

Dem Fachbereich 18 - Elektrotechnik und Informationstechnik -
der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) vorgelegte

Dissertation

**Entwurf eines elektromechanischen Systems
für flexibel konfigurierbare Eingabefelder
mit haptischer Rückmeldung**

von

Dipl.-Ing. Christoph Doerrer

geboren am 28. März 1972

in Kelkheim/Taunus

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. R. Werthschützky

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. E. Kallenbach

Tag der Einreichung: 23. Oktober 2003

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Dezember 2003

D 17

Darmstädter Dissertationen

Vorwort

Die vorliegende Arbeit habe ich im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektromechanische Konstruktionen an der Technischen Universität Darmstadt angefertigt.

Ich möchte mich in besonderem Maße bei Prof. Dr.-Ing. habil. R. Werthschützky für die Betreuung der Arbeit und den Freiraum bei deren Umsetzung bedanken. Auch sei Prof. Dr.-Ing. habil. E. Kallenbach für das Interesse und die Übernahme des Korreferates gedankt.

Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Institutes. Die freundliche, konstruktive und offene Atmosphäre war stets charakteristisch für das Institutsklima und hat somit stark zu meinem Wohlbefinden bei der täglichen Arbeit beigetragen. Fachliche Diskussionen, sowie tatkräftige Unterstützung waren für das Gelingen meiner Arbeit unerlässlich.

Auch bedanke ich mich bei den vielen Studierenden, die durch ihr Mitwirken an meinem Projekt dieses deutlich vorangetrieben haben. Gleichzeitig empfand ich die Betreuung von studentischen Arbeiten als sehr motivierend, inspirierend und bereichernd.

Schließlich danke ich meinen Eltern für die immer vorhandene Unterstützung und meiner Freundin für Geduld und Verständnis.

Darmstadt, im Januar 2004

Christoph Doerrer

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
1.1	Forschungsschwerpunkte	3
1.2	Gliederung der Arbeit	4
2	Haptische Wahrnehmung	7
2.1	Wahrnehmung des Menschen allgemein	7
2.2	Komponenten und Rezeptoren der haptischen Wahrnehmung	9
2.3	Besonderheiten der haptischen Wahrnehmung	14
2.4	Ausgewählte Kennwerte und Charakteristika der haptischen Wahrnehmung	15
3	Elektromechanische Systeme zur haptischen Stimulation	21
3.1	Anwendungen von haptischen Displays	21
3.2	Anforderungen an haptische Displays	24
4	Konzept für ein neuartiges Eingabefeld	29
4.1	Herausforderungen an Bediensysteme	29
4.1.1	Widerspruch zwischen Funktionalität und Nutzbarkeit	29
4.1.2	Bedeutung guter Bedienbarkeit	30
4.2	Stand der Technik von Bediensystemen und deren Schwachstellen	31
4.3	Stellenwert der Haptik bei der Gerätebedienung	33
4.3.1	Unterbewusste Handlungsabläufe aufgrund „Innerer Modelle“	34
4.3.2	Vergleich haptischer Stimulationen verschiedener Bediensysteme	35

4.3.3	Forderung nach haptischer Rückmeldung in Mensch-Maschine-Schnittstellen	40
4.4	Neues Konzept für Eingabefeld: „HapKeys“	40
4.4.1	Vorstellung des Bedienkonzeptes	41
4.4.2	Potenzial des Eingabefeldes	43
5	Untersuchungen mit einem Tastensimulator	47
5.1	Ziel der Experimente	47
5.2	Versuchsordnung und deren Eigenschaften	48
5.3	Versuch „Kraftsprung“	52
5.3.1	Versuchsdurchführung	52
5.3.2	Versuchsauswertung und Interpretation	54
5.4	Versuch „Kraft-Weg-Kennlinie einer Taste“	56
5.4.1	Versuchsdurchführung	56
5.4.2	Versuchsauswertung und Interpretation	58
6	Anforderungen an das Eingabefeld	61
6.1	Anforderungen zur Gewährleistung der Funktionalität	61
6.2	Anforderungen beim Einsatz als haptisches Display	62
7	Aktorentwurf	65
7.1	Bewertung möglicher Aktorprinzipien	65
7.2	Prinzipielle Aktorstruktur	68
7.3	Aktordimensionierung	69
7.3.1	Magnetische Flussdichte im Luftspalt	70
7.3.2	Thermisches Verhalten der Spulen	73
7.3.3	Kraftwirkung auf stromdurchflossene Spulen im Luftspalt	79
7.3.4	Analyse der Feldverläufe mit numerischer Simulation . .	81
7.4	Aktorkonstruktion	83
7.5	Bewertung des Aktors	87

8	Sensorentwurf	89
8.1	Positionssensorik	89
8.1.1	Bewertung möglicher Sensorprinzipien zur Positionsmessung	89
8.1.2	Aufbau der Positionssensoren	92
8.1.3	Bewertung der Positionssensorik	92
8.2	Bestimmung der Aktorkraft	95
9	Regelung	97
9.1	Anforderungen an die Regelung	97
9.2	Regelungsstruktur	98
9.2.1	Vergleich von Kraftregelung und Positionsregelung	98
9.2.2	Konzept der Regelung	99
9.3	Regelstrecke und Regler	102
9.3.1	Theoretische Modellierung der Regelstrecke	102
9.3.2	Praktische Messung des Übertragungsverhaltens	104
9.3.3	Einfluss des Fingers als Störgröße	105
9.3.4	Auswahl des Reglers	107
9.4	Umsetzung der Regelung	108
9.5	Bewertung der Regelung	111
10	Gesamtsystem	113
10.1	Beschreibung des Gesamtsystems und dessen Funktionalität	113
10.2	Erprobungsergebnisse	115
10.3	Resümee und Ausblick	124
11	Zusammenfassung	129
A	Aktordimensionierung	135
	Literaturverzeichnis	138

Formelzeichen

a		Steigung
A	[m ²]	Fläche, Querschnittsfläche
B	[T]	Magnetische Flussdichte
c	[J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹]	Spezifische Wärmekapazität
C_τ	[J·K ⁻¹]	Wärmekapazität
d	[m]	Durchmesser
F	[N]	Kraft
h	[m]	Höhe
H	[A·m ⁻¹]	Magnetische Feldstärke
i, I	[A]	Elektrischer Strom
j	[A·m ⁻²]	Stromdichte
k	[1]	Windungszahl
l	[m]	Länge, Leiterlänge
L	[H]	Induktivität
m	[kg]	Masse
n	[m·N ⁻¹]	Nachgiebigkeit
P_{el}	[W]	Elektrische Leistung
r	[N·s·m ⁻¹]	Reibung
R	[Ω]	Ohmscher Widerstand
R_m	[H ⁻¹]	Magnetischer Widerstand
$R_{\tau,L}$	[K·W ⁻¹]	Wärmeleitungswiderstand
$R_{\tau,\ddot{U}}$	[K·W ⁻¹]	Wärmeübergangswiderstand
s	[m]	Länge, Weg, Hub
S	[1]	Streufaktor
t	[s]	Zeit
u, U	[V]	Elektrische Spannung
v	[m·s ⁻¹]	Geschwindigkeit
V	[m ³]	Volumen
w	[J·m ⁻³]	Energiedichte
W	[J]	Energie
x	[m]	Auslenkung, Position
Z_{el}	[Ω]	Elektrische Impedanz
Z_{mech}	[N·s·m ⁻¹]	Mechanische Impedanz
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Wärmeübergangszahl
γ	[m ⁻²]	Wickeldichte

λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Spezifische Wärmeleitfähigkeit
μ_0	$[\text{H}\cdot\text{m}^{-1}]$	Magnetische Feldkonstante
μ_r	[1]	Relative magnetische Permeabilität
ϑ	[K]	Temperatur
Θ	[A]	Magnetische Durchflutung
ϕ_m	$[\text{V}\cdot\text{s}]$	Magnetischer Fluss
ϕ_τ	[W]	Wärmestrom
ω	$[\text{s}^{-1}]$	Kreisfrequenz
\dots		komplexe Größe

Indices

0	Luftspalt
el	elektrisch
Dr	Draht
Lu	Luft
M	Magnet
max	maximal
mech	mechanisch
PS	Polschuh
RS	Rückschluss
Sp	Spule
Wi	Wicklung
_i	innen
_a	außen
τ	thermische Größe

Abkürzungen

ESB	Ersatzschaltbild
JND	Just Noticeable Difference
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
ZNS	Zentrales Nervensystem

1 Motivation

Users do not care about what is inside the box, as long as the box does what they need done . . . As far as the customer is concerned, the interface is the product.

Jef Raskin

(Creator of the Macintosh Computer Project at Apple Computer)

Technische Geräte greifen immer stärker in unser Leben ein. In der industriellen Revolution wurden schwere körperliche oder mühselige und monotone Arbeiten durch neu entwickelte Maschinen übernommen. Seit den letzten zwei Jahrzehnten sind technische Geräte Begleiter unseres Alltags geworden, deren Präsenz in Zukunft voraussichtlich noch deutlich wachsen wird. Schon heute bedeuten Fortbewegung, Kommunikation, Arbeits- und Freizeitbeschäftigungen fast ständigen Umgang mit technischen Systemen. Und es nimmt nicht nur der Kontakt zwischen Menschen und Maschinen zu, sondern ebenfalls die Komplexität der zu bedienenden Geräte. Während früher die Funktionalität der Geräte noch einfach und überschaubar war, so ist heute ein rasant ansteigender Funktionsumfang zu beobachten. Einige Beispiele sollen diese zunehmende Technisierung des täglichen Lebens verdeutlichen:

- Moderne Küchenherde können per Timer programmiert werden: Startzeit, Kochdauer und Temperatur sind voreinstellbar.
- Videokameras bieten u.a. Titeleinblendungen, Filmschnittmöglichkeiten und etliche bildgestalterische Spezialeffekte.
- Heimkinos bestehend aus Video-Projektor, DVD-Spieler und Dolby-Surround Verstärker müssen für optimale Bild- und Tonwiedergabe aufeinander abgestimmt werden.
- Telefone können z.B. Rufnummern speichern, Gespräche umleiten, Dreierkonferenzen aufbauen. Oft sind zusätzlich Anrufbeantworterfunktionen integriert. Mobilfunktelefone ermöglichen häufig Weckfunktionen, Adress- und Terminverwaltungen, sowie einfache Videospiele.

- Bei Autoradios kann man einstellen, ob und wie laut Verkehrsnachrichten wiedergegeben werden, bei welcher Musikrichtung der Sendersuchlauf stoppt, usw.
- In Kraftfahrzeugen werden zunehmend Klimaanlage, Sitzheizung, Fenster, Schiebedach, Sitzposition, Außenspiegel u.ä. elektrisch eingestellt. Auch Navigationssysteme sind häufiger zu finden.
- Fahrkarten für öffentliche Verkehrsmittel werden weitgehend an Automaten verkauft. Dazu sind Start- und Zielort, sowie Preis- und weitere Reiseoptionen einzugeben.
- In Banken und Sparkassen gibt es Automaten für Kontoauszüge, Bargeldausgabe, Überweisungen und sogar Versicherungs- und Sparplanabschlüsse.
- Messtechnische Geräte wie Oszilloskope können mit PCs kommunizieren und ermöglichen komplexe mathematische Funktionen wie Fourier-Analysen.
- Bei Fertigungsgeräten wie Dreh- oder Fräsmaschinen werden per Software Verfahrene und Abtragungsgeschwindigkeiten programmiert.

Zusammenfassend ist ein deutlicher Trend zum vermehrten Einsatz technischer Einrichtungen in allen Bereichen des Lebens erkennbar. Zusätzlich wachsen Funktionsvielfalt und Anwendungsmöglichkeiten dieser Einrichtungen stetig an. Daher ist es einsichtig, dass die Mensch-Maschine-Schnittstelle, also das Kopplungsglied zwischen dem Gerät und dem Benutzer, zunehmende Aufmerksamkeit bei der Produktentwicklung erhalten muss. Denn längst ist es Vergangenheit, dass sich ausschließlich technik-interessierte Menschen voller Enthusiasmus mit modernen Maschinen beschäftigen. Jeder Bürger ist gezwungen, sich mit diesen Apparaten auseinanderzusetzen. Die dabei auftretenden Schwierigkeiten sind beispielsweise bei einigen Senioren zu beobachten, die von Fahrscheinautomaten regelmäßig an die Grenzen ihrer Fähigkeiten und Geduld gebracht werden. Ziel muss es demnach sein, intuitive Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Verfügung zu stellen, die eine leicht erlernbare Bedienung ermöglichen.

Betrachtet man die geschichtliche Entwicklung der Bedienfelder von Maschinen, so werden die Bemühungen zum Erreichen dieses Zieles durch Einsatz der jeweils neusten Technologien deutlich [83]: Anfangs wurden ausschließlich einfache Elemente wie Knöpfe und Hebel zur Bedienung verwendet, sowie Analog- oder Digitalanzeigen zur Informationsdarstellung. Hauptnachteil war die Notwendigkeit je eines Bedien- und Anzeigeelementes für jede einzelne Funktion des Ge-

rates. Die Entwicklung der Kathodenstrahlröhre ermöglichte Anzeigeeinrichtungen, die eine Vielzahl von Informationen gleichzeitig oder zeitlich nacheinander am selben Ort darstellen können. Der Platzbedarf der Röhren konnte durch die Einführung von Flachbildschirmen wie LC- oder TFT-Displays deutlich reduziert werden. Parallel zur Entwicklung im Bereich der Anzeigen wurden die Vorrichtungen zur Befehls- und Dateneingabe ebenfalls verbessert. Um die Tasten von Eingabefeldern mit unterschiedlichen Funktionen belegen zu können, wurde ihre Beschriftung in begrenztem Rahmen variabel ausgelegt. Dennoch blieb die Größe und Form der einzelnen Tasten unveränderbar. Dieser Nachteil wurde zunächst mit der *Lichtgriffeltechnik*, dann mit *Touch-Screens* zu beseitigen versucht. Hier werden virtuelle Tasten als frei gestaltbare Bedienelemente direkt auf dem Bildschirm dargestellt. Jedoch erkaufte man sich damit einen schwerwiegenden Mangel, nämlich den Verlust von haptischen Rückmeldungen an den Benutzer. Darauf wird in Kapitel 4 ausführlich eingegangen. Als weitere Eingabegeräte sind die sogenannte *Maus* für den Computerbereich und die gerade in der Entwicklung befindliche *Spracheingabe* zu nennen.

Dieser kurze Abriss über die Fortentwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle deutet an, was sich in der Praxis längst als Tatsache herausgestellt hat: In neuen technischen Geräten kommen immer häufiger Bildschirme aller Art zum Einsatz, wodurch ein klarer Schwerpunkt auf die visuelle Informationsaufnahme des Menschen gelegt wird. Dabei gerät zunehmend in den Hintergrund, dass die Maschinenbedienung ein multimodaler, also mehrere Sinneskanäle ansprechender Vorgang ist. Besonders die Haptik - die Wahrnehmung durch den Tastsinn - hat eine zentrale Bedeutung. Sie ermöglicht das örtliche ertasten einer Anordnung von Bedienelementen, das sichere Positionieren der Finger an diesen Stellteilen und eine eindeutige Wahrnehmung als Bestätigung des Bedienvorganges.

Daher wird in dieser Arbeit ein neuartiger Ansatz zur intuitiven Bedienung technischer Geräte durch gezielte Reizung der haptischen Sinneszellen erarbeitet und in Form eines elektromechanischen Systems umgesetzt.

1.1 Forschungsschwerpunkte

Ausgehend von der Analyse von aktuellen Bediensystemen werden deren Schwachstellen aufgezeigt. Als Hauptproblem stellt sich dabei das Fehlen einer angemessenen Rückmeldung an den menschlichen Tastsinn dar. Die Ursachen für den hohen Stellenwert dieser haptischen Rückmeldung und die Folgen bei deren Vernachlässigung werden ausführlich untersucht.

Aus den Ergebnissen wird ein neuartiges Konzept zur Erfüllung der Anforderungen an Bediensysteme für komplexe technische Geräte abgeleitet. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf flexibel konfigurierbaren Schaltelementen und der haptischen Reizübermittlung.

Zur Umsetzung des Konzeptes ist eine ingenieurwissenschaftliche Beschreibung der haptischen Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine notwendig. Eine umfangreiche Literaturrecherche und -analyse führt zu einer Zusammenstellung quantitativer technischer Merkmale, die von Bedien- und Anzeigeelementen zur gezielten haptischen Reizung der menschlichen Hand zu erfüllen sind. Lücken in der Literatur werden durch eigene Versuchsreihen geschlossen.

Das neuartige Eingabefeld wird durch ein elektromechanisches System, bestehend aus den drei Hauptkomponenten Aktorik, Sensorik und Regelung, umgesetzt. Die Prinzipienauswahl und Festlegung der Entwurfparameter erfolgt unter dem Gesichtspunkt der Sicherung der Anforderungen für das Gesamtsystem. Die Ergebnisse werden als Prototyp eines Bediensystems praktisch realisiert.

Die experimentelle Erprobung und Charakterisierung des haptischen Bedienfeldes stellt den abschließenden Forschungsschwerpunkt dar. Die ausführlichen Experimente dienen dem Nachweis der Zweckmäßigkeit der vorgeschlagenen Lösung.

1.2 Gliederung der Arbeit

Im folgenden Kapitel 2 „*Haptische Wahrnehmung*“ werden Grundlagen der Sinneswahrnehmung und Besonderheiten des Tastsinnes dargelegt. Technische Systeme zur gezielten Reizung dieses Wahrnehmungskanals sind Inhalt des Kapitels 3 „*Elektromechanische Systeme zur haptischen Stimulation*“.

Die detaillierte Ableitung eines neuen Ansatzes zur Gerätebedienung aus dem bisherigen Stand der Technik und dessen Defiziten erfolgt im Kapitel 4 „*Konzept für ein neuartiges Eingabefeld*“. Bevor die endgültigen „*Anforderungen an das Eingabefeld*“ in Kapitel 6 zusammengefasst werden können, sind Voruntersuchungen für diesen speziellen Anwendungsfall haptischer Displays notwendig. Die Durchführung und Ergebnisse der Experimente sind in Kapitel 5 „*Untersuchungen mit einem Tastensimulator*“ dargestellt.

In den sich anschließenden Kapiteln werden die Entwicklung und Realisierung der Hauptbestandteile des elektromechanischen Systems vorgestellt: Kapitel 7 be-

schäftigt sich mit dem „*Aktorentwurf*“, Kapitel 8 mit dem „*Sensorentwurf*“ und Kapitel 9 mit der „*Regelung*“ der Sensor-Aktor-Systeme.

Die ganzheitliche Betrachtung des entstandenen Bedienfeldes erfolgt in Kapitel 10 „*Gesamtsystem*“, ebenso wie ein Ausblick auf zukünftiges Entwicklungspotenzial. Kapitel 11 „*Zusammenfassung*“ greift nochmals die wichtigsten Vorgehensweisen, Entscheidungen und Ergebnisse bei der Konzeptbildung und Entwicklung des elektromechanischen Systems auf.

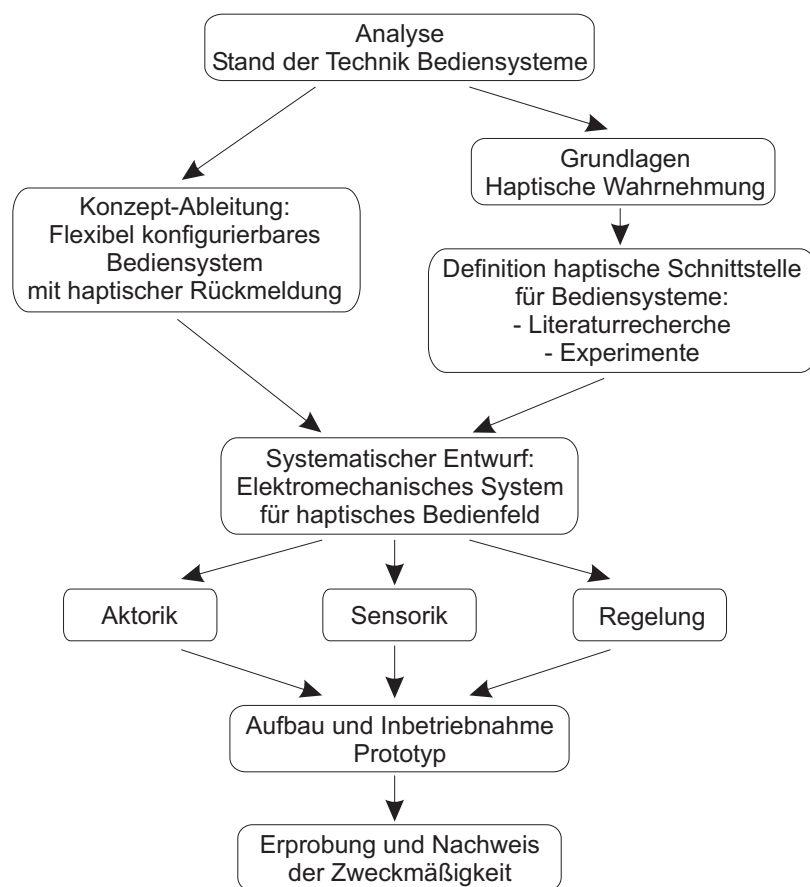


Abbildung 1.1: Schwerpunkte der Arbeit.

2 Haptische Wahrnehmung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung und vertieft diese im Bereich des Tastsinnes. Begriffe werden definiert, sowie besondere Charakteristika und ausgewählte Kennwerte der haptischen Fähigkeiten dargestellt.

2.1 Wahrnehmung des Menschen allgemein

Die Wahrnehmung ermöglicht dem Menschen die Aufnahme von Informationen über seine Umwelt und über sich selbst. Spezielle Organe des menschlichen Körpers reagieren auf unterschiedliche physikalische oder chemische Größen.

Das zentrale Nervensystem (ZNS) wertet die Informationen der Wahrnehmungsorgane aus, leitet daraus z.B. Bewegungsabläufe ab und setzt sie durch gezielte Aktivierung der Muskulatur um. Diese Abläufe betrachtend ist eine Analogie zu technischen Systemen erkennbar, wie Abb. 2.1 zeigt: Eine Regelung wertet Sensorsignale aus und steuert darauf aufbauend Aktoren an.

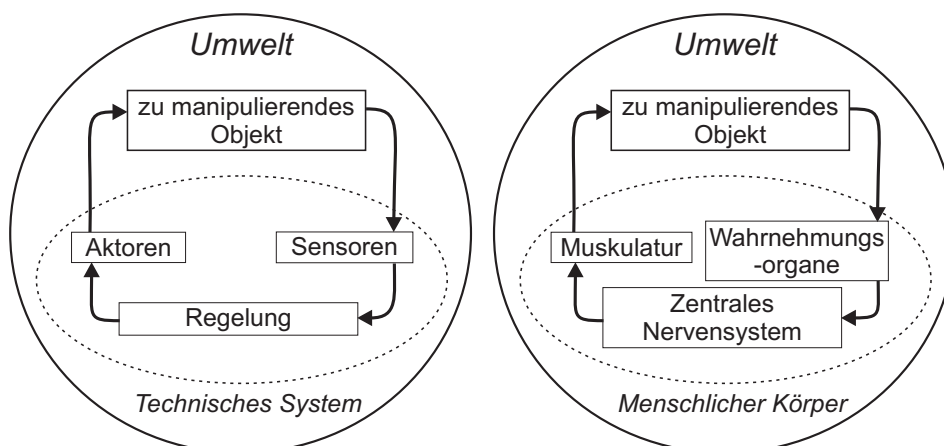


Abbildung 2.1: Vergleich zwischen technischem System und menschlichem Körper bei Interaktion mit Objekten aus der Umwelt.

Bei der Auswertung der „menschlichen Sensoren“ laufen während des Überganges von der Sinnesreizung zur bewussten Wahrnehmung komplexe Vorgänge im Körper ab [25][26][27][102]: Die Zellen der Sinnesorgane reagieren auf definierte physikalische oder chemische Reize. Trifft ein solcher adäquater Reiz auf die Zelle, so wird sie in einen angeregten Zustand durch Auslösung des sogenannten *Aktionspotenzials* versetzt. Die zentralen Vorgänge beruhen dabei auf einer Veränderung der Leitfähigkeit der Zellmembran für Kalium- und Natrium-Ionen. Der Reiz wird innerhalb der lang ausgedehnten Nervenzellen geleitet, indem das Aktionspotenzial an benachbarte Zellbereiche weitergereicht wird.

Zwischen zwei Zellen findet die Informationsübertragung an *Synapsen* durch die Ausschüttung chemischer Trägerstoffe statt. In der Regel sind mehrere Nervenzellen an den Synapsen miteinander verbunden und beeinflussen gemeinsam die Reizübergabe. Je nach eingesetzten Trägerstoffen können sich die Reize unterschiedlicher Zellen an den Synapsen gegenseitig unterstützen, aber auch hemmen.

Über eine Vielzahl synaptischer Kopplungen gelangt die Reizung vom Ort der Stimulation in den Bereich des zentrale Nervensystems, das sich aus dem Gehirn und dem Rückenmark zusammensetzt. Bis zu diesem Punkt gehören die Vorgänge der *objektiven Sinnesphysiologie* an, da sie mit geeigneter Messtechnik nachweisbar sind. Die anschließende Weiterverarbeitung im ZNS zu subjektiven Wahrnehmungen kann nicht mehr beobachtet oder gemessen werden und ist daher der *Wahrnehmungspsychologie* zugeordnet. Abb. 2.2 zeigt die Zwischenstufen und Zusammenhänge bei der Verarbeitung des Reizes zur Wahrnehmung. Ein Beispiel soll die unterschiedlichen Verarbeitungsschritte verdeutlichen:

Elektromagnetische Schwingungen der Wellenlänge 440 nm lösen den Sinneseindruck „blau“ aus. Die Aussage: „Ich sehe eine blaue Fläche, in die runde, weiße Flächen verschiedener Größe eingelagert sind“, beschreibt Sehempfindungen. Normalerweise nehmen wir aber unmittelbar eine Deutung dieser Sinnesempfindungen vor, wir ordnen sie in Erfahrenes und Erlerntes ein, aus der Empfindung wird eine Wahrnehmung. Der oben geschilderten Empfindung entspricht die Wahrnehmung „Am Himmel stehen Wolken“. Wahrnehmungen sind immer erfahrungsgeprägt. Ein Meteorologe sieht Stratocumuli, ein Kinderbuchillustrator Schäfchenwolken. [34]

Zur Bildung von Wahrnehmungen hat der Mensch Zugriff auf Informationen aus fünf unterschiedlichen Sinneskanälen (s. Tabelle 2.1). Man spricht auch von

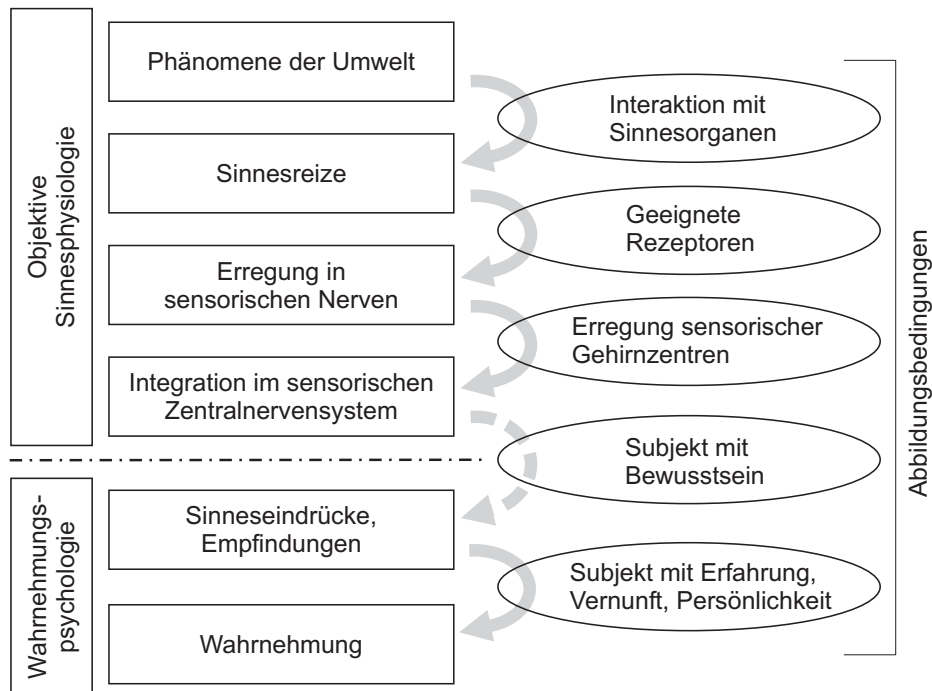


Abbildung 2.2: Schema der einzelnen Abbildungsstufen bei der Wahrnehmung (eigene Darstellung nach [34]).

den fünf Sinnen des Menschen: Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen wobei die Bezeichnung „Fühlen“ unterschiedliche Assoziationen hervorrufen kann: Das Wort „Gefühl“ ist ableitbar, womit auch geistige Eindrücke oder Gemütslagen beschrieben werden (...*ich habe das Gefühle...ich fühle mich unwohl...*). Um Missverständnisse zu vermeiden wird daher vom Tastsinn oder der *Haptik* gesprochen:

Haptik, *die*: Lehre vom Tastsinn (Psychol.)

haptisch [*gr.*: „greifbar“]: den Tastsinn betreffend [28]

2.2 Komponenten und Rezeptoren der haptischen Wahrnehmung

Der haptische Sinneskanal kann in zwei grundlegende Komponenten unterteilt werden: Die *taktile* und die *kinästhetische* Wahrnehmung. Diese Begriffe werden nicht von allen Autoren in der gleichen Bedeutung verwendet. Daher wird zunächst die im weiteren Verlauf verwendete und an [11] und [98] anlehende Terminologie vorgestellt:

Tabelle 2.1: Übersicht der Sinneskanäle des Menschen zur Wahrnehmung seiner Umwelt.

	SEHEN	HÖREN	RIECHEN	SCHMECKEN	„FÜHLEN“ (TASTSINN)
Sinnesorgan	Auge	Ohr	Nase	Zunge	verteilt in Haut und Bewegungs- apparat
Bezeichnung der Wahrnehmung	visuell	auditiv	olfaktorisch	gustatorisch	haptisch
Erscheinungs- form des Reizes	elektro- magnetische Wellen	mechanische Wellen	chemische Stoffe	chemische Stoffe	mechanische Größen

Taktile Wahrnehmung: Die taktile¹ Wahrnehmung wird auch *Oberflächensensibilität* genannt [102], da die entsprechenden Sinneszellen in der menschlichen Haut – d.h. oberflächennah – angeordnet sind. Sie reagieren auf Auslenkungen der Haut, Vibrationen und Temperatur [98]. Dadurch spielen sie bei der Wahrnehmung von Berührungen zwischen Mensch und Umwelt, Oberflächenbeschaffenheiten von Gegenständen oder Bewegungen berührter Objekte eine entscheidende Rolle.

Kinästhetische Wahrnehmung: Bei der kinästhetischen² Wahrnehmung spricht man auch von *Tiefensensibilität* [102], da die Sinneszellen sich „tiefer“ im menschlichen Körper in Muskeln, Sehnen und Gelenken befinden [11]. Stellung und Bewegung des Körpers, sowie die von der Muskulatur aufgebrauchten Kräfte für dessen Beschleunigung oder Fixierung werden durch die Kinästhetik wahrgenommen. Es handelt sich also um Informationen über den Körper selber, nicht über seine Umwelt. Eine weitere gebräuchliche Bezeichnung der kinästhetischen Wahrnehmung ist *propriozeptive Sensibilität*³ oder *Propriozeption* [86].

¹lat. taktum: Berührung

²gr.-nlat. kinästhetisch: auf die Muskelempfindung bezogen, bewegungsempfindlich

³lat. proprius: eigen ; lat. sensibilis: Fähigkeit zu empfinden

[28]

„propriozeptive Sensibilität“ kann interpretiert werden als „Wahrnehmung von körpereigenen Zuständen“

Haptische Wahrnehmung: Haptische Wahrnehmung bildet den Oberbegriff zu taktiler und kinästhetischer Wahrnehmung und beinhaltet Sinnesreize aus beiden Komponenten. Dies deckt sich mit dem bereits eingeführten Begriff „Tastsinn“, da das „Ertasten“ eines Gegenstandes die aktive Bewegung von Händen und Fingern voraussetzt. Durch die Bewegung findet eine kinästhetische Reizung statt, während aufgrund der Dehnung und Auslenkung der Haut – was einer taktilen Reizung entspricht – die Oberflächenbeschaffenheit des Objektes erkannt wird. Ein statisches Ablegen der Fingerkuppe auf einer Oberfläche bewirkt keine intensive Wahrnehmung deren Struktur. Erst wenn der Finger über die Oberfläche gleitet, können Aussagen über Rauigkeit o.ä. gemacht werden. Somit ist ein „Ertasten“ nur durch die Kombination von kinästhetischen und taktilen Informationen möglich. Daher kann das Wort „Tastsinn“ synonym zu „haptischer Wahrnehmung“ verwendet werden.

Ausgehend von diesen Definitionen können die Sinneszellen oder *Rezeptoren* der taktilen und kinästhetischen Komponente der Haptik ebenfalls unterschieden werden:

Rezeptoren der taktilen Wahrnehmung

Die Rezeptoren der taktilen Empfindlichkeit befinden sich in der Haut des Menschen (s. Abb. 2.3). Da sie auf mechanische Reize reagieren, werden sie auch *Mechanorezeptoren* genannt. Temperatur- und Schmerzempfindung sind ebenfalls der taktilen Wahrnehmung zugeordnet, werden jedoch in dieser Arbeit aufgrund der geringen Relevanz für die Entwicklung von haptischen Mensch-Maschine-Schnittstellen nicht weiter betrachtet.

Die Gesamtheit der Mechanorezeptoren ist in vier Rezeptortypen einteilbar [102][118]: SA-I, SA-II, RA-I und RA-II. SA und RA stehen für *Slowly* bzw. *Rapidly Adapting* und deutet auf die unterschiedlich schnellen Adaptionsverhalten hin. Adaption bezieht sich auf die Gewöhnung an einen unverändert anliegenden Reiz. Langsam adaptierende Sinneszellen reagieren auf einen solchen Reiz deutlich länger als schnell adaptierende Zellen. Die römischen Ziffern I und II beschreiben die Größe des Gebietes, in welchem ein Rezeptor auf einen Reiz reagiert. Eine römische I zeigt ein kleines sogenanntes *rezeptives Feld* an, während eine römische II entsprechend für ein großes Feld steht. Da SA-Rezeptoren auf annähernd statische Reize (Stimulationsfrequenz 0...10 Hz) reagieren, sind sie Indikatoren für die Intensität der Reize. Merkscheiben sind für Reize senkrecht

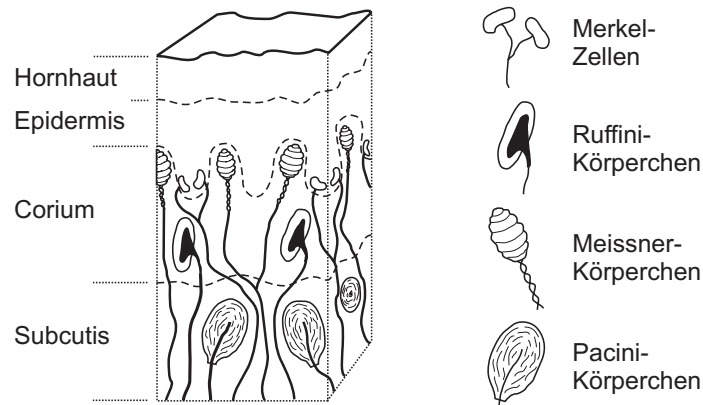


Abbildung 2.3: Art und Lage der taktilen Mechanorezeptoren in unbehaarter Haut (eigene Darstellung nach [118]).

zur Hautoberfläche sensibel, Ruffini-Körperchen für Dehnungen der Haut. RA-Rezeptoren sprechen nicht auf die statische Auslenkung oder Dehnung der Haut an, sondern auf deren dynamische Veränderung. Meissner-Körperchen agieren als Geschwindigkeits-Sensoren, Pacini-Körperchen zeigen die Beschleunigung an [118]. Tabelle 2.2 fasst die Eigenschaften der Mechanorezeptoren zusammen.

Tabelle 2.2: Eigenschaften der Mechanorezeptoren (aus [11] und [98]).

REZEPTOR-TYP	ANTWORT-VERHALTEN	STIMULATIONSFREQUENZ	REZEPTIVES FELD	FUNKTION	ZUR WAHRNEHMUNG VON
Merkel-scheiben	SA-I	0-10 Hz	klein, klar abgegrenzt (11 mm ²)	Intensitäts-Sensor	Druck
Ruffini-Körperchen	SA-II	0-10 Hz	groß, keine klaren Grenzen (60 mm ²)	Intensitäts-Sensor	Statische Kraft, Scherdehnung
Meissner-Körperchen	RA-I	20-50 Hz	klein, klar abgegrenzt (12 mm ²)	Geschwindigkeits-Sensor	Geschwindigkeit
Pacini-Körperchen	RA-II (oder PC)	100-300 Hz	groß, keine klaren Grenzen (100 mm ²)	Beschleunigungs-Sensor	Beschleunigung, Vibrationen

Rezeptoren der kinästhetischen Wahrnehmung

Die Rezeptoren der kinästhetischen Empfindlichkeit sind in der Muskulatur, den Sehnen und den Gelenken angesiedelt (s. Abb. 2.4). Innerhalb der Muskulatur gibt es spezielle Muskelfasern, die von Nervenfasern mehrfach umschlungen sind. Die so aufgebauten *Muskelspindeln* dienen als Rezeptoren der Länge und Längenänderungen der Arbeitsmuskulatur. Im Gegensatz zu den Muskelspindeln sind die *Golgi-Sehnenorgane* seriell zur Arbeitsmuskulatur angeordnet und liefern somit Informationen über die ausgeübte Kraft der Muskeln. Desweiteren befinden sich in den Gelenkkapseln Mechanorezeptoren, deren Stellenwert bei der Wahrnehmung von Gelenkpositionen und -geschwindigkeiten im Vergleich zum Einfluss der Muskelspindeln heute als gering angesehen wird [118].

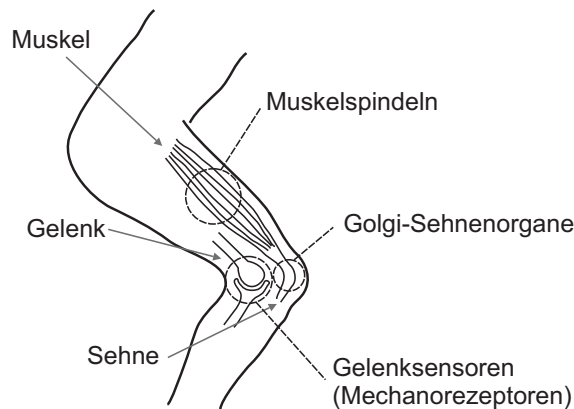


Abbildung 2.4: Art und Lage der kinästhetischen Rezeptoren am Beispiel des menschlichen Knies.

Nicht vernachlässigbar bei der Kinästhetik sind die Mechanorezeptoren in der Haut, die primär der taktilen Wahrnehmung dienen. Durch die Wirkung der Schwerkraft oder durch Hautdeformationen im Bereich eines Gelenkes liefern sie zusätzliche Informationen zur Körperstellung und -bewegung. Ebenso spielt das Vestibularorgan - das Gleichgewichtsorgan im Ohr - und die visuelle Kontrolle durch das Auge eine unterstützende Rolle bei der Wahrnehmung der Lage des Körpers [118].

Zusammenfassend nimmt der Mensch durch die Kinästhetik die Stellung seines Körpers, dessen aktive oder passive Bewegung, sowie die zur Beschleunigung oder Fixierung ausgeübten Muskelkräfte wahr.

Die beiden Komponenten der haptischen Wahrnehmung sind in Tabelle 2.3 nochmals übersichtlich zusammengestellt.

Tabelle 2.3: Übersicht der zwei Komponenten der haptischen Wahrnehmung.

HAPTISCHE WAHRNEHMUNG		
<i>Komponente</i>	Taktile Wahrnehmung	Kinästhetische Wahrnehmung
<i>Weitere Bezeichnung</i>	Oberflächensensibilität	Propriozeptive Wahrnehmung, Tiefensensibilität
<i>Lage der Sinneszellen</i>	In der Haut	In Muskeln, Sehnen, Gelenken
<i>Wahrnehmung von</i>	Druck, Hautdehnung, Vibrationen: Kontakt mit Umwelt, Objektkanten, Bewegung berührter Objekte, ...	Stellung und Bewegung des Körpers; aufgebrachte Kräfte für dessen Beschleunigung oder Fixierung

2.3 Besonderheiten der haptischen Wahrnehmung

Ein fundamentaler Unterschied zwischen der haptischen Wahrnehmung und den übrigen Sinneskanälen besteht in der örtlichen Anordnung der Sinneszellen. Während sich die Rezeptoren für das Sehen, Hören, Riechen und Schmecken in den klar abgegrenzten Sinnesorganen Augen, Ohren, Nase und Zunge befinden, so sind die Sinneszellen für das „Fühlen“ oder „Tasten“ über den ganzen Körper verteilt.

Darüber hinaus findet bei der visuellen und auditiven Wahrnehmung ausschließlich ein unidirektionaler Energiefluss von der Umwelt auf den Menschen statt. Dies ist für eine gezielte Stimulation der Sinneskanäle durch technische Geräte vorteilhaft. Der Energiefluss kann aufgezeichnet oder künstlich generiert und anschließend dem Menschen durch ein Wiedergabegerät (Bildröhre, Lautsprecher) dargeboten werden. Im Gegensatz dazu ist die haptische Wahrnehmung durch einen bidirektionalen Energiefluss zwischen Umwelt und Mensch charakterisiert: Man kann nichts ertasten, ohne es zu berühren. Dabei wird mechanische Energie vom Menschen zum Objekt geleitet, jedoch ebenso vom erfassten Objekt zum Menschen zurückreflektiert. Im Allgemeinen ist hier also eine „Wahrnehmung“ gleich einer „Veränderung“ der Umwelt zu setzen. Daraus folgt, dass eine haptische Informationsübermittlung mit einem reinen Ausgabegerät, das unabhängig von der Senke Informationen abgibt, nicht zu erreichen ist. Es ist stets eine Interaktion mit dem Menschen und somit ein bidirektionaler Energieaustausch notwendig [35]. HASSER beschreibt die haptische Wahrnehmung passend als die „aktive Wahrnehmung von Kraft, Geschwindigkeit und taktilen Reizen, die sich durch die Bewegung des Menschen in seiner Umwelt verändern“ [37]. Aus den

geschilderten Gründen wird die haptische Wahrnehmung häufig als der komplexeste menschliche Sinn bezeichnet [13].

