigkeit sowie die Stellgenauigkeit erhöhen kann.

3.3.5 Untersuchungen zur akustischen Rückmeldung bei Stellteilen

Die Bedienung eines Stellteils wird häufig in Zusammenhang mit einer akustischen Rückmeldung gebracht. Eine akustische Rückmeldung kann zusätzlich zur haptischen oder taktilen Rückmeldung ein wichtiger Faktor für die Beurteilung des Komforts und der Wertigkeit eines Stellteils sein. Über Rastgeräusche kann dem Benutzer zusätzlich die Bestätigung über ein richtiges Stellen des Eingabeelements gegeben werden. Rühmann empfiehlt deshalb für wegbehaftete, digitale Stellteile, wie Kipp- oder Drehschalter, ein hörbares und taktilen „Klick“ einzusetzen [RÜHMANN97].

In einer Untersuchung, in der ein Touchscreen mit und ohne akustischer Rückmeldung zu bedienen war, konnte zwar keine Steigerung der Eingabegeschwindigkeit gemessen werden, jedoch nahm die Anzahl der Bedienfehler deutlich ab [BENDER99].

3.4 Stand der Technik aktiver Eingabegeräte

Es gibt verschiedene Gründe für den Einsatz aktiver Eingabegeräte. Zum einen werden sie häufig dort eingesetzt, wo eine direkte mechanische Kopplung zwischen dem Stellteil und dem Wirkteil nicht möglich ist oder letzteres nur virtuell existiert. Die Rückmeldung eines über ein Stellteil eingegebenen Wertes muss hier künstlich über Aktoren erzeugt werden. Zum anderen werden aktive Eingabegeräte dort eingesetzt, wo mehr als eine Information über ein einziges Stellteil an den Benutzer übertragen werden soll und diese Informationen haptisch oder taktil wahrnehmbar sein sollen. Dies ist häufig dann der Fall, wenn eine komplexe Mensch-Maschine-Schnittstelle vereinfacht wird. Dadurch entsteht eine einheitliche Bedienschnittstelle und der Benutzer wird aufgrund der geringeren Anzahl gleichzeitig dargestellter Informationen entlastet [SCHATTENBERG02]. Eine geringere Komplexität kann durch eine Verringerung der Stellteil- und Anzeigenanzahl sowie durch eine Unterstützung des Benutzers bei der Eingabe durch eine redundante Informationsdarstellung in verschiedenen Sinnesmodalitäten erreicht werden. Im Folgenden werden einige wichtige Vertreter von Eingabeelementen mit aktiver haptischer und taktiler Rückmeldung vorgestellt.

3.4.1 Multifunktionale Stellteile mit aktiver haptischer oder taktiler Rückmeldung

Die meisten multifunktionalen Stellteile mit aktiver haptischer oder taktiler Rückmeldung sind im Bereich von Computerschnittstellen zu finden. Sie dienen hier vor allem als Interaktionswerkzeug im dreidimensionalen Raum. Aus diesem Grund bieten viele

dieser Geräte mehr als einen Freiheitsgrad bei den Bewegungsrichtungen an. Als Rückmeldung erhält der Benutzer Informationen über die aktuelle Position, die Bestätigung über die Auswahl eines Wertes oder Objekts sowie über Warnmeldungen. Diese Informationen werden über ein Abbremsen oder Beschleunigen des Stellteils während einer benutzerseitigen Bewegung erreicht. Ferner werden taktile Rückmeldungen durch Vibrationen an den Benutzer übermittelt. Bild 3.10 zeigt eine Auswahl verschiedener aktiver Eingabegeräte, die sich als multifunktionale Stellteile eignen und als solche eingesetzt werden.



Bild 3.10: Stellteile mit Eignung als Multifunktionsstellteil, von oben links nach unten rechts: Impulse Engine 2000 [IMMERSION99], Wingman Force 3D Pro [LOGITECH07], TouchSense [IMMERSION06], Remote Touch [LEXUS09], WingMan Force-Feedback-Mouse [LOGITECH99], Car-Mouse [ALPS98]

Die dargestellten Stellteile lassen sich in die Gruppen der stationären Geräte, der die Eingabemäuse und Joysticks zugeordnet werden können, sowie der Anzeigen mit taktiler Rückmeldung einteilen.

Die Eingabemäuse werden wie gewöhnliche Computermäuse bedient. Durch Verschieben bei Computermäusen, respektive durch Schwenken bei Lösungen für Bedienschnittstellen in Fahrzeugen (vgl. Lexus Remote Touch und Alps Car-Mouse) wird eine Funktion oder ein Wert, der auf einer zusätzlichen Anzeige dargestellt wird, ausgewählt und durch Druck auf eine separate Taste bestätigt. Die haptische Rückmel-

dung erfolgt, indem die Maus durch magnetische oder elektromechanische Aktoren fixiert, beschleunigt oder abgebremst wird. Für Lösungen im Fahrzeug ist der Stellweg aufgrund der räumlichen Gegebenheiten stark eingeschränkt. Für Computeranwendungen ist der Stellweg jedoch nur von der Art und dem Aufbau der Geräte sowie von den sinnvollen menschlichen und anwendungsspezifischen Faktoren begrenzt.

Joysticks mit aktiver haptischer Rückmeldung werden vorwiegend im Bereich von Computerspielen verwendet, um dem Benutzer ein realitätsnahes Gefühl zu vermitteln. Sie kommen aber auch in Fahrzeugen, die sich im Prototypenstand befinden, oder in Flugzeugen zum Einsatz, wo eine mechanische Verbindung zur Steuerung bewusst durch eine By-Wire-Lösung⁶ ersetzt wird. In diesen Fällen wird eine aktive haptische Rückmeldung als Ersatz für die bisher durch die Mechanik oder Hydraulik erzeugte Rückmeldung eingesetzt. Für Fahrzeuge und Flugzeuge werden Joysticks mit aktiver haptischer Rückmeldung nur eingeschränkt als multifunktionales Stellteil verwendet. Die wichtigsten Eingabemöglichkeiten durch Schwenken des Stellteils sind stets mit denselben Funktionen, wie dem Steuern und Manövrieren, verknüpft. Durch ergänzende haptische oder taktile Rückmeldungen, wie Vibrationen oder stärkerer Widerstandskraft, können dem Benutzer aber weitere Informationen über den Zustand des Flugzeugs oder des Fahrzeugs übermittelt werden. Im Bereich der Computertechnik können Joysticks mit aktiver Rückmeldung aufgrund ihrer freien Programmierbarkeit hingegen für viele Funktionen verwendet werden. Der Art ihrer Rückmeldung sind dabei nur durch den geringen Bewegungsumfang und die eingesetzte Technik Grenzen gesetzt. Die Rückmeldung wird entweder durch Elektromagneten oder Elektromotoren erzeugt. Letztere werden zur Erhöhung des Widerstandes häufig mit einem Getriebe gekoppelt und sind aufgrund der geringen Kosten hauptsächlich in Consumer-Produkten für Computerspiele verbaut.

Desweiteren kommen Touchscreens mit aktiver vibrotaktile Rückmeldung für multifunktionale Stellteile in Betracht. Eine vibrotaktile Rückmeldung wird häufig über einen am Touchscreen angebrachten Motor erzeugt, der mit einer Unwucht versehen ist. Die Vielfalt der Rückmeldemöglichkeiten beschränkt sich auf verschiedene Frequenzen der Vibration. Es sind jedoch schon Ansätze vorhanden, Kraft-Weg-Verläufe, wie die eines Druckknopfes, zu simulieren (vgl. [IMMERSION06]). Aufgrund ihrer zwingend notwendi-

⁶ Unter By-Wire-Technologie versteht man das Ersetzen von mechanischen oder hydraulischen Leitungen durch elektronische [AUTO00].

gen visuellen Kontrolle über die gerade bediente Funktion eignen sich Touchscreens jedoch nur eingeschränkt als multifunktionales Stellteil.

In den meisten Fällen geben die Hersteller von Mensch-Maschine-Schnittstellen mit aktiver haptischer Rückmeldung keinerlei Auskunft über die möglichen und verwendeten Kraft-Weg-Verläufe. Eine objektive Beurteilung der haptischen oder taktilen Rückmeldung der dargestellten Stellteile ist somit nur eingeschränkt möglich.

3.4.2 Rotatorische multifunktionale Stellteile mit aktiver Drehmomentrückmeldung

Serienmäßige Multifunktionsstellteile in Form eines aktiven Drehstellers gibt es bislang nur wenige. Bild 3.11 zeigt zwei dieser Stellteile.



Bild 3.11: Beispiele für Drehsteller mit aktiver haptischer Rückmeldung: BMW iDrive (links) [Bmw01] und TouchSense PR-1000 (Mitte) [IMMERSION07], Prüfstand eines aktiven Drehstellers (rechts) [REISINGER09]

Der „TouchSense PR-1000“ der Immersion Corp. wird vorwiegend zur Demonstration der Möglichkeiten aktiver Drehsteller eingesetzt [IMMERSION07]. Er besitzt eine gängige PC-Schnittstelle und wird zusammen mit einer einfachen Bediensoftware angeboten. Durch die Software können bereits vordefinierte oder auch, in eingeschränkter Form, selbst definierte Drehmomentverläufe als Rückmeldungen auf den Drehsteller aufgebracht werden. Die Kombination des „TouchSense PR-1000“ mit einer Anzeige ist nicht vorgesehen.

Weiterhin ist das „iDrive“ abgebildet, eine zentrale Benutzerschnittstelle in Fahrzeugen der BMW AG [Bmw01]. Dieses basiert auf einem Patent der Immersion Corp. und wurde von der Alps Electric Corp. hergestellt. Mit einer aktiven Drehmomentrückmeldung wurde es noch bis vor kurzem in die Oberklassefahrzeuge der BMW AG verbaut. Dieses Stellteil kann neben der Drehbewegung außerdem geschoben und gedrückt

werden, wodurch unter anderem Eingaben bestätigt oder Menüebenen geändert werden können. Es ist an eine separate Anzeige gekoppelt, auf der die Eingabe über das Stellteil nachverfolgt werden kann. Hauptziel des „iDrives“ ist es, die große Anzahl der Stellteile in Oberklassefahrzeugen auf ein einzelnes Stellteil zu reduzieren und damit die Bedienkomplexität zu mindern. Die eingeschränkte visuelle Kontrollmöglichkeit über die gerade aktuelle Funktion oder die Eingabeart während der Fahrt sollte über die haptische Rückmeldung, sogenanntes Force-Feedback, durch veränderliche Drehmomentverläufe erreicht werden.

Die Funktionsweise der beiden dargestellten Stellteile ist stets dieselbe. Wird der Drehknopf vom Benutzer bewegt, so wird diese Bewegung von einem Wegsensor erfasst. Durch eine hinterlegte Funktion bremst oder beschleunigt ein Elektromotor diese Bewegung in Abhängigkeit von der gerade aktuellen Position. Dadurch lassen sich verschiedene Effekte wie Rastungen oder Barrieren simulieren.

Dem „iDrive“ und dem „TouchSense PR-1000“ ist die Verwendung von Motoren gemeinsam, die im Vergleich zu den empfohlenen Drehmomenten für Drehsteller mit diesen Durchmessern nur sehr kleine Drehmomente dauerhaft aufbringen können. So besitzt der „TouchSense PR-1000“ z.B. ein maximales Drehmoment von 0,1 Nm.

Desweiteren gibt es aktive Drehsteller, die allein für Forschungszwecke oder als Prototypen aufgebaut und getestet wurden. In Bild 3.11 rechts ist exemplarisch dafür ein Prüfstand für veränderliche Drehmomente dargestellt. Auch hier wurde ein Elektromotor mit kleinen maximalen Drehmomenten verwendet. Zur Erhöhung der am Drehknopf wirkenden Drehmomente wurde eine mechanische Bremse eingesetzt [REISINGER09].

4 Adaptive Drehmomente zur Informationsübertragung

Aus dem umfangreichen Stand der Technik und Forschung in Kapitel 3 ist ersichtlich, dass es zwar einige Ansätze für adaptive multifunktionale Stellteile gibt, aber immer noch ein erheblicher wissenschaftlicher Forschungsbedarf besteht.

Die vorliegende Forschungsarbeit behandelt die Themenschwerpunkte der Stellgenauigkeit, der Komfortbereiche und der Unterschiedsschwellen bei adaptiven multifunktionalen Drehstellern. Dazu sollen die veränderlichen Parameter am Stellteilssystem sowie der Aufbau der Prüfstände und die Versuchsabläufe im Folgenden näher erläutert werden.

4.1 Veränderliche Parameter am Stellteilssystem

Auf der Seite des Stellteilsystems lassen sich folgende Parameter identifizieren, deren Veränderung sich maßgeblich auf die Bedienung eines multifunktionalen Stellteils mit aktiver haptischer Rückmeldung auswirken:

- Eingabeart
- Verlaufsart
- Verlaufsparemeter
- Reibung innerhalb des Stellteilsystems
- Abmaße des Stellteils
- Form des Stellteils

Die Eingabeart wird in monostabile, kontinuierliche und diskrete Eingaben eingeteilt (vgl. Kapitel 2.2.1). Diese unterscheiden sich vor allem in der Anzahl ihrer Rastpositionen. Bild 4.1 zeigt Beispiele für die Drehmomentverläufe der drei Eingabearten. Beim Lesen der Diagramme muss darauf geachtet werden, dass das vom Menschen aufgebraachte Drehmoment beim Drehen in positiver Richtung der Winkelachse ein negatives Vorzeichen hat. Ein positives Drehmoment des Stellteils wirkt somit bei positiver Drehrichtung gegen das Drehmoment des Benutzers und bremst die Bewegung ab, ein negatives Drehmoment wirkt entsprechend in die gleiche Drehrichtung wie das Drehmoment des Benutzers und beschleunigt die Stellbewegung.

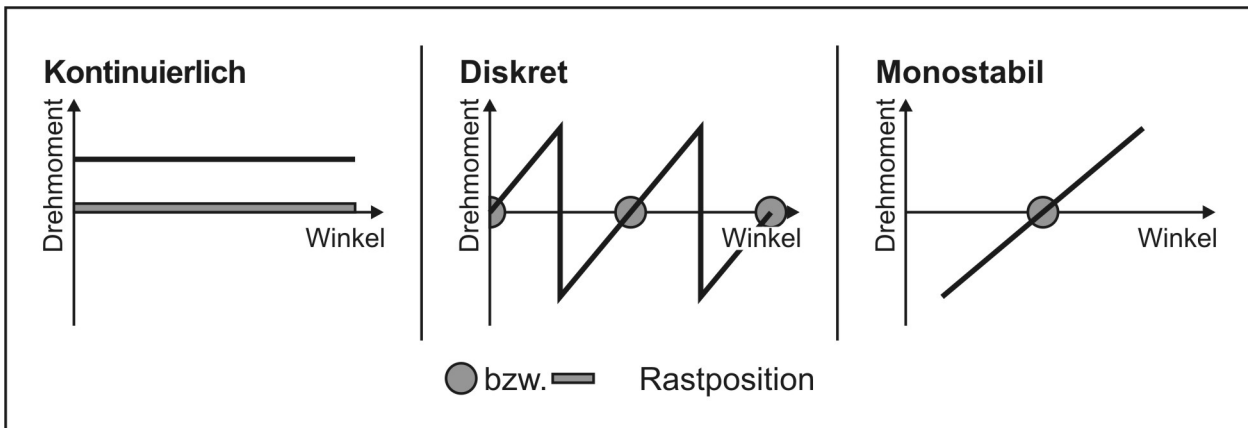


Bild 4.1: Drehmomentverläufe der drei verschiedenen Eingabearten

Der Drehmomentverlauf einer kontinuierlichen Eingabeart besitzt keine definierte Rastposition. Wird der Drehknopf losgelassen, bleibt er in dieser Position stehen. Das Drehmoment ist hier konstant und wirkt immer der Drehbewegung des Benutzers entgegen. Eine Bewegung des Stellteils wird hier so empfunden, als würde dieses, z.B. aufgrund von Reibung, ständig gebremst. Der in Bild 4.1 dargestellte Drehmomentverlauf für eine kontinuierliche Eingabe gilt nur beim Drehen in positiver Winkelrichtung. Beim Drehen in umgekehrter Richtung würde sich das Vorzeichen des Stellteildrehmoments umkehren.

Bei diskreter Eingabeart wirkt das Drehmoment des Stellteils von der Rastposition ausgehend gegen das des Benutzers. Ab einem Umkehrpunkt ändert sich das Vorzeichen des Stellteildrehmoments und wirkt in dieselbe Richtung wie das Drehmoment des Benutzers. Das Stellteil wird beschleunigt bis es die nächste Rastposition erreicht. Sowohl bei einer Rastposition als auch bei einem Umkehrpunkt beträgt das stellteilseitige Drehmoment 0 Nm. Die Unterscheidung zwischen Umkehrpunkt und Rastposition lässt sich mit der Wirkrichtung des stellteilseitigen Drehmoments erklären. Bei einem Umkehrpunkt wirkt dieses in dieselbe Richtung wie das vom Benutzer aufgebraachte Drehmoment. Bei einer Rastposition wirkt es hingegen immer gegen das Drehmoment des Benutzers. Ein Umkehrpunkt ist demnach ein metastabiler Zustand.

Bei einer monostabilen Eingabe steigt das Drehmoment aus der Rastposition stetig an. Wird das Stellteil außerhalb dieser Rastposition losgelassen, bewegt es sich selbstständig wieder in seine Ausgangslage zurück. Am ehesten lässt sich das Gefühl beim Drehen mit einem Stellteil vergleichen, das mit einer Feder gekoppelt ist. Wird das Stellteil bewegt, so würde die Rückstellkraft der Feder zunehmen. Beim Loslassen würde diese Rückstellkraft das Stellteil in seine Ursprungsposition zurückbewegen.

Die Verlaufsarten lassen sich nur bei monostabiler und diskreter Eingabeart unterscheiden. Bei Stellteilen mit aktiver haptischer Rückmeldung muss dabei zwischen realen und virtuellen Drehmomentverläufen unterschieden werden. Ein realer Drehmomentverlauf kann durch eine rein mechanische Lösung, z.B. durch eine Kurvenscheibe, ohne aktive Elemente erzeugt werden. Die Energie, die bei solchen Verläufen vom Benutzer aufgebracht wird, wird abzüglich der Reibung vom System auch wieder abgegeben. Bei virtuellen Drehmomentverläufen kann die abgegebene Energie von der eingebrachten deutlich abweichen. Bild 4.2 zeigt typische reale Drehmomentverläufe für eine monostabile und diskrete Eingabeart.

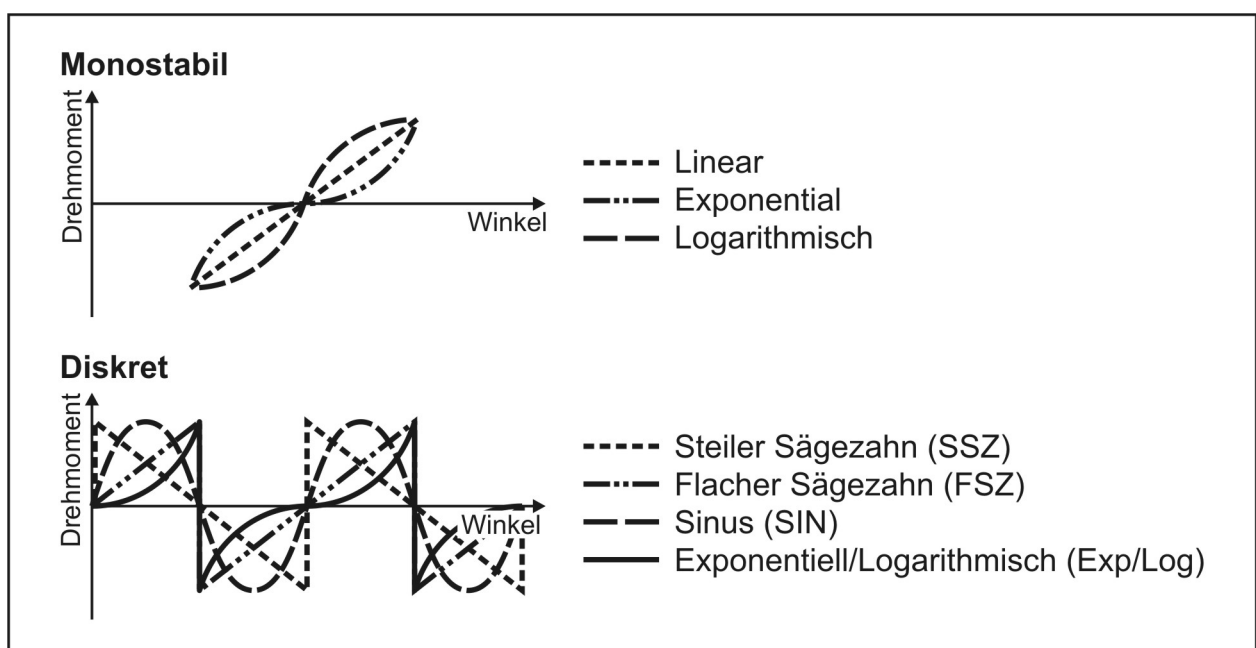


Bild 4.2: Verlaufsarten bei monostabiler und diskreter Eingabeart

Die Verlaufsarten werden darüber hinaus durch ihre Verlaufsparameter beschrieben. Hierzu zählen die Drehmomentamplitude A , die Steigungswinkel α und β sowie die Größe des Rastwinkels ϑ . Alle diese Parameter sind in Bild 4.3 beispielhaft für einen Drehmomentverlauf mit diskreter Eingabeart und flachem Sägezahnverlauf dargestellt.

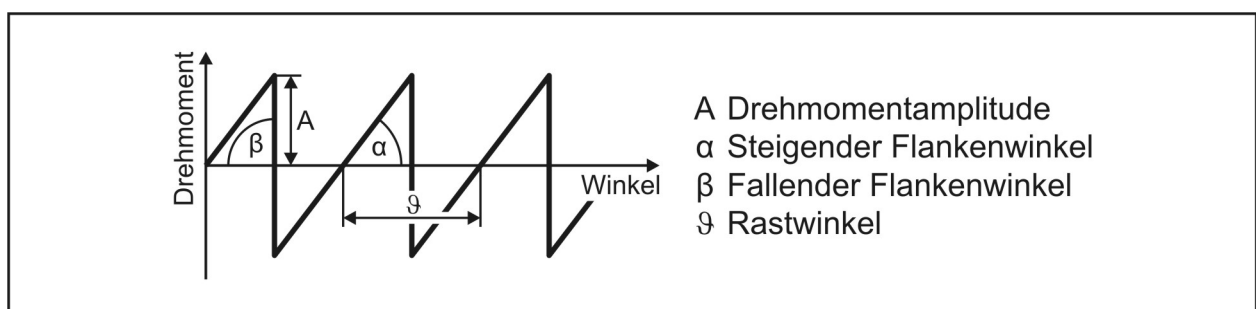


Bild 4.3: Verlaufsparameter am Beispiel eines flachen Sägezahnverlaufs (FSZ)

Ist Reibung im Stellteilsystem vorhanden, so werden die Drehmomentverläufe im Ganzen verschoben (vgl. Bild 4.4). Dadurch muss mehr Energie vom Benutzer in das Stellteilsystem eingebracht werden als vom System wieder abgegeben werden kann. Beim Einsatz aktiver Komponenten kann die Reibung künstlich eingebracht oder auch vorhandene Reibung vollständig eliminiert und somit der Drehmomentverlauf gezielt verschoben werden.

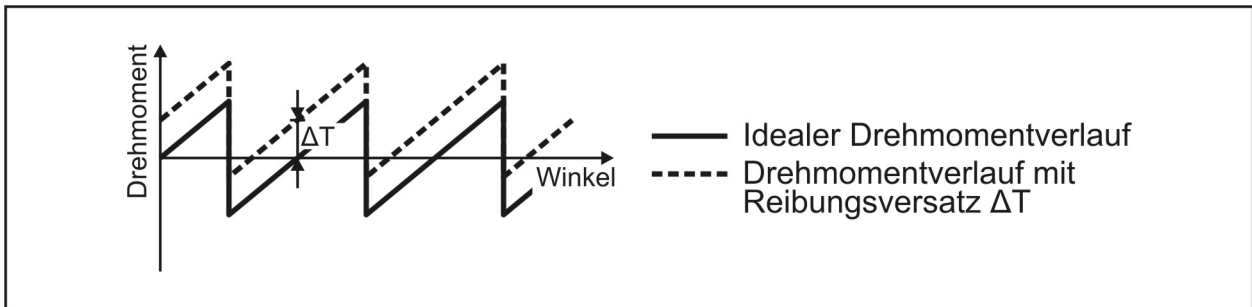


Bild 4.4: Vergleich des Drehmomentverlaufs mit und ohne Reibungsversatz

Desweiteren stellt die Geometrie des Stellteils einen veränderlichen Parameter dar. Durch einen größeren Durchmesser des Stellteils wird der Bewegungsumfang vergrößert. Je größer demnach der Durchmesser eines Drehknopfes ist, umso genauer kann eine Positionieraufgabe durchgeführt werden.

Als letzter veränderlicher Parameter ist die Form des Stellteils zu nennen. Durch eine anthropomorphe Formgebung lässt sich der Kopplungsgrad zwischen der Hand des Benutzers und dem Stellteil erhöhen [MÜNZER62]. Das Drehmoment kann dadurch formschlüssig übertragen werden. Gleichzeitig bringt eine anthropomorphe Formgebung aber auch eine Zwangshaltung der Hand mit sich.

4.2 Aufbau der Prüfstände

Für die Untersuchungen zum Einsatz adaptiver Drehmomente wurde ein Prüfstand aufgebaut, mit dem sich die Drehmomente entweder passiv oder aktiv verändern lassen. Der Aufbau und die Auslegung dieses Prüfstands sowie die Berechnung der Drehmomente sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

4.2.1 Prüfstand mit passiver Drehmomenterzeugung

Der Prüfstand mit passiver Drehmomenterzeugung (vgl. Bild 4.5) wurde zu Beginn der Forschungsarbeit für die Versuche zur Stellgenauigkeit, für Versuche zum Komforteindruck sowie zur Auslegung der Komponenten des Prüfstands mit aktiver Drehmomenterzeugung eingesetzt. Die Drehmomentverläufe lassen sich rein mecha-

nisch über den Austausch von Kurvenscheiben und Druckfedern einstellen. Dieser Prüfstand wurde so konstruiert, dass er sich leicht modifizieren lässt, wenig Reibung aufweist und eine möglichst geringe Massenträgheit besitzt.

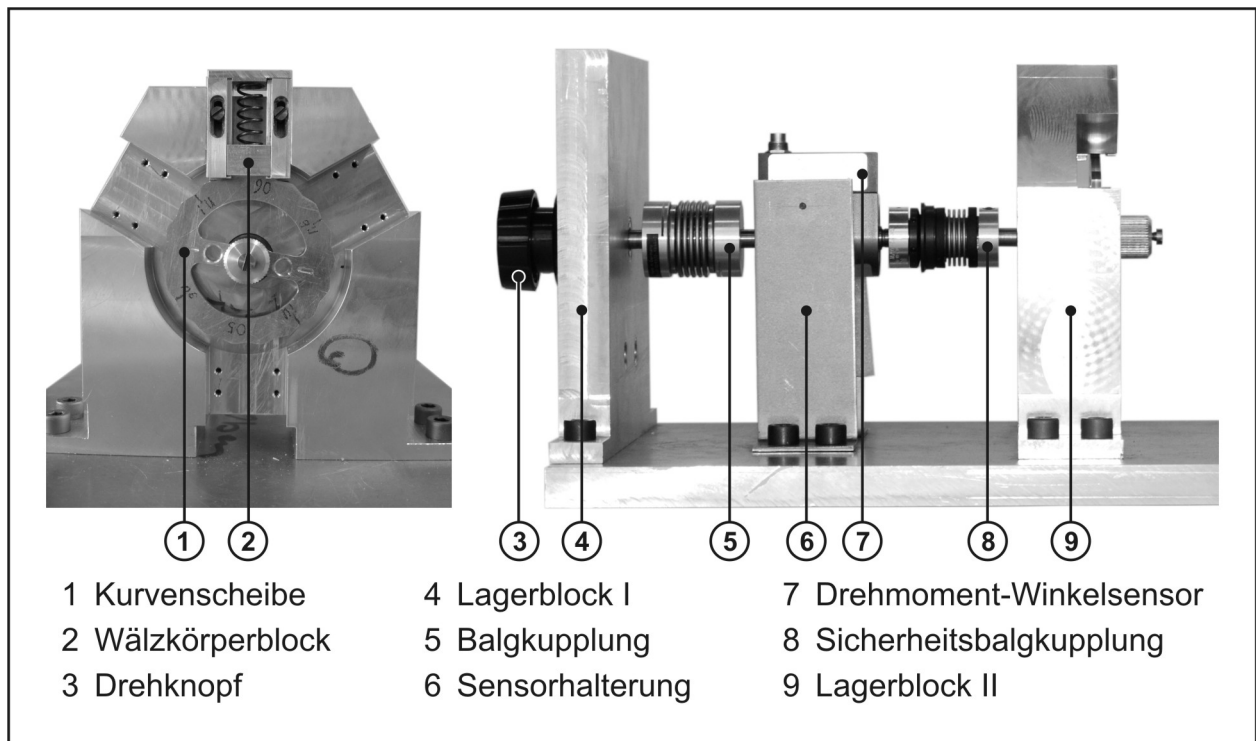


Bild 4.5: Prüfstand mit passiver Drehmomenterzeugung

Der Prüfstand besteht aus einer Grundplatte, auf die zwei Lagerblöcke sowie eine Halterung für den Drehmoment-Drehwinkelsensor aufgebracht sind. Der Lagerblock II dient zur Lagerung der Welle für die Kurvenscheiben. Er fungiert gleichzeitig zur Aufnahme für ein bis vier Wälzkörperblöcke. Zwei Rillenkugellager in einer Fest-Los-Anordnung sind für die Lagerung der Welle für die Kurvenscheiben verbaut.

Der Wälzkörperblock besteht aus einer Führung, in der sich die Halterung für das Wälzelement bewegen kann. Außerdem ist im Wälzkörperblock eine Schraubendruckfeder verbaut, durch die die Halterung und damit das Wälzelement auf die Kurvenscheibe gedrückt wird. Als Wälzelement kommt ein Miniatur-Rillenkugellager mit einem Außendurchmesser von 3 mm zum Einsatz. Die Federn lassen sich austauschen, um Einfluss auf den Drehmomentverlauf nehmen zu können. Der gesamte Wälzkörperblock lässt sich im Lagerblock II verschieben, um unterschiedliche Federlängen auszugleichen oder eine Vorspannung der Feder zu erreichen.

Die Kurvenscheiben wurden aus einer Aluminiumplatte gefräst. Um den gewünschten Drehmomentverlauf zu erhalten, musste die Zahnkontur auf eine Kreisform übertragen werden. Um die Konstruktion der Kurvenscheiben zu erleichtern, erfolgte die Eingabe

der Daten parametrisiert. Auf diese Weise lässt sich die Kurvenscheibe in verschiedene Abschnitte unterteilen, deren Parameter, wie Verlaufsart, Rastwinkelweite und Zahnhöhe, getrennt voneinander verändert werden können.

Die Welle der Kurvenscheibe ist mit einer Ausrastkupplung mit Balgelement mit der Welle des Drehmoment-Drehwinkel-Sensors verbunden. Die Kupplung dient zum einen zum Ausgleich angularer, lateraler und axialer Versätze, zum anderen als Schutz vor Überlast des Drehmoment-Drehwinkel-Sensors. Das Ausrastmoment lässt sich über eine Einstellmutter frei wählen.

Ein im Prüfstand eingebauter Drehmoment-Drehwinkel-Sensor misst Drehmomente in einem Bereich von ± 2 Nm mit einer Genauigkeit von 0,1% und Drehwinkel mit einer Genauigkeit von 1° . Die Auflösung für Drehmomente dieses Sensors entspricht der in Kapitel 3.1.3 angegebenen Mindestauflösung. Da bei dem passiven Prüfstand kein Aktor zur Drehmomentänderung eingesetzt wird, wird die Winkelmessung nicht für Steuerungsaufgaben sondern nur zur Überprüfung der Drehmomentverläufe benötigt.

Die Sensorwelle ist auf der Antriebsseite mit einer Balgkupplung mit dem Wellenstück des Drehknopfes verbunden. Die Welle des Drehknopfes ist im Lagerblock I mit einem Nadellager fliegend gelagert. Der Drehknopf ist kraftschlüssig mit dieser Welle über eine Arretierschraube verbunden. Dadurch lässt er sich einfach lösen und durch ein anderes Stellteil oder einen Antriebsmotor zum Messen der Drehmomentverläufe ersetzen. Die Daten des Sensors können über einen Messrechner dargestellt und aufgezeichnet werden.

Die Nachteile dieses Prüfstands sind zum einen das hörbare Einrastgeräusch bei diskreter Eingabeart. Dies kann zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen, da der haptische Eindruck, den das Stellteil beim Bewegen vermittelt, durch den akustischen überlagert wird. Zum anderen wirkt am Prüfstand aufgrund der eingesetzten Mechanik eine Reibung, die den kompletten Drehmomentverlauf um ca. 0,005 Nm verschiebt.

Die Kontur der an diesem Prüfstand eingesetzten Kurvenscheiben wurde im Vorfeld berechnet. Die Berechnung beruht auf mathematischen und geometrischen Gegebenheiten. In einer vereinfachten Berechnung wird der Wälzkörper als infinitesimal kleiner Punkt angesehen. Dieser bewegt sich entlang des Kurvenprofils. Durch die Feder mit der Federrate R wirkt die Anpresskraft F_F . Entlang des Kurvenscheibenprofils teilt sich diese Kraft in eine Normalkraft F_N , die senkrecht zum Kurvenprofil wirkt, und in eine horizontale Kraft F_H auf (vgl. Bild 4.6).

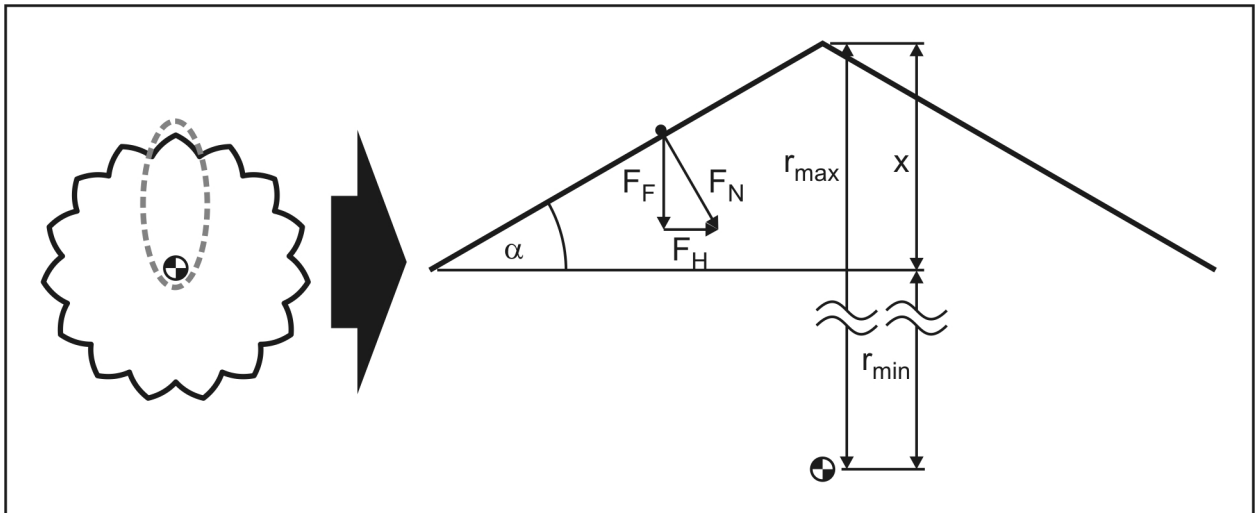


Bild 4.6: Wirkende Kräfte an einer Rastung einer abgewickelten Kurvenscheibe

Das beim Abweichen des Wälzkörpers von der Ruhelage wirkende Drehmoment M lässt sich mit Formel 4.1 berechnen.

$$M = F_H \cdot r_{\max} \quad (4.1)$$

wobei gilt:

$$F_H = \tan \alpha \cdot F_F \quad (4.2)$$

$$r_{\max} = r_{\min} + x \quad (4.3)$$

$$F_F = R \cdot x \quad (4.4)$$

Bei dem minimalen Kurvenscheibenradius r_{\min} handelt es sich um einen fest vorgegebenen Wert von 35 mm. Daraus lässt sich auch der minimale Umfang der Kurvenscheibe U_{\min} berechnen. Weiterhin ist durch die Vorgabe einer gleich verteilten Rastung mit vorgegebenem Rastweitenwinkel die Teilung T vorgegeben. Durch Einsetzen der Gleichungen 4.2–4.4 in 4.1 ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$M = (\tan \alpha \cdot R \cdot x)(r_{\min} + x) \quad (4.5)$$

Weiterhin wird vorgegeben, dass jede Rastung symmetrisch ist. Die Steigungswinkel α und β sind somit gleich groß (vgl. Bild 4.7).

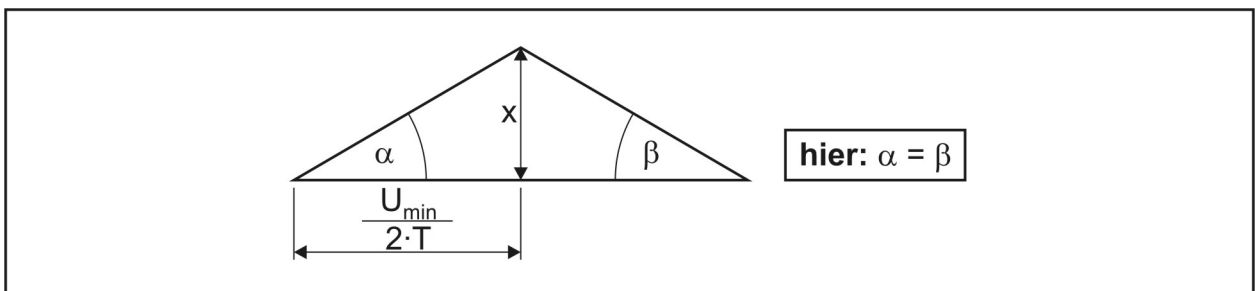


Bild 4.7: Symmetrische Rastung eines Zahnes

Unter Verwendung der Gleichung 4.5 und mit der in Bild 4.7 dargestellten Bedingung ergibt sich mit

$$\tan \alpha = \frac{x \cdot 2 \cdot T}{U_{\min}} \quad (4.6)$$

daraus folgende Gleichung:

$$f(x) = x^3 + r_{\min} \cdot x^2 - M \cdot \frac{U_{\min}}{2 \cdot T \cdot R} = 0 \quad (4.7)$$

Mit Gleichung 4.7 kann durch die Vorgabe des Drehmoments M die Zahnhöhe x bestimmt werden. Das Polynom dritten Grades in dieser Gleichung besitzt drei Lösungen, wovon nur eine positiv ist und somit für die Zahnhöhe x in Betracht kommt. In Bild 4.8 ist die Gleichung 4.7 in Abhängigkeit vom Drehmoment M dargestellt.

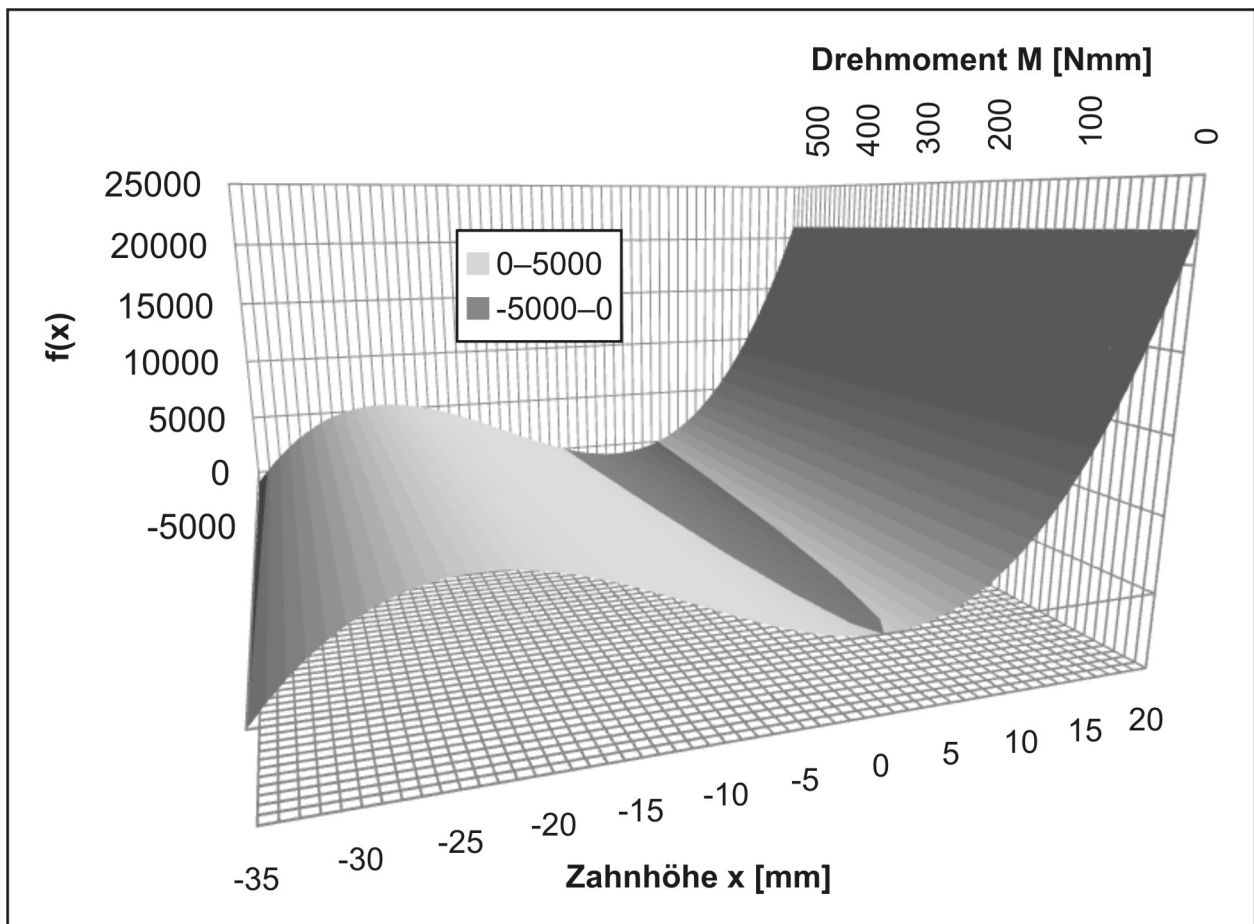


Bild 4.8: Grafische Darstellung der Gleichung 4.7 in Abhängigkeit vom Moment M . Aus Bild 4.8 ist ersichtlich, dass das Polynom dritten Grades bei einem Funktionswert von null nur eine positive Lösung für die Zahnhöhe x in Abhängigkeit von dem gewünschten Drehmoment M ergibt.

4.2.2 Prüfstand mit aktiver Drehmomenterzeugung

Die meisten Komponenten des Prüfstands mit aktiver Drehmomenterzeugung konnten von dem Prüfstand mit passiver Drehmomenterzeugung übernommen werden. Anstelle des Lagerblocks II ist jedoch ein Gleichstrommotor und ein Drehwinkelsensor verbaut. Der Prüfstand ist in Bild 4.9 dargestellt. Desweiteren wird ein Messrechner eingesetzt, der auch die Steuerung des Elektromotors übernimmt.

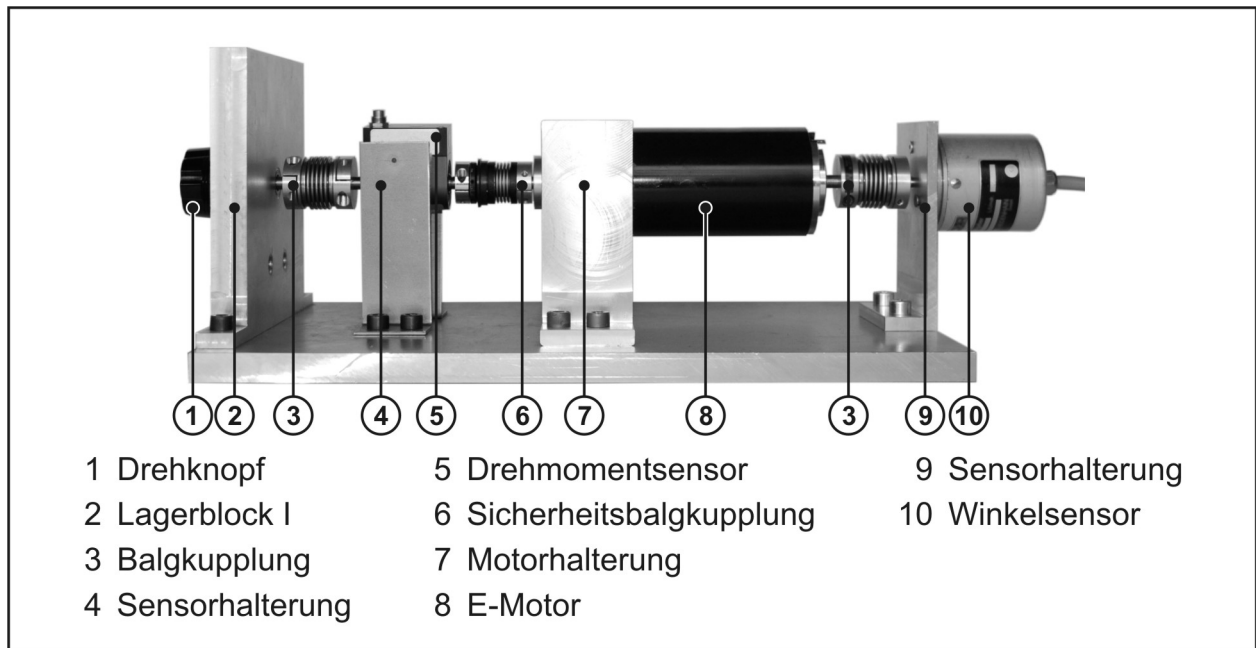


Bild 4.9: Prüfstand mit aktiver Drehmomenterzeugung

Der Stator des Gleichstrommotors verfügt über eine eisenlose Wicklung, sodass keine magnetischen Rastmomente auftreten, die den Drehmomentverlauf beeinflussen könnten. Das maximale Dauerdrehmoment beträgt 0,606 Nm. Der Motor wird in Verbindung mit einem Servoverstärker betrieben, der die Steuerungssignale einer Steuerungskarte in einen Stromwert wandelt und diesen Strom an den Motor leitet.

Der Drehgeber ist mit der Abtriebswelle des Motors über eine Metallbalgkupplung verbunden und mit einer Halterung auf der Grundplatte fixiert. Der Drehwinkel wird optisch mit einer Auflösung von 2500 Incr./Umdr. gemessen. Die digitalen Messsignale werden direkt an eine Mess- und Steuerungskarte weitergeleitet.

Zur Messung und Steuerung wird ein frei programmierbares Controller-Board mit digitaler Signalverarbeitung verwendet. Das Board arbeitet in Echtzeit, wodurch es zu keiner Verzögerung bei der Signalverarbeitung kommt. Das Controller-Board ist in einem Rechner eingebaut, der zur Programmierung der Karte, zur Darstellung und Aufzeichnung der Messwerte sowie zur Auswahl und Abänderung der Drehmomentverläufe

während der Versuche eingesetzt wird. Bild 4.10 zeigt den kompletten Aufbau des Prüfstands mit aktiver Drehmomenterzeugung.

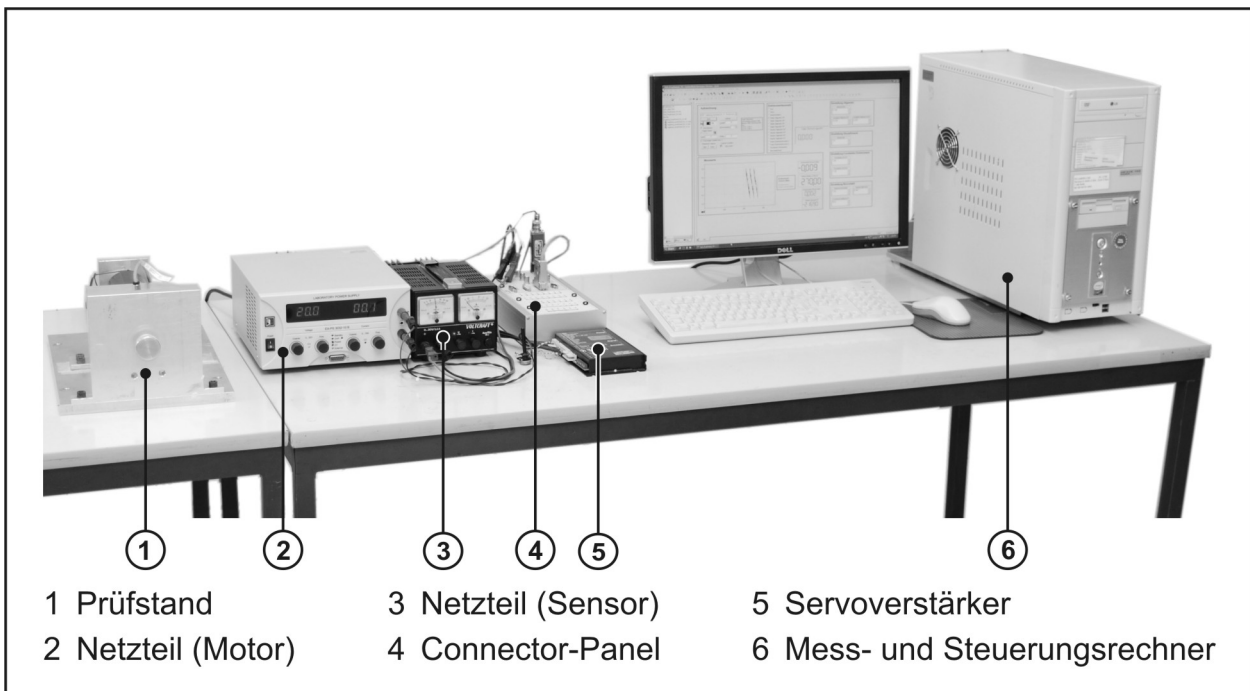


Bild 4.10: Komponenten des Prüfstands mit aktiver Drehmomenterzeugung

Mit einer Software zur Programmierung und einer zur Versuchs- und Messdurchführung wird das Controller-Board und damit der gesamte Prüfstand bedient. Bilder der Steuerung und der Bedienoberfläche sind dem Anhang zu entnehmen.