2.4 Ausgewählte Kennwerte und Charakteristika der haptischen Wahrnehmung

In der Literatur existieren zahlreiche Beiträge über die haptische Wahrnehmung und deren Eigenschaften. Häufig handelt es sich dabei um phänomenologische Beschreibungen einzelner Aspekte oder Versuchsergebnisse abgegrenzter Experimente. Eine übersichtliche Aufstellung der erforschten Kennwerte und Charakteristika konnte dagegen nicht ermittelt werden. Als Ergebnis einer umfangreichen Literaturrecherche und -analyse ist im Folgenden eine Auswahl wichtiger Kenngrößen und Grenzwerte bezüglich der haptischen Wahrnehmung zusammengestellt. Hauptaugenmerk ist dabei auf die menschliche Hand gelegt, wobei sowohl auf deren Wahrnehmungs- (Tabelle 2.4), als auch Ausgabefähigkeiten (Tabelle 2.5) eingegangen wird. Die Angaben basieren auf Experimenten verschiedener Autoren, wodurch sich Versuchsbedingungen wie Einweisung, Anzahl der Versuchspersonen und -durchgänge durchaus unterscheiden. Häufig sind statistische Auswertungen aufgrund der geringen Versuchspersonenzahl nicht möglich [11]. Dennoch werden hier die Werte der Übersicht wegen nebeneinander gestellt. Detaillierte Versuchsbedingungen sind in den jeweiligen Literaturstellen zu recherchieren. Für weiterführende Informationen wird auf die Ausführungen in [3, 11, 36, 49, 99, 100, 108] verwiesen.

Tabelle 2.4: Kennwerte der Wahrnehmungsfähigkeit der menschlichen Hand.

Grundgröße	Kennwert	Körperstelle	Wert	Quelle
Statische Auslenkung / Position	Hautauslenkung, Absolutschwelle ^(a)	Fingerspitze (taktil)	10 μm ^(b)	[48]
	Zweipunktschwelle ^(c) (Räumliche Auflösung)	Fingerspitze (taktil)	2-3 mm ^(d, e, f)	[11][48]
		Handfläche (taktil)	10-11 mm	[48][100]
	Positionsauflösung, Differenzschwelle (JND) ^(g)	Fingergelenk (kinästhetisch)	2,5 °	[108]
		Handgelenk (kinästhetisch)	2,0 °	[108]
Dynamische Auslenkung (Vibration)	Frequenz, Obergrenze (taktile Wahrnehmung)	Finger (taktil)	5-10 kHz	[8][11]
	Frequenz, Obergrenze (kinästhetische Wahrn.)	gesamter Körper (kinästhetisch)	20-30 Hz	[8]
	Maximale Empfindlichkeit	Fingerspitze, Handfläche (taktil)	bei 200-300 Hz	[5][7][48]
	Amplitude, Absolutschwelle	Fingerspitze, Handfläche (taktil)	0,1-0,2 μm bei 200-300 Hz ^(h, i, j)	[5][7][48]
	Amplitudenauflösung, Differenzschwelle (JND) ^(g)	Fingerspitze (taktil)	10-25 %	[7]
	Frequenzauflösung, Differenzschwelle (JND)	Fingerspitze (taktil)	8-10 % ^(k)	[7]
Kraft / Druck	Kraft, Absolutschwelle	Fingerspitze ^(l) (taktil)	0,8 mN	[11]
		Handfläche (taktil)	1,5 mN	[11]
	Kraft, Differenzschwelle (JND)	gesamter Körper (kinästhetisch)	5-10 % (ca. 7 %) ^(m, n, o)	[82]
	Druck, Absolutschwelle	Finger (taktil)	0,2 N/cm ² ^(p)	[99]
	Druck, Differenzschwelle (JND)	Handgelenk (kinästhetisch)	4-19 % ^(q)	[108]
Drehmoment	Differenzschwelle (JND)	Daumen, Zeigefinger (kinästhetisch)	12,7 % ^(r)	[43]
Nachgiebigkeit	Differenzschwelle (JND)	Daumen, Zeigefinger (kinästhetisch)	5-15 % ^(s, t)	[107]

Bemerkungen und Ergänzungen zu Tabelle 2.4

- (a) Absolutschwelle: Ab diesem absoluten Grenzwert wird der Reiz wahrgenommen.
- (b) Wird eine Bewegung des Fingers zugelassen, so können Oberflächenstrukturen mit $0,85 \mu\text{m}$ Höhe wahrgenommen werden [58].
- (c) Zwei Reize mit einem örtlichen Abstand größer der Zweipunktschwelle werden unterscheidbar wahrgenommen. Die räumliche Auflösung ist der Kehrwert der Zweipunktschwelle.
- (d) Bei vibrotaktile Stimulation (Vibrationen) befindet sich die Zweipunktschwelle an der unteren Grenze von 2 mm [48].
- (e) Die Zweipunktschwelle wird kleiner, wenn die Reize nicht gleichzeitig, sondern zeitlich nacheinander dargeboten werden [48].
- (f) Eine Positionsveränderung eines Reizes kann örtlich zehnfach besser aufgelöst werden als die Zweipunktschwelle [48].
- (g) Differenzschwelle: Maß für notwendige Änderung eines Reizes, um eine unterscheidbare Wahrnehmung hervorzurufen. Übliche Abkürzung: *JND* für *Just Noticeable Difference*. Häufig ist die Differenzschwelle von der aktuellen Reizintensität abhängig und wird daher in Prozent dieses Referenzreizes angegeben. (Bsp.: Bei einer anliegenden Kraft von 5 N und einer JND von 10 % wird eine unterscheidbare Wahrnehmung erst ab 4,5 bzw. 5,5 N erzeugt.)
- (h) Die Wahrnehmungsschwelle hängt stark von der Vibrationsfrequenz, dem Ort der Reizung und der Größe der Reizfläche ab [7][48][100].
- (i) Amplituden größer als 0,1 mm werden an der Fingerspitze als lästig empfunden [7].
- (j) Bei Reizung mit konstanter Frequenz und Amplitude findet eine Desensibilisierung statt, die bis zu einem Taubheitsgefühl führen und nach Beenden der Reizung noch mehrere Minuten andauern kann [12][49].
- (k) Die Fähigkeit Reize zu unterscheiden reduziert sich ab 320 Hz [8].
- (l) Die Absolutschwelle der Kraftwahrnehmung wird von taktilen Mechanorezeptoren durch die Verformung der Haut registriert.
- (m) Der Wert von 7 % wurde als weitgehend unabhängig vom betreffenden Muskelsystem und vom Betrag der Kraft ermittelt [82].
- (n) Ein spezieller Versuch bezüglich Kräften zwischen Daumen und Zeigefinger zeigte eine JND von 5-10 % für Referenzkräfte zwischen 2,5 und 10 N bei einem Fingerabstand von 45 bis 125 mm. Für kleinere Kräfte wird eine größere JND vermutet [82].
- (o) Bei einem Versuch zur Unterscheidung von Massen unterschiedlicher Gegenstände wurde eine JND von 10 % festgestellt [5].
- (p) Die taktile Wahrnehmung des Menschen ist besonders empfindlich für Druckgradienten und speziell für Objektkanten [108].
- (q) Versuch bei einem Referenzdruck von $1,8 \text{ N/cm}^2$. JND stark ansteigend mit abnehmender Kontaktfläche: 4,4 % bei $5,06 \text{ cm}^2$, 18,8 % bei $1,27 \text{ cm}^2$ [108].
- (r) Versuch bei einem Referenzdrehmoment von 60 mNm.
- (s) Versuch bei einer Referenznachgiebigkeit von 4 mm/N und einem Federweg von 15 bis 35 mm.
- (t) Bei der Wahrnehmung der Nachgiebigkeit spielt die geleistete Arbeit beim Stauchen und die Verformung der Objektoberfläche eine Rolle [11].

Tabelle 2.5: Kennwerte der Ausgabefähigkeit der menschlichen Hand.

Grundgröße	Kennwert	Körperstelle	Wert	Quelle
Geschwindigkeit	Maximale Geschwindigkeit	Finger (handnächstes Gelenk)	17 rad/s ^(a)	[36]
		Finger (mittleres Gelenk)	18 rad/s ^(a)	[36]
Bewegung	Bandbreite (Bewegung und Kraftausübung)	Finger	5-10 Hz ^(b)	[8]
Kraft	Maximale Kraft	Zeige-, Mittel-, Ringfinger	40-50 N ^(c)	[11]
		Daumen	85-100 N	[36]
		Handgelenk	35-65 N	[11]
		zwischen 2 Fingern: Fingerspitzengriff ^(d)	45-65 N ^(e)	[11]
		zwischen 2 Fingern: Schlüsselgriff ^(f)	76-109 N	[11]
	Ausübungsgenauigkeit	Fingerspitze (mit visuellem Feedback) ^(g)	40 mN ^(h)	[103]
		Fingerspitze (ohne visuelles Feedback)	11-15 % ⁽ⁱ⁾	[103]
Drehmoment	Maximales Drehmoment	Finger (handnächstes Gelenk)	370-500 Ncm ^(j)	[36]
		Finger (mittleres Gelenk)	120-289 Ncm ^(j)	[36]
		Finger (handfernstes Gelenk)	40-85 Ncm ^(j)	[36]

Bemerkungen und Ergänzungen zu Tabelle 2.5

- (a) Für langsame Bewegungen werden Geschwindigkeiten von 3-6 rad/s für handnächste und mittlere Fingergelenke angegeben [36].
- (b) Die Bandbreite der Ausgabefähigkeiten ist situationsabhängig: unerwartete Signale: 1-2 Hz, periodische Signale: 2-5 Hz, bekannte Bewegungsabläufe: ca. 5 Hz, Reflexreaktionen: ca. 10 Hz [8].
- (c) Bei gestreckten Fingern und Bewegung nur am handnächste Gelenk. Diese Werte sind weitgehend unabhängig von der Gelenkstellung (Beugung zwischen 0 und 80°) [11].
- (d) Es müssen verschiedene Griffpositionen der Finger unterschieden werden. Fingerspitzengriff bedeutet, dass ausschließlich die Fingerspitzen am Griff beteiligt sind. Eine Übersicht der Griffpositionen ist in [11] zu finden.
- (e) Die Maximalkraft kann nicht auf Dauer ausgeübt werden. Bei einer periodischen Kraftausübung von 25 % der Maximalkraft für 15 s mit anschließender Pause von 15 s entsteht schon nach 10 min der Eindruck einer Erschöpfung. Bei 15 % der Maximalkraft entsteht dieser Eindruck erst nach 104 min [117].
- (f) Beim Schlüsselgriff drückt der Daumen an den seitlichen Bereich des Zeigefingers.
- (g) Aufgabe der Versuchsteilnehmer war das Ausüben einer konstanten Kraft. Dabei wurde auf einem Monitor die aktuell ausgeübte Kraft visuell rückgemeldet [103].
- (h) Dieser durchschnittliche Fehler wurde weitgehend unabhängig vom Betrag der auszuübenden Kraft zwischen 0,25 und 1,5 N festgestellt. Die Kräfte wurden 14 s aufrechterhalten [103].
- (i) Ohne visuelle Rückmeldung wird der Fehler deutlich größer und hängt von der auszuübenden Kraft ab, weshalb die Angabe in Prozentwerten erfolgt [103].
- (j) Die Werte wurden rechnerisch aus Fingerkräften und -abmessungen bestimmt [36].

Zusammenfassung:

Der haptische Sinneskanal setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, der taktilen und der kinästhetischen Wahrnehmung. Die zugehörigen Rezeptoren in der Haut bzw. im Bewegungsapparat liefern dem Menschen Informationen u.a. über Berührungen, Körperstellungen, Kräfte und Bewegungen. Aufgrund der körperweiten Verteilung der Rezeptoren und des bidirektionalen Energieflusses zwischen Mensch und Umwelt beim Vorgang des Ertastens nimmt die haptische Wahrnehmung eine Sonderstellung unter den menschlichen Sinneskanälen ein. Eine umfangreiche Literaturrecherche führte zu einer übersichtlichen Darstellung wichtiger Kennwerte der Wahrnehmungs- und Ausgabefähigkeiten der menschlichen Hand.

3 Elektromechanische Systeme zur haptischen Stimulation

Mit speziellen elektromechanischen Systemen können Informationen per haptischer Reizung an den Menschen übertragen werden. Die Einsatzgebiete, sowie Anforderungen und Gestaltungsrichtlinien für die Entwicklung solcher haptischen Displays werden in diesem Kapitel erläutert.

Da der visuelle und auditive Sinneskanal des Menschen in vielen Situationen bereits überlastet ist, bietet sich eine verstärkte Nutzung des Tastsinnes zur gezielten Informationsübertragung an. Es liegt daher im Interesse der Natur- und Ingenieurwissenschaft, analog zum Sehen und Hören auch für den haptischen Sinneskanal technische Geräte zur gezielten Stimulation der entsprechenden Rezeptoren zu entwerfen. Verwendung finden dafür sogenannte *haptische Displays*. Das Wort *Display* wird zwar häufig mit optischen Anzeigen assoziiert, bedeutet jedoch allgemein *Darstellung*. Haptische Displays stellen dem Tastsinn Informationen dar. Eine Untergruppe bilden *taktile Displays*, die ausschließlich die taktilen Sinneszellen, beispielsweise durch mechanische Vibrationen, anregen (s. Abb. 3.1). Seltener ist von *kinästhetischen Displays* die Rede, da keine Reizung der kinästhetischen Rezeptoren ohne gleichzeitige Stimulation der taktilen Zellen durchführbar ist: Kinästhetische Reize sind künstlich nicht direkt erzeugbar, da es sich um die Wahrnehmung von körpereigenen Stellungen und Kräften handelt [6]. Es ist eine Manipulation direkt am menschlichen Körper erforderlich, was ohne Körperkontakt, und somit taktiler Stimulation, nicht möglich ist. Daher werden Einrichtungen zur Erzeugung kinästhetischer Sinneseindrücke wie Kräfte oder Bewegungen häufig nicht als *kinästhetische Displays*, sondern wegen der stets präsenten taktilen Komponente als *haptische Displays* bezeichnet.

3.1 Anwendungen von haptischen Displays

Die Anwendungsmöglichkeiten haptischer Displays sind in drei unterschiedlichen Bereichen zu sehen:

Grundlagenforschung

Um die Wirkungsweise und Eigenschaften des haptischen Sinneskanals wissenschaftlich zu untersuchen, besteht die Notwendigkeit der reproduzierbaren Erzeugung quantifizierter haptischer Reize. Beispielsweise erfordert ein psychophysiologisches Experiment zur Bestimmung der Kraftwahrnehmungsschwelle ein haptisches Display zur präzisen Krafteinleitung an einer bestimmten Körperstelle.

Substitution anderer Sinne

Seit langer Zeit werden haptische Displays zur Substitution anderer Wahrnehmungssinne eingesetzt. Besonders die Umsetzung von visuellen Informationen in haptische Reize ist eine bewährte Technik zur Unterstützung blinder Menschen. Taktile Displays generieren aus gedruckten Schriftzeichen ertastbare Braille-Schrift. Auch im Straßenverkehr wird das Signal von Fußgängerampeln mit Hilfe vibrierender Tastflächen dargestellt.

Erweiterte Informationsübertragung

In vielen Bereichen ist der visuelle und auditive Sinneskanal des Menschen bereits stark belastet. Der haptische Kanal bietet dagegen meist noch Kapazitäten für zusätzliche Informationsübertragung. Beispielsweise kann ein Navigationssystem im Kraftfahrzeug statt optischer oder akustischer Signale auch taktile Reize zur Kommunikation mit dem Fahrer verwenden. Der Reizort (rechtes oder linkes Bein) zeigt die Richtung, die Reizfrequenz die Entfernung zur Abbiegestelle an [111].

Hauptanwendung einer erweiterten Informationsübertragung ist die Telemanipulation. Immer wenn der Mensch Objekte aufgrund ihrer Größe (Mikromontage) oder der Umgebung (Weltraum, gesundheitsgefährdendes Einsatzgebiet) nicht mehr direkt mit den Händen manipulieren kann, ist der Einsatz von Telemanipulationssystemen sinnvoll. Hierbei wird ein *Slave* - in der Regel ein beweglicher Greifer - vom Benutzer durch ein örtlich getrenntes Eingabegerät (*Master*) gesteuert. Eine Positionsveränderung am Master führt zu einer entsprechenden Bewegung des Slaves. In den meisten Telemanipulationssystemen ohne starre mechanische Kopplung findet dabei kein Rückfluss haptischer Informationen vom Slave über den Master zum Bediener statt. So kann der Bediener beispielsweise nicht die vom Slave ausgeübte Greifkraft beim Anheben eines Gegenstandes spüren. Gerade diese haptischen Informationen über Berührungen, Kräfte und Rutschbewegungen bilden jedoch die Grundlage für die Überlegenheit der flexiblen feinmo-

torischen Fähigkeiten des Menschen gegenüber Robotersystemen. Die steigende Leistungsfähigkeit eines Telemanipulationssystems durch Verwendung eines haptischen Masters, der die Greifkräfte des Slaves an den Benutzer reflektiert, wurde von [64] am Beispiel einer Mikromontagearbeitsplatzes gezeigt (s. Abb. 3.1). Aktuelle Beispiele von Telemanipulation sind Break-by-Wire oder Steer-by-Wire Systeme in Kraftfahrzeugen. Um in Gefahrensituationen elektronisch in das Steuerverhalten des Fahrers eingreifen zu können, wird die rein mechanische Kopplung aufgebrochen und durch Sensor-Aktor-Systeme ersetzt. Die Brems- oder Lenkbewegung des Fahrers wird sensorisch erfasst und mit Aktoren auf Bremszylinder bzw. Lenkgestänge übertragen. Aufgrund der mechanischen Trennung geht dabei die haptische Rückmeldung verloren. Um dem Fahrer z.B. das plötzlich sehr leichte Lenkgefühl bei vereister Fahrbahn zu vermitteln, ist nun eine künstlich generierte haptische Rückmeldung am Lenkrad erforderlich [60].

Zunehmend interessanter wird die haptische Informationsübermittlung bei der Darstellung virtueller Welten. Visuell können diese Scheinwelten für unterschiedlichste Anwendungen bereits realitätsnah wiedergegeben werden. Zur vollständigen Abbildung einer Umgebung muss dem Nutzer jedoch auch das Ertasten und Ergreifen von virtuellen Objekten möglich sein [35][105]. Als Beispiel sei ein Trainingssystem für endoskopische Eingriffe genannt, das neben den Kamerabildern des Operationsfeldes auch die Kräfte, wie sie bei realen Operationen an den Instrumenten der minimal-invasiven Chirurgie spürbar sind, simuliert [53].

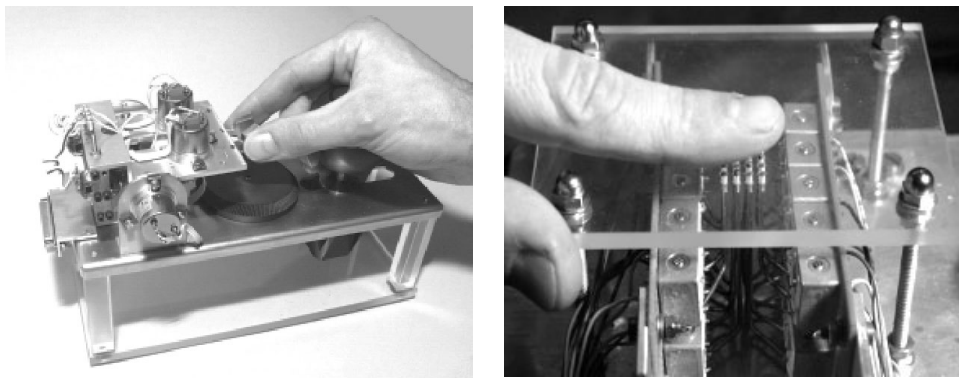


Abbildung 3.1: Beispiele haptischer Displays.

Links: Kraftreflektierendes Eingabegerät für telemanipulierte Mikromontage [64]. Rechts: Vibrotaktiler Display zur Stimulation der Fingerkuppe [113].

3.2 Anforderungen an haptische Displays

Der haptische Sinneskanal ist deutlich weniger erforscht als beispielsweise die visuelle Wahrnehmung [101]. Daher weisen visuelle Anzeigegeräte in den letzten Jahren große Entwicklungsfortschritte auf, während haptische Displays noch immer „in den Kinderschuhen“ stecken [44][61][78][89]. Dennoch können die bisherigen Forschungsergebnisse zur Ableitung einiger allgemeiner Anforderungen und Konstruktionshinweise für haptische Displays verwendet werden. Generell ist beim Entwurf haptischer Displays jedoch davor zu warnen, sich ausschließlich auf Empfehlungen anderer Wissenschaftler zu verlassen. Jede Aussage beruht auf Experimenten mit unterschiedlichen Aufbauten und häufig nur einer geringen Anzahl von Versuchspersonen [11]. Die Anforderungen an ein haptisches Display hängen stark vom speziellen Anwendungsfall sowie der stimulierten Körperstelle und deren Wahrnehmungsfähigkeiten ab. So muss ein taktiles Display für die Fingerspitze eine deutlich größere räumliche Auflösung bieten als für eine Reizung des Oberschenkels. Als weiteres Beispiel ist für eine virtuelle Simulation eines minimal-invasiven, chirurgischen Eingriffs nur ein kleiner Kraftbereich darzustellen, dieser jedoch sehr präzise und fein aufgelöst. Der haptische Eindruck eines aktiven Bremspedals für ein Break-by-Wire System im Kraftfahrzeug kann dagegen viel gröber sein, muss aber einen größeren Kraftbereich abdecken. Ebenso wie die darzustellenden Kraftbereiche unterscheiden sich auch die zu gewährleistenden Bewegungsräume und mechanischen Freiheitsgrade je nach Anwendungsgebiet.

Trotz der Abhängigkeit der Anforderungen an haptische Displays von deren spezifischen Anwendungsfällen werden im Folgenden einige Richtlinien zusammengestellt. Für deren Verständnis ist das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten eines haptischen Displays kurz zu erläutern (s. Abb. 3.2): Aufgabe des Displays ist es, Kräfte auf ein Körperteil auszuüben oder dieses in eine bestimmte Position zu bewegen. Daher beinhalten haptische Displays stets aktorische Komponenten und eine entsprechende mechanische Konstruktion. Zusätzlich wirken die vom Benutzer ausgeübten Kräfte und Bewegungen ebenfalls auf die mechanische Struktur ein. Diese Größen werden sensorisch erfasst, damit das haptische Display entsprechend auf die veränderte Situation reagieren kann. Eine Regelung verbindet die aktorischen und sensorischen Baugruppen zu einem typischen elektromechanischen System.

Zwei prinzipielle Wirkstrukturen sind dabei denkbar: Das Display gibt in Abhängigkeit der Position eine Kraft oder umgekehrt in Abhängigkeit der Kraft ei-

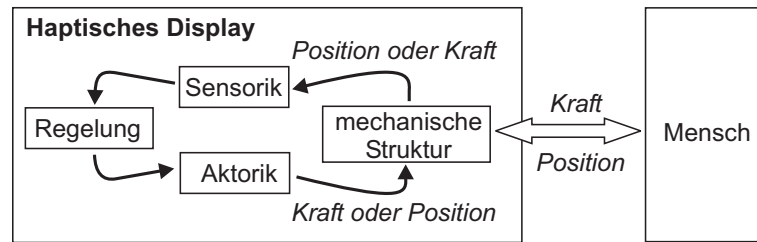


Abbildung 3.2: Prinzipielles Zusammenwirken der Hauptkomponenten eines haptischen Displays bei Interaktion mit einem Benutzer.

ne Position bzw. Bewegung aus. Entsprechend spricht man unter Bezug auf die elektromechanische Analogie [68] von einer Impedanz- (Kraftausgabe) oder Admittanzregelung (Positionsausgabe) [69]. Beide Umsetzungsvarianten sind möglich, wobei meist die Impedanzregelung bevorzugt wird. Denn ein haptisches Display muss auch Situationen oder Umgebungen darstellen können, in denen der Benutzer *keine* haptische Reizung erfahren soll. Hier sollte ein hochwertiges Display dem Nutzer möglichst große Bewegungsfreiheit ohne spürbaren mechanischen Widerstand ermöglichen [5][16]. Dies ist mit einer rücktreibbaren Kraftquelle als Aktor einfacher realisierbar als mit einer Bewegungsquelle, deren selbsthemmende Charakteristik durch die Admittanzregelung kompensiert werden muss. Denn im Leerlauf setzt eine Kraftquelle (geringe mechanische Impedanz) einer Auslenkung keine Kraft entgegen, während bei einer Bewegungsquelle (hohe mechanische Impedanz) eine große Kraft spürbar ist. Dafür ist bei der Verwendung einer Kraftquelle die weniger gute Darstellung großer Kräfte und Steifigkeiten in Kauf zu nehmen [69]. Dennoch empfehlen viele Autoren beim Entwurf haptischer Displays rücktreibbare Antriebe mit geringer Reibung als Kraftquellen in Impedanzregelkreisen einzusetzen und entsprechend die mechanische Konstruktion aus leichten und steifen Bauelementen zu realisieren [5][51][64][88].

Quantitative Empfehlungen für die Auslegung haptischer Displays zur Reizung von Händen und Fingern variieren in großen Bereichen, was erneut die Abhängigkeit vom Anwendungsfall unterstreicht. Die notwendige Auflösung der Positionssensorik wird zwischen 0,25 mm [36] und 0,025 mm [88] beschrieben. Die Kraftausgabe der Aktorik muss nicht den Bereich der Maximalkraft des Menschen abdecken. Für eine kontinuierliche Kraftdarstellung sind 3-15 % dieser Maximalkraft ausreichend, für die Darstellung von Kraftspitzen 20-30 % [36]. Die Präzision der Kraftausgabe wird zwischen 0,05 N [99] und 0,01 N [103] als hinreichend angesehen. Die Dynamik der Kraftausgabe ist als Quotient von der maximal und minimal darstellbaren Kraft definiert. Dabei ist die Minimalkraft meist gleich

der Kraft zur Überwindung der Reibung. Zielwerte sind im Bereich von 100 : 1 [5][88], wobei einige erfolgreiche Displays nur die Hälfte oder weniger erreichen [36]. Neben der Ausgabe von statischen Kräften ist die dynamische Ausgabefähigkeit zur Darstellung von sprunghaften Kraftveränderungen ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Um Kraftsprünge möglichst klar, hart und „knackig“ zu übermitteln, muss die Bandbreite der Kraftübertragungsfunktion möglichst groß sein. Das bedeutet, dass die Ist-Kraft des Displays bis in einen hohen Frequenzbereich der vorgegebenen Soll-Kraft ohne Verzerrungen oder Amplitudenreduzierung folgt. Über die Größe der notwendigen Bandbreite wird sehr unterschiedlich berichtet: Werte sowohl von 30 Hz [36], 50 Hz [88], als auch 100 Hz [64] werden empfohlen. Die breite Streuung ist durch die Unsicherheit zu erklären, ob ausschließlich kinästhetische Rezeptoren zu reizen sind (maximale Wahrnehmungsfrequenz ca. 30 Hz) oder auch taktile Sinneszellen berücksichtigt werden müssen. Einigkeit herrscht über die Tatsache, dass zum Erreichen einer bestimmten Kraftübertragungs-Bandbreite die Regelschleife mit Sensorabfrage und Aktoransteuerung deutlich schneller zu durchlaufen ist, und zwar mindestens um den Faktor 10-20 [8] oder sogar 40 [88].

Zusammenfassend sind eindeutige Anforderungen an haptische Displays schwer aus Arbeiten anderer Autoren abzuleiten. Anhaltspunkte werden jedoch durchaus ersichtlich. Tabelle 3.1 führt die genannten Richtwerte für Displays zur Kraftdarstellung an der menschlichen Hand nochmals auf. Vor dem Entwurf eines haptischen Displays sind diese Werte jedoch auf Plausibilität für den jeweiligen Anwendungsfall evtl. mit eigenen Versuchsreihen zu prüfen. Darüber hinaus müssen weitere Anforderungen bezüglich spezifisch notwendiger Kräfte, Bewegungsbereiche, Freiheitsgrade u.ä. formuliert werden.

Tabelle 3.1: Allgemeine Richtwerte aus unterschiedlichen Literaturstellen für den Entwurf eines kraftdarstellenden Displays zur Reizung der menschlichen Hand.

ANFORDERUNG	RICHTWERT
Auflösung der Positionssensorik	0,25 mm - 0,025 mm
Maximalkraft	kontinuierlich: 3-15 % der maximalen Finger-/Handkraft
	kurzzeitig: 20-30 % der maximalen Finger-/Handkraft
Präzision der Kraftausgabe	0,05 N - 0,01 N
Dynamik der Kraftausgabe	100 : 1
Bandbreite der Kraftausgabe	30 Hz - 100 Hz
Wiederholfrequenz der Regelung	10 - 40 fache Bandbreite der Kraftausgabe
Aktorik	nicht selbsthemmend, wenig Reibung, hohe Dynamik
Mechanische Struktur	wenige, leichte und steife Bauelemente

Zusammenfassung:

Haptische Displays dienen der Informationsübertragung an den Menschen durch gezielte Reizung seines Tastsinnes. Anwendungsgebiete sind in der Grundlagenforschung, in der Substitution anderer Sinneskanäle (z.B. Braille-Schrift) und in der Erweiterung und Vervollkommnung der dargestellten Informationen in Telemanipulations- oder Simulationssystemen zu sehen. Grundlegende Anforderungen an den Entwurf haptischer Displays sind als Ergebnis einer Literaturrecherche zusammengestellt worden. Die exakten Spezifikationen sind jedoch vom konkreten Anwendungsfall abzuleiten.

4 Konzept für ein neuartiges Eingabefeld

Der Stand der Technik von Bediensystemen für technische Geräte wird in diesem Kapitel vorgestellt und analysiert. Die zunehmende Wichtigkeit der Mensch-Maschine-Schnittstelle und die Folgen bei Vernachlässigung der haptischen Reizübermittlung werden untersucht. Darauf aufbauend erfolgt die Ableitung eines neuartigen Bedienkonzeptes. Es handelt sich um ein flexibel konfigurierbares Eingabefeld, das aufgrund der haptischen Rückmeldung intuitiv anwendbar ist.

4.1 Herausforderungen an Bediensysteme

4.1.1 Widerspruch zwischen Funktionalität und Nutzbarkeit

Die Bedienung technischer Geräte ist fester Bestandteil unseres alltäglichen Lebens geworden, wie bereits in Kap. 1 erläutert. Zusätzlich weisen diese Geräte einen ständig wachsenden Umfang von Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten auf. Grund dafür ist hauptsächlich der Erfolg der Mikroelektronik, der eine Miniaturisierung und Kostenreduzierung elektronischer Schaltungen mit sich brachte [120]. Immer öfter befinden sich komplette Computersysteme innerhalb der Geräte [29]. Durch den Aufruf von Programmen können unterschiedliche Funktionen abgerufen werden. Das Ergänzen von Unterprogrammen und somit das Bereitstellen zusätzlicher Funktionen stellt kaum einen Kostenfaktor dar. Daher haben Gerätehersteller bei der Erweiterung der Funktionsvielfalt häufig eher den Marketing-Aspekt, als den Nutzen für den Kunden im Auge. Denn der Anwender hat von der zunehmenden Funktionalität keineswegs automatisch einen Vorteil. Jede zusätzliche Funktion muss auf dem Bedienfeld anwählbar sein. In vielen Fällen resultiert daraus eine Verschlechterung der allgemeinen Bedienbarkeit des Gerätes - meist für alle Funktionen, d.h. sowohl für Standard-, als auch für Spezialanwendungen.

Häufig genug bleiben Spezialfunktionen von durchschnittlichen Anwendern ungenutzt. Maschinenbediener in der Automobilindustrie erhalten beispielsweise

se eine zweimonatige Schulung für eine CNC-Maschine, verwenden in der Praxis jedoch nur 10-20 % der Steuerfunktionen [30]. Entsteht dennoch der Wunsch zur Aktivierung einer selten genutzten Spezialfunktion, so können sich die Nutzer aufgrund der komplexen Bedienvorgänge nicht mehr an die einzelnen Bedienungsschritte erinnern. Dieses Phänomen wird als *Feature-Shock* bezeichnet: Zu viele Funktionen führen zur Unfähigkeit diese anzuwenden [29]. Die Spezialfunktionen werden demzufolge selten oder nie benutzt und vergrößern somit nicht die Nutzbarkeit des Gerätes, erschweren jedoch dessen Bedienung. „Funktionalität“ darf daher nicht mit „Nutzbarkeit“ gleichgesetzt werden. Funktionalität bezieht sich auf die Fähigkeiten eines Produktes, während Nutzbarkeit beschreibt, wie Menschen mit dem Produkt arbeiten [29]. Einige Beispiele und Zitate sollen den Sachverhalt unterstreichen:

- Hauptaufgabe von Videorekordern ist das Aufzeichnen eines Fernsehprogramms. Für diese Standardfunktion müssen häufig umfangreiche Einträge auf kleinen LC-Displays oder On-Screen-Menüs getätigt werden. Eventuell ist zusätzlich ein Satelliten-Receiver zu programmieren. Der Erfolg des Programmiersystems „Show-View“ ist damit zu erklären, dass die Benutzer ihren Wunsch nach unkomplizierter Programmierung durch Verwendung eines einzigen Nummern-Codes erfüllt sahen [120].
- Moderne Zeitschaltuhren mit Wochen-, Tages- und Sonderprogrammen, mehreren Schaltkanälen und zufallsgesteuerter Schaltpunktbeeinflussung sind bezüglich ihrer Funktionalität mechanischen Zeitschaltuhren deutlich überlegen. Umgekehrt verhält es sich bei der Nutzbarkeit aufgrund der Programmierung durch mehrfachbelegte Minitasten und Einfachdisplays [120].
- *The radio in my truck is difficult enough to use as a radio, and I find it impossible to remember how to set the clock* [87].
- *No matter how complex the overall system, there is no excuse for not keeping simple tasks simple* [87].
- *Building functionality into a product doesn't guarantee that people will be able to use it* [29].

4.1.2 Bedeutung guter Bedienbarkeit

Die Bedeutung einer optimierten Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) und damit einer guten Bedienbarkeit darf bei technischen Geräten nicht unterschätzt wer-

den. Während sich früher Produkte verschiedener Hersteller deutlich durch unterschiedliche Funktionalität voneinander absetzten, so wachsen sie heute hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit näher zusammen. Als Beispiel bieten Videorekorder bei vergleichbarem Preis in der Regel nahezu identische Leistungen. Der Kunde macht seine Kaufentscheidung nicht mehr von der Funktionalität, sondern von deren Bedienbarkeit abhängig [29]. Auch im Automobil wird die MMS zunehmend wichtiger, da zum einen das Informationsangebot (Navigation, Kommunikation, Audio, Video, Internet) wächst, zum anderen der dichtere Straßenverkehr immer weniger Ablenkung erlaubt. So kann sich die Bedienbarkeit durchaus wie das Design oder die technische Ausstattung zum Differenzierungsmerkmal zwischen Herstellern entwickeln [112] und die Firmenreputation beeinflussen [29].

Insgesamt wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle in Zukunft einen höheren Stellenwert einnehmen [56] [112]. Sehr prägnant wird in [87] deren Bedeutung zusammengefasst:

Users do not care about what is inside the box, as long as the box does what they need done . . . As far as the customer is concerned, the interface is the product.

4.2 Stand der Technik von Bediensystemen und deren Schwachstellen

Ein zukunftsfähiges Bediensystem muss die einfache und intuitive Aktivierung einer Großzahl von Funktionen ermöglichen. Denn trotz des teilweise fragwürdigen Nutzens hoher Funktionsvielfalt, wird die Komplexität technischer Systeme in Zukunft weiter steigen. Momentan sind zwei Strategien zur Bedienung erkennbar:

Umfangreiche Bedienfelder

Die naheliegendste Lösung ist bei steigendem Funktionsumfang das Bedienfeld ebenfalls zu erweitern: Für jede Funktion des Gerätes werden einzelne oder mehrere Tasten vorgesehen. Beschränkt wird diese Vorgehensweise zum einen durch die Unübersichtlichkeit, die durch eine Vielzahl von Bedienelementen entsteht, zum anderen durch das begrenzt zur Verfügung stehende Platzangebot für das Bedienfeld. In Abb. 4.1 sind Beispiele für unübersichtliche und beengte Tastenfelder zu sehen, die auf den ersten Blick eine ablehnende Haltung beim Nutzer hervorrufen. Der Einsatz umfangreicher Bedienfelder ist daher nur bis zu einer gewissen Komplexität der Geräte sinnvoll.



Abbildung 4.1: Beispiele für umfangreiche Bedienfelder.

Links: Videokamera mit 20 Folientasten auf einem 25 cm² kleinen Bedienfeld. Rechts: Universalfernbedienung mit unübersichtlich vielen Tasten.

Menüstrukturen

Menüstrukturen bieten ebenfalls die Möglichkeit zur Selektion einzelner Funktionen aus einem großen Angebot. Sie basieren auf der Idee, nicht alle Funktionen gleichzeitig zur Auswahl zu stellen, sondern in hierarchisch strukturierte Ebenen aufzuteilen. In jeder Ebene steht nur eine überschaubare Anzahl verschiedener Optionen zur Verfügung. In der ersten Menüebene kann typischerweise nur zwischen Funktionsgruppen entschieden werden, deren Unterfunktionen in den folgenden Ebenen auswählbar sind. Diese bei Computer-Software etablierte Methode bietet auch bei der Gerätebedienung ein großes Potenzial. Sobald eine Mensch-Maschine-Schnittstelle mit konventionellen Tasten zu unübersichtlich wird, bietet sich der Einsatz von Menüstrukturen an [4] und wird bereits in vielen Geräten praktiziert [29].

Zur Realisierung von menübasierten Bedienfeldern sind spezielle Ein- und Ausgabesysteme notwendig. Denn in jeder Menüebene sind die Bedienelemente mit unterschiedlichen Funktionen belegt. Um dem Benutzer die aktuelle Funktion einer Taste mitzuteilen, ist eine veränderbare Beschriftung erforderlich. Zusätzlich kann die Anzahl der selektierbaren Funktionen innerhalb der Menüebenen variieren, so dass die Bedienelemente möglichst in Anzahl, Größe und Lage flexibel sein sollten.

Im Software-Bereich werden auf einem Bildschirm virtuelle Schaltflächen dargestellt, deren Erscheinungsformen und Beschriftungen umprogrammiert werden können. Mit einer Computer-Maus kann der Benutzer jede Schaltfläche anklicken und damit die gewünschte Funktion auswählen. Jedoch ist die Maus als Eingabegerät nicht für alle Umgebungen geeignet. Der große Platzbedarf, die geringe Diebstahl- und Vandalismus-Sicherheit und die Notwendigkeit eines schmutzarmen Umfeldes erschweren den Einsatz für portable Anwendungen, sowie für Geräte in Produktionshallen oder mit Zugang für die Öffentlichkeit.

Weniger empfindliche Systeme sind Bildschirme, die seitlich von konventionellen Tasten umgeben sind. Die aktuellen Funktionen werden neben den einzelnen Tasten auf dem Bildschirm angezeigt. Durch die feste Anordnung der Tasten ist jedoch weder eine Variabilität deren Anzahl, noch deren Größe oder Lage geboten. Zudem sind die Tasten stets sicht- und bedienbar, auch wenn sie in bestimmten Menüebenen ohne Funktion sind. Dies kann zu Verwirrungen bei Benutzung des Gerätes führen.

Diese Nachteile existieren bei den häufig verwendeten *Touch-Screens* nicht. Touch-Screens sind berührungsempfindliche Bildschirme. Ein durchsichtiges Tastfeld ist hierbei im Verbund mit einer optischen Anzeige montiert. Virtuelle Tasten werden auf dem Bildschirm visualisiert und durch Druck mit der Fingerspitze auf der entsprechenden Stelle betätigt. Der Vorteil ist, dass nur die aktuell benötigten Tasten dargestellt werden und diese zusätzlich in Form, Gestaltung und Beschriftung frei programmierbar sind [4]. Touch-Screens sind heute bereits in vielen Geräten wie z.B. Fahrscheinautomaten, Geldautomaten oder Organizern zu finden (s. Abb. 4.2).

Touch-Screens weisen jedoch einen schwerwiegenden Mangel auf: Bei Berührung und Betätigung der virtuellen Tasten auf dem Bildschirm erfährt der Benutzer im Gegensatz zu konventionellen Tasten keine, bzw. nur eine unzureichende haptische Rückmeldung. Die Ursachen und Folgen werden im nächsten Abschnitt erläutert.

4.3 Stellenwert der Haptik bei der Gerätebedienung

Um die Bedeutung der haptischen Wahrnehmung für eine intuitive Gerätebedienung zu verdeutlichen, wird zunächst die Vorstellung der sogenannten *Inneren Modelle* eingeführt.



Abbildung 4.2: Beispiele für die Verwendung von Touch-Screens zur Realisierung von Menüstrukturen.

Links: Bankterminal mit erweiterten Funktionen wie Versicherungsberatung.
Rechts: Organizer für Adress- und Terminverwaltung.