Auch am Prüfstand mit aktiver Drehmomenterzeugung wirkt eine Reibung, die die Drehmomentverläufe verschiebt. Sie entsteht vor allem wegen des hier verwendeten Motors mit mechanischer Kommutierung. Im Vergleich mit dem Prüfstand mit passiver Drehmomenterzeugung ist die Reibung mit einem Wert von 0,028 Nm sogar um mehr als das 5-fache größer. Mit der Steuerung kann diese Reibung jedoch durch eine entsprechende Dauerbestromung des Motors vollständig eliminiert oder auf einen gewünschten Wert angepasst werden.

4.3 Versuchsparameter und -durchführung

Die veränderlichen Parameter werden für die Versuche gezielt ausgewählt, so dass nicht alle Parameter und Parameterkombinationen untersucht werden müssen.

Das Stellteil ist austauschbar. Nur bei den Versuchen zur Stellgenauigkeit wird ein Drehknopf aus Kunststoff mit einem Außendurchmesser von 39 mm verwendet. Der Drehknopf aus Kunststoff weist auf der Greiffläche leichte Vertiefungen auf, die zu einer Zwangshaltung der Finger führen können. Deshalb wird dieses Stellteil in allen weiteren

Versuchen durch ein formneutrales Stellteil aus Aluminium mit einer am Umfang aufgetragenen Rändelung ersetzt. Der Drehknopfdurchmesser dieses Stellteils beträgt 35 mm. Dies entspricht in etwa dem Durchmesser des Kunststoffdrehknopfs, gemessen an der tiefsten Stelle der Vertiefungen. Dadurch lassen sich beide Drehknöpfe miteinander vergleichen.

Untersucht werden in den folgenden Versuchen ausschließlich Drehmomentverläufe, die sich auch durch eine Mechanik erzeugen lassen. Damit wird dem Gesetz der Erwartungskonformität nach Kapitel 2.2 Genüge getan. Einzig die Reibung wird bei den Versuchen am Prüfstand mit aktiver Rückmeldung variiert. Dies wäre bei einer rein mechanischen Lösung des Prüfstands nicht ohne größeren konstruktiven Aufwand realisierbar.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt bei der diskreten Eingabeart. Die Rastwinkel bewegen sich in den Versuchen im Bereich zwischen 5° - 30° , die maximalen Drehmomente am Stellteil im Bereich zwischen 0,01-0,41 Nm. Mit Ausnahme von exponentiell-logarithmischen Verläufen werden alle in Kapitel 4.1 dargestellten Verlaufsarten untersucht. Als Vergleich zu der diskreten Eingabeart werden auch einige Versuche mit monostabiler Eingabeart gemacht.

In allen Versuchen sitzen die Probanden vor dem Prüfstand. Der Lagerblock I befindet sich dabei in der x-z-Ebene (vgl. Bild 4.11). Der Drehknopf wird um die y-Achse im (positive Drehung um die y-Achse) oder gegen (negative Drehung um die y-Achse) den Uhrzeigersinn gedreht. Die Greifart wird nicht vorgegeben, sondern kann von den Probanden frei gewählt werden.

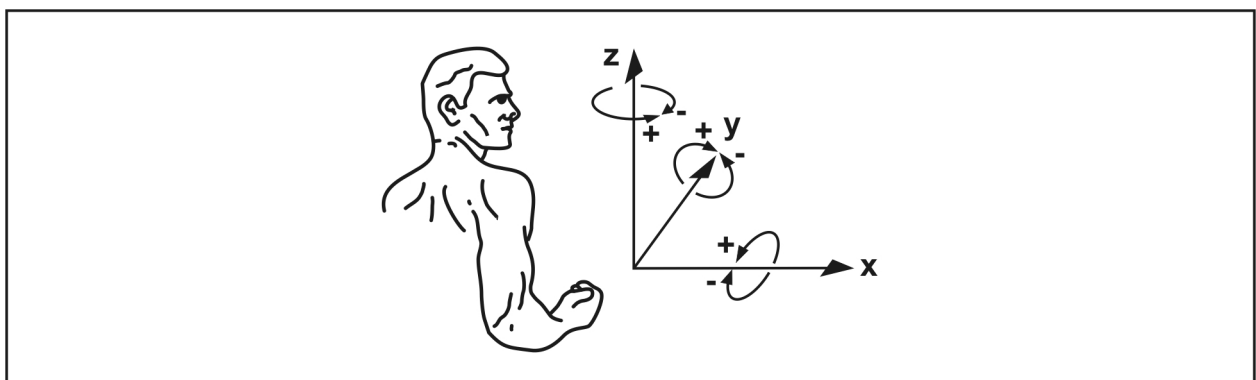


Bild 4.11: Koordinatensystem des Hand-Arm-Systems [DIN EN 894-3]

Der Stuhl, auf dem die Probanden sitzen, lässt sich in der Höhe und der Position zum Stellteil einstellen. Alle Probanden haben dadurch in etwa die gleiche Arm- und Körper-

haltung. Das Stellteil befindet sich bei allen Probanden im erweiterten Arbeitszentrum (vgl. Bild 4.12).

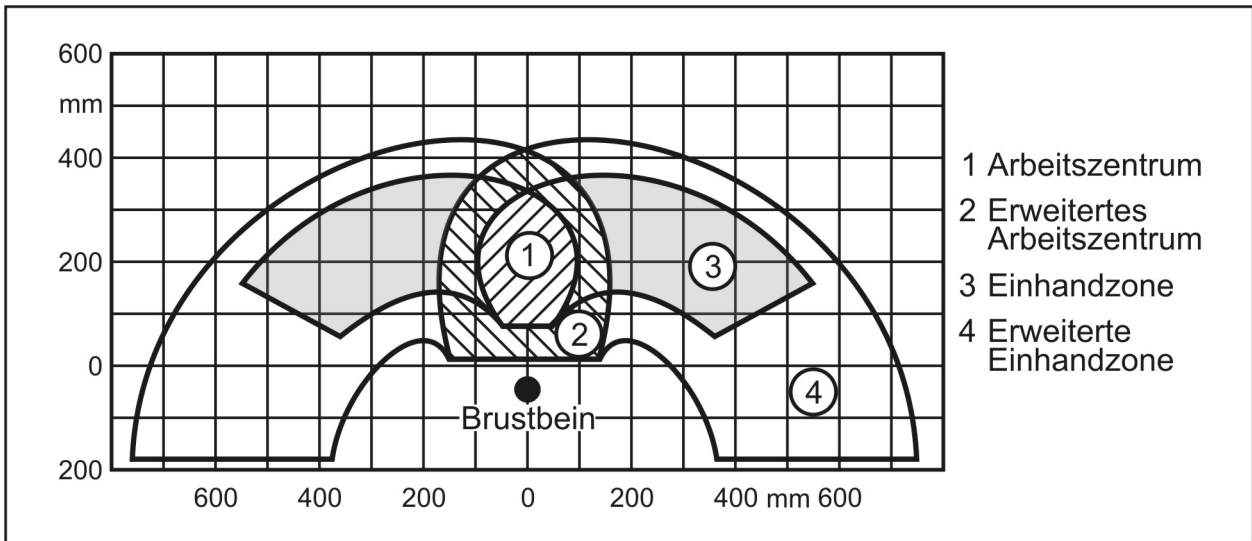


Bild 4.12: Greifraumzonen [BULLINGER94]

Durch eine Abdeckung der Komponenten und einem vom Benutzer nicht einsehbaren Bildschirm wird der Proband weder abgelenkt noch bekommt er Informationen, die seine Antworten beeinflussen könnten. Desweiteren gibt es keine auditive Rückmeldung beim Prüfstand mit aktiver Drehmomentenerzeugung. In Bild 4.13 ist der Versuchsaufbau während einer Befragung exemplarisch dargestellt.



Bild 4.13: Beispiel einer Versuchsdurchführung in Laborumgebung

Um an ein großes und heterogenes Probandenkollektiv zu gelangen, finden die Versuche an verschiedenen Orten statt. Dazu werden die Probanden in Laborumgebung, in

Büros, in Foyers von Hotels, in einer Mensa sowie in Baumärkten eingeladen an den Versuchen teilzunehmen.

Die Versuche werden mit der Interview-Methode durchgeführt. Dies soll zum einen für eine höhere Konzentration der Versuchsteilnehmer auf die Stellaufgabe führen, zum anderen lassen sich so Notizen vom Moderator, z.B. zur verwendeten Greifart oder zu Bemerkungen der Probanden, machen. Die in den Untersuchungen eingesetzten Fragebögen sind im Anhang zu finden.

Die Drehmomentverläufe werden im Vorfeld jeder Untersuchung gemessen, aufgezeichnet und auf Ihre Richtigkeit hin überprüft. Während der Versuche selbst werden die Drehmomentverläufe auf der Bedienoberfläche der Software angezeigt, dienen aber nur noch zur wiederholten Kontrolle.

5 Schwerpunktorientierte Untersuchungen

Die Probandenversuche sind unterteilt in schwerpunktorientierte Untersuchungen und solche, in denen zwei oder mehr Themenschwerpunkte gleichzeitig untersucht und auf ihre Wechselwirkung hin betrachtet werden.

In den folgenden drei Untersuchungen wird der Einfluss verschiedener Drehmomentverläufe einzeln auf die Teilgebiete der Stellgenauigkeit, der Komfortbereiche und der Unterschiedsschwelle untersucht. In allen drei Versuchen ändern sich die Verlaufsparameter und die Verlaufsarten während einer Betätigung nicht. Dies dient in allen drei Fällen dazu, die Grundlagen von adaptiven multifunktionalen Stellteilen zu bestimmen.

5.1 Untersuchung zur Stellgenauigkeit

Diese Untersuchung ist als erster Ansatz für die Auslegung adaptiver Drehmomentverläufe anzusehen. Ziel ist es, die Positionierfehler auf ein Minimum zu reduzieren und zu ermitteln, welche Faktoren besonders Einfluss auf die Stellgenauigkeit nehmen.

5.1.1 Hypothesen

- Die Drehmomentamplitude, der Rastwinkel und die Verlaufsart sind Faktoren eines Drehmomentverlaufs, die die Stellgenauigkeit beeinflussen.
- Es ergibt sich ein Lerneffekt, der ein genaues Stellen erleichtert.

5.1.2 Versuchsbeschreibung

Um zu klären, ob es Parameter oder Verlaufsarten gibt, bei denen die Stellgenauigkeit besonders hoch ist, werden diese nur beim Wechsel zur nächsten Positionieraufgabe geändert. Deswegen finden die Versuche am passiven Drehmomentprüfstand statt.

Eine Positionieraufgabe beinhaltet das Bewegen des Drehknopfes um eine vorgegebene Anzahl an Rastpositionen. Um den ungünstigsten Fall einer Erstbetätigung zu erhalten, bekommen die Probanden keine Möglichkeit, sich im Vorfeld einer Untersuchung an die Stellmomente zu gewöhnen. Bereits die erste Positionieraufgabe wird in die Ergebnisse mit einbezogen.

Als Ergebnis ist neben der Fehlerhäufigkeit die Versuchsnummer von Interesse, also wann ein Fehler auftritt, sowie die Rückmeldung der Probanden über das subjektiv empfundene Gefühl, ob der getestete Drehmomentverlauf sich sicher stellen lässt. Für Letzteres beantworten sie die Frage, ob sie das Gefühl hatten, den Drehknopf sicher

auf die gewünschte Position bewegen zu können. Gezählt werden davon die Antworten, bei denen die Versuchsteilnehmer kein sicheres Stellgefühl hatten. Diese Anzahl wird dann in das Verhältnis zur gesamten Anzahl der Versuche pro Drehmomentverlauf gesetzt. Die Daten werden als Balken- und als Verlaufsdiagramme dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Diagramme wird die Skalierung der Ordinate stets gleich gehalten.

Die Versuche zur Stellgenauigkeit sind in vier Versuchsreihen gegliedert. Die Reihen unterscheiden sich in der Verlaufsart, den Drehmomentamplituden und den Rastwinkeln. Da angenommen wird, dass sich die Stellgenauigkeit mit steigender Drehmomentamplitude verbessert, wird zunächst nach der kleinsten Drehmomentamplitude gesucht, ab der genaues Stellen möglich ist. Erst danach werden Rastwinkel und Verlaufsart variiert.

In der ersten Versuchsreihe zur Stellgenauigkeit (VRS1) bekommen die Probanden die Aufgabe, den Drehknopf um zwei bzw. drei Rastungen weiterzubewegen. Es wird nur ein flacher Sägezahnverlauf mit einem Rastwinkel von 20° untersucht. Die maximalen Drehmomentamplituden betragen 0,01 Nm, 0,02 Nm, 0,03 Nm und 0,036 Nm. Die Reihenfolge der Drehmomentamplituden wird bei jedem Versuchsteilnehmer variiert, um Reihenfolgeeffekte auszuschließen. Das Stellteil muss sowohl im als auch gegen den Uhrzeiger bewegt werden. Dazu muss jeder Proband nacheinander beide Hände verwenden. Die Auswertung nach Drehrichtung und Händigkeit soll zeigen, ob es Einflussfaktoren gibt, die vom Menschen herrühren. An der ersten Versuchsreihe nehmen insgesamt 18 Personen teil, bestehend aus zehn männlichen und acht weiblichen Teilnehmern, mit einem durchschnittlichen Alter von 28,1 Jahren (SD = 10,1 Jahre). Die Versuche finden zum einen in einer Laborumgebung statt, zum anderen in öffentlich zugänglichen Räumen. Bei der Auswahl der Probanden wird auf ein heterogenes Kollektiv Wert gelegt, das nicht ausschließlich aus Studenten besteht. Diese Auswahl wird auch in den folgenden Versuchsreihen angewandt.

In der darauffolgenden Versuchsreihe 2 (VRS2), werden die Drehmomentamplituden nochmals erhöht. Hier werden Drehmomentverläufe mit flachem sägezahnförmigem Verlauf und maximalen Drehmomenten von 0,05 Nm, 0,06 Nm, 0,065 Nm und 0,073 Nm untersucht. Die restlichen Parameter entsprechen denen aus VRS1. Auch hier finden die Versuche nicht ausschließlich in Laborumgebung statt. Um außerhalb des Labors an ein ausreichend großes Probandenkollektiv zu gelangen, werden die Versuche gekürzt, so dass nicht alle Parameter bei einem Probanden geändert und

getestet werden. An der zweiten Versuchsreihe nehmen insgesamt 57 Probanden teil. Das Kollektiv setzt sich aus 40 männlichen und 17 weiblichen Teilnehmern mit einem durchschnittlichen Alter von 38,2 Jahren (SD = 11,3 Jahre) zusammen.

In der Versuchsreihe 3 (VRS3) wird der Rastwinkel variiert. Dafür bleibt die in den zuvor durchgeführten Reihen ermittelte optimale Drehmomentamplitude im Bereich von 0,07 Nm nahezu unverändert. Als Rastwinkel werden 5°, 10°, 15°, 20°, 25° und 30° untersucht. Auch hier wird ein flacher Sägezahnverlauf untersucht. Die restlichen Versuchsbedingungen bleiben dieselben wie in den vorigen Versuchsreihen. Die weiteren Versuchsbedingungen in VRS3 entsprechen den vorherigen Reihen. Es nehmen 38 Probanden teil, deren Durchschnittsalter 29,1 Jahre (SD = 9,4 Jahre) beträgt. Das Kollektiv setzt sich hier aus 31 männlichen und sieben weiblichen Teilnehmern zusammen.

In der letzten Versuchsreihe (VRS4) zur Stellgenauigkeit wird die Verlaufsart verändert. Anstelle eines flachen sägezahnförmigen Verlaufs wird nun ein sinusförmiger verwendet. Da überprüft werden soll, ob sich die zuvor untersuchten Parameter bei dieser Verlaufsart auf eine ähnliche Weise auswirken, werden sowohl der Rastwinkel als auch die Drehmomentamplitude variiert. Es werden die Amplituden 0,06 Nm, 0,08 Nm und 0,10 Nm in jeder möglichen Kombination mit den Rastwinkeln 15°, 20° und 25° untersucht. Alle sonstigen Versuchsbedingungen bleiben unverändert. An der letzten Versuchsreihe nehmen 55 Personen teil, davon sind 17 Frauen und 38 Männer. Das Durchschnittsalter beträgt 36,1 Jahre (SD = 11,8 Jahre).

Zur besseren Übersicht sind die Versuchsdaten aller vier Versuchsreihen nochmals in Tabelle 5.1 dargestellt.

Versuchsreihe	VRS1	VRS2	VRS3	VRS4
Verlaufsart	FSZ	FSZ	FSZ	SIN
Rastwinkel	20°	20°	5° 10° 15° 20° 25° 30°	15° 20° 25°
Drehmomentamplitude	0,01 Nm 0,02 Nm 0,03 Nm 0,036 Nm	0,05 Nm 0,06 Nm 0,065 Nm 0,73 Nm	0,07 Nm	0,06 Nm 0,08 Nm 0,10 Nm

Tabelle 5.1: Versuchsdaten aller vier Versuchsreihen zur Stellgenauigkeit

5.1.3 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der VRS1 zeigen eine bereits sehr hohe Stellgenauigkeit. Der prozentuale Anteil an Fehlern bezogen auf alle getätigten Positionierbewegungen beträgt hier maximal 9,72% bei einer Drehmomentamplitude von 0,036 Nm. Bei 0,02 Nm führen 6,94% aller Bewegungen zu falschen Endpositionen. Bei 0,01 Nm und 0,03 Nm beträgt die Fehlerhäufigkeit noch 5,56%. Bei allen Fehlern wird das Stellteil über die gewünschte Position hinaus gedreht. Der Fall, dass das Stellteil zu kurz bewegt und die gewünschte Endposition nicht erreicht wird, tritt nicht auf. Zwar zeigt sich die höchste Fehlerhäufigkeit bei 0,036 Nm, aber dieses Ergebnis muss im Zusammenhang mit der Anzahl der überdrehten Rastpositionen gesehen werden. So werden die Drehmomentverläufe mit den Amplituden von 0,03 Nm und 0,036 Nm fast immer nur um eine Rastposition zu weit gedreht. Bei den Verläufen mit den Amplituden von 0,01 Nm und 0,02 Nm wird die gewünschte Endposition hingegen einige Mal um drei oder vier Positionen überdreht. Dieser Effekt wird durch die Aussagen der Probanden bekräftigt. Die häufigsten Rückmeldungen, dass sich der getestete Drehmomentverlauf nicht sicher stellen lässt, sind bei der kleinsten Drehmomentamplitude von 0,01 Nm zu finden. Mit Ausnahme der Drehmomentamplitude von 0,02 Nm ist die Häufigkeit der Rückmeldungen über ein unsicheres Stellgefühl immer etwas höher als die tatsächlich gemessene Fehlerhäufigkeit. Bild 5.1 zeigt die Ergebnisse der VRS1 grafisch zusammengefasst.

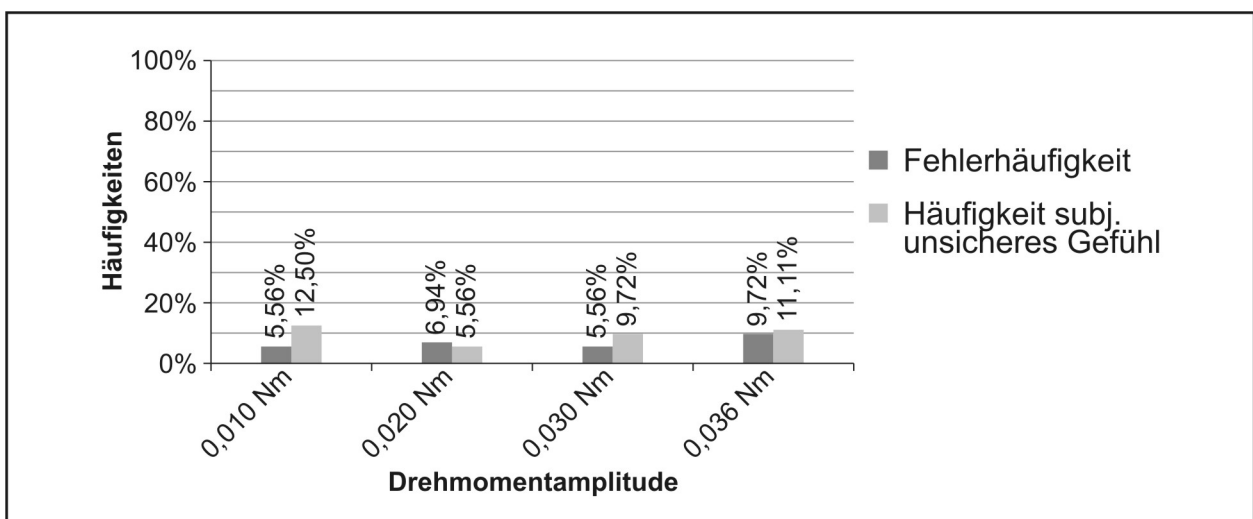


Bild 5.1: Fehlerhäufigkeit und subjektiver Eindruck zum Stellgefühl der VRS1

Die Darstellung der Fehler in Abhängigkeit von der Versuchsnummer zeigt ein erhöhtes Fehlerauftreten bei den ersten Positionierbewegungen (vgl. Bild 5.2). Ab der elften Positionieraufgabe kommt es in der gesamten VRS1 nur noch zu einer einzigen Fehl-

positionierung. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich der Mensch sehr schnell auf die notwendigen Kräfte für eine Betätigung einstellen kann.

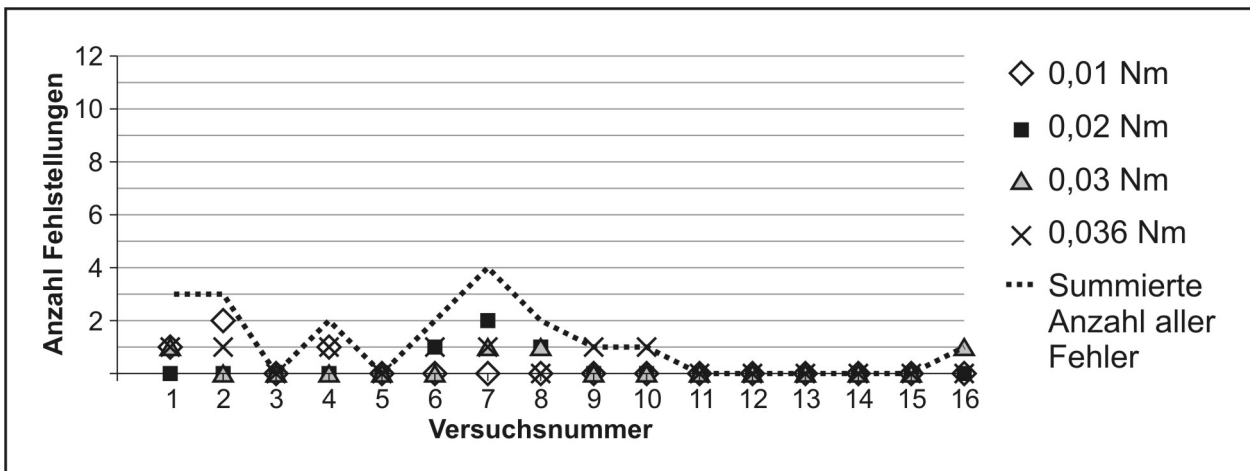


Bild 5.2: Fehlerauftreten in Abhängigkeit von der Versuchsnummer der VRS1

In VRS2 soll die Stellgenauigkeit durch eine Erhöhung der Drehmomentamplituden verbessert werden. Die Ergebnisse in Bild 5.3 zeigen bei 0,05 Nm eine Fehlerhäufigkeit von noch immer 4,5%, während ab einer Amplitude von 0,06 Nm nahezu keine Fehlpositionierungen mehr auftreten. Bei 0,065 Nm beträgt die Fehlerhäufigkeit zwar 1,87%, nach Hajos kann dies jedoch als statistisches Messrauschen bezeichnet werden, da jeder auf Erfahrungen und Ergebnissen von Menschen basierende Versuch fehlerbehaftet ist [HAJOS72]. Demzufolge benötigt es eine minimale Drehmomentamplitude von ca. 0,06 Nm, um bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf mit einem Rastwinkel von 20° eine hohe Stellgenauigkeit zu gewährleisten.

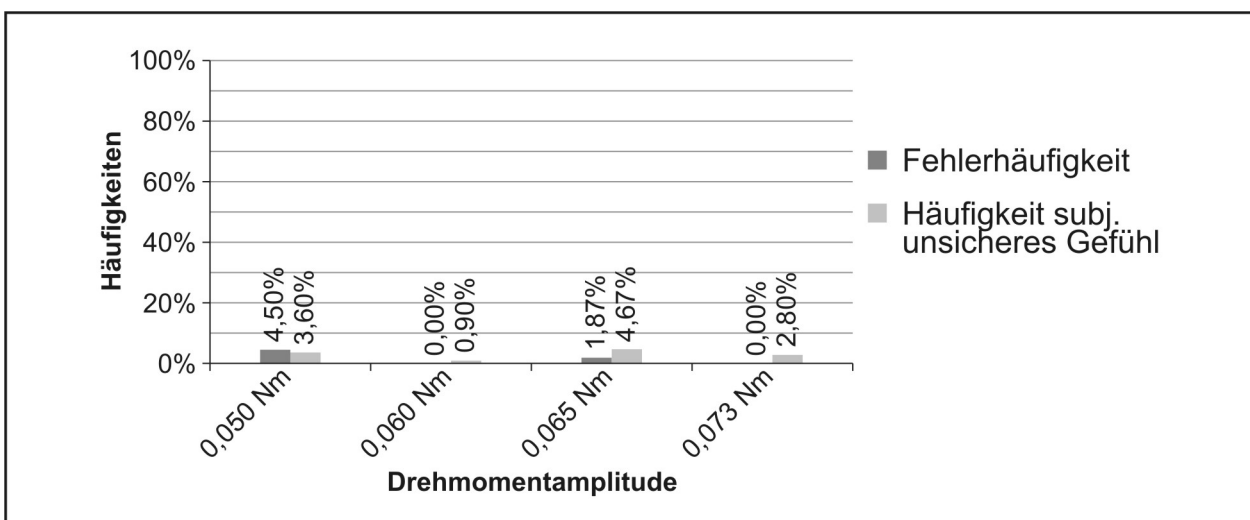


Bild 5.3: Fehlerhäufigkeit und subjektiver Eindruck zum Stellgefühl der VRS2

Der in VRS1 beschriebene Lerneffekt ist in dieser Versuchsreihe noch deutlicher erkennbar (vgl. Bild 5.4). Die ersten 22 Probanden machen bei insgesamt 16 Positionieraufgaben nach den ersten vier Versuchen keine Fehler mehr. Aus diesem Grund werden die Versuche bei den nächsten 35 Probanden der VRS2 gekürzt.

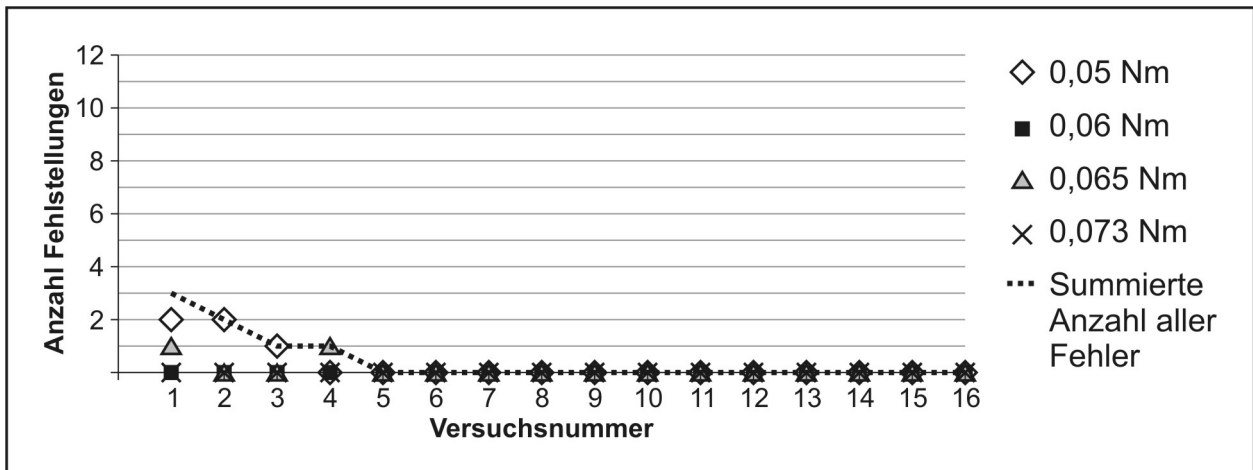


Bild 5.4: Fehlerauftreten in Abhängigkeit von der Versuchsnummer der VRS2

Die Auswertung der Fehlerhäufigkeit bezogen auf die Händigkeit der Probanden und der bei einer Positionieraufgabe eingesetzten Hand liefert unklare Ergebnisse. Werden in VRS1 viermal so viele Fehler mit der nichtdominanten Hand gemacht, dreht sich das Verhältnis in VRS2 um. Hier werden mit der dominanten Hand doppelt so viele Fehler gemacht wie mit der nichtdominanten Hand. Dieses Resultat entspricht den Aussagen von Porac et al., wonach Geschicklichkeitsaufgaben nicht zwingend mit der dominanten Hand besser erfüllt werden [PORAC81]. Aufgrund dieser Ergebnisse wird auf eine weitere Abhängigkeit der Ergebnisse zur Händigkeit verzichtet und die folgenden beiden Versuchsreihen werden nur noch mit der dominanten Hand durchgeführt.

In der dritten Versuchsreihe (VRS3) wird der Rastwinkel in 5°-Schritten verändert. In Bild 5.5 sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihe dargestellt. Es zeigt sich eine deutliche Erhöhung der Fehlerhäufigkeit bei kleinen Rastwinkeln. So werden bei einem Rastwinkel von 5° in mehr als 80% der Positionieraufgaben Fehler gemacht. Eine Verdopplung des Rastwinkels auf 10° führt bereits zu einer deutlichen Reduzierung der Fehlerhäufigkeit. Auffallend bei diesen beiden kleinen Rastwinkeln ist weiterhin die Anzahl der über die gewünschte Endposition hinaus gedrehten Rastungen. In beiden Fällen kommt es mehrfach vor, dass vier oder fünf Rastungen zu weit gedreht wird. Ab einem Rastwinkel von 15° nimmt die Fehlerhäufigkeit weiter ab und auch die Anzahl der

überdrehten Rastungen sinkt auf maximal drei überdrehte Rastungen. Bei einem Rastwinkel von 20° und größer treten nahezu keine Fehler mehr auf.

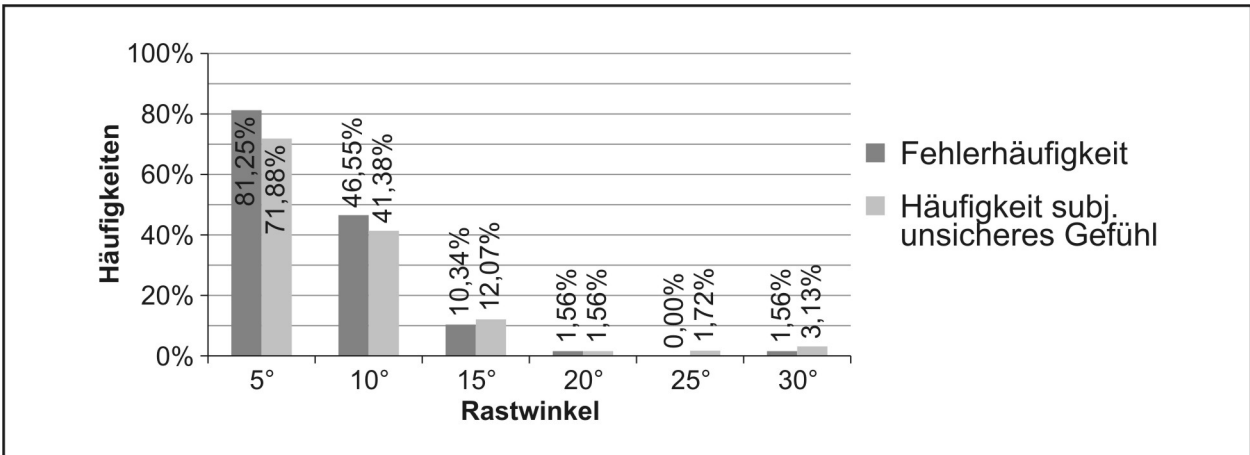


Bild 5.5: Fehlerhäufigkeit und subjektiver Eindruck zum Stellgefühl der VRS3

Die Auswertung der Fehler nach der Versuchsnummer zeigt, dass bei den Rastwinkeln von 5°, 10° und 15° noch bis zur letzten Versuchsnummer Fehler gemacht werden (vgl. Bild 5.6). Bei den drei größten Rastwinkeln tritt hingegen nur beim zweiten und fünften Versuch insgesamt je ein Fehler auf.

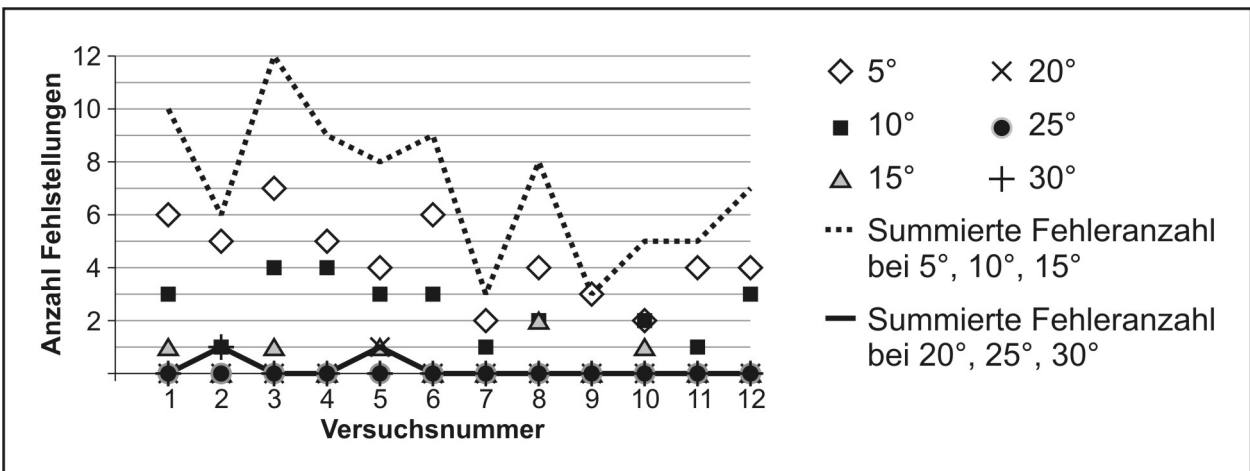


Bild 5.6: Fehlerauftreten in Abhängigkeit von der Versuchsnummer der VRS3

In der letzten Versuchsreihe (VRS4) wird überprüft, inwieweit sich diese Ergebnisse auf andere Verlaufsarten übertragen lassen. Dazu wird exemplarisch ein sinusförmiger Verlauf untersucht. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt auch hier, dass die meisten Fehler bei dem kleinsten getesteten Rastwinkel von 15° auftreten (vgl. Bild 5.7). Auffallend ist jedoch, dass sowohl bei den Rastwinkeln von 15° und 20° die Fehlerhäufigkeit mit größer werdender Drehmomentamplitude steigt. Die höchste Fehlerhäufigkeit mit

20,00% tritt bei einem Rastwinkel von 15° und einer Drehmomentamplitude von 0,1 Nm auf. Erst bei einem Rastwinkel von 25° bleibt die Fehlerhäufigkeit unabhängig vom Rastwinkel sehr niedrig und erreicht maximal einen Wert von 3,23%.

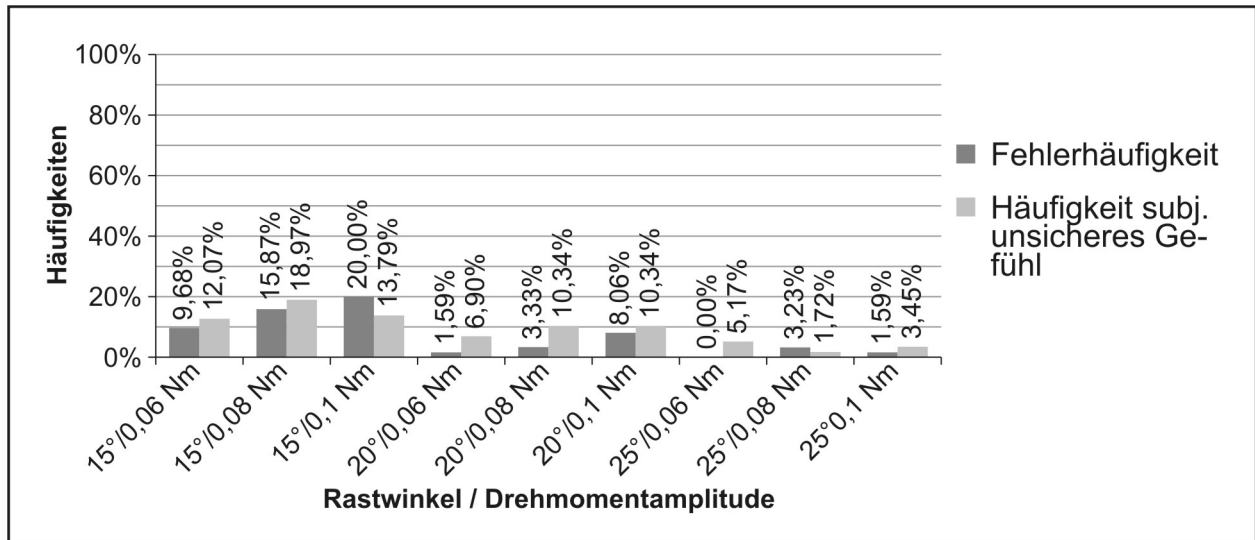


Bild 5.7: Fehlerhäufigkeit und subjektiver Eindruck zum Stellgefühl der VRS4

Die Fehlerhäufigkeiten decken sich insgesamt weitestgehend mit den Ergebnissen der vorangegangenen drei Versuchsreihen. Ferner wird auch hier der Drehknopf bei einem Rastwinkel von 15° um maximal drei Rastungen zu weit gedreht, bei 20° um maximal zwei Rastungen und bei 25° um maximal eine Rastung.

Die Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Fehler zeigt auch hier, dass bei 15° noch bis zum Ende hin Fehler gemacht werden (vgl. Bild 5.8). Bei einem Rastwinkel von 25° treten die Fehler hingegen fast ausschließlich am Anfang einer Untersuchung auf.

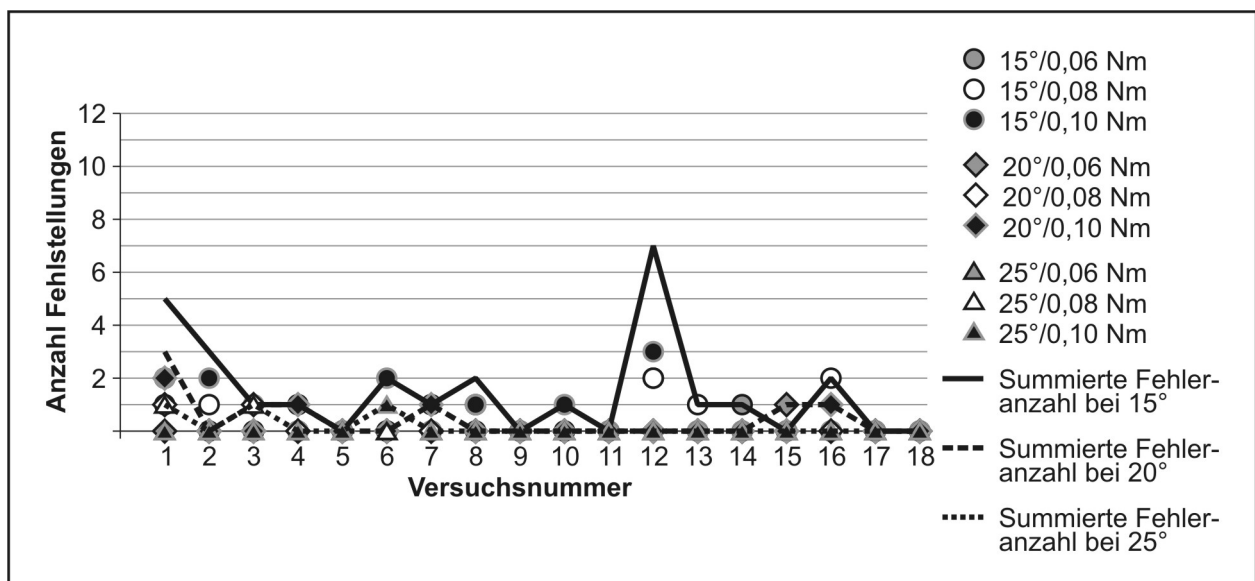


Bild 5.8: Fehlerauftreten in Abhängigkeit von der Versuchsnummer der VRS4

Die Drehrichtung hat auf die Fehlerhäufigkeit keinen Einfluss. In allen vier Versuchsreihen ist das Verhältnis der Fehler bei Drehungen des Stellteils im Uhrzeigersinn zur Anzahl der Fehler bei Drehungen gegen den Uhrzeigersinn etwa 15:14 und damit sehr ausgeglichen.

Die bei dieser Untersuchung aufgezeichneten durchschnittlichen Drehgeschwindigkeiten liefern ebenfalls keine weiteren Erkenntnisse. Die meisten Probanden bewegen den Drehknopf mit ca. 7–8 U/min. Da sich die Drehgeschwindigkeit aber stark dynamisch ändert, wird auf eine Aussage zum Einfluss der Drehgeschwindigkeit in dieser Untersuchung verzichtet.

5.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchung zur Stellgenauigkeit zeigt, dass es eine untere Grenze für eine Drehmomentamplitude gibt, ab der sicheres Stellen möglich ist. Bei einem flachen sägezahnförmigen Verlauf und einem Rastwinkel von 20° beträgt diese minimale Amplitude 0,06 Nm. Wird die Amplitude bei dieser Verlaufsart und diesem Rastwinkel weiter erhöht, so hat dies bis zur getesteten Amplitude von 0,073 Nm keine negativen Auswirkung auf die Stellgenauigkeit. Gleiches gilt für eine Erhöhung des Rastwinkels. Bei einer Verringerung des Rastwinkels bei einer gleichbleibenden Amplitude von ca. 0,07 Nm verschlechtert sich die Stellgenauigkeit hingegen drastisch. Das Kürzen der Versuchsanzahl pro Proband hat sich in dieser Untersuchung als vorteilhaft gezeigt, da die meisten Fehler bei den ersten Positionieraufgaben stattfinden. So wird den Probanden die Möglichkeit genommen sich auf die wirkenden Drehmomente einzustellen. Verlaufsarten und Verlaufparameter, die starken Einfluss auf die Stellgenauigkeit nehmen, treten in den Ergebnissen dadurch deutlich hervor. Die Versuche, die zum Vergleich mit einem sinusförmigen Drehmomentverlauf durchgeführt wurden, bestätigen diese Aussagen auch für eine andere Verlaufsart. Die beiden für diese Untersuchung aufgestellten Hypothesen werden somit für richtig erklärt.

Als Fazit dieser Untersuchung und bei den vorgegebenen Randbedingungen (z.B. der Stellteildurchmesser) lässt sich folgende Empfehlung aussprechen:

Um eine hohe Stellgenauigkeit bei diskreter Eingabeart gewährleisten zu können, sollte die Drehmomentamplitude nicht kleiner als 0,06 Nm bei einem Rastwinkel von mindestens 20° sein. Größere Rastwinkel bis 30° erlauben überdies die Verwendung höherer Drehmomente, ohne die Stellgenauigkeit zu beeinflussen.

5.2 Untersuchung zum Komfortbereich

Nachdem in der ersten Untersuchung Anhaltswerte für die Auslegung der Drehmomentverläufe für sicheres Stellen ermittelt wurden, soll die folgende Untersuchung zur Ermittlung des Komfortbereichs dienen.

5.2.1 Hypothesen

- Es gibt einen Bereich der Drehmomentamplitude, der bevorzugt wird und weder als zu leicht- noch als zu schwergängig eingestuft wird.
- Die Verlaufsart beeinflusst die Empfindung von Drehmomenten.

5.2.2 Versuchsbeschreibung

Die Versuche zum Komfortempfinden von Drehmomenten finden sowohl am Prüfstand mit passiver als auch an dem mit aktiver Drehmomenterzeugung statt. Zwar würde der Prüfstand mit passiver Drehmomenterzeugung ausreichen, da in dieser Untersuchung ebenfalls einfache Verlaufsarten ohne Änderung während einer Bewegung getestet werden, der Wechsel findet dennoch aus zwei Gründen statt. Zum einen sollen zunächst die am Prüfstand mit passiver Drehmomenterzeugung gewonnenen Ergebnisse auf Ihre Übertragbarkeit auf den Prüfstand mit aktiver Drehmomenterzeugung überprüft werden. Bei einer Abweichung der Ergebnisse kann dann der aktive Prüfstand für die weiteren Untersuchungen angepasst werden. Zum anderen werden durch den Wechsel die akustischen Signale eliminiert, die bei der Bewegung des Wälzkörpers auf der Kurvenscheibe entstehen. Eine solche akustische Signalgebung fehlt bei einem adaptiven multifunktionalen Stellteil aufgrund der Drehmomenterzeugung durch aktive Komponenten. Zwar ist der Klang beim Einrasten durch die immer gleiche Materialpaarung des Wälzkörpers und der Kurvenscheibe stets derselbe und auch die Lautstärke ändert sich laut der subjektiven Rückmeldung der Probanden nicht, dennoch sollte eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Akustik vermieden werden (vgl. Kapitel 3.3.5).

Die Untersuchung ist in vier Versuchsreihen unterteilt. In allen vier Reihen werden ausschließlich Verläufe für diskrete Eingabearten untersucht. Dazu müssen die Probanden das Stellteil drehen und anschließend den getesteten Drehmomentverlauf auf einer fünfstufigen, bipolaren Rating-Skala einordnen (vgl. Bild 5.9). Dazu wird ihnen die Frage gestellt, wie sie die Kraft, die sie zum Bewegen des Drehknopfs aufbringen müssen, empfinden. Die möglichen Antworten werden Ihnen auf einer kleinen Tafel, die neben dem Prüfstand steht, grafisch, numerisch und als verbale Marker dargestellt.

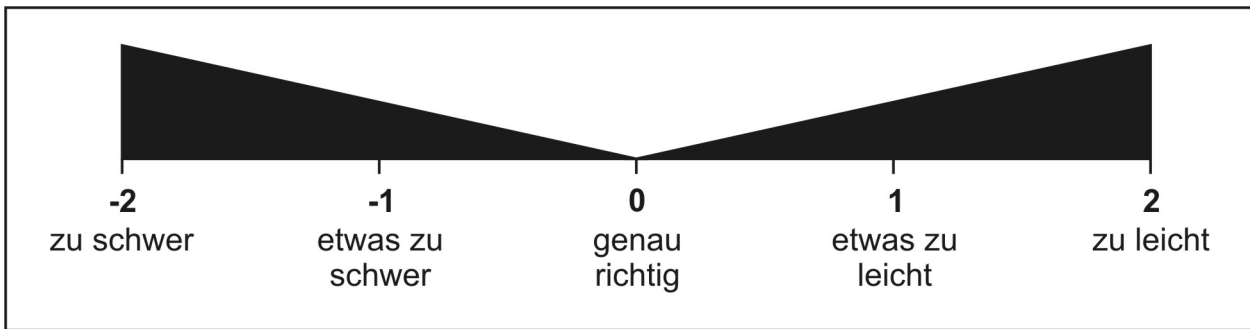


Bild 5.9: Verwendete bipolare Ratingskala

Jeder Versuchsteilnehmer beurteilt alle Drehmomentverläufe einer Versuchsreihe. Dazu dreht er das Stellteil sowohl im als auch gegen den Uhrzeigersinn um je zwei Rastpositionen. Beide Drehrichtungen werden getrennt beurteilt. Die Anzahl der zu drehenden Rastpositionen wird beschränkt, um eine verfälschte Aussage aufgrund einer unkomfortablen Armdrehung zu vermeiden. Positionierfehler werden jedoch nicht erfasst. Der Rastwinkel beträgt in jeder der vier Reihen 20° .