4.3.1 Unterbewusste Handlungsabläufe aufgrund „Innerer Modelle“

Viele Handlungen führt der Mensch aus, ohne dass sie ihm bewusst sind. Sie laufen also „automatisch“ ab. Ermöglicht wird dies durch *innere Modelle*, wie in Abb. 4.3 dargestellt. Sie enthalten für eine bestimmte Handlung sowohl das Bewegungsprogramm (Abfolge der zu kontrahierenden Muskeln), als auch die für dieses Programm erwartete Sinneswahrnehmung. Solange die tatsächliche Wahrnehmung durch die Sinneszellen dieser Erwartung entspricht, läuft der Vorgang unterbewusst ab. Ist dagegen eine Abweichung vorhanden, so wird das Bewusstsein eingeschaltet, um eine passende Reaktion auf diese unerwartete Situation abzuwägen [9].

Ein Beispiel soll die Präsenz der inneren Modelle verdeutlichen: Bei einer Bewegung des Auges durch die Augenmuskulatur wird vom inneren Modell eine Verschiebung des visuell wahrgenommenen Bildes erwartet. Die Kompensation dieser Verschiebung erfolgt automatisch, so dass die Umgebung als ruhend wahrgenommen wird. Wird dagegen der Augapfel mit dem Finger bewegt, so ist die resultierende Bildverschiebung nicht erwartet. Es erfolgt keine automatische Kompensation, so dass sich für den Menschen die Umgebung zu bewegen scheint. Auf dieses unerwartete Ereignis kann der Mensch nicht unterbewusst reagieren, da kein entsprechendes inneres Modell für diese Handlung existiert [9].

Nach [87] ermöglichen Automatismen durch innere Modelle erst das gleichzeitige Ausführen mehrerer Tätigkeiten, da man sich nur auf eine einzige Hand-

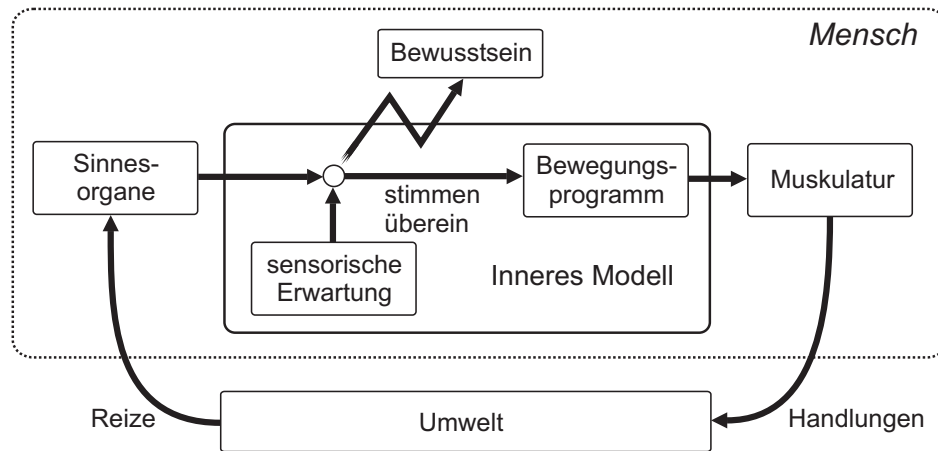


Abbildung 4.3: Schema der unterbewussten Handlungsabläufe aufgrund innerer Modelle. Stimmt die Sinneswahrnehmung mit der Erwartung überein, läuft die Handlung nach einem festgelegtem Bewegungsprogramm unterbewusst ab. Decken sie sich nicht, wird das Bewusstsein eingeschaltet.

lung bewusst konzentrieren kann. Problemlos kann man beim Laufen etwas essen und über eine mathematische Gleichung nachdenken. Beißt man jedoch auf etwas unerwartet Hartes, so wird die Aufmerksamkeit auf den bisher unterbewussten Essvorgang gelenkt und das mathematische Problem gerät in den Hintergrund.

Innere Modelle sind keine statischen, angeborenen Handlungsschemata. Sie spiegeln vielmehr unsere Erfahrungen und trainierten Fertigkeiten wieder. Eine ungewohnte Handlung kann nicht unterbewusst ausgeführt werden. Durch intensives Training läßt sich der Vorgang jedoch bis zur Automatisierung erlernen, es wird also ein neues inneres Modell entwickelt. Die schnellen Bewegungen beim Schreiben auf einer Tastatur, beim Klavierspielen oder beim Sport wären niemals bewusst in dieser Geschwindigkeit ausführbar. Erst Automatismen ermöglichen dies [87]. Es ist jedoch zu beachten, dass bei älteren Menschen die Fähigkeit zum Erlernen neuer innerer Modelle nur noch sehr begrenzt oder nicht mehr vorhanden ist.

4.3.2 Vergleich haptischer Stimulationen verschiedener Bediensysteme

Bei Mensch-Maschine-Schnittstellen nehmen innere Modelle die Schlüsselstellung für intuitive Bedienbarkeit ein. Die haptische Stimulation ist dabei eine wichtige Komponente, wie im Folgenden gezeigt wird [20]. Prinzipiell handelt es sich

bei der Gerätebedienung um eine bidirektionale Kommunikation: Der Mensch gibt der Maschine einen Befehl, die Maschine wiederum zeigt dem Menschen die Annahme oder Ausführung des Befehls an (s. Abb. 4.4).

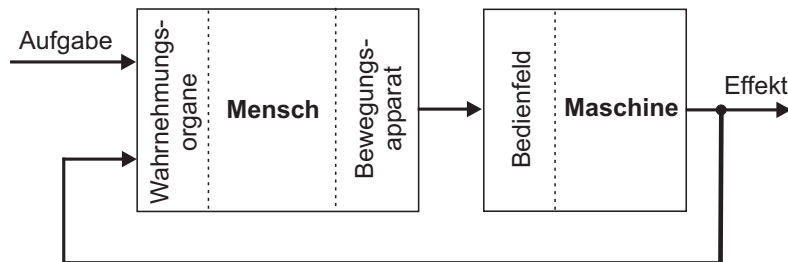


Abbildung 4.4: Allgemeiner Ablauf bei der Bedienung einer Maschine (nach [9]).

Jedoch sollte der Benutzer nicht erst durch Betriebsgeräusche der Maschine o.ä. eine Bestätigung seiner Befehlseingabe erhalten. Vielmehr ist eine direkte Rückmeldung durch das Bediensystem über die erfolgte Eingabe erstrebenswert. Bildlich gesprochen soll der Benutzer „spüren“, dass er eine Taste gedrückt hat. Diese Anforderung wird von konventionellen, mechanischen Tasten erfüllt. Wie Abb. 4.5a zeigt, erhält der Benutzer mehrere Rückmeldungen auf den Vorgang „Tastenbetätigung“:

Zunächst wird der Kontakt zwischen dem Finger und der Taste durch taktile Sinneszellen wahrgenommen, was einer Rückkopplung zum haptischen Sinn entspricht. Wenn die Taste sich zu bewegen beginnt, so bewegt sich der Finger des Menschen ebenso. Die veränderte Position x - also der zurückgelegte Weg - wird der haptischen Wahrnehmung durch deren kinästhetische Rezeptoren zugeführt. Entscheidend ist, dass während der Bedienung der Taste deren Betätigungskraft in der Regel nicht konstant ist. Sie wächst bis zum Erreichen des Schaltpunktes an und fällt danach stark ab (s. Abschn. 4.4). Diese von der Position x abhängige Kraft F erzeugt ein deutlich wahrnehmbares „haptisches Klicken“ oder einen „Schaltknacks“. Anders ausgedrückt ändert sich die mechanische Impedanz während der Benutzung in einer so charakteristischen Art, dass sie haptisch eindeutig erfassbar ist. Zusammengefasst spürt der Benutzer beim Bedienen einer konventionellen Taste die Berührung, die Bewegung, die Kraft und den „Schaltknacks“ mit Hilfe der haptischen Wahrnehmung. Darüber hinaus ist visuell die Positionsveränderung der Taste sichtbar, was jedoch eine eher irrelevante Information darstellt.

Durch Gewohnheit, Training und Erfahrung hat der Mensch für die Hand-

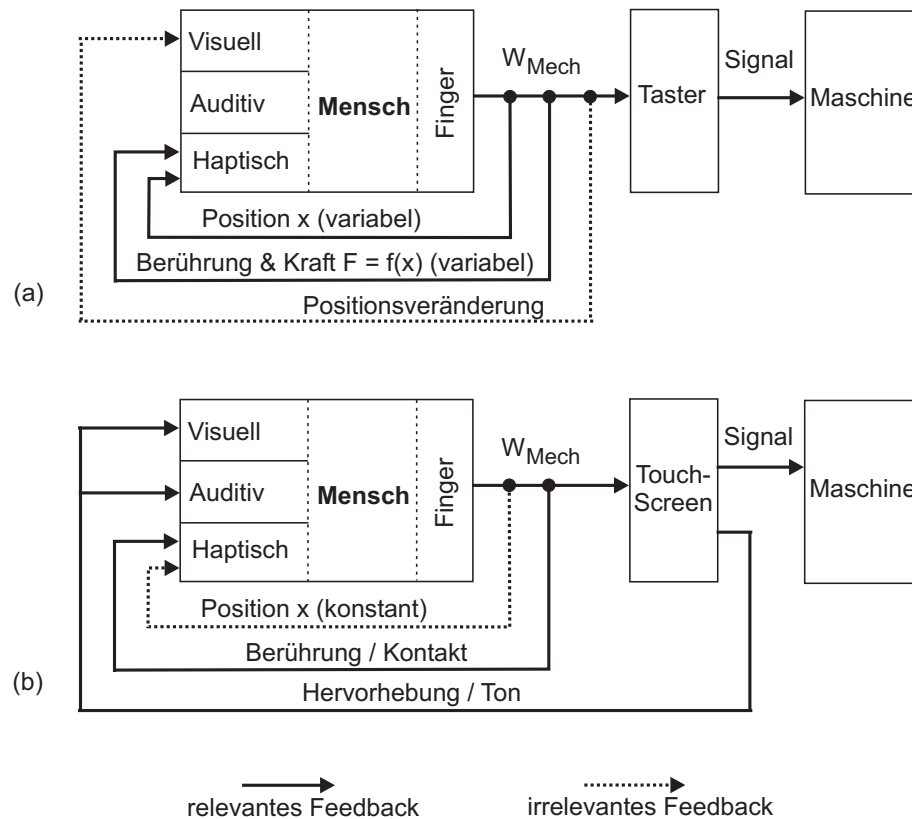


Abbildung 4.5: Vergleich der Informationswege bei Gerätebedienung mit (a) herkömmlichen mechanischen Tasten und mit (b) Touch-Screens (angelehnt an [90]).

lung „Tastenbetätigung“ bei Gerätebedienungen ein entsprechendes inneres Modell aufgebaut, welches die Vorgänge unterbewusst ablaufen lässt. Dies ist jedoch nur gültig, solange die Sinneswahrnehmung des Menschen den Erwartungen des inneren Modells entspricht. An dieser Stelle unterscheiden sich Touch-Screens von herkömmlichen Tasten.

Wie in Abb. 4.5b zu sehen ist, spürt der Mensch bei der Benutzung von Touch-Screens zwar den Kontakt zwischen Finger und Eingabefeld auf haptischem Weg, jedoch kann aufgrund der Steifigkeit des Bildschirmes keine Positionsveränderung der virtuellen Tasten stattfinden. Ein Touch-Screen stellt eine konstante, unendlich große mechanische Impedanz dar. Damit kann der Benutzer aus der haptischen Wahrnehmung nicht schließen, ob er die virtuelle Taste betätigt hat oder nicht. Ein substituierender Sinnesreiz ist als zusätzliche Rückmeldung erforderlich. Oft wird dieser durch optische Hervorhebungen oder akustische Töne realisiert. Die substituierten Signale entsprechen jedoch nicht den Erwartungen des inneren Modells für die Betätigung von Tasten. Die Bedienung erfolgt nicht unterbewusst und

intuitiv, sondern erfordert eine gewisse Aufmerksamkeit, was auch in der Praxis beobachtbar ist: Aufgrund der Erwartung einer haptischen Rückmeldung wenden Benutzer bei Touch-Screens häufig unnötig hohe Betätigungskräfte auf. Sie „pressen“ geradezu auf den Bildschirm, was auf eine wenig intuitive Bedienung schließen lässt. Ein ähnliches Verhalten ist bei Folientasten mit unzureichender haptischer Rückmeldung ersichtlich, die ebenfalls eine übermäßige Betätigungskraft der Nutzer provozieren. Dies führt beispielsweise bei Kopiergeräten zur mechanischen Zerstörung der Tasten [55].

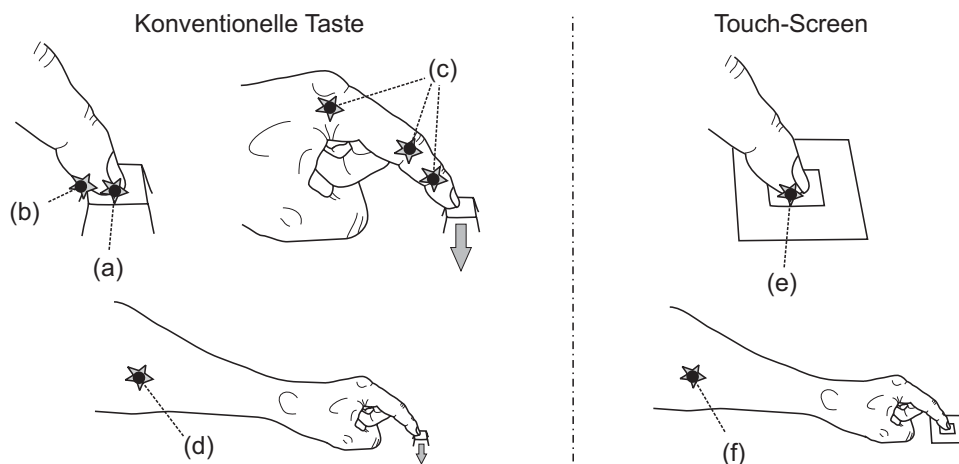
Ein weiterer wichtiger Aspekt der haptischen Wahrnehmung während der Gerätebedienung ist die Ertastbarkeit der Bedienelemente. Bei herkömmlichen Tasten legt der Benutzer seine Finger vor der Betätigung auf der Tastenoberfläche ab. Dabei spürt er durch die taktilen Rezeptoren die Körperkanten der Taste und somit, ob der Finger mittig aufliegt. Dieses Ertasten ermöglicht auch das Wechseln zu benachbarten Bedienelementen ohne visuelle Kontrolle. Fernbedienungen von TV-Geräten werden z.B. zum Kanalwechsel häufig in dieser Weise benutzt. Weitergehend ist es sogar möglich einzelne Tasten nur aufgrund ihrer Form, Größe und Lage in einer Menge anderer Bedienelemente taktil zu erkennen. Die visuelle Ablenkung z.B. beim Autofahren kann dadurch minimiert werden.

Bei Touch-Screens sind solche Vorgänge des Ertastens nicht möglich. Es ist stets eine visuelle Positionskontrolle des Fingers vor der Betätigung einer virtuellen Taste notwendig. Auch gibt es keinen Übergang zwischen dem Berühren einer virtuellen Taste und deren Betätigung. Fehlbedienungen entstehen, wenn der Finger eine Tastfläche zweimal direkt nacheinander aktiviert oder auf dem Weg zur gewünschten Taste unbeabsichtigterweise über den Bildschirm streicht. Ebenso kann es durch Lichtbrechung am Bildschirm oder schlechten Blickwinkel vorkommen, dass der Finger nicht exakt über der zu berührenden Stelle positioniert ist. Da der Nutzer sich einzig auf die visuelle Information verlassen muss, ist eine versehentliche Aktivierung der benachbarten Taste möglich. Solche negativen Erfahrungen beeinflussen den Benutzer nachhaltig bei der Verwendung von Touch-Screens. Um erneute Fehlbedienungen zu vermeiden, wird er der Bedienung entsprechend größere Aufmerksamkeit widmen.

Ein Gedankenexperiment soll die Unterlegenheit von Touch-Screens gegenüber konventionellen Tasten bezüglich der natürlichen und intuitiven Bedienbarkeit nochmals verdeutlichen. Man stelle sich vor, anstatt mit einer herkömmlichen Computer-Tastatur mit einem Touch-Screen zu arbeiten. Wie langsam und unsicher würde man wohl mit zehn Fingern auf den virtuellen Tasten des Touch-

Screens schreiben? Bei diesen Gedanken wird schnell klar, wie wichtig sowohl die taktilen Reize zur Erkennung der Tastenbegrenzung, als auch die kinästhetischen Reize zur Bestätigung des Tastendrucks für die Effizienz herkömmlicher Tastaturen sind.

Abschließend werden in Abb. 4.6 die Unterschiede der haptischen Stimuli zwischen konventionellen Tasten und Touch-Screen bildlich zusammengefasst.



<p><i>Konventionelle Taste</i></p> <p>(a) Berührung zwischen Fingerkuppe und Taste (taktil).</p> <p>(b) Begrenzung der Taste (taktil).</p> <p>(c) Bewegung des Fingers bei Betätigung der Taste: Beugung der Gelenke (kinästhetisch).</p> <p>(d) Kraftausgabe der Finger-Muskulatur (im Unterarm befindlich) zur Tastenbetätigung (kinästhetisch): In der Regel nicht konstant, sondern von Tastenposition abhängig („Schaltknacks“).</p> <p><i>Virtuelle Taste auf Touch-Screen</i></p> <p>(e) Berührung zwischen Fingerkuppe und Touch-Screen (taktil).</p> <p>(f) Kraftausgabe der Finger-Muskulatur (kinästhetisch): Einzig vom Willen des Nutzers abhängig und nicht den Schaltzustand des Bedienelementes widerspiegelnd.</p>

Abbildung 4.6: Bildliche Verdeutlichung der haptischen Reize bei Betätigung einer konventionellen Taste [(a)(b)(c)(d)] und einer virtuellen Taste auf einem Touch-Screen [(e)(f)].

4.3.3 Forderung nach haptischer Rückmeldung in Mensch-Maschine-Schnittstellen

Haptische Rückmeldung ist für intuitive, schnelle und fehlerfreie Bedienung von Geräten notwendig, wie in der Literatur deutlich dargelegt wird: Die Vermeidung von Bedienungsfehler durch tastbare Signale ist in [31] und [119] beschrieben. Fehlt eine haptische Rückmeldung bei der Bedienung von Tasten, wird der Benutzer verunsichert. In [91] wird ein „haptisches Klicken“ durch die Überwindung eines deutlich spürbaren Druckpunktes gefordert. Dies wird auch bei Folientastern durch Verwendung spezieller Federelemente („Knackfrösche“) angestrebt [10]. Dass die Interaktion zwischen Mensch und Maschine durch haptische Reizung zusätzlich zur visuellen Darstellung angenehmer, intuitiver und schneller wird [78], konnte beispielsweise im Cockpit eines Flugzeuges [119] aber auch im Kraftfahrzeug [111] nachgewiesen werden. In vielen Situationen ist der visuelle und auditive Sinneskanal stark belastet oder nur beschränkt einsetzbar, so dass ein zusätzlicher Informationskanal unumgänglich ist. Das akustische Signal eines Mobiltelefons ist beispielsweise in vielen Umgebungen nicht akzeptabel und wird durch einen unauffälligen Vibrationsalarm ersetzt, der nur die Zielperson und nicht dessen Umfeld anspricht [110].

Folgende Vorteile der Verwendung des haptischen Sinneskanals in Mensch-Maschine-Schnittstellen werden von [111] genannt: Er ist stets aufnahmebereit (kann nicht „zugehalten“ oder „abgelenkt“ werden), ermöglicht eine natürliche und intuitive Anwendung, vergrößert die effektive Kapazität der Informationsverarbeitung des Nutzers und entlastet dessen auditive und visuelle Wahrnehmung. Trotz der erkennbaren Vorteile der haptischen Reizung liegt der Schwerpunkt bei MMS noch immer auf dem visuellen und auditiven Sinn [111]. Dabei bieten visuell dominante Schnittstellen trotz hoher Flexibilität nicht immer das größte Potenzial zur Erfüllung einer Aufgabe, da informationsüberflutete Bildschirme auch verwirrend wirken können. Das Wissen um eine effiziente Verwendung des haptischen Sinneskanals bei Mensch-Maschine-Schnittstellen befindet sich jedoch noch im Anfangsstadium [78] und wird daher nur sehr eingeschränkt angewendet [14].

4.4 Neues Konzept für Eingabefeld: „HapKeys“

Als Konsequenz aus den Überlegungen in den letzten Abschnitten wird ein neuartiges Bedienkonzept für technisch komplexe Einrichtungen entwickelt [18][21].

Vor der Vorstellung des Konzeptes und dessen Potenzials, wird die Argumentation für ein neuartiges Bedienfeld nochmals zusammengefasst:

Zur Handhabung der zunehmenden Funktionsvielfalt und Komplexität technischer Geräte stellt der Einsatz von menübasierten Bediensystemen eine zukunftsweisende Lösung dar. Dafür sind Eingabefelder mit Bedienelementen variabel in Anzahl, Größe, Lage und Beschriftung erforderlich. Zusätzlich sollte das Bediensystem eine eindeutige haptische Rückmeldung auf Betätigungsvorgänge erzeugen. Dadurch werden Fehlbedienungen vermieden, der visuelle und auditive Sinneskanal entlastet und intuitive Nutzbarkeit durch automatisierte Bewegungsabläufe basierend auf inneren Modellen ermöglicht. Wie bereits erläutert, ist der Mensch durch intensives Training prinzipiell in der Lage, neue innere Modelle zu bilden. Er könnte sich somit an Bediensysteme ohne haptische Rückmeldung gewöhnen und diese langfristig mit geringer Aufmerksamkeit nutzen. Doch sollte sich nicht der Mensch an die Technik anpassen müssen, sondern der technische Fortschritt an die Fähigkeiten des Menschen [97]. Ziel muss die menschengerechte Maschine, nicht der maschinengerechte Mensch sein [121], besonders da der wachsende Bevölkerungsanteil älterer Menschen neue Handlungsschemata nicht mehr oder nur noch schwer erlernen kann.

4.4.1 Vorstellung des Bedienkonzeptes

Das entwickelte Bedienkonzept vereinigt die Vorteile von mechanischen Tasten und von Touch-Screens: Die Flexibilität und Übersichtlichkeit von Touch-Screens wird mit der intuitiv verarbeitbaren haptischen Reizung konventioneller Tasten kombiniert. Es resultiert ein Eingabefeld zur Darstellung unterschiedlich konfigurierbarer Tasten, bei deren Betätigung der Nutzer eine eindeutige haptische Rückmeldung erfährt. Der Name des Konzeptes lautet „**HapKeys**“, was eine Assoziation zu den bekannten „Softkeys“ - also Tasten mit frei belegbaren Funktionen - hervorrufen soll, jedoch auch die haptische Rückmeldung zum Ausdruck bringt.

Die Realisierung des Konzeptes erfolgt mit folgendem Ansatz: Das Bedienfeld setzt sich aus mehreren einzelnen Elementen zusammen, die im Ausgangszustand eine ebene Fläche bilden (Abb. 4.7a). Die Elemente können durch eine entsprechende Regelung unabhängig voneinander angehoben werden, also ihre Position in einem Freiheitsgrad gezielt ändern. Benachbarte Elemente können derart angesteuert werden, dass sie als Gruppe eine visuelle Einheit bilden und gemeinsam als eine größere Taste interpretiert werden. Je nach Ansteuerung kann das Bedienfeld

somit Tasten unterschiedlicher Größe und Form an beliebigen Stellen innerhalb des Feldes darstellen, wie Abb. 4.7 verdeutlicht.

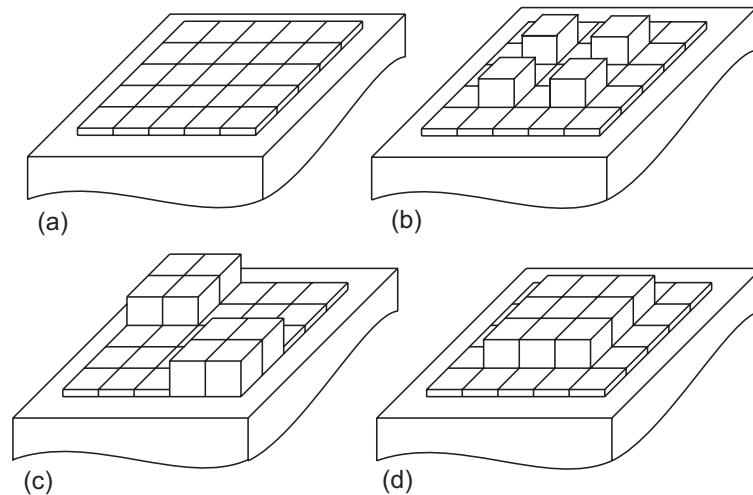


Abbildung 4.7: Konzept des Bedienfeldes „HapKeys“.

- (a): Kein Element ist aktiv. (b): 4 einzelne Elemente bilden 4 kleine Tasten.
 (c): Jeweils 4 Elemente sind zu einer größeren Taste gruppiert. (d): Eine Gruppe von 9 Elementen stellt eine große Taste dar.

Die Tasten können nicht nur visuell, sondern auch haptisch wahrgenommen werden. Bei Berührung mit dem Finger werden die begrenzenden Kanten der Bedienelemente ertastet. Dies ermöglicht eine Orientierung und sichere Positionierung des Fingers auf den Tasten. Die Besonderheit der HapKeys ist jedoch in der haptischen Rückmeldung während der Betätigung zu sehen. Da die Tasten mit dem Finger niedergedrückt werden können, ist zum einen eine Positionsänderung und Bewegung spürbar. Zum anderen wird die Betätigungskraft wahrgenommen, welche variiert werden kann. Genauer gesagt sind unterschiedliche Kraft-Weg-Kennlinien oder *charakteristische Kurven* mit Hilfe einer Regelung darstellbar. Abb. 4.8a zeigt eine typische Kraft-Weg-Kennlinie einer Taste mit angemessenen haptischen Eigenschaften. Der Anstieg der Betätigungskraft bis zum Schalterpunkt ist erkennbar, gefolgt von einer plötzlichen Abnahme. Ein solcher Verlauf der charakteristischen Kurve ruft die gewünschte Empfindung eines haptischen „Klickens“ hervor und unterstützt die intuitive Nutzbarkeit.

Um die beschriebene Funktionalität der HapKeys zu ermöglichen, muss jedes einzelne Element des Bedienfeldes als geregeltes Sensor-Aktor-System ausgelegt werden. Das prinzipielle Zusammenwirken zwischen den Aktoren und Sensoren der matrixartig angeordneten Elemente und deren Regelung ist in Abb. 4.9 dar-

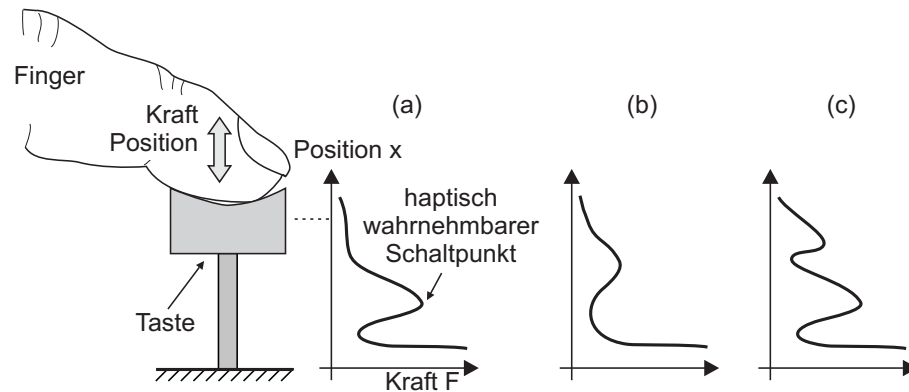


Abbildung 4.8: Beispiele möglicher Kraft-Weg-Kennlinien einer Taste mit haptischem „Klick“. Der Schaltpunkt der Taste ist haptisch wahrnehmbar und unterstützt eine intuitive Bedienung (a). Durch den Verlauf der Kraft-Weg-Kennlinie kann der Schaltpunkt je nach Anwendungsfall der Taste unterschiedlich stark ausgeprägt werden (a,b). Auch die Realisierung von zwei Schaltpunkten ist möglich (c).

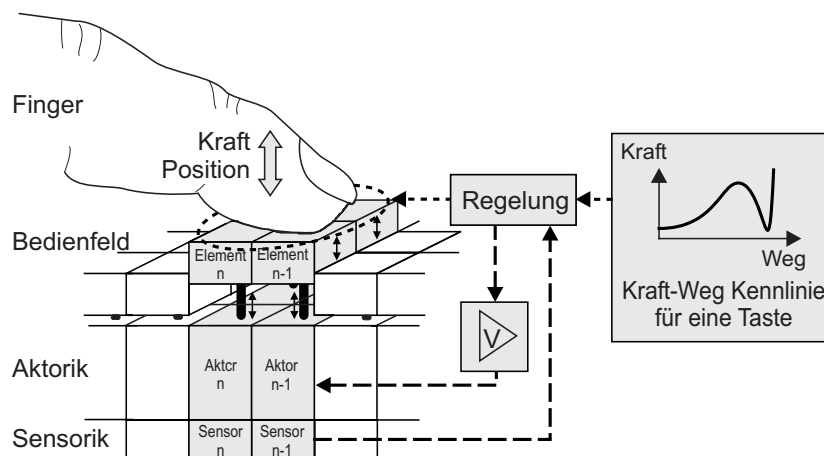


Abbildung 4.9: Das Konzept HapKeys wird durch eine matrixförmige Anordnung von geregelten Sensor-Aktor-Systemen umgesetzt.

gestellt. Die Anforderungen an die einzelnen Komponenten des Gesamtsystems, sowie deren Umsetzung sind Inhalt der nachfolgenden Kapitel.

4.4.2 Potenzial des Eingabefeldes

Das Konzept HapKeys bietet ein flexibles Bediensystem mit angepasster haptischer Rückmeldung. Die haptische Reizung setzt sich aus der wahrnehmbaren

Begrenzung, Bewegung und Betätigungskraft der Taste zusammen. Die Flexibilität des Systems ist einerseits in den anpassbaren Kraft-Weg-Kennlinien, hauptsächlich jedoch in der variablen Darstellung von Tasten unterschiedlicher Anzahl, Größe und Form zu sehen. Somit wird eine situationsgerechte Bedienoberfläche ermöglicht, bei der nur aktuell sinnvolle Optionen auswählbar sind und ungeeignete Eingaben verhindert werden, wie in [4][38][112] gefordert.

Einsatzgebiete für das Bediensystem HapKeys, sowie Erweiterungspotenzial des Konzeptes sind im Folgenden aufgeführt:

- Anwendungen mit Touch-Screens können prinzipiell auch mit HapKey-Feldern ausgestattet werden. Zu beachten ist, dass in öffentlichen Bereichen Touch-Screens eine höhere Vandalensicherheit bieten, da keine bewegten Teile verwendet werden.
- Geräte mit mechanischen Tasten können durch den Einsatz von HapKey-Feldern deutlich übersichtlicher gestaltet werden:
 - Als Beispiel ist in Abb. 4.10 schematisch eine Universal-Fernbedienung zur Steuerung mehrere Geräte wie Fernseher, Videorecorder und Satelliten-Receiver dargestellt. Heute erhältliche Fernbedienungen dieser Art sind unübersichtlich und verwirren den Nutzer durch eine Vielzahl von Tasten (s. Abb. 4.1). Ein HapKey-Feld ermöglicht eine übersichtliche Menüstruktur, in deren ersten Ebene das zu bedienende Gerät, und in der folgenden Menüebene die gewünschte Funktion gewählt wird.

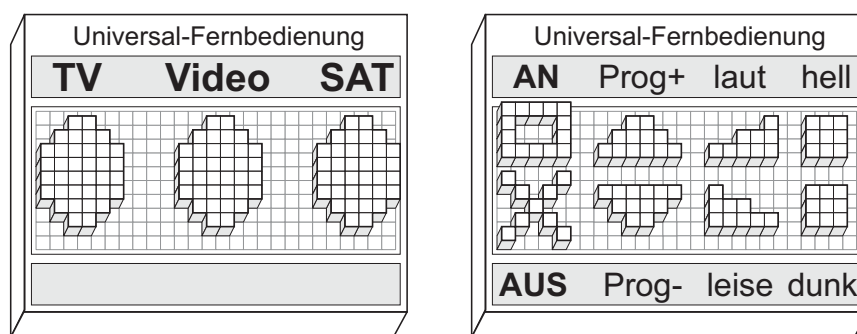


Abbildung 4.10: Beispielhafte Anwendung eines HapKey-Feldes als Universal-Fernbedienung.

Je nach Auswahl der zu bedienenden Einrichtung (TV, Video, Sat) erscheinen in der folgenden Menüebene ausschließlich Funktionen dieses Gerätes.

- Telefone könnten je nach Situation ein angepasstes Bedienfeld aufweisen und dadurch z.B. älteren Menschen weniger Probleme bereiten. Zum Annehmen eines Gespräches ist nur eine einzige Taste verfügbar, während zum Wählen einer Nummer zehn Ziffertasten dargestellt werden. Alle weiteren Funktionen, wie die Programmierung von Kurzwahlen, finden in Menüebenen mit anderen Tastenkonfigurationen statt. Somit ist es möglich, Fehlbedienungen weitgehend zu vermeiden und Tasten ausreichender Größe für Standardfunktionen zur Verfügung zu stellen.
 - In Kraftfahrzeugen sind menübasierte Bediensysteme wegen des steigenden Funktionsumfangs (Klimaanlage, Navigationssystem, Multimedia) sinnvoll. HapKey-Felder stellen hierfür eine Lösung dar, die aufgrund der ertastbarkeit der Bedienelemente die visuelle Ablenkung gering hält.
-
- Bediensysteme mit HapKey-Feldern können durch Umprogrammierung verändert oder erweitert werden. Im Fall der oben genannten Universalfernbedienung kann bei Neukauf eines Gerätes die vorhandene Fernbedienung neu programmiert und weiterverwendet werden.
 - Die Variabilität des Bedienfeldes erlaubt eine individuell angepasste Erscheinungsform, wie in [23][112] gefordert. Neben der Anordnung der Tasten nach den Bedürfnissen des einzelnen Nutzers, ist auch eine Anpassung an unterschiedliche Nutzergruppen (Anwender (Anfänger, Profi), Servicepersonal, Entwickler) möglich.
 - Neben der freien Anordnung der Bedienelemente, ist auch deren mechanische Charakteristik veränderlich. Tastenhöhe, Druckpunkte, Gegenkräfte - also allgemein die Kraft-Weg-Kennlinien - sind variabel an die Bedürfnisse des Nutzers oder der Funktion anpassbar (s. Abb. 4.8). Hersteller von Computer-Tastaturen betreiben großen Aufwand, um Produkte zu entwickeln, die sich besonders gut anfühlen [32]. Dennoch präferieren die Nutzer nicht immer die teuerste Tastatur, sondern entscheiden sich nach individuellen Vorlieben. Daher ist das variable mechanische Verhalten der HapKey-Tasten sinnvoll.
 - Großes Potenzial bieten HapKey-Felder für die Erstellung von Prototypen von Mensch-Maschine-Schnittstellen. Bisher werden Bedienfelder vor der endgültigen Gestaltung meist an Bildschirmen visuell simuliert, wobei der

Eindruck über die Charakteristika beim Berühren und Benutzen der Elemente verborgen bleibt [29]. Mit einem HapKey-Feld können Tastengrößen, Kraftverläufe, Druckpunkte und Stellwege in der Testphase schnell variiert werden, um anschließend im Serienprodukt konventionelle Bedienelemente mit entsprechenden Eigenschaften einzusetzen.

- Da die einzelnen Elemente eines HapKey-Feldes aktive Systeme sind, können durch gezielte Ansteuerung zusätzliche Informationen an den Benutzer übertragen werden. Vorstellbar ist eine Taste bei Benutzung vibrieren zu lassen, um die Wichtigkeit einer Funktion (z.B. Bestätigung eines Überweisungsauftrages) anzuzeigen oder deren erfolgreiche Ausführung rückzumelden. Ähnliche Ansätze sind auch von [76] beschrieben, in denen Eigenschaften multimedialer Daten (z.B. Musikrichtung eines Liedes) durch haptische Stimulation an den Benutzer übertragen werden sollen.
- Durch die freie Gestaltung der Kraft-Weg-Kennlinie sind Tasten mit mehreren Schaltpunkten realisierbar (s. Abb. 4.8 c). Ein exemplarischer Anwendungsfall ist die zweistufige Geschwindigkeitssteuerung von Fensterhebern in Kraftfahrzeugen, oder das Fokussieren und Auslösen bei Fotoapparaten. Mit leichtem Druck auf die Taste wird der erste Schaltpunkt erreicht, mit stärkerem der zweite.

Zusammenfassung:

Der wachsende Funktionsumfang technischer Geräte stellt für die Mensch-Maschine-Schnittstelle eine Herausforderung dar. Eine zukunftsweisende Lösung ist der Einsatz menübasierter Bediensysteme. Diese erfordern Eingabefelder, deren Bedienelemente in Anzahl, Größe, Lage und Beschriftung variabel sind. Touch-Screens erfüllen diese Anforderung, geben dem Benutzer jedoch keine angemessene haptische Rückmeldung. Für eine intuitive Bedienung durch unterbewusste Handlungsabläufe ist die haptische Reizung aber von großer Wichtigkeit. Daher wurde ein Bedienkonzept entwickelt, das flexibel konfigurierbare Tasten ermöglicht, deren Begrenzungen, Bewegungen und Schaltpunkte bei Betätigung haptisch zu spüren sind. Das neuartige Bedienfeld setzt sich aus einzelnen Elementen zusammen, die jeweils ein eigenständiges Sensor-Aktor-System repräsentieren. Eine Regelung ermöglicht das Gruppieren der einzelnen Elemente zu größeren Bedieneinheiten.

5 Untersuchungen mit einem Tastensimulator

Vor der Festlegung der Anforderungen an das System HapKeys werden mit einer Versuchsanordnung Voruntersuchungen durchgeführt. 20 Testpersonen nehmen an zwei Experimenten teil. Ziel ist die Quantifizierung der Wahrnehmungsschwelle bei sprunghafter Änderung der Betätigungskraft einer Taste. Zusätzlich wird untersucht, welche Charakteristika Kraft-Weg-Kennlinien von Tasten aufweisen müssen, um vom Bediener als angenehm und intuitiv anwendbar beurteilt zu werden.

5.1 Ziel der Experimente

Wie in Abschnitt 3.2 bereits dargestellt, können Anforderungen an haptische Displays nur im begrenzten Rahmen allgemeingültig aufgestellt werden. Die genauen Spezifikationen müssen vom konkreten Einsatzzweck abgeleitet werden. Da in der Literatur kaum dem hier vorgestellten Anwendungsfall verwandte Untersuchungen existieren, ist die Durchführung eigener Experimente sinnvoll. Ziel ist es, aus den Voruntersuchungen Rückschlüsse auf die geforderte Leistungsfähigkeit der Sensor-Aktor-Systeme für die HapKey-Elemente zu ziehen. Zwei Experimente wurden zu diesem Zweck entworfen [22]:

Experiment 1: „Kraft-JND“ oder „Wahrnehmbare Kraftsprünge bei Tastenbetätigung“

Um die Aktorik, Signalverarbeitung und Regelung der HapKeys auslegen zu können, sind Kenntnisse über die notwendige Auflösung der Kraftausgabe erforderlich. Richtungsweisend ist hierfür die Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen in dem konkreten Anwendungsfall. Die Frage lautet: Welche Kraftsprünge kann der Mensch bei Betätigung einer Taste mit dem Finger haptisch wahrnehmen? Die übliche Kenngröße für solche Angaben ist die bereits eingeführte *Unterschiedsschwelle* (gerade wahrnehmbare Differenz) oder auch *JND* (Just Noticeable Difference).

Experiment 2: Kraft-Weg-Kennlinie einer Taste

Die haptische Charakteristik einer Taste ist hauptsächlich durch die Kraft-Weg-Kennlinie und dem daraus resultierenden, spürbaren Schalterpunkt bestimmt. Welche Eigenschaften die Kennlinie einer Taste aufweisen muss, um vom Benutzer als angenehm und intuitiv anwendbar beurteilt zu werden, wird in diesem Experiment untersucht. Aus den Ergebnissen können quantitative Anforderungen wie die erforderliche Maximalkraft der Aktoren für das System HapKeys abgeleitet werden.

5.2 Versuchsanordnung und deren Eigenschaften

Zur Durchführung der Experimente ist eine Versuchsanordnung notwendig. Hauptbestandteil ist ein haptisches Display zur Simulation einer Taste, deren haptische Eigenschaften durch eine variable Kraft-Weg-Kennlinie gezielt einstellbar ist. Der Tastensimulator ist durch ein Sensor-Aktor-System realisiert [71], wie in Abb. 5.1 gezeigt.

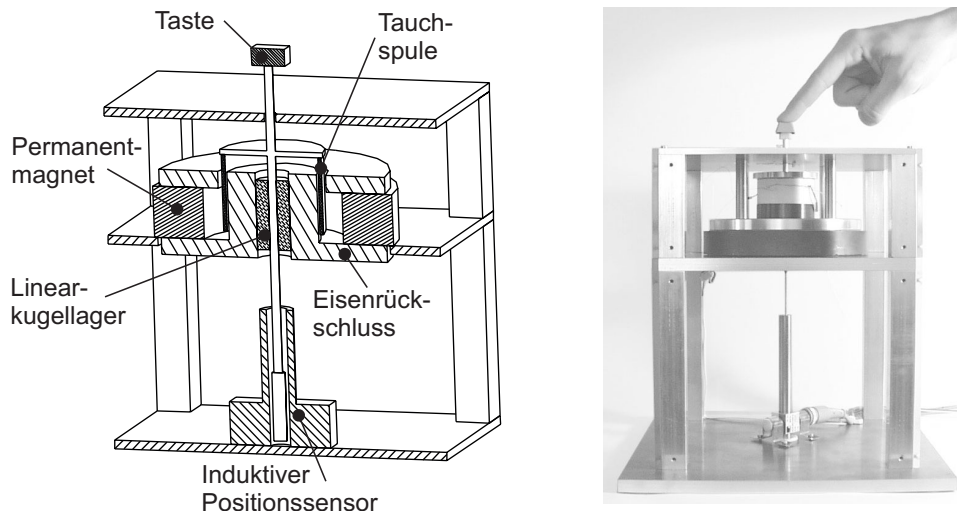


Abbildung 5.1: Aufbau und Bild des Tastensimulators.