In jeder Versuchsreihe werden die Mittelwerte MW samt dazugehörigen Standardabweichungen SD der in Zahlen formulierten Antwortmöglichkeiten berechnet. Zusätzlich wird ein Signifikanztest in Form eines t-Tests für jede Reihe durchgeführt. Dieser zeigt, bei welchen Drehmomentamplituden es signifikante Unterschiede zum getesteten Wert „0 - genau richtig“ gibt. Da dies jedoch nicht zur Ermittlung der Drehmomentamplitude ausreicht, bei der die Rückmeldung „0 - genau richtig“ zu erwarten ist, werden die Daten in der ersten Versuchsreihe zusätzlich mit einer gemischten Regressionsanalyse ausgewertet⁷. Das passende Regressionsmodell wird über eine Varianzanalyse ermittelt und dann grafisch dargestellt.

In der ersten Versuchsreihe zum Komfortempfinden (VRK1) wird ein flacher sägezahnförmiger Drehmomentverlauf mit neun unterschiedlichen Drehmomentamplituden untersucht, die von 0,07 Nm bis 0,41 Nm reichen. Der Drehknopf wird dazu von der dominanten Hand des Versuchsteilnehmers bewegt. Da VRK1 dazu dient, sich einen Überblick über die Einstufung der verschiedenen Drehmomentamplituden zu verschaffen, finden die Versuche der VRK1 im Labor statt. Das Probandenkollektiv besteht aus

⁷ Eine gemischte Regressionsanalyse ist bei Daten notwendig, die nicht unabhängig voneinander sind (Longitudinaldaten). Da die Probanden in dieser Untersuchung mehr als eine Bewertung gemacht haben, ist die Unabhängigkeit der Ergebnisse nicht mehr gegeben. Ein Versuchsteilnehmer sollte in zwei ähnlichen Versuchen annähernd gleich gut abschneiden. Es besteht also die Möglichkeit, dass ein Teil der Varianz der Ergebnisse nicht durch den Test, sondern durch die Person, die ihn macht, entsteht. Eine nähere Beschreibung einer gemischten Regressionsanalyse für solche Longitudinaldaten findet sich z.B. in [HEDEKER06] oder [FAHRMEIR07].

Mitarbeitern sowie aus Studenten der Universität Stuttgart. An VRK1 nehmen insgesamt zwölf Personen teil. Davon sind zehn männlich und zwei weiblich. Das Durchschnittsalter beträgt 27,4 Jahren (SD = 4,5 Jahre).

Die zweite Versuchsreihe (VRK2) dient dazu, den zuvor als „genau richtig“ ermittelten Bereich genauer zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden Drehmomente mit flachem sägezahnförmigen Verlauf und Amplituden von 0,071 Nm, 0,091 Nm und 0,105 Nm getestet. Die Drehmomentamplitude von 0,091 Nm wird dabei als optimal erwartet. Die Versuche finden sowohl im Labor als auch in Foyers öffentlich zugänglicher Gebäude statt. Für VRK2 werden 31 Versuchsteilnehmer (16 Männer, 15 Frauen) angeworben. Ihr Durchschnittsalter beträgt 35,4 Jahre (SD = 10,8 Jahre).

Die Versuchsreihen 3 und 4 finden am Prüfstand mit aktiver Drehmomenterzeugung statt. In der Versuchsreihe 3 (VRK3) wird anstelle eines flachen ein steiler Sägezahnverlauf getestet. Die Reibung des Prüfstands wird vollständig ausgeglichen, so dass ein idealer, mittig zur Abszisse liegender Verlauf entsteht. Zum Vergleich der Ergebnisse aus VRK2 werden auch in VRK3 Drehmomentamplituden mit den Werten von 0,071 Nm, 0,091 Nm und 0,105 Nm untersucht. Wie schon zuvor finden die Versuche an unterschiedlichen Orten mit einem heterogenen Probandenkollektiv statt. Es nehmen 17 Probanden an der dritten Versuchsreihe teil (11 Männer, 6 Frauen), deren Durchschnittsalter 32,9 Jahre (SD = 16,6 Jahre) beträgt.

Die vierte Versuchsreihe dient einzig zum Vergleich der in VRK2 mit dem Prüfstand mit passiver Drehmomenterzeugung ermittelten Ergebnisse. Die Versuchsbedingungen entsprechen deshalb denen aus VRK2. Hier nehmen 19 Probanden teil. Das Durchschnittsalter beträgt 36,9 Jahre (SD = 10,4 Jahre) und entspricht somit in etwa dem Durchschnittsalter der VRK2. Das Kollektiv setzt sich aus sieben Frauen und zwölf Männern zusammen.

Tabelle 5.2 fasst die Versuchsdaten nochmals zusammen.

Versuchsreihe	Verlaufsart	Drehmomenterzeugung	Drehmomentamplitude [Nm]
VRK1	FSZ	passiv	0,07 / 0,1 / 0,135 / 0,17 / 0,22 0,26 / 0,31 / 0,37 / 0,41
VRK2	FSZ	passiv	0,071 / 0,091 / 0,105
VRK3	SSZ	aktiv	0,071 / 0,091 / 0,105
VRK4	FSZ	aktiv	0,071 / 0,091 / 0,105

Tabelle 5.2: Versuchsdaten aller vier Versuchsreihen zur Komfortuntersuchung

5.2.3 Versuchsergebnisse

Die Auswertung der VRK1 in Bild 5.10 zeigt eine Abweichung der Drehmomente mit einer Amplitude größer als 0,1 Nm vom optimalen Bereich in Richtung „zu schwer“. Bis zu einer Amplitude von 0,17 Nm bleiben die Mittelwerte der Antworten noch im Bereich „etwas zu schwer“. Erst ab einer Amplitude von 0,22 Nm wird diese Grenze in Richtung „zu schwer“ überschritten. Eine Drehmomentamplitude von 0,07 Nm weicht hingegen in Richtung „zu leicht“ ab. Mit einem Mittelwert von MW = -0,25 liegt die Drehmomentamplitude mit einem Wert von 0,1 Nm am nächsten zum Optimum „genau richtig“. Jedoch variieren die Antworten der Versuchsteilnehmer sehr stark, wodurch eine hohe Standardabweichung SD entsteht. Diese kann generell bei den Amplituden 0,07–0,17 Nm, deren Mittelwerte nahe dem Optimum liegen, festgestellt werden.

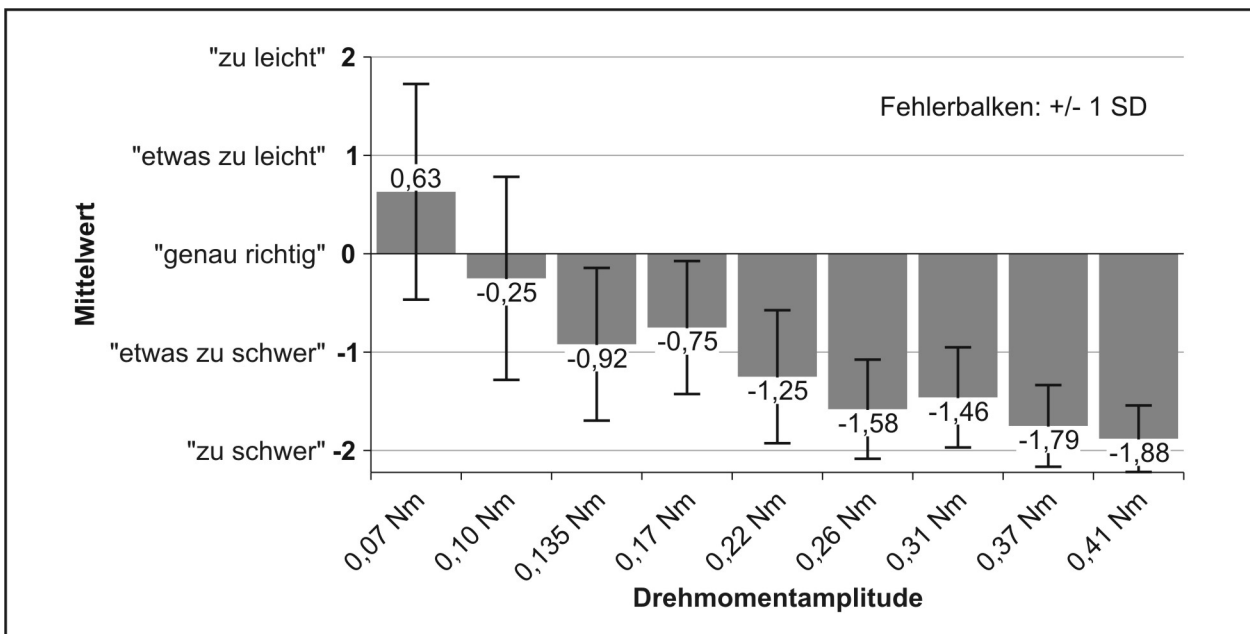


Bild 5.10: Mittelwerte der VRK1 in Abhängigkeit von der Drehmomentamplitude

Der t-Test mit dem Testwert „0 - genau richtig“ kann bei einer Drehmomentamplitude von 0,1 Nm nicht falsifiziert werden ($p = 0,247$). Bei einer Drehmomentamplitude von 0,07 Nm wird der Wert „0 - genau richtig“ hingegen sehr signifikant ($p = 0,01$), bei allen übrigen Amplituden hoch signifikant ($p < 0,001$) falsifiziert.

Die Auswertung mit einem gemischten Regressionsmodell ergibt einen hoch signifikanten quadratischen Trend ($p < 0,0001$). Die Funktion $f(A)$ dieser Regression lautet:

$$f(A) = 24.017 \cdot A^2 - 17.607 \cdot A + 1.427 \quad (5.1)$$

Aus dieser Funktion lässt sich nur eine sinnvolle Nullstelle mit $A \approx 0,093$ Nm ableiten. Diese Drehmomentamplitude A kann bei einem flachen, sägezahnförmigen Drehmo-

mentverlauf als Optimum angesehen werden. In Bild 5.11 sind die Regressionsfunktion und die Mittelwerte der Antworten nochmals grafisch dargestellt.

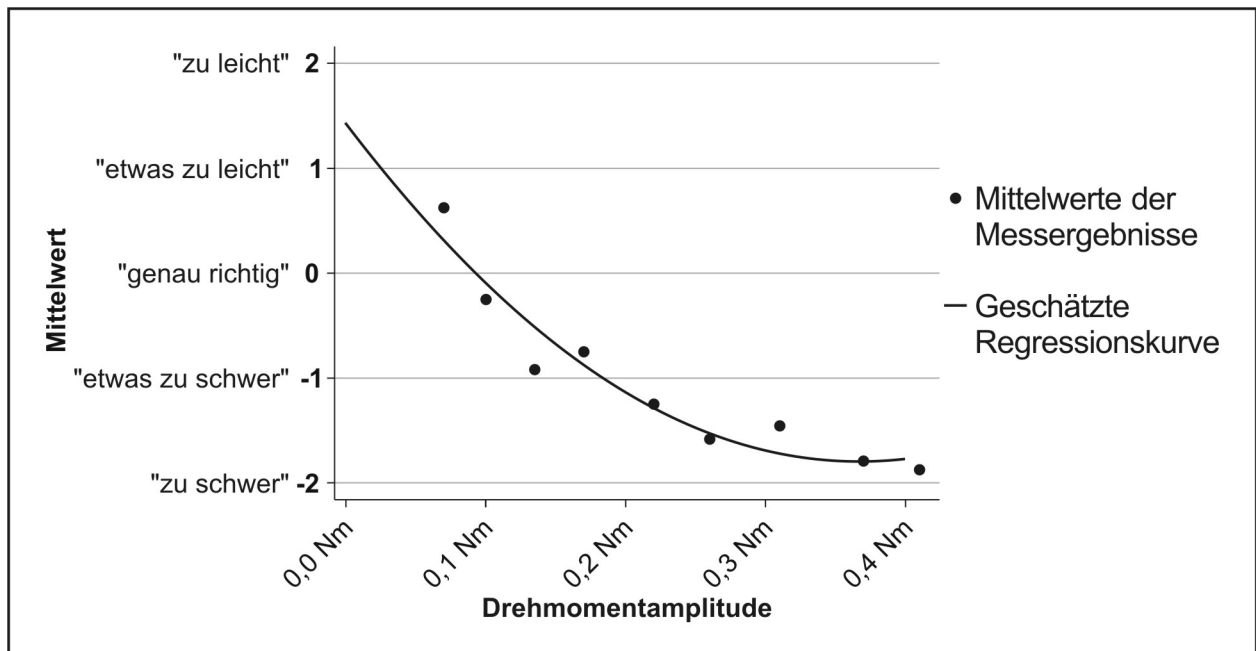


Bild 5.11: Mittelwerte der VRK1 in Abhängigkeit von der Drehmomentamplitude

Anhand der Ergebnisse aus VRK1 wird ein optimaler Bereich für Drehmomentamplituden zwischen 0,07 Nm und 0,1 Nm festgelegt. In der Versuchsreihe 2 (VRK2) werden deshalb die Drehmomentamplituden 0,071 Nm, 0,091 Nm und 0,105 Nm nochmals genauer untersucht. In Bild 5.12 sind die zugehörigen Ergebnisse dargestellt.

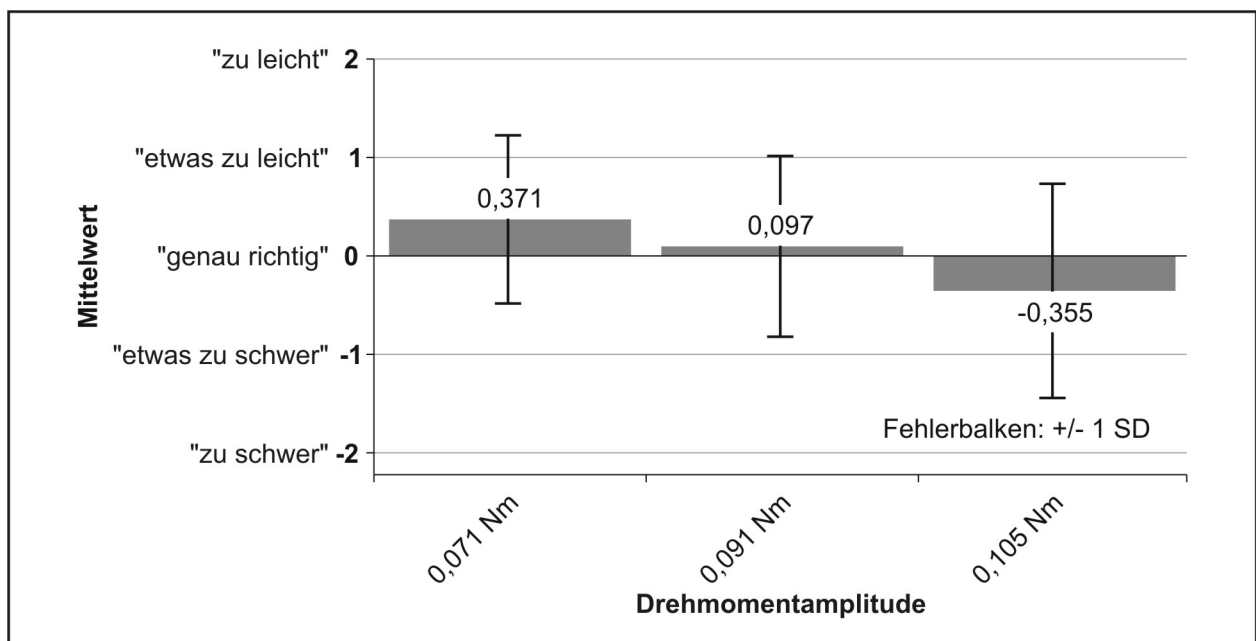


Bild 5.12: Mittelwerte der VRK2 in Abhängigkeit von der Drehmomentamplitude

Die Drehmomentamplitude mit einem Wert von 0,091 Nm liegt am nächsten zur berechneten optimalen Amplitude von 0,093 Nm. Passend dazu liegt bei einer Amplitude von 0,091 Nm auch der Mittelwert der Antworten sehr nah am Optimum „genau richtig“ (MW = 0,097). Der Mittelwert bei einer Drehmomentamplitude von 0,105 Nm entspricht mit MW = -0,355 nahezu dem Mittelwert bei einer Amplitude von 0,1 Nm aus VRK1. Der Mittelwert bei A = 0,071 Nm verringert sich hingegen um gut 40% auf einen Wert von MW = 0,371, verglichen mit dem Ergebnis, das in VRK1 bei einer Amplitude von 0,071 Nm ermittelt werden konnte. Gründe für diese Verringerung können die reduzierte Anzahl an zu vergleichenden Drehmomentamplituden sowie die größere Anzahl an Versuchsteilnehmern in VRK2 sein.

Die Standardabweichungen der Mittelwerte liegen mit Werten von 0,854 bis 1,088 bei allen drei Drehmomentamplituden in einem ähnlich hohen Bereich wie bei den getesteten Amplituden von 0,07 Nm und 0,1 Nm in VRK1.

Aufgrund der geringen Anzahl getesteter Drehmomentamplituden ist eine Regressionsanalyse bei dieser Versuchsreihe nicht sinnvoll. Anhand der Ergebnisse aus den Mittelwerten und dem t-Test lässt sich die berechnete optimale Drehmomentamplitude von 0,093 Nm bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf aber bestätigen. Die geringen Abweichungen der Mittelwerte vom Optimum bei den Drehmomentamplituden mit Werten von 0,071 Nm und 0,105 Nm bestätigen ferner den in VRK1 angenommenen optimalen Bereich für Drehmomentamplituden.

In der dritten Versuchsreihe (VRK3) soll die Übertragbarkeit der in VRK1 und VRK2 erhaltenen Ergebnisse auf eine andere Verlaufsart überprüft werden. Dazu werden Versuche bei gleichen Drehmomentamplituden wie in VRK2 aber mit steilem sägezahnförmigem Drehmomentverlauf durchgeführt. Bild 5.13 zeigt die Ergebnisse dieser Versuchsreihe. Es zeigt sich, dass auch hier die Mittelwerte nahe zum Wert „0 - genau richtig“ bleiben. Insgesamt sind sie jedoch etwas in Richtung „zu leicht“ verschoben. Der Mittelwert bei einer Drehmomentamplitude von 0,105 Nm liegt dem optimalen Wert (MW = 0,500) am nächsten, der Mittelwert bei einer Amplitude von 0,071 Nm liegt hingegen am weitesten davon entfernt (MW = 0,706). Die Standardabweichungen der Mittelwerte bewegen sich bei allen drei Drehmomentamplituden in einem ähnlichen Bereich wie in VRK2.

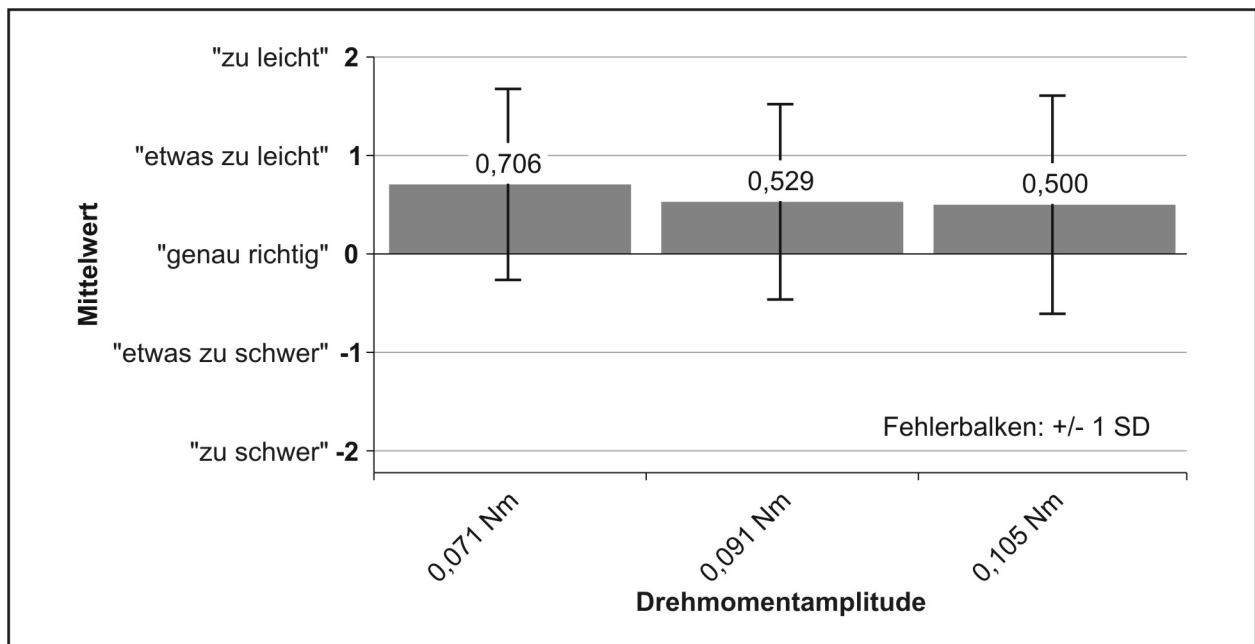


Bild 5.13: Mittelwerte der VRK3 in Abhängigkeit von der Drehmomentamplitude

Bei der Analyse durch einen t-Test der in VRK3 gewonnenen Daten wird der Versatz der Mittelwerte in positive Richtung bestätigt. Die Analyse zeigt signifikante Unterschiede ($p = 0,013$) bei einer Drehmomentamplitude von 0,105 Nm, sehr signifikante Unterschiede ($p = 0,004$) bei $A = 0,091$ Nm und höchst signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) bei einer Amplitude von 0,071 Nm. Anhand der Mittelwerte und der Ergebnisse des t-Tests muss also davon ausgegangen werden, dass ein steiler sägezahnförmiger Drehmomentverlauf als etwas leichtgängiger empfunden wird als ein flacher sägezahnförmiger Verlauf.

Die vierte Versuchsreihe (VRK4) dient der Überprüfung des in VRK3 festgestellten Versatzes des komfortabel empfundenen Drehmomentbereichs bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf, indem VRK2 auf dem Prüfstand mit aktiver Drehmomenterzeugung wiederholt wird. Es zeigt sich, dass die optimale Drehmomentamplitude von 0,091 Nm in VRK2 auch in VRK4 als optimal angenommen werden kann (vgl. Bild 5.14). Die Mittelwerte der Antworten liegen bei dieser Drehmomentamplitude in beiden Versuchsreihen sehr dicht beieinander ($MW_{VRK2} = 0,097$ und $MW_{VRK4} = 0,079$). Bei den Drehmomentamplituden 0,071 Nm und 0,105 Nm verschieben sich die Mittelwerte indes hin zu „1 - etwas zu leicht“. So ergibt sich bei einer Amplitude von 0,105 Nm sogar ein positiver Mittelwert, der etwas größer ist als bei 0,091 Nm. Die Standardabweichungen aller drei Mittelwerte werden ebenfalls etwas größer und bewegen sich im Bereich von $SD=1,104$ – $1,242$.

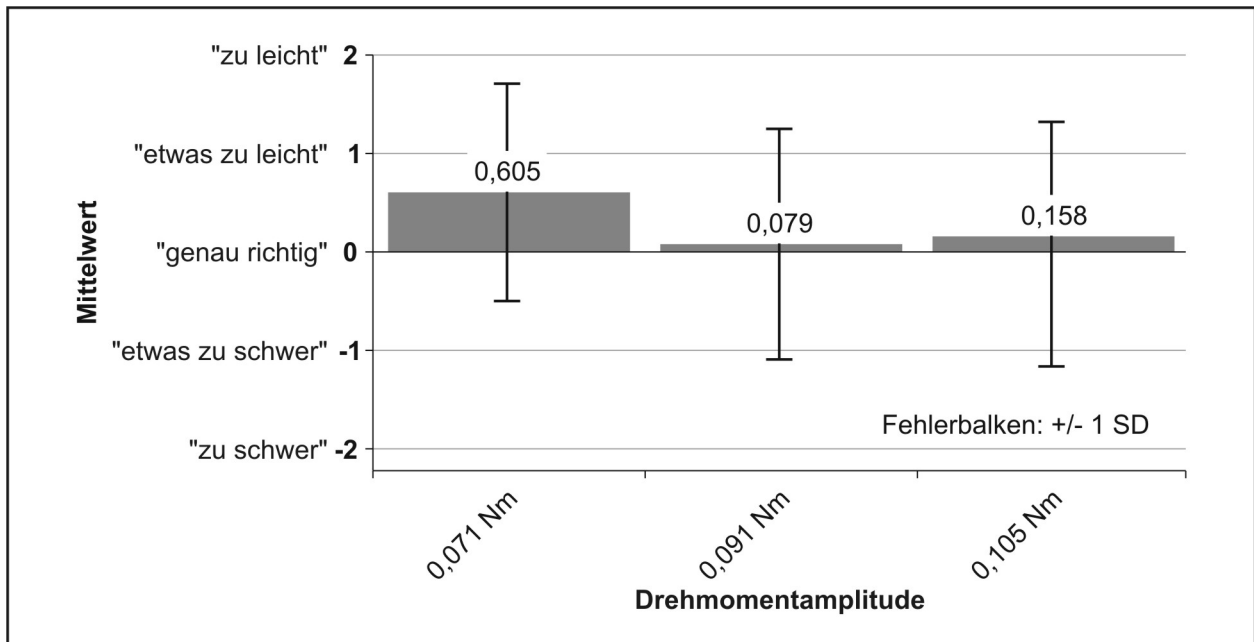


Bild 5.14: Mittelwerte der VRK4 in Abhängigkeit von der Drehmomentamplitude

Die Verschiebung der Mittelwerte und die Vergrößerung der Standardabweichungen in VRK4 resultieren zum einen aus dem kleineren Probandenkollektiv, zum anderen sind sie dem Umstieg auf den Prüfstand mit aktiver Drehmomentenerzeugung zuzuschreiben. Da hier durch die Steuerung die Reibung vollständig ausgeglichen wird, ergibt sich ein geringer aber offensichtlich erkennbarer Unterschied des Stellgefühls.

5.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der Untersuchung zum Komfortempfinden bestätigen, dass es einen Bereich gibt, der als optimal bezeichnet werden kann. Dieser Bereich liegt bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf zwischen 0,071 Nm und 0,105 Nm. Größere Drehmomentamplituden bleiben aber noch bis 0,17 Nm im Bereich zwischen „0 - genau richtig“ und „-1 - etwas zu schwer“ und können demnach noch als akzeptabel bezeichnet werden. Die optimale Drehmomentamplitude ist bei dieser Verlaufsart bei 0,093 Nm zu finden.

Bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf verschiebt sich dieser Bereich etwas in Richtung „1 - etwas zu leicht“, die Ergebnisse müssen aber aufgrund der Ergebnisse aus VRK4 relativiert werden. Aus VRK4 ist ersichtlich, dass beim Prüfstand mit aktiver Drehmomentenerzeugung alle Mittelwerte aufgrund des Reibungsausgleichs in Richtung „zu leicht“ verschoben werden. Demzufolge rücken die Ergebnisse bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf näher zum Optimum „0 - genau richtig“, wenn auch nicht so nah wie die Ergebnisse bei einem flachen sägezahnförmigen Ver-

lauf. Der als optimal ermittelte Bereich für Drehmomentamplituden kann deshalb auch hier angenommen werden.

Wegen den geringen Abweichungen der Ergebnisse bei flachen und steilen sägezahnförmigen Drehmomentverläufen scheint also die Verlaufsart keinen wesentlichen Einfluss auf das Komfortempfinden zu haben. Eine Erweiterung der Untersuchung durch einen sinusförmigen Drehmomentverlauf wurde deshalb nicht durchgeführt.

In der hier durchgeführten Untersuchung konnte ferner festgestellt werden, dass bei kleinen Drehmomentamplituden häufig eine „billige“ Anmutung als Rückmeldung von den Probanden zu verzeichnen war.

Aus der Untersuchung zum Komfortempfinden von Drehmomenten und bei den vorgegebenen Randbedingungen resultiert folgende Empfehlung:

Drehmomentverläufe mit diskreter Eingabeart sollten Drehmomentamplituden im Bereich zwischen 0,07 Nm und 0,1 Nm haben. Größere Amplituden sind bis 0,17 Nm akzeptabel, vor allem dann, wenn anstelle eines flachen ein steiler sägezahnförmiger Drehmomentverlauf verwendet wird.

5.3 Untersuchung zur Unterschiedsschwelle

In der letzten Einzeluntersuchung sollen die Unterschiedsschwellen von Drehmomenten ermittelt werden. Das Ziel dieser Untersuchung ist es, die Wahrnehmungsgrenze von Drehmomenten zu quantifizieren.

5.3.1 Hypothesen

- Die Unterschiedsschwelle bei Drehmomenten hängt von der Skalierungsrichtung, der Verlaufsart und der Eingabeart ab.
- Bei kleinen Drehmomentamplituden muss der Skalierungsfaktor größer sein als bei großen Drehmomentamplituden, um Drehmomentunterschiede wahrnehmbar zu machen.

5.3.2 Versuchsbeschreibung

Die Versuche zur Unterschiedsschwelle finden wie alle folgenden Untersuchungen am aktiven Prüfstand statt. Dadurch ist gewährleistet, dass keine akustischen Signale vom Prüfstand die Messergebnisse beeinflussen. Das Probandenkollektiv ist auch in dieser

Untersuchung heterogen und besteht aus Personen mit den unterschiedlichsten Berufen. Die Versuche finden wie schon zuvor zum einen in Laborumgebung, zum anderen in öffentlich zugänglichen Räumen statt. Desweiteren werden einige Versuche in einem Betrieb für Werkzeugmaschinen durchgeführt, um gezielt handwerklich geschulte Versuchspersonen zu befragen.

In dieser Untersuchung sollen zunächst die Unterschiedsschwellen zweier Verlaufsarten bei diskreter Eingabeart erfasst und miteinander verglichen werden. Danach sollen die daraus erhaltenen Ergebnisse mit denen einer anderen Eingabeart verglichen werden. Als Verlaufsarten bei der diskreten Eingabeart kommen ein steiler und ein flacher sägezahnförmiger Drehmomentverlauf zum Einsatz. Da mit diesen beiden Verlaufsarten eine Grundlage geschaffen wird, um die Ergebnisse verschiedener Verlaufsarten miteinander zu vergleichen, wird auf weitere Verlaufsarten, z.B. einen sinusförmigen Drehmomentverlauf, verzichtet. Als alternative Eingabeart wird ein monostabiler Drehmomentverlauf gewählt.

Die Unterschiedsschwellen werden mit der Konstanzmethode ermittelt. Dazu bewegen die Probanden das Stellteil zunächst bei einem Drehmomentverlauf mit einer Ausgangsdrehmomentamplitude. Die Dauer und Weite dieser Bewegung wird den Probanden selbst überlassen. Erst danach wird die Drehmomentamplitude verändert und der Proband muss über diese Veränderung ein Urteil abgeben. Das Stellteil kann auch bei dem Vergleichsmoment beliebig lang gedreht werden. Das zu vergleichende Drehmoment kann vom Versuchsteilnehmer als „kleiner“, „gleich groß“ oder „größer“ als das Ausgangsdrehmoment eingestuft werden. Es werden absichtlich drei Antwortmöglichkeiten gegeben, um die Probanden nicht zu der Antwort „größer“ oder „kleiner“ zu zwingen und damit falsche Ergebnisse zu erzeugen, wenn die Probanden keinen Unterschied erkennen können.

Die Vergleichsmomente ergeben sich aus einer Skalierung mit stets demselben Skalierungsfaktor des Ausgangsdrehmoments (vgl. Bild 5.15). So entstehen insgesamt acht Vergleichsmomente zu jedem Ausgangsdrehmoment. Die Skalierung basiert auf der Normzahlenreihe R40 [KIENZLE50] (vgl. Kapitel 3.2.3).

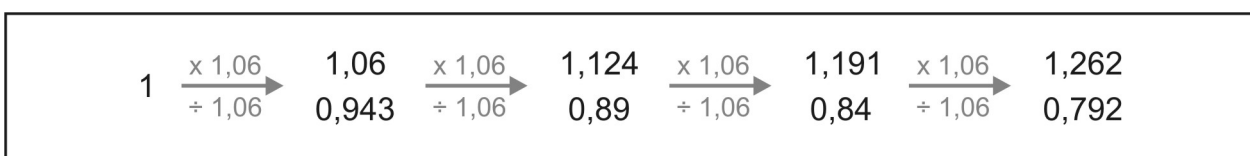


Bild 5.15: Skalierungsfaktoren für die Ausgangsdrehmomentamplituden

Es werden jeweils eine große und eine kleine Drehmomentamplitude als Ausgangspunkt für die monostabile und die beiden diskreten Eingabearten gewählt. Um die Versuche zeitlich zu beschränken, wurden insgesamt sechs Versuchsreihen mit unterschiedlichen Probanden durchgeführt. Zudem wird das Stellteil nur im Uhrzeigersinn bewegt. Wie sich in den vorigen Untersuchungen gezeigt hat, hat diese Einschränkung keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse.

In allen sechs Versuchsreihen werden zunächst die relativen Häufigkeiten der korrekten Antworten in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor dargestellt. Daraus wird die Unterschiedsschwelle, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, bei der Grenze festgelegt, ab der 50% der Antworten zu den Unterschieden korrekt sind. Zur Überprüfung der ersten Hypothese dieser Untersuchung können die Werte der Unterschiedsschwellen der beiden Verlaufsarten und der alternativen Eingabeart miteinander verglichen werden. Neben den relativen Häufigkeiten werden für jeden Probanden psychometrische Funktionen geschätzt. Dazu wird eine logistische Regressionsanalyse durchgeführt. Für diesen Zweck werden alle „gleich“-Antworten durch zufällig gewählte „kleiner“- oder „größer“-Antworten ersetzt. Nur durch diese Art von Daten lassen sich danach Regressionsfunktionen auswählen und berechnen. Die Ergebnisse werden dann in Abhängigkeit von der getesteten Drehmomentamplitude miteinander verglichen. Dabei ist die Steigung der Regressionskurven entscheidend. Sind die Steigungen der kleinen und der großen Drehmomentamplitude signifikant unterschiedlich, so muss davon ausgegangen werden, dass der Skalierungsfaktor für eine Unterschiedserkennung bei unterschiedlichen Ausgangsdrehmomentamplituden voneinander abweicht⁸.

In Vorversuchen konnte bereits ermittelt werden, dass ein Rastwinkel von $\vartheta = 20^\circ$ bei diskreter Eingabeart zu keinen nutzbaren Ergebnissen der Unterschiedsschwelle führt. Die 50%-Grenze wird selbst bei einer Skalierung um den Faktor 1,262 des Ausgangsdrehmoments nur selten erreicht. Aus diesem Grund wird der Rastwinkel in dieser Untersuchung auf $\vartheta = 30^\circ$ festgelegt.

⁸ Eine logistische Regression gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ereignis, in diesem Fall z.B. die Antwort „größer“, eintritt. Gleichzeitig lassen sich die Wahrscheinlichkeiten verschiedener Einflussvariablen, hier z.B. die Drehmomentamplitude, miteinander vergleichen. Da wie schon in der vorangegangenen Untersuchung auch in dieser Untersuchung die Probanden mehr als eine Beurteilung abgeben, handelt es sich bei den Ergebnissen um longitudinale Daten. Für die Berechnung einer solchen logistischen Regressionsanalyse mit gemischten Effekten sei auf [HEDEKER06] verwiesen.

Die Ergebnisse der sechs Versuchsreihen können anhand ihrer untersuchten Teilgebiete teilweise zusammengefasst werden. Aus diesem Grund ist im Folgenden von drei Versuchsreihen mit je zwei Teilreihen die Rede.

Im ersten Teil der Versuchsreihe 1 zur Unterschiedsschwelle (VRU1-A) wird ein flacher sägezahnförmiger Drehmomentverlauf mit einer Drehmomentamplitude von 0,08 Nm als Ausgangsamplitude untersucht. Es nehmen insgesamt 50 Personen an dieser Versuchsreihe teil. Davon sind vier Personen weiblich und 46 Personen männlich. Das Durchschnittsalter dieses Probandenkollektivs beträgt 33,9 Jahre mit einer Standardabweichung SD von 10,6 Jahren.

Im zweiten Teil der Versuchsreihe 1 (VRU1-B) wird die Drehmomentamplitude auf einen Wert von 0,15 Nm geändert. Diese, nach der Untersuchung zum Komfortempfinden bereits sehr große Drehmomentamplitude, wird gewählt, um Einflüsse der Größe der Drehmomentamplitude zu untersuchen. Weisen sowohl die kleine als auch die große Drehmomentamplitude ausreichend gute Ergebnisse bei der Unterscheidung auf, so können durch den Wechsel der Drehmomentamplitude bei sonst gleicher Eingabeart, Verlaufsart und Verlaufsparmater mehr Informationen an den Benutzer übermittelt werden. An VRU1-B nehmen 52 Personen teil. Das Kollektiv setzt sich aus 49 Männern und drei Frauen mit einem durchschnittlichen Alter von 35,7 Jahren (SD = 11,5 Jahre) zusammen.

Als Vergleich zu VRU1 wird in der zweiten Versuchsreihe ein steiler sägezahnförmiger Drehmomentverlauf untersucht. Dazu nehmen im ersten Teil der zweiten Versuchsreihe (VRU2-A) 62 Personen (4 Frauen, 58 Männer) teil. Das Durchschnittsalter liegt bei 33,0 Jahren (SD = 11,2 Jahre). Die Ausgangsdrehmomentamplitude beträgt 0,08 Nm.

Im zweiten Teil dieser Versuchsreihe (VRU2-B) beurteilen 50 Personen den steilen sägezahnförmigen Verlauf bei einem Ausgangsdrehmoment von 0,15 Nm. Das Probandenkollektiv setzt sich aus 48 Männern und zwei Frauen mit einem Durchschnittsalter von 34,7 Jahren (SD = 11,3 Jahre) zusammen.

In der dritten Versuchsreihe wird eine monostabile Eingabeart gewählt. Da es bei dieser Eingabeart keine Rastposition gibt, muss der Drehknopf um einen vorgegebenen Winkel bewegt werden, um bei allen Versuchsteilnehmern dasselbe maximale Drehmoment zu erreichen. Das Stellteil wird dazu mit einem Zeiger versehen und auf der Frontplatte des Prüfstands wird eine Markierung für die Endposition aufgebracht. Dadurch ist keine Blindbetätigung mehr möglich, aber es ist gewährleistet, dass bei allen Probanden dieselben Versuchsbedingungen herrschen. Als maximaler Drehwinkel wird $\vartheta = 40^\circ$ im

Uhrzeigersinn gewählt. Nach DIN EN 894-3 ist bei diesem Drehwinkel ein bequemes Einstellen gewährleistet.

Im ersten Teil der dritten Versuchsreihe beträgt das Ausgangsdrehmoment an der Endposition 0,1 Nm. Es wird mit Absicht nicht das in den zuvor durchgeführten Versuchen minimale Drehmoment von 0,08 Nm gewählt, da auch hier in Vorversuchen keine akzeptable Unterschiedserkennung festgestellt werden konnte. Am ersten Teil dieser Versuchsreihe (VRU3-A) nehmen 14 Probanden teil. Dieser Teilversuch wird absichtlich klein gehalten, da durch das veränderte Ausgangsdrehmoment an der Endposition schwer zu vergleichende Ergebnisse zu erwarten sind. Aus demselben Grund wird in diesem Teilversuch der Versuchsort nicht variiert, sondern es wird nur in Laborumgebung gearbeitet. Dennoch sollen die Ergebnisse als Vergleich zu den anderen Ergebnissen dargestellt werden. Das Probandenkollektiv besteht ausschließlich aus männlichen Versuchsteilnehmern. Das durchschnittliche Alter beträgt 27,9 Jahre (SD = 5,4 Jahre).

Im zweiten Teil der letzten Versuchsreihe (VRU3-B) wird das Ausgangsdrehmoment in der Endposition auf 0,15 Nm erhöht. Dadurch ist eine Vergleichbarkeit mit den Versuchsreihen VRU1 und VRU2 gegeben. An diesem Versuch nehmen 55 Personen (41 Männer, 14 Frauen) teil, deren Durchschnittsalter 41,9 Jahre (SD = 13,3 Jahre) beträgt.

In Tabelle 5.3 sind die wichtigsten Versuchsdaten für jeden der drei Teilversuche zusammengefasst.

Versuchsreihe	VRU1-A	VRU1-B	VRU2-A	VRU2-B	VRU3-A	VRU3-B
Eingabeart	diskret	diskret	diskret	diskret	mono-stabil	mono-stabil
Verlaufsart	FSZ	FSZ	SSZ	SSZ	Linear	Linear
Ausgangs-amplitude	0,08 Nm	0,15 Nm	0,08 Nm	0,15 Nm	0,10 Nm	0,15 Nm
Skalierungs-faktoren	0,792 / 0,84 / 0,89 / 0,943 / 1,06 / 1,124 / 1,191 / 1,262					

Tabelle 5.3: Versuchsdaten aller Versuchsreihen zur Unterschiedsschwelle

5.3.3 Versuchsergebnisse

In Bild 5.16 sind die relativen Häufigkeiten der korrekten Antworten für einen flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf abgebildet. Betrachtet man die Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,08 Nm bei einer Verkleinerung, so wird die Grenze, ab der

50% der Antworten diese Verkleinerung bestätigen, bei einem Skalierungsfaktor von ca. 0,91 der Ausgangsdrehmomentamplitude erreicht. Bei einer Vergrößerung dieser Drehmomentamplitude beträgt der Faktor ca. 1,14.

Um die Skalierungsfaktoren bei einer Verkleinerung mit denen bei Vergrößerung der Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,08 Nm miteinander vergleichbar zu machen, muss der reziproke Wert des Skalierungsfaktors bei Verkleinerung gebildet werden. Dieser beträgt ca. 1,10 und liegt damit sehr nah zum Skalierungsfaktor bei einer Vergrößerung dieser Drehmomentamplitude. Die relativen Häufigkeiten korrekter Antworten liegen bei maximaler Verkleinerung und maximaler Vergrößerung der oben genannten Ausgangsamplitude mit Werten von 78,0% bzw. 72,0% ebenfalls sehr nah beieinander. Würde man somit eine Näherungskurve der korrekten Antworten mit den reziproken Skalierungsfaktoren für die Verkleinerung in Bild 5.16 eintragen, so würde diese nahezu mit der Näherungskurve für eine Vergrößerung übereinstimmen.

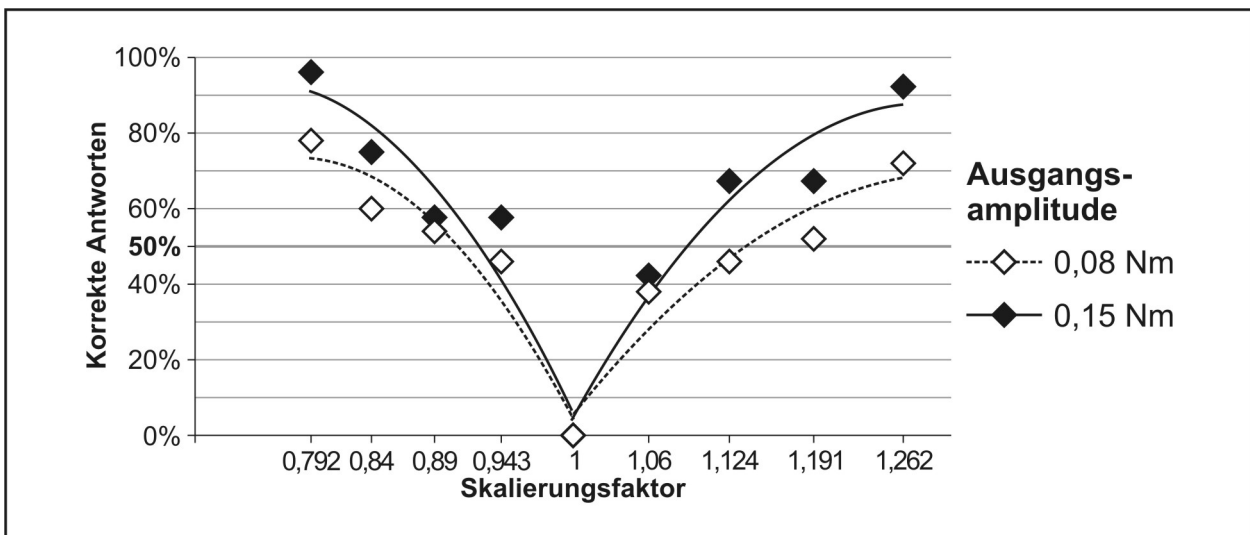


Bild 5.16: Relative Häufigkeiten der korrekten Antworten bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf

Verglichen mit einer Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,08 Nm werden sowohl bei einer Verkleinerung als auch bei einer Vergrößerung einer Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,15 Nm die 50%-Grenzen etwas früher erreicht. So beträgt der Skalierungsfaktor bei einer Verkleinerung der Drehmomentamplitude von 0,15 Nm ca. 0,93, bei einer Vergrößerung beträgt er ca. 1,09 (vgl. Bild 5.16). Bildet man auch hier den Kehrwert des Skalierungsfaktors für die 50%-Grenze bei einer Verkleinerung der Drehmomentamplitude, so erhält man einen Wert von 1,08, der beinahe dem einer Vergrößerung entspricht.

Auch die maximale Anzahl der korrekten Antworten bei maximaler Vergrößerung und Verkleinerung der Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,15 Nm ähneln sich. Die Werte liegen bei 92,3% bzw. 96,2%. Somit muss auch hier davon ausgegangen werden, dass sich die Erkenntnisse, die aus den Näherungskurven für Verkleinerung und Vergrößerung gewonnen werden können, weitestgehend entsprechen.

Den Skalierungsfaktoren bei der Grenze von 50% der korrekten Antworten zufolge unterscheiden sich die Unterschiedsschwellen bei der kleinen und der großen Ausgangsdrehmomentamplitude kaum. In Bild 5.16 ist aber bereits erkenntlich, dass sich die Näherungskurven der korrekten Antworten bei einer weiteren Verkleinerung bzw. Vergrößerung immer weiter voneinander entfernen.

Um nachzuweisen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Ausgangsamplituden gibt, werden psychometrische Funktionen mittels logistischer Regressionsanalyse geschätzt. Dazu wird ein Regressionsmodell untersucht, in das die Drehmomentamplitude als Steigung der Regressionskurve eingeht. Analysiert wird, ob sich die Steigungen der Regressionskurven bei unterschiedlicher Ausgangsdrehmomentamplitude unterscheiden. Für diesen Zweck muss vorab überprüft werden, ob ein linearer Trend bezüglich der Skalierungsfaktoren besteht.

Der Vergleich mit einem saturierten Modell zeigt, dass ein Regressionsmodell mit linearem Trend nicht falsifiziert werden kann ($p = 0,4746$). Die im Anschluss daran durchgeführte Analyse der Steigungen bei verschiedenen Ausgangsdrehmomentamplituden ergibt einen hoch signifikanten Einfluss der Ausgangsamplitude auf die zu erwartenden Antworten ($p < 0,001$). Anhand dieses Ergebnisses und der zuvor durchgeführten Darstellung der relativen Häufigkeiten der korrekten Antworten sind demnach bei einer Ausgangsamplitude von 0,15 Nm bei jedem Skalierungsfaktor mehr korrekte Antworten zu erwarten als dies bei einer Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,08 Nm der Fall ist.

Bild 5.17 zeigt die psychometrischen Funktionen, die sich aus dieser Analyse ergeben. Die psychometrischen Funktionen geben die berechneten Wahrscheinlichkeiten wieder, mit der in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor der Ausgangsdrehmomentamplitude die Antwort „größer“ zu erwarten ist. Zusätzlich zu den Funktionen sind die Datenpunkte, aus denen die psychometrischen Funktionen ermittelt werden, abgebildet. Anhand des Vergleichs der psychometrischen Funktion bei einer Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,15 Nm mit der psychometrischen Funktion bei 0,08 Nm ist ebenfalls der unter-

schiedlich steile Kurvenverlauf ersichtlich. Die Steigung der Funktionen ist dabei ein Maß, wie schnell eine korrekte Unterschiedserkennung von einem von der Ausgangsamplitude abweichendem Drehmoment zu erwarten ist. Je steiler dabei eine Funktion ist, umso eher ist mit korrekten Antworten zu rechnen, wie dies bei der Funktion mit 0,15 Nm Ausgangsdrehmoment der Fall ist.