Links: Schnittbild des Tastensimulators, bestehend aus einem elektrodynamischen Aktor (Tauchspule, Permanentmagnet, Eisenrückschluss) und einem induktiven Positionssensor. Die Taste ist an der Tauchspule fixiert und wird mit Hilfe eines Linearkugellagers geführt. Rechts: Foto des Tastensimulators während der Benutzung.

Als Aktor kommt ein elektrodynamisches Tauchspulsystem aus einem handelsüblichen Lautsprecher zum Einsatz. Das Wandlerprinzip weist im Idealfall einen

linearen Zusammenhang zwischen eingprägtem Strom und ausgeübter Kraft auf. Zur gezielten Kraftausgabe kann somit durch die Verwendung einer Stromquelle auf einen geschlossenen Regelkreis mit Kraftsensorik verzichtet werden. Die Position der Taste wird mit einem induktiven Sensor [Fa. HBM, Typ W20, Auflösung ca. $10\ \mu\text{m}$] aufgenommen. Wie in Abb. 5.2 schematisch dargestellt, wird das Sensorsignal von einem Brückenverstärker [Fa. HBM, Typ MGC mit Einschub AB12 und MC55] ausgewertet und über eine AD-Wandlerkarte [Fa. Addi-Data, Typ APCI-3120, Auflösung 16 Bit] dem PC zugeführt. Die unter LabVIEW [Fa. National Instruments] programmierte Steuerungssoftware berechnet je nach darzustellender Kraft-Weg-Kennlinie die Ausgabekraft der Taste in Abhängigkeit deren Position. Eine kraftproportionale Spannung wird über die DA-Wandlerkarte [Fa. Addi-Data, Typ APCI-3120, Auflösung 14 Bit] einer Stromquelle [116] zugeführt. Deren spannungsproportionaler Ausgangsstrom fließt durch die Tauchspule des Aktors und erzeugt die gewünschte Kraftwirkung.

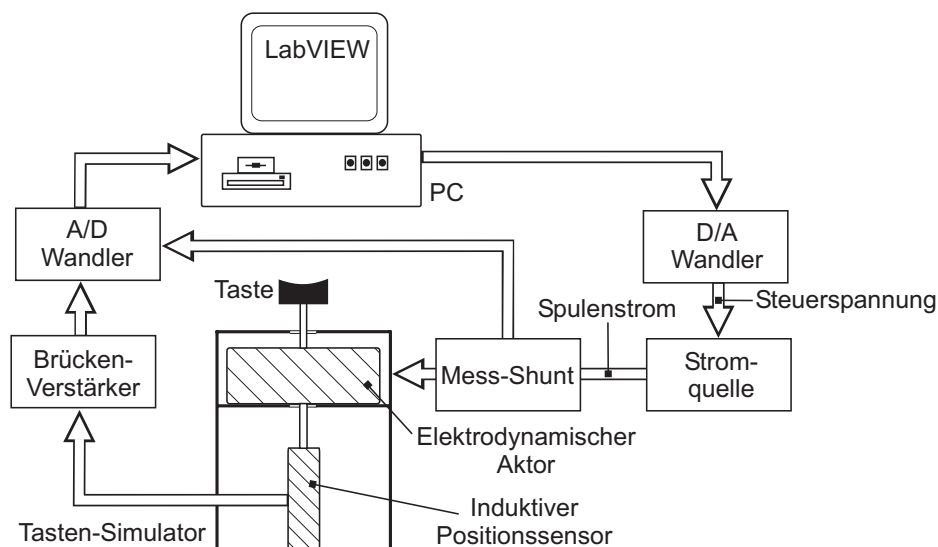


Abbildung 5.2: Zusammenwirken der Komponenten der Versuchsanordnung.

Für die Auswertung der Experimente muss der quantitative Zusammenhang zwischen der Steuerspannung des PCs und der ausgegebenen Tastenkraft bekannt sein. Innerhalb dieser Wirkkette befindet sich die spannungsgesteuerte Stromquelle, die in 60 Messzyklen zwischen $122\ \text{mA}$ ($0,12\ \text{V}$) und $544\ \text{mA}$ ($0,52\ \text{V}$) eine absolute Linearitätsabweichung kleiner $2,1\ \text{mA}$ aufweist. Dies entspricht einem relativen Fehler zwischen $1,75\ \%$ und $0,4\ \%$. Um die Aktorkraft in Abhängigkeit der Steuerspannung bestimmen zu können, wird in einem Messaufbau über der

Simulatortaste ein Kraftsensor [Fa. HBM, Typ S2, Auflösung ca. 10 mN] an einem höhenverstellbaren Stativ befestigt (s. Abb. 5.3). Er dient als Endanschlag für die Taste. Durch eine Positionsveränderung des Anschlages kann zusätzlich die Abhängigkeit der Aktorkraft von der Lage der Tauchspule im Magnetkreis überprüft werden. Die auf eine Maximalkraft von 5 N beschränkten Messzyklen sind in Abb. 5.3 und die Messergebnisse in Abb. 5.4 aufgetragen.

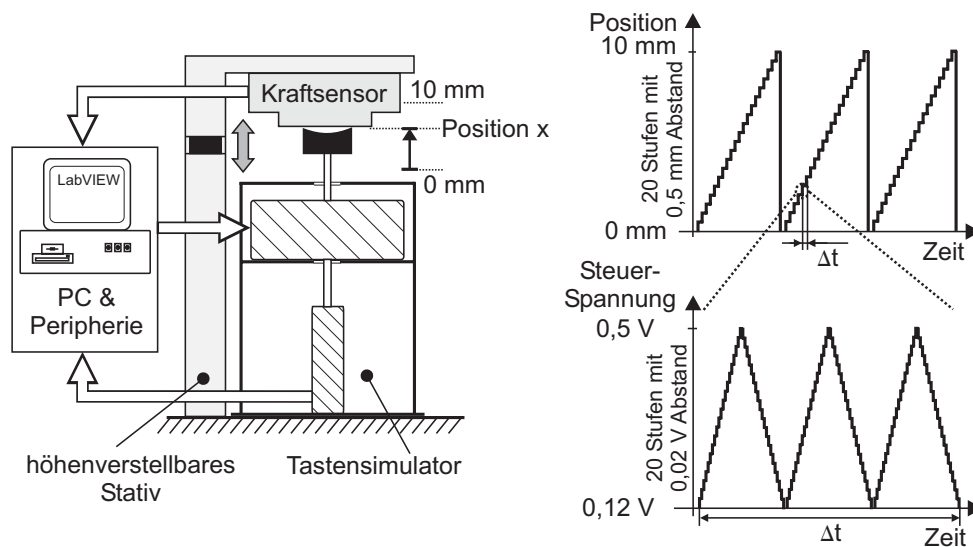


Abbildung 5.3: Messaufbau mit Kraftsensor zur Charakterisierung des Tastensimulators.

Links: Vermessung des Versuchsaufbaus unter Verwendung eines höhenverstellbaren Kraftsensors. Rechts: Messzyklen für die Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Aktorkraft, Steuerungsspannung und Tauchspulposition. An jeder Stufe der Position durchläuft die Spannung drei Zyklen.

Es ist erkennbar, dass entgegen der Erwartung die Simulatorkraft eine Abhängigkeit von der Auslenkung der Taste, also der Position der Tauchspule im Magnetkreis, aufweist. Diese Nichtlinearität ist auf den Einfluss des magnetischen Streufeldes im Luftspalt des Eisenkreises zurückzuführen (s. Abb. 5.5). Die Anzahl der Spulenwindungen im Luftspalt wird durch konstruktive Maßnahmen konstant gehalten. Dagegen befinden sich im Streufeld je nach Lage der Tauchspule unterschiedlich viele Windungen. Deren Kraftwirkung führt zur Positionsabhängigkeit der Aktorkraft, welche als Nichtlinearität bei der Versuchsauswertung zu berücksichtigen ist.

Daher werden die aufgenommenen Messwerte nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch ein Kennlinienfeld nach Gl. 5.1 approximiert. Die Abweichung zu den realen Messwerten ist bis auf wenige Ausreißer kleiner 50 mN.

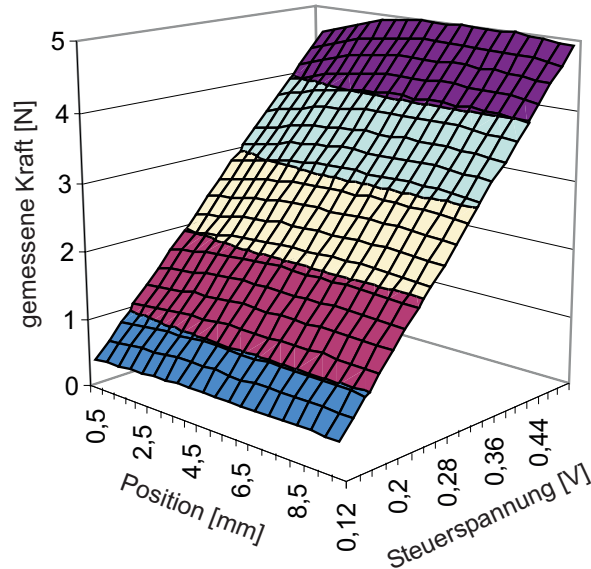


Abbildung 5.4: Mittelwerte der gemessenen Aktorkraft in Abhängigkeit der Steuerspannung und der Tastenposition.

Dieser quantitative Zusammenhang findet bei der Auswertung der Experimente Verwendung.

$$\begin{aligned}
 F(u, x) &= a(x) \cdot u + b(x) \quad \text{mit} & (5.1) \\
 a(x) &= -0,0215 \frac{\text{N}}{\text{V} \cdot \text{mm}^2} \cdot x^2 + 0,2786 \frac{\text{N}}{\text{V} \cdot \text{mm}} \cdot x + 10,94 \frac{\text{N}}{\text{V}} \\
 b(x) &= 0,0013 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot x - 0,9133 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Zusammengefasst ist mit der Versuchsanordnung die Simulation von Tasten mit unterschiedlichen haptischen Eigenschaften möglich. Die Kraft-Weg-Kennlinie ist per Software programmierbar, wobei die Maximalkraft ca. 12 N beträgt. Der Tastenhub ist durch mechanische Anschläge im Bereich von 0 bis 10 mm einstellbar. Um auf einen mit der Taste mitbewegten, hochbelastbaren Miniatur-Kraftsensor verzichten zu können, wird der Tastensimulator gesteuert und nicht geregelt. Dies führt zu Differenzen zwischen der Soll- und der Ist-Größe der Aktorkraft. Die Approximation nach Gl. 5.1 weist eine Abweichung zu den realen Messwerten typischerweise kleiner 50 mN auf.

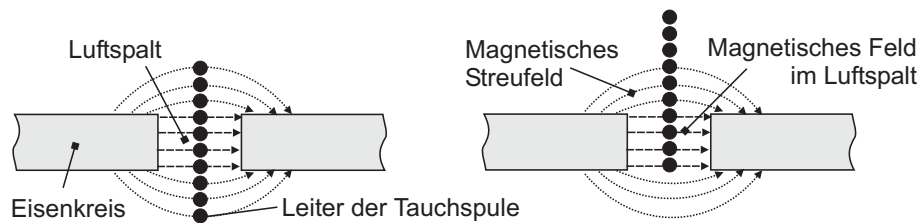


Abbildung 5.5: Einfluss des magnetischen Streufeldes beim elektrodynamischen Aktor.

Links: Die stromdurchflossenen Leiter der Tauchspule befinden sich symmetrisch im Luftspalt. Rechts: Die Spule ist weiter oben positioniert, wodurch weniger Leiter vom Streufeld erfasst werden.

5.3 Versuch „Kraftsprung“

5.3.1 Versuchsdurchführung

Ziel ist die Ermittlung der Größe von gerade wahrnehmbaren Kraftsprüngen (Kraft-JND) bei der Betätigung einer Taste. Prinzipiell gibt es verschiedene Methoden der Versuchsdurchführung um solche Kennwerte der Wahrnehmung zu erfassen [17][115][122]:

Methode der Minimaländerung: Dem Probanden werden Reize dargeboten, deren Intensitäten vom Versuchsleiter von Durchgang zu Durchgang um einen kleinen Betrag erhöht oder verringert werden. Wichtig ist, dass es sich um monoton ansteigende oder absteigende Folgen von Reizen handelt. Bei einer ansteigenden Folge wird der Unterschied zwischen Referenzreiz und Vergleichsreiz von Null ausgehend erhöht, bis die Versuchsperson die Differenz wahrnehmen kann. Eine absteigende Folge beginnt mit einem eindeutig wahrnehmbaren Unterschied, der bis unter die Wahrnehmungsgrenze verringert wird.

Konstanzmethode: Es werden Reizpaare ausgewählt, deren Unterschiede im Bereich der wahrnehmbaren Schwelle liegen. Diese Reizpaare werden dem Probanden in zufälliger Reihenfolge meist mehrfach dargeboten. Die Aussagen, welcher der beiden Reize des Paares eine stärkere Empfindung auslöst, werden statistisch mit Hilfe der relativen Häufigkeit ausgewertet.

Herstellungsmethode: Der Proband wird gebeten, den Vergleichsreiz selbstständig soweit hoch- oder herunterzuregeln, dass gerade noch ein Unterschied zum Referenzreiz wahrgenommen werden kann.

Das Kraftsprung-Experiment wird mit der Herstellungsmethode durchgeführt, da hier aufgrund der aktiven Beteiligung der Probanden eine hohe Aufmerksamkeit während des Versuches und damit ein aussagekräftiges Ergebnis erwartet wird.

Mit dem Tastensimulator wird ein Kraftverlauf nach Abb. 5.6 dargestellt. Die Kraft ist sowohl in der oberen, als auch in der unteren Hälfte des Tastenhubes konstant, weist jedoch in der Mitte einen Sprung auf. Die Probanden drücken die Taste mit dem Zeigefinger herunter und müssen dabei entscheiden, ob während der Betätigung eine Änderung der Kraft wahrnehmbar ist oder nicht. Der Betrag der Kraft im oberen Teil des Hubes (Testkraft) ist von den Versuchsteilnehmern selbständig veränderbar, während die Referenzkraft im unteren Teil für je einen Versuchsdurchgang konstant bleibt. Die Testkraft kann von den Probanden in Schritten von 10 mN vergrößert oder verkleinert werden (s. Abb. 5.6). Eine Veränderung der Testkraft ist beliebig oft möglich, ebenso das Überprüfen des haptischen Eindrucks bei Betätigung der Taste. Die Wahrnehmungsschwelle kann dabei sowohl überschritten (Kraftsprung eindeutig spürbar), als auch unterschritten (Kraftsprung eindeutig nicht spürbar) werden. Am Ende jedes Versuchsdurchgangs soll der Proband die maximale Differenz zwischen Test- und Referenzkraft eingestellt haben, die gerade noch keine Wahrnehmung des Kraftsprungs verursacht.

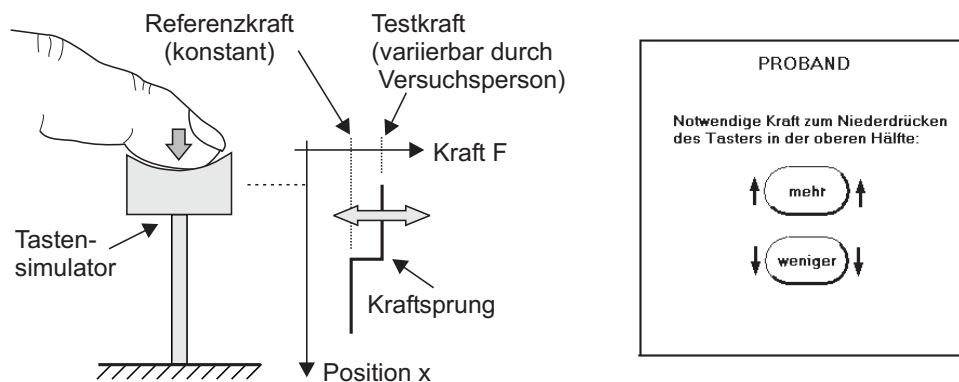


Abbildung 5.6: Kraftsprung-Experiment nach der Herstellungsmethode.

Links: Kraftverlauf bei Betätigung des Tastensimulators. Durch Veränderung der Testkraft über eine Benutzeroberfläche am PC (rechts) wird die Größe des Kraftsprungs zur Referenzkraft beeinflusst.

Das Experiment wird bei fünf unterschiedlichen Referenzkräften durchgeführt: Mit 0,5 ; 1,0 ; 1,5 ; 2,0 und 2,5 N ist ein für den Anwendungsfall „Tastenbetätigung“ sinnvoller Bereich abgedeckt. Jede Referenzkraft wird den Probanden zweimal dargeboten, wobei die Testkraft einmal größer und einmal kleiner als die

Referenz ist. So kann die positive und negative Unterschiedsschwelle untersucht werden. Die Reihenfolge der dargestellten Referenzkräfte, wie auch die anfänglichen Größen der Kraftsprünge (35 bis 150 % der Referenzkraft) werden zufällig bestimmt. Während des Experimentes ist der Hub der simulierten Taste auf 5 mm eingestellt. Die Versuchspersonen wurden angewiesen, die Taste langsam und bewusst zu betätigen. Außerdem sollte der Finger nicht beobachtet werden, da der Kraftsprung evtl. eine visuell erkennbare Diskontinuität der Fingerbewegung verursacht. Tabelle 5.1 fasst die wichtigsten Versuchsparameter nochmals zusammen.

Tabelle 5.1: Versuchsparameter des Experimentes „Kraftsprung“.

Ziel	Wahrnehmungsschwelle von Kraftsprüngen bei Tastenbetätigung
Referenzkräfte	0,5 ; 1,0 ; 1,5 ; 2,0 ; 2,5 N
Testkräfte	von Versuchsperson in 10 mN Schritten einstellbar
Versuchsdurchgänge	10: Testkraft einmal größer und einmal kleiner als jede Referenzkraft
Tastenhub	5 mm
Versuchsdauer	unbegrenzt

5.3.2 Versuchsauswertung und Interpretation

An den Experimenten nahmen 20 Versuchspersonen aus der Altersgruppe zwischen 24 und 32 Jahren teil. Es handelt sich um 18 männliche und zwei weibliche Personen, 18 davon Rechtshänder, zwei Linkshänder.

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse sind quantitative Aussagen über die Unsicherheit der Kraftbestimmung in diesem speziellen Experiment notwendig. Wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, besteht eine Abhängigkeit der ausgeübten Aktorkraft nicht einzig von der Steuerspannung, sondern auch von der Position der Tauchspule. In diesem Experiment findet der interessierende Kraftsprung jedoch stets in der Mitte des Tastenhubes, also an einer konstanten Position statt. Für diese spezielle Aktorauslenkung kann eine lineare Approximation nach Gl. 5.2 aufgestellt werden, die in drei Messreihen eine Abweichung zu den realen Messwerten von maximal 35 mN und nach Betragsbildung durchschnittlich 8,7 mN aufzeigt. Daher wird bei der Versuchsauswertung von einem mittleren Fehler von ca. ± 9 mN ausgegangen, der in der gleichen Größenordnung wie die Schrittweite bei Veränderung der Sprunghöhe (s.o.) liegt.

$$F(u) = 11,56 \frac{\text{N}}{\text{V}} \cdot u - 0,941 \text{ N} \quad (5.2)$$

Zur Auswertung des Experimentes werden die von den Versuchspersonen eingestellten Testkräfte im Vergleich zu den Referenzkräften betrachtet und deren prozentuale und absolute Differenzen untersucht. Dabei zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Versuchsdurchgängen mit kleinerer und größerer Testkraft gegenüber der jeweiligen Referenzkraft. Daher werden die Kraftdifferenzen beider Durchgänge nach Betragsbildung gemittelt. Dies entspricht nach [115] dem Vorgehen zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle bei der Herstellungsmethode: Die Differenz zwischen den beiden Reizintensitäten, die gerade eine niedrigere und höhere Empfindung verursachen, wird halbiert.

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Abb. 5.7 gezeigt. Aufgetragen sind die Differenzen zwischen den Referenzkräften und den eingestellten Testkräften, die nach Aussage der Versuchspersonen noch nicht als Kraftsprung wahrgenommen werden. Die ausgefüllten Quadrate zeigen die Werte für die einzelnen Probanden an (z.T. übereinanderliegend); die weißen Kreise den jeweiligen Mittelwert aller Versuchspersonen.

Die prozentuale Differenz entspricht der Definition der Just-Noticeable-Difference (JND).

$$\text{JND} = \frac{\Delta F}{F_{\text{Referenz}}} = \frac{|F_{\text{Test}} - F_{\text{Referenz}}|}{F_{\text{Referenz}}} \quad (5.3)$$

Für größere Referenzkräfte liegt die JND bei 5 bis 10 %, nimmt jedoch mit fallender Referenz deutlich zu. Dies deckt sich mit den Aussagen von [82], der für die Kraftwahrnehmung zwischen Daumen und Zeigefinger ebenfalls eine JND zwischen 5 und 10 % für Kräfte von 2,5 bis 10 N festgestellt hat und eine Zunahme der JND für kleinere Kraftreferenzen erwartet.

Besonders interessante Erkenntnisse lassen sich aus den Absolutwerten der Differenzen ableiten. Diese liegen unabhängig von der Referenzkraft im Durchschnitt bei ca. 100 mN. Das bedeutet, dass bei der Bedienung von Tasten mit Betätigungskräften zwischen 0,5 und 2,5 N plötzliche Kraftschwankungen von 100 mN nicht wahrgenommen werden können. Trotz einer Unsicherheit von wenigstens 10 mN (Kraftberechnung, stufenweise Einstellung der Testkraft) fließt diese Erkenntnis in den späteren Entwurf der HapKeys ein.

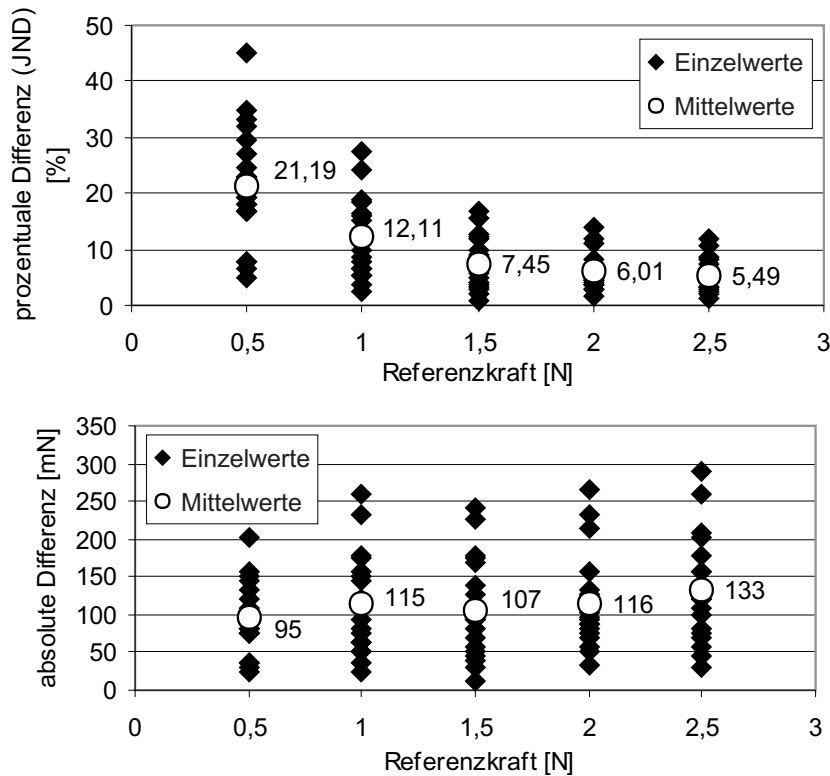


Abbildung 5.7: Auswertung der Versuchs „Kraftsprung“:

Oben sind die prozentualen Differenzen bezogen auf die jeweilige Referenzkraft dargestellt. Zu sehen sind die individuellen Ergebnisse der 20 Versuchsteilnehmer, sowie deren Mittelwerte (weiße Kreise). Unten ist entsprechend die absolute Differenz zwischen Test- und Referenzkraft aufgetragen.

5.4 Versuch „Kraft-Weg-Kennlinie einer Taste“

5.4.1 Versuchsdurchführung

Dieses Experiment beschäftigt sich mit der Frage, wie die Kraft-Weg-Kennlinie einer Taste beschaffen sein muss, um bei Betätigung einen angenehmen und intuitiven haptischen Eindruck hervorzurufen. Die Probanden können dafür die Kraft-Weg-Kennlinie der durch den Simulator dargestellten Taste verändern. Um die Anzahl der einzustellenden Parameter gering zu halten, wird vereinfachend die kontinuierliche Kurve mechanischer Tasten durch eine Kennlinie bestehend aus

fünf Teilgeraden ersetzt. In Abb. 5.8 ist dargestellt, wie die sechs Parameter der Kennlinie mit Schieberegler in einer graphischen Bedienoberfläche unter Lab-View variiert werden können. Die Kräfte können in einem Bereich von 0 bis 3 N, die Positionen zwischen 0 und 5 mm eingestellt werden. Die Schieberegler der Steuersoftware ermöglichen eine Auflösung von ca. 50 mN, bzw. 0,1 mm. Der Hub der Taste ist während des Experimentes fest auf 5 mm eingestellt.

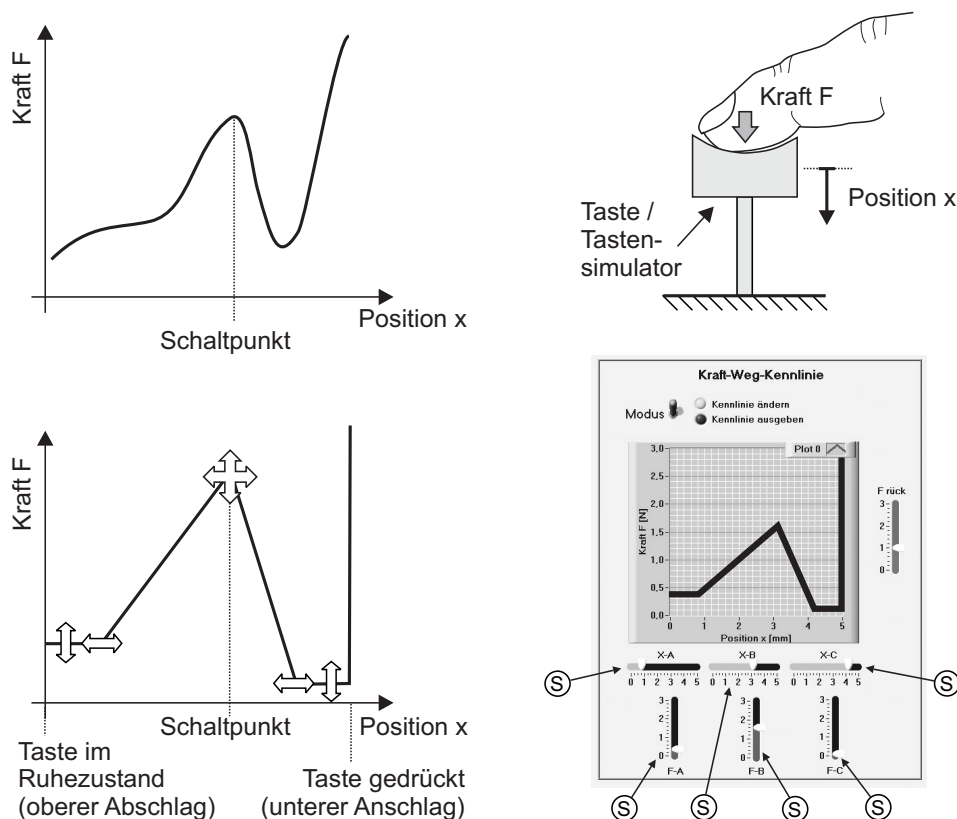


Abbildung 5.8: Versuchsdurchführung des Experimentes „Kraft-Weg-Kennlinie“.

Oben: Beispiel einer charakteristischen Kurve (Kraft-Weg-Kennlinie) einer konventionellen, mechanischen Taste. Unten: Vereinfachte Kraft-Weg-Kennlinie der simulierten Taste (links). Die sechs Parameter werden mit Hilfe von Schieberegler (S) in einer Benutzeroberfläche am PC eingestellt (rechts).

Die Versuchspersonen können in unbegrenzter Zeit die Kennlinie beliebig oft verändern und den entstehenden haptischen Eindruck überprüfen. Es wurde empfohlen, zwischen zwei Tastenbetätigungen jeweils nur einen Parameter zu variieren, um dessen speziellen Einfluss einschätzen zu können.

5.4.2 Versuchsauswertung und Interpretation

Bei der Auswertung dieses Experimentes ist die Genauigkeit der Kraftberechnung aus der Spannungsung von untergeordneter Wichtigkeit. Zur Ableitung einiger grundlegender Kennwerte über den Verlauf der bevorzugten Kraft-Weg-Kennlinien ist eine Auflösung unter 100 mN nicht erforderlich. Jedoch sollten vor der Bewertung der Versuchsergebnisse einige Rahmenbedingungen verdeutlicht werden: Trotz der reduzierten Anzahl von sechs variablen Parametern ergibt sich ein großes Lösungsfeld für die charakteristische Kurve. Daher besteht die Gefahr, dass die Probanden eher ein lokales, als das globale Maximum der angenehm empfundenen Kennlinien eingestellt haben. Darüber hinaus hängen die erwarteten Eigenschaften einer Taste von deren Einsatzzweck ab. Eine Computer-Tastatur muss sich anders als ein Fernbedienungsknopf anfühlen. In diesem Experiment wurde als Anwendungsfall ein Fahrkartenautomat genannt. Insgesamt ist der Versuch als Grundlagenuntersuchung anzusehen, dessen Ergebnisse als Orientierung bei der Auslegung von Tasten dienen sollen.

Die Probanden haben sich nach einer Versuchsdauer von 10 bis 15 Minuten für die in Abb. 5.9 dargestellten Kennlinien entschieden. Gestrichelt eingetragen ist die ebenfalls veränderliche Rückstellkraft, die konstant bei der Rückbewegung vom unteren zum oberen Anschlag wirkt.

Deutlich erkennbar ist die Vielfältigkeit der Kennlinien. Auf den ersten Blick lassen sich keine allgemeingültigen Eigenschaften feststellen. Dennoch können einige Kennwerte abgeleitet werden: Die maximale Kraft am Schaltpunkt wurde von den meisten Probanden nicht deutlich über 1,5 N eingestellt, wie in Abb. 5.10 zu sehen ist. Diese Erkenntnis ist für den HapKey-Entwurf verwendbar. Desweiteren ist bei näherer Betrachtung ersichtlich, dass der Anstieg der Kraft zum Schaltpunkt, ebenso wie der Abfall nach dem Schaltpunkt, häufig im Bereich von ca. 1 N liegt.

Die wichtigste Aussage des Experimentes ist in der Unterschiedlichkeit der Kennlinien zu sehen, d.h. die Erwartung an die haptische Rückmeldung bei der Bedienung von Tasten ist individuell sehr unterschiedlich. Dies stützt das Konzept der HapKeys, welches Bedienelemente ermöglicht, deren Kraft-Weg-Kennlinie flexibel an die Bedürfnisse jedes Benutzers anpassbar sind.

5.4 VERSUCH „KRAFT-WEG-KENNLINIE EINER TASTE“

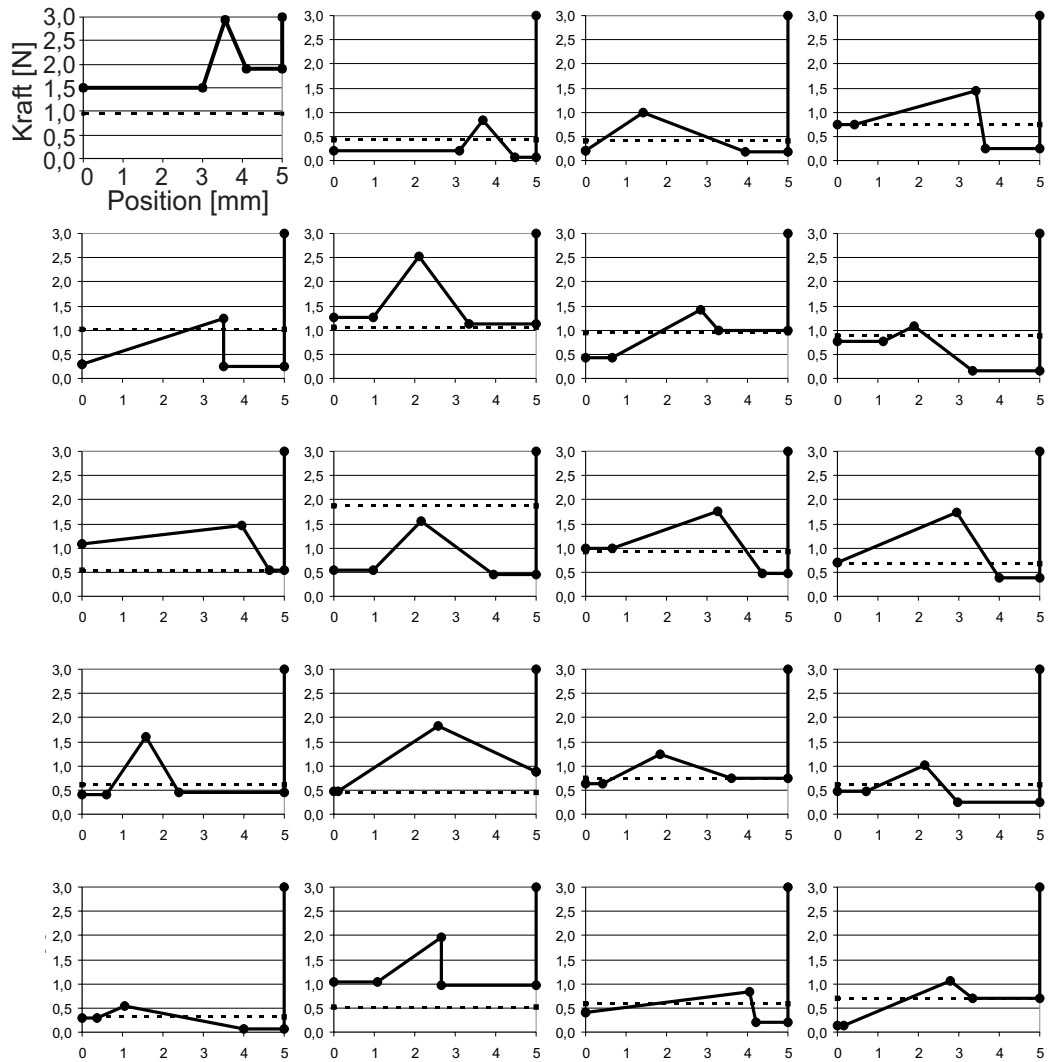


Abbildung 5.9: Auswertung des Experimentes „Kraft-Weg-Kennlinie“.

Die als angenehm empfundenen Kennlinien aller 20 Versuchspersonen sind in jeweils eigenen Diagrammen dargestellt. Position 0 mm entspricht dem oberen Tastenanschlag, Position 5 mm dem unteren. Die gestrichelte Linie zeigt die Größe der Rückstellkraft an.

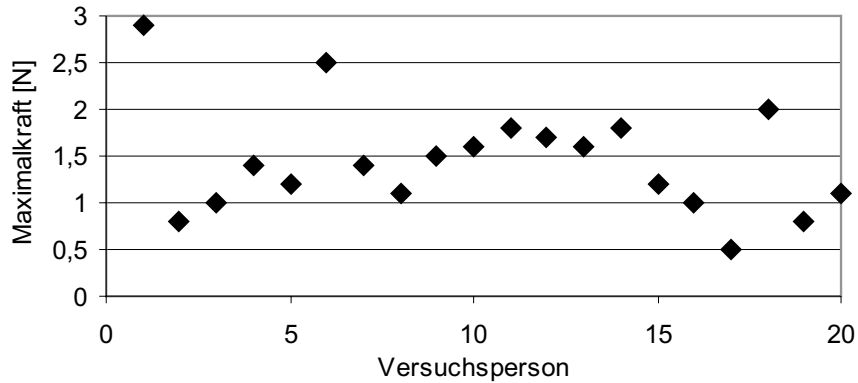


Abbildung 5.10: Maximale Kraft am Schaltpunkt der von den einzelnen Versuchspersonen bevorzugten Kraft-Weg-Kennlinien.

Zusammenfassung:

Zur genaueren Spezifikation der statischen Anforderungen an das System HapKeys wurden zwei Experimente durchgeführt. Dabei kam ein haptisches Display zur Simulation einer Taste mit variabler Kraft-Weg-Kennlinie zum Einsatz. Mit dem Experiment „Kraftsprung“ konnte gezeigt werden, dass sprunghafte Änderungen der Betätigungskraft einer Taste bis zu 100 mN nicht wahrgenommen werden. Im Versuch „Kraft-Weg-Kennlinie“ wurde festgestellt, dass die maximale Kraft am Schaltpunkt von angenehm empfundenen Tasten meist nicht größer ist als ca. 1,5 N. Außerdem wurden deutliche Unterschiede bei der subjektiven Erwartung an die haptische Charakteristik einer Taste beobachtet.

6 Anforderungen an das Eingabefeld

Die technischen Anforderungen an das elektromechanische System zur Realisierung eines Prototypen des HapKey-Bedienfeldes werden in diesem Kapitel zusammengestellt. Dabei werden Ergebnisse aus vorangegangenen Abschnitten, als auch neue Aspekte berücksichtigt.

6.1 Anforderungen zur Gewährleistung der Funktionalität

Der Prototyp des HapKey-Feldes soll die gesamte Funktionalität des Konzeptes aufweisen. Um dennoch den mechanischen und elektrischen Aufwand beim Aufbau des Prototypen zu begrenzen, wird eine überschaubare Anzahl von Sensor-Aktor-Elementen angestrebt. Mit einer matrixartigen Anordnung von 3×5 Elementen ist bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Tastenkonfigurationen auf dem Eingabefeld darstellbar.

Die Größe der Elemente wird horizontal mit $1 \times 1 \text{ cm}^2$ so gewählt, dass eine kleine Taste auf dem Bedienfeld mit einem einzelnen Element repräsentiert werden kann. Der Stellweg der Elemente, und damit der Tastenhub, wird auf 5 mm festgelegt. Damit ist sowohl ein guter haptischer Eindruck, als auch eine visuell eindeutige Hervorhebung der aktivierten Elemente gegenüber der Bedienfeldebene gewährleistet.

Um größere Tasten auf dem Bedienfeld darzustellen, werden benachbarte Elemente gruppiert, indem sie auf die gleiche Auslenkung eingeregelt werden. Diese Elemente müssen sich bei Tastenbetätigung gleichförmig bewegen, unabhängig davon, ob der Finger einzelne oder mehrere Elemente der Gruppe drückt. Die dafür notwendige Positionsregelung sollte bleibende Regelabweichungen über 0,3 mm verhindern. So wird der visuelle Eindruck einer zusammenhängenden Taste aufrecht erhalten.

Zusätzlich muss die Regelung für jede Taste auf dem Bedienfeld eine individuelle Kraft-Weg-Kennlinie ermöglichen. Besteht eine Taste aus einer Gruppe

von Elementen, so muss der vom Benutzer wahrgenommene haptische Eindruck unabhängig von der Anzahl der berührten und gedrückten Elemente sein. Eine Differenz zwischen der vorgegebenen und der tatsächlich ausgegebenen Kraft-Weg-Kennlinie ist für diesen Anwendungsfall dagegen unkritisch. Der haptische Eindruck wird hauptsächlich durch den Kurvenverlauf und weniger durch die exakten Kraftamplituden geprägt. Eine Abweichung der Ist- von der Soll-Kennlinie im Bereich von 200 mN ist ohne Qualitätsverlust akzeptierbar. Weitere Details bezüglich den Aufgaben der Regelung werden im Kapitel 9 dargestellt.

6.2 Anforderungen beim Einsatz als haptisches Display

Da das Bedienfeld den Tastsinn des Menschen zur Informationsübertragung nutzt, sind alle in Kapitel 3.2 genannten Anforderungen an haptische Displays auf dieses System übertragbar und soweit relevant in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Darüber hinaus ergeben sich Anforderungen aus dem speziellen Anwendungsfall als Eingabefeld, die durch die Untersuchungen mit dem Tastensimulator (Kapitel 5) quantifiziert werden konnten: Die Maximalkraft der Elemente muss im Bereich von 1,5 N liegen, um die Erwartungen an den Kraftverlauf einer Taste erfüllen zu können (s. Experiment „Kraft-Weg-Kennlinie“). Die Maximalkraft wird jedoch nur am Schaltpunkt der Kraft-Weg-Kennlinie ausgegeben, weshalb der Betrieb unter Volllast bei normaler Tastenbetätigung nur kurzzeitig (< 1 s) notwendig ist.

Die Auflösung der Kraftausgabe von haptischen Displays muss mindestens der Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen entsprechen. Die Kraftsensorik sollte dagegen das menschliche Auflösungsvermögen um den Faktor zehn übersteigen [99]. In Kapitel 8 wird gezeigt, dass bei der Realisierung des HapKey-Feldes die aktorischen Komponenten gleichzeitig der Kraftbestimmung dienen und daher die sensorischen Anforderungen erfüllen müssen. Im Experiment „Kraftsprung“ wurde als Unterschiedsschwelle der Kraftwahrnehmung des Fingers bei Tastenbetätigung ein Wert von ca. 100 mN bestimmt. Somit ergibt sich eine geforderte Kraftauflösung der zu entwickelnden Aktoren von 10 mN. Dieser Wert wird ebenfalls von [103] für hochqualitative Displays empfohlen.

Die Stellgeschwindigkeit des Aktors muss an die Geschwindigkeit einer Tastenbetätigung mit dem Finger angepasst sein. Messungen ergaben dabei einen Richtwert von ca. 200 mm/s.