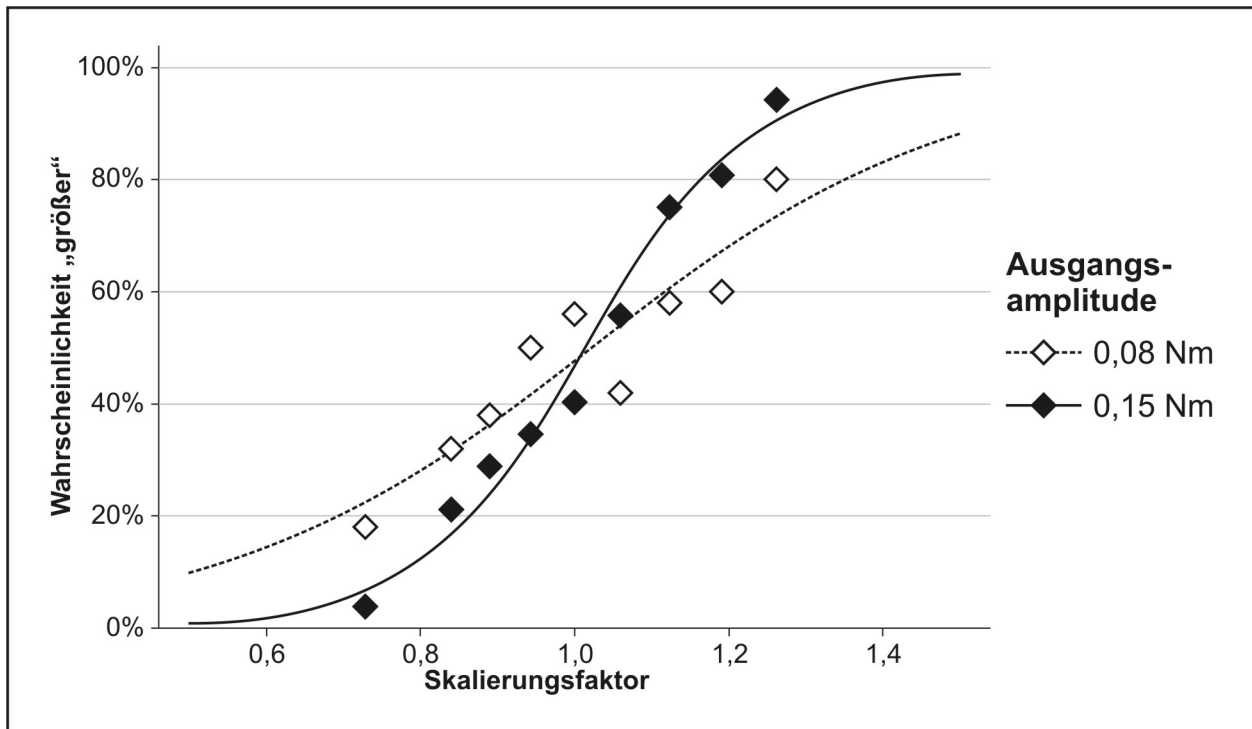


Bild 5.17: Psychometrische Funktionen für die Wahrscheinlichkeit der Antwort „größer“ in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf

Die Auswertung der Unterschiedserkennung bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf ergibt ein ähnliches Bild wie zuvor bei dem flachen sägezahnförmigen Verlauf. Die relativen Häufigkeiten der richtigen Antworten sind in Bild 5.18 dargestellt. Die Skalierungsfaktoren, bei denen die 50%-Grenze der korrekten Antworten erreicht wird, liegen sehr nah zu denen bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf. Bei der kleinen Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,08 Nm wird diese Grenze bei einem Skalierungsfaktor von 0,88 bei Verkleinerung und von 1,14 bei Vergrößerung der Amplitude erreicht. Bildet man hier den Kehrwert des Skalierungsfaktors bei Verkleinerung, um ihn mit dem Skalierungsfaktor bei Vergrößerung vergleichen zu können, erhält man exakt denselben Wert von 1,14. Auch die relative Häufigkeit der korrekten Antworten bei der Vergrößerung der Ausgangsamplitude um den größten

Skalierungsfaktor entspricht mit einem Wert von 54,8% exakt dem bei Verkleinerung der Drehmomentamplitude um den kleinsten Skalierungsfaktor.

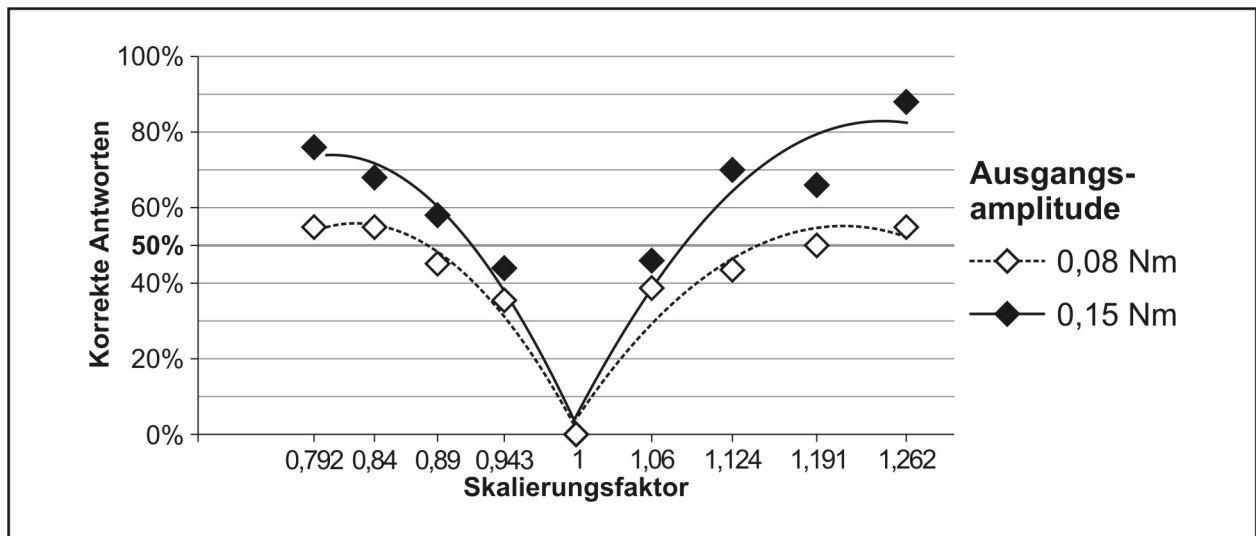


Bild 5.18: Relative Häufigkeiten der korrekten Antworten bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf

Die Skalierungsfaktoren betragen bei einer Verkleinerung der Amplitude 0,92 und bei einer Vergrößerung 1,09, um bei einer Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,15 Nm die Grenze von 50% der korrekten Antworten zu erreichen. Der reziproke Wert des Skalierungsfaktors bei Verkleinerung beträgt 1,09 und entspricht damit dem bei Vergrößerung der Amplitude. Beim Vergleich der korrekten Antworten bei den größten untersuchten Skalierungsfaktoren lassen sich bei dieser Ausgangsamplitude Unterschiede feststellen. So beträgt die relative Häufigkeit korrekter Antworten bei Vergrößerung der Drehmomentamplitude 88,0%, bei einer Verkleinerung sind es hingegen nur 76%. Die restlichen Werte beider Näherungskurven stimmen weitestgehend miteinander überein. Da sich die Näherungskurven auch schon bei einer Ausgangsamplitude von 0,08 Nm sehr stark ähneln, kann davon ausgegangen werden, dass die Skalierungsrichtung keine Rolle bei der Unterschiedserkennung bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf spielt.

Wie schon in VRU1 weichen die relativen Häufigkeiten der korrekten Antworten bei unterschiedlichen Ausgangsdrehmomentamplituden auch bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf voneinander ab. Auch hier werden deshalb psychometrische Funktionen mit einer logistischen Regressionsanalyse geschätzt, um zu überprüfen, ob sich ein Einfluss der Ausgangsdrehmomentamplitude auf die zu erwartenden Antworten der Versuchsteilnehmer nachweisen lässt. Zunächst wird des-

halb wieder überprüft, ob ein linearer Trend bezüglich der Skalierungsfaktoren besteht. Auch hier zeigt der Vergleich mit einem saturierten Modell, dass ein Regressionsmodell mit linearem Trend nicht falsifiziert werden kann ($p = 0,824$). Wie schon beim flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf ergibt die Analyse der Steigungen bei verschiedenen Ausgangsdrehmomentamplituden auch beim steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf einen hoch signifikanten Einfluss der Amplitude auf die zu erwartenden Antworten ($p < 0,001$). Die aus der Analyse erhaltenen psychometrischen Funktionen sind in Bild 5.19 grafisch dargestellt.

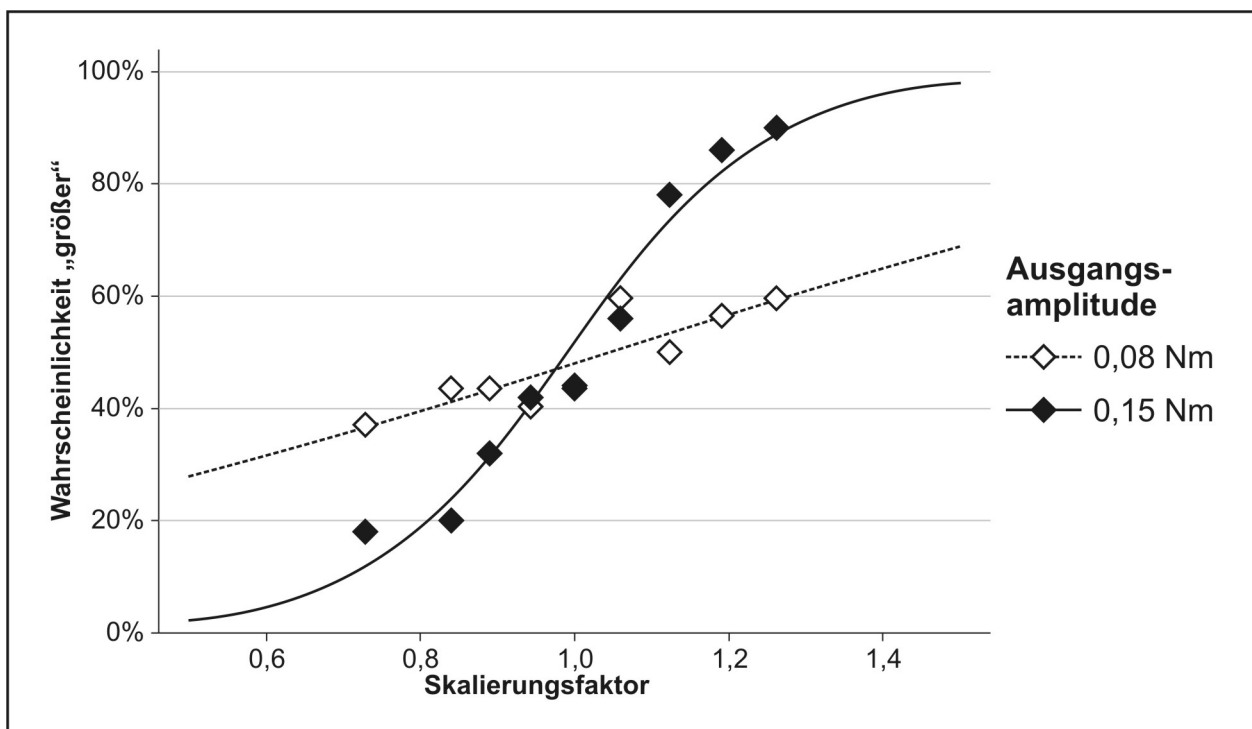


Bild 5.19: Psychometrische Funktionen für die Wahrscheinlichkeit der Antwort „größer“ in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf

Der Grafik zufolge ist bei einer Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,08 Nm die Wahrscheinlichkeit für die Antwort „größer“ bei Skalierungsfaktoren größer als eins deutlich kleiner und bei Faktoren kleiner als eins deutlich größer als bei einer Ausgangsamplitude von 0,15 Nm. Bei der kleinen Ausgangsamplitude von 0,08 Nm ist demnach für jede Skalierungsrichtung mit weniger korrekten Antworten zu rechnen als bei der großen Ausgangsamplitude von 0,15 Nm.

Bei den Versuchsergebnissen der VRU3 mit monostabiler Eingabeart unterscheidet sich die Verteilung der relativen Häufigkeit verglichen mit den beiden vorherigen Ver-

suchsreihen. Die Näherungskurven bei einem maximalen Drehmoment von 0,10 Nm und 0,15 Nm liegen sowohl bei einer Vergrößerung als auch bei einer Verkleinerung sehr nah beieinander. Dies zeigt sich auch bei den Skalierungsfaktoren, ab denen die Hälfte der Antworten richtig gegeben wird. Die Werte der Skalierungsfaktoren liegen bei einer Verkleinerung der Ausgangsamplitude von 0,10 Nm bei 0,88 und bei einer Vergrößerung bei 1,09. Bei einer Ausgangsamplitude von 0,15 Nm betragen die Skalierungsfaktoren 0,89 bei Verkleinerung und 1,10 bei Vergrößerung, um 50% richtige Antworten zu erhalten. Bei der maximalen Vergrößerung der Ausgangsamplitude von 0,15 Nm um den Faktor 1,262 werden annähernd ähnlich viele korrekte Antworten gemacht (76,4%) wie bei einer Ausgangsamplitude von 0,10 Nm (78,6%). Bei Verkleinerung der Ausgangsamplituden weichen die Näherungskurven der korrekten Antworten erst bei den kleinsten Skalierungsfaktoren voneinander ab. Bei einer Ausgangsamplitude von 0,10 Nm werden hier 78,6% richtige Antworten gegeben, bei einer Ausgangsamplitude von 0,15 Nm sind es 60,0%. In Bild 5.20 sind die eben beschriebenen Näherungskurven sowie die relative Häufigkeit der korrekten Antworten dargestellt.

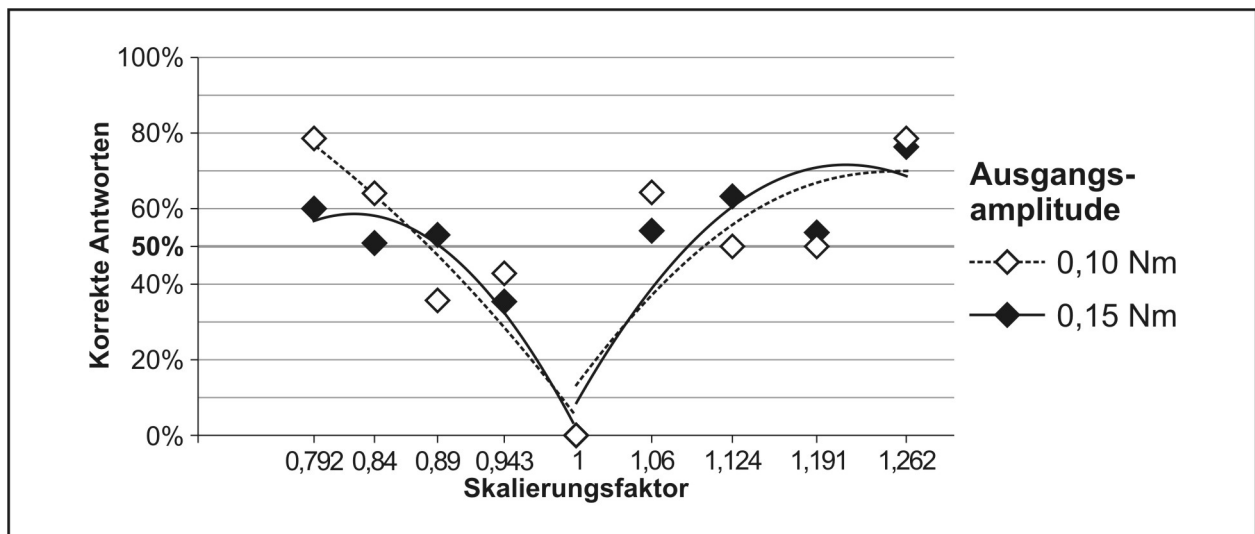


Bild 5.20: Relative Häufigkeiten der korrekten Antworten bei einem linear ansteigendem Drehmomentverlauf bei monostabiler Eingabeart

Der oben aufgeführten Analyse zufolge hängen die erkannten Unterschiede nicht mit dem maximalen Drehmoment bei einer monostabilen Eingabeart zusammen. Dennoch sollen auch bei dieser Versuchsreihe die psychometrischen Funktionen mit einer logistischen Regressionsanalyse geschätzt werden. Bei dem Test, ob ein linearer Trend bezogen auf die Skalierungsfaktoren besteht, kann hier abermals ein Regressionsmodell mit einem linearen Trend im Vergleich mit einem saturierten Modell nicht falsifiziert werden ($p = 0,2143$). Wie erwartet, zeigt die darauffolgende Analyse jedoch keinen

signifikanten Unterschied beim Vergleich der Steigungen der psychometrischen Funktionen für beide Ausgangsamplituden ($p = 0,5128$). Bei einer monostabilen Eingabeart ist demnach nicht mit unterschiedlichen Ergebnissen bei verschiedenen Ausgangsdrehmomentamplituden zu rechnen. Stellt man auch hier die psychometrischen Funktionen der zu erwartenden Wahrscheinlichkeit für die Antwort „größer“ für beide Ausgangsamplituden grafisch dar, so ergibt sich Bild 5.21. Zum einen ist daraus die Ähnlichkeit beider Funktionskurven ersichtlich. Zum anderen kann bei einer Ausgangsamplitude von 0,10 Nm aber auch die teils sehr hohe Abweichung der Datenpunkte von der Funktionskurve festgestellt werden. Die hohe Abweichung kann von der geringen Anzahl der Versuchsteilnehmerzahl herrühren. Die Ergebnisse, die sich aus der logistischen Regressionsanalyse der VRU3 ergeben, müssen deshalb und wegen der zu VRU1 und VRU2 abweichenden kleinen Ausgangsamplitude kritisch betrachtet werden.

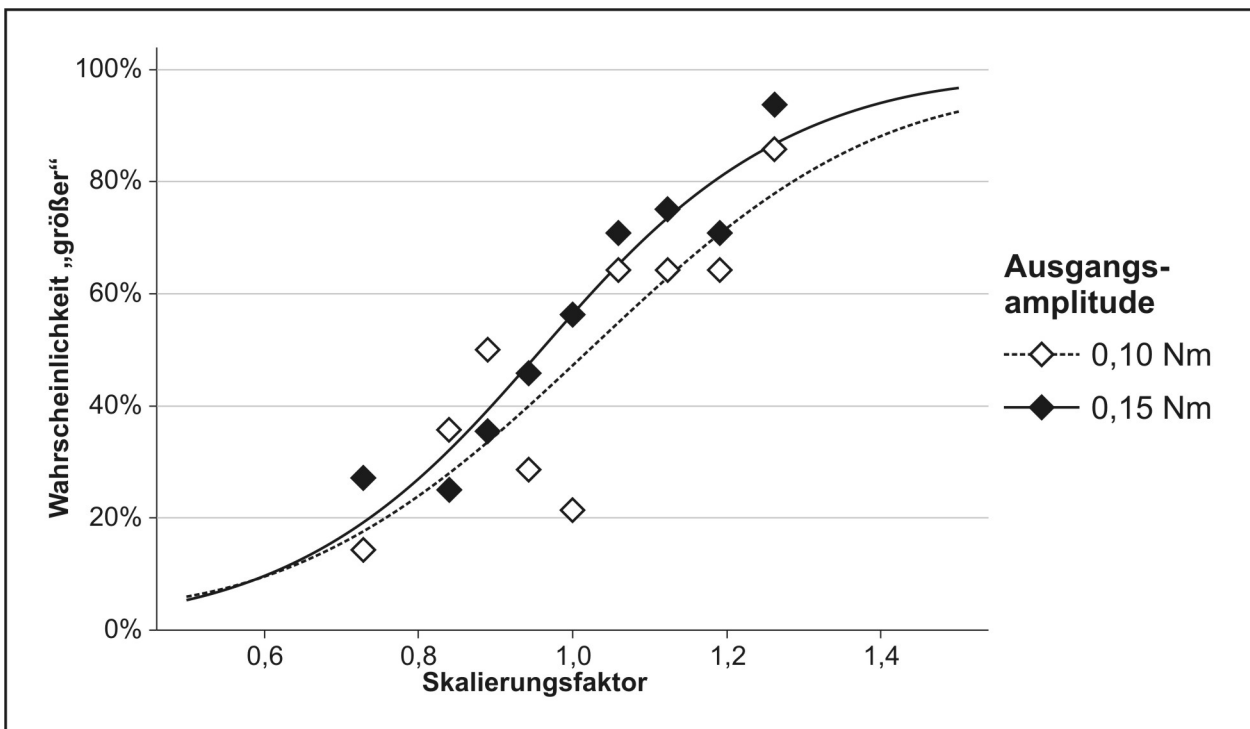


Bild 5.21: Regressionskurven für die Wahrscheinlichkeit der Antwort „größer“ in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor bei einem linear ansteigendem Drehmomentverlauf bei monostabiler Eingabeart

5.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der Untersuchung zur Unterschiedsschwelle lassen sich bei keiner der Versuchsreihen Einflüsse von der Skalierungsrichtung der Ausgangsamplitude auf die Unterschiedsschwelle feststellen. Bei jeder Ausgangsamplitude liegen die Skalierungsfaktoren bei Vergrößerung sehr nah an den reziproken Skalierungsfaktoren bei

Verkleinerung, teilweise stimmen sie exakt überein. Dies ist insbesondere an der Grenze der Fall, ab der 50% der Antworten korrekt sind. Die Skalierungsfaktoren für diese Grenze sind für alle drei Versuchsreihen in Tabelle 5.4 nochmals aufgelistet. Es zeigt sich, dass ein maximaler Skalierungsfaktor von 1,14 benötigt wird, um die 50% Grenze zu erreichen. Dieser Wert trifft sowohl bei einem flachen als auch bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf mit einer Ausgangsamplitude von 0,08 Nm zu. Der kleinste Skalierungsfaktor mit einem Wert von 1,08 tritt hingegen bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf mit einer Ausgangsamplitude von 0,15 Nm auf.

Aus Tabelle 5.4 ist auch ersichtlich, dass sich die Skalierungsfaktoren von flachen und steilen sägezahnförmigen Drehmomentverläufen bei denselben Ausgangsamplituden ebenfalls sehr stark ähneln. Bei diesen zwei Verlaufsarten ist demnach bis zur 50%-Grenze ebenfalls kein Unterschied erkennbar.

Eingabeart	Verlaufsart	Ausgangsamplitude	Verkleinerungsfaktor für 50% korrekte Antworten (reziproker Wert)	Vergrößerungsfaktor für 50% korrekte Antworten
diskret	FSZ	0,08 Nm	0,91 (1,10)	1,14
diskret	FSZ	0,15 Nm	0,93 (1,08)	1,09
diskret	SSZ	0,08 Nm	0,88 (1,14)	1,14
diskret	SSZ	0,15 Nm	0,92 (1,09)	1,09
monostabil	Linear	0,10 Nm	0,88 (1,14)	1,09
monostabil	Linear	0,15 Nm	0,89 (1,12)	1,10

Tabelle 5.4: Versuchsergebnisse aller Versuchsreihen zur Unterschiedsschwelle

Vergleicht man die relativen Häufigkeiten korrekter Antworten eines flachen und steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlaufs bei den größten und kleinsten Skalierungsfaktoren ($SF = 1,262$ und $SF = 0,792$), zeigen sich höhere Werte bei einem flachen Verlauf. Es ist also ein Einfluss der Verlaufsart auf die Unterschiedserkennung besonders bei großen Skalierungen anzunehmen. Demzufolge ermöglicht der flache sägezahnförmige Drehmomentverlauf eine besonders hohe Unterschiedserkennung bei einer Skalierung der Ausgangsdrehmomentamplitude um die Faktoren 0,792 und 1,262. Bei einer monostabilen Eingabeart mit linearem Drehmomentverlauf weichen die Ergebnisse von denen bei diskreter Eingabeart etwas ab. So wird die 50%-Grenze bei monostabiler Eingabeart und einer Ausgangsamplitude von 0,15 Nm erst durch eine stärkere Skalierung erreicht. Diese Aussage wird durch die Anzahl korrekter Antworten

bei dem größten und kleinsten Skalierungsfaktor bekräftigt, die vor allem bei der großen Ausgangsamplitude von 0,15 Nm niedriger liegen als bei den Drehmomentverläufen mit vergleichbaren Ausgangsamplituden der Versuchsreihen VRU1 und VRU2. Die Eingabeart ist also als Einflussfaktor auf die Unterschiedserkennung anzusehen.

Durch die Schätzung von psychometrischen Funktionen mit einer logistischen Regressionsanalyse kann ferner festgestellt werden, dass die Ausgangsamplitude bei den Versuchsreihen mit diskreter Eingabeart einen Einfluss auf die zu erwartende Unterschiedserkennung hat. So sind bei größeren Ausgangsamplituden stets mehr korrekte Antworten zu erwarten als bei einer kleineren Ausgangsamplitude. Dieser Effekt lässt sich ansatzweise bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf bereits bei der Grenze erkennen, ab der 50% der Antworten korrekt sind. Deutlich wird er aber vor allem bei den größten untersuchten Skalierungsfaktoren sowohl bei einem flachen als auch einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf. Bei einer monostabilen Eingabeart tritt dieser Effekt hingegen nicht ein.

Als Resultat dieser Untersuchung und bei den vorgegebenen Randbedingungen ergeben sich die folgenden Empfehlungen:

Um 50% richtige Aussagen zu Unterschieden bei zwei von der Art her gleichen Drehmomentverläufen zu erhalten, muss sich deren Drehmomentamplitude mindestens um den Faktor 1,14 unterscheiden. Bei einer Verkleinerung der Ausgangsdrehmomentamplitude muss der reziproke Wert dieses Skalierungsfaktors genommen werden.

Je größer die Ausgangsdrehmomentamplitude ist, umso stärker erhöht sich die Anzahl korrekter Antworten. Dieser Effekt tritt vor allem bei großen Skalierungsfaktoren auf. Um die Erkennung von Unterschieden zwischen dem Ausgangs- und Vergleichsdrehmoment zu erleichtern, empfiehlt sich daher ein hohes Ausgangsdrehmoment von 0,15 Nm. Dies gilt vor allem für einen steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf.

Eine monostabile Eingabeart ist für die unterschiedliche Darstellung von Informationen durch eine Variation der Drehmomentamplitude wegen der niedrigen Erkennungsraten, selbst bei großen Skalierungen der Ausgangsamplitude, nicht zu empfehlen.

6 Kombinierte Untersuchungen

In der folgenden Untersuchung soll der Einfluss nicht konstanter Drehmomentamplituden auf die Stellgenauigkeit und die Unterschiedserkennung untersucht werden. Um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen, sollen die Versuche bei dem ungünstigen Fall eines sehr kurzen Betätigungsweges durchgeführt werden. Die Nähe dieser Versuche zu realen Stellteilen, die an eine Mechanik gebunden sind, wird durch die Variation der Reibung im Stellteilsystem gewährleistet.

6.1 Hypothesen

- Bei großen Sprüngen der Drehmomentamplitude steigt die Unterschiedserkennung, die Stellgenauigkeit hingegen sinkt.
- Die Einflussgröße einer nicht konstanten Drehmomentamplitude auf die Unterschiedserkennung und die Stellgenauigkeit hängt von der Verlaufsart und der Amplitudenreihenfolge ab.
- Ein mit Reibung behaftetes Stellteil erfüllt die Erwartungen des Benutzers mehr als ein reibungsfreies Stellteil und erhöht die Stellgenauigkeit.

6.2 Versuchsbeschreibung

Die Ergebnisse der kombinierten Untersuchung zur Stellgenauigkeit und Unterschiedserkennung sollen allgemeingültig sein und sich gut auf einen anwendungsorientierten Einsatz eines adaptiven multifunktionalen Drehstellers übertragen lassen. Aus diesem Grund finden die Versuche vorwiegend außerhalb der Laborumgebung statt. Das Probandenkollektiv wird dazu möglichst heterogen gewählt. Um die Versuchsdauer trotz der großen Menge variierter Parameter in einem akzeptablen Rahmen zu halten und so ausreichend viele Probanden befragen zu können, wird die Aufgabenanzahl pro Versuchsteilnehmer stark gekürzt.

Die Aufgabe der Versuchsteilnehmer in dieser Untersuchung ist es, einen Drehknopf mit diskreter Eingabeart um zwei Rastpositionen im Uhrzeigersinn zu drehen. Dabei unterscheiden sich die Drehmomentamplituden der beiden Rastungen. Bei der Untersuchung wird aufgezeichnet, ob die geforderten zwei Rastungen gestellt werden und ob der Proband einen Unterschied zwischen den Drehmomentamplituden beider Rastungen erkennen kann. Dazu muss der Proband angeben, für welche der beiden Rastungen er mehr Kraft benötigt hat. Kann der Proband keinen Unterschied erkennen,

wird die Angabe als „falsch“ gewertet. Da die Aussagen zur Erkennungsrate bei falscher Endposition in Frage gestellt werden müssen, werden die Ergebnisse sowohl mit als auch ohne diese Aussagen ausgewertet. Danach kann beurteilt werden, ob trotz einer falschen Positionierung die Unterschiede der Drehmomentamplituden richtig erkannt werden. Als Ergebnis erhält man zum einen die relative Häufigkeit der Positionierfehler, zum anderen die relative Häufigkeit richtig erkannter Unterschiede. Die Stellgenauigkeit und die Erkennungsrate lassen sich grafisch als Abszisse und Ordinate in einem Diagramm darstellen (vgl. Bild 6.1). Der sich aus diesem Wertepaar ergebende Radius wird als Bewertungskennzahl für Amplitudenkombinationen BAK (nicht normiert) definiert.

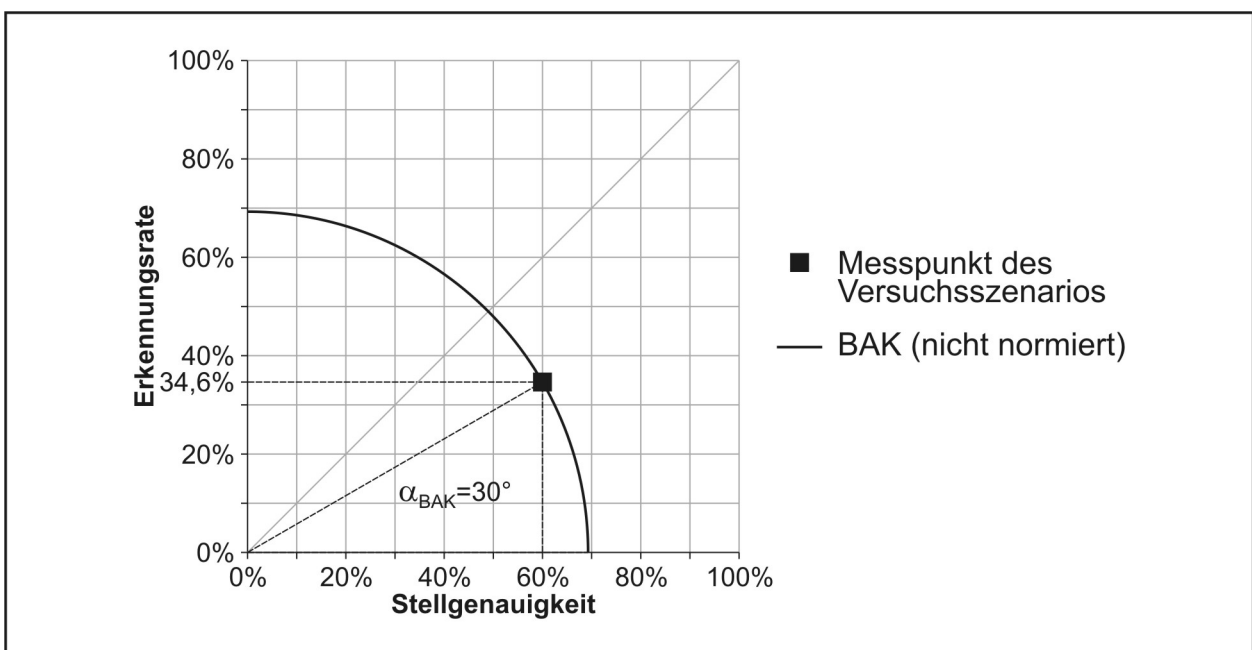


Bild 6.1: Beispiel einer grafischen Darstellung der kombinierten Auswertung der Erkennungsrate und der Stellgenauigkeit

Für eine erweiterte Analyse der Versuchsdaten muss diese Kennzahl normiert werden, wie in Gleichung 6.1 dargestellt. Die BAK berechnet sich aus dem quadratischen Mittel der Erkennungsrate ER und der Stellgenauigkeit SG.

$$BAK = \sqrt{\frac{SG^2 + ER^2}{2}} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

Durch die Verwendung des quadratischen Mittels und dessen Normierung lassen sich die verschiedenen Versuchsszenarien quantitativ auf einer festen Skala von 0–100% in eine Rangfolge bringen und damit beurteilen.

Da die Bewertungskennzahl das Verhältnis der Stellgenauigkeit zur Erkennungsrate nicht mehr erkennen lässt, wird zusätzlich der Winkel der Bewertungskennzahl α_{BAK}

eingeführt (vgl. Gleichung 6.2). Dadurch wird die Lage in einem zweidimensionalen Achsensystem aus der Stellgenauigkeit und der Erkennungsrate sichtbar gemacht. Liegt α_{BAK} in einem Bereich über 45° , so überwiegt die Erkennungsrate. Bei einem Winkel kleiner als 45° überwiegt hingegen die Stellgenauigkeit.

$$\alpha_{BAK} = \arctan\left(\frac{ER}{SG}\right) \quad (6.2)$$

Eine optimale Kombination von Drehmomentamplituden lässt sich durch eine hohe Bewertungskennzahl und einen Bewertungswinkel nahe 45° erkennen.

In der Untersuchung werden insgesamt sechs verschiedene Amplitudenkombinationen analysiert (vgl. Tabelle 6.1). Dabei ist der kleinste Skalierungsfaktor einer Kombination mit einem Wert von 1,20 so gewählt, dass nach den Ergebnissen aus Kapitel 5.3 der Unterschied der Drehmomentamplituden in mehr als 50% der Fälle richtig erkannt werden sollte. Die Drehmomentamplituden der Kombinationen liegen zwischen 0,08–0,15 Nm. Damit ist sichergestellt, dass Positionierfehler nicht aufgrund einer zu kleinen Drehmomentamplitude entstehen und selbst die größte Drehmomentamplitude in einem für die Komforteinstufung akzeptablen Bereich liegt. Beide Reihenfolgen einer Amplitudenkombination werden untersucht.

Skalierungsfaktor SF	1,20	1,25	1,25	1,50	1,50	1,875
Amplitudenkombination A_0 / A_1 [Nm / Nm]	0,10 / 0,12	0,08 / 0,10	0,12 / 0,15	0,08 / 0,12	0,10 / 0,15	0,08 / 0,15

Tabelle 6.1: Untersuchte Amplitudenkombinationen

Neben einem flachen und steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf wird auch ein sinusförmiger Verlauf untersucht. Dabei wird der Rastwinkel als Kompromiss zwischen optimaler Erkennungsrate, die einen möglichst großen Rastwinkel verlangt (vgl. Kapitel 5.3) und optimaler Anwendbarkeit, die für die Übertragung vieler Informationen ohne zu häufiges Umgreifen möglichst viele Rastungen mit kleinen Rastwinkeln verlangt, auf 24° festgelegt.

In Vorversuchen zeigt sich, dass die Stellgenauigkeit sowie die Erkennungsrate zweier unterschiedlicher Drehmomentamplituden bei einem Drehmomentverlauf ohne Reibungsversatz, verglichen mit den Ergebnissen der zuvor durchgeführten Untersuchungen, sinken. Aus diesem Grund wird der Reibungsausgleich in dieser Untersuchung in drei Schritten variiert (vgl. Bild 6.2). Zunächst wird trotz der sich an-

deutenden Verschlechterung der Stellgenauigkeit und der Erkennungsrate ein Drehmomentverlauf ohne Reibungsversatz untersucht. Dazu wird die gesamte Reibung, die im Prüfstand mit aktiver Drehmomenterzeugung herrscht, durch einen Reibungsausgleich von 0,028 Nm beseitigt (vgl. Bild 6.2, Verlauf 1). Darüber hinaus werden alle Amplitudenkombinationen komplett ohne Reibungsausgleich (vgl. Bild 6.2, Verlauf 3) sowie mit einem mittleren gewählten Reibungsausgleich von 0,01 Nm (vgl. Bild 6.2, Verlauf 2) untersucht.

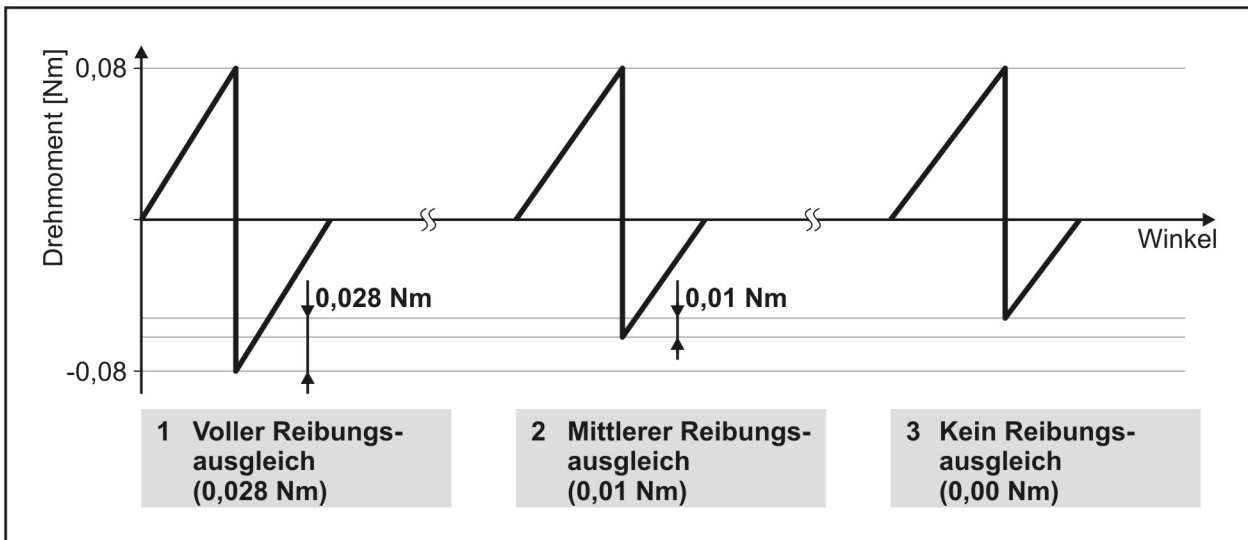


Bild 6.2: Variierter Reibungsausgleich am Beispiel jeweils einer Rastung eines flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlaufs mit einer positiven Drehmomentamplitude von 0,08 Nm

Der letzte Wert des Reibungsausgleichs dient zur Überprüfung, inwieweit sich bereits ein geringes Reibmoment auf die Ergebnisse der Stellgenauigkeit und Unterschiedserkennung auswirken und ob sich, verglichen mit den Ergebnissen ohne Reibungsausgleich, deutliche Unterschiede ergeben. In allen drei Fällen bleibt das im Diagramm positiv eingezeichnete maximale Drehmoment, das dem Drehmoment des Benutzers entgegenwirkt, unverändert. Nur das negative maximale Drehmoment wird verändert. Durch diese Vorgehensweise ist sichergestellt, dass die Erkennungsrate nicht durch unterschiedliche Drehmomentamplituden, die vom Benutzer aufzubringen sind, beeinflusst wird.

Die Drehmomentverläufe sind so angelegt, dass auf zwei kleine Drehmomentamplituden jeweils eine große Amplitude folgt (vgl. Bild 6.3). Dies wiederholt sich für eine gesamte Umdrehung des Stellteils. Aus Kapitel 5.1 kann gefolgert werden, dass vor allem kleine Drehmomentamplituden zu Positionierfehlern führen. Um den Grundge-

danken einer Worst-Case-Untersuchung zu betonen, werden deshalb die Startpositionen so gewählt, dass die dritte Rastung in jedem Fall eine kleine Drehmomentamplitude darstellt.

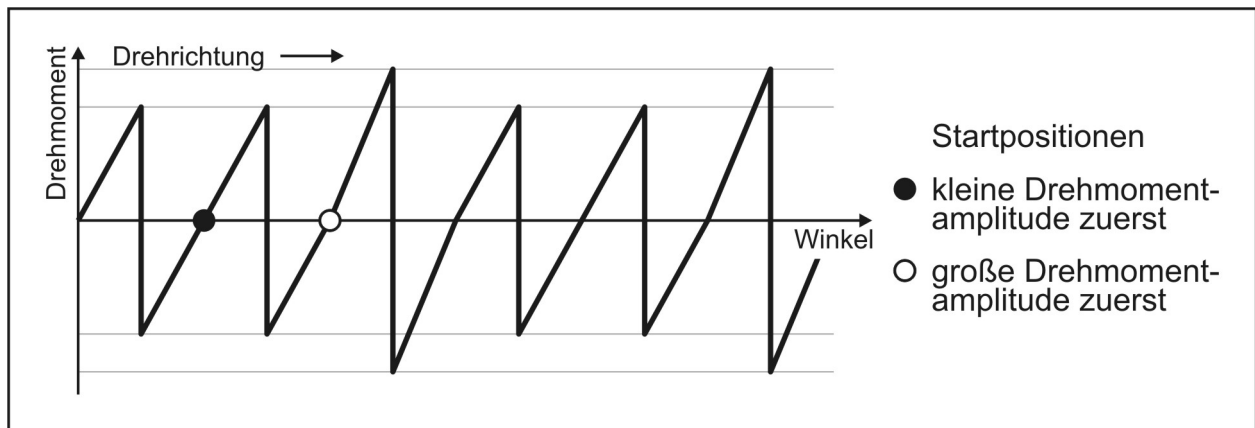


Bild 6.3: Reihenfolgen der Drehmomentamplituden der eingesetzten Drehmomentverläufe sowie dazugehörige Startpositionen bei vollem Reibungsausgleich

Insgesamt ergeben sich 108 verschiedene Versuchsszenarien, die jeweils mit mindestens 32 Probanden durchgeführt werden. An der gesamten Untersuchung nehmen 251 Probanden teil. Das Kollektiv setzt sich aus 194 männlichen und 57 weiblichen Versuchsteilnehmern zusammen. Davon sind 84 in handwerklichen Berufen tätig, 86 von ihnen üben eine Bürotätigkeit aus und 45 Personen sind Studenten. Das Durchschnittsalter beträgt 41,4 Jahre mit einer Standardabweichung von 15,3 Jahren.

6.3 Versuchsergebnisse

In Bild 6.4 oben sind die Fehlerhäufigkeiten der unterschiedlichen Amplitudenkombinationen eines flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlaufs dargestellt. Vergleicht man die Fehlerhäufigkeiten der drei Reibungsausgleiche miteinander, so fällt auf, dass die meisten Positionierfehler fast ausschließlich bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm gemacht werden. Bei einem Reibungsausgleich von 0,01 Nm kann in den meisten Fällen bereits eine Reduzierung der Fehlerhäufigkeit festgestellt werden. Wird der Reibungsausgleich völlig entfernt, sinkt die Fehlerhäufigkeit teilweise drastisch. So verringert sich die Fehlerhäufigkeit bei drei der sechs untersuchten Amplitudenkombinationen ohne Reibungsausgleich um mehr als die Hälfte, verglichen mit den Fehlerhäufigkeiten bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm.

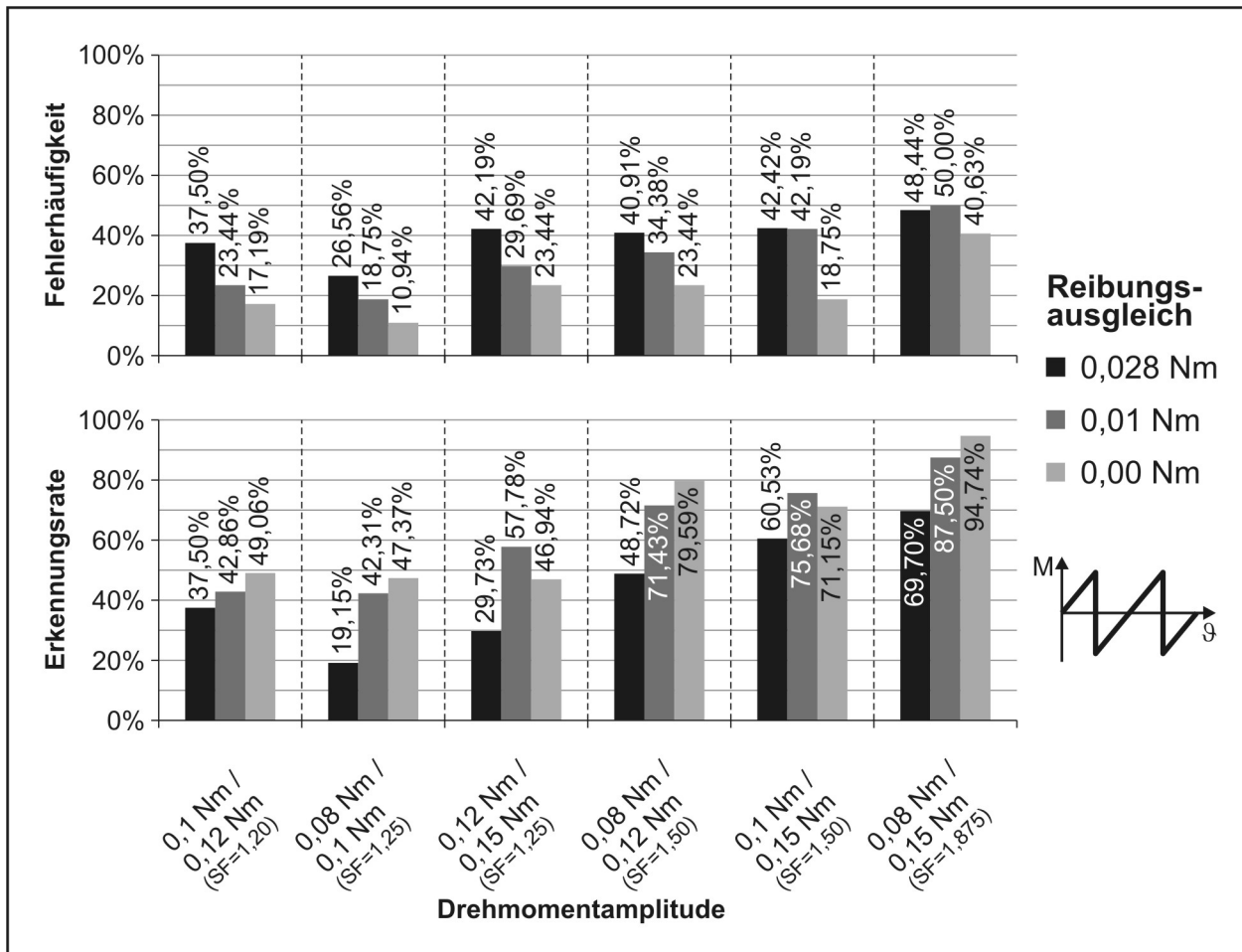


Bild 6.4: Auftretene Fehlerhäufigkeit und Erkennungsrate bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf

Vergleicht man des Weiteren die Amplitudenkombination miteinander, so treten die höchste Fehlerhäufigkeiten bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,15 Nm auf. Die maximale Fehlerhäufigkeit beträgt bei dieser Amplitudenkombination 50,00% bei einem Reibungsausgleich von 0,01 Nm. Die wenigsten Positionierfehler sind hingegen bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,1 Nm und einem Reibungsausgleich von 0,00 Nm zu finden. Hier entsprechen 10,94% der Endpositionen nicht der Sollposition.

Während die Fehlerhäufigkeiten bei den Amplitudenkombinationen mit einem Skalierungsfaktor von 1,50 nur wenig voneinander abweichen, unterscheiden sich die Fehlerhäufigkeiten der Amplitudenkombinationen mit einem Skalierungsfaktor von 1,25 deutlich voneinander. Somit kann bei dem hier untersuchten flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf nicht zwangsläufig die Fehlerhäufigkeit am Skalierungsfaktor ausgemacht werden.

Die zu einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf passenden Erkennungsraten sind in Bild 6.4 unten zu sehen. Im Vergleich zu den Ergebnissen der

Fehlerhäufigkeit zeigt sich hier ein umgekehrtes Bild. Anstelle zu sinken, steigen die Erkennungsraten mit abnehmendem Reibungsausgleich.

Die geringsten Erkennungsraten treten bei allen Amplitudenkombinationen bei vollem Reibungsausgleich von 0,028 Nm auf. Bis auf zwei Ausnahmen sind die höchsten Erkennungsraten bei einem Reibungsausgleich von 0,00 Nm zu finden. Die Erkennungsraten bei 0,01 Nm Reibungsausgleich liegen in fast allen Fällen sehr dicht unterhalb dieser Maximalwerte.

Die höchste Erkennungsrate mit einem Wert von 94,74% findet sich bei einem Reibungsausgleich von 0,00 Nm und der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,15 Nm, die mit einem Skalierungsfaktor von 1,875 auch gleichzeitig den größten Unterschied der Drehmomentamplituden einer Kombination repräsentiert. Auch bei den beiden anderen Reibungsausgleichen sind die höchsten Erkennungsraten bei dieser Amplitudenkombination zu finden. Die geringste Erkennungsrate ist hingegen nicht bei der Amplitudenkombination mit dem geringsten Skalierungsfaktor sondern bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,1 Nm zu finden, was einem Skalierungsfaktor von 1,25 entspricht. Bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm beträgt die Erkennungsrate lediglich 19,15% und entspricht damit nicht einmal einem Drittel des in der vorangegangenen Untersuchung zur reinen Unterschiedserkennung ermittelten Wertes bei einer ähnlichen Skalierung (SF = 1,262).

Der ebenfalls in der vorausgegangenen Untersuchung festgestellte Effekt, dass bei demselben Skalierungsfaktor aber hohen Ausgangsamplituden die Erkennungsraten steigen, ist auch hier bei den beiden Amplitudenkombinationen mit einem Skalierungsfaktor von 1,25 zu erkennen. Bei den Amplitudenkombinationen mit einem Skalierungsfaktor von 1,50 lässt sich dieser Effekt hingegen nur bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm feststellen.

Die Fehlerhäufigkeit bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf ist insgesamt geringer als bei einem flachen (vgl. Bild 6.5 oben). In den meisten Fällen entsprechen weniger als 20% der Endpositionen nicht der geforderten Soll-Position. Auch bei dieser Verlaufsart treten die meisten Fehler bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm auf. Die Fehlerhäufigkeiten bei den Reibungsausgleichen von 0,01 Nm und 0,00 Nm liegen hingegen sehr nah beieinander und variieren in der Rangfolge des Reibungsausgleichs mit der geringsten Fehlerhäufigkeit.

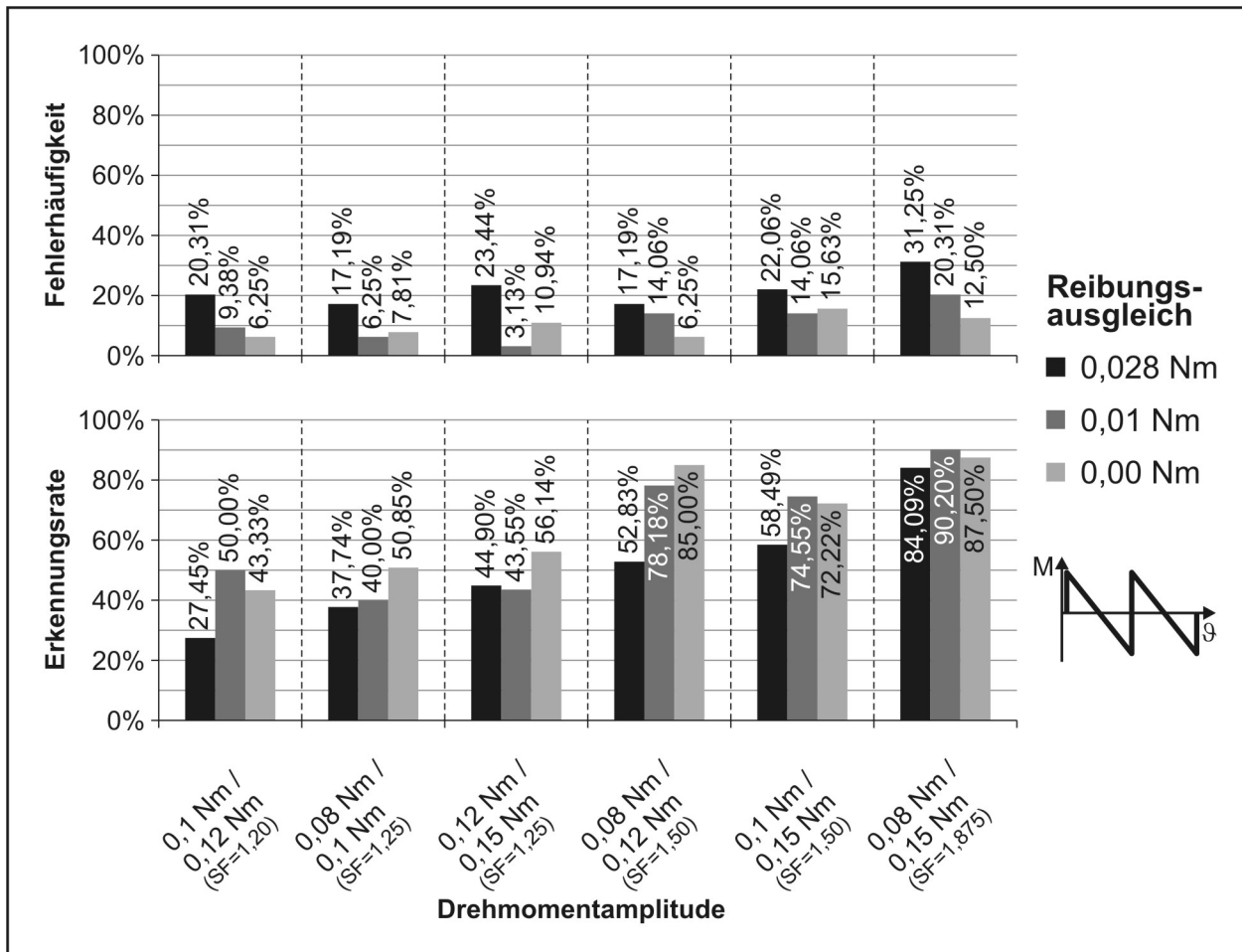


Bild 6.5: Auftretene Fehlerhäufigkeit und Erkennungsrate bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf

Wie schon bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf werden auch bei dieser Verlaufsart die meisten Fehler bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,15 Nm und einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm gemacht. Die Fehlerhäufigkeit beträgt in diesem Fall 31,25%. Die geringste Fehlerhäufigkeit mit einem Wert von 3,13% tritt bei der Amplitudenkombination 0,12 Nm/0,15 Nm und einem Reibungsausgleich von 0,01 Nm auf. Der Wertebereich der Fehlerhäufigkeiten bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf ähnelt sich insgesamt, unabhängig von den Skalierungsfaktoren, stark. Einzig die Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,15 Nm weicht etwas von den anderen Werten in Richtung größerer Fehlerhäufigkeit ab.

Die Erkennungsraten bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf sind unten in Bild 6.5 dargestellt. Die niedrigsten Erkennungsraten sind danach fast ausschließlich bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm zu finden, wie es auch schon bei einem flachen sägezahnförmigen Verlauf der Fall war. Die Drehmomentverläufe mit einem Reibungsausgleich von 0,01 Nm und 0,00 Nm weisen fast immer höhere Erken-

nungsraten auf. Die Unterschiede der Erkennungsraten in Abhängigkeit von der Größe des Reibungsausgleichs fallen indessen bei einigen Amplitudenkombinationen nicht so groß aus, wie es bei einem flachen sägezahnförmigen Verlauf der Fall war. Bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm sind die Erkennungsraten in den meisten Fällen etwas höher als bei einem flachen sägezahnförmigen Verlauf. Bei den beiden anderen Reibungsausgleichen weichen die Erkennungsraten hingegen weniger stark von denen eines flachen sägezahnförmigen Verlaufes ab. Die höchste Erkennungsrate ($E = 90,20\%$) tritt bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,15 Nm und einem Reibungsausgleich von 0,01 Nm auf. Auch bei den anderen Reibungsausgleichen sind bei dieser Amplitudenkombination die höchsten Erkennungsraten zu finden. Die niedrigste Erkennungsrate ist diesmal bei der Amplitudenkombination 0,1 Nm/0,12 Nm zu finden. Bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm beträgt die Erkennungsrate 27,45%. Damit liegen die höchste und die niedrigste Erkennungsrate bei einem steilen sägezahnförmigen Verlauf erwartungsgemäß bei den Amplitudenkombinationen mit dem größten bzw. dem kleinsten Skalierungsfaktor.

Auch bei dem hier untersuchten steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf ist die Abhängigkeit der Erkennungsrate von der Größe der Ausgangsamplitude nur bei Amplitudenkombinationen mit einem Skalierungsfaktor von 1,25 zu erkennen. Der Effekt bei einer hohen Ausgangsamplitude ist aber nicht so stark ausgeprägt, wie es bei einem flachen sägezahnförmigen Verlauf der Fall war.

Die Fehlerhäufigkeiten, die bei einem sinusförmigen Drehmomentverlauf auftreten, sind in Bild 6.6 oben dargestellt. Die Fehlerhäufigkeiten bei einer sinusförmigen Verlaufsart liegen in einem mittleren Bereich zwischen den beiden vorherigen Verlaufsarten. Erneut treten auch hier die meisten Fehler bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm auf. Bei einem vollständigen Verzicht auf einen Reibungsausgleich ist die Fehlerhäufigkeit hingegen fast immer am geringsten. Bei einem Reibungsausgleich von 0,01 Nm liegt die Fehlerhäufigkeit entweder zwischen denen der beiden anderen untersuchten Reibungsausgleiche oder sehr nah an der Fehlerhäufigkeit der Drehmomentverläufe mit einem Reibungsausgleich von 0,00 Nm.

Die maximale Fehlerhäufigkeit mit einem Wert von 40,63% tritt bei einem sinusförmigen Drehmomentverlauf sowohl bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,15 Nm als auch bei der Kombination 0,1 Nm/0,15 Nm jeweils bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm auf. Die wenigsten Fehler werden beim sinusförmigen Drehmomentverlauf,

wie schon bei dem flachen sägezahnförmigen Verlauf, bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,1 Nm und einem Reibungsausgleich von 0,00 Nm gemacht.

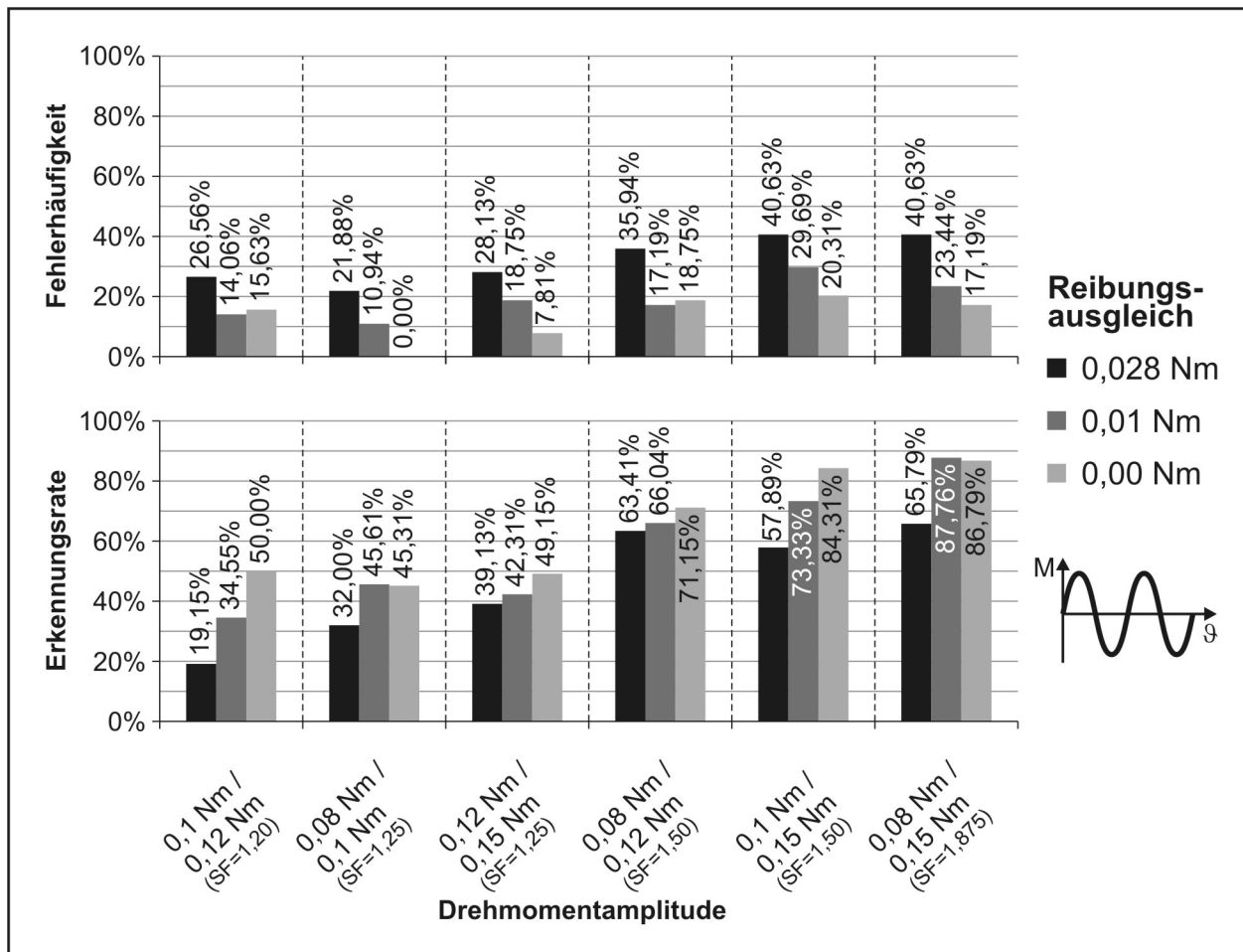


Bild 6.6: Auftretene Fehlerhäufigkeit und Erkennungsrate bei einem sinusförmigen Drehmomentverlauf

Vergleicht man jeweils die beiden Amplitudenkombinationen mit denselben Skalierungsfaktoren, so treten sowohl bei einem Skalierungsfaktor von 1,25 als auch bei einem Faktor von 1,50 bei den Amplitudenkombinationen mit den größeren Amplituden (0,1 Nm/0,15 Nm und 0,12 Nm/0,15 Nm) etwas mehr Fehler auf. Der Unterschied ist recht gering und beträgt in diesen Fällen weniger als 10%. Somit kann auch hier nicht zwangsläufig auf eine Abhängigkeit der Fehlerhäufigkeit vom Skalierungsfaktor geschlossen werden.

Wie schon bei den beiden vorherigen Drehmomentverläufen sind auch bei einem sinusförmigen Drehmomentverlauf die niedrigsten Erkennungsraten bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm zu finden (vgl. Bild 6.6, unten). Die Drehmomentverläufe mit einem Reibungsausgleich von 0,01 Nm weisen bei zwei Amplitudenkombinationen die höchste Erkennungsrate auf, liegen aber sonst immer

etwas unterhalb der Erkennungsraten bei Drehmomentverläufen mit einem Reibungsausgleich von 0,00 Nm. Verglichen mit einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf, lässt sich bei einem sinusförmigen Drehmomentverlauf mit einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm kein Trend einer stets höheren oder stets niedrigeren Erkennungsrate als die bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf feststellen. Bei abnehmendem Reibungsausgleich gleichen sich die Erkennungsraten zwar denen der sägezahnförmigen Verläufe an, variieren aber deutlich stärker als dies bei dem Vergleich zwischen den Erkennungsraten eines steilen und eines flachen sägezahnförmigen Verlaufs der Fall ist. Am häufigsten werden die Unterschiede zweier Amplituden bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,15 Nm und einem Reibungsausgleich von 0,01 Nm erkannt. Die maximale Erkennungsrate beträgt in diesem Fall 87,76%. Wie schon bei den beiden anderen Verlaufsarten treten bei dieser Amplitudenkombination auch bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm und 0,00 Nm die höchsten Erkennungsraten auf. Am seltensten werden die Unterschiede indes bei der Amplitudenkombination 0,1 Nm/0,12 Nm erkannt. Bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm wird der Unterschied der Drehmomentamplituden bei dieser Kombination nur in 19,15% der Fälle erkannt.

Die Erkennungsraten korrelieren bei einem sinusförmigen Drehmomentverlauf weitestgehend mit den Skalierungsfaktoren der Amplitudenkombinationen. Große Skalierungsfaktoren führen demnach eher zu einer Erkennung der Unterschiede als kleine. Auch die Erkennungsraten der Amplitudenkombinationen mit denselben Skalierungsfaktoren ähneln sich bei dieser Verlaufsart. Der Unterschied zwischen den beiden Amplitudenkombinationen mit einem Skalierungsfaktor von 1,25 ist hier kaum erkennbar.

Werden zur Berechnung der Erkennungsraten aller drei untersuchten Verlaufsarten auch die Rückmeldungen mit einbezogen, bei denen die Endposition nicht richtig gestellt wurde, so ändert dies kaum etwas an den Ergebnissen. Die Erkennungsraten unterscheiden sich dann zu den zuvor dargestellten Erkennungsraten in fast allen Fällen um weniger als fünf Prozent. Dabei kann gleichermaßen eine Zu- wie auch eine Abnahme der Erkennungsrate beobachtet werden.

Die Auswertung der Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit von der Amplitudenreihenfolge ist exemplarisch in Bild 6.7 dargestellt. Dieser Auswertung zufolge ist die Fehlerhäufigkeit

bei den Versuchen, in denen zuerst die größere der beiden Amplituden einer Amplitudenkombination zu überwinden ist, etwas höher als bei den Versuchen, in denen die größere Amplitude als zweite Rastung auftritt. Die Unterschiede belaufen sich aber in den meisten Versuchen auf weniger als 10% und sind damit nicht als maßgeblicher Einflussfaktor auf die Stellgenauigkeit anzusehen. Noch geringer sind die Unterschiede von unterschiedlichen Amplitudenreihenfolgen bei der Erkennungsrate. Im Gegensatz zur Fehlerhäufigkeit hat darüber hinaus keine der beiden Amplitudenreihenfolgen stets eine höhere Erkennungsrate. Somit besteht kein Einfluss der Amplitudenreihenfolge auf die Unterschiedserkennung. Eine vollständige Darstellung aller Diagramme zum Einfluss der Amplitudenreihenfolge ist im Anhang zu finden.

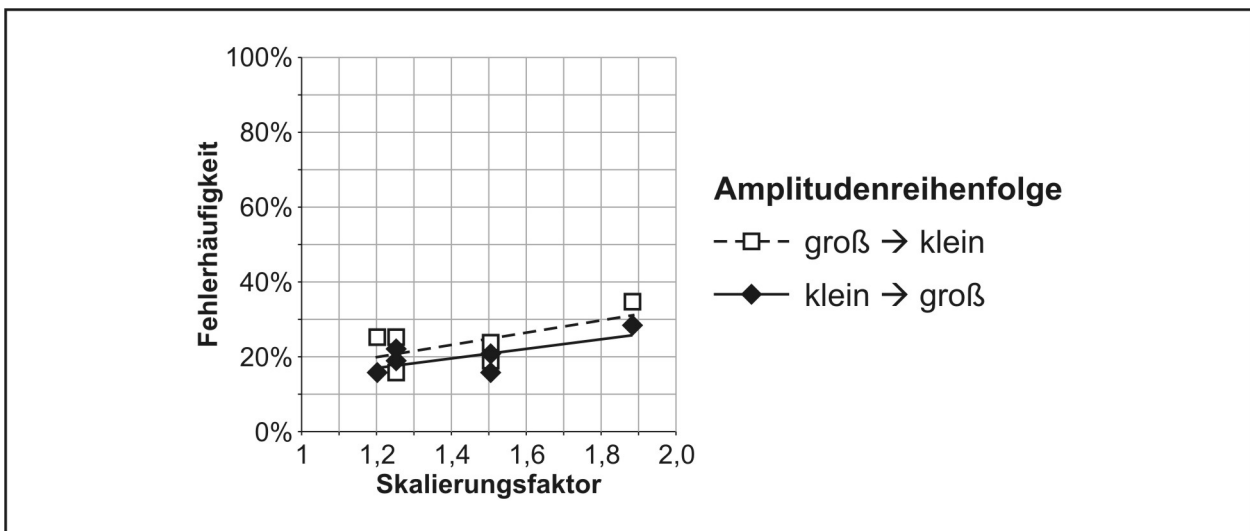


Bild 6.7: Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit von der Amplitudenreihenfolge bei einem steilen sägezahnförmigen Verlauf mit einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm

Die Diagramme der kombinierten Auswertung der Stellgenauigkeit und der Erkennungsrate sind auf Bild 6.8 – Bild 6.10 dargestellt. Dabei stellt jedes Diagramm die Erkennungsraten und die Stellgenauigkeit als Wertepaar einer Drehmomentamplitudenkombination dar. Daraus lässt sich ein Radius für jede Verlaufsart und den zugehörigen Reibungsausgleich einzeichnen. Die Größe des Radius entspricht der nicht normierten Bewertungskennzahl. Durch die Position der Wertepaare zur Winkelhalbierenden kann abgelesen werden, ob die Stellgenauigkeit oder die Erkennungsrate überwiegt.

Aus allen sechs Diagrammen ist ersichtlich, dass sich bei den Drehmomentverläufen ohne Reibungsausgleich mit nur einer Ausnahme stets die größten Radien ergeben.

Hiervon haben alle einen steilen sägezahnförmigen oder einen sinusförmigen Drehmomentverlauf. Ein ebenfalls sehr großer Radius findet sich bei einem steilen sägezahnförmigen Verlauf und einem Reibungsausgleich von 0,01 Nm. Die kleinsten Radien sind hingegen ausschließlich bei flachen sägezahnförmigen Drehmomentverläufen und einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm zu finden.

Bei allen sechs Diagrammen überwiegt nur bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,15 Nm die Erkennungsrate ($\alpha_{\text{BAK}} > 45^\circ$). Die Stellgenauigkeit überwiegt dagegen bei den Amplitudenkombinationen 0,08 Nm/0,10 Nm, 0,10 Nm/0,12 Nm und 0,12 Nm/0,15 Nm ($\alpha_{\text{BAK}} < 45^\circ$). Bei diesen drei Kombinationen kann man ferner ein Ansteigen der Erkennungsrate mit zunehmender Amplitudengröße feststellen. So sind bei der Amplitudenkombination 0,08 Nm/0,10 Nm die niedrigsten, bei der Kombination 0,12 Nm/0,15 Nm die höchsten Erkennungsraten zu finden. Bei den Amplitudenkombinationen 0,08 Nm/0,12 Nm und 0,10 Nm/0,15 Nm sind die Erkennungsrate und die Stellgenauigkeit sehr ausgeglichen. Insgesamt lässt sich aus diesen Ergebnissen schließen, dass ein Skalierungsfaktor von 1,50 einen Grenzwert darstellt. Amplitudenkombinationen mit einem größeren Skalierungsfaktor verschieben das Ergebnis zugunsten der Erkennungsrate, demgegenüber kommen kleinere Skalierungsfaktoren der Stellgenauigkeit zugute.

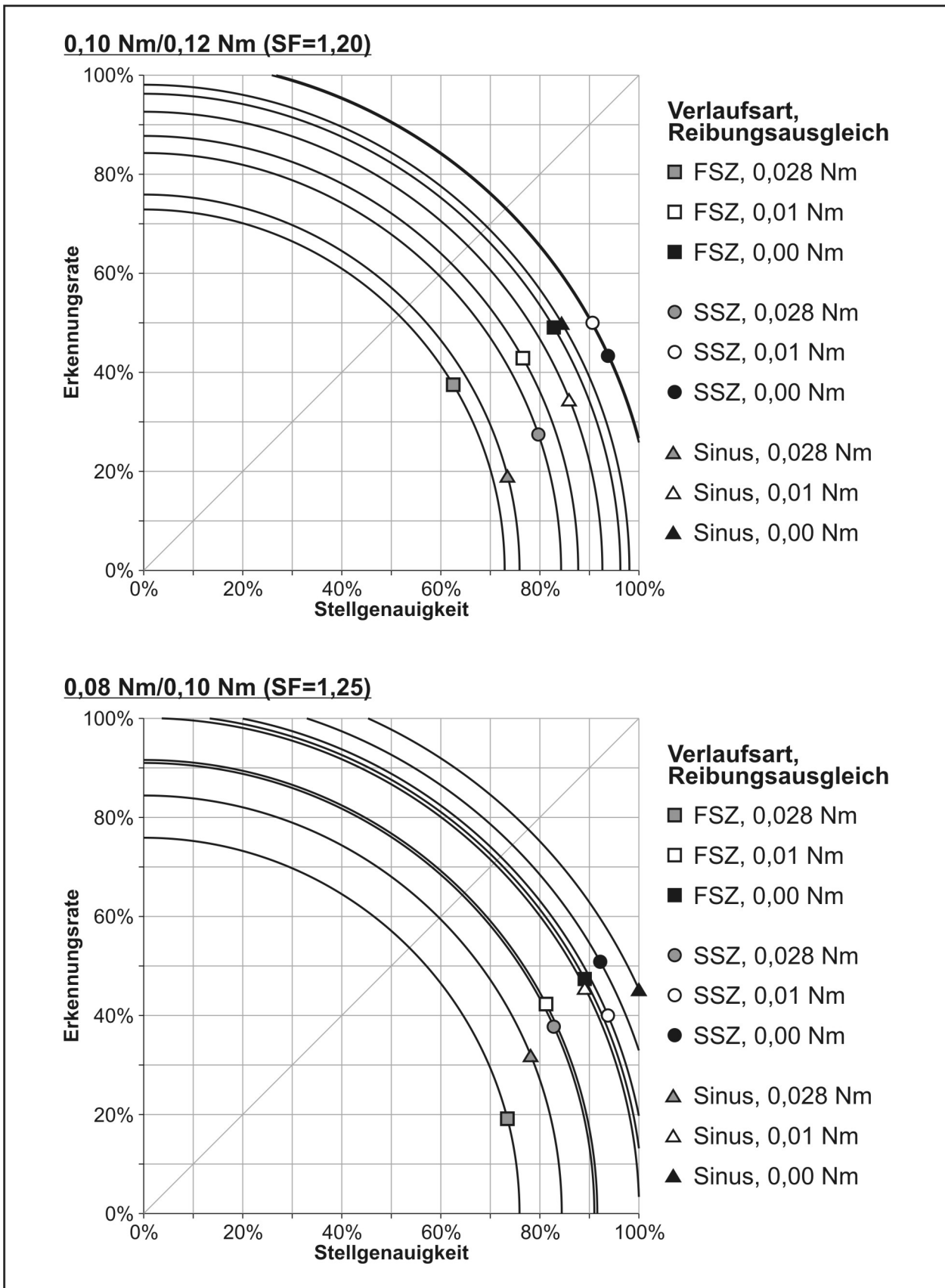


Bild 6.8: Kombinierte Auswertung der Stellgenauigkeit und der Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Amplitudenkombination (Teil 1)

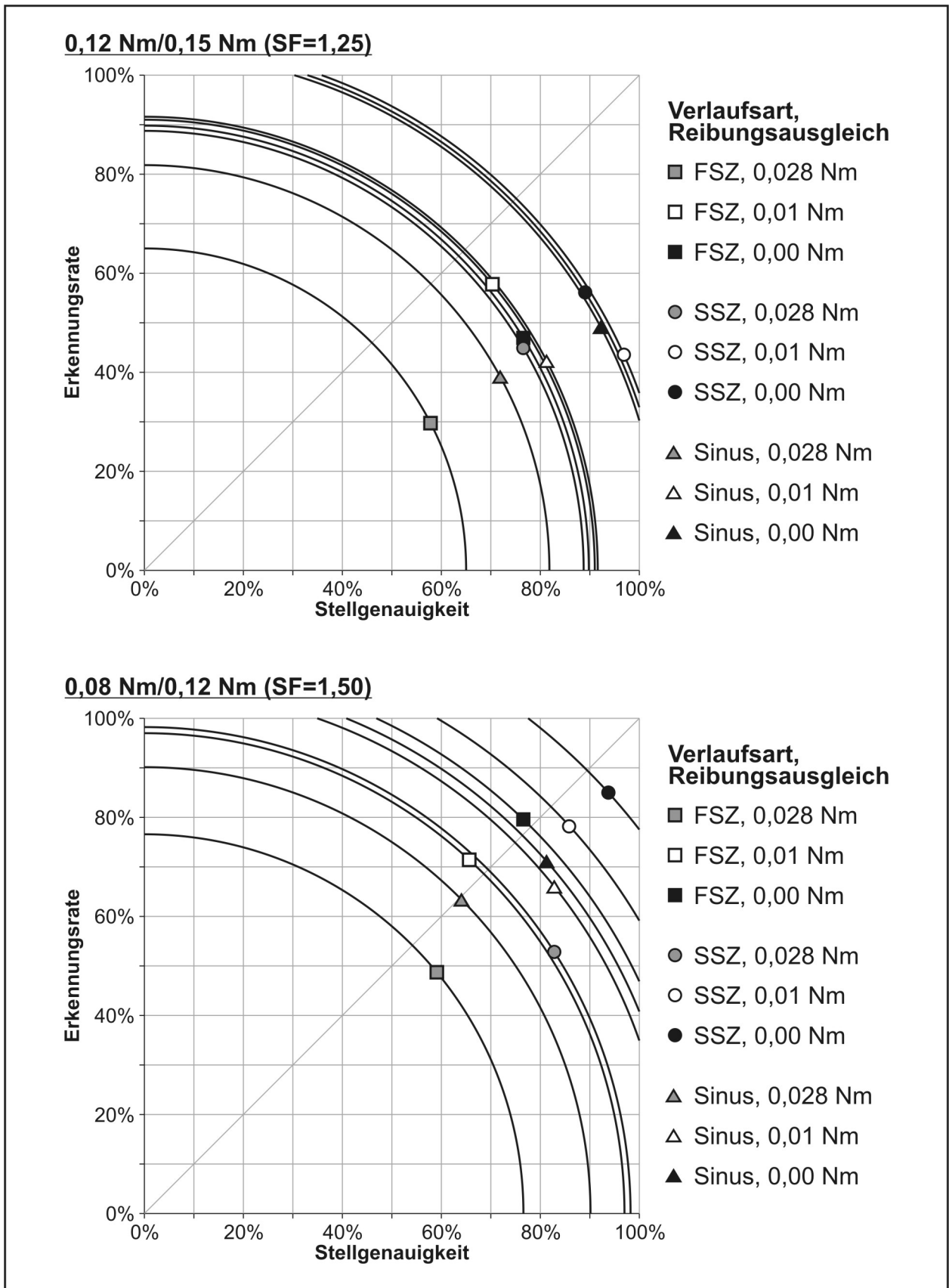


Bild 6.9: Kombinierte Auswertung der Stellgenauigkeit und der Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Amplitudenkombination (Teil 2)

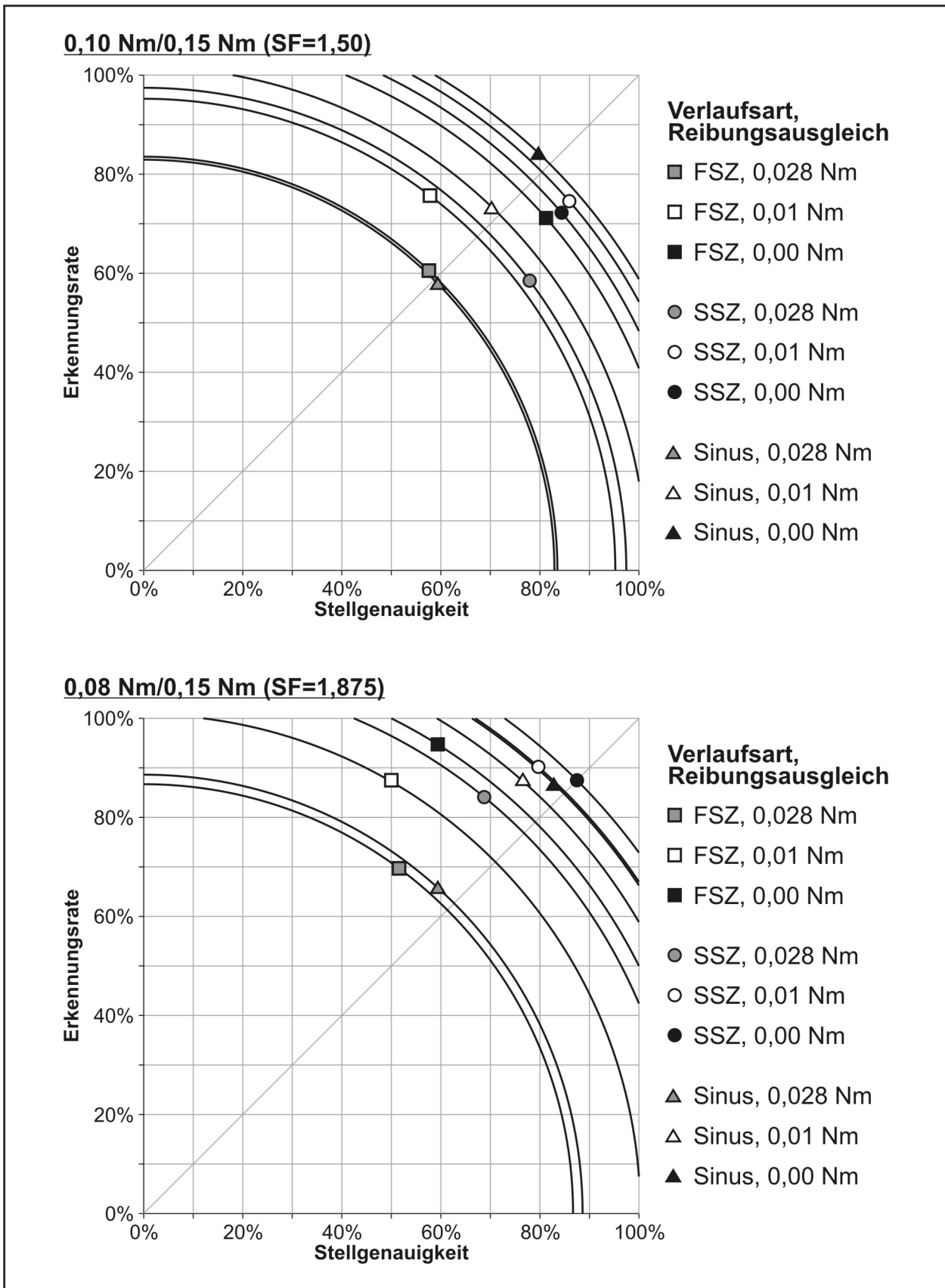


Bild 6.10: Kombinierte Auswertung der Stellgenauigkeit und der Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Amplitudenkombination (Teil 3)

Eine weitere Beurteilung der Ergebnisse erfolgt direkt über die Bewertungskennzahl. Vernachlässigt man dazu die Amplitudenreihenfolge, so lassen sich die 54 nun noch verbliebenen Versuchsszenarien anhand ihrer Bewertungskennzahl in eine Rangfolge bringen. Tabelle 6.2 zeigt davon die zehn Szenarien mit den höchsten Bewertungskennzahlen. Demzufolge treten hohe Bewertungskennzahlen besonders bei den Amplitudenkombinationen 0,08 Nm/0,12 Nm und 0,08 Nm/0,15 Nm und einem Reibungsausgleich von entweder 0,00 Nm oder 0,01 Nm auf. Ferner ist das einzige Szenario mit einem flachen sägezahnförmigen Verlauf erst auf dem neunten Platz zu finden.

Platzierung	Bewertungskennzahl BAK	Bewertungswinkel α_{BAK}	Verlaufsart	Amplitudenkombination	Reibungsausgleich
1.	89,19%	41,99°	SSZ	0,08 Nm/0,12 Nm	0,00 Nm
2.	85,19%	43,42°	SSZ	0,08 Nm/0,15 Nm	0,00 Nm
3.	83,60%	45,54°	Sinus	0,08 Nm/0,15 Nm	0,00 Nm
4.	82,87%	47,16°	SSZ	0,08 Nm/0,15 Nm	0,01 Nm
5.	81,39%	48,30°	Sinus	0,08 Nm/0,15 Nm	0,01 Nm
6.	80,65%	41,11°	SSZ	0,08 Nm/0,12 Nm	0,01 Nm
7.	80,65%	41,11°	SSZ	0,1 Nm/0,15 Nm	0,01 Nm
8.	77,63%	24,38°	Sinus	0,08 Nm/0,1 Nm	0,00 Nm
9.	77,54%	57,22°	FSZ	0,08 Nm/0,15 Nm	0,00 Nm
10.	77,38%	43,26°	Sinus	0,1 Nm/0,15 Nm	0,00 Nm

Tabelle 6.2: Bewertungsreihenfolge der zehn am besten abschneidenden Drehmomentverläufe

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Hypothese, dass mit großen Sprüngen der Drehmomentamplitude die Unterschiedserkennung zunimmt, kann bestätigt werden. Auch der in der Einzeluntersuchung zur Unterschiedserkennung bewiesene Einfluss der Amplitudengröße auf die Erkennungsrate kann in der kombinierten Untersuchung festgestellt werden. Dieser wird vor allem bei den sägezahnförmigen Drehmomentverläufen mit einem Skalierungsfaktor von 1,25 bestätigt. Auf die Stellgenauigkeit wirkt sich die Größe der Amplitudenunterschiede hingegen nicht stark aus. Die Amplitudenkombinationen mit den größten und den kleinsten Skalierungsfaktoren beinhalten zwar tatsächlich die Drehmomentverläufe mit kleinsten bzw. größten Werten für die Stellgenauigkeit, jedoch gibt es auch bei

diesen beiden Kombinationen Drehmomentverläufe, die sich von diesen Werten stark unterscheiden. Zudem weichen bei den Amplitudenkombinationen mit denselben Skalierungsfaktoren die Fehlerhäufigkeiten voneinander ab.

Der Einfluss der Verlaufsart auf die Stellgenauigkeit bei nicht konstanten Drehmomentamplituden lässt sich nicht bei jeder Amplitudenkombination bestätigen. Trotzdem lässt sich der Trend feststellen, dass ein steiler sägezahnförmiger Drehmomentverlauf oftmals eine deutlich höhere Stellgenauigkeit als ein flacher sägezahnförmiger Verlauf aufweist. Die Stellgenauigkeit eines sinusförmigen Drehmomentverlaufs bewegt sich dazu meist in der Mitte dieser beiden Verlaufsarten. Auch bei der Auswertung des Einflusses der Verlaufsart auf die Unterschiedserkennung ergibt sich ein inhomogenes Bild. Während sich die Erkennungsraten eines flachen und eines steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlaufs vor allem bei einem Reibungsausgleich von 0,028 Nm unterscheiden, lässt sich beim sinusförmigen Drehmomentverlauf keine derartige Aussage treffen. Wird der Reibungsausgleich verringert, gleichen sich die Erkennungsraten aller drei untersuchten Verlaufsarten einander an.

Die Amplitudenreihenfolge beeinflusst die Stellgenauigkeit weniger als anfangs angenommen. Es lässt sich zwar die Tendenz erkennen, dass bei einer kleinen Drehmomentamplitude, die auf eine große folgt, mehr Positionierfehler gemacht werden, der Unterschied zu den Tests mit umgekehrter Amplitudenreihenfolge jedoch gering ist. Bei der Unterschiedserkennung lässt sich diese Tendenz nicht bestätigen.

Neben den Skalierungsfaktoren ist die Reibung einer der größten Einflussfaktoren in dieser Untersuchung. Wie sich gezeigt hat, kann durch die gezielte Verwendung von Reibung die Stellgenauigkeit maßgeblich verbessert werden. Dies gilt häufig schon bei einem kleinen Reibungsanteil von 0,01 Nm. Eine noch stärkere Reibung verbessert die Stellgenauigkeit zwar noch mehr, die Verbesserung steigt aber nicht im gleichen Maße wie der Reibungsanteil. Obwohl es keinen Hinweis aus dem Stand der Forschung gab, wird darüber hinaus durch die Hinzugabe von Reibung in das Stellteilsystem auch die Unterschiedserkennung erhöht.

Im Vergleich mit den zuvor durchgeführten Untersuchungen treten in der kombinierten Untersuchung deutlich geringere Erkennungsraten und Stellgenauigkeiten auf. Dies ist zum einen der deutlich kürzeren Betätigungsdauer und zum anderen den Amplitudensprüngen während einer Betätigung zuzuschreiben. Ferner fällt bei dieser Untersuchung auf, dass einige Probanden eine Fehlpositionierung nicht eigenständig registrieren und stattdessen von einer korrekt eingestellten Endposition ausgehen.

Dieser Effekt war in der Untersuchung zur Stellgenauigkeit nicht feststellbar. Er lässt sich durch die fehlende akustische Rückmeldung des Prüfstands mit aktiver Drehmomenterzeugung oder durch eine verringerte haptische Wahrnehmungsfähigkeit einzelner Probanden erklären.

Durch die kombinierte Auswertung lässt sich der Skalierungsfaktor von 1,50 als Grenze eines ausgewogenen Verhältnisses zwischen der Stellgenauigkeit und der Erkennungsrate identifizieren.

Die Bewertungskennzahl allein lässt sich in dieser Untersuchung nur eingeschränkt als Beurteilungsmaß verwenden, da durch die sehr hohen Werte der Unterschiedserkennung vor allem die Amplitudenkombinationen mit sehr großen Skalierungsfaktoren hohe Bewertungskennzahlen erhalten.

Eine grafische Zusammenfassung der wichtigsten positiven Einflussfaktoren auf die Unterschiedserkennung und die Stellgenauigkeit ist in Bild 6.11 dargestellt.



Bild 6.11: Auszug der wichtigsten positiven Einflussfaktoren auf die Unterschiedserkennung und die Stellgenauigkeit

Zusammenfassend ergeben sich aus dieser Untersuchung und bei den vorgegebenen Randbedingungen folgende Empfehlungen:

Reibung sollte aufgrund ihres positiven Einflusses auf die Stellgenauigkeit und die Erkennungsrate in jedem Stellteilsystem vorhanden sein. Für den Einsatz eines adaptiven multifunktionalen Stellteils ist ferner zu klären, ob die Stellgenauigkeit oder die Unterschiedserkennung favorisiert wird. Danach lässt sich eine Amplitudenkombination

aus den in dieser Untersuchung dargestellten Diagrammen auswählen. Müssen nur wenige Informationen haptisch übermittelt werden, die sich mit nur einer Verlaufsart darstellen lassen, so ist ein steiler sägezahnförmiger Verlauf wegen seiner hohen Stellgenauigkeit zu bevorzugen. Die Drehmomentamplitude sollte auch bei nicht konstanten Drehmomentamplituden nie kleiner als 0,06 Nm sein. Größere Drehmomentamplituden unterstützen zudem die Erkennung von Unterschieden.

7 Evaluation durch anwendungsorientierte Untersuchungen

In der letzten Untersuchung sollen alle Erkenntnisse aus den Kapiteln 5 und 6 anwendungsnah überprüft und damit evaluiert werden. Ziel ist es dabei nicht, ein spezielles Anwendungsbeispiel zu untersuchen, sondern den Einsatz eines multifunktionalen Stellteils mit aktiver haptischer Rückmeldung mit Hilfe eines abstrakten Anwendungsfalls zu analysieren. Darüber hinaus sollen die Meinungen der Versuchsteilnehmer erfasst und deren Verhalten bei der Bedienung eines solchen Stellteils beobachtet werden.

7.1 Hypothesen

- Durch eine Eingewöhnungsphase und eine Einlernzeit, die durch aufeinander aufbauende Aufgaben gekennzeichnet ist, können komplexe, haptisch übermittelte Informationen sicher erkannt und die Bedienung eines adaptiven multifunktionalen Stellteils ermöglicht werden.
- Verschiedene Verlaufsarten lassen sich sicher voneinander unterscheiden.
- Drehmomentamplituden, die sich um den Faktor 1,875 unterscheiden, können nach einer Eingewöhnungsphase sicher auseinander gehalten werden.

7.2 Allgemeine Versuchsbeschreibung

Anstelle des Begriffs „Drehmomentverlauf“ wird während der gesamten Untersuchung der Begriff „Funktion“ verwendet, um die Versuchspersonen nicht mit Fachvokabular zu verunsichern und einen anwendungsorientierten Bezug der haptisch wahrgenommenen Reize herzustellen. Die Untersuchung beschränkt sich auf eine diskrete Eingabeart mit einem stets festen Rastwinkel von 24° . In der gesamten Untersuchung wird wegen den ermittelten positiven Effekten auf die Stellgenauigkeit und die Erkennungsrate kein Reibungsausgleich vorgenommen. Somit wirkt die gesamte Reibung von $0,028 \text{ Nm}$ am Stellteil, die durch die Prüfstandsteuerung jedoch nur den negativen Drehmomentanteil beeinflusst (vgl. Bild 6.2). Der Reibungsausgleich beträgt demzufolge $0,00 \text{ Nm}$.

Der Drehknopf wird vorrangig im Uhrzeigersinn bewegt. Bei der in manchen Teilaufgaben erlaubten Positionskorrektur kommen jedoch auch vereinzelt Bewegungen gegen den Uhrzeigersinn vor.

Die anwendungsorientierte Untersuchung beginnt mit einer ausgedehnten Eingewöhnungsphase. Die Dauer der Eingewöhnungsphase bestimmen die Versuchspersonen

selbst. Dabei wird den Versuchsteilnehmern die gesamte Untersuchung zunächst erklärt. Danach erhalten sie die Möglichkeit, sechs verschiedene Drehmomentverläufe zu testen. Bei diesen handelt es sich um flache und steile sägezahnförmige sowie sinusförmige Drehmomentverläufe mit jeweils einer stets konstanten kleinen und großen Drehmomentamplitude von 0,08 Nm bzw. 0,15 Nm. Um den Probanden das Zuordnen der wahrgenommenen Drehmomente zu erleichtern, ist neben dem Prüfstand eine Schautafel mit allen sechs Verläufen aufgestellt (vgl. Bild 7.1).

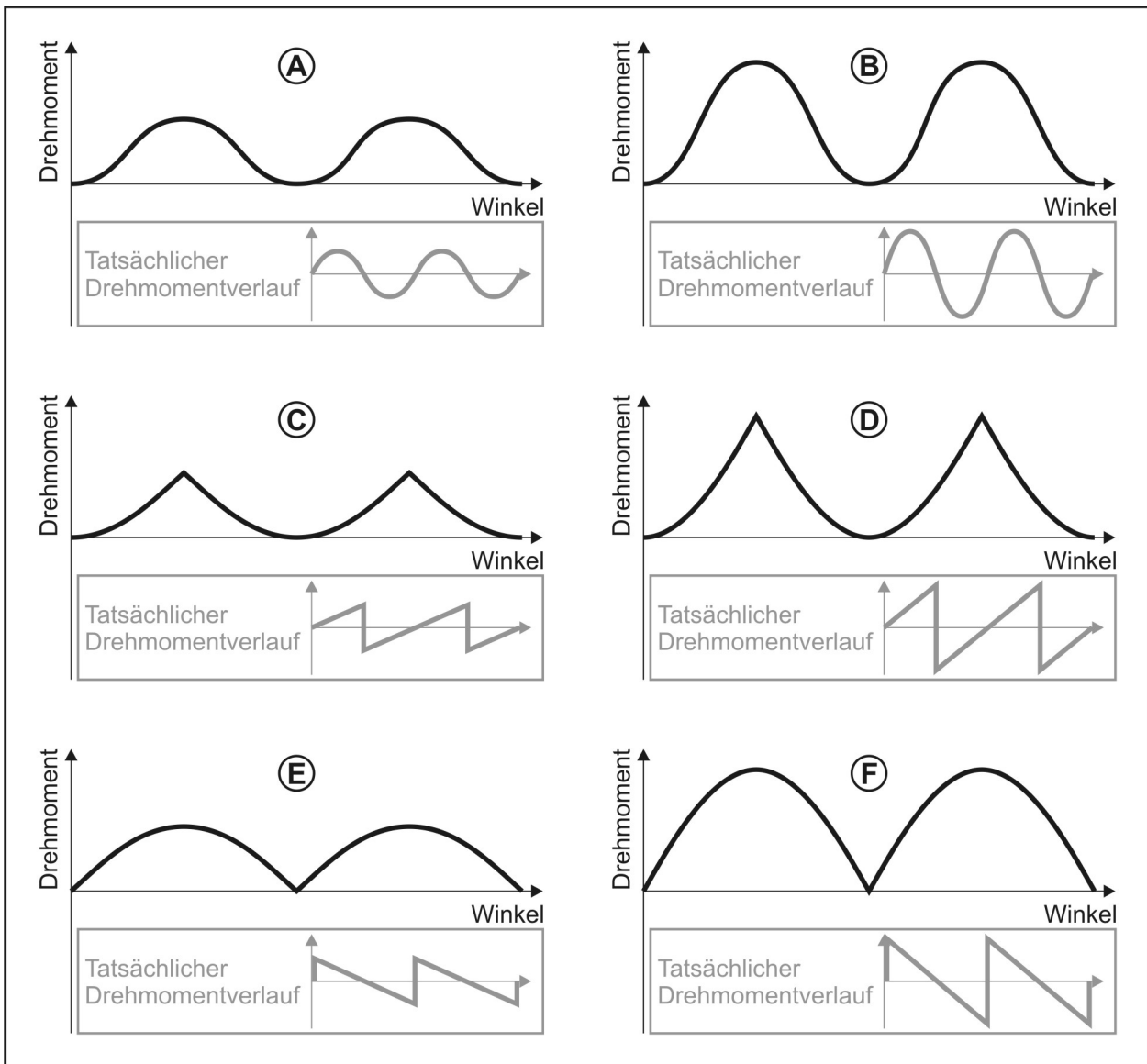


Bild 7.1: Integraldarstellung der Drehmomentverläufe in der Eingewöhnungsphase⁹

⁹ Die grau dargestellten Drehmomentverläufe dienen einzig der besseren Verständlichkeit von Bild 7.1. Die verwendete Schautafel enthielt diese grauen Drehmomentverläufe nicht.

Als Darstellungsart wird anstelle der tatsächlichen Drehmomentverläufe die Integraldarstellung gewählt [REISINGER09]. Die Kurven lassen sich mit den Konturen von Kurvenscheiben vergleichen. Die Minima entsprechen dabei den Rastpositionen, die Maxima den Umkehrpunkten. Nach Reisinger entspricht die Integraldarstellung eher dem inneren Modell, das sich die Benutzer vom Drehmomentverlauf beim Betätigen eines Drehschalters machen. Das soll den Probanden helfen, komplexe Zuordnungs- und Positionieraufgaben bei den nachfolgenden Aufgaben ohne technische Vorkenntnisse zu lösen. Jedem dieser Drehmomentverläufe wird ein Buchstabe zugeordnet, um eine einfache Zuordnung für die nachfolgenden Aufgaben zu ermöglichen. Den beiden sinusförmigen Drehmomentverläufen werden die Buchstaben A und B zugeordnet, die flachen und steilen sägezahnförmigen Drehmomentverläufe erhalten die Buchstaben C und D bzw. E und F. Die sechs Drehmomentverläufe werden jedem Probanden zunächst der Reihe nach zum Testen auf das Stellteil appliziert. Danach können sie selbst bestimmen, welche der sechs Verläufe sie ein weiteres Mal testen möchten.