Ein entscheidender Faktor für die Qualität des haptischen Eindrucks ist die Wiederholrate der Regelung. Je präziser und „knackiger“ die Krafrückmeldung sein soll, desto höher muss die Regelfrequenz gewählt werden. Sie sollte 10-20mal größer als die gewünschte Bandbreite der Kraftausgabe sein [8] und wird von [88] mit mindestens 2 kHz angesetzt.

Die wichtigsten Anforderungen an das System Hapkeys sind in Tabelle 6.1 nach Schwerpunkten geordnet aufgeführt. Die folgenden Kapitel greifen diese Schwerpunkte nacheinander auf.

Tabelle 6.1: Auszug der Anforderungsliste für den Prototypen des Bediensystems „HapKeys“.

GEOMETRIE / ALLGEMEINES	
Anzahl der Elemente	15 (matrixförmige Anordnung: 3 × 5)
Abmessungen der Elemente	≤ 10 × 10 × 100 mm ³ (B × T × H)
AKTORIK	
Freiheitsgrade	1 (Linearbewegung)
Abmessungen	≤ 10 × 10 × 50 mm ³
Maximalkraft	≥ 1,5 N
Dauerbetrieb bei Maximalkraft	≥ 1 s
Auflösung der Kraftausgabe	≤ 10 mN
Stellweg	5 mm
max. Stellgeschwindigkeit	≥ 200 mm/s
Mechanik	rücktreibbare Anordnung, geringe bewegte Masse, geringe Reibung [5][51][64][88]
POSITIONSENSORIK	
Messbereich	5 mm
Messgenauigkeit	≤ 25 μm [88]
Grenzfrequenz	≥ 1 kHz
Kraftbedarf zur Messung	≤ 100 mN
Abmessungen	≤ 10 × 10 × 50 mm ³
KRAFTSENSORIK	
Messbereich	≥ 1,5 N
Messgenauigkeit	≤ 10 mN [103]
Grenzfrequenz	≥ 1 kHz
Kraftbedarf zur Messung	≤ 100 mN
Abmessungen	≤ 10 × 10 × 50 mm ³
REGELUNG	
Konfigurierbarkeit des Bedienfeldes	Darstellung von Tasten unterschiedlicher Größe durch Gruppierung mehrerer Elemente: Regelung auf gleiche Auslenkung und damit gleichförmige Bewegung (Positionsregelung mit Regeldifferenz ≤ 0,3 mm)
Kraft-Weg-Kennlinie	<ul style="list-style-type: none"> ○ individuelle Kraft-Weg-Kennlinie für jede Taste des Bedienfeldes darstellbar ○ bei Tasten gruppiert aus mehreren Elementen: haptischer Eindruck unabhängig von Anzahl der gleichzeitig gedrückten Elemente ○ Differenz zur eingestellten Soll-Kennlinie ≤ 200 mN
Regelfrequenz	≥ 2 kHz [8][88]

7 Aktorentwurf

Beginnend mit der Bewertung verschiedener aktorischer Wirkprinzipien wird in diesem Kapitel der Entwurf der Aktoren für den Anwendungsfall HapKeys beschrieben. Der prinzipielle Aufbau wird durch analytische Betrachtungen und numerische Simulationen unter Berücksichtigung der Randbedingungen zu einer realen Konstruktion detailliert. Abschließend wird die erreichte Leistungsfähigkeit der Aktoren untersucht.

7.1 Bewertung möglicher Aktorprinzipien

Vor der Bewertung verschiedener Aktorprinzipien bezüglich ihrer Eignung für das System HapKeys, werden die relevanten Anforderungen für den Entwurf der Aktorik in Tabelle 7.1 nochmals zusammengefasst:

Tabelle 7.1: Zusammenstellung der wichtigsten Anforderungen für den Aktorentwurf.

AKTORIK	
Freiheitsgrade	1 (Linearbewegung)
Abmessungen	$\leq 10 \times 10 \times 50 \text{ mm}^3$
Maximalkraft	$\geq 1,5 \text{ N}$
Dauerbetrieb bei Maximalkraft	$\geq 1 \text{ s}$
Auflösung der Kraftausgabe	$\leq 10 \text{ mN}$
Eigenschaften der Kraftausgabe	<ul style="list-style-type: none">o möglichst unabhängig von Auslenkungo möglichst linear zu Steuergröße
Stellweg	5 mm
max. Stellgeschwindigkeit	$\geq 200 \text{ mm/s}$
Mechanik	rücktreibbare Anordnung, geringe bewegte Masse, geringe Reibung [5][51][64][88]
Fertigung	feinwerktechnisch realisierbar

Das grundlegende Kriterium zur Beurteilung der Aktorprinzipien ist die Bereitstellung der geforderten Maximalkraft bei den gegebenen geometrischen Abmessungen. Betrachtet man die Maximalkraft von 1,5 N und den Stellweg von 5 mm, so ergibt sich eine notwendige Energiedichte von:

$$w = \frac{F \cdot s}{V} = \frac{1,5 \text{ N} \cdot 5 \text{ mm}}{10 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm}} = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \quad (7.1)$$

Die nachfolgend aufgeführten Aktorprinzipien erreichen nach [45][75][84] die genannte Energiedichte und weisen die für den Anwendungsfall notwendigen dynamischen Eigenschaften auf. Hydraulische, pneumatische, thermische und chemische Aktoren scheiden aufgrund zu geringer dynamischer Qualitäten oder mangelhaften Regelungsverhaltens aus. Betrachtet werden nur Antriebe, die direkt ohne Getriebe eine Linearbewegung ausführen und eine rüctreibbare Struktur aufweisen. Bei der vergleichenden Darstellung der Aktoren sind jeweils die **typischen Kräfte und Stellwege bei Ausführungen für kleine und mittlere Stellleistungen** aufgeführt.

Elektromagnetische Aktoren

Die Kraftwirkung beruht auf dem Bestreben einer Magnetkrisanordnung zur Minimierung seines magnetischen Widerstandes [50].

Typische Bauform	Hubmagnet
Typische Maximalkräfte	2 - 100 N [42]
Typischer Maximalstellweg	20 mm [42]
Nachteile	○ Kraft stark abhängig von Auslenkung (z.T. konstruktiv kompensierbar [50])

Elektrodynamische Aktoren

Auf die bewegten Ladungsträger eines stromdurchflossenen Leiters wirkt in einem magnetischen Feld die LORENTZ-Kraft.

Typische Bauform	Tauchspule, Voice-Coil Aktor
Typische Maximalkräfte	1 - 15 N
Typischer Maximalstellweg	20 mm
Vorteile	○ Kraft proportional zu Spulenstrom ○ Kraft unabhängig von Auslenkung ○ Bidirektionale Kraftausgabe ohne Vorspannung oder antagonistische Anordnung

Piezoelektrische Aktoren

Das Anlegen einer elektrischen Feldstärke führt in ausgewählten anisotrop-polarisierten Werkstoffen zu einer Deformation oder Kraftwirkung [68].

Typische Bauform	Piezo-Stapelaktor, Biegewandler (Piezokeramik)
Typische Maximalkräfte	20 - 5000 N [42]
Typischer Maximalstellweg	< 1 mm [42]
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ○ sehr große Kräfte
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ○ große Stellwege nur mit Getriebe realisierbar ○ Hystereseverhalten [68]

Elektrostatische Aktoren

Die Anziehungskraft zwischen unterschiedlichen Ladungen ist Grundlage dieses Aktorprinzips. *Klassische elektrostatische Aktoren* weisen zwischen den Elektroden einen Luftspalt auf. Sie werden fast ausschließlich in mikrotechnischen Systemen als Kamm- oder Wanderkeilanordnung verwendet, da aufgrund des *PASCHEN-Effektes* große Energiedichten erst ab Luftspatllängen kleiner $2 \mu\text{m}$ erreichbar sind [75].

Bei *elektrostatischen Aktoren mit elastischem Dielektrikum* (z.B. Polymeraktoren) führt das dielektrische Material zwischen den nachgiebigen Elektroden beim Anlegen einer elektrischen Spannung eine räumliche Verformung aus [84]. Diese Variation des elektrostatischen Prinzips bietet neue Möglichkeiten wie das Stapeln und Aufrollen von Aktorschichten [46][59]. Die folgenden Eigenschaft beziehen sich auf solche Anordnungen.

Typische Bauform	Gestapelte oder gerollte Anordnung (Silikon)
Typische Maximalkräfte	1 - 2,5 N [59]
Typischer Maximalstellweg	6 mm [59]
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ○ Miniaturisierungspotenzial ○ Potenzial zur Herstellung im Batch-Prozess
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ○ hohe Betriebsspannung (>100 V) ○ Herstellungstechnologie noch in Entwicklung

Die Entscheidung bezüglich der Aktorik fällt auf das elektrodynamische Wirkprinzip aufgrund der deutlichen Vorteile für diesen Anwendungsfall. Es zeichnet sich durch Kräfte und Stellwege im geforderten Bereich, die Unabhängigkeit der Kraft von der Auslenkung, die Linearität zwischen Kraft und Spulenstrom und

durch die Realisierbarkeit mit klassischer Feinwerktechnik aus. Für eine spätere Weiterentwicklung und Miniaturisierung des Systems bieten elektrostatische Antriebe interessante Ansätze.

7.2 Prinzipielle Aktorstruktur

Elektrodynamische Aktoren setzen sich generell aus den folgenden Bestandteilen zusammen: Spule, Permanentmagnet (alternativ: Erregerspule) und Flussführung. Letztere ist meist in mehrere Komponenten aufgeteilt (z.B. Polschuhe und Rückschluss). Durch unterschiedliche Kombinationen dieser Grundelemente lässt sich ein umfangreiches Lösungsfeld für die Aktorstruktur aufstellen. In Abb. 7.1 sind exemplarisch drei mögliche Anordnungen mit konstruktiven Umsetzungsbeispielen skizziert [19].

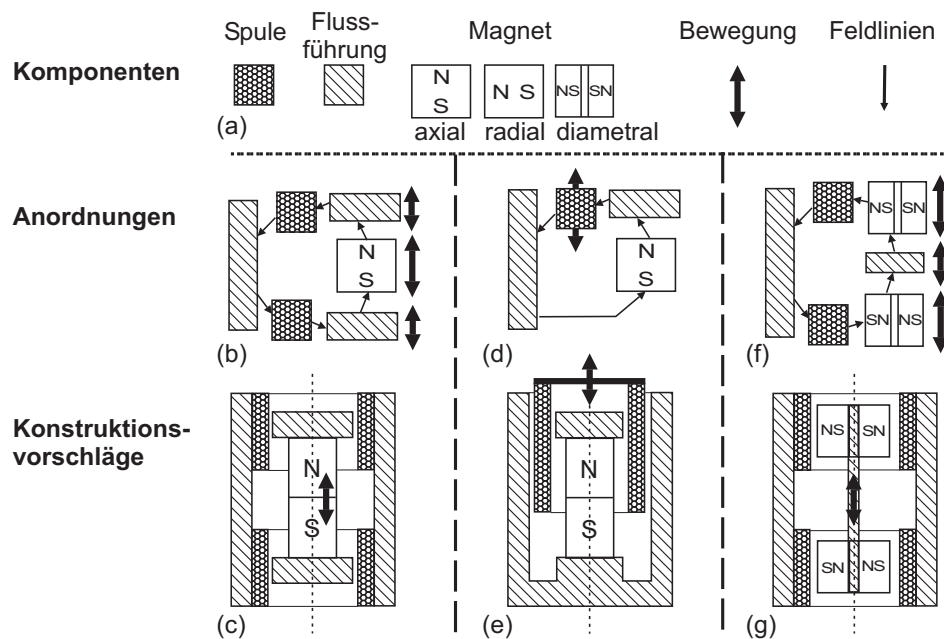


Abbildung 7.1: Auszug des Lösungsfeldes für elektrodynamische Aktoren.

Die Hauptkomponenten eines elektrodynamischen Aktors (a) ermöglichen unterschiedliche Strukturen. Skizziert sind einige exemplarische Anordnungen (b)(d)(f) und dazugehörige Konstruktionsvorschläge (c)(e)(g).

Variiert man die Anordnung der Komponenten, die Magnetisierungsrichtung des Permanentmagneten, sowie die Anzahl der Spulen und Flussführungselemente, so sind über 100 Alternativen denkbar. Für den Anwendungsfall sinnvolle Möglichkeiten werden in [52] diskutiert und u.a. aufgrund folgender Überlegungen beurteilt:

- Spulen im Stator vermeiden das Problem von bewegten elektrischen Verbindungen und verbessern die Wärmeabfuhr durch direkten Kontakt zu Rückschlussteilen [94].
- Große Querschnittsflächen der flussführenden Komponenten verhindern eine magnetische Sättigung des Materials.
- Magnete aus Standard-Lieferprogrammen (Geometrie, Magnetisierung) ermöglichen Kostenersparnisse.
- Geringe Komplexität der Spulengeometrie reduziert den Fertigungsaufwand.

Die Anordnung nach Abb. 7.1c mit einem bewegten Magneten und zwei statischen Spulen vereint die genannten Vorteile und wird zur Realisierung ausgewählt. Die detaillierte Gestaltung der Aktorkomponenten wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

7.3 Aktordimensionierung

Bei der Festlegung der Materialien und Geometrie des Aktors ist die maximale Kraftausgabe bei vorgegebenem Bauvolumen als Optimierungsziel anzusehen. Die bei elektrodynamischen Aktoren wirkende LORENTZ-Kraft berechnet sich zu [15]:

$$\vec{F} = i \cdot \vec{l} \times \vec{B} \quad (7.2)$$

Die Stromstärke i fließt durch den Leiter mit der Länge \vec{l} , der sich im Magnetfeld mit der Flussdichte \vec{B} befindet. In der gewählten Anordnung sind die Vektoren \vec{B} (radial) und \vec{l} (tangential) näherungsweise orthogonal zueinander und verursachen eine axiale Kraft mit dem Betrag:

$$F = B \cdot i \cdot l \quad (7.3)$$

Alle drei die Kraft bestimmenden Faktoren sind von der Gestaltung des Aktors abhängig. Zur Verdeutlichung der nachfolgenden Betrachtungen und Berechnungen ist in Abb. 7.2 die Aktorgeometrie mit allen relevanten Größen dargestellt. Die angegebenen Zahlenwerte greifen dabei auf die Ergebnisse der nächsten Abschnitte vor.

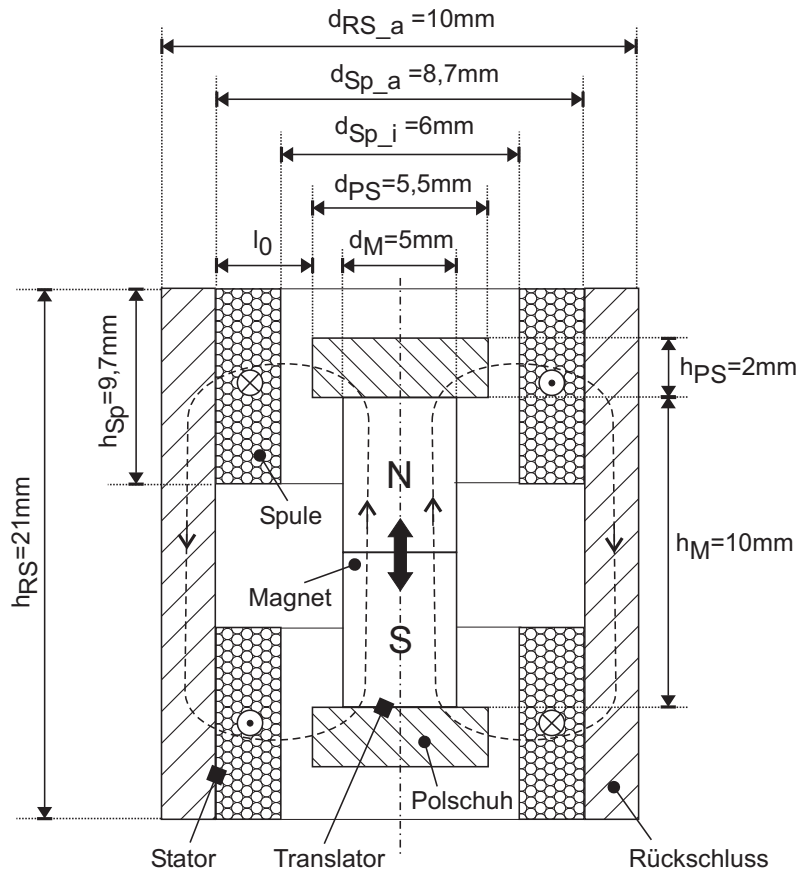


Abbildung 7.2: Geometrie des rotationssymmetrischen Aktors.

7.3.1 Magnetische Flussdichte im Luftspalt

Die Flussdichte im Luftspalt B_0 wird durch den Permanentmagneten erzeugt. Zur Bestimmung von B_0 erfolgt die Magnetkreisberechnung daher im Zustand stromloser Aktorspulen. Das magnetische Verhalten der Kupferspulen ist in diesem Fall dem von Luft gleichzusetzen. Der Magnetkreis wird mit den Formeln der Magnetostatik beschrieben, da die magnetischen Größen bei ruhendem Dauermagneten keine zeitliche Abhängigkeit aufweisen. Der **magnetische Fluss** ϕ_m ist definiert als:

$$\phi_m = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (7.4)$$

Idealisierend wird davon ausgegangen, dass der magnetische Fluss vollständig innerhalb des Magnetkreises geführt wird und die Querschnittsflächen A der einzelnen Kreiskomponenten orthogonal durchdringt. Unter diesen Voraussetzungen

nimmt der Fluss im Permanentmagneten (Index M), in den Polschuhen (Index PS) und im Rückschluss (Index RS) aufgrund der Quellenfreiheit des magnetischen Feldes die gleiche Größe an. Im Luftspalt (Index 0) muss jedoch mit einer Aufweitung der Magnetfeldlinien gerechnet werden, was durch den Streuungsfaktor S (< 1) berücksichtigt wird [65]. Es gilt näherungsweise:

$$\phi_m = B_M \cdot A_M = B_{RS} \cdot A_{RS} = B_{PS} \cdot A_{PS} = B_0 \cdot A_0 \cdot S^{-1} \quad (7.5)$$

Die **magnetische Feldstärke** \vec{H} wird durch das Durchflutungsgesetz beschrieben:

$$\Theta = \oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (7.6)$$

Befinden sich keine stromdurchflossenen Leiter innerhalb der vom Wegintegral umschlossenen Flächen, so ist die Durchflutung Θ gleich null. Bildet man das Integral über die Bestandteile des Magnetkreises unter der Annahme von konstanten magnetischen Feldstärken innerhalb der einzelnen Komponenten, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Theta &= \oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum_{i=1}^n H_i \cdot l_i \\ &= H_M \cdot h_M + 2 \cdot H_0 \cdot l_0 + H_{RS} \cdot l_{RS} + 2 \cdot H_{PS} \cdot l_{PS} = 0 \end{aligned} \quad (7.7)$$

Die Verbindung zwischen den Größen \vec{B} und \vec{H} wird mit der **Materialbeziehung** hergestellt:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \quad (7.8)$$

Die relative Permeabilitätszahl μ_r ist für das Material des Permanentmagneten und der Flussführung keine Konstante. Abb. 7.3 zeigt die H-B-Kennlinie für das weichmagnetische Material PERMENORM [Fa. Vaccumschmelze Hanau], das für die **Flussleitstücke** (Polschuhe, Rückschluss) verwendet wird. Die Sättigungsfussdichte liegt nach Herstellerangaben bei 1,55 T.

Bei der überschlägigen Berechnung des Magnetkreises kann der Einfluss der flussführenden Elemente jedoch vernachlässigt werden, wenn deren magnetischer Widerstand R_m sehr viel kleiner als der des Luftspaltes ist [65].

$$R_m = \frac{l}{\mu_r \cdot A} \quad (7.9)$$

In der gewählten Geometrie wird die Flussführung ca. die 30fache Länge des Luftspaltes bei ähnlicher Querschnittsfläche aufweisen. Um den magnetischen Widerstand kleiner als 1 % des Luftspaltwiderstandes zu halten, ist eine relative Permeabilität μ_r größer 3000 notwendig. PERMENORM bietet nach Abb. 7.3 bei einer Flussdichte von 1,2 T (maximale Flussdichte des verwendeten Permanentmagneten) noch ein μ_r von über 9000 (s. Gl. 7.10). Dieser Wert konnte durch Messungen des Herstellers an den realen Werkstücken bestätigt werden. Wird demnach in den weichmagnetischen Komponenten eine Flussdichte von 1,2 T nicht überschritten, so können sie bei der Magnetkreisberechnung vernachlässigt werden.

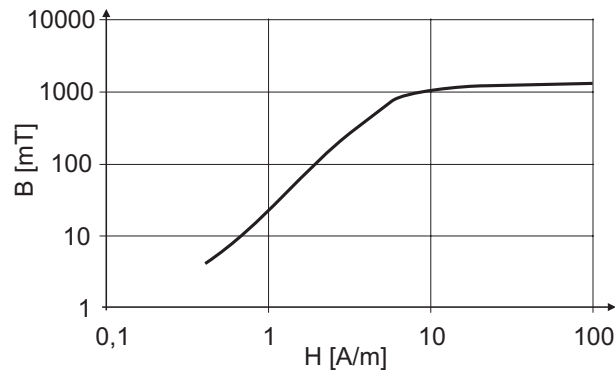


Abbildung 7.3: Magnetisierungskennlinie des weichmagnetischen Werkstoffes PERMENORM 5000V5 der Flussleitstücke des Magnetkreises (aus [109]).

$$\mu_r(B) = \frac{B}{\mu_0 \cdot H(B)} \quad \rightarrow \mu_r(1,2 \text{ T}) \approx \frac{1,2 \text{ T}}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 100 \frac{\text{A}}{\text{m}}} = 9547 \quad (7.10)$$

Der **Permanentmagnet** aus Neodym-Eisen-Bor [Fa. s.a.m. Products] bietet eine Remanenzflussdichte von ca. 1,2 T und weist im Arbeitsbereich ein lineares Verhalten zwischen B_M und H_M nach Abb. 7.4 und Gl. 7.11 auf [92]. Der Betriebspunkt auf der Entmagnetisierungskurve stellt sich in Abhängigkeit der Magnetkreisgeometrie ein.

$$B_M = f(H_M) = B_{M,\max} + a_M \cdot H_M = 1,2 \text{ T} + \frac{1,2 \text{ T}}{915 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}} \cdot H_M \quad (7.11)$$

Die Flussdichte im Luftspalt kann mit den vier im Folgenden nochmals zusammengestellten Gleichungen berechnet werden. In Gl. 7.7 wurde die Vernachlässigung der magnetischen Widerstände der Flussleitstücke miteinbezogen.

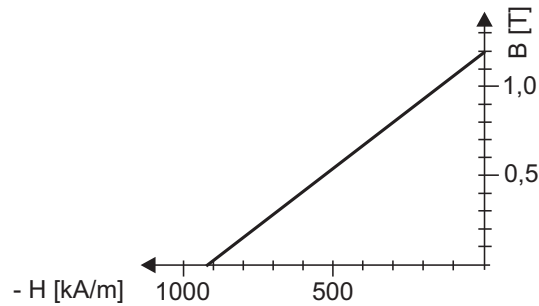


Abbildung 7.4: Entmagnetisierungskennlinie des Dauermagneten aus Neodym-Eisen-Bor des Typs SAM435C (aus [92]).

$$B_0 \cdot A_0 \cdot S^{-1} = B_M \cdot A_M \quad (7.5)$$

$$0 = H_M \cdot h_M + 2 \cdot H_0 \cdot l_0 \quad (7.7)$$

$$B_0 = \mu_0 \cdot H_0 \quad (7.8)$$

$$B_M = B_{M,\max} + a_M \cdot H_M \quad (7.11)$$

Setzt man Gl. 7.8 in Gl. 7.7 ein, so ergibt sich:

$$H_M = -\frac{2}{\mu_0} \cdot \frac{l_0}{h_M} \cdot B_0 \quad (7.12)$$

Aus der Entmagnetisierungskennlinie (Gl. 7.11) kann der Arbeitspunkt des Permanentmagneten berechnet werden:

$$B_M = B_{M,\max} - a_M \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \frac{l_0}{h_M} \cdot B_0 \quad (7.13)$$

Eingesetzt in Gl. 7.5 entsteht die Beziehung:

$$B_0 \cdot A_0 \cdot S^{-1} = \left(B_{M,\max} - a_M \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \frac{l_0}{h_M} \cdot B_0 \right) \cdot A_M \quad (7.14)$$

$$B_0 = B_{M,\max} \cdot \left(\frac{A_0}{S \cdot A_M} + a_M \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \frac{l_0}{h_M} \right)^{-1}$$

7.3.2 Thermisches Verhalten der Spulen

Die Aktorkraft ist nicht nur proportional zur Flussdichte im Luftspalt, sondern auch zur Stromdichte in der darin befindlichen Spule. Begrenzt wird der maximal

zulässige Spulenstrom durch die thermische Zerstörung des Kupferlackdrahtes bei ca. 120 °C [80]. Da der Wirkungsgrad elektrodynamischer Antriebe nur wenige Prozent beträgt, wird näherungsweise die gesamte zugeführte elektrische Energie in Wärme umgesetzt [81]. Dies führt zu einer Temperaturerhöhung und zu thermischen Ausgleichsvorgängen mit der Umgebung [50][81]:

Wärmeleitung: Wärmeübertragung zwischen zwei zueinander in Ruhe befindlichen Körpern bzw. Medien unterschiedlicher Temperatur.

$$\text{Wärmeleitungswiderstand: } R_{\tau,L} = l \cdot (\lambda \cdot A)^{-1} \quad (7.15)$$

mit λ : spezifisches Wärmeleitvermögen

Konvektion: Wärmeübertragung zwischen zwei zueinander bewegten Körpern bzw. Medien unterschiedlicher Temperatur. Am Übergang von erwärmten Festkörpern zu gasförmigen Medien erfolgt Konvektion durch das Vorbeiströmen des Gases.

$$\text{Wärmeübergangswiderstand: } R_{\tau,\ddot{u}} = (\alpha \cdot A_k)^{-1} \quad (7.16)$$

mit α : Wärmeübergangszahl und A_k : Kopplungsfläche

Wärmestrahlung: Wärmeübertragung zwischen zwei Körpern unterschiedlicher Temperatur durch Energieabgabe in Form von elektromagnetischen Wellen. Beim Betrieb elektrodynamischer Antriebe kann die Wärmestrahlung erfahrungsgemäß vernachlässigt werden [81].

Temperaturerhöhung: Nicht abgegebene Wärmeenergie wird im Körper gespeichert und führt zu einer Temperaturerhöhung.

$$\text{Wärmekapazität: } C_{\tau} = c \cdot m \quad (7.17)$$

mit c : spezifische Wärmekapazität

Die oben eingeführten thermischen Widerstände und Kapazitäten deuten auf eine elektrothermische Analogiebetrachtung hin. Unter Verwendung der in Tabelle 7.2 aufgeführten Beziehungen wird ein thermisches Ersatzschaltbild (ESB) nach Abb. 7.5 aufgestellt [52]. Es ist ein Akteur im Schnitt von oben gezeigt. Da die Akteure im engen Verbund zueinander aufgebaut werden, grenzen die einzelnen Akteure nicht an die Umgebungsluft, sondern an benachbarte Akteure (A-D). Bei der Entwicklung des ESB wird die Wärmeübertragung von der Spule zum

Tabelle 7.2: Gegenüberstellung der elektrischen und thermischen Größen für Analogiebetraachtungen.

ELEKTRISCHE GRÖSSE	THERMISCHE GRÖSSE
Elektrischer Strom i [A]	Wärmestrom ϕ_τ [W]
Elektrische Spannung u [V]	Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ [K]
Elektrischer Widerstand R [Ω]	Thermischer Widerstand R_τ [$\frac{\text{K}}{\text{W}}$]
Elektrische Kapazität C [F]	Thermische Kapazität C_τ [$\frac{\text{J}}{\text{K}}$]

Luftspalt nicht als Übergangs- sondern als Leitungswiderstand repräsentiert, da aufgrund der Abgeschlossenheit des geringen Luftvolumens innerhalb des Aktors kaum Strömung durch aufsteigende und absinkende Luft entsteht. Das entstandene ESB (Abb. 7.5c) kann unter folgenden Annahmen erheblich vereinfacht werden (Abb. 7.5d):

- In Voruntersuchungen wurden die Temperaturerhöhungen $\Delta\vartheta_{\text{Sp}}$ einer bestromten Spule einmal im freien Luftraum und einmal montiert in einem Rückschluss gemessen und miteinander verglichen. Der Endwert des Temperaturanstieges war in Luft um ca. den Faktor 7 größer als im Rückschluss. Der Wärmestrom fließt also hauptsächlich über den Leitungswiderstand zum Rückschluss $R_{\tau,L \text{ Sp} \rightarrow \text{RS}}$ ab, so dass im ESB der Wärmewiderstand zur Luft $R_{\tau,L \text{ Sp} \rightarrow \text{Lu}}$ und die nachfolgenden Komponenten vernachlässigt werden können.
- Die Wärmekapazität des Eisenrückschlusses $C_{\tau,\text{RS}}$ ist so groß, dass sie für kleine und mittlere Betriebszeiten durch einen Kurzschluss ersetzt werden kann.
- Werden die Rückschlüsse der Aktoren als sehr große Wärmekapazitäten interpretiert, so finden keine nennenswerten Temperaturanstiege gegenüber der Umgebung statt. Die Rückschlüsse aller Aktoren befinden sich im Bereich der Raumtemperatur. Somit fallen die Wärmeübergänge zwischen den einzelnen Aktoren $R_{\tau,L \text{ RS} \rightarrow \text{RS}}$ weg.

Das resultierende ESB betrachtend entspricht der Temperaturanstieg der Spule dem Aufladevorgang eines RC-Gliedes:

$$\Delta\vartheta_{\text{Sp}}(t) = \phi_\tau \cdot R_{\tau,L \text{ Sp} \rightarrow \text{RS}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{\tau,L \text{ Sp} \rightarrow \text{RS}} \cdot C_{\tau,\text{Sp}}}}\right) \quad (7.18)$$

Mit Messreihen wird die Gültigkeit des aufgestellten ESB überprüft. In einem Versuchsmuster, ähnlich dem endgültigen Prototypen, wird eine Spule von einem

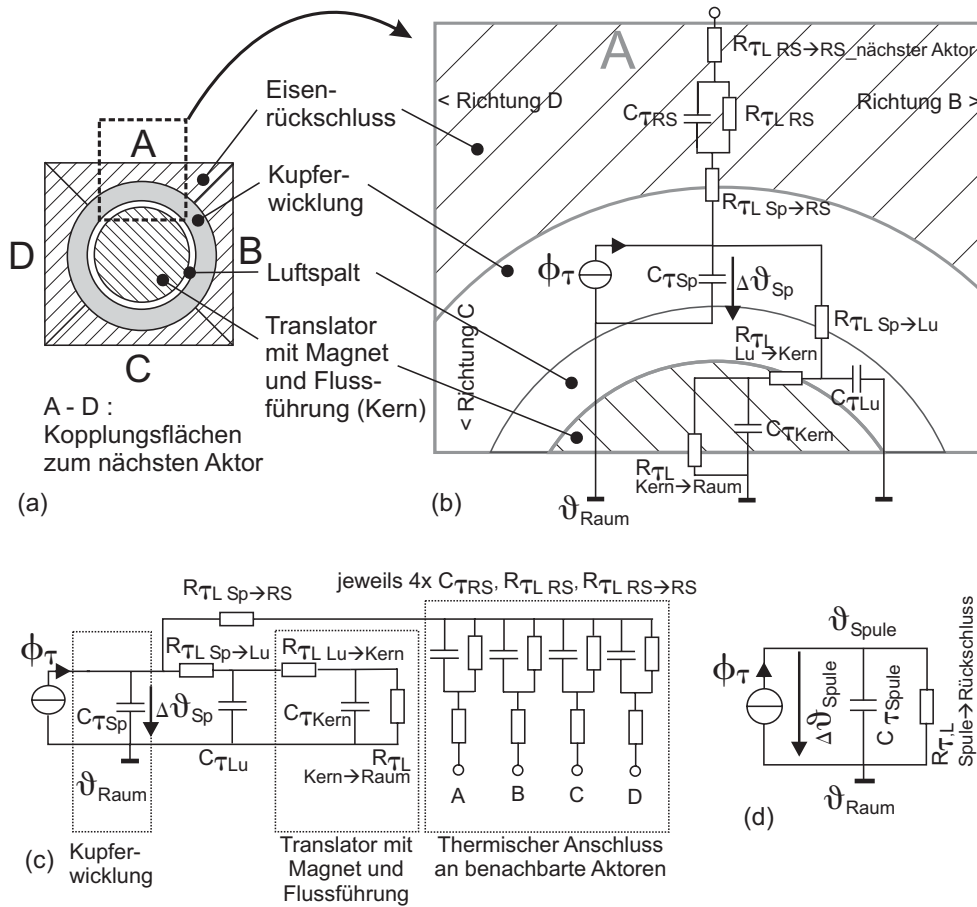


Abbildung 7.5: Ableitung des thermischen Ersatzschaltbildes.

Geometrie der Aktoranordnung im Schnitt von oben (a): Der Translator ist vom Luftspalt, der Spule und dem Eisenrückschluss umgeben. In der Vergrößerung (b) sind die Elemente des elektrothermischen Ersatzschaltbildes eingezeichnet. Das umstrukturierte ESB (c) kann unter bestimmten Annahmen stark vereinfacht werden (d).

Rückschluss umgeben und unterschiedlich stark bestromt. Aufgrund der Änderung des ohmschen Widerstandes der Spule wird auf deren Temperatur geschlossen. Abb. 7.6 zeigt die Ergebnisse der zu einem späteren Zeitpunkt wiederholten Messungen am realisierten und vollständig montierten Aktor-Array mit eingesetzten Translatoren. Die Messkurven weisen für den Messzeitraum von zwei Minuten das mit Hilfe des ESB vorausgesagte Aufladeverhalten eines RC-Gliedes (s. Gl. 7.18) auf. Mit der Steigung und dem Endwert des Temperaturverlaufs sowie den Charakteristika der Spule (s. Tabelle 7.3, Vorgriff auf Abschn. 7.3.3) können die Elemente des thermischen ESB nach Gl. 7.18 quantifiziert werden. Die folgenden Berechnungen sind bei Bestromung mit 0,5 A durchgeführt, liefern aber auch bei anderen Stromstärken vergleichbare Ergebnisse:

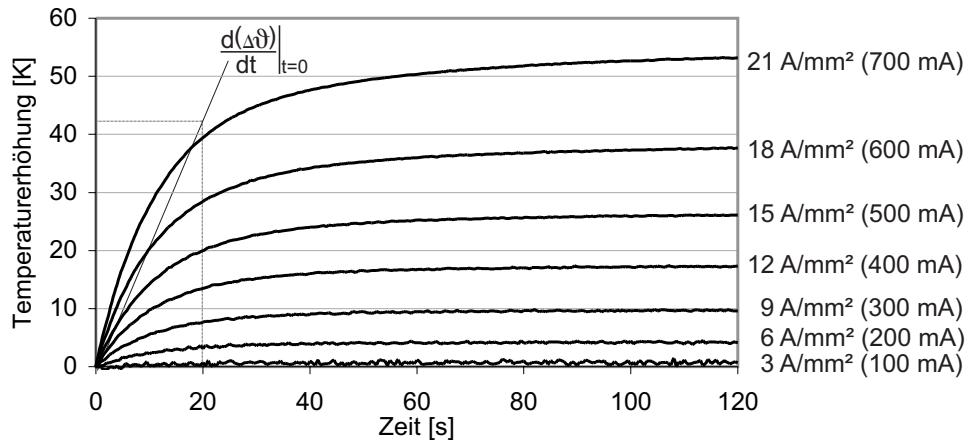


Abbildung 7.6: Temperaturerhöhung der im Magnetkreis eingebauten Spule (s. Tabelle 7.3) bei unterschiedlichen Stromstärken bzw. daraus folgenden Stromdichten.

Tabelle 7.3: Eigenschaften der verwendeten körperlosen Spulen [Fa. Pikatron].

Innendurchmesser	$d_{Sp_i} = 6 \text{ mm}$
Außendurchmesser	$d_{Sp_a} = 8,7 \text{ mm}$
Höhe	$h_{Sp} = 9,7 \text{ mm}$
Durchmesser Kupferlackdraht	$d_{Dr} = 0,16 \text{ mm}$
Windungszahl	$k = 384$
Ohmscher Widerstand	$R_{Sp} = 8,3 \Omega$

$$\phi_{\tau} \approx P_{el} = R_{Sp} \cdot i^2 \approx 2 \text{ W} \quad \text{für } i = 0,5 \text{ A} \quad (7.19)$$

$$R_{\tau,L Sp \rightarrow RS} = \frac{\Delta \vartheta_{Sp}(t)}{\phi_{\tau}} \Big|_{t \rightarrow \infty} = 13 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (7.20)$$

$$\text{mit } \Delta \vartheta_{Sp} \approx 26 \text{ K} \quad \text{für } i = 0,5 \text{ A} \text{ (siehe Abb. 7.6)}$$

$$C_{\tau,Sp} = \frac{\phi_{\tau}}{\frac{d(\Delta \vartheta_{Sp}(t))}{dt} \Big|_{t=0}} = 0,93 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (7.21)$$

$$\text{mit } d(\Delta \vartheta_{Sp})/dt|_{t=0} \approx 43 \text{ K}/20 \text{ s} \quad \text{für } i = 0,5 \text{ A} \text{ (siehe Abb. 7.6)}$$

Zur Plausibilitätsprüfung wird die spezifische Wärmekapazität der Spule ($m = 1,6 \text{ g}$) zu $c = 581 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ berechnet und mit dem Wert für reines Kupfer von $383 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ [62] verglichen. Erwartungsgemäß wird durch den Einfluss der Lackisolierung und der Lufträume zwischen den Wicklungen die Wärmekapazität vergrößert. Der Wärmewiderstand $R_{\tau,L Sp \rightarrow RS}$ liegt mit $13 \frac{\text{K}}{\text{W}}$ deutlich über den Literaturangaben für einen Wärmeübergang auf gleichgroßer Fläche zwischen zwei Metallen

($2,6 \frac{\text{K}}{\text{W}}$) oder zwischen Metall und einer Eloxanschicht ($5,2 \frac{\text{K}}{\text{W}}$) [80]. Dennoch liegen die Werte in der gleichen Größenordnung und ein schlechterer Wärmeübergang ist durch die Lackschicht und die unebenen Spulenoberfläche zu erklären. Insgesamt können die Überlegungen und Vereinfachungen bei der Aufstellung des ESB, sowie dessen Eignung zur Beschreibung des thermischen Verhaltens der Aktorspulen bestätigt werden.

Keine Aussage liefert das ESB über die Wahl eines geeigneten Drahtdurchmessers für die Spulenwicklungen. Kraft- und temperaturbestimmend ist einzig die Stromdichte in der Spule, die jedoch mit unterschiedlichen Kombinationen aus Drahtdurchmesser und Wicklungszahl erreicht werden kann. Als Richtlinie gilt, dass die zum Betrieb notwendigen Ströme und Spannungen in üblichen Bereichen für Treiberstufen gehalten werden sollen. Darüber hinaus ist zu dünner Draht aufgrund der erschwerten mechanischen Handhabung (z.B. beim Kontaktieren) zu vermeiden. Einen guten Kompromiss stellt ein Durchmesser von $d_{\text{Dr}} = 0,16 \text{ mm}$ dar, welcher auch für die Temperaturmessreihen in Abb. 7.6 verwendet wurde.

Die thermische Grenzbelastung für Spulen mit diesem Drahtdurchmesser wird in einer abschließenden Messung untersucht. Im Anwendungsfall HapKeys wird diese Belastung nicht dauerhaft, sondern nur kurzzeitig vorliegen. Daher werden die montierten Spulen zyklisch für 1 s mit 1 A ($j = 30 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$) gefolgt von einer Erholungsphase von 3 s, bzw. 1 s mit 50 mA bestromt. Die Ergebnisse in Abb. 7.7 zeigen, dass kurzzeitig bei einem gewählten Maximalstrom von 1 A die thermische Belastbarkeit der Spulen mit einem Drahtdurchmesser von 0,16 mm noch nicht überschritten wird.

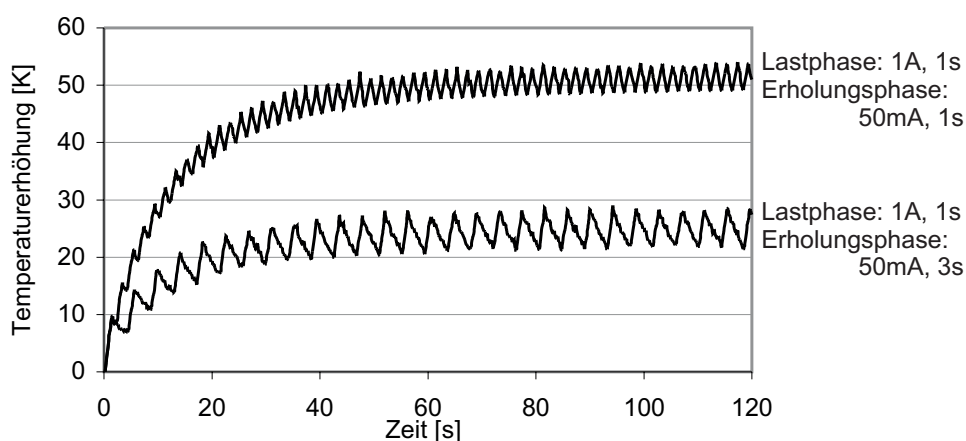


Abbildung 7.7: Temperaturerhöhung der im Magnetkreis eingebauten Spule bei zyklischer Bestromung ($1 \text{ A} \hat{=} 30 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$) mit anschließender Erholungsphase (50 mA) bei unterschiedlichen Zykluszeiten.

7.3.3 Kraftwirkung auf stromdurchflossene Spulen im Luftspalt

Unter Verwendung der Ergebnisse der letzten beiden Abschnitte werden im nächsten Schritt die geometrischen Abmessungen der einzelnen Aktorkomponenten mit dem Ziel festgelegt, eine maximale Kraftausgabe bei vorgegebenem Bauraum zu erreichen. Aufgrund einiger Rahmenbedingungen ist die Dimensionierung jedoch eingeschränkt:

Die weichmagnetischen Flussleitstücke dürfen nicht in die magnetische Sättigung geraten, was nach Abschnitt 7.3.1 bei einer maximalen Flussdichte von 1,2 T garantiert ist. Diese wird nicht überstiegen, wenn die Querschnittsfläche groß genug zur Aufnahme des magnetischen Flusses des Dauermagneten $\phi_m = B_M \cdot A_M$ (Gl. 7.5) ausgelegt ist. Für eine Berechnung mit Sicherheitsreserven wird als B_M die Remanenzflussdichte des Magneten von 1,2 T angesetzt, auch wenn sich der reale Arbeitspunkt darunter einstellen wird. Schlussfolgernd kann eine Sättigung vermieden werden, wenn die Querschnittsfläche der Flussleitstücke mindestens so groß wie die des Magneten ist:

$$A_M \stackrel{!}{=} A_{RS} \quad \rightarrow \quad \frac{\pi}{4} \cdot d_M^2 = \frac{\pi}{4} (d_{RS_a}^2 - d_{Sp_a}^2) \quad [d_{Sp_a} \hat{=} d_{RS_i}] \quad (7.22)$$

$$d_{Sp_a} = \sqrt{d_{RS_a}^2 - d_M^2} = f(d_M)$$

Der Außendurchmesser des Rückschlusses d_{RS_a} ist aufgrund der geometrischen Anforderungen (s. Kap. 6) auf 10 mm vorgegeben. Weitere Überlegungen führen zu folgenden Festlegungen:

- Der Polschuhdurchmesser wird möglichst klein gewählt, um den Wicklungsraum für die Spulen zu maximieren. Zur Montage muss der Magnet jedoch in den Polschuh eingelassen werden (s. Abschn. 7.4). Konstruktiv ist daher der Durchmesser des Polschuhs um mindestens $\Delta d = 0,5$ mm größer zu wählen als der Magnetdurchmesser:

$$d_{PS} = d_M + \Delta d = f(d_M) \quad (7.23)$$

- Der Innendurchmesser der Spule muss um mindestens $\Delta d = 0,5$ mm größer als der Durchmesser der Polschuhe sein, um eine Berührung auszuschließen und Fertigungstoleranzen auszugleichen.

$$d_{Sp_i} = d_{PS} + \Delta d = d_M + 2 \cdot \Delta d = f(d_M) \quad (7.24)$$

Zur Berechnung der Aktorkraft ist weiterhin die Länge l des Leiters im Luftspalt notwendig. Sie hängt von der Wicklungszahl im Luftspalt k_0 und von der durchschnittlichen Länge einer Spulenwicklung $\overline{l_{Wi}}$ ab. Zusätzlichen Einfluss hat die Wickeldichte γ , die jedoch bei unverändertem Drahtdurchmesser als konstant angesehen wird und anhand einer Musterspule bestimmt wird zu:

$$\gamma = \frac{\text{Wicklungszahl}}{\text{Wickelquerschnittsfläche}} \approx 30 \text{ mm}^{-2} = \text{konst.} \quad (7.25)$$

Beachtet man, dass der Aktorentwurf zwei Spulen aufweist, so berechnet sich die Leiterlänge im Luftspalt zu:

$$\begin{aligned} l &= 2 \cdot k_0 \cdot \overline{l_{Wi}} = 2 \cdot A_{Sp,0} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot \overline{d_{Wi}} \\ &= 2 \cdot \frac{d_{Sp,a} - d_{Sp,i}}{2} \cdot h_{PS} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot \frac{d_{Sp,a} + d_{Sp,i}}{2} = f(d_M, h_{PS}) \end{aligned} \quad (7.26)$$

Unter Verwendung von Gl. 7.14 und Gl. 7.26 ergibt sich die Kraft des Aktors zu (s. Anhang A):

$$\begin{aligned} F &= B_0 \cdot i \cdot l \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot B_{M,\max} \cdot i \cdot \gamma \cdot \frac{G1}{G2 + \frac{G3}{h_M \cdot h_{PS}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{mit } G1 &= (d_{RS,a}^2 - d_M^2) - (d_M + 2 \cdot \Delta d)^2 = f(d_M) \\ G2 &= \frac{2}{S \cdot d_M^2} \cdot \left(\sqrt{d_{RS,a}^2 - d_M^2} + d_M + \Delta d \right) = f(d_M) \\ G3 &= \frac{a_M}{\mu_0} \cdot \left(\sqrt{d_{RS,a}^2 - d_M^2} - d_M - \Delta d \right) = f(d_M) \end{aligned} \quad (7.27)$$

Wie aus Gl. 7.27 hervorgeht, wächst die Kraft mit der Höhe des Magneten h_M und der Polschuhe h_{PS} an. Eine entsprechende Vergrößerung dieser Komponenten führt jedoch zu einer Zunahme des Bauraumes und macht längere Spulen notwendig. Diese weisen eine höhere Verlustleistung und damit eine geringere thermische Standfestigkeit auf. Die Magnethöhe wird aus konstruktiven Gründen auf $h_M = 10 \text{ mm}$ festgelegt, was auch einem Standardmaß des Herstellers entspricht. Die Polschuhe werden unter Berücksichtigung der magnetischen Sättigung mit einer Höhe von $h_{PS} = 2 \text{ mm}$ realisiert. Würde man beide Größen verdoppeln, so wüchse der Bauraum und die Translatormasse um etwa den Faktor 2, die erreichbare Kraft jedoch nur um ca. 7 % an.

Mit den genannten Festlegungen ist die Aktorkraft nur noch vom Magnetdurchmesser d_M abhängig. Die Kraftberechnung bei einem Maximalstrom von $i = 1 \text{ A}$ (s. Abschnitt 7.3.2) und einem Streufaktor S von 0,8 [65] liefert das in Abb. 7.8 dargestellte Ergebnis. Die Produktpalette des Magnetherstellers macht eine Abkehr vom Maximum bei 4,5 mm auf einen Magnetdurchmesser von 5 mm notwendig.

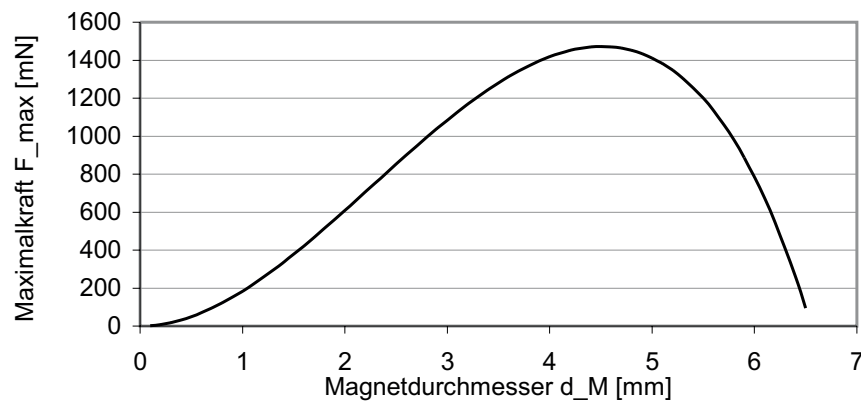


Abbildung 7.8: Analytisch bestimmte Maximalkraft des Aktors in Abhängigkeit des Magnetdurchmessers d_M .

Der nun vollständig dimensionierte Magnetkreis weist nach den analytischen Beziehungen eine Flussdichte im Luftspalt von $B_0 = 0,38 \text{ T}$ auf, während der Arbeitspunkt im Magnet sich auf $B_M = 1,08 \text{ T}$ einstellt. Die Maximalkraft berechnet sich bei einer Bestromung mit $i = 1 \text{ A}$ zu $F_{\max} = 1,4 \text{ N}$.

7.3.4 Analyse der Feldverläufe mit numerischer Simulation

Durch die analytische Betrachtung des Aktors konnte die Abhängigkeit der Kraft von den geometrischen Abmessungen erarbeitet werden. Für konstruktive Details ist jedoch der Einfluss einer Gestaltänderung auf den Feldverlauf interessant. Daher werden mit der Software FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS (FEMM) Simulationen durchgeführt. Es handelt sich um ein Freeware-Tool zur Lösung von Problemen der Magnetostatik an einfachen Geometrien [73]. Bei den Untersuchungen stehen nicht die quantitativen Werte im Vordergrund, sondern die qualitativen Feldverläufe. In Abb. 7.9 sind einige Simulationsergebnisse für die entwickelte Aktorgeometrie dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Flussdichte im Luftspalt mit ca. 0,22 T deutlich geringer als bei der analytischen Betrachtung ausfällt (0,38 T). Jedoch ist das Streufeld außerhalb der Polschuh-Höhe deutlich

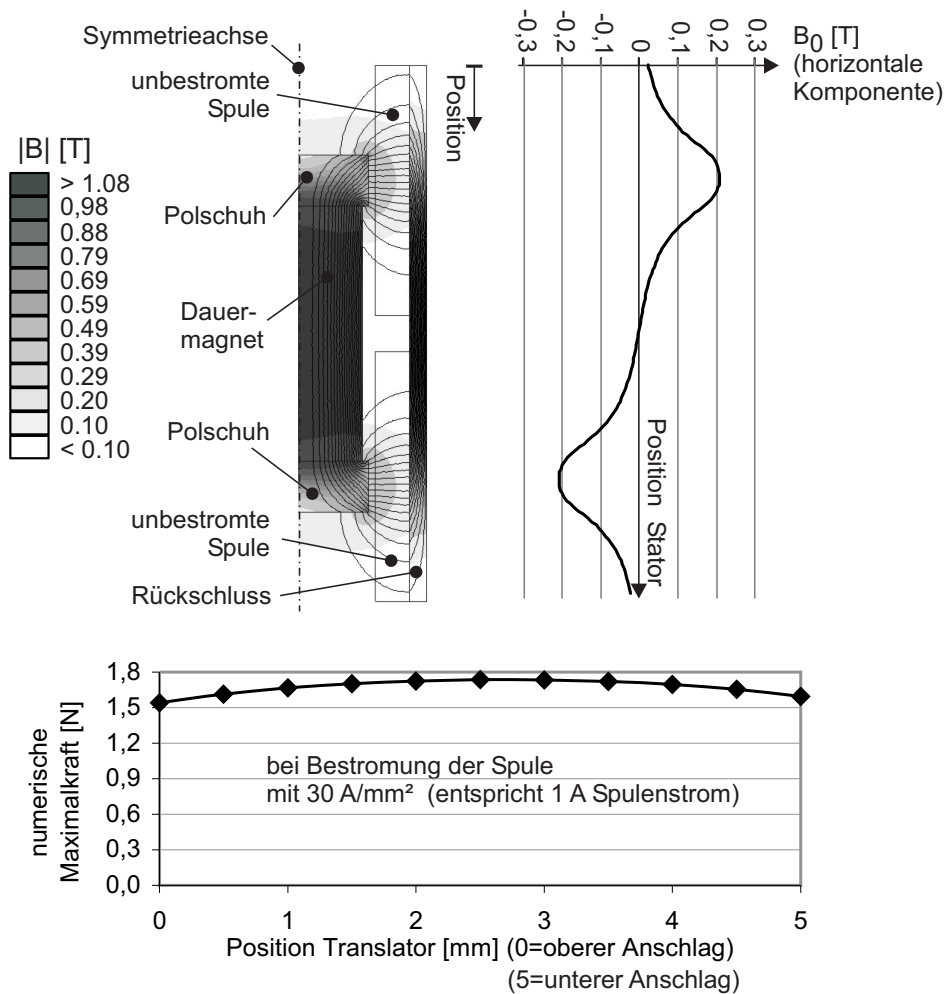


Abbildung 7.9: Ergebnisse der numerischen Simulation mit FEMM.

Dargestellt ist der rotationssymmetrische Feldverlauf (oben links), die Flussdichte B_0 im vertikalen Schnitt durch die stromlosen Spulen (oben rechts), sowie die numerisch berechnete Kraft auf den Translator in Abhängigkeit von dessen vertikaler Position bei einer Spulenstromdichte von $30 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ (unten).

ausgeprägt, so dass die numerisch berechnete Aktorkraft bei einer Stromdichte von $30 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ (entspricht einem Spulenstrom von 1 A) den analytischen Wert um ca. 20 % übertrifft. Die Abhängigkeit der Kraft von der Position des Translators ist ebenfalls durch das Streufeld begründet, das je nach Auslenkung die Spulen mehr oder weniger stark durchdringt.

Festzuhalten ist, dass die Werte der numerischen Simulation und der analytischen Betrachtung in der gleichen Größenordnung liegen. Damit sind zum einen die analytischen Überlegungen gestützt, zum anderen kann die Simulation mit

FEMM für qualitative Feldbetrachtungen herangezogen werden. Diese dienen der Ableitung von folgenden konstruktiven Details:

- Um Wechselwirkungen zwischen den matrixartig angeordneten Aktoren zu verhindern, müssen, wie in Abb. 7.10 ersichtlich, die einzelnen Rückschlüsse magnetisch getrennt werden.
- Abb. 7.11 zeigt die Notwendigkeit einer magnetisch nichtleitenden Achse zur Führung der Translatoren. Beim Einsatz von ferromagnetischem Material ist mit deutlich größeren Streuverlusten zu rechnen.

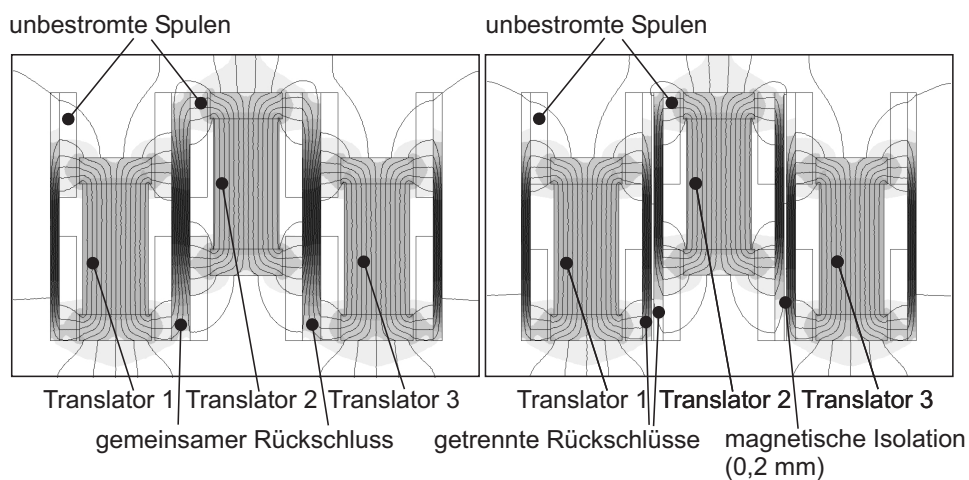


Abbildung 7.10: Feldverlauf von drei benachbarten Aktoren mit unterschiedlicher Translatorposition.

Ein gemeinsamer Rückschluss (links) führt zu Wechselwirkungen zwischen den Aktoren. Eine magnetische Isolierung (rechts) verhindert dies.

7.4 Aktorkonstruktion

Die detaillierte Gestaltung der Aktorkonstruktion baut auf den Ergebnissen des Abschnitts 7.3 auf.

Translator

In Abb. 7.12 ist der bewegliche Teil des Aktors - der Translator - in unterschiedlichen Darstellungen zu sehen. Die Polschuhe weisen oben und unten Mulden auf, um eine konzentrische Ausrichtung mit den Magneten und den Achsen zu ermöglichen. Auf den Polschuhen werden Kunststoff-Hülsen zur mechanischen Dämpfung der Endanschläge befestigt. Sowohl die Messing-Achsen, als auch die Kunststoff-Kappen weisen zur Gewichtsreduzierung Bohrungen auf.

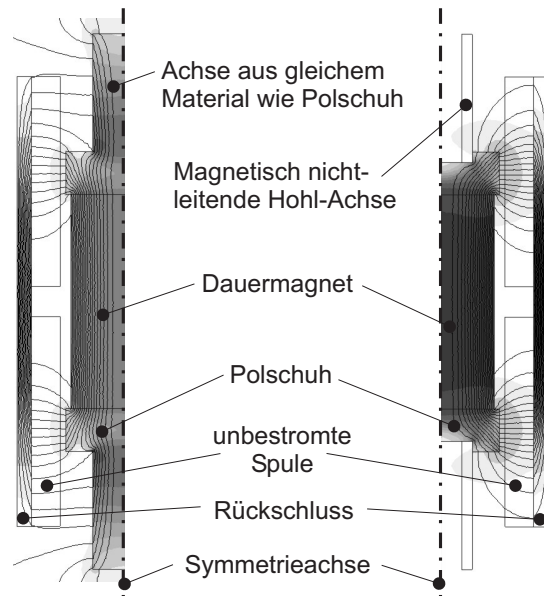


Abbildung 7.11: Rotationssymmetrische Feldverläufe bei unterschiedlichen Materialien der Führungsachsen.

Bei Verwendung von magnetisch leitfähigem Material (links) bildet sich ein deutlich größeres Streufeld als bei nichtmagnetischem Material (rechts).

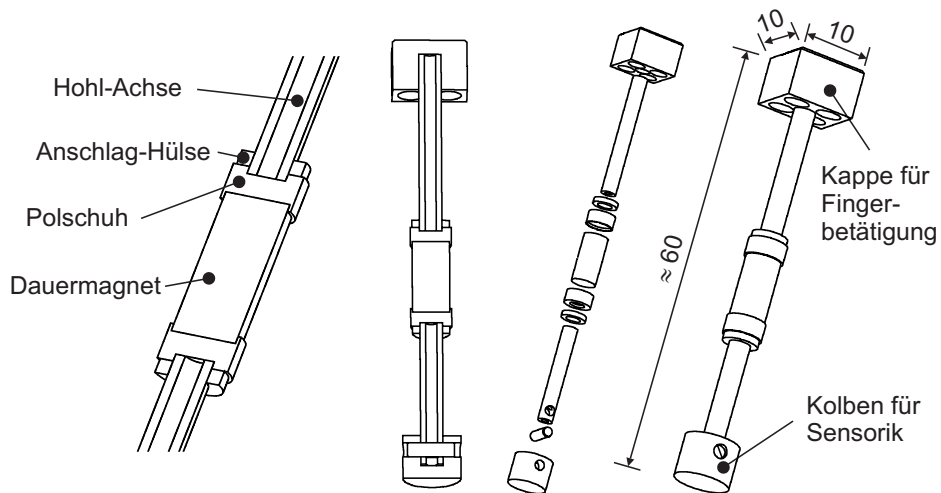


Abbildung 7.12: Verschiedene Ansichten, Schnitte und Details des Translators.

Stator

Der Stator als feststehender Teil der Aktorik kann 15 Translatoren aufnehmen. Wie in Abb. 7.13 zu sehen ist, weist der Basiskörper aus Messing 15 Bohrungen in einer matrixartigen Anordnung von 3×5 auf. In jeder Bohrung dient eine Hülse mit 0,7 mm Wandstärke aus PERMENORM als Rückschluss der einzelnen Aktoren. In die Hülsen werden die Spulen eingelassen. Die im Basiskörper sichtbaren Nuten dienen als „Kabelführung“ der Spulenanschlüsse.

Die Translatoren werden ober- und unterhalb des Basiskörpers vertikal geführt. In der oberen Führungsplatte befinden sich zur Reduzierung der Reibungskräfte Miniatur-Linearkugellager [Fa. SKF, Typ LBBR3] [50]. Das Gegenlager in der unteren Führungsplatte ist als einfaches Gleitlager mit Spielpassung ausgeführt.

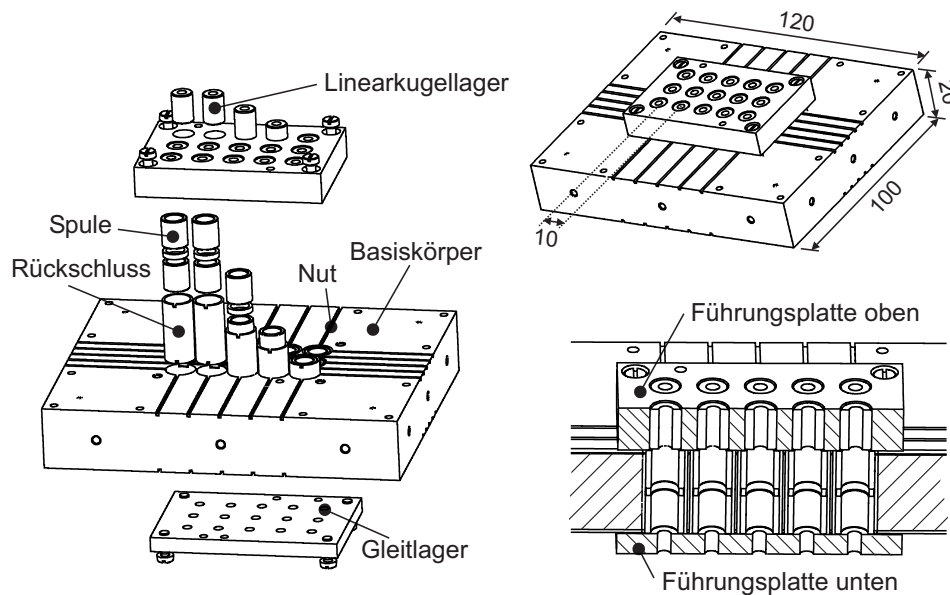


Abbildung 7.13: Der Stator im zusammengebauten Zustand, im Schnitt und als Explosionszeichnung.

Der zusammengebaute Zustand von Stator und Translatoren ist in Abb. 7.14 zu sehen. Die unter den Aktoren befestigten Komponenten sind Bestandteile der Sensorik, die im nächsten Kapitel beschrieben werden. Abb. 7.15 zeigt abschließend Photographien der realisierten Aktorik.

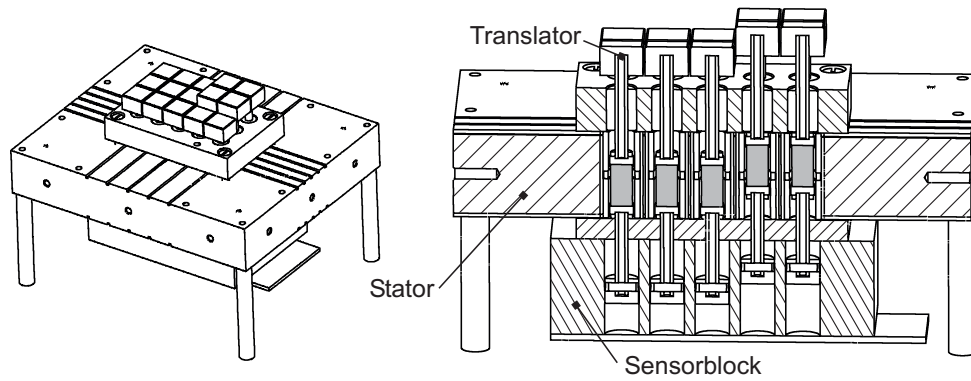


Abbildung 7.14: Gesamtaufbau des Prototypen.
Stator und Translatoren sind zusammengesetzt. Die Schnittdarstellung verdeutlicht den inneren Aufbau des Systems.

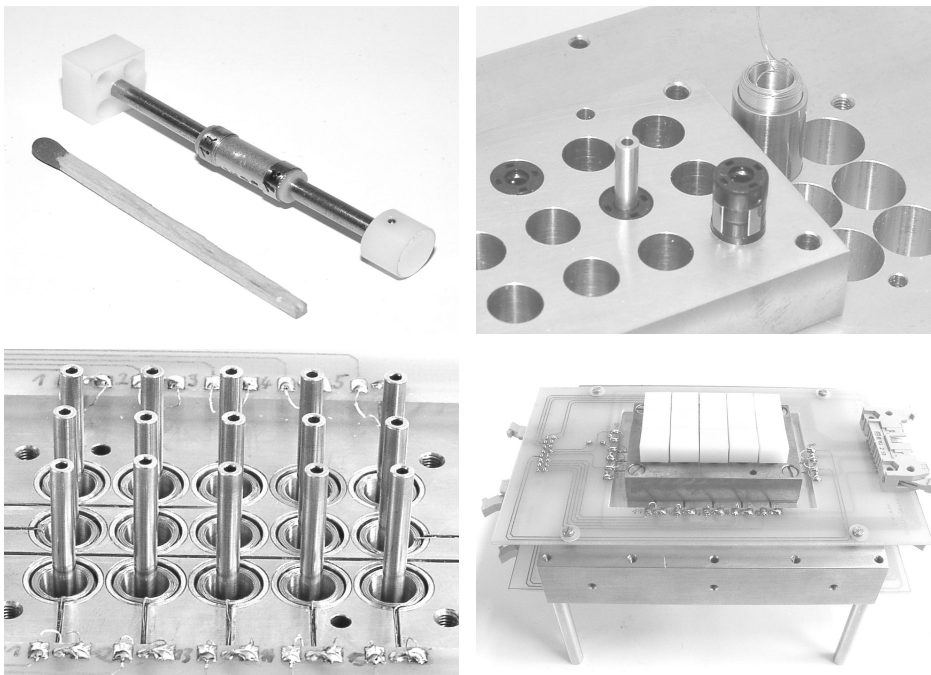


Abbildung 7.15: Fotografien der einzelnen Aktorkomponenten.
Translator ; teilmontierter Stator ; mit Translatoren bestückter Stator ; zusammgebauter Zustand.

7.5 Bewertung des Aktors

Die Leistungsfähigkeit der Aktorik wird dem Messplatz aus Abb. 10.4 und 10.5 (s. Kapitel 10) untersucht. Exemplarisch ist in Abb. 7.16 für einen Aktor die ausgeübte Kraft in Abhängigkeit des Spulenstromes bei unterschiedlichen Auslenkungen des Translators aufgetragen.

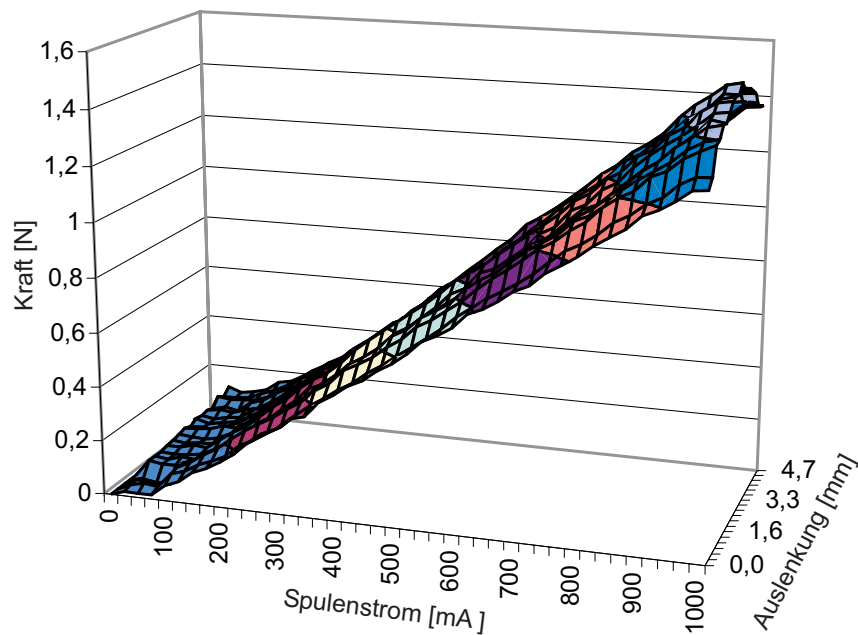


Abbildung 7.16: Ausgeübte Kraft eines Aktors in Abhängigkeit des Spulenstromes und der Translatorposition (0 mm = oberer Anschlag).

In erster Näherung ist der erwartete lineare Zusammenhang zwischen Spulenstrom und Aktorkraft erkennbar. Im Bereich niedriger Ströme wird die Gewichtskraft und Reibungskraft noch nicht überwunden. Bei großen Aktorstößen ist eine Abhängigkeit der Kraft von der Auslenkung des Translators erkennbar. Ursache ist die Kraftwirkung durch das magnetische Streufeld in der Nähe der Polschuhe. Diese Kraft nimmt von der Mittenstellung des Translators zu dessen Endpositionen hin ab (s. Abb. 7.9 und 5.5). Beim Maximalstrom von 1 A entsteht dadurch eine Kraftdifferenz zwischen Mitten- und Endposition von ca. 250 mN, die als systematischer Fehler kompensiert werden kann. Der Zusammenhang zwischen der Aktorkraft und der Steuerspannung der Stromquelle ist durch Gl. 7.28 beschreibbar. Die Differenz zwischen berechneter und gemessener Kraft liegt für Spannungen zwischen 1,5 und 10 V bei maximal 40 mN.

$$\begin{aligned}
 F(u, x) &= a(x) \cdot u + b(x) \quad \text{mit} & (7.28) \\
 a(x) &= -0,0039 \frac{\text{N}}{\text{V} \cdot \text{mm}^2} \cdot x^2 + 0,0195 \frac{\text{N}}{\text{V} \cdot \text{mm}} \cdot x + 0,1404 \frac{\text{N}}{\text{V}} \\
 b(x) &= 0,0054 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot x - 0,1212 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Jedoch beschreibt das Kennfeld nach Gl. 7.28 die Menge der Näherungsgeraden nicht ideal. Die Genauigkeit kann gesteigert werden, wenn für jede Aktorposition die lineare Approximation nicht nach Gl. 7.28 berechnet wird, sondern individuell anhand der Messdaten an dieser Position bestimmt wird. So liegt bei einer konstanten Position die Linearitätsabweichung nach Überwindung der Gewichtskraft und Reibungskraft im Bereich von 20 mN, wie in Abb. 7.17 erkennbar.

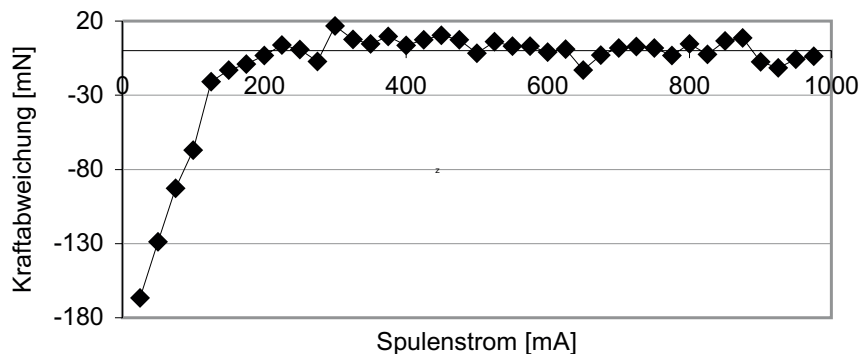


Abbildung 7.17: Absolute Abweichung zwischen der gemessenen Aktorkraft und der Berechnung anhand einer Näherungsgerade für eine feste Auslenkung.

Damit verfehlt der Aktor zwar die Forderungen nach einer Genauigkeit der Kraftausgabe von 10 mN, ist aber mit der Auflösung von 20 mN durchaus noch für hochqualitative haptische Displays geeignet. Den geforderten Stellweg von 5 mm, sowie die geforderte Maximalkraft von 1,5 N erreicht der elektrodynamische Aktor bei einem Bauraum von $10 \times 10 \times 35 \text{ mm}^3$ (Stator).

Zusammenfassung:

Aus unterschiedlichen Aktorprinzipien wurde für diesen Anwendungsfall das elektrodynamische Wirkprinzip ausgewählt. Der schematische Aufbau besteht aus zwei feststehenden Spulen und einem beweglichen Permanentmagnet. Analytische Betrachtungen, thermische Untersuchungen und numerische Feldsimulationen führten zur realisierten Konstruktion. Die Aktoren weisen einen Hub von 5 mm bei einer Maximalkraft von 1,5 N auf. Der Bauraum beschränkt sich auf $10 \times 10 \times 35 \text{ mm}^3$.

8 Sensorentwurf

Inhalt dieses Kapitels sind die sensorischen Komponenten des HapKey-Systems. Schwerpunkt bildet die Auswahl und der Aufbau der Positionssensorik. Die Bestimmung der Aktorkräfte findet durch eine Auswertung der Steuergrößen statt.

Um mit den Tasten des HapKey-Feldes Kraft-Weg-Kennlinien darstellen zu können, müssen der Regelung (s. Kap. 9) Informationen sowohl über die Auslenkungen als auch über die Kräfte der einzelnen Elemente zur Verfügung stehen.

8.1 Positionssensorik

8.1.1 Bewertung möglicher Sensorprinzipien zur Positionsmessung

Die wichtigsten Anforderungen an die Positionssensorik sind in Tabelle 8.1 nochmals zusammengefasst. In einer Recherche wurden resistive, induktive, magnetische, kapazitive, optische und akustische Sensorprinzipien betrachtet [116]. Insgesamt wurden dabei ca. 20 Lösungen sowohl bezüglich der theoretischen Eigenschaften der Funktionsprinzipien, als auch der praktischen Einsetzbarkeit realer Bauformen für den konkreten Anwendungsfall untersucht. Eine Vorauswahl dient der Reduzierung des Lösungsraumes. Neben den Abmessungen, Kosten, erreich-

Tabelle 8.1: Zusammenstellung der wichtigsten Anforderungen an die Positionssensorik.

POSITIONSSENSORIK	
Messbereich	5 mm
Messgenauigkeit	$\leq 25 \mu\text{m}$ [88]
Grenzfrequenz	$\geq 1 \text{ kHz}$
Kraftbedarf zur Messung	$\leq 100 \text{ mN}$
Abmessungen	$\leq 10 \times 10 \times 50 \text{ mm}^3$

baren Grenzfrequenzen und Messauflösungen wurde auch die Kombinierbarkeit mit dem gewählten elektrodynamischen Wirkprinzip der Aktoren berücksichtigt. Die drei im Folgenden näher betrachteten Sensoren weisen bei geringem Bauraum und Preis die günstigsten Applikationsmöglichkeiten für die Aktorkonstruktion auf.

Reflexlichtschranke

Eine Reflexlichtschranke besteht aus einer Lichtquelle (i.d.R. Leuchtdiode) und einem Lichtempfänger (i.d.R. Fototransistor) in einem gemeinsamen Gehäuse (s. Abb. 8.1). Befindet sich vor der Anordnung ein Objekt, so wird der emittierte Lichtkegel in Abhängigkeit des Objektabstandes auf dem Empfänger abgebildet. Treffen Photonen auf die Sperrschicht des Transistors, findet in der Raumladungszone eine Trennung der entstehenden Elektronenlochpaare statt [93]. Der Kollektorstrom I_C wächst an, die Ausgangsspannung sinkt. Im industriellen Bereich werden Reflexlichtschranken meist nur zur Bestimmung zweier logischer Schaltzustände eingesetzt. Für bestimmte Messbereiche ist jedoch auch eine Verwendung als Positionssensor möglich.

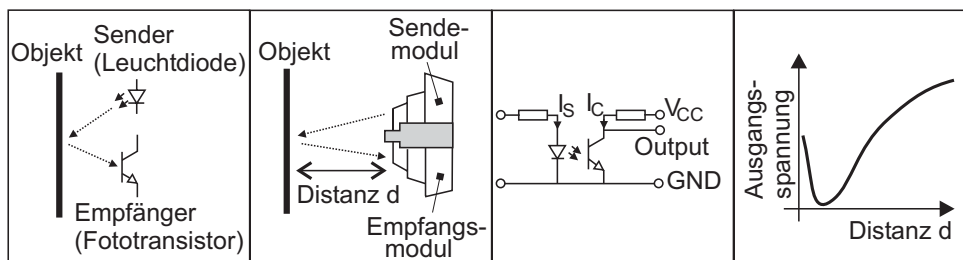


Abbildung 8.1: Funktionsweise, Aufbau, Beschaltung und Kennlinie einer Reflexlichtschranke.

Folgende Vorteile dieses Sensors sind zu nennen: Kleine Abmessungen, geringer Preis, wenig Aufwand für Ansteuerung und Signalauswertung, berührungsloses Messverfahren.

Hallsensor

Hallsensoren dienen der Messung von magnetischen Feldern. Sie nutzen den Effekt, dass bewegte Ladungsträger - also elektrischer Strom - im Magnetfeld eine Kraftwirkung (Lorentzkraft) erfahren. Diese führt zu einer Ladungsverschiebung innerhalb des stromführenden Materials. Das daraus resultierende elektrische Feld verursacht eine entgegengerichtete, elektrostatische Kraft. Es entsteht ein Kräfte-

gleichgewicht. Die messbare Hallspannung ist damit bei konstantem Stromfluss ein Indikator für die Größe der magnetischen Flussdichte [93].

Befindet sich ein Hallelement im Magnetfeld eines Permanentmagneten, so kann bei geeigneter Anordnung aus der Hallspannung auf den Abstand zwischen den beiden Komponenten geschlossen werden (Abb. 8.2).

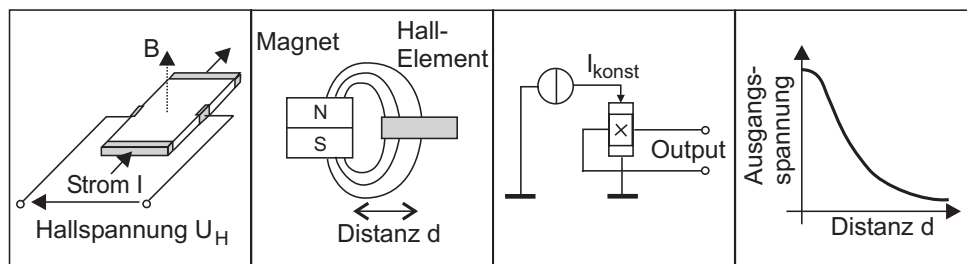


Abbildung 8.2: Funktionsweise, exemplarische Applikation, Beschaltung und Kennlinie eines Hallelementes.

Hallelemente sind preiswert, klein und einfach auswertbar. Zur Ansteuerung ist jedoch eine hochkonstante Stromquelle erforderlich. Bei matrixförmiger Sensoranordnung können sich benachbarte Magnetfelder gegenseitig beeinflussen und das Messergebnis verfälschen.

Differenzialspule

Der Sensor ist aus zwei Spulen mit einem gemeinsamen, beweglichen Kern aufgebaut (Abb. 8.3). Wird der Kern bewegt, so ändern sich die Teilinduktivitäten L_1 und L_2 gegensinnig. Durch einen Vergleich der Induktivitäten kann auf die Kernposition geschlossen werden [94]. Die Differenzialanordnung hat gegenüber dem Einspulenbau Vorteile in der Linearität, der Empfindlichkeit und dem Messbereich [93].

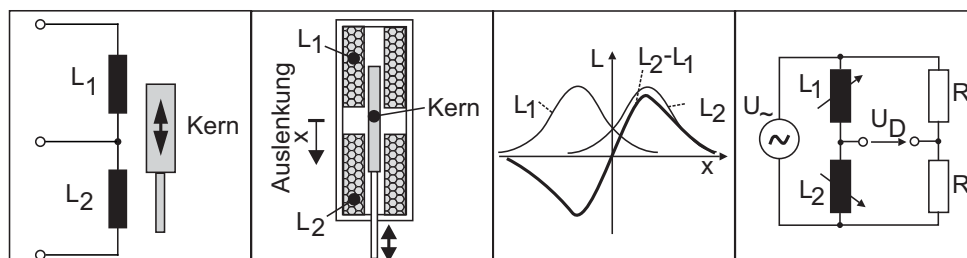


Abbildung 8.3: Funktionsweise, Aufbau, Kennlinie und Auswertung einer Differenzialspule.

Bei dem gewählten Aktoraufbau (s. Kap. 7) kann dieses Sensorprinzip ohne weitere mechanische Komponenten realisiert werden. Jedoch ist eine hohe Präzision und Symmetrie der Spulen notwendig. Die Signalauswertung erfolgt in der Regel über eine Wechselstrombrücke, deren Abgleich für jedes einzelne Sensorelement sehr aufwändig ist [70].

Entscheidung

Um die geeignetste Lösung auszuwählen, wurden die drei vorgestellten Sensoren inklusive elektronischer und mechanischer Peripherie nach Tabelle 8.2 bewertet. Teilweise beruht die Punktvergabe auf eigenen Versuchsreihen [116]. Die Entscheidung fiel auf die Verwendung von Reflexlichtschranken. Auch wenn die Differenzialspule für diesen Anwendungsfall technisch die eleganteste Lösung darstellt, so erschwert die Komplexität der Signalverarbeitung deren Realisierung, insbesondere da mehrere Sensorelemente erforderlich sind.

8.1.2 Aufbau der Positionssensoren

Nach der Entscheidung für das optische Sensorprinzip, gilt es dessen Potenzial durch geeignete Applikation optimal zu nutzen. Als Reflexlichtschranke kommt der Typ SFH 9201 [Fa. Osram] aufgrund des miniaturisierten SMD Gehäuses zum Einsatz. Da die Sensoren matrixförmig angeordnet werden, muss ein gegenseitiges Übersprechen durch die Verwendung von einzelnen „Messkanälen“ verhindert werden (s. Abb. 8.4). Material und Formgebung sowohl der Messkanäle, als auch der als Reflektor dienenden Kolben wurden in mehreren Messreihen untersucht. Die größte Positionsauflösung ergab sich bei einem rotationssymmetrischen Kanal von 8 mm Durchmesser in schwarzem PVC, kombiniert mit einer Beschichtung des Kolbens mit glänzend weißem Isolationsband.

Der Abstand zwischen Kolben und Reflexlichtschranke wird konstruktiv so festgelegt, dass die Kennlinie der Sensoren optimal ausgenutzt wird.