Die explorative Untersuchung dauert bei jedem Probanden zwischen einer und eineinhalb Stunden. An der Untersuchung nehmen insgesamt elf Personen teil, davon sind acht männlich und drei weiblich. Das durchschnittliche Alter beträgt 32,4 Jahre mit einer Standardabweichung von 6,1 Jahren. Die Probanden werden gezielt ausgewählt. Sie sind vorwiegend handwerklich in medizinischen oder technischen Berufen tätig. Die Untersuchung findet ausschließlich in Laborumgebung statt, um trotz der langen Dauer der Befragung und des kleinen Probandenkollektivs aussagekräftige Ergebnisse ohne den Einfluss äußerer Störgrößen zu erhalten.

Die eigentliche Untersuchung beginnt nach der Eingewöhnungsphase. Die Untersuchung selbst ist in drei Aufgabengruppen unterteilt. Diese bauen aufeinander auf, beginnen mit einfachen Positionier- und Erkennungsaufgaben mit ausführlichen Erläuterungen und enden mit Beschreibungs- und Positionieraufgaben, deren Inhalte zur Erfüllung der Aufgaben von den Probanden dekodiert werden müssen. Eine Übersicht der Aufgabeninhalte ist in Tabelle 7.1 aufgelistet.

Aufgrund des großen Untersuchungsumfangs wird im Folgenden jede Aufgabengruppe separat beschrieben und ausgewertet. Danach werden, wie in den vorherigen Untersuchungen, die wichtigsten Ergebnisse aller Aufgabengruppen zusammengefasst.

Aufgabe Nr.	Aufgabeninhalt
A1	Einfache Erkennungs- und Positionieraufgaben mit ausführlicher Erläuterung
A1.1	Zuordnen des wahrgenommenen Drehmomentverlaufs zu einer der sechs auf der Schautafel dargestellten Drehmomentverläufe
A1.2	Bewegen des Stellteils um vier Rastpositionen und Benennen der Rastung mit der größeren Drehmomentamplitude
A1.3	Bewegen des Stellteils um vier Rastpositionen und Benennen der Rastung mit der kleineren Drehmomentamplitude
A2	Lernaufgaben zur Zuordnung von haptischen Rückmeldungen zu Funktionsmerkmalen
A2.1	Positionieren des Stellteils auf ein Funktionsende
A2.2	Positionieren des Stellteils auf einen präferierten Wert sowie Zuordnen des wahrgenommenen Drehmomentverlaufs zu einer der sechs auf der Schautafel dargestellten Drehmomentverläufe
A2.3	Bewegen des Drehknopfs um drei Rastungen und Angabe, ob der Funktionswert dabei schrittweise zunimmt, abnimmt oder gleichbleibt
A3	Aufgaben mit Dekodierung der haptischen Rückmeldung
A3.1	Während einer Stellbewegung simultane Beschreibung der erkannten Funktionen und Funktionsmerkmale
A3.2	Positionieren des Stellteils auf ein zuvor genanntes Merkmal

Tabelle 7.1: Übersicht der durchgeführten Versuche

7.3 Aufgabengruppe 1 – Einfache Erkennungs- und Positionieraufgaben

7.3.1 Versuchsbeschreibung

In der ersten von drei Aufgabengruppen werden den Versuchsteilnehmern einfache Erkennungs- und Positionieraufgaben gestellt. Ziel dieser Aufgabengruppe ist es nicht, besonders hohe Erkennungsraten und Werte für die Stellgenauigkeit zu erhalten, sondern die Versuchsteilnehmer auf die verschiedenen Drehmomentverläufe zu sensibilisieren, um so einen Lerneffekt für die nachfolgenden Aufgabengruppen zu erhalten. Die Aufgabengruppe 1 (A1) besteht aus drei Aufgabenteilen, denen eine ausführliche Erklärung über das vom Probanden zu erwartende Stellgefühl vorangeht.

Die erste Aufgabe der Aufgabengruppe 1 (A1.1) besteht darin, die sechs in der Eingewöhnungsphase kennengelernten Funktionen zu erkennen und zu benennen. Jede Funktion wird bei jedem Probanden jeweils zweimal auf das Stellteil appliziert. Die Reihenfolge der Funktionsabfolge ist zufällig gewählt und variiert von Proband zu Proband. Als Ergebnis dieser Aufgabe erhält man die relative Häufigkeit der richtig erkannten Funktionen.

In der zweiten Aufgabe der Aufgabengruppe 1 (A1.2) sollen die Probanden das Stellteil um vier Rastpositionen bewegen, wovon eine der vier Rastungen eine höhere Drehmomentamplitude aufweist. Der Sprung der höheren Drehmomentamplitude entspricht einer Skalierung der übrigen Amplituden um den Faktor 1,25. Dieser nach den Erkenntnissen in Kapitel 6 kleine Stufensprung wird bewusst ausgewählt und auch bei allen weiteren Teilaufgaben dieser Untersuchung eingesetzt. Wegen der vorhandenen Einlernzeit wird eine höhere Erkennungsrate als in der zuvor durchgeführten Untersuchung erwartet. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, den Drehknopf um die geforderte Anzahl an Rastpositionen zu bewegen und anzugeben, für welchen der vier Rastungen mehr Kraft benötigt wird. Aufgezeichnet und ausgewertet werden die richtig erkannten höheren Drehmomentamplituden. Diese können, wie in der vorangegangenen Untersuchung, mit Häufigkeitsdiagrammen dargestellt und bewertet werden. Auch hier werden die Drehmomentverläufe der sechs in der Eingewöhnungsphase eingeführten Funktionen verwendet. Jeder dieser Drehmomentverläufe muss einmal von jeder Versuchsperson gestellt werden. Sowohl die Position der höheren Amplitude als auch die Reihenfolge der sechs Drehmomentverläufe wird bei jedem Probanden per Zufall festgelegt.

Der dritte Teil (A1.3) der ersten Aufgabengruppe entspricht dem zweiten Teil fast vollständig. Anstelle einer höheren Drehmomentamplitude wird in diesem Aufgabenteil jedoch eine niedrigere Drehmomentamplitude eingesetzt. Dazu wird die Drehmomentamplitude einer der vier zu stellenden Rastungen um den Faktor 0,8 verkleinert. Dies entspricht dem reziproken Skalierungsfaktor aus A1.2, so dass sich die Ergebnisse aus beiden Teilaufgaben vergleichen lassen. Die Aufgabe der Probanden besteht auch bei dem letzten der drei Aufgabenteile darin, die abweichende Rastung zu benennen und das Stellteil um exakt vier Positionen zu bewegen. Auch bei dieser Teilaufgabe werden die richtig erkannten abweichenden Drehmomentamplituden ausgewertet.

7.3.2 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse aus A1.1 sind in Bild 7.2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die flachen Sägezahnverläufe sehr sicher auch bei unterschiedlichen Drehmomentamplituden (Funktion C und D) erkannt werden. Die Funktionen C und D werden in 81,82% bzw. 77,27% der aufgezeichneten Rückmeldungen richtig erkannt. Unerwartet gering fällt die Erkennung hingegen bei den Funktionen A und B sowie E und F aus, die für einen sinusförmigen bzw. einen steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf stehen. Die Funktionen A und B werden nur zu rund einem Drittel richtig erkannt, bei den Funktionen E und F sind es ca. zwei Fünftel. Auffällig ist dabei, dass die Funktion A und E sowie B und F sehr häufig miteinander verwechselt werden. Ob es sich um die große oder kleine Drehmomentamplitude handelt, wird hingegen fast immer richtig erkannt.

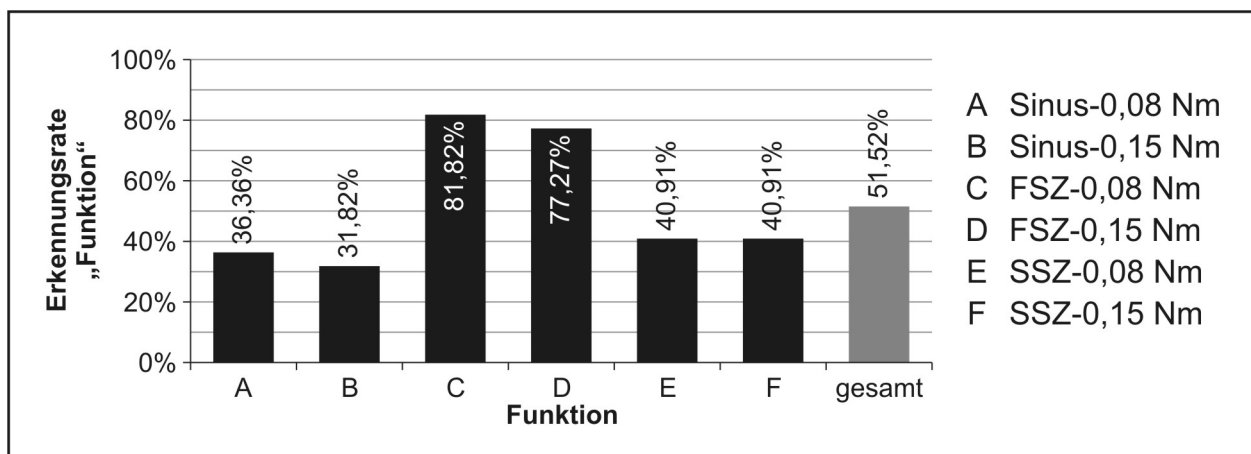


Bild 7.2: Relative Häufigkeit richtig erkannter Funktionen, A1.1

Die haptische Ähnlichkeit der Funktionen A und E sowie B und F kann nur mit der Integraldarstellung der Drehmomentverläufe erklärt werden. Diese ähneln sich vor allem im Bereich des Umkehrpunkts einer Rastung. Die Umkehrpunkte von steilen sägezahnförmigen und sinusförmigen Drehmomentverläufen entsprechen in den Integraldarstellungen gleichmäßig verlaufenden konvexen Kurven. Im Gegensatz dazu weist der Drehmomentverlauf eines flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlaufs bei der Integraldarstellung einen linearen Anstieg bis zum Umkehrpunkt auf, ab dem das Drehmoment schlagartig seine Wirkrichtung ändert. Die Unterschiede oder Ähnlichkeiten, die sich bei der Integraldarstellung beim Vergleich der drei Verlaufsarten bei den Rastungen ergeben, werden hingegen nicht erkannt. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Drehmomente im Bereich der Rastpositionen unterhalb oder sehr nahe an den Reizschwellen liegen und deshalb die Unterschiede nicht erkannt werden

können. Insgesamt ergibt sich über alle Versuche eine relative Häufigkeit richtig erkannter Drehmomentverläufe von 51,52%.

In A1.2 wird eine größere Drehmomentamplitude, die bei einer von vier Rastungen auftritt, durchschnittlich mit 68,18% richtig erkannt (vgl. Bild 7.3). Im Vergleich zu den Ergebnissen bei gleichem Skalierungsfaktor von 1,25 aus Kapitel 6 kann damit in dieser Teilaufgabe eine insgesamt höhere Erkennungsrate festgestellt werden. Die Rastung mit der größeren Drehmomentamplitude wird selbst bei den Funktionen C und F mit den geringsten Erkennungsraten noch in 54,55% aller Versuche richtig erkannt. Bei einem sinusförmigen und flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf und einer großen Ausgangsdrehmomentamplitude (Funktionen B und D) werden die abweichenden Rastungen am besten erkannt. Die Erkennungsrate beträgt in beiden Fällen 81,82%. Die These, dass bei gleichem Skalierungsfaktor aber größerem Ausgangsdrehmoment Unterschiede besser erkannt werden (vgl. Kapitel 5.3), kann wegen der Abweichung bei der Funktion F jedoch nur teilweise bestätigt werden. Diese Abweichung muss auf das kleine Probandenkollektiv und die geringe Versuchsanzahl bei dieser Teilaufgabe zurückgeführt werden. Die verglichen mit Kapitel 6 insgesamt höheren Erkennungsraten sind vor allem das Resultat der Eingewöhnungsphase, die einen Lerneffekt und eine Sensibilisierung der zu betätigenden Drehmomente bewirkt.

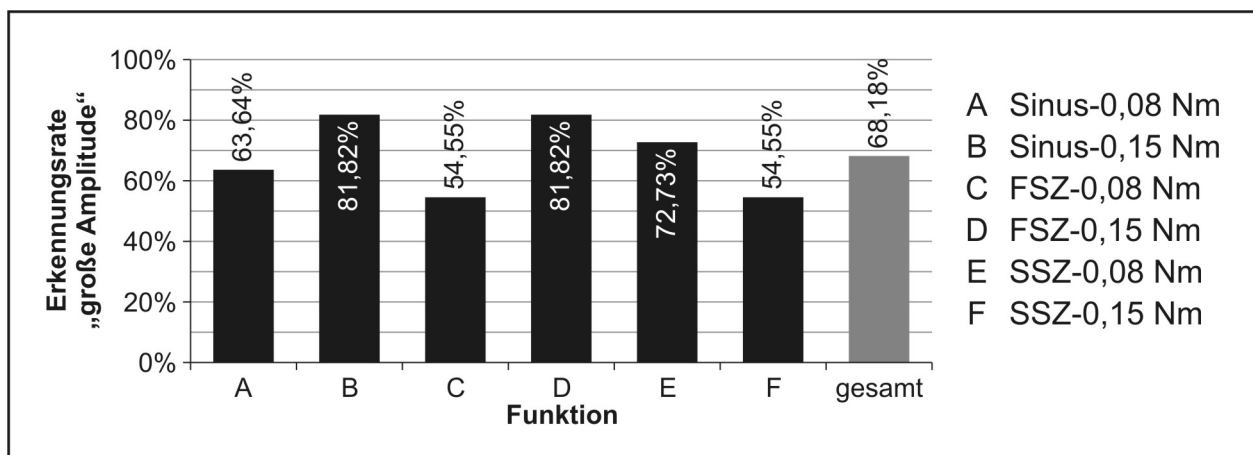


Bild 7.3: Relative Häufigkeit der erkannten größeren Drehmomentamplitude, A1.2

Verkleinert man die Drehmomentamplitude bei einer von vier Rastungen, so fällt die Erkennungsrate etwas geringer aus als bei einer Vergrößerung. Die Auswertung der für diesen Fall durchgeführten Versuche der Teilaufgabe A1.3 ergibt eine gemittelte gesamte Erkennungsrate von 60,61% (vgl. Bild 7.4). Dennoch sinkt auch bei dieser Teilaufgabe die Erkennungsrate der Rastung mit abweichender Drehmomentamplitude bei keiner Funktion unter 50%. Die minimale Erkennungsrate beträgt bei den Funktio-

nen B, D und F 54,55%. Die maximale Erkennungsrate tritt hingegen bei der Funktion C mit einem Wert von 72,73% auf. Eine aufgrund der Verlaufsart besonders hohe oder niedrige Erkennungsrate kann somit keiner der sechs Funktionen zugewiesen werden.

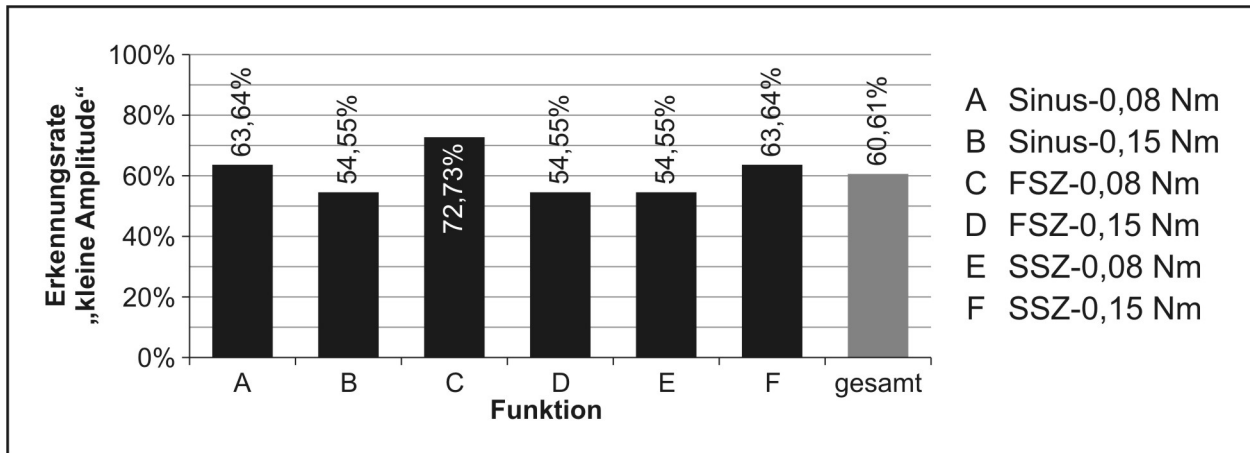


Bild 7.4: Relative Häufigkeit der erkannten kleineren Drehmomentamplitude, A1.3

Die Stellgenauigkeit in A1.2 und A1.3 ist generell sehr hoch. In beiden Teilaufgaben werden insgesamt nur vier Positionierfehler gemacht, die von den Versuchsteilnehmern eigenständig ohne Hinweis des Versuchsleiters auch als Fehler erkannt werden.

7.4 Aufgabengruppe 2 – Lernaufgaben

7.4.1 Versuchsbeschreibung

In der zweiten Aufgabengruppe (A2) sind den Veränderungen des Drehmomentverlaufs Funktionsmerkmale zugeordnet. Diese werden den Versuchsteilnehmern jeweils vor den Teilaufgaben genannt. Die Probanden sollen die Merkmale erkennen und den Aufgabeninhalten entsprechend reagieren. Die zweite Aufgabengruppe besteht aus drei Aufgabenteilen, wovon eine Erkennungs- und zwei reine Positionieraufgaben beinhalten. Auch diese Aufgabengruppe dient dazu, die Versuchsteilnehmer an die dritte Aufgabengruppe mit komplexen Aufgabeninhalten hinzuführen.

Die erste Teilaufgabe der zweiten Aufgabengruppe (A2.1) besteht darin, das Ende einer Funktion zu erkennen und den Drehknopf auf diese Endposition zu bewegen. Als Merkmal für ein Funktionsende wird eine Rastung mit niedrigerer Drehmomentamplitude als die vorherigen eingesetzt, wie es diese auch in A1.3 zu identifizieren galt (vgl. Bild 7.5). Die Anzahl der Rastungen, die bei der Funktion 1 bis zu deren Ende zu stellen sind, variiert dabei von drei bis sieben Rastungen.

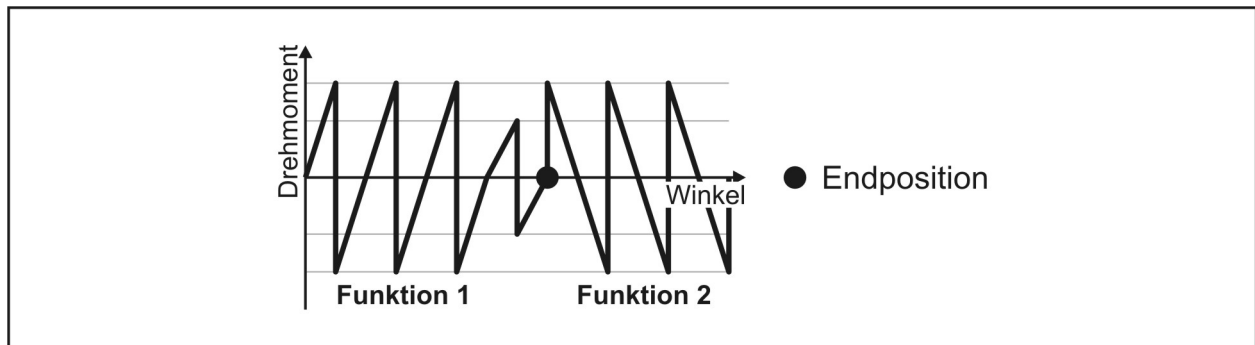


Bild 7.5: Exemplarischer Drehmomentverlauf für A2.1

Als Funktionen werden in dieser Aufgabe die sechs verschiedenen Drehmomentverläufe aus der Eingewöhnungsphase verwendet. Die in der Eingewöhnungsphase eingeführten Buchstaben für jede dieser sechs Verläufe bleiben dabei unverändert. Ein Funktionsende ist neben der Rastung mit niedriger Drehmomentamplitude auch dadurch gekennzeichnet, dass nach dieser Rastung eine neue Funktion mit einem anderen der fünf verbleibenden Drehmomentverläufe beginnt. Zu diesem Zweck werden zwölf Kombinationen ausgewählt, die von jedem Probanden jeweils einmal zu betätigen sind. Die Kombinationen sind so ausgewählt, dass jede der drei möglichen Verlaufsarten einmal bei einer anderen Drehmomentamplitude mit sich selbst und mindestens einmal mit jeder anderen Verlaufsart unabhängig von deren Drehmomentamplitude kombiniert wird. Alle zwölf eingesetzten Kombinationen sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

Lf. Nr.	2. Verlaufsart - Drehmomentamplitude	2. Verlaufsart - Drehmomentamplitude
1	FSZ - 0,08 Nm (Funktion C)	FSZ - 0,15 Nm (Funktion D)
2	SSZ - 0,08 Nm (Funktion E)	FSZ - 0,08 Nm (Funktion C)
3	SSZ - 0,15 Nm (Funktion F)	FSZ - 0,08 Nm (Funktion C)
4	FSZ - 0,08 Nm (Funktion C)	Sinus - 0,08 Nm (Funktion A)
5	FSZ - 0,15 Nm (Funktion D)	SSZ - 0,08 Nm (Funktion F)
6	FSZ - 0,15 Nm (Funktion D)	Sinus - 0,08 Nm (Funktion A)
7	SSZ - 0,08 Nm (Funktion E)	SSZ - 0,15 Nm (Funktion F)
8	SSZ - 0,08 Nm (Funktion E)	Sinus - 0,15 Nm (Funktion B)
9	Sinus - 0,08 Nm (Funktion A)	SSZ - 0,15 Nm (Funktion F)
10	Sinus - 0,15 Nm (Funktion B)	SSZ - 0,15 Nm (Funktion F)
11	Sinus - 0,15 Nm (Funktion B)	Sinus - 0,08 Nm (Funktion A)
12	Sinus - 0,08 Nm (Funktion A)	FSZ - 0,15 Nm (Funktion D)

Tabelle 7.2: Verwendete Kombinationen von Verlaufsarten und Drehmomentamplituden bei A2.1

Während der gesamten Teilaufgabe sind die Versuchsteilnehmer dazu angehalten, den Drehknopf nicht weiter als bis zur Endposition der ersten Funktion zu bewegen. Sollten sie das Stellteil dennoch zu weit bewegen, ist es ihnen gestattet, das Stellteil in die richtige Position zurückzubewegen. Ausgewertet werden dann die Stellgenauigkeiten für die Endposition mit und ohne Korrektur.

Im zweiten Aufgabenteil (A2.2) sollen die Probanden einen präferierten Wert einstellen. Dieser ist durch eine Rastung mit einer höheren Drehmomentamplitude gekennzeichnet. Die Probanden sollen diese Rastung erkennen und den Drehknopf auf die Position direkt nach dieser Rastung bewegen. Im Gegensatz zu A2.1 verändern sich nach einem präferierten Wert die Funktion und somit die Verlaufsart und die ursprüngliche Drehmomentamplitude nicht (vgl. Bild 7.6). Jeder der sechs Drehmomentverläufe A–F aus der Eingewöhnungsphase wird von jedem Versuchsteilnehmer zweimal durchgeführt. Die Rastung mit der abweichenden Drehmomentamplitude kann als dritte bis siebte zu stellende Rastung auftreten. Die Position variiert zufällig zwischen jeder Positionieraufgabe. Auch bei dieser Teilaufgabe können die Versuchsteilnehmer die Endposition bei einer Fehlpositionierung korrigieren. Um die Erkennung der sechs Drehmomentverläufe A–F für die letzte Aufgabengruppe zu bestärken, sollen die Probanden neben der Positionieraufgabe diese sechs Drehmomentverläufe ein weiteres Mal benennen. Als Ergebnis werden somit die Stellgenauigkeit bei korrigierter und unkorrigierter Endposition gewonnen sowie die relative Häufigkeit der richtig erkannten Drehmomentverläufe.

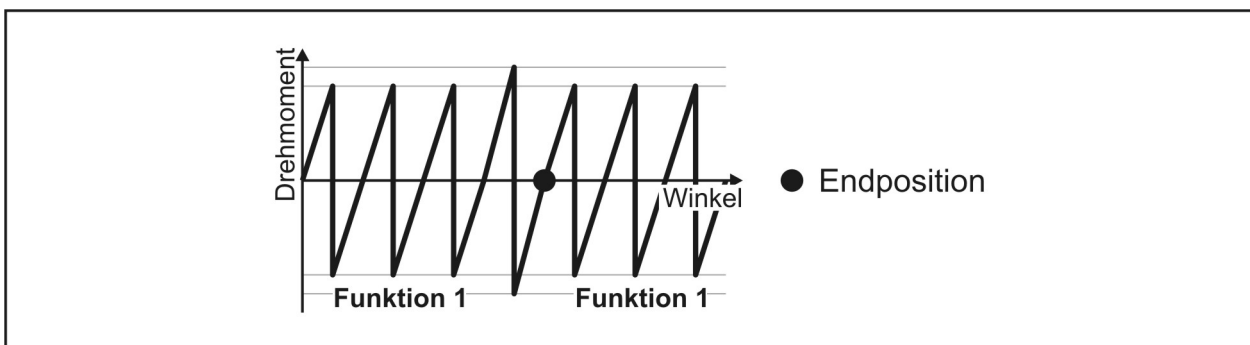


Bild 7.6: Exemplarischer Drehmomentverlauf für A2.2

Neben den Veränderungen einzelner Drehmomentamplituden für präferierte Werte und Funktionsenden wird in der dritten Aufgabengruppe (A2.3) eine weitere Art der haptischen Informationsdarbietung untersucht. Dazu wird eine stufenweise Änderung der Amplituden eines Drehmomentverlaufs eingeführt, um abnehmende oder zunehmende Werte einer Funktion darzustellen. Die Abstufung ist so gewählt, dass die dritte Rastung

einer Skalierung der ersten Rastung um den Faktor 1,25 bei Vergrößerung und 0,8 bei Verkleinerung entspricht.

Zusätzlich zu den größer und kleiner werdenden Drehmomentamplituden werden auch gleichbleibende Drehmomentamplituden eingesetzt, um den Schwierigkeitsgrad der Aufgabe zu erhöhen und die Versuchsteilnehmer wiederum auf die kommenden Aufgaben zu sensibilisieren. Als Ausgangspunkt für die Teilaufgabe werden abermals die sechs Drehmomentverläufe aus der Eingewöhnungsphase verwendet. Die Aufgabe der Probanden besteht nun darin, den Drehknopf um drei Rastungen zu bewegen und dann anzugeben, ob der Funktionswert zunimmt, abnimmt oder gleichbleibt. Ausgewertet werden dann die richtig erkannten Funktionsänderungen sowohl bei der geforderten als auch bei falsch gestellter Endposition.

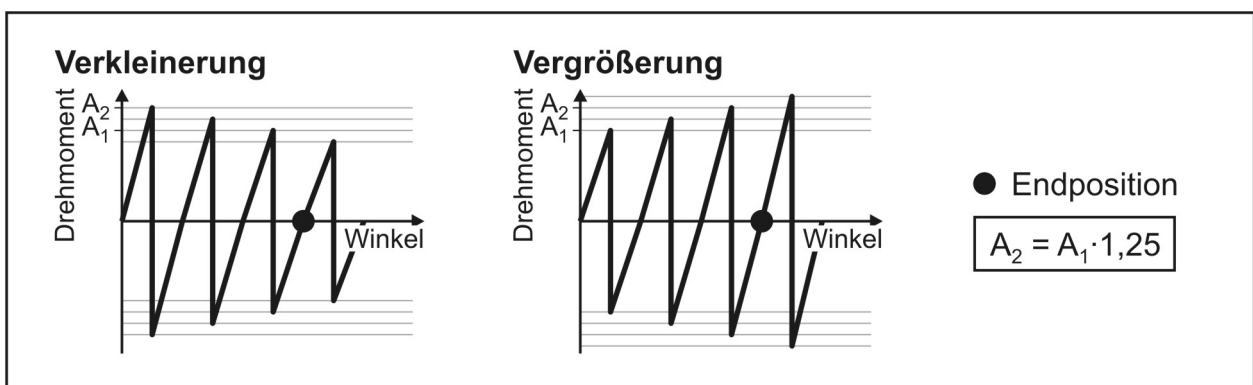


Bild 7.7: Exemplarische Drehmomentverläufe für A2.3

7.4.2 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse aus A2.1, die die Stellgenauigkeit bei einem Funktionsende wiedergeben, sind stark kontrovers (vgl. Bild 7.8). Wertet man nur die Betätigungen aus, bei denen die Endposition auf Antrieb richtig – also ohne Korrektur – gestellt wird, so ergibt sich eine sehr geringe Stellgenauigkeit. Im besten Fall werden so knapp die Hälfte (45,45%) der Positionierungen korrekt durchgeführt. Die Endposition wird vor allem dann richtig gestellt, wenn es sich um die Funktionen D und F handelt, also flachen und steilen sägezahnförmigen Drehmomentverläufe mit einer hohen Ausgangsdrehmomentamplitude. Lediglich bei einem sinusförmigen Verlauf wird ein Funktionsende eher bei einer kleinen Ausgangsdrehmomentamplitude (Funktion A) genauer gestellt als bei einer großen Amplitude.

Zählt man auch die Betätigungen, bei denen die Endpositionen nur durch Korrekturbewegungen richtig gestellt werden, zur Stellgenauigkeit dazu, so erhöhen sich die Werte der Stellgenauigkeit drastisch. Dies gilt vor allem dann, wenn neben der Verlaufsart

auch die Größe der Drehmomentamplitude wechselt. Die Versuchsteilnehmer erkennen das Funktionsende in diesen Fällen hauptsächlich durch die deutliche Veränderung der haptischen Rückmeldung. Die meisten Versuchsteilnehmer korrigieren die Endposition bei einem solchen Wechsel direkt nachdem oder noch während sie die erste Rastung der zweiten Funktion betätigen bzw. betätigt haben. So können bei zwei der getesteten Drehmomentverläufe Stellgenauigkeiten von 100% festgestellt werden.

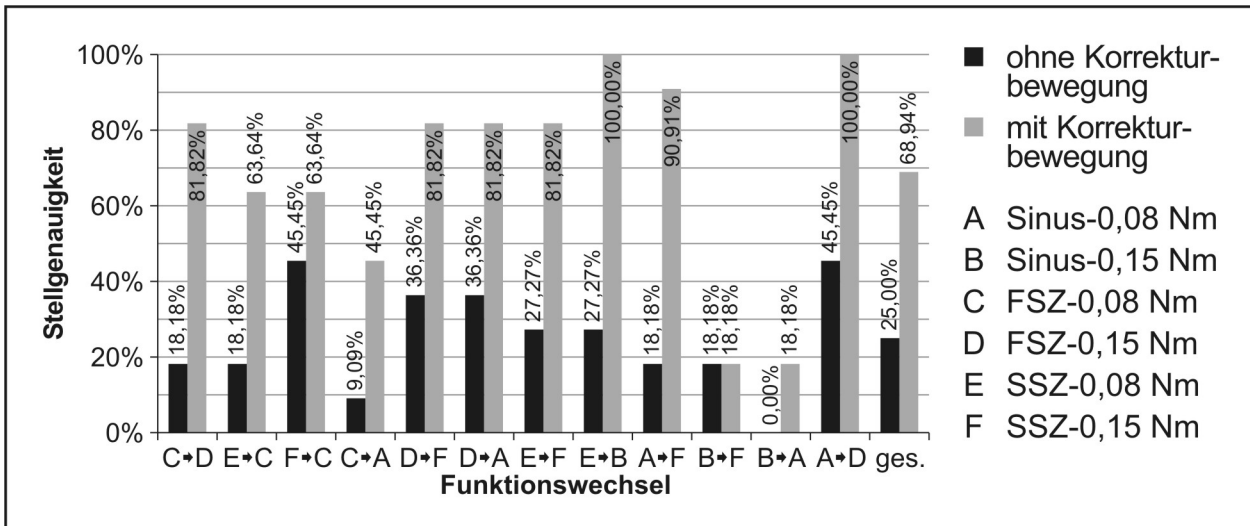


Bild 7.8: Stellgenauigkeit bei einem Funktionsende, A2.1

Besonders niedrig ist die Stellgenauigkeit trotz Berücksichtigung der Ergebnisse mit Korrekturbewegung bei einem Wechsel von einem sinusförmigen Drehmomentverlauf mit großer Drehmomentamplitude hin zu derselben Verlaufsart mit kleiner Amplitude (Funktion B→A) und bei einem Wechsel von einem sinusförmigen Drehmomentverlauf hin zu einem steilen sägezahnförmigen Verlauf ohne Änderung der Ausgangsdrehmomentamplitude (Funktion B→F). Letzteres lässt sich wiederum durch die Ergebnisse aus A1.1 erklären, wonach die beiden Funktionen bei der Betätigung eine sich stark ähnelnde haptische Rückmeldung geben. Das Merkmal eines Funktionsendes, das durch eine kleinere Drehmomentamplitude repräsentiert wird, wird hier, wie es generell aus den Ergebnissen unter Berücksichtigung der Korrektur ersichtlich ist, nur unzureichend erkannt und somit auch nur selten als das Merkmal genutzt, das es für das korrekte Einstellen der Endposition zu erkennen gilt.

Die Stellgenauigkeiten in A2.2 für das Einstellen von präferierten Werten unterscheiden sich bei der Berücksichtigung der Korrektur der Endposition nicht so stark von den Ergebnissen ohne Berücksichtigung der Korrektur (vgl. Bild 7.9). Im Gegensatz zu A2.1 haben die Versuchsteilnehmer bei Teilaufgabe A2.2 nur die Möglichkeit, die geforderte Endposition durch die größere Drehmomentamplitude zu erkennen. Sie können dabei

nicht auf ein weiteres Merkmal, z.B. eine sich verändernde Funktion, zurückgreifen. Diese Verringerung haptisch erkennbarer Merkmale führt zu einer erhöhten Aufmerksamkeit der Versuchsteilnehmer für Schwankungen der Drehmomentamplitude und damit zu höheren Stellgenauigkeiten, ohne dass dafür eine Korrektur notwendig wäre. Da die Stellgenauigkeit bei dieser Teilaufgabe stark von der Erkennung der Rastung mit der größeren Drehmomentamplitude abhängt, lassen sich die Ergebnisse mit denen aus A1.2 vergleichen. Es zeigt sich jedoch, dass die Werte der Stellgenauigkeit in A2.2 stets unter denen der Erkennungsrate aus A1.2 bleiben. Während die Erkennungsrate der Position der abweichenden Drehmomentamplituden stets mehr als 50% beträgt, wird die Rastung mit der größeren Drehmomentamplitude im besten Fall zu 50% auf Antrieb erkannt und dementsprechend oft korrekt gestellt. Selbst mit Einbeziehung der Ergebnisse, bei denen eine Korrekturbewegung notwendig ist, um die geforderte Endposition richtig einzustellen, erhöht sich die Stellgenauigkeit nur auf einen Maximalwert von 63,64% bei der Funktion D und bleibt damit unter den Ergebnissen von A1.2.

Bei allen sechs Verlaufsarten lässt sich der Einfluss der Größe der Ausgangsdrehmomentamplitude feststellen. Die Stellgenauigkeiten, die bei A2.2 stark von den Erkennungsraten abhängen, sind bei allen drei eingesetzten Verlaufsarten bei jeweils der höheren Ausgangsdrehmomentamplitude größer. Fasst man die Ergebnisse aller Funktionen zusammen, erhält man eine gemittelte Stellgenauigkeit von 41,67% ohne Berücksichtigung von Korrekturbewegungen und von 53,03% mit einer solchen Berücksichtigung.

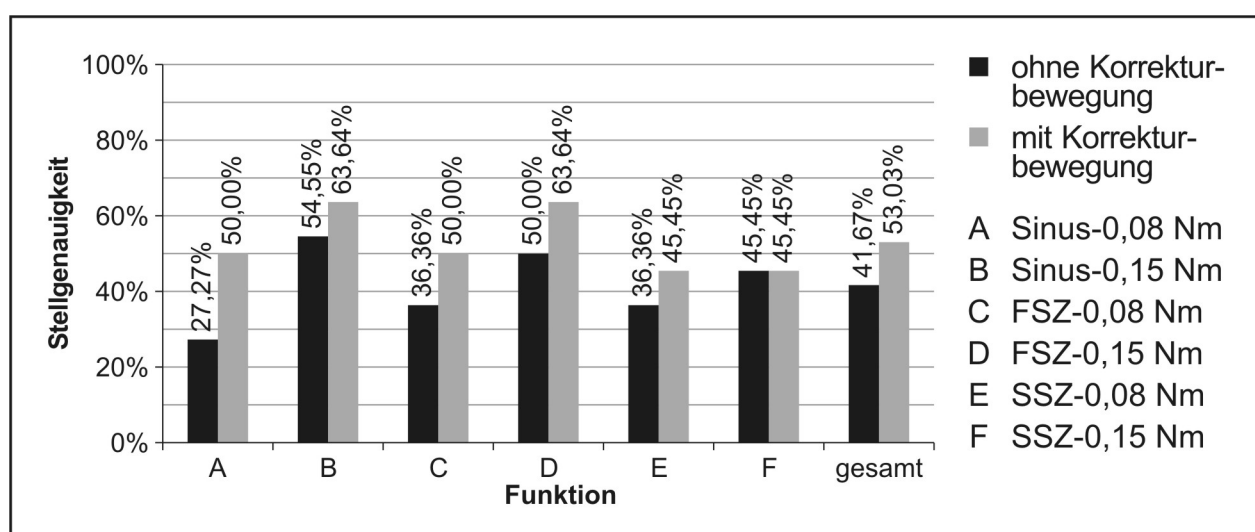


Bild 7.9: Stellgenauigkeit bei einem präferierten Wert, A2.2

Die Auswertung der Funktionserkennung in A2.2 zeigt trotz fortgeschrittener Versuchsdauer keine nennenswerte Veränderung der Ergebnisse (vgl. Bild 7.10). Die gemittelte

Funktionserkennung aller sechs Funktionen erhöht sich minimal auf einen Wert von 54,55%. Wie schon zuvor werden die Funktionen A mit E und B mit F miteinander verwechselt, so dass sich bei diesen vier Funktionen sehr niedrige Erkennungsraten ergeben. Die Funktionen C und D, die einen flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf repräsentieren, werden hingegen erneut am ehesten richtig erkannt. Die Erkennungsrate liegt bei diesen beiden Funktionen bei über 80%.

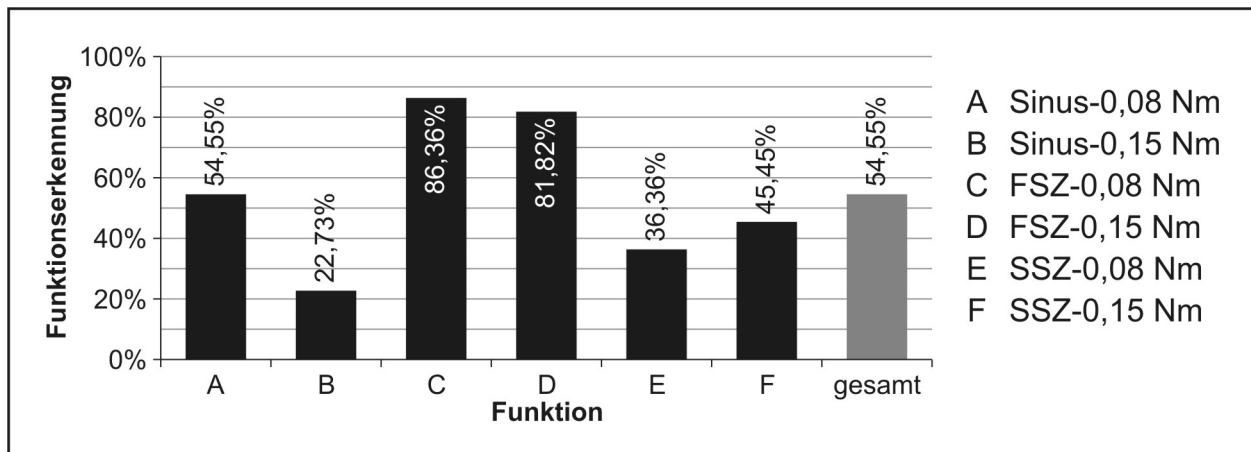


Bild 7.10: Relative Häufigkeit richtig erkannter Funktionen, A2.2

Die Ergebnisse der Teilaufgabe A2.3 sind in Bild 7.11 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass sich eine hohe Erkennung einer gleichbleibenden oder sich stetig verändernden Drehmomentamplitude nur schwer in Verbindung mit einer bestimmten Verlaufsart oder Ausgangsdrehmomentamplitude bringen lässt. So sticht keine der sechs Funktionen A–F durch eine besonders hohe Erkennungsrate hervor. Es besteht jedoch über fast alle Funktionen die Tendenz, dass eine stetig abnehmende Drehmomentamplitude eher erkannt wird als eine stetig zunehmende oder eine gleichbleibende. Bei einer schrittweisen Verkleinerung der Drehmomentamplitude ergibt sich bei vier der sechs Funktionen eine Erkennungsrate, die gleich oder größer als 80% ist. Diese vier Werte stellen auch gleichzeitig die höchsten Erkennungsraten in dieser Teilaufgabe dar. Insgesamt ergibt sich in A2.3 eine gemittelte Erkennungsrate von 61,36%. Dieser Wert ähnelt den gemittelten Gesamtergebnissen aus A1.2 und A1.3, in denen sich die Drehmomentamplitude bei einer einzigen Rastung um denselben Skalierungsfaktor ändert, der in A2.3 erst nach zwei Rastungen erreicht wird. Somit führt eine stufenweise Veränderung der Drehmomentamplitude zu keiner deutlichen Änderung der Erkennungsrate. Positionierfehler werden in dieser Aufgabe nahezu keine gemacht. Lediglich bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf mit zu- und abnehmender Drehmomentamplitude wird die Endposition in wenigen Fällen überdreht. Vernachlässigt man

die Antworten der Probanden bei den Fehlpositionierungen zur Berechnung der Erkennungsrate, so erhält man in diesen beiden Fällen deutlich höhere Erkennungsraten. Sie ändern sich bei Funktion D von 42,86% und 57,14% auf jeweils 71,43%. Wegen des seltenen Auftretens von Fehlpositionierungen lassen sich jedoch keine generellen Rückschlüsse ihres Einflusses auf die Erkennungsrate ziehen. Auf eine Darstellung dieser Ergebnisse in Bild 7.11 sei wegen der geringen Abweichung verzichtet.

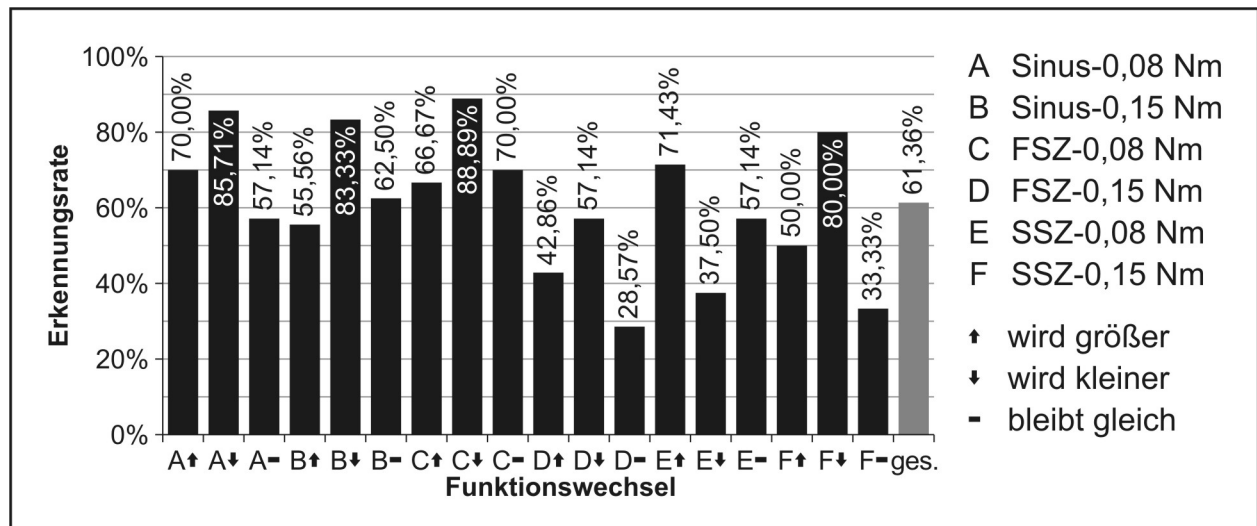


Bild 7.11: Relative Häufigkeit richtig erkannter Drehmomentänderungen, A2.3

7.5 Aufgabengruppe 3 – Dekodieraufgaben

7.5.1 Versuchsbeschreibung

In der letzten Aufgabengruppe (A3) werden alle Inhalte der vorherigen Aufgabengruppen bei einer Positionierungs- und bei einer Erkennungsaufgabe umgesetzt. Die Ergebnisse geben indirekt Aufschluss über den Lerneffekt, der sich bis zu dieser Aufgabengruppe eingestellt hat. Für die beiden Teilaufgaben werden zehn Drehmomentverläufe aus den sechs Verläufen der Eingewöhnungsphase und mit den Merkmalen „präferierter Wert“, „Funktionsende“ und „abnehmender, zunehmender oder gleichbleibender Funktionswert“ zufällig zusammengestellt. Die zehn Drehmomentverläufe sind im Anhang zu finden. Jeder dieser Drehmomentverläufe erstreckt sich über 360°, wobei es keine dezidierte Start- und Endposition gibt.

In der ersten Teilaufgabe der dritten Aufgabengruppe (A3.1) sollen die Probanden die Merkmale und die zugeordneten Buchstaben der Funktionen nennen, während sie diese betätigen. Ihnen werden dazu nacheinander fünf der zehn erstellten Drehmo-

mentverläufe auf das Stellteil appliziert. Die Auswahl erfolgt so, dass jeder Versuchsteilnehmer ca. 30 erkennbare Merkmale inklusive der Funktionen betätigt. Die Drehmomentverläufe sowie die Endpositionen werden dafür bei jedem Probanden variiert. Dabei umfassen die Drehwinkel einen Bereich zwischen 72° – 192° . Dadurch kommt es auch vor, dass die Probanden während einer Betätigung umgreifen müssen. Die Endposition wird ihnen vom Versuchsleiter während jeder Betätigung genannt. Als Ergebnis erhält man den prozentuellen Anteil richtig erkannter Merkmale jedes Versuchsteilnehmers sowie die aus diesem Ergebnis gemittelte Erkennungsrate aller Teilnehmer.

Bei der letzten Teilaufgabe (A3.2) handelt es sich um eine Positionieraufgabe, in der die Versuchsteilnehmer den Drehknopf bis einschließlich zum vorgegebenen Merkmal bewegen sollen. Das Merkmal wird ihnen vor einer Betätigung genannt. Als Merkmale können präferierte Werte, Funktionsenden oder eine vorgegebene Nummer einer Rastung bei einer vorgegebenen Funktion sein. Auch hier werden fünf oder sechs der zehn für diese Aufgabengruppe erstellten Drehmomentverläufe bei jedem Probanden zufällig ausgewählt. Bei jedem der zehn Drehmomentverläufe sind die Startposition sowie das einzustellende Merkmal und damit auch gleichzeitig die Endposition vorgegeben (vgl. Tabelle 7.3). In dieser Teilaufgabe werden Drehwinkel von 120° – 360° verwendet, so dass es fast immer zu einem Umgreifen während einer Betätigung kommt. Wie schon in den Aufgaben A2.1 und A2.2 dürfen die Probanden auch in Teilaufgabe A3.2 die Endposition korrigieren. Die relative Häufigkeit der richtig gestellten Endposition jeder der zehn einzustellenden Merkmale sowie die gesamte relative Häufigkeit sind das Ergebnis dieser Teilaufgabe.

Verlauf-Nr.	Start-position	End-position	Einzustellendes Merkmal
1	216°	72°	Präferierter Wert bei der Funktion A
2	288°	120°	Ende der Funktion C
3	264°	168°	Zweitkleinster Wert der Funktion C
4	48°	168°	Eine Rastung nach dem präferierten Wert bei der Funktion B
5	288°	96°	Zweigrößter Wert der Funktion E
6	72°	216°	Dritte Rastung bei der Funktion A
7	72°	288°	Ende der Funktion E
8	192°	336°	Präferierter Wert bei der Funktion C
9	144°	264°	Präferierter Wert bei der Funktion D
10	0°	360°	Ende der Funktion B

Tabelle 7.3: Verwendete Kombinationen von Drehmomentverläufen und -amplituden

7.5.2 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse aus A3.1, in der die Probanden während der Betätigung des Stellteils die dabei erkannten Merkmale aufzählen sollten, sind in Bild 7.12 dargestellt. Im besten Fall werden dabei mehr als 85% der vorhandenen Merkmale von einem Versuchsteilnehmer richtig erkannt. Dass die Ergebnisse sehr stark von den haptischen Wahrnehmungsfähigkeiten der einzelnen Versuchsteilnehmer abhängen, zeigt sich an der großen Schwankung der Ergebnisse. So werden von einem Probanden nur 34,82% der vorhandenen Merkmale erkannt. Trotz der bis dahin fortgeschrittenen Versuchsdauer, die einen Lerneffekt vermuten lässt, fällt die Erkennung der vorhandenen haptischen Merkmale insgesamt gering aus. So werden nur von zwei Probanden mehr als 80% der vorhandenen Merkmale richtig erkannt. Der Großteil der elf Probanden erkennt hingegen nur etwas mehr als die Hälfte der in ihren Versuchen vorhandenen Merkmale richtig. Die über alle Probanden gemittelte Erkennungsrate beträgt deshalb nur 62,22%.

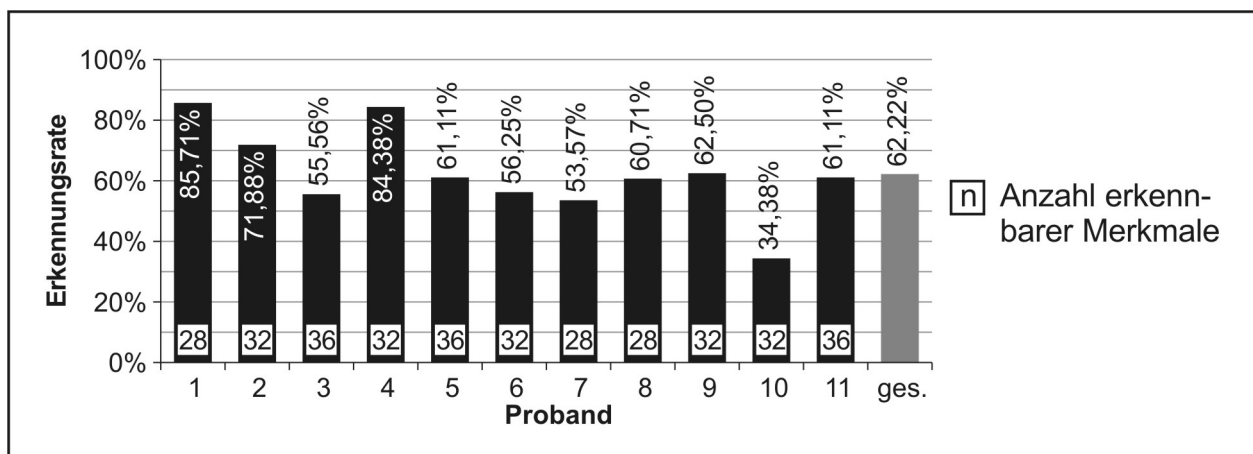


Bild 7.12: Relative Häufigkeit richtig erkannter Merkmale, A3.1

Die Ergebnisse der Stellgenauigkeiten zu dem Aufgabenteil A3.2 sind in Bild 7.13 zusammengefasst dargestellt. Betrachtet man nur die Ergebnisse, in denen keine Korrekturbewegung zur Erreichung der geforderten Endposition gemacht wurde, wird eine maximale Stellgenauigkeit von 60,00% erreicht. Bei den meisten Positionieraufgaben beträgt die Stellgenauigkeit ohne Berücksichtigung der Ergebnisse mit Korrekturbewegung jedoch weniger als 30%. Die Aufgaben bei den Verläufen Nummer 7 und 10 werden ohne Korrekturbewegungen sogar von keinem Probanden korrekt erfüllt.

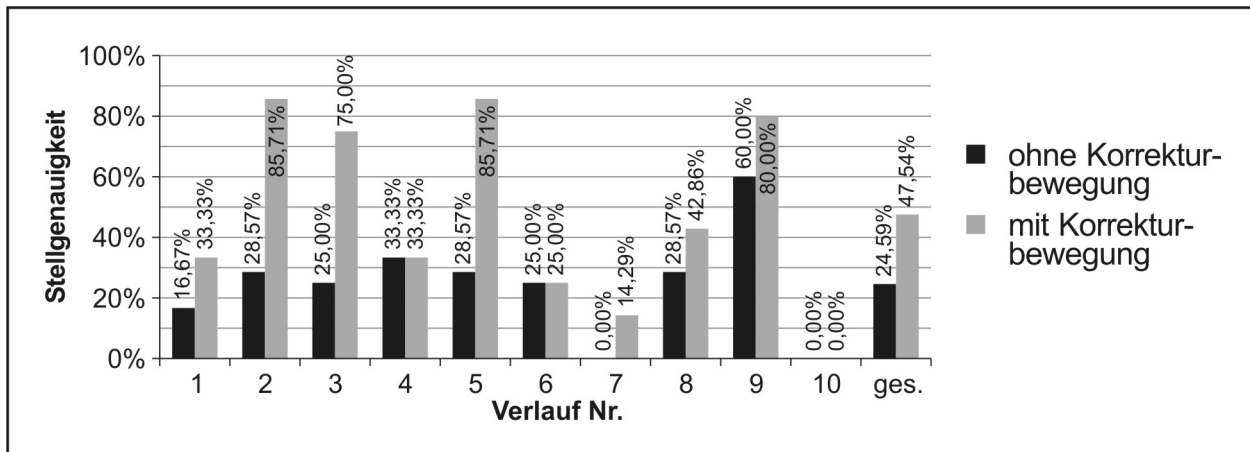


Bild 7.13: Stellgenauigkeit bei vorgegebenen einzustellenden Merkmalen, A3.2

Wertet man auch die Betätigungen, in denen die geforderte Endposition mit einer zusätzlichen Korrekturbewegung erreicht wird, zur Berechnung der Stellgenauigkeit aus, erhöhen sich die Stellgenauigkeiten teilweise deutlich. Bei vier Positionieraufgaben werden so Stellgenauigkeiten mit Werten von 75,00% bis 85,71% erreicht. Allerdings ist mit Ausnahme von einer dieser vier Aufgaben ergänzend zu erwähnen, dass die geforderten einzustellenden Merkmale häufig nur durch Zuhilfenahme eines weiteren darauffolgenden Merkmals, nämlich der Änderung der Verlaufsart, erkannt und korrekt eingestellt werden. Bei den Aufgaben, in denen sich die Verlaufsart nicht ändert oder eine Änderung zwischen zwei Verlaufsarten mit ähnlicher haptischer Rückmeldung (vgl. Ergebnisse aus A1.1 und A2.2) erfolgt, erhöht sich die Stellgenauigkeit trotz des Einbeziehens der Ergebnisse mit korrigierten Endpositionen nicht oder nur vergleichsweise gering. Ohne und mit dem Einbeziehen der Ergebnisse bei korrigierter Endposition ergibt sich so eine gemittelte Stellgenauigkeit von 24,59% bzw. 47,54%.

7.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Versuch, die Ergebnisse aller vorangegangener Untersuchungen in einer anwendungsorientierten Untersuchung zusammenzuführen, führt trotz einer Eingewöhnungs- und Einlernphase nicht zu einer Erhöhung der Erkennungsraten und der Stellgenauigkeiten. Gerade bei Aufgaben, in denen es ein einzelnes haptisch dargestelltes Merkmal unter vielen zu erkennen gilt, sind viele der in dieser Untersuchung teilnehmenden Versuchspersonen überfordert. Generell kann eine hohe kognitive Belastung der Probanden bei den Versuchen festgestellt werden, die sich durch das Ausblenden visueller und akustischer Reize, z.B. durch das Schließen der Augen oder einer verzögerten Antwort auf Fragen, äußert. Die Gründe für die Überforderung können zum einen ungünstig ausgewählte Drehmomentänderungen sein, die nur schwer zu erkennen sind,

wie die Verringerung der Drehmomentamplitude zur Symbolisierung eines Funktionsendes. Zum anderen kann die Menge an Informationen, die unterschiedlich haptisch dargestellt werden, die Ursache für die Überforderung sein. Eine noch immer zu kurze Einlernzeit kann ebenfalls als Grund genannt werden.

Drei Versuchspersonen erreichen in dieser Untersuchung bei fast allen Teilaufgaben besonders hohe Ergebnisse. Auffällig ist dabei, dass es sich bei diesen Personen um diejenigen handelt, die in ihren Berufen fast ausschließlich handwerkliche Tätigkeiten ausüben. Die geringsten Stellgenauigkeiten und Erkennungsraten werden hingegen von dem einzigen Versuchsteilnehmer, der fast ausschließlich Bürotätigkeiten ausübt, erreicht. Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl in dieser Untersuchung müssen diese Aussagen jedoch kritisch betrachtet werden.

Aus der Untersuchung kann der Schluss gezogen werden, dass man Verlaufsarten, deren Drehmomentverläufe deutlich verschieden sind, nicht zwangsläufig voneinander unterscheiden kann. In der hier durchgeführten Untersuchung werden vor allem ein steiler sägezahnförmiger und ein sinusförmiger Drehmomentverlauf miteinander verwechselt. Einzig durch die Hinzunahme der Integraldarstellung der Drehmomentverläufe lässt sich dieser Effekt erklären.

Große Amplitudensprünge mit einem Skalierungsfaktor von 1,875, die zur Darstellung unterschiedlicher Funktionen eingesetzt werden, werden in dieser Untersuchung zwar sehr häufig erkannt, die Ergebnisse kommen wegen der gleichzeitig auftretenden Verwechslung verschiedener Verlaufsarten jedoch kaum zum Ausdruck. Einzig ein flacher sägezahnförmiger Drehmomentverlauf führt zu Ergebnissen, die sich mit den Erkennungsraten aus der vorangegangenen Untersuchung vergleichen lassen. Eine vollständige Unterscheidbarkeit stellt sich jedoch auch hier nicht ein.

Generell kann in dieser Untersuchung festgestellt werden, dass die Stellgenauigkeit neben dem Einfluss des Drehmomentverlaufs vor allem von der Fähigkeit der Probanden abhängt, haptisch dargestellte Informationen zu erkennen. Positionierfehler passieren demnach vor allem dann, wenn Informationen nur schwer oder gar nicht erkannt werden. Korrekturen der Endposition sind dann die Folge.

8 Gestaltungshinweise für multifunktionale Stellteile

Aus den Ergebnissen der vorherigen Untersuchungen in den Kapiteln 5–7 lassen sich allgemeine Hinweise für die Gestaltung adaptiver multifunktionaler Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung ableiten. Zu diesem Zweck müssen im Vorfeld die Einsatzbedingungen sowie die Anforderungen für die Betätigung und Benutzung festgelegt werden. Damit lassen sich Gestaltungshinweise nach der Bedienhäufigkeit und -dauer sowie nach dem Einsatzzweck und dem Einsatzgebiet unterscheiden. In Tabelle 8.1 sind diese vier Kriterien und die dazugehörigen Ausprägungen aufgelistet. Dabei sind die Felder grau gekennzeichnet, die beim Einsatz eines multifunktionalen Stellteils besondere Sorgsamkeit bei der Auswahl geeigneter Drehmomentverläufe erfordern.

Bedienhäufigkeit	selten <i>≤ einmal pro Woche</i>	oft <i>> einmal pro Woche</i>
Bediendauer	kurz <i>wenige Minuten</i>	lang <i>mehr als eine Stunde</i>
Einsatzzweck	unterstützend <i>Zusätzlich zur haptischen Anzeige werden Informationen redundant visuell oder akustisch dargestellt</i>	ersetzend <i>Informationen werden nur haptisch dargestellt</i>
Einsatzgebiet	sicherheitskritisch <i>Eingabefehler können schwerwiegende finanzielle und gesundheitliche Folgen nach sich ziehen</i>	nicht kritisch <i>Eingabefehler können problemlos korrigiert werden</i>

Tabelle 8.1: Kriterien für die Auswahl passender Gestaltungshinweise (grau hinterlegt sind besonders kritische Fälle)

Das Kriterium „Bedienhäufigkeit“ wirkt sich vor allem auf die Anzahl dargestellter Informationen und die Darstellungsart aus. Bei seltener Bedienung ist der Benutzer nur sehr wenig auf ein multifunktionales Stellteil mit aktiver haptischer Rückmeldung sensibilisiert. Aufgrund mangelnder Erfahrung ist nicht davon auszugehen, dass die haptisch dargestellten Informationen richtig interpretiert werden können. Bei einer seltenen Bedienung ist deshalb die Anzahl haptisch dargestellter Informationen sehr gering zu halten. Gleichzeitig müssen Unterschiede innerhalb des Drehmomentverlaufs sehr deutliche Ausprägungen besitzen. Bei seltener Bedienung eines multifunktionalen Stellteils beträgt die sinnvolle Anzahl von Informationen maximal vier, die sich zum

Beispiel über zwei verschiedene Verlaufsarten und zwei Ausgangsdrehmomentamplituden darstellen lassen. Als Verlaufsarten sollten für diesen Zweck ein flacher sägezahnförmiger Drehmomentverlauf mit einem sinusförmigen oder einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf verwendet werden. Die beiden letzteren sollten aufgrund ihrer schweren Unterscheidbarkeit nicht gleichzeitig eingesetzt werden. Der Skalierungsfaktor von unterschiedlichen Drehmomentamplituden sollte mindestens 1,5 betragen, damit der Großteil der Benutzer diesen Unterschied sicher erkennen kann.

Ähnlich wie mit der Bedienhäufigkeit verhält es sich mit der Bediendauer. Bei einer kurzen Bediendauer lassen sich ebenfalls nur sehr wenige Informationen haptisch darstellen. Der Grund ist hier jedoch nicht zwingend die mangelnde Erfahrung, sondern vielmehr die fehlende Eingewöhnungszeit. Den Benutzern steht nur wenig Zeit zur Verfügung, sich an die wirkenden Drehmomente zu gewöhnen. Eine ebenfalls kurze Bediendauer lag auch bei den Untersuchungen zur Unterschiedsschwelle (vgl. Kapitel 5.3) und bei der kombinierten Untersuchung (vgl. Kapitel 6) vor. In beiden Untersuchungen zeigte sich, dass Unterschiede der Drehmomentamplitude unterhalb eines Skalierungsfaktors von 1,25 nur mit höchster Konzentration erkannt werden. Um neben haptischen Reizen die Aufnahmefähigkeit von visuellen oder akustischen Reizen zu gewährleisten, sollte der Skalierungsfaktor bei Sprüngen der Drehmomentamplitude den Wert von 1,25 deshalb nicht unterschreiten.

Die fehlende Eingewöhnungszeit bei einer kurzen Bediendauer wirkt sich auch auf die Stellgenauigkeit aus. Die gezielte Einbringung von Reibung in das Stellteilsystem und die Vermeidung von Drehmomentamplituden, die kleiner als 0,06 Nm sind, sollten deshalb bevorzugt werden, ebenso wie die seltene Verwendung eines flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlaufs.

Bei einer langen Bediendauer sind speziell die Komfortbereiche zu beachten. Große Drehmomentamplituden mit Werten von 0,15 Nm und höher sollten nur in geringem Umfang eingesetzt werden, da sonst Ermüdungserscheinungen auftreten können, die sowohl die Stellgenauigkeit als auch die Erkennungsrate negativ beeinflussen. Entsprechende Aussagen wurden bereits von Teilnehmern der letzten anwendungsorientierten Untersuchung in Kapitel 7 geäußert.

Soll ein multifunktionales Stellteil unterstützend eingesetzt werden, also neben einer visuellen oder akustischen Anzeige eine redundante haptische Anzeige verkörpern, so stehen weniger die Stellgenauigkeit und die Unterschiedserkennung im Vordergrund als vielmehr die Komfortbereiche. Bei einer diskreten Eingabeart sollten sich nach Kapitel 5.2 die Drehmomentamplituden vorwiegend um 0,09 Nm bewegen.

Sollen mit einem multifunktionalen Stellteil hingegen visuelle und akustische Anzeigen ersetzt werden, tritt besonders die Unterschiedserkennung in den Vordergrund. Die Unterschiedsgröße der Drehmomentamplituden hängt dann vor allem von der Anzahl der darzustellenden Informationen und der haptischen Wahrnehmungsfähigkeit der Benutzer ab. Als quantitative Angaben für den Skalierungsfaktor kommen alle zuvor ermittelten Skalierungsfaktoren von 1,14 bis 1,875 in Frage, da sich diese als sinnvoll erwiesen haben.

Der Einsatz eines adaptiven multifunktionalen Stellteils mit aktiver haptischer Rückmeldung ist bei einem sicherheitskritischen Einsatzgebiet nur eingeschränkt zu empfehlen, da sich gezeigt hat, dass auch bei optimalen Versuchsbedingungen noch immer Positionierfehler und eine nicht vollständige Erkennung aller haptisch dargestellten Informationen vorkommen können. Bei einem sicherheitskritischen Einsatzgebiet sollte eine aktive Drehmomenterzeugung deshalb vor allem zur Erhöhung der Stellgenauigkeit eingesetzt werden. Die aktive Drehmomenterzeugung kann zu diesem Zweck neben der künstlichen Erzeugung von Reibung im Stellteilsystem auch zur Auswahl geeigneter Verlaufsarten und Verlaufsparemeter genutzt werden. Als Beispiele zur Erhöhung der Stellgenauigkeit lassen sich ein steiler sägezahnförmiger Drehmomentverlauf, eine Drehmomentamplitude von mindestens 0,06 Nm und ein Rastwinkel von mindestens 20° nennen.

Die Kriterien zur Auswahl geeigneter Gestaltungshinweise hängen teils voneinander ab, teils schließen sie sich gegenseitig aus. Konkrete Gestaltungshinweise lassen sich deshalb oft nur im Anwendungskontext machen. Durch die Kombination der in Tabelle 8.1 aufgelisteten Kriterien und die sich daraus ergebenden oben aufgeführten Anforderungen für jedes Kriterium lassen sich jedoch allgemeine Vorschläge zur Anzahl und Art haptisch dargestellter Informationen geben. Durch die Kombination jeder Ausprägung aller vier Kriterien ergeben sich 16 mögliche Anwendungsfälle. Davon sind vier Fälle nicht sinnvoll, in denen ein ersetzender Einsatzzweck und ein sicherheitskritisches

Einsatzgebiet gleichzeitig vorkommen. Ein sicherheitskritisches Einsatzgebiet erfordert immer auch eine visuelle oder akustische Anzeige, in der die derzeit aktuelle Funktion und deren Wert dargestellt und vom Benutzer überprüft werden können. Der Einsatz eines adaptiven multifunktionalen Stellteils als Ersatz für eine visuelle oder akustische Anzeige würde dieser Bedingung widersprechen. Aus diesem Grund ergeben sich zwölf Anwendungsfälle (vgl. Tabelle 8.2), die sich wiederum vier Gruppen zuweisen lassen.

	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Bedienhäufigkeit	oft	oft	oft
Bediendauer	kurz	kurz	kurz
Einsatzzweck	unterstützend	unterstützend	ersetzend
Einsatzgebiet	nicht kritisch	sicherheitskritisch	nicht kritisch
Zuordnung	<i>Gruppe 2-3</i>	<i>Gruppe 1-2</i>	<i>Gruppe 1</i>
	Fall 4	Fall 5	Fall 6
Bedienhäufigkeit	selten	selten	selten
Bediendauer	kurz	kurz	kurz
Einsatzzweck	unterstützend	unterstützend	ersetzend
Einsatzgebiet	nicht kritisch	sicherheitskritisch	nicht kritisch
Zuordnung	<i>Gruppe 2</i>	<i>Gruppe 1</i>	<i>Gruppe 1</i>
	Fall 7	Fall 8	Fall 9
Bedienhäufigkeit	oft	oft	oft
Bediendauer	lang	lang	lang
Einsatzzweck	unterstützend	unterstützend	ersetzend
Einsatzgebiet	nicht kritisch	sicherheitskritisch	nicht kritisch
Zuordnung	<i>Gruppe 4</i>	<i>Gruppe 2</i>	<i>Gruppe 3</i>
	Fall 10	Fall 11	Fall 12
Bedienhäufigkeit	selten	selten	selten
Bediendauer	lang	lang	lang
Einsatzzweck	unterstützend	unterstützend	ersetzend
Einsatzgebiet	nicht kritisch	sicherheitskritisch	nicht kritisch
Zuordnung	<i>Gruppe 2</i>	<i>Gruppe 1-2</i>	<i>Gruppe 1</i>

Tabelle 8.2: Fallunterscheidung und Gruppenzuordnung anhand von Auswahlkriterien

Die Gruppen geben indirekt die empfohlene Anzahl der Informationen wider, die haptisch an den Benutzer übertragen werden sollten. Gleichzeitig wird durch die Gruppen angegeben, welche Unterscheidungsmerkmale für verschiedene Informationen genutzt werden sollten. Es werden insgesamt vier Gruppen unterschieden (vgl. Tabelle 8.3). Die Gruppe 1 beinhaltet danach die wenigsten, Gruppe 4 hingegen die meisten Informationen, die auf unterschiedliche Weise haptisch dargestellt werden sollen.

Gruppe 1	Maximal zwei verschiedene Verlaufsarten
Gruppe 2	Zwei Verlaufsarten Zwei Ausgangsdrehmomentamplituden
Gruppe 3	Zwei Verlaufsarten Zwei Ausgangsdrehmomentamplituden Ein bis zwei Funktionsmerkmale
Gruppe 4	Zwei oder mehr verschiedene Verlaufsarten Zwei oder mehr Ausgangsdrehmomentamplituden Vier oder mehr Funktionsmerkmale

Tabelle 8.3: Gestaltungsvorschläge in Abhängigkeit von der Einsatzgruppe

Alle vorherigen Angaben beziehen sich auf ein Stellteil mit diskreter Eingabeart. Funktionsmerkmale, wie präferierte Werte, Funktionsenden und zu- oder abnehmende Werte, lassen sich bei dieser Eingabeart durch unterschiedliche Verlaufparameter darstellen. Davon bietet sich besonders Variation der Drehmomentamplitude zur haptischen Darstellung der Funktionsmerkmale an. Präferierte Werte und zu- oder abnehmende Funktionswerte werden durch eine einzelne höhere Drehmomentamplitude bzw. durch die schrittweise Veränderung der Drehmomentamplitude gut erkannt. Weitere Funktionsmerkmale können über den Rastwinkel dargestellt werden. Der Rastwinkel ist jedoch nur eingeschränkt als Variable geeignet, da er für eine hohe Stellgenauigkeit einen Mindestwert von 20° betragen sollte, und zu große Rastwinkel zu einem Stellweg führen, der entweder nicht komfortabel oder nur durch mehrfaches Umgreifen zu erreichen ist. Um die Erkennung eines Funktionsendes (vgl. Kapitel 7) zu erhöhen, kann allerdings eine Kombination aus leicht vergrößertem Rastwinkel, z.B. $\vartheta=30^\circ$, und einer einzelnen kleinen Drehmomentamplitude gewählt werden. Dabei erleichtert der vergrößerte Rastwinkel die Erkennung der vom Rest abweichenden kleinen Drehmomentamplitude.

Anhand der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche können allgemein bei dieser Eingabeart eine Drehmomentamplitude von 0,09 Nm und ein Rastwinkel von 24° empfohlen werden. Dabei sollte eine Funktion, die sich mit einem multifunktionalen Stellteil betätigen lässt, aus mindestens drei Rastungen bestehen. Im Stellteilsystem sollte eine Reibung von mindestens 0,01 Nm vorliegen. Ein steiler sägezahnförmiger Drehmomentverlauf ist dabei wegen der geringen Anzahl an Positionierfehlern und des sehr deutlichen Einrastens zwischen zwei Rastungen zu empfehlen.

9 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die notwendigen Voraussetzungen einer aktiven haptischen Rückmeldung bei einem adaptiven multifunktionalen Stellteil durch zahlreiche methodisch aufgebaute Versuche untersucht. Zu diesem Zweck wurde zu Beginn die haptische Wahrnehmung aus biologischer und psychophysischer Sicht näher betrachtet. Zusätzlich wurden die Möglichkeiten und Grenzen einer Mensch-Maschine-Schnittstelle, die aus Stellteilen und Anzeigen besteht, beschrieben. Mit diesen Angaben sowie mit der Anforderung eines unbegrenzten Stellweges und der Möglichkeit, eine hohe Anzahl an Informationen haptisch unterscheidbar darstellen zu können, wurde ein Drehsteller als multifunktionales Stellteil für diese Forschungsarbeit ausgewählt.

In einer ausführlichen Recherche wurde festgestellt, dass in bisherigen Forschungsarbeiten nur Teilgebiete zu Stellteilen mit aktiver haptischer Rückmeldung untersucht wurden, in denen jedoch der Einfluss der Teilgebiete aufeinander nicht betrachtet wurde. Gerade die Möglichkeiten, die sich beim Einsatz eines Drehstellers als multifunktionales Stellteil mit aktiver haptischer Rückmeldung anbieten, wurden nur unzureichend behandelt. Stellteilsysteme, ähnlich dem Aufbau des in dieser Arbeit erstellten Drehmomentprüfstands, wurden in der Literatur gefunden. Da es sich bei diesen um Prototypen handelt oder wesentliche Anforderungen an die Stellgenauigkeit und Unterschiedserkennung nicht erfüllt werden, lässt sich damit jedoch kein anwendungsorientierter Einsatz verwirklichen.

Um präzise Aussagen zu den Einsatzbedingungen eines adaptiven multifunktionalen Stellteils mit aktiver haptischer Rückmeldung zu erhalten, wurde ein variabler Prüfstand zur Durchführung systematischer Untersuchungen aufgebaut. Mit diesem ist es möglich, unterschiedliche Drehmomentverläufe entweder passiv über eine Mechanik oder aktiv über einen Elektromotor zu erzeugen. Zur aktiven Drehmomenterzeugung wurde ein Gleichstrommotor gewählt, dessen abzugebendes Drehmoment durch eine Steuerkette vorgegeben wird.

Als Forschungsschwerpunkte für die Untersuchungen wurden die Stellgenauigkeit, die Komfortbereiche und die Unterschiedserkennung sowie die Kombination aus Stellgenauigkeit und Unterschiedserkennung festgelegt. Die Forschungsschwerpunkte bauen so aufeinander auf, dass die für den jeweils folgenden Schwerpunkt zu untersuchenden Einflussgrößen systematisch festgelegt werden konnten. In allen Untersuchungen

wurde Wert darauf gelegt, eine hohe externe Validität der Ergebnisse zu erhalten. Aus diesem Grund fanden die meisten Versuche nicht unter Laborbedingungen statt. Dieses Vorgehen führte gleichzeitig zu einem Probandenkollektiv, das sowohl vom Alter als auch von den Berufsgruppen her heterogen und für eine breite Datenerhebung sehr gut geeignet war.

In der Untersuchung zur Stellgenauigkeit konnte festgestellt werden, dass für eine hohe Stellgenauigkeit ein Mindestdrehmoment von 0,06 Nm und ein minimaler Rastwinkel von 20° benötigt werden.

Aus der darauffolgenden Untersuchung zu den Komfortbereichen konnte ein optimaler Bereich der Drehmomentamplitude zwischen 0,07–0,17 Nm abgeleitet werden. Als optimale Drehmomentamplitude wurde bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf ein Wert von 0,09 Nm festgestellt. Im Vergleich dazu konnte bei einem steilen sägezahnförmigen Verlauf eine leichte Verschiebung dieses Optimums zu größeren Werten der Drehmomentamplitude festgestellt werden.

Die Untersuchung zur Unterschiedserkennung zeigte einen deutlichen Einfluss der Ausgangsdrehmomentamplitude nicht aber der Skalierungsrichtung. Verglichen mit einer Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,08 Nm muss eine Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,15 Nm demnach nicht so stark skaliert werden, um Unterschiede erkennbar zu machen. Unabhängig von der Verlaufsart wird die Unterschiedsschwelle bei einer Ausgangsdrehmomentamplitude von 0,08 Nm ab einem Skalierungsfaktor von 1,14 und bei einer Amplitude von 0,15 Nm ab einem Skalierungsfaktor von 1,10 erreicht.

In der kombinierten Untersuchung zur Stellgenauigkeit und Unterschiedserkennung mussten höhere Skalierungsfaktoren ($\geq 1,2$) eingesetzt werden, um ähnlich hohe Werte für die Unterschiedserkennung wie in der vorausgegangenen Untersuchung zu erhalten. Dabei zeigte sich, dass zu große Unterschiede der Drehmomentamplituden die Stellgenauigkeit negativ beeinflussen. Gleichzeitig konnte bei kleinen Unterschieden der Drehmomentamplitude und der Hinzugabe von Reibung in das Stellteilsystem eine sehr hohe Stellgenauigkeit nachgewiesen werden. Ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Unterschiedserkennung und Stellgenauigkeit ergab sich bei einem Skalierungsfaktor von 1,5. Besonders hohe Werte für die Stellgenauigkeit und die Unterschiedserkennung konnten bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf festgestellt werden.

Die am Ende dieser Forschungsarbeit durchgeführte Evaluation mit Hilfe einer anwendungsorientierten Untersuchung, in der alle zuvor gewonnen Erkenntnisse in

ausgewählten Beispielen umgesetzt wurden, führte zu kontroversen Ergebnissen. Nur ein Teil der Versuchsteilnehmer konnte die meisten der ihnen gestellten Aufgaben richtig erfüllen. Während der Untersuchung konnte bei allen Teilnehmern eine hohe kognitive Belastung festgestellt werden. Bei einem industriellen Einsatz eines adaptiven multifunktionalen Stellteils mit aktiver haptischer Rückmeldung sind deshalb Vorversuche durchzuführen, um auf der Basis der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse die Anzahl und Darstellungsart haptisch übermittelter Informationen an die demografischen und psychografischen Merkmale der Benutzer anzupassen. Zu diesem Zweck wurden in dieser Arbeit konkrete Gestaltungshinweise zu einem adaptiven multifunktionalen Stellteil mit aktiver haptischer Rückmeldung formuliert, die eine industrielle Umsetzung ermöglichen.

10 Ausblick

Beim Einsatz von multifunktionalen Stellteilen stellt sich die Frage, wie viele Funktionen sich sinnvollerweise mit einem einzigen Stellteil bedienen lassen. In der Literatur werden hierzu ansatzweise Antworten gegeben (vgl. [SCHMAUDER04], [ZIESCHAG02]). Allerdings wird nicht dargestellt, wie groß die sinnvolle Anzahl an Funktionen sein kann, die sich durch unterschiedliche Kraft-Weg- oder Drehmoment-Drehwinkel-Verläufe darstellen lassen. Um diese Frage beantworten zu können, sollten neben der diskreten Eingabeart, die in der vorliegenden Arbeit ausführlich untersucht wurde, auch die kontinuierliche und die monostabile Eingabeart näher untersucht werden. Durch die Hinzunahme solcher haptisch deutlich unterscheidbarer Merkmale würde sich die sinnvolle Anzahl an Funktionen erweitern lassen. In diesem Zusammenhang müssen aber auch die Grenzen der menschlichen Informationsverarbeitung betrachtet werden. Demzufolge kann es zu Engpässen, sogenannten „Flaschenhälsen“, bei der Informationsverarbeitung kommen [ANDERSON07]. Damit einher geht eine serielle Verarbeitung der Informationen und eine darauffolgende, ebenfalls serielle motorische Handlung. Die Engpässe treten besonders dann auf, wenn unterschiedliche Informationen von demselben kognitiven System des menschlichen Gehirns, z.B. dem Kortex zur Steuerung der Handmotorik, verarbeitet werden müssen. Zu klären gilt es deshalb, ab welcher Informationsmenge es zu einem Engpass bei haptisch dargestellten Informationen kommt und wie sehr solche Engpässe die Bediengeschwindigkeit bei adaptiven multifunktionalen Stellteilen verlangsamen.

Neben Untersuchungen zur Funktionsanzahl sollten auch Untersuchungen zum Einfluss des Stellteildurchmessers und der Position und Orientierung des Stellteils zum Benutzer durchgeführt werden. Erste Vorversuche lassen erkennen, dass eine Vergrößerung des in dieser Forschungsarbeit verwendeten Stellteildurchmessers zu keinen nennenswerten Verbesserungen der Stellgenauigkeit und der Unterschiedsschwelle führt. Bei einer Verkleinerung des Stellteildurchmessers werden beide Faktoren hingegen negativ beeinflusst. Ferner konnte in einer ersten Studie festgestellt werden, dass die Position und die Orientierung des Stellteils zum Benutzer keinen maßgeblichen Einfluss auf die Unterschiedserkennung hat. Beide Voruntersuchungen sollten aber im Sinne einer statistischen Absicherung mit einem erheblich größeren Probandenkollektiv wissenschaftlich belegt werden.

Zukünftig könnte auf visuelle Anzeigen bei der Mensch-Maschine-Schnittstelle von Produkten ganz verzichtet werden. An ihre Stelle könnten Anzeigen treten, die die Informationen über andere Sinnesmodalitäten übermitteln. Gerade durch eine multimodale Informationsdarbietung kann die Informationsmenge erhöht und damit die Bedienung komplexer Mensch-Maschine-Schnittstellen erleichtert werden [AKYOL01]. Eine gleichzeitig akustisch und haptisch redundante Informationsdarbietung bietet sich dafür besonders an. Neben der Informationseingabe durch ein Stellteil, das mit aktiven Komponenten auch zur Informationsausgabe dient, erhält der Benutzer durch akustische Signale eine weitere Möglichkeit zur Kontrolle des eingegebenen Wertes oder der Funktion. Die visuelle Aufmerksamkeit kann dadurch auf andere Systemkomponenten, z.B. zur Kontrolle, gerichtet werden. Eine solche multimodale Darstellung von Informationen gilt es zu untersuchen. Auch in diesem Fall sind die Engpässe der menschlichen Kognition zu ermitteln und der Grad der Verbesserung im Vergleich zu einer visuellen Anzeige zu quantifizieren.

Literatur

- [AKAMATSU94] Akamatsu, M.; Sato, S.: A multi-modal mouse with tactile and force feedback. In: International Journal of Human-Computer Studies. Motta, E.; Wiedenbeck, S. (Hrsg.). Duluth, MN, USA, 1994.
- [AKYOL01] Akyol, S.; Libuda, L.; Kraiss, K.-F.: Multimodale Benutzung adaptiver Kfz-Boardsysteme. In: Jürgensohn, T.; Timpe, K.; Willumeit, H. (Hrsg.): Kraftfahrzeugführung. Berlin: Springer Verlag, 2001, S. 137–154.
- [ALPS98] N.N.: Drive-by-Wire CAR-Mouse. Alps Electric Co., LTD. (Hrsg.). http://www.alps.com/e/news_release/2004/0426_01.html, zuletzt geprüft am 18.03.2008.
- [ANDERSON07] Anderson, J.; Funke, J.; Plata, G.: Kognitive Psychologie. 6. Aufl., Berlin: Spektrum Akad. Verl., 2007.
- [ANGUELOV09] Anguelov, N.: Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und Bedienfeldern für den Kfz-Innenraum. Dissertation, TLA, Technische Universität Dresden, 2009.
- [AUTO00] N.N.: X-by-Wire – das Feeling bleibt! In: Automobil & Elektronik. Heft 01/2000. Heidelberg: Hüthig, 2000, S. 122–126.
- [BAUMANN98] Baumann, K.; Lanz, H.: Mensch-Maschine-Schnittstellen elektronischer Geräte. Leitfaden für Design und Schaltungstechnik. Berlin: Springer Verlag, 1998.
- [BEUTH04] Beuth, O.; Beuth, K.: Leistungselektronik. Bd. 9: Vogel-Fachbuch. 1. Aufl., Würzburg: Vogel, 2004.
- [BENDER99] Bender, G.: Touch Screen Performance as a Function of the Duration of Auditory Feedback and Target Size. Dissertation, Wichita, KS, Wichita State University, 1999.
- [BEYER01] Beyer, L.; Weiss, T.: Elementareinheiten des somatosensorischen Systems als physiologische Basis der taktil-haptischen Wahrnehmung. In: Der bewegte Sinn. Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.). Basel: Birkhäuser Verlag, 2001.
- [BIERMANN03] Biermann, H.; Weißmantel, H.: Regelkatalog SENSI - Geräte: Bedienungsfreundlich und barrierefrei durch das richtige Design. <http://www.emk.tu-darmstadt.de/~weissmantel/sensi/sensi.html>, zuletzt aktualisiert am 22.01.2003, zuletzt geprüft am 16.06.2010.
- [BIRBAUMER06] Birbaumer, N.; Schmidt, R.: Biologische Psychologie. 6. Aufl., Berlin: Springer Verlag, 2006.

- [BMW01] N.N.: BMW Group (Hrsg.): Die BMW 7er Reihe: Der iDrive-Controller. <https://www.press.bmwgroup.com/pressclub/p/pcgl/photoDetail.html?docNo=P0006028>, zuletzt aktualisiert am 09.2001, zuletzt geprüft am 14.01.2011.
- [BORTZ06] Bortz, J.; Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler. 4., überarbeitete Aufl., Berlin: Springer Verlag, 2006.
- [BÖRSCHLEIN97] Börschlein, E.-M.: Haptischer Komforteindruck von Handstellteilen in Personenkraftwagen. In: Veranstaltungsunterlagen - Komfort und Ergonomie in Kraftfahrzeugen. Bubb, K. (Hrsg.). Haus der Technik e.V. Essen, 1997.
- [BRADLEY69] Bradley, J.: Optimum Knob Diameter. In: Human Factors. The journal of the Human Factors and Ergonomics Society. Vol. 11, No. 4. Thousand Oaks, Calif.: Sage, 1969, S. 353–360.
- [BREWSTER07] Brewster, S.; Chohan, F.; Brown, L.: Tactile feedback for mobile interactions. In: Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems. New York, NY: Association for Computing Machinery, 2007, S. 159–162.
- [BUBB01] Bubb, H.: Haptik im Kraftfahrzeug. In: Kraftfahrzeugführung. Jürgensohn, T.; Timpe, K.; Willumeit, H. (Hrsg.). Berlin: Springer Verlag, 2001, S. 155–175.
- [BUBB04] Bubb, H.; Rausch, H.: Mit welchen Bedienelementen können Autos gelenkt werden? Steuerung von Kraftfahrzeugen. http://www.integral2.iaw.rwth-aachen.de/course.php?co_id=27&co_inst=216&SID=fa45de769dc6ea7e31d5aaa1445873ce, zuletzt aktualisiert am 19.01.2004, zuletzt geprüft am 13.06.2008.
- [BULLINGER79] Bullinger, H.-J.; Kern, P.; Solf, J.: Reibung zwischen Hand und Griff: Der Einfluß von Material und Oberfläche auf das Reibungsverhalten zwischen Hand und Arbeitsmittelhandseite. Bd. 213: Forschungsbericht / Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag für Neue Werbung, 1979.
- [BULLINGER94] Bullinger, H.-J.; Ilg, R.; Schmauder, M.: Ergonomie: Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung: Technologiemanagement. Stuttgart: Teubner Verlag, 1994.
- [BURDEA96] Burdea, G.: Force and touch feedback for virtual reality. New York, NY: Wiley, 1996.
- [CAMPENHAUSEN93] Campenhausen, C.: Die Sinne des Menschen: Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung. 2. Aufl., Stuttgart: Thieme Verlag, 1993.

- [CHANG05] Chang, A.; O'Sullivan, C.: Audio-haptic feedback in mobile phones. In: Proceedings of the 2005 Conference on Human Factors in Computing Systems. Extended abstracts. New York, NY: Association for Computing Machinery, 2005, S. 1264–1267.
- [COCKBURN05] Cockburn, A.; Brewster, S.: Multimodal feedback for the acquisition of small targets. In: Ergonomics. London: Taylor and Francis Ltd., 2005, S. 1129–1150.
- [CYBEREDGE10] CyberEdge Information Services, I.: Virtual Lexicon. http://www.cyberedge.com/info_r_lex01.html, zuletzt geprüft am 25.05.2010.
- [DEBUS02] Debus, T.; Becker, T.; Dupont, P.: Multichannel vibrotactile display for sensory substitution during teleoperation. In: Telemanipulator and Telepresence Technologies VIII. Proceedings. Stein, M. (Hrsg.). Bellingham, Wash.: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2002.
- [DENNERLEIN00] Dennerlein, T.; Martin, D.; Hasser, C.: Force-feedback improves performance for steering and combined steering-targeting tasks. In: Conference on Human Factors in Computing Systems, Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. Turner, T. (Hrsg.). New York: ACM Press, 2000.
- [DIN EN 614-2] Norm. DIN EN 614-2. Dezember 2008. Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 2: Wechselwirkungen zwischen der Gestaltung von Maschinen und den Arbeitsaufgaben.
- [DIN EN 894-1] Norm. DIN EN 894-1. Januar 2009. Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen.
- [DIN EN 894-2] Norm. DIN EN 894-2. Februar 2009. Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 2: Anzeigen.
- [DIN EN 894-3] Norm. DIN EN 894-3. Januar 2010. Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 3: Stellteile.
- [DINSE08] Dinse, H.; Wilimzig, C.; Kalisch, T.: Learning effects in haptic perception. In: Human Haptic Perception: Basics and Applications. Grunwald, M. (Hrsg.). Basel: Birkhäuser Verlag, 2008.
- [FAHRMEIR07] Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S.: Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen: Statistik und ihre Anwendungen. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [FECHNER60] Fechner, G.: Elemente der Psychophysik. Leipzig: Breitkopf und Härtel, 1860.

- [FRANK97] Frank, H.; Lobin, G.: Sprachorientierungsunterricht: Ein bildungswissenschaftlicher Beitrag zur interlinguistischen Sprachkybernetik: Kap. 10, Grenzen und Gütemaße der Informationsverarbeitung durch den Schüler. Altersabhängigkeiten. <http://wwwcs.uni-paderborn.de/extern/fb/2/Kyb.Paed/loi/kap10d.htm>, zuletzt aktualisiert am 21.12.1997, zuletzt geprüft am 21.08.2010.
- [FRIEDRICH07] Friedrich, O.: Physiologie - GK1. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [GESCHEIDER76] Gescheider, G.: Psychophysics. The fundamentals. 3. Ed., Mahwah, NJ: Erlbaum, 1976.
- [GIBSON73] Gibson, J.: Die Sinne und der Prozess der Wahrnehmung. Bern: Huber Verlag, 1973.
- [GOLDSTEIN08] Goldstein, E.B.; Irtel, H.; Plata, G.: Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs. 7. Aufl., Berlin: Spektrum Akad. Verlag, 2008.
- [GRUNWALD01] Grunwald, M.: Begriffsbestimmungen zwischen Psychologie und Physiologie. In: Der bewegte Sinn. Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.). Basel: Birkhäuser Verlag, 2001.
- [GUO09] Guo, Z.; Chang, L.; Xue, Y.: Cogging torque of permanent magnet electric machines: An overview. In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. CCECE. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: IEEE, 2009, S. 1172–1177.
- [HAJOS72] Hajos, A.: Wahrnehmungspsychologie. Psychophysik und Wahrnehmungsforschung. Stuttgart: Kohlhammer, 1972.
- [HAMPEL08] Hampel, T.; Maier, T.: Verbesserung der Informationsübertragung von Force-Feedbacksystemen. In: Industriedesign und Ingenieurwissenschaften. Technisches Design in Forschung, Lehre und Praxis. Hentsch, N.; Kranke, G.; Wölfel, C. (Hrsg.). Dresden: TUDpress, 2008, S. 71–84.
- [HAMPEL09A] Hampel, T.; Maier, T.: Innovation by using adaptive operation forces – purpose, control location and realization. In: 9th Stuttgart International Symposium – Automotive and Engine Technology, Dokumentation, Vol. 2, ATZlive (Hrsg.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009.
- [HAMPEL09B] Hampel, T.; Maier, T.: Zukünftige Informationsinhalte bei Multifunktionsstellteilen: Der Einfluss adaptiver Stellkräfte und -momente auf die Stellgenauigkeit. In: Elektronik im Kraftfahrzeug. 14. Internationaler Kongress. VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Düsseldorf: VDI Verlag, 2009, S. 721–732.

- [HAMPEL09C] Hampel, T.; Maier, T.: Einflussgrößen auf die Wahrnehmung von Drehmomentunterschieden bei Drehstellern. In: Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit. VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Düsseldorf: VDI Verlag, 2009, S. 269–276.
- [HASSER98] Hasser, C.; Massie, T.: The haptic illusion. In: Digital illusion. Entertaining the future with high technology. Dodsworth, C. (Hrsg.). New York: ACM Press, 1998.
- [HEDEKER06] Hedeker, D.; Gibbons, R.: Longitudinal Data Analysis: Wiley series in probability and statistics. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [HEIDENHAIN10] N.N.; Heidenhain GmbH (Hrsg.): Prospekt Drehgeber: Messprinzipien. Traunreut, 2010.
- [HEIMANN07] Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: Mechatronik: Komponenten - Methoden - Beispiele. 3. Aufl., München: Hanser Fachbuchverlag, 2007.
- [HOFFMANN07] Hoffmann, J.: Handbuch der Messtechnik. 3., neu bearb. Aufl., München: Hanser, 2007.
- [IMMERSION99] N.N.: Immersion Corporation (Hrsg.): Laparoscopic Impulse Engine: Impulse Engine 2000. San Jose, CA, 1999.
- [IMMERSION06] N.N.: Immersion Corporation (Hrsg.): TouchSense Technology for the Touchscreen Interface: Adding tactile feedback to touchscreen applications. San Jose, CA, 2006.
- [IMMERSION07] N.N.: Immersion Corporation (Hrsg.): PR-1000 TouchSense : Programmable Rotary Module. San Jose, CA, 2007.
- [JANDURA94] Jandura, L.; Srinivasan, M.: Experiments on Human Performance in Torque discrimination and Control. In: Dynamic systems and control. Presented at 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Radcliffe, C. (Hrsg.). New York, NY: American Society of Mechanical Engineers, 1994, S. 369-375.
- [JENKINS50] Jenkins, W.; Maas, L.; Rigler, D.: Influence of friction in making settings on a linear scale. In: Journal of Applied Psychology. Washington, DC: American Psychological Association, 1950, S. 434–439.
- [KAPUSCINSKI97] Kapuscinski, C.: Motor Selection and Damper Design for a six Degree of Freedom Haptic Display. Masterarbeit, Northwestern University, 1997.
- [KERN09] Kern, T.: Kapitel 2 – Begriffsklärungen. In: Entwicklung haptischer Geräte. Ein Einstieg für Ingenieure. Kern, T. (Hrsg.). Berlin: Springer Verlag, 2009.
- [KIENZLE50] Kienzle, O.: Normungszahlen. Berlin: Springer Verlag, 1950.

-
- [KRAIF07] Kraif, U.; Wermke, M.: Duden - das Fremdwörterbuch. Bd. 5: Der Duden. 9., aktualisierte Aufl., Mannheim: Dudenverlag, 2007
- [KUNSCH97] Kunsch, K.; Kunsch, S.: Der Mensch in Zahlen : Eine Datensammlung in Tabellen mit über 20.000 Einzelwerten. 3. Aufl., München: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, 1997.
- [LEXUS09] N.N.: Toyota Deutschland GmbH (Hrsg.): Der neue Lexus RX. Köln, 2009.
- [LOGITECH99] N.N.: Logitech Europe S.A. (Hrsg.): Produktdatenblatt WingMan Force-Feedback-Mouse. Morges, 1999.
- [LOGITECH07] N.N.: Logitech Europe S.A. (Hrsg.): Produktdatenblatt Wingman Force 3D Pro. Morges, 2007.
- [LORENZ06] N.N.: Lorenz Messtechnik GmbH (Hrsg.): Bedienungsanleitung für Drehmomentsensor. Alfdorf, 2006.
- [MAIER10] Maier, T.; Schmid, M.: IdeEn Kompakt: Manuskript zu den Vorlesungen Technisches Design I-IV. Universität Stuttgart: IKTD, 2010.
- [MAXON08] N.N.: Maxon Motor AG (Hrsg.): Gesamtkatalog: Programm 08/09. Sachseln, 2008.
- [MUHS07] Muhs, D.; Wittel, H.; Jannasch, D.; Voßiek, J.: Roloff / Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung. 18. Aufl., Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 2007.
- [MÜNZER62] Münzer, K.: Griffgestaltung im Rahmen der Arbeitsgestaltung. Darmstadt: Verband für Arbeitsstudien REFA e.V., 1962.
- [NEUDÖRFER81] Neudörfer, A.: Anzeiger und Bedienteile: Gesetzmäßigkeiten und systematische Lösungssammlungen, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981.
- [NEUDÖRFER05] Neudörfer, A.: Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinen-Richtlinie. 3. Aufl., Berlin: Springer Verlag, 2005.
- [PANG91] Pang, X.; Tan, H.; Durlach, N.: Manual discrimination of force using active finger motion. In: Perception Psychophysics, Vol. 49, No. 6. Austin, Texas: Psychonomic Society Publ., 1991, S. 531-540.
- [PORAC81] Porac, C.; Coren, S.: Lateral preferences and human behavior. New Berlin: Springer Verlag, 1981.
- [PORST09] Porst, R.: Fragebogen: Ein Arbeitsbuch. 2. Aufl., Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009.
- [PROFOS94] Profos, P.; Pfeifer, T.: Handbuch der industriellen Meßtechnik. 6. Aufl., München: Oldenbourg, 1994.