8.1.3 Bewertung der Positionssensorik

Eine typische Messkurve im Arbeitsbereich der montierten Reflexlichtschranke ist in Abb. 8.5 gezeigt. Bei einer Spannungsmessung (s. Abb. 8.1) mit einer Genauigkeit von 10 mV errechnet sich aus der Steigung der Messkurve eine Positionsauflösung zwischen 5 und 35 μm . Damit ist in weiten Bereichen die Anforderung

Tabelle 8.2: Bewertungsmatrix der näher betrachteten Positionssensoren [116].
Punkteskala: 1=sehr gut, 2=gut, 3=befriedigend.

Kriterium	Reflexlichtschranke	Hall-Sensor	Differenzialspule
Kennlinie / Auflösung	2	3	1
Kosten	1	1	2
Übersprechen	1	3	1
Montage / mech. Aufwand	2	3	1
Signalauswertung / el. Aufwand	1	1	3
<i>Durchschnitt</i>	1,4	2,2	1,6

Erläuterungen:

KENNLINIE/AUFLÖSUNG: Die Kennlinien der Reflexlichtschranke und des Hall-Sensors lassen sich mit einem Polynom-Ansatz gut approximieren und bieten nach eigenen Messungen bei einer Spannungsauflösung von 10 mV eine Messauflösung zwischen $5 \mu\text{m}$ und $35 \mu\text{m}$ (Reflexlichtschranke) bzw. $5 \mu\text{m}$ und $80 \mu\text{m}$ (Hall-Sensor). Die Differenzialspule bietet theoretisch eine lineare Kennlinie mit einer Auflösung bis zu $0,1 \mu\text{m}$ [93], die praktisch nicht überprüft wurde.

KOSTEN: Die Kosten für Reflexlichtschranke und Hall-Sensor inklusive Auswertungs elektronik liegen unter 2 Euro. Für die Differenzialspule können zwar die Spulen der Aktorik verwendet werden, jedoch werden die Kosten für die Bauelemente zur Ansteuerung und Signalauswertung auf mindestens 5 Euro geschätzt.

ÜBERSPRECHEN: Da die Sensoren matrixartig angeordnet werden, dürfen sich benachbarte Kanäle nicht gegenseitig beeinflussen. Die Lichtquellen der Reflexlichtschranken sind im Gegensatz zu den evtl. notwendigen Magneten für die Hall-Sensoren einfach abschirmbar. Die Induktivitäten der Differenzialspulen sind aufgrund der Verwendung als Aktorspulen bereits magnetisch voneinander getrennt (s. Abschn. 7.3.4).

MONTAGE/MECHANISCHER AUFWAND: Am Translator ist für eine Reflexlichtschranke eine Reflektionsfläche, für einen Hall-Sensoren ein Permanentmagnet anzubringen. Die Sensorjustage ist beim magnetischen Prinzip kritischer als beim optischen. Die Differenzialspulen benötigen keine zusätzlichen mechanischen Komponenten.

SIGNALAUSWERTUNG/ELEKTRISCHER AUFWAND: Die Signalauswertung der Reflexlichtschranken und Hall-Sensoren erfolgt mit einfachen Operationsverstärker-Schaltungen und anschließender Kennlinienanpassung im Regelungs-PC. Zur Auswertung der Differenzialspulen ist komplexe Schaltungstechnik mit individueller Abstimmung notwendig [70].

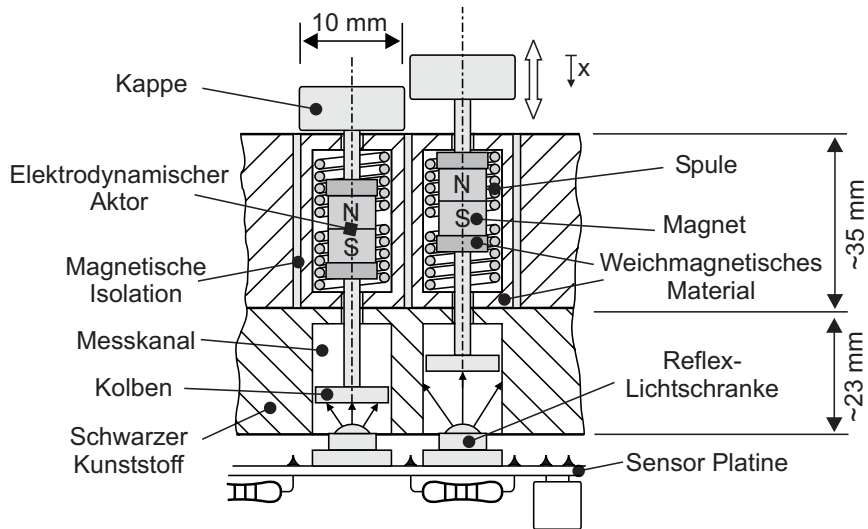


Abbildung 8.4: Schematisches Schnittbild durch die gesamte Sensor-Aktor-Anordnung. Neben dem Aufbau der Aktorik ist die Realisierung der einzelnen Messkanäle für die Sensorik erkennbar.

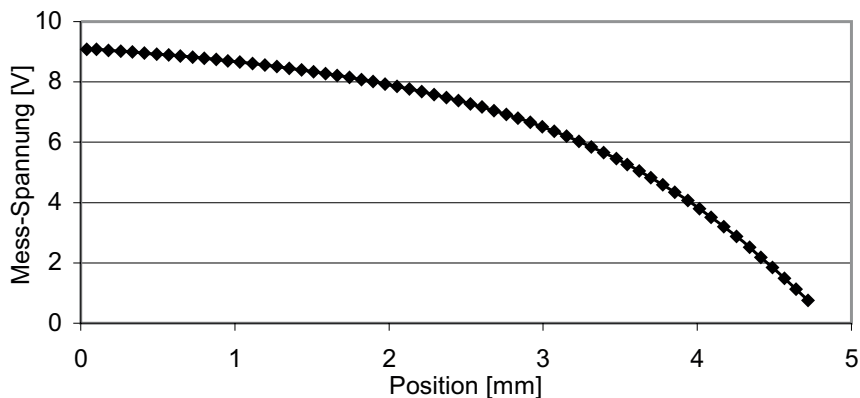


Abbildung 8.5: Kennlinie einer montierten Reflexlichtschranke (Messschaltung nach Abb. 8.1).

Der größte Messabstand ergibt sich für die Position 0 mm, bei der sich die Elemente am oberen Endanschlag befinden.

von $25 \mu\text{m}$ erfüllt. Die Datenblattangaben über Anstiegs- und Abfallszeiten der Lichtschranke ergeben eine maximale Wiederholfrequenz der Positionsmessung von 10 kHz. Die Messung erfolgt berührungslos und damit ohne Kraftbedarf. Lediglich die zu bewegende Translatormasse wird durch den Kolben geringfügig erhöht. Zusammenfassend erfüllen die Reflexlichtschranken die Anforderungen an die Positionssensorik.

8.2 Bestimmung der Aktorkraft

Die Kraftmessung für das System HapKeys stellt eine Herausforderung dar: Ausreichend präzise, robuste, kleine und leichte Kraftsensoren (s. Anforderungen in Tabelle 6.1) sind kostengünstig weder kommerziell verfügbar, noch selbst zu entwickeln. Dieser Sachverhalt zwingt zur Ausnutzung der Linearität zwischen ausgeübter Kraft und eingepprägtem Strom des elektrodynamischen Aktors. Aus der Stromstärke als bekannter Steuergröße kann auf die Aktorkraft geschlossen werden. Somit wird der Einsatz von Kraftsensoren umgangen.

Wie bei der Vermessung der Aktorik (s. Abschnitt 7.5) gezeigt wurde, erreicht die Linearität der Kraftausgabe nicht die geforderten 10 mN, sondern nur ca. 20 mN bei Berücksichtigung der Translatorposition. Somit kann auch nur mit dieser Auflösung auf die Aktorkraft geschlossen werden. Dies führt eventuell zu einer geringfügig reduzierten Qualität des haptischen Eindruckes, ist jedoch für die Gesamtfunktionalität des Systems nicht von Bedeutung.

Zusammenfassung:

Ausgehend von den Anforderungen an die Positionssensorik sind unterschiedliche Sensorprinzipien untersucht worden. Die Entscheidung fiel aufgrund der hohen Auflösung und der geringen Komplexität der Signalauswertung auf die Verwendung von Reflexlichtschranken. Die erreichte Genauigkeit liegt für den Messbereich von 5 mm zwischen $5 \mu\text{m}$ und $35 \mu\text{m}$. Zur Bestimmung der ausgeübten Aktorkraft wurde wegen Fehlens geeigneter Kraftsensoren auf den linearen Zusammenhang zwischen Strom und Kraft des elektrodynamischen Wirkprinzips zurückgegriffen. Aus der Steuergröße kann die wirkende Kraft mit einer Auflösung von ca. 20 mN berechnet werden.

9 Regelung

Die Regelung verknüpft die aktorischen und sensorischen Komponenten zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem. In diesem Kapitel findet eine Diskussion über mögliche Regelkonzepte statt. Weiterhin wird die Umsetzung der Regelung für das Sensor-Aktor-Array beschrieben und bewertet.

9.1 Anforderungen an die Regelung

Aufgabe der Regelung ist es, die Aktoren in Abhängigkeit der Sensorinformationen so anzusteuern, dass mit den Elementen des Eingabefeldes eine variabel konfigurierbare Bedienfläche dargestellt werden kann. Die wichtigsten Anforderungen (s. Kap. 6) sind in Tabelle 9.1 nochmals zusammengestellt. Zur Gewährleistung der Funktionalität des Gesamtsystems ist eine umfangreiche Signalverarbeitung notwendig, was den Einsatz einer PC-basierten, digitalen Regelung nahelegt.

Einige der Anforderungen sind nicht quantifiziert, sondern beschreiben qualitativ die Forderung nach der Erzeugung eines hochwertigen haptischen Eindrucks.

Tabelle 9.1: Zusammenstellung der wichtigsten Anforderungen an die Regelung.

REGELUNG	
Konfigurierbarkeit des Bedienfeldes	Darstellung von Tasten unterschiedlicher Größe durch Gruppierung mehrerer Elemente: Regelung auf gleiche Auslenkung und damit gleichförmige Bewegung ⇒ Elemente bilden eine ebene Oberfläche (Positionsregelung mit Regeldifferenz $\leq 0,3$ mm)
Kraft-Weg-Kennlinie	<ul style="list-style-type: none">○ individuelle Kraft-Weg-Kennlinie für jede Taste des Bedienfeldes darstellbar○ bei Tasten gruppiert aus mehreren Elementen: haptischer Eindruck unabhängig von Anzahl der gleichzeitig gedrückten Elemente○ Differenz zur eingestellten Soll-Kennlinie ≤ 200 mN
Regelfrequenz	≥ 2 kHz [8][88]

Welche Eigenschaften eine Regelung dafür aufweisen muss, hängt stark von der zu stimulierenden Körperstelle und dem Anwendungsfall des haptischen Displays ab. Verallgemeinerbare Forschungsergebnisse sind nicht verfügbar. Daher ist bei der Reglerabstimmung am realen Sensor-Aktor-System zum Teil auch empirisches Vorgehen notwendig.

Vor der näheren Betrachtung der Regelung wird die Bedeutung einiger Begriffe definiert:

Element / Segment:	Individuell geregeltes Sensor-Aktor-System. Kleinste Einheit auf dem HapKey-Feld.
Taste:	Bedienelement auf dem HapKey-Feld. Eine Taste kann sich aus nur einem (= einelementige Taste) oder aus mehreren Elementen (= mehrelementige Taste) zusammensetzen. Bei Betätigung soll der Benutzer eine Kraft-Weg-Kennlinie wahrnehmen.
Aktives Element:	Ist einer Taste zugeordnet. Bestandteil eines Bedienelementes.
Passives Element:	Ist keiner Taste zugeordnet. Kann nicht betätigt werden.
Frei bewegliches Element:	Wird nicht vom Finger des Benutzers berührt.
Berührtes Element:	Steht im mechanischen Kontakt mit dem Finger des Benutzers.

9.2 Regelungsstruktur

9.2.1 Vergleich von Kraftregelung und Positionsregelung

Um die Funktionalität der HapKeys zu gewährleisten, muss sowohl die Position, als auch die ausgeübte Kraft der einzelnen Aktoren überwacht werden. Prinzipiell ist hierfür eine Kraft- oder eine Positionsregelungen mit Abhängigkeit von der jeweils anderen Größe möglich [116].

Bei einer **Kraftregelung** wird zur Darstellung der Kraft-Weg-Kennlinie der Spulenstrom - und somit die Aktorkraft - in Abhängigkeit der Auslenkung der Elemente vorgegeben. Dies stellt eine gute Lösung dar, solange der Finger alle Elemente einer Taste gleichmäßig betätigt. Berührt der Finger jedoch bei größeren Tasten einige Elemente nur am Rand oder gar nicht mehr, so ist eine gleichmäßige Kraftausgabe aller Aktoren ungeeignet. Leicht touchierte Elemente würden eine höhere Position annehmen, als Elemente mittig unter der Fingerkuppe (Abb. 9.1a). Vollständig unberührte Elemente würden sich sogar bis an den oberen Endanschlag bewegen. Um mit einer Kraftregelung dennoch eine ebene Tastenoberfläche zu erlangen, müssten berührte und unberührte Elemente sensorisch unterschieden werden können. Zusätzlich wären Kenntnisse über die Verteilung der Fingerkraft auf

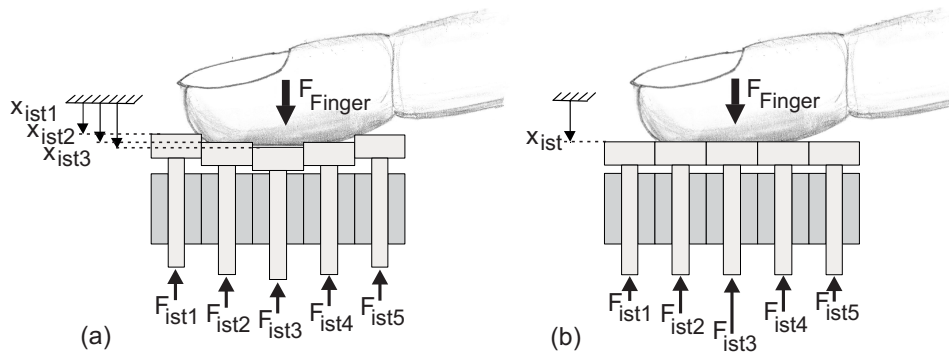


Abbildung 9.1: Vergleich von Kraft- und Positionsregelung bezüglich der Tastenoberfläche. (a): Üben alle Elemente die gleiche Kraft aus, so ergibt sich bei ungleichmäßiger Fingerberührung eine unebene Tastenoberfläche. (b): Werden dagegen alle Elemente auf die gleiche Position eingeregelt, bildet sich eine einheitliche Oberfläche aus.

der Fingerkuppenfläche erforderlich. Entsprechende Daten konnten nicht recherchiert werden.

Bei der Verwendung einer **Positionsregelung** ist die Kenntnis der Fingerkraftverteilung nicht erforderlich. Die ebene Tastenoberfläche ergibt sich durch die Vorgabe der gleichen Soll-Position für alle relevanten Elemente (Abb. 9.1b). Zur Darstellung von Kraft-Weg-Kennlinien wird zunächst die Gesamtkraft der Taste durch Summation der einzelnen Elementkräfte berechnet. Anhand der Kraft-Weg-Kennlinie kann aus dieser Tastenkraft die Soll-Position für die Regelung ermittelt werden. Das genaue Vorgehen wird im nächsten Abschnitt dargestellt.

Die Entscheidung fällt auf die Verwendung einer Positionsregelung, da mit einer Kraftregelung einheitliche Oberflächen bei mehrelementigen Tasten nicht oder nur sehr aufwändig gewährleistet werden können. Darüber hinaus wird durch den positionsgeregelten Betrieb der Einfluss der Reibung der mechanischen Komponenten minimiert [51].

9.2.2 Konzept der Regelung

Das Gesamtkonzept der Regelung wird in Abb. 9.2 verdeutlicht. Für jedes Element, also jedes einzelne Sensor-Aktor-System, steht eine individuelle Positionsregelung zur Verfügung. Die Soll-Position kann für die Elemente getrennt vorgegeben werden. Sollen mehrere Elemente gemeinsam eine Taste bilden, so erhalten sie die gleiche Soll-Position. Damit bewegen sie sich einheitlich und bilden eine

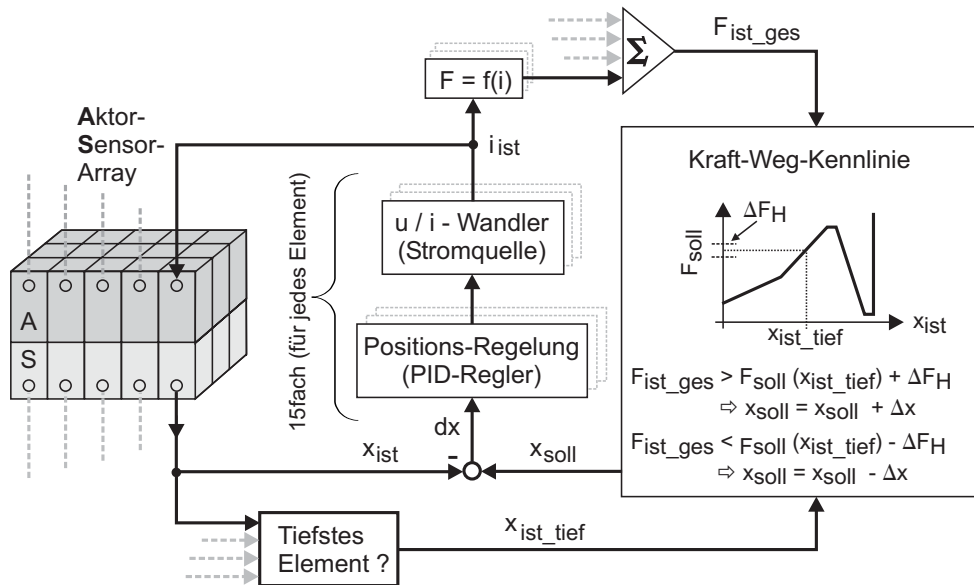


Abbildung 9.2: Schematisches Gesamtkonzept der Regelung.

ebene Tastenoberfläche. Unterschiedliche Konfigurationen des Bedienfeldes mit in Anzahl und Größe variablen Tasten sind auf diese Weise darstellbar.

Zur Gewährleistung des haptischen Eindruckes ist dem Bediener eine Kraft-Weg-Kennlinie zu übermitteln. Wie in Abschnitt 9.2.1 gezeigt, kann nicht direkt anhand der Kraft-Weg-Kennlinie und der Tastenposition auf die auszugebende Kraft der einzelnen Elemente geschlossen werden, da die Kraftverteilung des Fingers über den Elementen unbekannt ist.

Daher wird die Kraft-Weg-Kennlinie durch gezielte Beeinflussung der Sollwertvorgabe der Positionsregelung realisiert: Aufgabe der Positionsregelung ist es, die vorgegebene Soll-Position einzuregulieren. Drückt der Nutzer bei unveränderter Soll-Position mit dem Finger auf die Elemente, so werden sich im Idealfall die Elemente nicht bewegen, sondern nur deren ausgeübte Gegenkräfte entsprechend ansteigen. Die Addition der Einzelkräfte aller Elemente einer Taste abzüglich Gewichts- und Reibungskräften ergibt die Tastengesamtkraft F_{ist} , die der aktuellen Fingerkraft entspricht. Dabei ist es unerheblich, ob der Finger die Kraft auf mehrere Elemente verteilt aufbringt, oder nur ein einzelnes Element drückt. Die Summation der einzelnen Elementkräfte führt zum gleichen Ergebnis der Tastengesamtkraft.

Ist die Tastengesamtkraft, also die aktuelle Fingerkraft, größer als sie nach der Kraft-Weg-Kennlinie an der momentanen Tasten-Position sein sollte, so muss

die Taste nach unten bewegt werden. Mit anderen Worten: Übt der Finger mehr Kraft aus, als die Taste bei dieser Auslenkung entgegenhalten sollte, so weicht die Taste nach unten aus, indem die Soll-Position der Elemente an eine tiefere Stelle verschoben wird. Ist entsprechend die Fingerkraft kleiner, muss sich die Taste durch Verschiebung der Soll-Position nach oben bewegen. Der Vorgang der Änderung von x_{soll} in Abhängigkeit der Differenz zwischen Ist- und Soll-Kraft der Taste ist in Abb. 9.3 verdeutlicht. Man erkennt, dass die Kraft-Weg-Kennlinie von der Regelung praktisch „abgefahren“ wird.

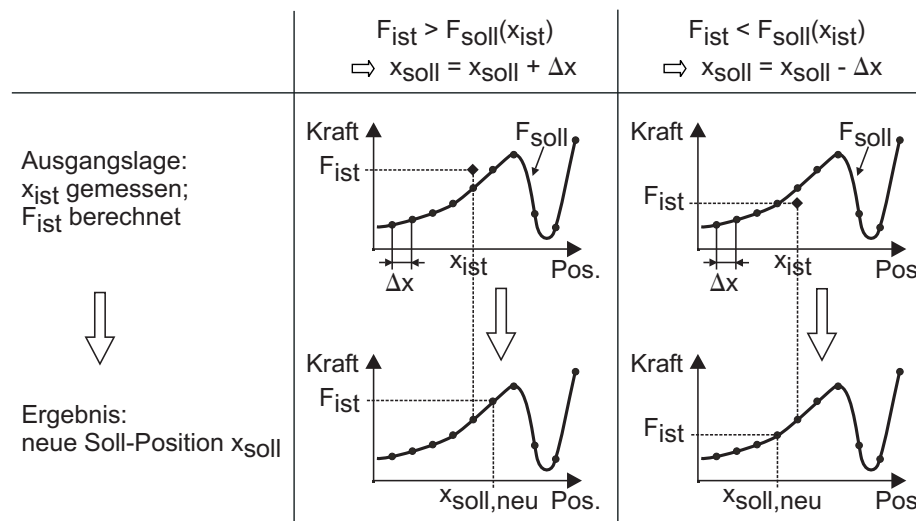


Abbildung 9.3: Ablauf bei der Bestimmung der neuen Soll-Position für die Regelung zur Realisierung einer Kraft-Weg-Kennlinie.

Abhängig von der Differenz zwischen Soll- und Ist-Kraft wird die Positionsvorgabe nach unten oder oben verschoben. Zu beachten ist, dass aufgrund der Zählrichtung (Nullpunkt am oberen Anschlag) ein größerer Zahlenwert einer tieferen Position entspricht.

Bei der Realisierung der Regelungsstruktur sind einige Besonderheiten zu beachten:

- Entgegen dem Idealfall wird sich bei der Positionsregelung eine Regeldifferenz zwischen Ist- und Soll-Position einstellen; die Auslenkungen der einzelnen Elemente werden geringfügig voneinander abweichen. Die Kraft-Weg-Kennlinie muss jedoch für alle Elemente einer Taste an der gleichen Stelle ausgewertet werden. Daher wird als Ist-Position die Auslenkung des jeweils tiefsten Elementes einer Taste angenommen (s. Abb. 9.2), da dieses voraussichtlich am zentralsten vom Finger berührt wird.
- Beim Vergleich zwischen der Tastengesamtkraft (F_{ist}^1) und der Soll-Kraft aus

der Kraft-Weg-Kennlinie (F_{soll}) wird eine Hysterese (ΔF_H) zur Vermeidung von Instabilitäten eingeführt (s. Abb. 9.2).

- Im Fall einer signifikanten Kraftdifferenz wird die Soll-Position nach oben oder nach unten verschoben. Praktische Erfahrungen haben gezeigt, dass eine konstante Schrittweite Δx (s. Abb. 9.3) keinen optimalen haptischen Eindruck erzeugt. Wählt man die Schrittweite klein, so fühlt sich die Taste bei schneller Betätigung träge an. Ist die Schrittweite dagegen groß, so sind die Positionssprünge bei langsamer Tastenbetätigung haptisch wahrnehmbar und zerstören den Eindruck einer kontinuierlichen Bewegung. Gelöst wird das Problem durch eine Anpassung der Schrittweite an die Tastengeschwindigkeit: Bei langsamer Betätigung wird die Soll-Position in kleinen Schritten verändert, bei schneller Betätigung in entsprechend größeren Schritten.

9.3 Regelstrecke und Regler

Zur Realisierung des Regelungskonzeptes ist die Positionsregelung der einzelnen Elemente umzusetzen, deren Sollwertvorgabe durch das Vorgehen aus Abschn. 9.2.2 erfolgt. Das Blockschaltbild der Positionsregelung ist in Abb. 9.4 dargestellt. Die Übertragungsfunktionen des Stellgliedes (Stromquelle) und der Positionssensorik weisen bis in den hohen Frequenzbereiche von 10 kHz einen konstanten Übertragungsfaktor auf [116] und werden für die weitere Betrachtung als proportionale Glieder behandelt. Die in der Praxis auftretenden Linearitätsfehler werden durch Korrekturkennlinien in der Signalverarbeitung kompensiert (s. Abschn. 9.4).

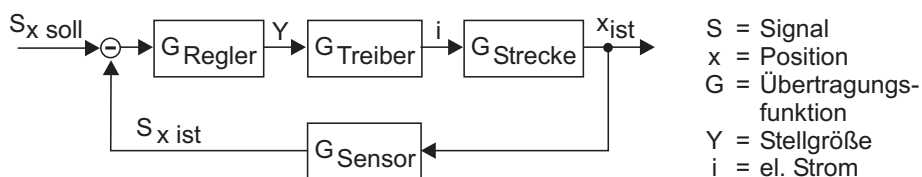


Abbildung 9.4: Blockschaltbild der Positionsregelung eines einzelnen Elementes.

9.3.1 Theoretische Modellierung der Regelstrecke

Die Regelstrecke setzt sich aus den aktorischen und mechanischen Komponenten des Systems zusammen. Um das Verhalten der Strecke mit den Methoden der

Elektrotechnik beschreiben zu können, wird das mechanische System mit Hilfe der elektromechanischen Analogie in ein elektrisches Netzwerk überführt. Tabelle 9.2 zeigt die Analogiebeziehungen auf [68].

Tabelle 9.2: Gegenüberstellung der elektrischen und mechanischen Größen für Analogiebe- trachtungen (aus [68]).

ELEKTRISCHE GRÖSSE	MECHANISCHE GRÖSSE
Spannung u [V]	Geschwindigkeit v [$\frac{m}{s}$]
Strom i [A]	Kraft F [N]
Leitwert G [$\frac{1}{\Omega}$] = [S]	Reibung r [$\frac{N \cdot s}{m}$]
Kapazität C [F]	Masse m [kg]
Induktivität L [H]	Nachgiebigkeit n [$\frac{m}{N}$]

Das mechanische System besteht aus einer bewegten Masse m , einer Reibung r und einer Nachgiebigkeit n . Das schwach ausgeprägte nachgiebige Verhalten resultiert aus zwei Effekten: Zum einen existiert das Bestreben des Aktors, sich in die Position minimaler magnetischer Energie in der Aktormitte zu bewegen. Dieses Verhalten ist mit einer „magnetischen Federung“ gleichzusetzen [7]. Zum anderen wirkt das Luftvolumen zwischen Stator und Translator des Aktors als akustische Nachgiebigkeit. Die Luft kann aufgrund enger mechanischer Toleranzen an Lagern und Polschuhen nur eingeschränkt ausströmen, so dass sie bei Aktorbewegungen komprimiert wird und einen federnden Charakter aufweist [68].

Das elektromechanische Ersatzschaltbild des elektrodynamischen Aktors nach [68] ist in Abb. 9.5 dargestellt. Die akustische Impedanz ist im ESB vernachlässigt. Der Koppelfaktor des verlustfrei angenommenen elektrodynamischen Transformators ist $1/X = B_0 \cdot l$.

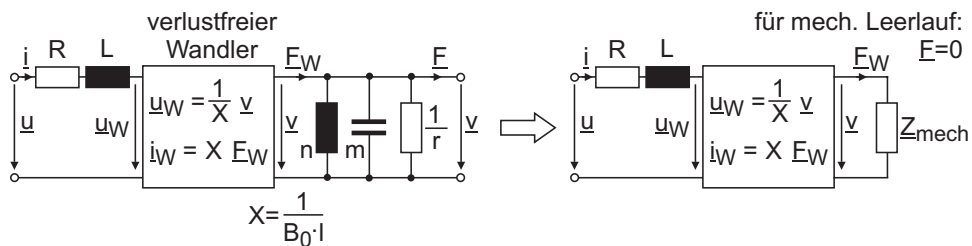


Abbildung 9.5: Elektromechanisches Ersatzschaltbild des elektrodynamischen Aktors im mechanischen Leerlauf (ohne Fingerkontakt).

Die mechanische Impedanz des Aktors, die in der Analogie der elektrischen Admittanz zugeordnet ist, ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{mech} &= \frac{F}{\underline{v}} = (j\omega n)^{-1} + j\omega m + r \\
 &= \frac{1 + j\omega nr - \omega^2 nm}{j\omega n} \\
 &= \frac{1 + j\frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{Q} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{j\omega n} \tag{9.1}
 \end{aligned}$$

mit: $\omega_0^2 = \frac{1}{nm}$; $Q = \frac{1}{\omega_0 nr}$

Die gesuchte Übertragungsfunktion der Regelstrecke $G_{Strecke} = \underline{x}/\underline{i}$ kann mit Hilfe der Transformationsvorschrift bestimmt werden. Dabei wird der Blindanteil der elektrischen Eingangsimpedanz (L) aufgrund der tieffrequenten Anwendung vernachlässigt [68], ebenso wie der seriell zur Stromquelle liegende ohmsche Widerstand der Spule. Die sich ergebende Übertragungsfunktion weist PT₂-Verhalten auf:

$$\begin{aligned}
 G_{Strecke} &= \frac{\underline{x}}{\underline{i}} = \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{\underline{v}}{\underline{i}} = \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{X \cdot \underline{u}}{\underline{i}} = \frac{X}{j\omega} \cdot \underline{Z}_{el} = \frac{X}{j\omega} \cdot \frac{1}{X^2 \cdot \underline{Z}_{mech}} \\
 &= \frac{1}{j\omega \cdot X} \cdot \frac{j\omega n}{1 + j\omega nr - \omega^2 nm} \tag{9.2} \\
 &= B_0 l \cdot \frac{n}{1 + j\omega nr - \omega^2 nm}
 \end{aligned}$$

Da im Gegensatz zur bewegten Masse m sowohl die Reibung r , als auch die Nachgiebigkeit n schwer direkt messbar oder berechenbar sind, wird die mechanische Impedanz der Aktoren experimentell bestimmt und daraus die fehlenden Parameter für die Übertragungsfunktion abgeleitet.

9.3.2 Praktische Messung des Übertragungsverhaltens

Die mechanischen Komponenten der Aktorik werden mit einem elektrodynamischen Mini-Shaker [Fa. Brüel & Kjaer, Typ 4810] in periodische Bewegung versetzt. Ein Impedanzmesskopf [Fa. Brüel & Kjaer, Typ 8001] nimmt die dabei entstehenden Kräfte und Geschwindigkeiten auf. Die Auswertung erfolgt mit Hilfe eines Frequenzanalysators [Fa. HP, Typ 35665A]. Der schematische Messaufbau ist in Abb. 9.6 skizziert.

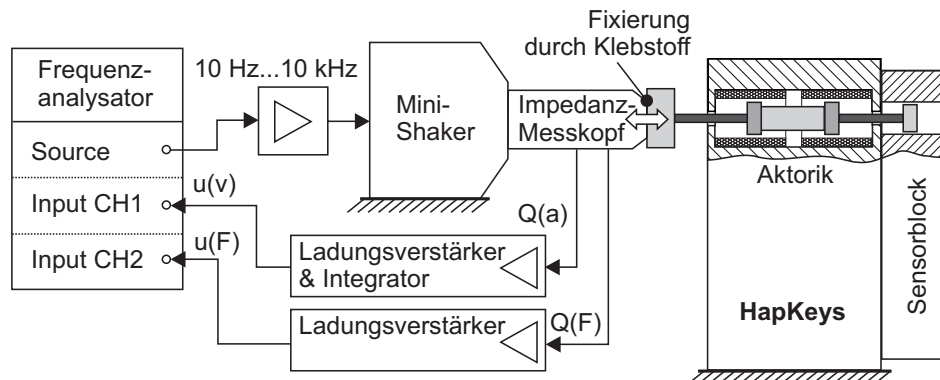


Abbildung 9.6: Skizze des Messaufbaus zur Bestimmung der mechanischen Impedanz der Regelstrecke.

Die Ergebnisse der Messung der mechanischen Impedanz $Z_{mech} = \underline{F}/\underline{v}$ sind in Abb. 9.7 exemplarisch für drei Elemente aufgetragen. Jede Kurve zeigt den Mittelwert von drei Messungen. Die Differenzen im niedrigen Frequenzbereich sind mit dem Einfluss fertigungstechnischer Toleranzen auf die nachgiebigen Eigenschaften der akustischen Impedanz und auf die mechanische Reibung der einzelnen Elemente zu erklären.

Ebenfalls ist in Abb. 9.7 eine rechnerische Simulation der Impedanz der parallelgeschalteten mechanischen Bauelemente dargestellt. Dabei wurde als Masse der reale Wert von $m = 5,34 \text{ g}$ des Translators angesetzt. Anschließend wurde die Nachgiebigkeit und die Reibung bis zur bestmöglichen Übereinstimmung mit den Messwerten angepasst. Es ergaben sich realistische Werte von $n = 10 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$ und $r = 2 \frac{\text{Ns}}{\text{m}}$. Der Kurvenverlauf der Simulation deckt sich sowohl in Betrag, als auch in Phase gut mit dem Frequenzverlauf der Messreihen. Schlussfolgernd ist das angesetzte Netzwerkmodell zur Beschreibung der mechanischen Impedanz der Aktoren geeignet. Somit kann auch das im vorhergehenden Abschnitt bestimmte PT_2 -Verhalten als Übertragungscharakteristik der Strecke angenommen werden.

9.3.3 Einfluss des Fingers als Störgröße

Betrachtet wurde bisher nur das Verhalten der Elemente in frei beweglichem Zustand, also ohne Kontakt mit dem Finger des Benutzers. Dieser übt eine zusätzliche Kraft auf die beweglichen Komponenten der Mechanik aus. Zur Verdeutlichung wird in Abb. 9.8 die Aktorik in die Kraft-Erzeugung und die mechanische Einheit aufgetrennt [85]. Nur eine Kraftdifferenz zwischen Finger- und Aktorkraft führt zu einer Anregung des Translators.

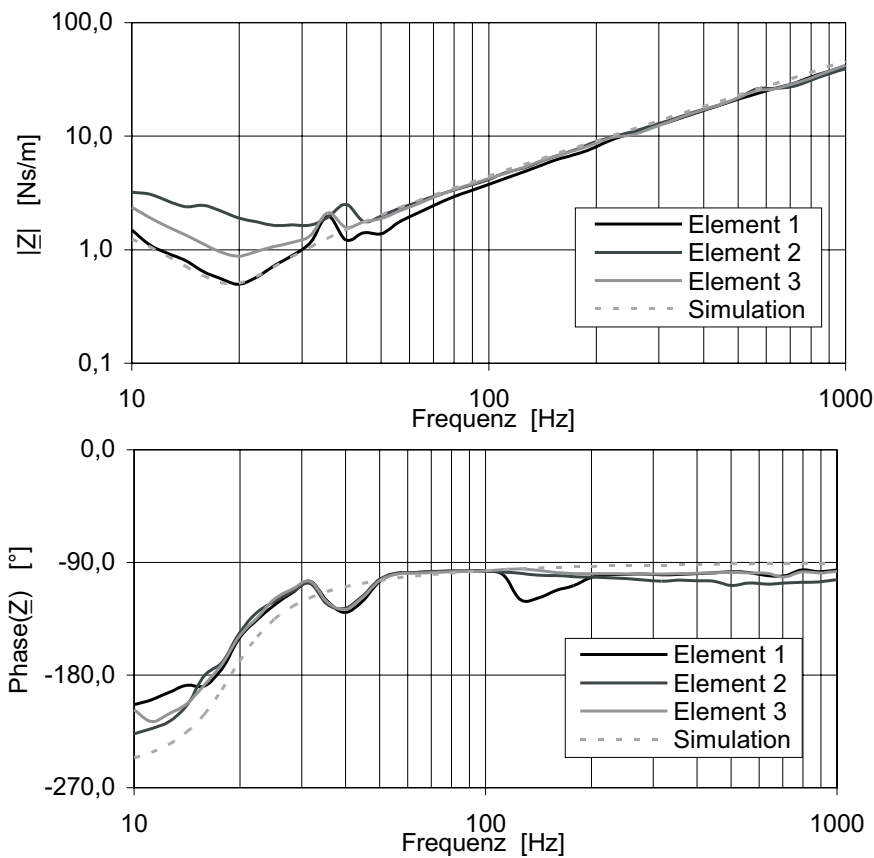


Abbildung 9.7: Resultat der Messung der mechanischen Impedanzen.

Gezeigt sind für drei unterschiedliche Elemente jeweils die gemittelten Ergebnisse von drei Messungen. Zusätzlich ist ein rechnerisch simulierter Impedanzverlauf aufgetragen.

Der Finger nimmt aber nicht nur als Kraftquelle durch die Störgröße „Fingerkraft“ Einfluss auf den Regelkreis, sondern verändert auch das Verhalten der Regelstrecke. Durch den Kontakt zwischen Finger und Taste werden deren mechanische Impedanzen parallel geschaltet. Nach [33] kann die Impedanz des Fingers durch ein Masse-Feder-Dämpfer-System vereinfachend modelliert werden. Jedoch sind dessen Parameter starken Schwankungen unterlegen. Selbst im statischen Zustand ohne Reflexreaktion und ohne willentliche Bewegung variieren die Nachgiebigkeit und die Dämpfung deutlich in Abhängigkeit der Muskelvorspannung. Darüber hinaus ist die Fingerimpedanz bei jedem Menschen individuell unterschiedlich [40] und von Gelenkstellung und Krafrichtung beeinflusst [77].

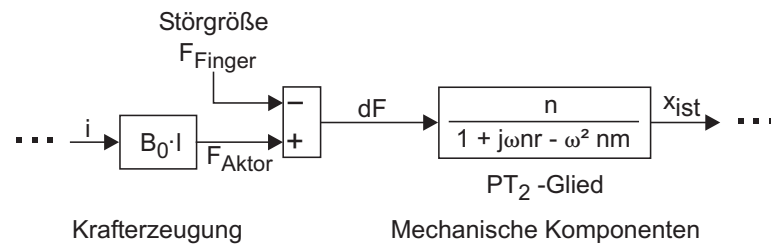


Abbildung 9.8: Einfluss der Störgröße Fingerkraft.
Die mechanischen Komponenten werden nur angeregt, wenn sich Finger- und Aktorkraft nicht kompensieren.

Schlussfolgernd ist das Verhalten der frei beweglichen Tastenelemente für die Regelung gut theoretisch bestimmbar, während die Eigenschaften der vom Finger betätigten Elemente nur in der praktischen Anwendung ermittelt werden können.

9.3.4 Auswahl des Reglers

Aufgabe des Reglers ist die Positionsregelung sowohl der frei beweglichen, als auch der vom Finger berührten Elemente. Folgende Herausforderungen sind an den Regler und dessen Parametrierung gestellt:

- Die Regelgröße x_{ist} wirkt über den Algorithmus zur Darstellung der Kraft-Weg-Kennlinie auf die Führungsgröße x_{soll} zurück: Die Soll-Position wird in Abhängigkeit der Ist-Position und der Ist-Kraft festgelegt (s. Abschn. 9.2.2).
- Bei Kontakt zwischen Tastenelement und Benutzerfinger ändert sich die Übertragungsfunktion der Regelstrecke in Abhängigkeit der individuellen Eigenschaften des Fingers (s. Abschn. 9.3.3).
- Die Güte der Positionsregelung ist für das visuelle Erscheinungsbild des Bedienfeldes zwar wichtig, entscheidend ist jedoch in diesem Projekt die Qualität des haptischen Eindrucks bei der Tastenbetätigung. Welche Regeleigenschaften dafür notwendig sind, ist weitgehend experimentell zu untersuchen (s. Abschn. 9.1).

Diese Bedingungen betrachtend bietet sich der Einsatz eines anpassungsfähigen Reglers kombiniert mit empirischer Parameteroptimierung an. Es kommt ein PID-Regler zum Einsatz, dessen Koeffizienten im realen Betrieb des Sensor-Aktor-Arrays eingestellt werden. Zur reinen Positionsregelung der PT₂-Strecke

ist ein solcher Regler gut geeignet [74], da er die Voraussetzung zur Optimierung von hoher Stellgenauigkeit (P), rascher Reaktion (D) und geringer bleibender Regelabweichung (I) bietet. Darüber hinaus erlaubt der PID-Regler ausreichend Variationsmöglichkeiten zur schnellen Erprobung des Einflusses unterschiedlicher Regelverhalten auf den erzeugten haptischen Eindruck des Gesamtsystems. Experimente zum stabilen Betrieb bei verschiedenen Fingerimpedanzen und Kraftverläufen sind mit direkter Validierung der haptischen Rückmeldung möglich.

9.4 Umsetzung der Regelung

Die Regelung und Signalverarbeitung werden unter Verwendung eines Personal-Computers [Pentium II, 400MHz] und von zwei kombinierten AD/DA-Einschubkarten [Fa. Addi-Data, Typ APCI-3120] digital umgesetzt. Mit den Wandlerkarten stehen 15 analog-digital Kanäle mit 16-Bit und 15 digital-analog Kanäle mit 14-Bit Auflösung zur Verfügung. Um für nachfolgende Systeme den Hardware-Aufwand zu reduzieren, ist als Zukunftsziel die Umsetzung der digitalen Regelung auf einen Mikrocontroller mit entsprechender Wandler-Peripherie zu sehen. Ein geeignetes Konzept ist bereits entwickelt [72], wird jedoch in diesem Projekt noch nicht umgesetzt.