- [REISINGER09] Reisinger, J.: Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen. Dissertation, LfE, Technische Universität München, 2009.
- [ROBLES08] Robles-De-La-Torre, G.: Principles of haptic perception in virtual environments. In: Human Haptic Perception: Basics and Applications. Grunwald, M. (Hrsg.). Basel: Birkhäuser Verlag, 2008, S. 363–379.
- [RODENACKER91] Rodenacker, W.: Methodisches Konstruieren. Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele. 4., überarb. Aufl., Berlin: Springer Verlag, 1991.
- [RÜHMANN89] Rühmann, H.: Einfluß der Trägheit des Bedienelementes auf die Steuerleistung. In: Handbuch der Ergonomie. Schmidtke, H. (Hrsg.). München: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1989.
- [RÜHMANN97] Rühmann, H.: Komfort und Ergonomie in Kraftfahrzeugen. Betätigungskräfte. In: Veranstaltungsunterlagen - Komfort und Ergonomie in Kraftfahrzeugen. Bubb, K. (Hrsg.). Essen: Haus der Technik e.V., 1997, S. 1–24.
- [SCHATTENBERG02] Schattenberg, K.: Fahrzeugführung und gleichzeitige Nutzung von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen: Untersuchungen zur sicherheitsoptimierten Gestaltung und Positionierung von Anzeige- und Bedienkomponenten im Kraftfahrzeug. Dissertation, IfP, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2002.
- [SCHMAUDER96] Schmauder, M.: Händigkeitsgerechte Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Dissertation, IAT, Universität Stuttgart, 1996.
- [SCHMAUDER04] Schmauder, M.; Prescher, W.; Paritschkow, S.; Zieschang, H.; Müller-Gethmann, H.: Funktionelle Auslegung von Joystick-Steuerungen in Erdbaumaschinen: Gewährleistung der Arbeitssicherheit. http://www.baumaschine.de/Portal/Aktuell_0401/Wissenschaft/multifunktionsstellteile/multifunktionsstellteile.html, zuletzt aktualisiert am 01.2004, zuletzt geprüft am 25.08.2010.
- [SCHMIDT87] Schmidt, R.; Dudel, J.: Grundriß der Neurophysiologie. 6. Aufl., Berlin: Springer Verlag, 1987.
- [SCHMIDT07] Schmidt, R.; Lang, F.: Physiologie des Menschen. 30. Aufl., Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [SCHMIDTKE89A] Schmidtke, H.: Drehknöpfe. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie. 2. Aufl., München: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1989, C-9.4.1.
- [SCHMIDTKE89B] Schmidtke, H.: Drehschalter. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie. 2. Aufl., München: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1989, C-9.4.2.

- [SCHMIDTKE89C] Schmidtke, H.; Rühmann, H.: Drehmomente an Sterngriffen und Drehknöpfen in der Vertikalebene. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie. 2. Aufl., München: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1989, B-4.3.6.
- [SCHMIDTKE89D] Schmidtke, H.: Einfluß der Reibung im Bedienelement. In: Handbuch der Ergonomie. Schmidtke, H. (Hrsg.). München: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1989.
- [SCHMIDTKE89E] Schmidtke, H.: Einfluß des Spiels im Bedienelement auf die Steuerleistung. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie. München: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1989.
- [SCHOMAKER95] Schomaker, L.; Nijtmans, J.; Camurri, A.; Lavagetto, F.; Morasso, P.; Benoit, C. et al.: A Taxonomy of Multimodal Interaction in the Human Information Processing System: A Report of the Esprit Project 8579 MIAMI. Nijmegen: Nijmegen Institute for Cognition and Information, 1995.
- [SENDER08] Sendler, J.: Entwicklung und Gestaltung variabler Bedienelemente für ein Bedien- und Anzeigesystem im Fahrzeug. Dissertation, TLA, Technische Universität Dresden, 2008.
- [SERAFIN07] Serafin, C.; Heers, R.; Tschirhart, M.; Ullrich, C.; Ramstein, C.: User Experience in the U.S. and Germany of In-Vehicle Touch Screens with Integrated Haptic and Auditory Feedback. In: Proceedings of the SAE World Congress & Exhibition. Warrendale, Pa.: SAE International, 2007.
- [SILBERNAGL07] Silbernagl, S.; Despopoulos, A.: Taschenatlas Physiologie. 7. Aufl., Stuttgart: Thieme Verlag, 2007.
- [SKRAMLIK37] Skramlik, E. von : Psychophysiologie der Tastsinne : Band I und II, Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft, 1837.
- [STEIN06] Stein, J. ; Stoodley, C. : Neuroscience : An introduction. Chichester : Wiley, 2006.
- [STEVENS75] Stevens, S. : Psychophysics : Introduction to its perceptual, neural, and social prospects. New York: Wiley, 1975.
- [TAN94] Tan, H.; Srinivasan, M. A.; Eberman, B.; Cheng, B.: Human Factors for the Design of Force-Reflecting Haptic Interfaces. In: Proceedings of the 3rd Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Chicago, IL, 1994.
- [WEBER05] Weber, E.: Tastsinn und Gemeingefühl. Bd. 149: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann, 1905.
- [WEISS01] Weiss, T.: Plastizität im somatosensorischen System. In: Der bewegte Sinn. Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg). Basel, Birkhäuser Verlag, 2001.

- [WOTTAWA93] Wottawa, H.: Psychologische Methodenlehre: Eine orientierende Einführung. 2. Aufl., Weinheim: Juventa Verlag, 1993.
- [ZEILINGER05] Zeilinger, S.: Aktive haptische Bedienelemente zur Interaktion mit Fahrerinformationssystemen. Dissertation, IfA, Universität der Bundeswehr München, 2005.
- [ZIESCHAG02] Zieschag, H.; Müller-Gethmann, H.; Schmauder, M.; Reinert, D.; Schmid, W.: Anforderungen an Multifunktions-Stellteile. In: Die BG: Prävention, Organisation, Recht. Berlin: Erich Schmid Verlag, 2002.

Verwendete Studien- und Diplomarbeiten unter Anleitung des Verfassers:

- [BETTINGER09] Bettinger, B.: Experimentelle Untersuchung zum Empfinden der Unterschiedsschwelle bezogen auf das Stellmoment eines Drehschalters. Diplomarbeit, IKTD, Universität Stuttgart, 2009.
- [FARR09] Farr, S.: Experimentelle Untersuchung zum als komfortabel empfundenen Drehmoment bei Drehschaltern. Studienarbeit, IKTD, Universität Stuttgart, 2009.
- [GRAUER10] Grauer, B.: Experimentelle Untersuchung zum empfundenen Drehmoment bei unterschiedlicher Stellteilform von Drehschaltern. Studienarbeit, IKTD, Universität Stuttgart, 2010.
- [KIRCHENBAUR10] Kirchenbaur, S.: Experimentelle Untersuchung zur Auswirkung erkennbarer Unterschiede von Drehmomenten auf die Stellgenauigkeit. Studienarbeit, IKTD, Universität Stuttgart, 2010.
- [MÜNCH09] Münch, F.: Experimentelle Untersuchung zur Abhängigkeit zwischen Drehmomenten und Fehlbetätigungen bei Drehschaltern. Studienarbeit, IKTD, Universität Stuttgart, 2009.
- [NGUYEN10] Nguyen, H.: Experimentelle Untersuchung zum empfundenen Drehmoment bei unterschiedlich zum Benutzer angeordneten Drehschaltern. Studienarbeit, IKTD, Universität Stuttgart, 2010.
- [SCHMITZ08] Schmitz, M.: Einsatzgebiete und Beurteilung von Force-Feedback-Systemen. Studienarbeit, IKTD, Universität Stuttgart, 2008.
- [WINTERHOLLER09] Winterholler, J.: Entstehung und Entwicklung von Stellteilen im Pkw. Studienarbeit, IKTD, Universität Stuttgart, 2009.

Anhang

A1 Steuerungsplan und Bedienoberfläche des Prüfstands

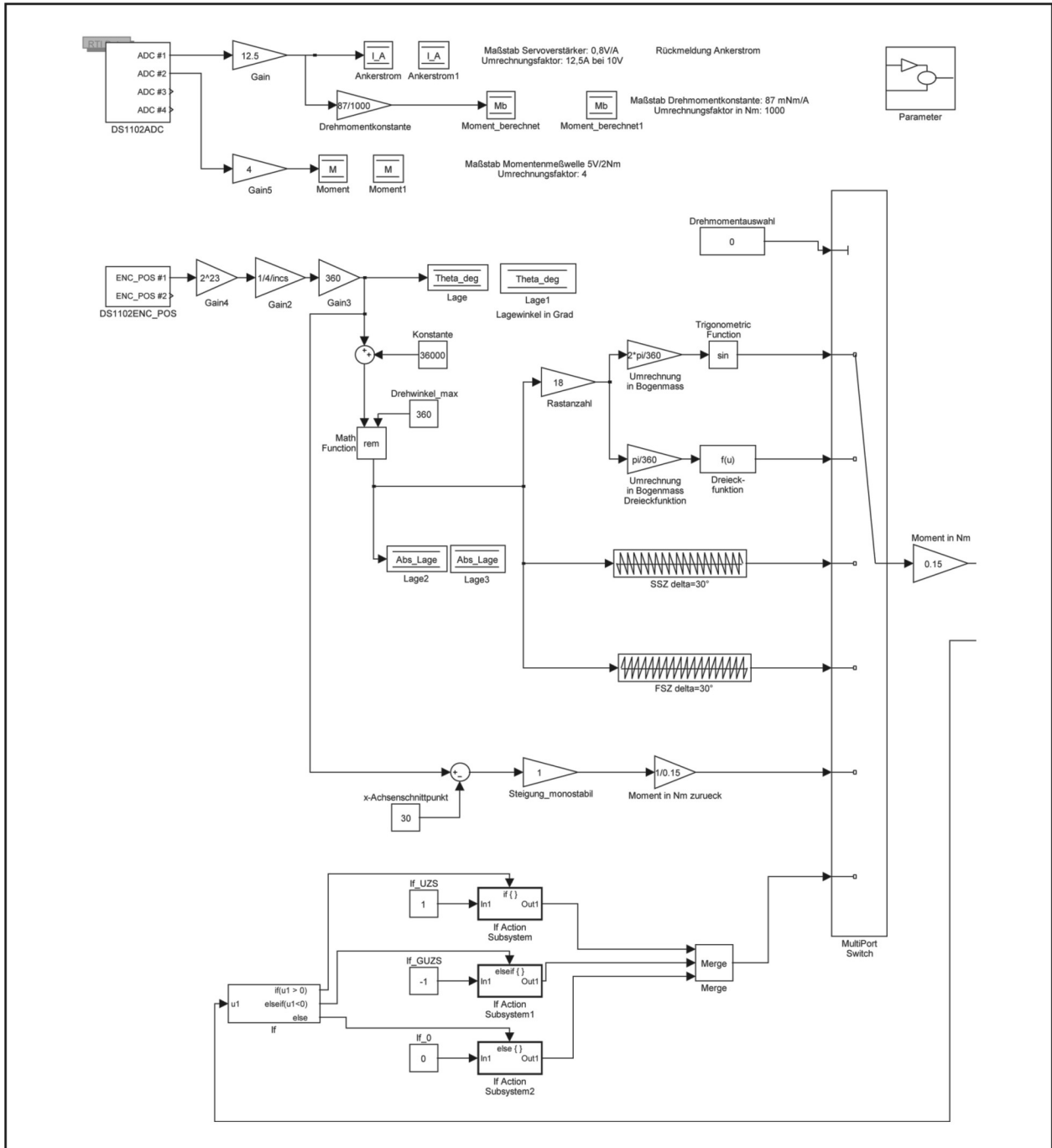


Bild A1.1: Exemplarischer Steuerplan des Prüfstands mit aktiver haptischer Rückmeldung

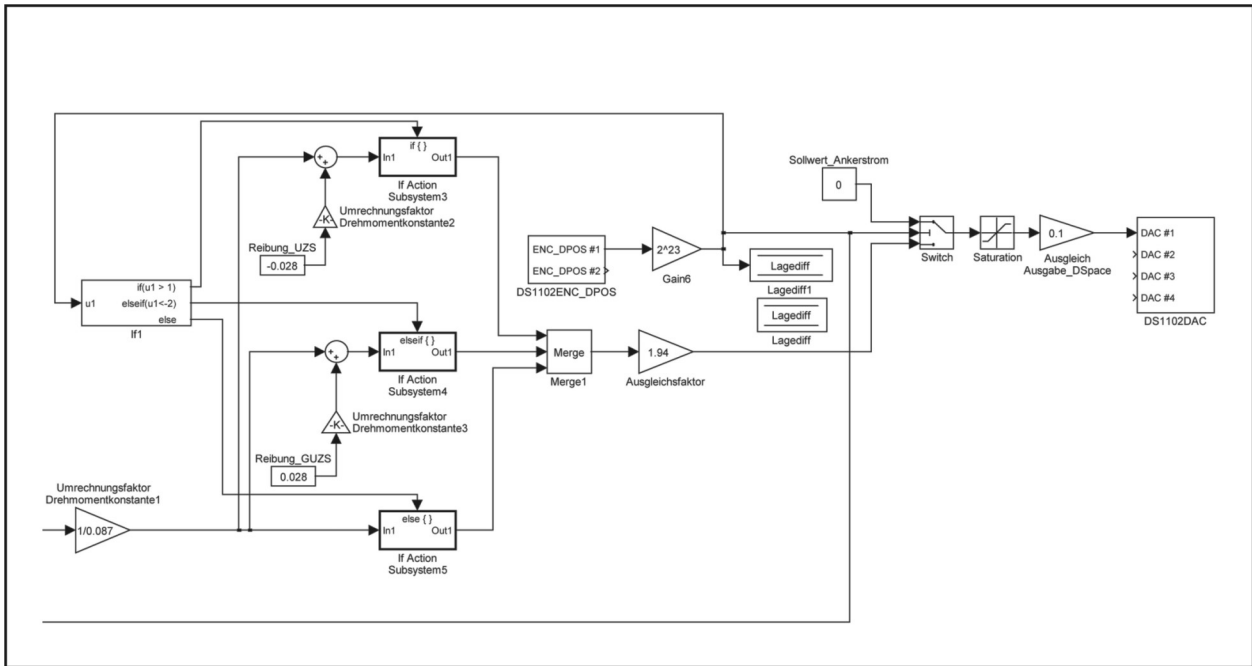


Bild A1.1: Exemplarischer Steuerplan des Prüfstands mit aktiver haptischer Rückmeldung (Fortsetzung)

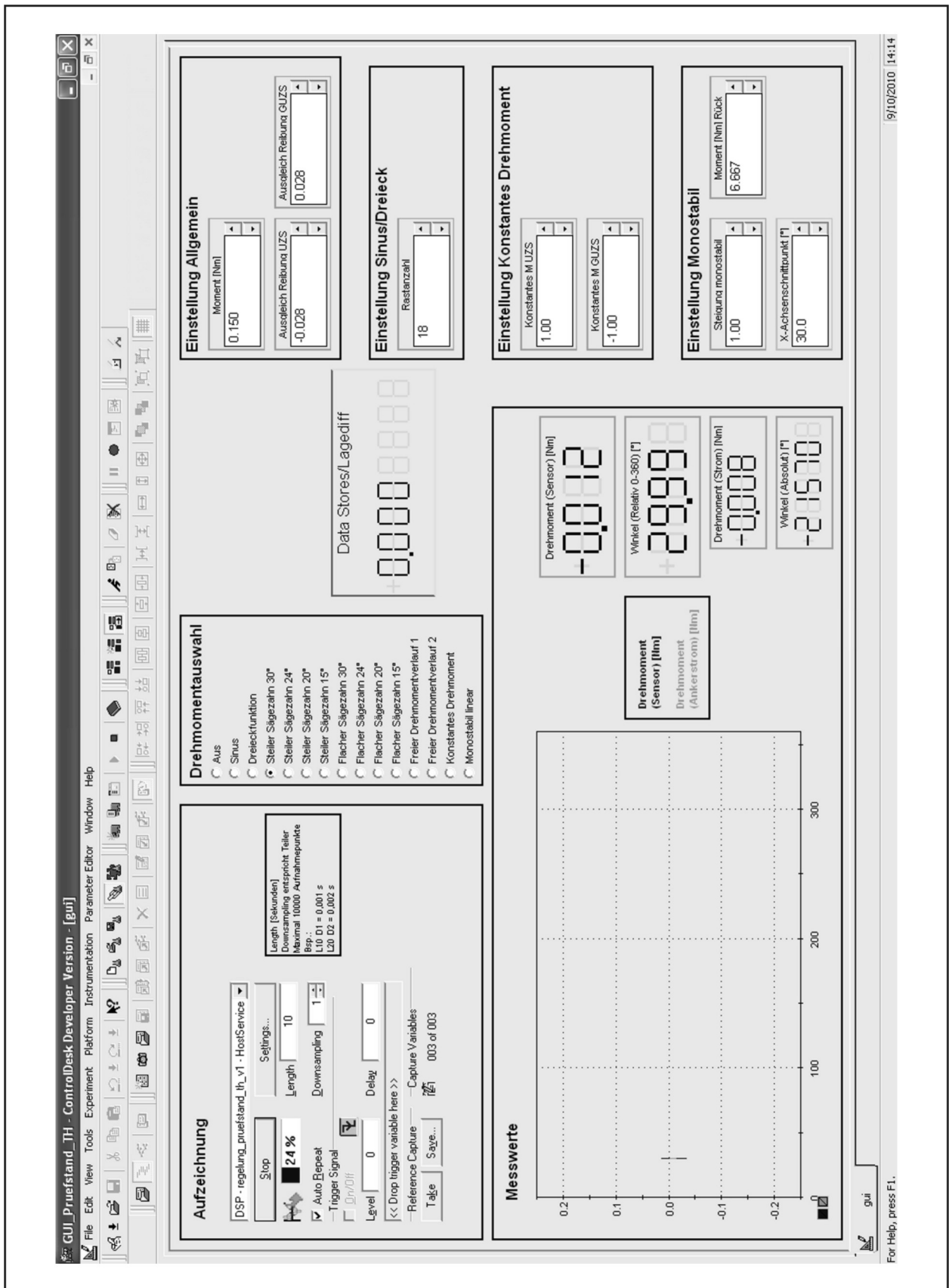


Bild A1.2: Exemplarische Oberfläche des Bedien- und Steuerungsprogramms „ControlDesk“

A2 Fragebögen

Versuchs- und Probandendaten			
Federn: _____ Kurvenscheiben: _____ Datum: _____			
Alter: _____ Größe: _____ Perzentil: _____ Beruf: _____			
Händigkeit: <input type="checkbox"/> links <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> rechts <input type="checkbox"/> weiblich <input type="checkbox"/> beidhändig			
Aufgabe der Probanden: Bei jedem Versuch sollen 2 Rastungen weitergedreht werden			
Drehgeschwindigkeit: _____			
	Versuchsdaten	Fragen	Notizen
Moment:	1. Versuch		
	Hand: Dreh- richtung: <input type="checkbox"/> links <input type="checkbox"/> im UZS <input type="checkbox"/> rechts <input type="checkbox"/> gg. UZS	Hatten Sie das Gefühl, die 2. Rastung genau zu stellen? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Greifart: <input type="checkbox"/> Kontaktgriff <input type="checkbox"/> Zufassunggriff <input type="checkbox"/> Umfassunggriff Sonstiges: _____ Zugriff: <input type="checkbox"/> Hand <input type="checkbox"/> Finger _____ Richtig gestellt? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein _____
	2. Versuch		
	Hand: Dreh- richtung: <input type="checkbox"/> links <input type="checkbox"/> im UZS <input type="checkbox"/> rechts <input type="checkbox"/> gg. UZS	Hatten Sie das Gefühl, die 2. Rastung genau zu stellen? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Greifart: <input type="checkbox"/> Kontaktgriff <input type="checkbox"/> Zufassunggriff <input type="checkbox"/> Umfassunggriff Sonstiges: _____ Zugriff: <input type="checkbox"/> Hand <input type="checkbox"/> Finger _____ Richtig gestellt? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein _____
Feder:	3. Versuch		
	Hand: Dreh- richtung: <input type="checkbox"/> links <input type="checkbox"/> im UZS <input type="checkbox"/> rechts <input type="checkbox"/> gg. UZS	Hatten Sie das Gefühl, die 2. Rastung genau zu stellen? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Greifart: <input type="checkbox"/> Kontaktgriff <input type="checkbox"/> Zufassunggriff <input type="checkbox"/> Umfassunggriff Sonstiges: _____ Zugriff: <input type="checkbox"/> Hand <input type="checkbox"/> Finger _____ Richtig gestellt? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein _____
Kurvenscheibe:	4. Versuch		
	Hand: Dreh- richtung: <input type="checkbox"/> links <input type="checkbox"/> im UZS <input type="checkbox"/> rechts <input type="checkbox"/> gg. UZS	Hatten Sie das Gefühl, die 2. Rastung genau zu stellen? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Greifart: <input type="checkbox"/> Kontaktgriff <input type="checkbox"/> Zufassunggriff <input type="checkbox"/> Umfassunggriff Sonstiges: _____ Zugriff: <input type="checkbox"/> Hand <input type="checkbox"/> Finger _____ Richtig gestellt? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein _____
Abschlussfrage			
Bei welchem Versuch viel es Ihnen leichter die 2 Rastungen zu stellen?			
<input type="checkbox"/> links im UZS <input type="checkbox"/> links gegen UZS <input type="checkbox"/> rechts im UZS <input type="checkbox"/> rechts gegen UZS			

Bild A2.1: Exemplarischer Fragebogen der Untersuchung zur Stellgenauigkeit

Datenerfassung

Alter: _____

Größe: _____

Geschlecht: männlich weiblich

Händigkeit: Rechtshänder Linkshänder Beidhänder

Fragestellung

Bitte drehen Sie den Drehschalter um 2 Rastpositionen. Wie beurteilen Sie die dabei aufgebrauchte Kraft auf der folgenden Skala:

zu schwer, etwas zu schwer, genau richtig, etwas zu leicht, zu leicht?

Scheibe: _____

im UZS _____	<input type="checkbox"/> zu schwer	<input type="checkbox"/> etw. zu schwer	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> etw. zu leicht	<input type="checkbox"/> zu leicht	Greif- art	Dreh- geschw.	Kommentar
im UZS _____	<input type="checkbox"/> zu schwer	<input type="checkbox"/> etw. zu schwer	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> etw. zu leicht	<input type="checkbox"/> zu leicht	Greif- art	Dreh- geschw.	Kommentar
im UZS _____	<input type="checkbox"/> zu schwer	<input type="checkbox"/> etw. zu schwer	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> etw. zu leicht	<input type="checkbox"/> zu leicht	Greif- art	Dreh- geschw.	Kommentar
gegen UZS _____	<input type="checkbox"/> zu schwer	<input type="checkbox"/> etw. zu schwer	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> etw. zu leicht	<input type="checkbox"/> zu leicht	Greif- art	Dreh- geschw.	Kommentar
gegen UZS _____	<input type="checkbox"/> zu schwer	<input type="checkbox"/> etw. zu schwer	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> etw. zu leicht	<input type="checkbox"/> zu leicht	Greif- art	Dreh- geschw.	Kommentar
gegen UZS _____	<input type="checkbox"/> zu schwer	<input type="checkbox"/> etw. zu schwer	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> etw. zu leicht	<input type="checkbox"/> zu leicht	Greif- art	Dreh- geschw.	Kommentar

Qualitätseindruck:

billig mittel hochwertig

Bild A2.2: Exemplarischer Fragebogen der Untersuchung zum Komfortempfinden

Versuchsreihe:	VP-Nr.:	Datum:
persönliche Daten: _____		
Geschlecht: <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich		Händigkeit: <input type="checkbox"/> Rechtshänder <input type="checkbox"/> Linkshänder <input type="checkbox"/> Beidhänder
Alter: _____		Beruf: _____
Größe: _____		Hobby: _____

Amplitude _____ Nm	Unterschied erkannt	falsch	sicherer Eindruck	Greifart	Bemerkungen
72,9 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
84 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
89 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
94,3 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
100 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
106 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
112,4 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
119,1 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
126,2 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
Amplitude _____ Nm	Unterschied erkannt	falsch	sicherer Eindruck	Greifart	Bemerkungen
72,9 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
84 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
89 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
94,3 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
100 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
106 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
112,4 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
119,1 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	
126,2 %	<input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> kleiner		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	___ FZG ___ KG	

Bild A2.3: Exemplarischer Fragebogen der Untersuchung zur Unterschiedserkennung

Versuchsfragebogen(Aufgabe: 2 Rastpunkte weiterstellen)

Datum:

Greifart: Finger:

Drehung: UZS GUZS

Auffälligkeiten:

Versuchsdurchführung mit: links rechts

Alter: mm Beruf:

Händigkeit: links rechts beidhändig

Rei- bung	Moment im Wechsel Sinus	Win- kel	Erster Rastpunkt im Vergleich zum zweiten	Konnten sie, ihrer Meinung nach, die 2 Rastpunkte sicher/genau stellen?	War der erste oder der zweite Rastpunkt schwerer zu stellen?	Notiz: Hat der Proband genau 2 Rastungen weitergestellt?	Wirkten die Antworten des Probanden sicher?	Notiz
0.0 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.0 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.0 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.0 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.01 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.01 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.01 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.01 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.028 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.028 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.028 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
0.028 Nm	24°	<input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer <input type="checkbox"/> kleiner <input type="checkbox"/> größer	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich <input type="checkbox"/> erster <input type="checkbox"/> zweiter <input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> zu viel	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	

Bild A2.4: Exemplarischer Fragebogen zu den kombinierten Untersuchungen

Versuchsreihe:	VP-Nr. 1	Datum:									
persönliche Daten:											
Geschlecht <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich	Händigkeit <input type="checkbox"/> rechts <input type="checkbox"/> links										
Alter:	Beruf:										
Größe:	Hobbies:										
sonstiges:											
Aufgabe 1.1: Drehen Sie den Drehschalter so weit Sie möchten und geben Sie an, um welchen der sechs dargestellten Verläufe es sich handelt.											
Verlauf	Antwort		Verlauf	Antwort							
A			D								
C			B								
E			F								
D			E								
F			A								
B			C								
Aufgabe 1.2: Drehen Sie den Drehschalter um 4 Rastungen und geben Sie an welche der Rastungen schwerer war.											
Verlauf	Start	Ist-Zustand				Einstufung				Überdreht	
4	0°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
8	48°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
2	24°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
6	72°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
12	24°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
10	0°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
Aufgabe 1.3: Drehen Sie den Drehschalter um 4 Rastungen und geben Sie an welche der Rastungen leichter war.											
Verlauf	Start	Ist-Zustand				Einstufung				Überdreht	
7	0°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
5	48°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
3	24°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
1	72°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
9	24°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein
11	0°	<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"/>
		1	2	3	4	1	2	3	4	ja	nein

Bild A2.5: Exemplarischer Fragebogen zu den anwendungsorientierten Untersuchungen

Aufgabe 2.1:

Drehen Sie den Drehschalter bis zum Ende der ersten Funktion und noch bevor die zweite Funktion beginnt. Das Ende einer Funktion wird durch eine schwächere Rastung dargestellt. Sie dürfen bei einer Fehlpositionierung des Stellteils die Position korrigieren.

Verlauf	Insg. richtig gestellt		Korrigiert
2	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>
10	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>
13	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>
7	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>

Verlauf	Insg. richtig gestellt		Korrigiert
12	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>
9	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>
1	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>
8	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>
11	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>

Aufgabe 2.2:

Drehen Sie den Drehschalter bis zum Erreichen eines präferierten Wertes. Ein präferierter Wert wird durch eine stärkere Rastung dargestellt. Sie dürfen bei einer Fehlpositionierung des Stellteils die Position korrigieren.

Welche Funktion haben Sie gerade bedient?

Verlauf	Start	Insg. richtig gestellt		Korrigiert	Antwort
E	0°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
F	48°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
C	24°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
B	72°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
D	24°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
A	0°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	

Verlauf	Start	Insg. richtig gestellt		Korrigiert	Antwort
F	0°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
D	48°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
B	24°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
C	72°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
E	24°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	
A	0°	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	

Aufgabe 2.3:

Alle Funktionen können einen Wert darstellen, der zu- oder abnimmt. Dementsprechend nehmen auch die dazugehörigen Drehmomente zu oder ab.

Drehen Sie den Drehschalter um 3 Rastpunkte weiter und ordnen Sie dann das gefühlte Drehmoment folgenden Aussagen zu:

Wert nimmt zu () Wert bleibt gleich (-) Wert nimmt ab ()

Verlauf	Richtig gestellt		Antwort		
			1	2	3
5	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Verlauf	Richtig gestellt		Antwort		
			1	2	3
2	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bild A2.5: Exemplarischer Fragebogen zu den anwendungsorientierten Untersuchungen (Fortsetzung)

Aufgabe 3.1: Drehen Sie das Stellteil bis ich Ihnen sage zu stoppen und beschreiben Sie anhand dem bisher Gelernten, was Sie gerade bedienen.													
Ver- lauf Nr.	End- winkel	Anzahl Rastung- en	Ver- lauf Fkt. 1	Ver- lauf Fkt. 2	Ver- lauf Fkt. 3	Fkt.- Ende	Präf. Wert	Zu- Ab- Gleich			Insg. richtig gestellt		Korri- giert
									—		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	144°	6						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	72°	3						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	120°	5						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	168°	7						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	168°	7						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Aufgabe 3.2: Drehen Sie das Stellteil bis Sie die geforderte Angabe erreicht haben.							
Ver- lauf Nr.	Start- winkel	End- winkel	Angabe			Insg. richtig gestellt	Korri- giert
1	216°	72°	P bei A (SIN 0,08)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	0°	360°	Ende B (SIN 0,15)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	48°	168°	1 Rastung nach P bei B (SIN 0,15)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	144°	264°	P bei D (FSZ 0,15)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	288°	120°	Ende C (FSZ 0,08)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bild A2.5: Exemplarischer Fragebogen zu den anwendungsorientierten Untersu-
chungen (Fortsetzung)

A3 Erweiterte Auswertung der kombinierten Untersuchung

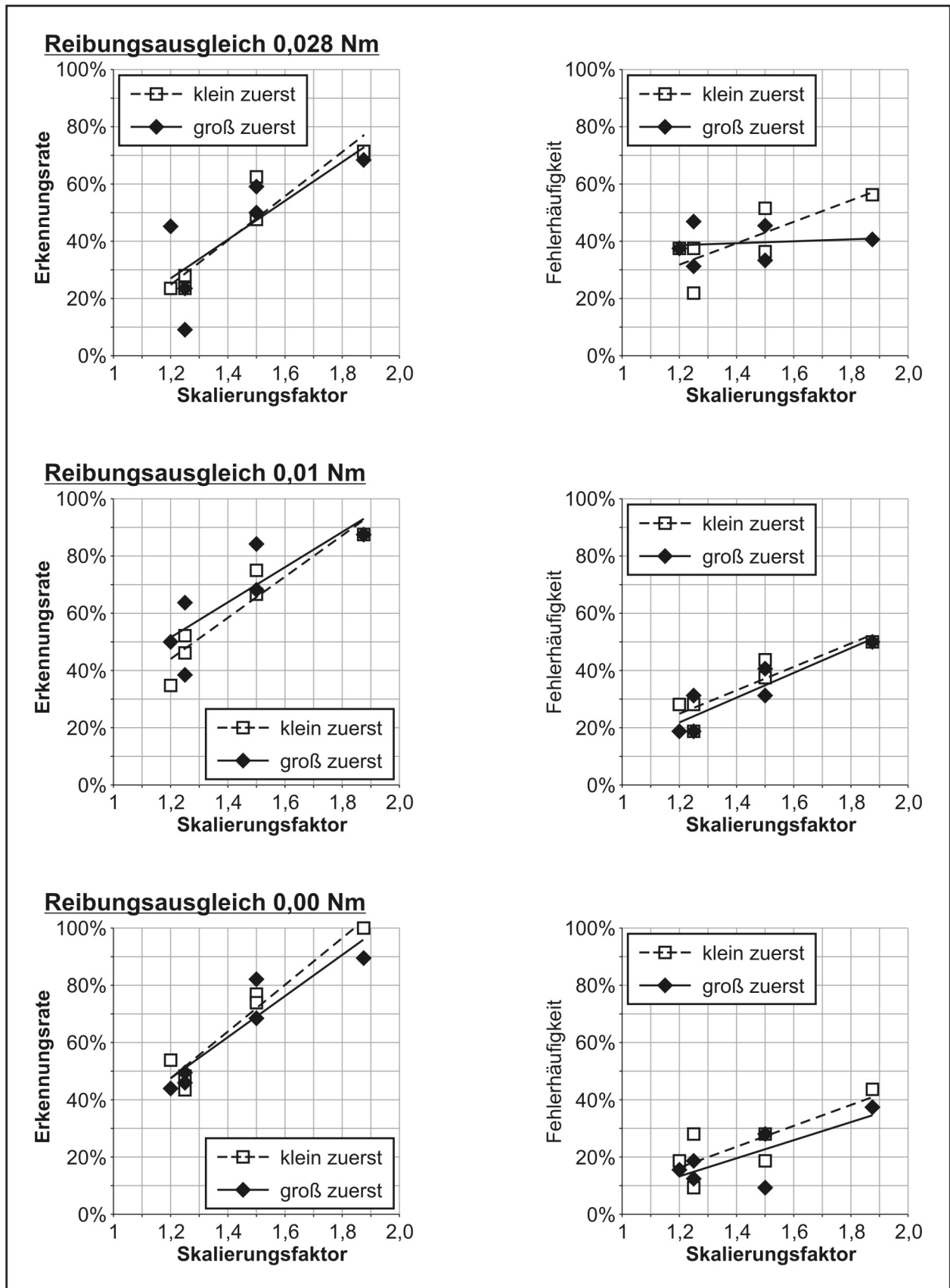


Bild A3.1: Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit von der Amplitudenreihenfolge bei einem flachen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf

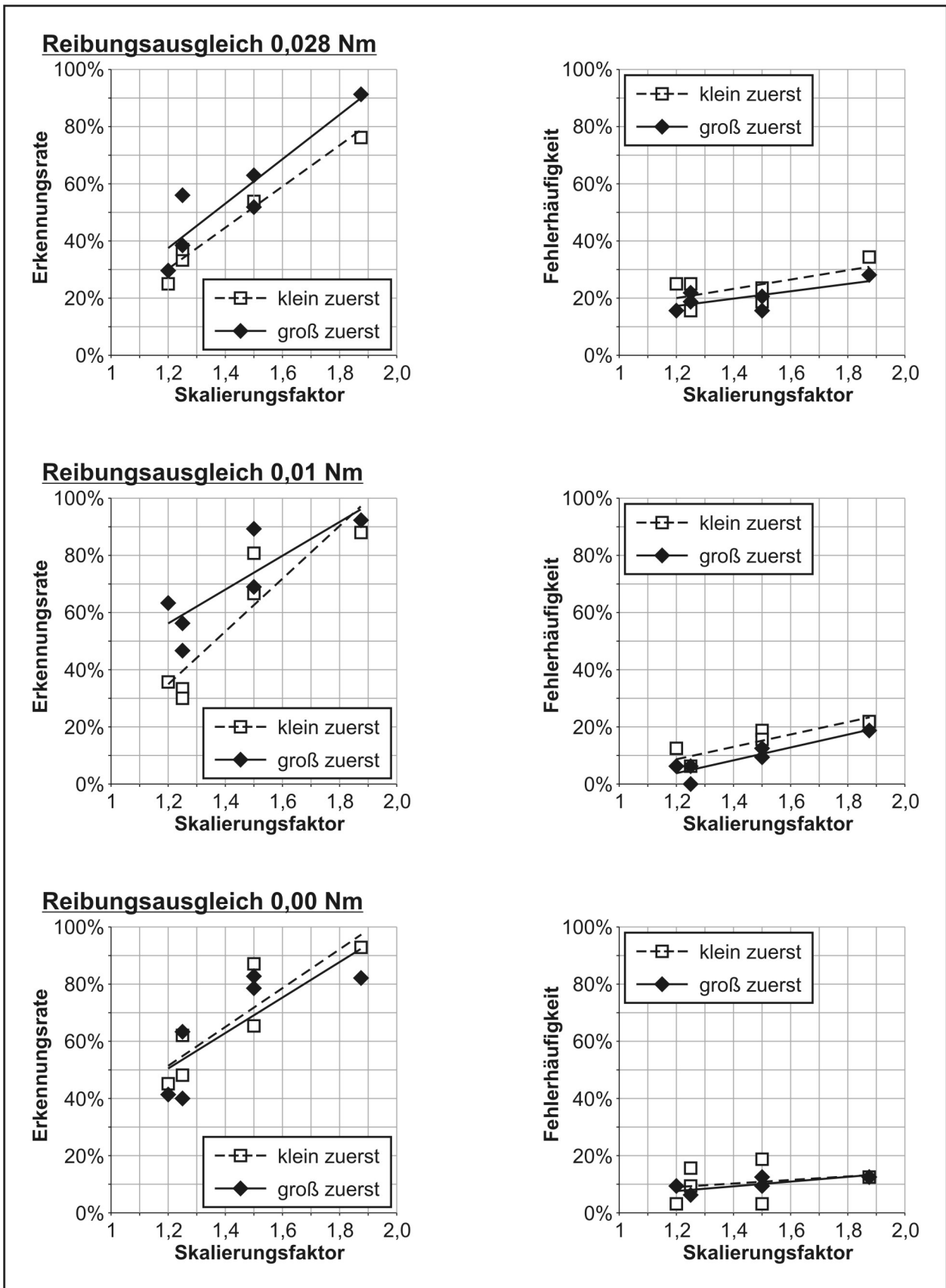


Bild A3.2: Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit von der Amplitudenreihenfolge bei einem steilen sägezahnförmigen Drehmomentverlauf

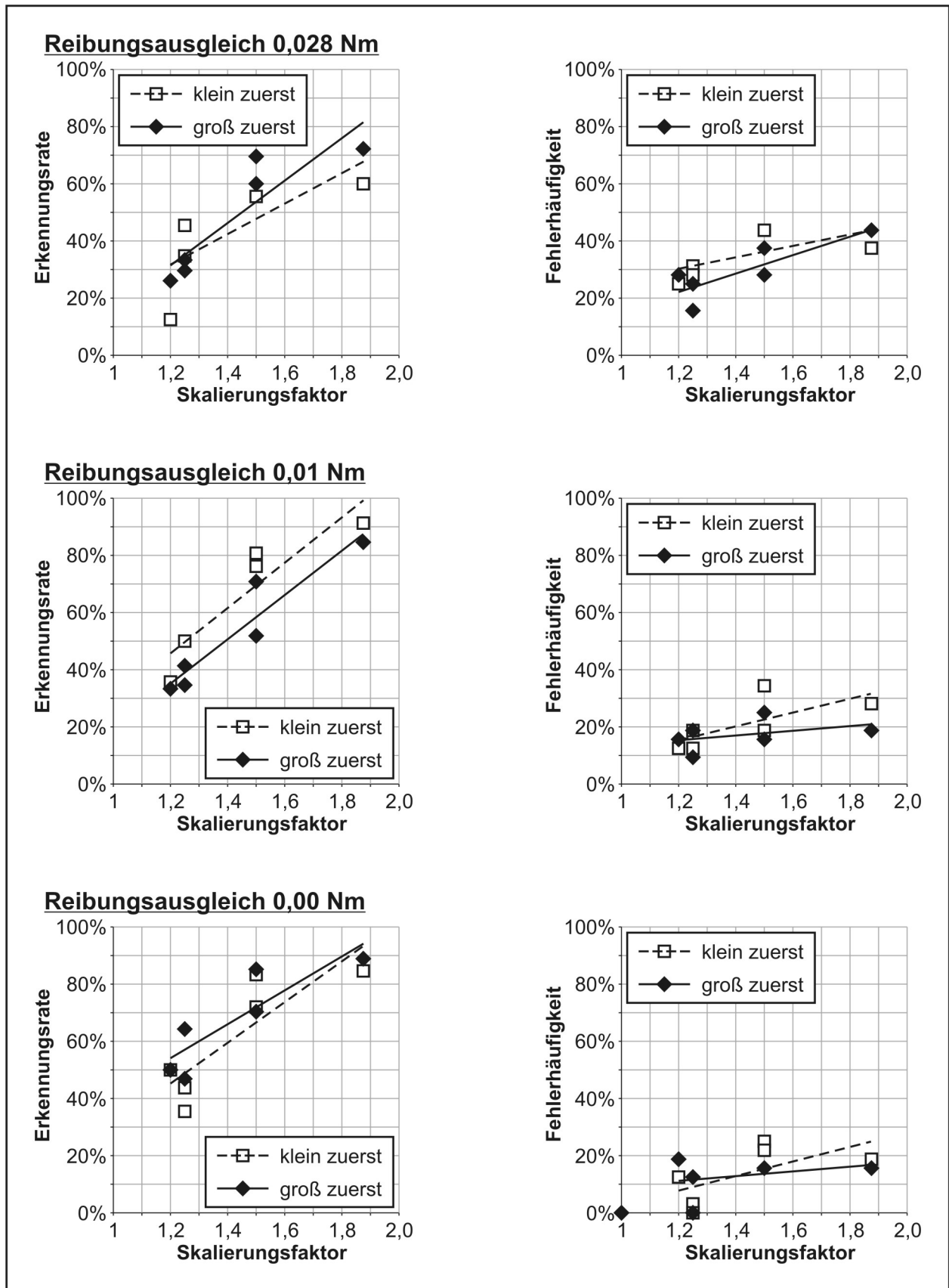


Bild A3.3: Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit von der Amplitudenreihenfolge bei einem sinusförmigen Drehmomentverlauf

A4 Anwendungsorientierte Untersuchung – Drehmomentverläufe

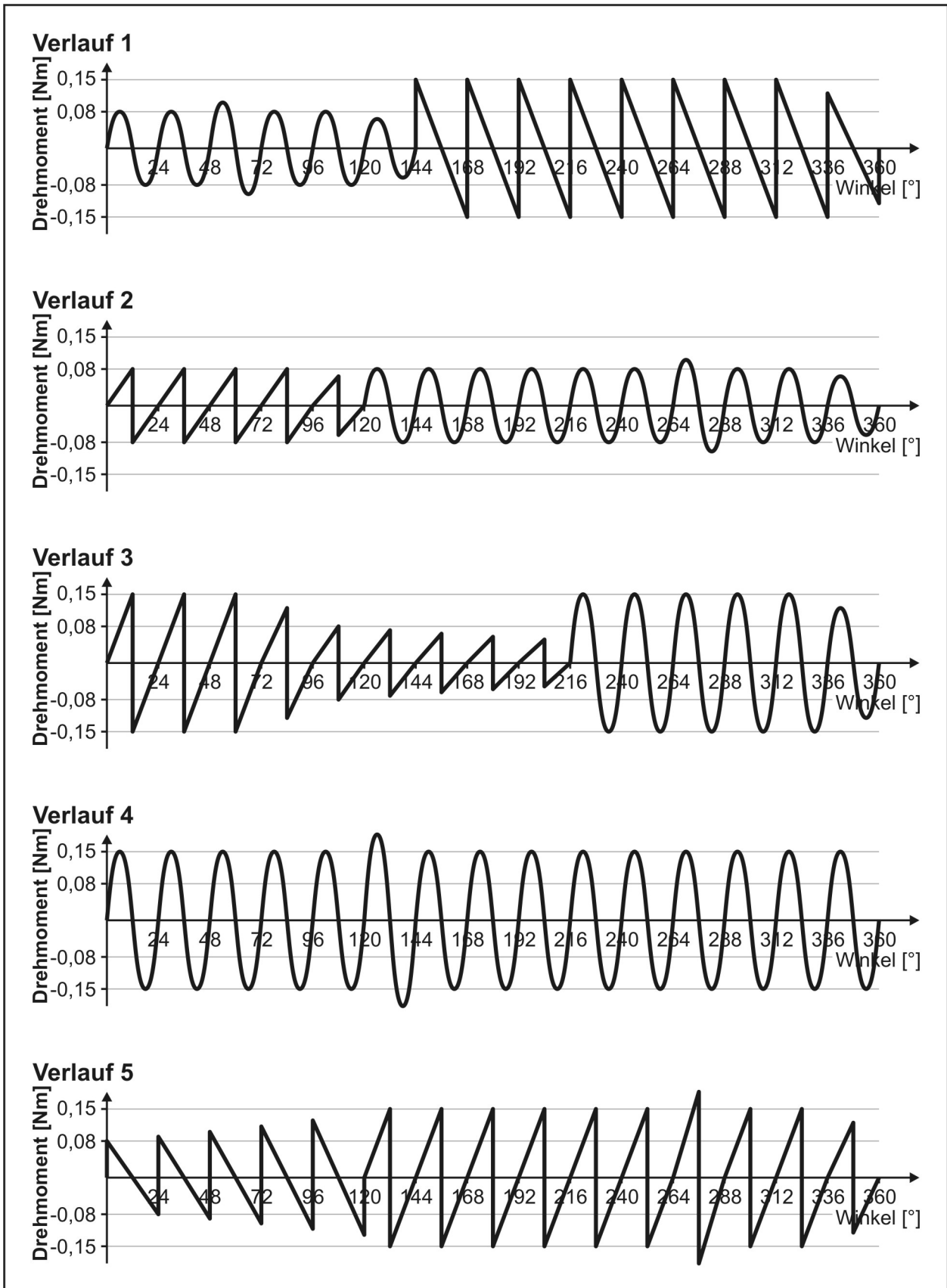


Bild A4.1: Drehmomentverläufe der Aufgabengruppe 3

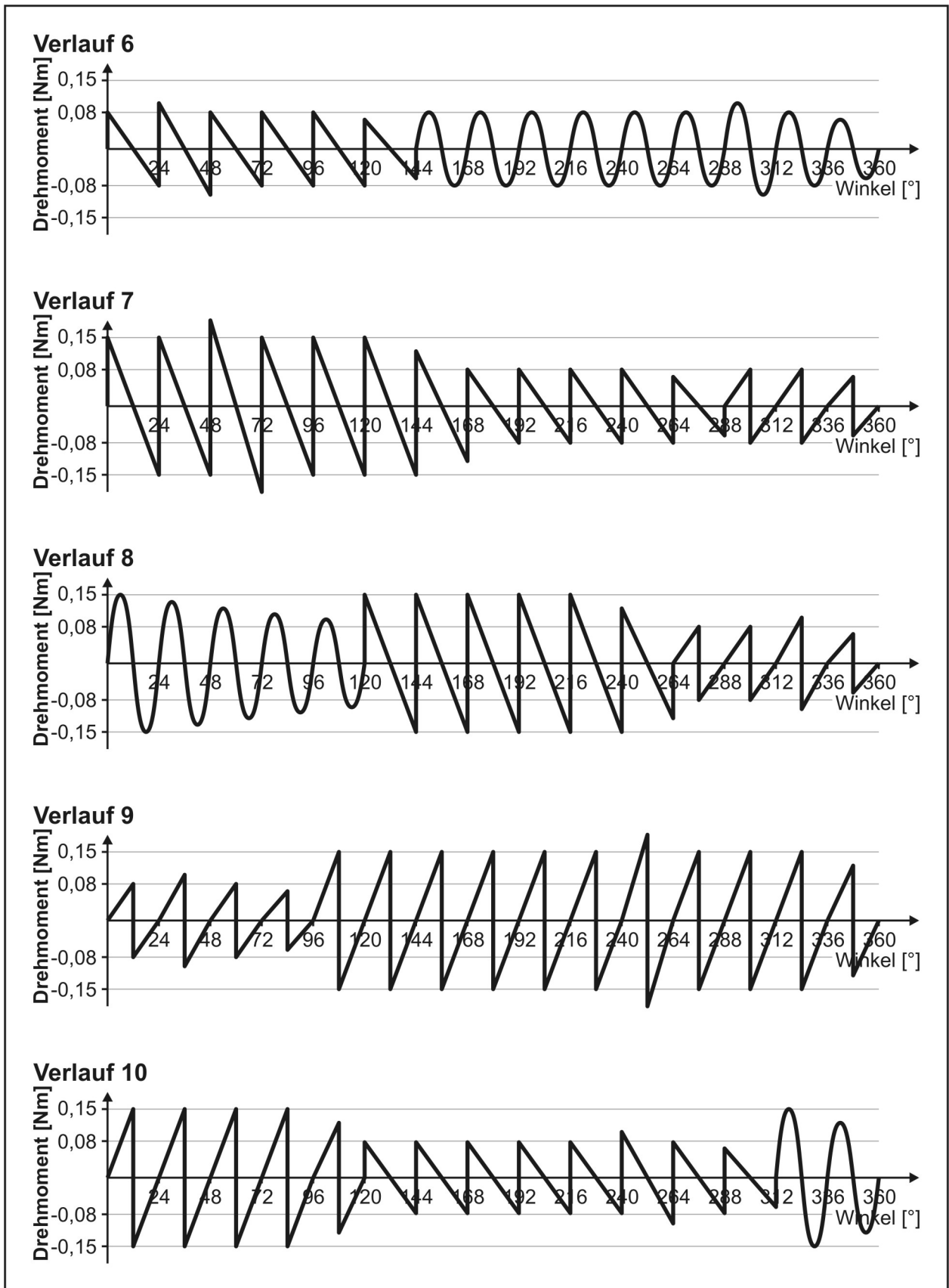


Bild A4.1: Drehmomentverläufe der Aufgabengruppe 3 (Fortsetzung)

Lebenslauf

Persönliche Angaben:

Name: Thomas Hampel
Geburtsdatum, -ort: 17.01.1980, Ellwangen (Jagst)
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulausbildung:

09/1990 – 07/1996 Besuch des Ost-Alb-Gymnasiums, Bopfingen
09/1996 – 07/1999 Allgemeine Hochschulreife am Ernährungswissenschaftlichen Gymnasiums, Justus-von-Liebig-Schule, Aalen

Studium:

10/1999 – 05/2005 Studium des Maschinenwesens an der Universität Stuttgart
Hauptfächer: Konstruktionstechnik, Werkzeugmaschinen

Beruflicher Werdegang:

seit 07/2005 Akademischer Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design der Universität Stuttgart, Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design

ISBN: 978-3-922823-78-0