Die Regelungssoftware ist in der Sprache C programmiert und wird unter dem Betriebssystem DOS ausgeführt. Die Wahl des Betriebssystems ist mit dem Ziel möglichst hoher Geschwindigkeit des Programmablaufes begründet. Das vereinfachte Flussdiagramm der Software ist in Abb. 9.9 dargestellt und wird im Folgenden erläutert:

Um eine bestimmte Tastenkonfiguration auf dem Bedienfeld darzustellen, muss jedes Element entweder einer der Tasten zugeordnet, oder als passives Element deklariert werden. Die passiven Elemente werden zunächst am unteren Anschlag, die aktiven Elemente am oberen Anschlag positioniert. So entsteht die gewünschte Bedienstruktur.

Die nachfolgende Schleife, in der die Positionsregelung stattfindet, wird für jedes einzelne Element nacheinander abgearbeitet. Passive Elemente werden durch die Kraftwirkung eines geringen Konstantstromes am unteren Anschlag fixiert. Bei aktiven Elementen werden die Signale der Positionssensoren durch AD-Wandlung ausgelesen. Diese Wandlung wird entgegen der vereinfachten Darstellung im Flussdiagramm nicht innerhalb der Schleife angestoßen, sondern läuft

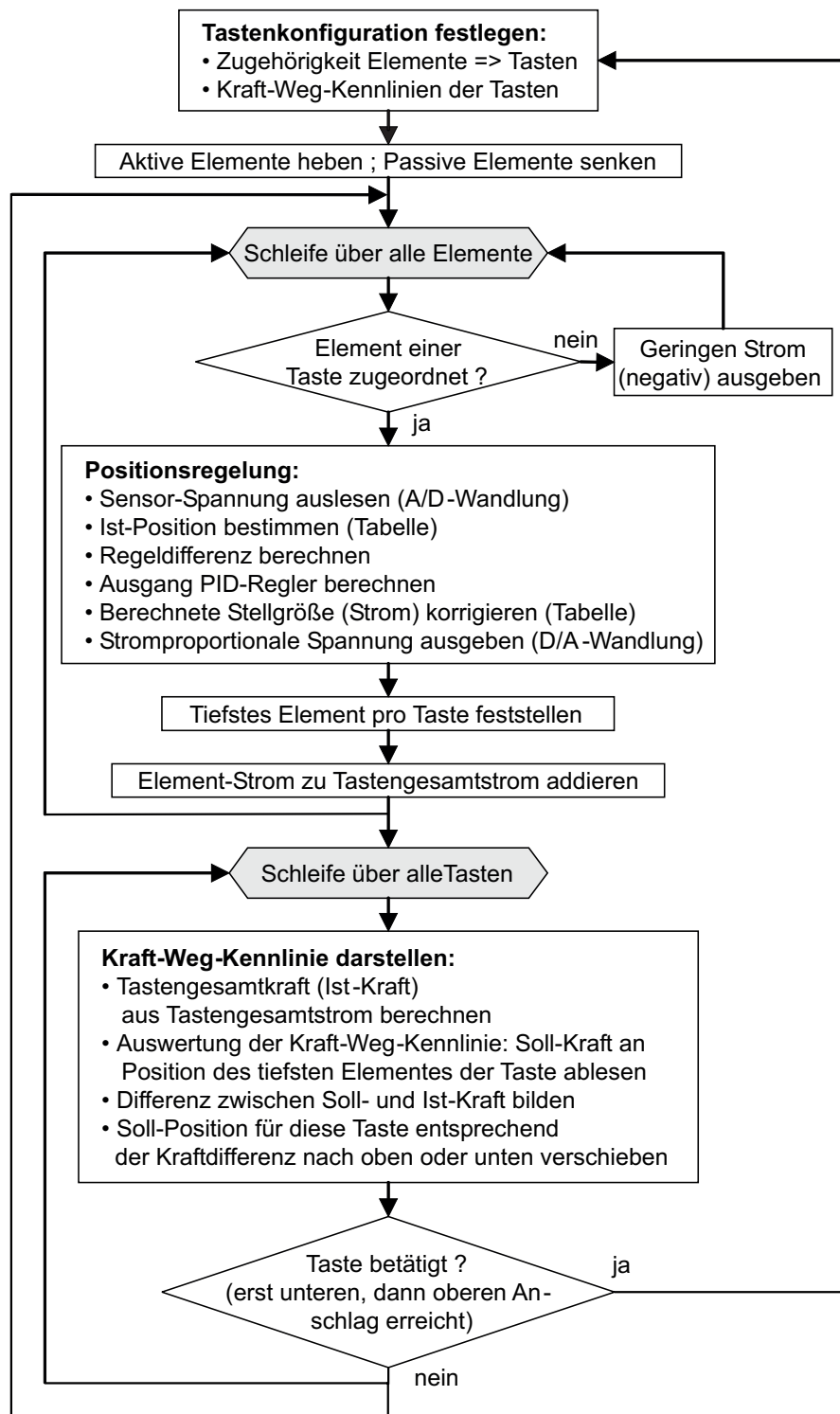


Abbildung 9.9: Vereinfachtes Flussdiagramm der Software zur Regelung des Sensor-Aktor-Arrays.

kontinuierlich im Hintergrund ab. Ist die Wandlung aller analogen Eingänge abgeschlossen, wird ein Interrupt gesetzt, der das gleichzeitige Auslesen aller Sensorspannungen triggert. Da die Kennlinien der optischen Wegsensoren nichtlinear sind (s. Kap. 8), wird die aktuelle Position der Elemente unter Verwendung von Wertetabellen ermittelt. Diese enthalten individuell für die einzelnen Sensoren zu jeder Ausgangsspannung die zugehörige Position. Um dabei die Datenmenge handhabbar zu halten, wird die Auflösung der A/D-Wandler rechnerisch auf 10-Bit reduziert. Damit wird bei 10 V Nennspannung eine Messgenauigkeit von ca. 10 mV erreicht, welche auch bei der Sensorbetrachtung angesetzt wurde. Mit Kenntnis der Ist-Position kann die Regeldifferenz zur Soll-Position berechnet und dem PID-Regler zugeführt werden. Dieser ist entsprechend den Vorschriften von beispielsweise [41] oder [74] als quasikontinuierlicher Abtastregler digital umgesetzt. Für die Stellgröße am Reglerausgang ist zur Kompensation von Nichtlinearitäten und unterschiedlicher Reibung der einzelnen Aktorelemente eine Korrekturtabelle vorgesehen. Mit einer Auflösung von 10-Bit ist die Kennlinie zwischen Reglerausgang und Spulenstrom für jeden Aktor individuell festlegbar. Die D/A-Wandlung liefert anschließend die Eingangsspannung für die Stromquellen.

Innerhalb der Positionsregelungs-Schleife werden einige Kennwerte für die einzelnen Tasten, die sich aus mehreren Elementen zusammensetzen können, bestimmt. Zum einen wird die Position des jeweils tiefsten Elementes jeder Taste ermittelt. Zum anderen werden die Ströme aller Elemente, die gemeinsam eine Taste bilden, zum Tastengesamtstrom summiert. Hierbei bleibt jedoch der D-Anteil der Regler unberücksichtigt, damit die hochdynamischen Stromimpulse zur Positionsregelung keine Auswirkung auf die Kraftberechnung und somit auf die haptische Ausgabe haben.

Die nachfolgende Schleife dient der Darstellung der Kraft-Weg-Kennlinien. Sie arbeitet nacheinander die einzelnen Tasten des Bedienfeldes ab. Aus dem Tastengesamtstrom wird die Tastenkraft mit Hilfe des Faktors $B_0 \cdot l$ bestimmt. Die Gewichtskräfte der einzelnen Elemente werden dabei abgezogen. An der Position des tiefsten Elementes der Taste wird die Soll-Kraft aus der zugeordneten Kraft-Weg-Kennlinie abgelesen. Die Kennlinien sind ebenfalls in tabellarischer Form abgelegt. Entsprechend der Kraftdifferenz zwischen Soll- und Ist-Kraft findet eine Veränderung der Soll-Position für alle Elemente dieser Taste statt. Die Schrittweite der Positionsverschiebung hängt dabei von der aktuellen Tastengeschwindigkeit ab (vgl. Abschn. 9.2.2).

Weiterhin wird in der Schleife geprüft, ob der Benutzer eine der Tasten auf

dem Bedienfeld betätigt hat. Dies ist der Fall, wenn eine Taste zunächst den unteren, dann den oberen Endanschlag erreicht. Eine Tastenbetätigung führt in der Regel zu einer neuen Konfiguration auf dem Bedienfeld. Andernfalls beginnen die Regelschleifen von vorn.

9.5 Bewertung der Regelung

Bei der praktischen Arbeit mit dem realen Bedienfeld hat sich die Entscheidung für einen variabel einstellbaren PID-Regler zum Test unterschiedlicher Reglerverhalten als sinnvoll erwiesen. Im ersten Schritt wurde ausschließlich die Positionsregelung in Betrieb genommen. Hierbei konnte mit Hilfe bekannter Regeln zur Parametereinstellung [74] eine hohe Qualität bezüglich Stellgenauigkeit und Stelldynamik erreicht werden. Diese Parametrierung führt jedoch bei Zuschaltung der vollen Funktionalität inklusive Darstellung der Kraft-Weg-Kennlinien zu enttäuschenden Ergebnissen der haptischen Reizung: Während der integrierende Anteil für die Positionsregelung eine bleibende Regeldifferenz verhindert, führt dieser bei Betätigung der Taste zu einem trägen haptischen Eindruck. Auf ähnliche Weise sorgt der differenzielle Anteil zwar für eine schnelle Positionseinregelung, verursacht jedoch eine Störung der haptischen Empfindung in Form von ungleichmäßigen Bewegungen und Kraftverläufen. Die sensible Schwelle der Wahrnehmung von Kraft- und Positionssprüngen wird offenbar rasch überschritten.

Die Parametrierung stellt somit stets einen Kompromiss zwischen der Güte der Positionsregelung, verantwortlich für den visuellen Eindruck einer homogenen Tastenoberfläche, und der haptischen Darbietung, bestimmend für den intuitiven Gefühlseindruck bei Betätigung, dar. In diesem Projekt ist die Authentizität des haptischen Eindrucks das verfolgte Primärziel, so dass Abstriche in der gleichförmigen Positionierung der Elemente akzeptiert werden. Daher wurde experimentellen Untersuchungen zufolge eine Einstellung mit dominantem Proportionalverhalten und geringen I- und D-Anteilen für den Regler gewählt.

Mit dieser Parametrierung ergibt sich aufgrund der oben genannten Umstände eine maximale Positionsdifferenz zwischen zwei Elementen einer Taste von 0,8 mm bei Betätigung. Die Abweichung zwischen der vorgegebenen und der tatsächlich dargestellten Kraft-Weg-Kennlinie liegt im Bereich von 50 bis 300 mN. Die diesen Ergebnissen zugrunde liegenden Messungen mit ausführlicher Interpretation sind in der Beurteilung des Gesamtsystems (Abschn. 10.2) beschrieben. Die Regelschleife wird auf dem PC mit einer Frequenz von ca. 6 kHz durchlaufen, wo-

bei einer Erneuerung der Sensorwerte aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der AD/DA-Wandlerkarten nur in jedem zweiten Regeldurchlauf erfolgt.

Für das Projekt HapKeys stellt die Regelung eine Komponente des Gesamtsystems dar, bildet aber nicht den Schwerpunkt der Arbeit. Daher bietet sowohl das Regelungskonzept, als auch die Reglerauswahl und dessen Parametrierung noch Potenzial zur Optimierung.

Abschließend ist mit dem realisierten Regelungskonzept dennoch ein gutes Ergebnis sowohl bezüglich des visuellen Erscheinungsbildes (Positionsregelung), als auch des haptischen Sinneseindrucks (Darstellung der Kraft-Weg-Kennlinien) erreicht worden. Dies ist insbesondere unter Berücksichtigung der Tatsache zu sehen, dass zwei Größen (Position und Kraft) kontrolliert werden müssen, aber nur für die Positionsmessung explizite Sensoren vorhanden sind. Die Kraft wird anhand der Stellgröße Strom bestimmt (s. Abschn. 8.2), der jedoch auch die dynamischen Anteile zur Positionsregelung beinhaltet. Demzufolge ist eine Abweichung vom idealen Regelverhalten zu erwarten.

Aus den Erfahrungen dieses Projektes kann für haptische Displays in der Prototypenphase die Verwendung eines Reglers mit änderbarem Verhalten empfohlen werden. So kann in praktischen Versuchen der haptische Eindruck durch Variation der Reglereigenschaften optimiert werden.

Zusammenfassung:

Die Regelung basiert auf dem Konzept, für jedes einzelne Element eine individuelle Positionsregelung vorzusehen. Größere Tasten setzen sich aus mehreren Elementen zusammen, die mit PID-Reglern auf die gleiche Auslenkung eingeregelt werden. Durch Summation der elektrischen Ströme dieser Elemente kann auf die ausgeübte Tastenkraft geschlossen werden. Diese Kraft wird mit der Soll-Kraft verglichen, welche nach der darzustellenden Kraft-Weg-Kennlinie an der aktuellen Tastenposition vorherrschen sollte. Entsprechend der Kraftdifferenz wird die Sollwertvorgabe der Positionsregelung nach oben oder unten korrigiert, die Taste demnach auf- oder abwärts bewegt. Die Umsetzung der Regelung erfolgt digital auf einem PC mit AD/DA-Wandlerkarten.

10 Gesamtsystem

Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems „HapKeys“ wird in diesem Kapitel abschließend zusammengestellt. Zur Quantifizierung der haptischen Ausgabefähigkeit werden mit einem speziellen Messplatz die Kraft-Weg-Kennlinien der Tasten auf dem Bedienfeld vermessen. Zusätzlich wird in einer Versuchsreihe die praktische Nutzbarkeit des HapKey-Feldes nach Aussage von Probanden ermittelt.

Ein Resümee zeigt die wichtigsten Entwicklungen und Erkenntnisse des Projektes auf und gibt einen Ausblick auf weitere Tätigkeitsfelder.

10.1 Beschreibung des Gesamtsystems und dessen Funktionalität

Das Gesamtsystem entsteht durch die funktionale Kombination der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Komponenten. Deren Zusammenwirken mit den jeweiligen Größen an den Schnittstellen ist in Abb. 10.1 skizziert.

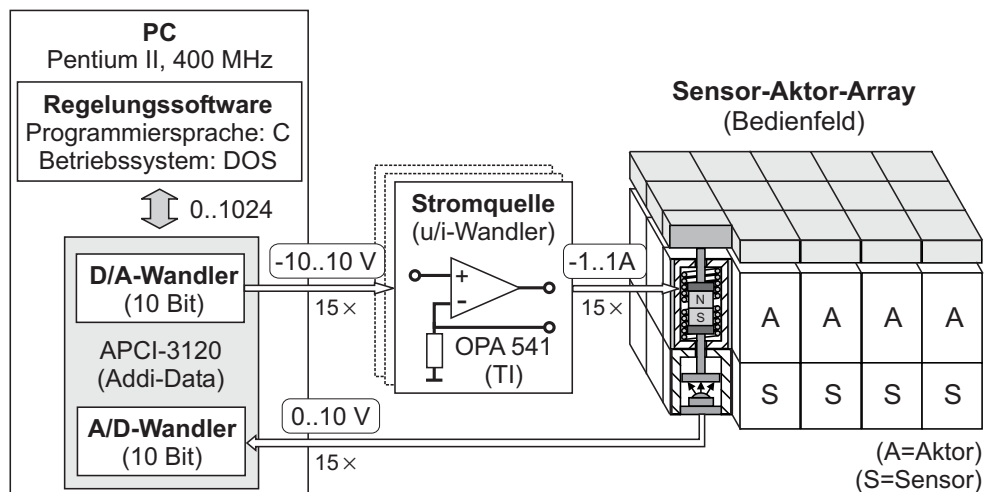


Abbildung 10.1: Schematische Darstellung der Einzelkomponenten und deren Zusammenwirken als Gesamtsystem.

Die zwei Hauptforderungen zur Gewährleistung der Funktionalität des HapKey-Feldes sind mit der *variablen Tastenkonfiguration* und der *haptischen Rückmeldung* erfüllt:

Variable Tastenkonfiguration

Die Grundlage zur Ermöglichung variabler Tastenkonfigurationen wird durch das Konzept gebildet, das Bedienfeld aus unabhängig voneinander auslenkbaren Einzelelementen zusammensetzen. Der Prototyp besteht aus 15 solcher Elemente mit je einer Grundfläche von $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Unterschiedlich große Tasten werden durch Gruppierung benachbarter Elemente realisiert, die durch eine Regelung stets auf gleicher Auslenkung gehalten werden. Einige exemplarische Tastenkonfigurationen sind in Abb. 10.2 gezeigt. In Abb. 10.3 ist zu sehen, wie sich alle Elemente einer Taste gleichförmig bewegen, obwohl nur einige der Elemente vom Finger tatsächlich niedergedrückt werden.

Somit ist das Bedienfeld zur Darstellung von Menüstrukturen geeignet, da die Anzahl, Größe und Lage der bereitgestellten Tasten variiert werden kann (vgl. Abschn. 4.2).

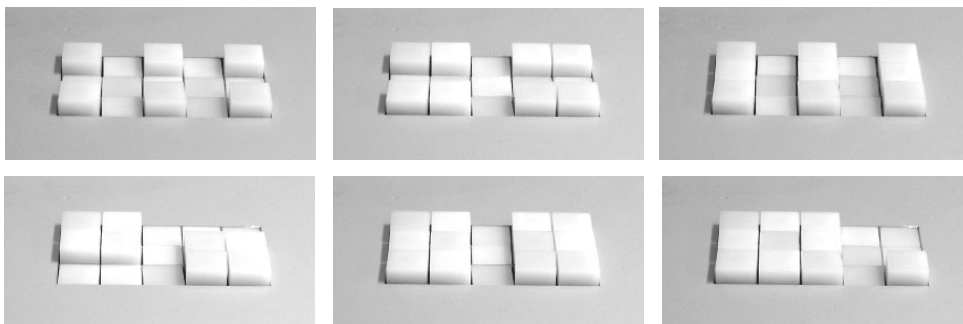


Abbildung 10.2: Unterschiedliche Konfigurationen des Bedienfeldes mit verschiedenen großen Tasten.

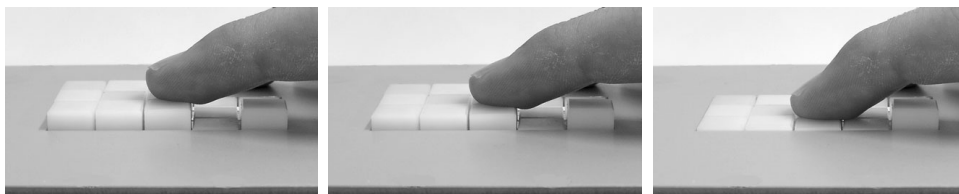


Abbildung 10.3: Gleichförmige Bewegung aller Elemente einer Taste.

Alle neun Elemente der Taste werden auf die gleiche Auslenkung eingeregelt. Somit entsteht der visuelle Eindruck einer zusammenhängenden Taste.

Haptische Rückmeldung

Die haptische Rückmeldung des Bedienfeldes ist durch mehrere Merkmale gekennzeichnet: Die Begrenzung der Tasten wird durch die taktile Reizerzeugung deren Kanten wahrgenommen. Auf kinästhetischem Weg spürt der Benutzer bei Tastenbetätigung die Bewegung über den Hub von 5 mm, ebenso wie die notwendige Betätigungskraft zur Überwindung des Schaltpunktes. Der Schaltpunkt wird durch die Kraft-Weg-Kennlinie charakterisiert, welche für jede Taste auf dem Bedienfeld einzeln einstellbar ist. So kann das Schaltverhalten individuell auf die Benutzer oder die anwählbaren Funktionen angepasst werden. Die Variabilität der Kennlinie ermöglicht auch die Realisierung von Tasten mit zwei Schaltpunkten, wie sie beispielsweise von Fotoapparaten bekannt sind: Leichtes Antippen (1. Schaltpunkt) führt zur Fokussierung, vollständiges Durchdrücken (2. Schaltpunkt) zum Auslösen.

Die maximale Betätigungskraft der auf dem Bedienfeld erzeugten Tasten beträgt ca. 1,5 N. Generell gilt bei Tasten, die sich aus mehreren Elementen zusammensetzen, dass die vom Benutzer aufzubringende Kraft zur Betätigung weitgehend unabhängig von der Anzahl der gleichzeitig berührten Elemente ist (s. Abschn. 10.2). Nur so kann der gleiche haptische Eindruck wie bei einer konventionellen mechanischen Taste entstehen: Unabhängig von der Größe der berührten Fläche auf der Taste herrscht der gleiche Kraftbedarf zur Überwindung des Schaltpunktes.

Um die genannten haptischen Eigenschaften des HapKey-Feldes zu verdeutlichen, werden in Abschn. 10.2 einige Messreihen vorgestellt und interpretiert.

10.2 Erprobungsergebnisse

Nachdem die Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten in den jeweiligen Kapiteln behandelt wurde, ist nun das Gesamtsystem zu beurteilen. Hierbei wird auf drei Aspekte eingegangen: Darstellung der Kraft-Weg-Kennlinie, Qualität der Positionsregelung und subjektive Beurteilung durch Benutzer. Diese Kriterien bewerten jeweils das Zusammenwirken der Komponenten Aktorik, Sensorik und Regelung als Gesamtsystem.

Darstellung der Kraft-Weg-Kennlinie

Zur quantitativen Untersuchung der vom Bedienfeld dargestellten Kraft-Weg-Kennlinien kommt ein speziell entwickelter Messaufbau zum Einsatz [67]. Wie

in Abb. 10.4 skizziert werden die Tasten des HapKey-Feldes mit einem Messkopf kontinuierlich niedergedrückt. Der Messkopf wird durch einen PC-gesteuerten Schrittmotor mit Spindelgetriebe verfahren. Dabei erfassen Sensoren die Position und die ausgeübte Kraft der Tasten. Der induktive Positionssensor [Fa. HBM, Typ W10K] weist eine Auflösung von ca. $10\ \mu\text{m}$ auf. Der Kraftsensor [Fa. HBM, Typ S2] arbeitet mit Dehnungsmessstreifen und ermöglicht eine Kraftbestimmung während des Messablaufes mit einer Auflösung von ca. $50\ \text{mN}$. Nach der Auswertung der Sensorsignale mit einem Brückenverstärker [Fa. HBM, Typ MGC mit Einschub AB12 und MC55] werden die Messwerte über eine 12-Bit A/D-Wandlung dem PC zugeführt. Hier findet die Signalauswertung und die Steuerung des Messplatzes unter LabView [Fa. National Instruments] statt.

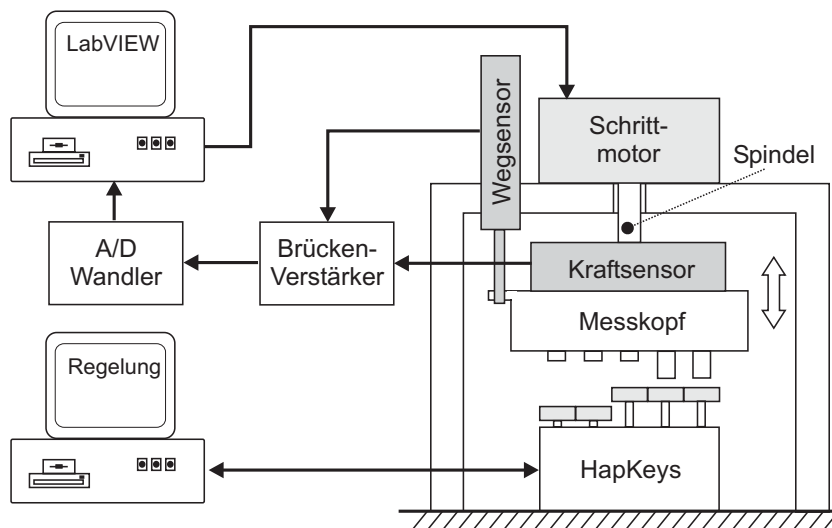


Abbildung 10.4: Schematischer Aufbau des Messplatzes zur Aufnahme der Kraft-Weg-Kennlinien.

Der Messkopf ermöglicht die Anzahl der gleichzeitig betätigten Elemente zu verändern. Konstruktiv ist dies durch manuelle Arretierung einzelner Messstifte in zwei unterschiedlichen Positionen verwirklicht (s. Abb. 10.5). Bei abgesenktem Messstift wird das darunter liegende Element des Bedienfeldes betätigt, bei angehobenem Messstift nicht. So kann überprüft werden, ob eine Taste unabhängig von der Anzahl der berührten Elemente den gleichen Kraftverlauf aufweist.

Im Verlauf des ersten Untersuchungsabschnitts stellt jedes Element als Einzeltaste die identische Kraft-Weg-Kennlinie dar und wird separat vermessen. Die Ergebnisse von fünf Betätigungsvorgängen und deren Mittelwert sind exemplarisch für ein Element in Abb. 10.6 dargestellt. Die Abweichung zur Soll-Kennlinie ist stets kleiner als $50\ \text{mN}$.

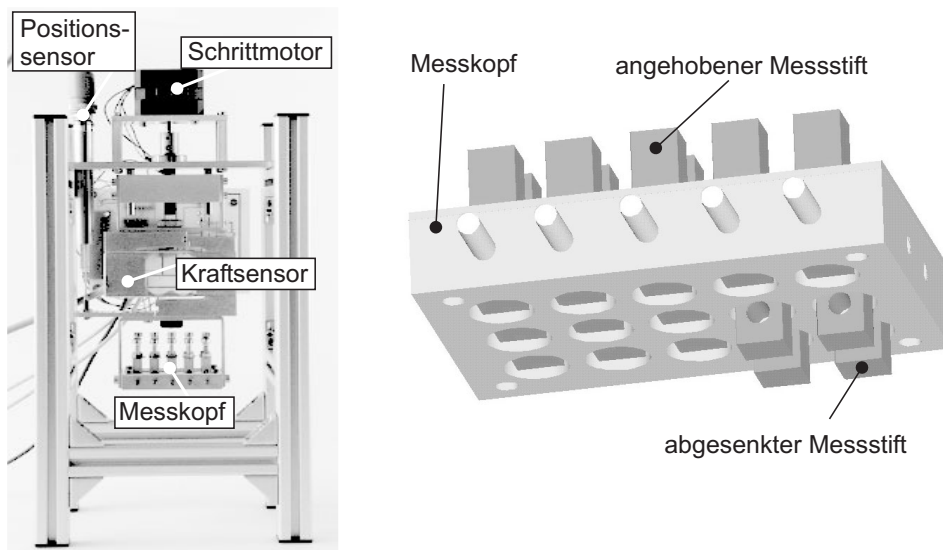


Abbildung 10.5: Bild des Messplatzes mit Messkopfdarstellung.
Links: Foto des Messaufbaus. Rechts: Vergrößerte Darstellung des Messkopfes mit angehobenen und abgesenkten Messstiften.

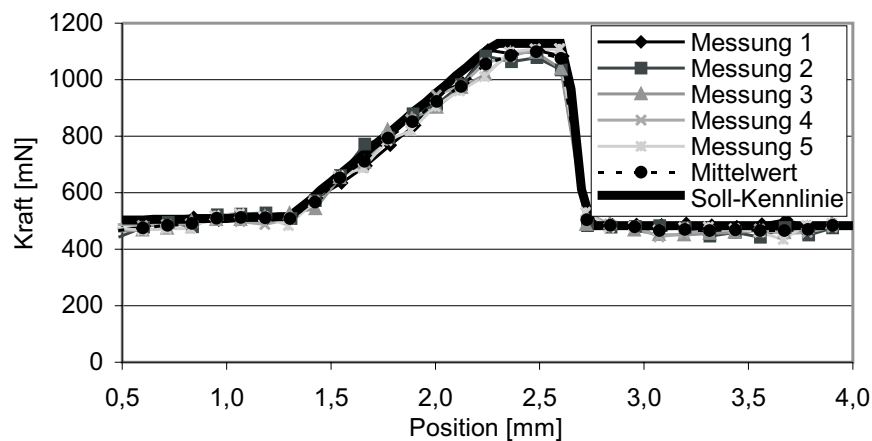


Abbildung 10.6: Gemessene Kraft-Weg-Kennlinie einer Taste bestehend aus einem Element.
Gezeigt sind fünf Messdurchgänge und deren Mittelwert.

Die präzise Wiedergabe einer vorgegebenen Kraft-Weg-Kennlinie wird auch durch Abb. 10.7 bestätigt. Hier sind im Vergleich zueinander die Messergebnisse aller 15 Elemente als Einzeltasten aufgetragen. Es handelt sich jeweils um die Mittelwerte aus fünf Messungen. Die Kraftverläufe weisen Unterschiede zwischen den Elementen bzw. zur vorgegebenen Soll-Kennlinie kleiner als 150 mN auf. Ursachen sind die leicht unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der einzelnen Elemente (Reibungen und Nachgiebigkeiten).

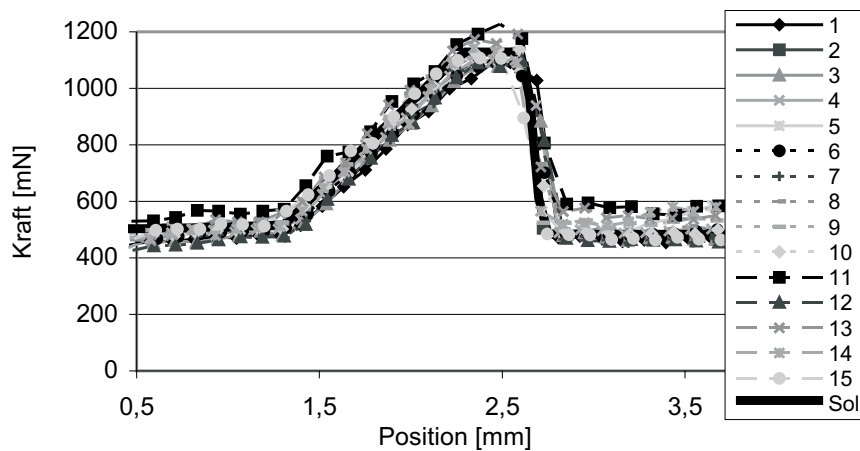


Abbildung 10.7: Gemessene Kraft-Weg-Kennlinien aller 15 Elemente des Bedienfeldes im Vergleich.

Aufgetragen ist die Mittelung aus jeweils fünf Messreihen. Jedes Element stellt eine eigenständige Taste mit identischer Soll-Kennlinie dar.

Zur Verdeutlichung der Vielfältigkeit der darstellbaren Kraft-Weg-Kennlinien sind in Abb. 10.8 die Messergebnisse bei unterschiedlichen Soll-Vorgaben für eine einelementige Taste gezeigt. Die Differenzen zu den Soll-Kennlinien und zwischen den einzelnen Messdurchgängen sind stets kleiner als 100 mN. Damit wird die Forderung nach einer Abweichung zwischen Soll- und Ist-Kennlinie von weniger als 200 mN (s. Kap. 6) erfüllt.

Interessant ist weiterhin die Vermessung der Kraft-Weg-Kennlinie einer größeren Taste bei Betätigung unterschiedlich vieler Elemente. Abb. 10.9 zeigt exemplarisch die Ergebnisse von einer Taste, die sich aus vier Elementen zusammensetzt. Es sind die Mittelwerte aus jeweils fünf Messreihen bei Betätigung von einem, zwei, drei und vier Elementen dargestellt. Bis zu drei Elementen ist eine gute Überdeckung mit der Soll-Kennlinie mit Abweichungen im Bereich von 100 mN vorhanden. Bei Betätigung aller vier Elemente ist in den kleinen Kraftbereichen eine deutlich größere Differenz zu erkennen. Der Grund dafür liegt in einer Besonderheit der Regelung:

Anfangs wiesen große Tasten bei Betätigung das Problem einer trägen Reaktion und großer Auslenkungsdifferenzen zwischen den einzelnen Elementen auf. Hierfür gilt folgende Ursache: Zur Positionsregelung hat jedes Element einen gewissen Kraftbedarf zur Beschleunigung der Masse und Überwindung der Gewichts- und Reibungskräfte. Der dafür fließende Spulenstrom dient also der Positionierung und führt noch nicht zu einer Kraftausgabe „nach außen“. Sum-

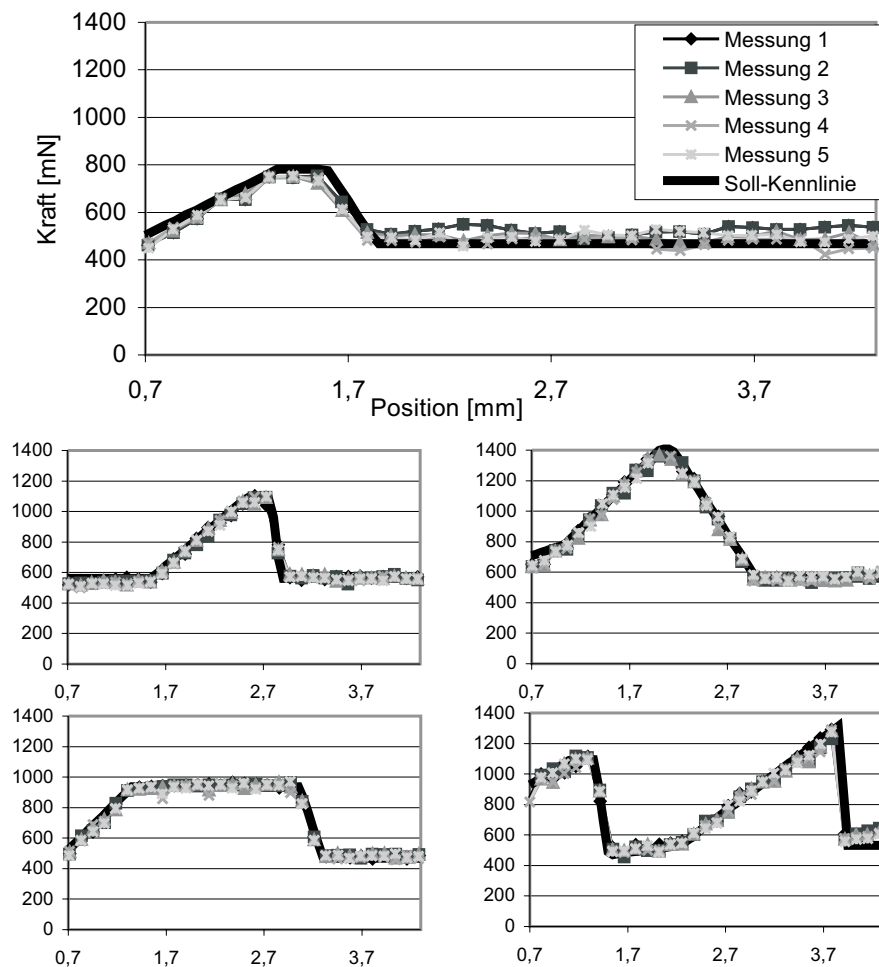


Abbildung 10.8: Darstellung unterschiedlicher Kraft-Weg-Kennlinien von einer einelementigen Taste.

Es sind jeweils die Ergebnisse von fünf Messreihen zu sehen.

miert man diese Ströme über eine größere Elementzahl auf, so berechnet sich für die Regelung bereits eine Ausgabekraft der Taste, obwohl die Elemente tatsächlich nur in ihre Soll-Position gebracht werden. Das Problem wurde weitgehend dadurch beseitigt, dass für die Kraftberechnungen nur Spulenströme herangezogen werden, die eine gewisse Grenze - hier ca. 100 mA - überschreiten. Anders ausgedrückt findet eine Art Unterscheidung zwischen berührten und unberührten Elementen statt. Ab 100 mA zählt ein Segment als berührtes Element, dessen Spulenstrom zur Kraftberechnung ausgewertet wird. Unter der Stromgrenze spielt das nur „mitgeführte“ Element keine Rolle für die Kraftausgabe.

Wenn mehrere Elemente gleichzeitig gedrückt werden, so teilt sich die ausgegebene Tastengesamtkraft entsprechend auf diese Elemente auf. Je größer die

Anzahl der berührten Elemente, desto geringer wird deren individuelle Ausgabekraft. Dies kann dazu führen, dass die oben erläuterte Stromgrenze bei einzelnen Elementen unterschritten wird und die von der Regelung berechnete Kraft geringer als die tatsächlich ausgegebene Kraft ist. Dieser Effekt ist in den Messreihen in Abb. 10.9 sichtbar. Für die praktische Anwendbarkeit des Bedienfeldes ist dieser Sachverhalt nur von geringer Bedeutung, da der Finger aufgrund der gewählten Elementgröße in der Regel nur ein oder zwei, maximal jedoch vier Elemente gleichzeitig betätigt. Die dabei entstehenden Kraftdifferenzen sind mit maximal 200-300 mN vertretbar. Wird bei einer zukünftigen Weiterentwicklung des Bedienfeldes die Elementgröße reduziert, so kann aufgrund der geringeren Masse und Reibung die oben angeführte Stromgrenze ebenfalls verringert werden. Damit sollte der haptische Eindruck durch die Berührung einer größeren Anzahl von Elementen voraussichtlich nicht negativ beeinträchtigt werden.

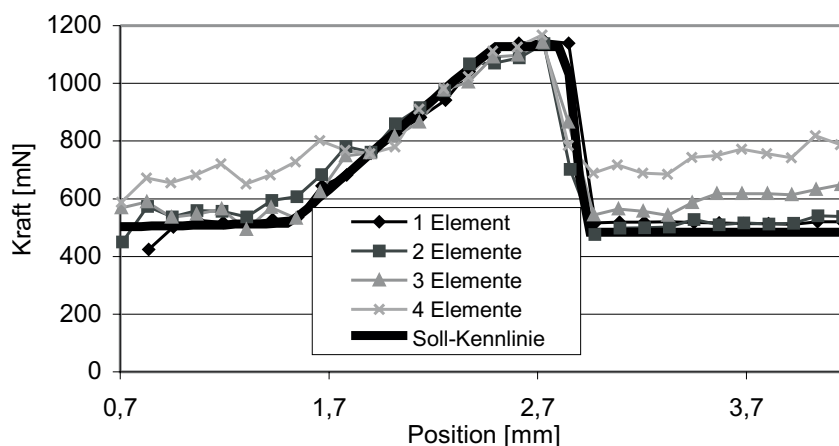


Abbildung 10.9: Messung der Kraft-Weg-Kennlinie einer Taste, die sich aus vier Elementen zusammensetzt.

Dargestellt sind die Mittelwerte von je fünf Messreihen bei Betätigung von einem, zwei, drei oder vier Elementen durch den Messkopf des Messplatzes.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Kraft-Weg-Kennlinien beliebiger Form von den Tasten des Bedienfeldes präzise wiedergegeben werden können. Der haptische Eindruck bei der Betätigung ist dabei in anwendungsnahen Fällen weitgehend unabhängig von der Größe der Berührungsfläche, also der Anzahl der berührten Elemente. Die Messergebnisse spiegeln die ausreichende Leistungsfähigkeit sowohl der Positionssensorik, als auch der Kraftberechnung aus dem Spulenstrom wieder und stützen somit die Entscheidungen bei der Sensorauswahl. Weiterhin wird das Konzept der Regelung bestätigt.

Qualität der Positionsregelung

Während des Betriebs der HapKeys stellen sich bei mehrelementigen Tasten trotz identischer Sollwertvorgabe Auslenkungsdifferenzen zwischen den einzelnen Elementen ein. Die Größe der Differenz zwischen Soll- und Ist-Position hängt von der Parameter-Einstellung der Positionsregelung ab. Sie beträgt bei der gewählten Parametrierung typischerweise weniger als 0,8 mm. Damit ist die Anforderung von 0,3 mm Regeldifferenz (s. Kap. 6) deutlich überschritten. Die existente Abweichung kann durch Anpassung der Regelparameter zur optimierten Positionsregelung mindestens um 50 % reduziert werden und läge mit 0,4 mm dann im Bereich der Forderung. Jedoch darf, wie in Abschn. 9.5 erwähnt, bei der Parameterwahl nicht nur die für die visuell gleichförmige Auslenkung verantwortliche Positionsregelung betrachtet werden. In besonderem Maße muss auch die Qualität der haptischen Rückmeldung Berücksichtigung finden. Der gewählte Kompromiss zwischen visueller und haptischer Güte führt zu Auslenkungsdifferenzen, die vom menschlichen Auge zwar wahrgenommen werden, jedoch aus zwei Gründen nicht den visuellen Eindruck einer ebenen Oberfläche und damit einer zusammenhängenden Taste ausschließt:

- Die Positionsdifferenz wächst mit zunehmender Tastenkraft an und ist somit am Schaltpunkt der Taste maximal. Diese Position wird während der Betätigung nur kurzzeitig eingenommen und schnell überwunden.
- Große Auslenkungsunterschiede entstehen nur zwischen berührten und unberührten Elementen einer Taste. Der Finger verdeckt jedoch in der Regel die Mehrzahl der berührten Elemente und somit auch den direkten Blick auf die kritischen Übergänge. Die typische Positionsdifferenz zwischen unberührten Elementen einer Taste liegt unter 0,25 mm und ist somit visuell unauffällig. Daher wird der optische Gesamteindruck einer zusammenhängenden Taste weitgehend aufrecht erhalten.

Subjektive Beurteilung durch Benutzer

Das Ziel des HapKey-Projektes ist die Entwicklung eines intuitiv verwendbaren Bedienfeldes. Daher ist neben der quantitativen Vermessung des Systems die subjektive Einschätzung von Nutzern entscheidend für die Gesamtbeurteilung des Ergebnisses. Zur Erfassung dieser individuellen Einschätzung wird eine Versuchsreihe in Kombination mit einem Fragebogen eingesetzt.

Während des Versuchs werden auf dem Bedienfeld unterschiedliche Tastenkonfigurationen dargestellt. Sowohl Tasten aus nur einem Element, als auch mehr-elementige Tasten werden dargeboten (s. Abb. 10.2). Zusätzlich weisen die Tasten unterschiedliche Schaltverläufe (Kraft-Weg-Kennlinien) auf. Die 20 Testpersonen können das Verhalten des Bedienfeldes ohne Zeitbegrenzung erproben und parallel dazu den Fragebogen ausfüllen. Die Auswertung der Befragung ist in Abb. 10.10 zusammengestellt. Folgende Aussagen sind aus den Ergebnissen ableitbar:

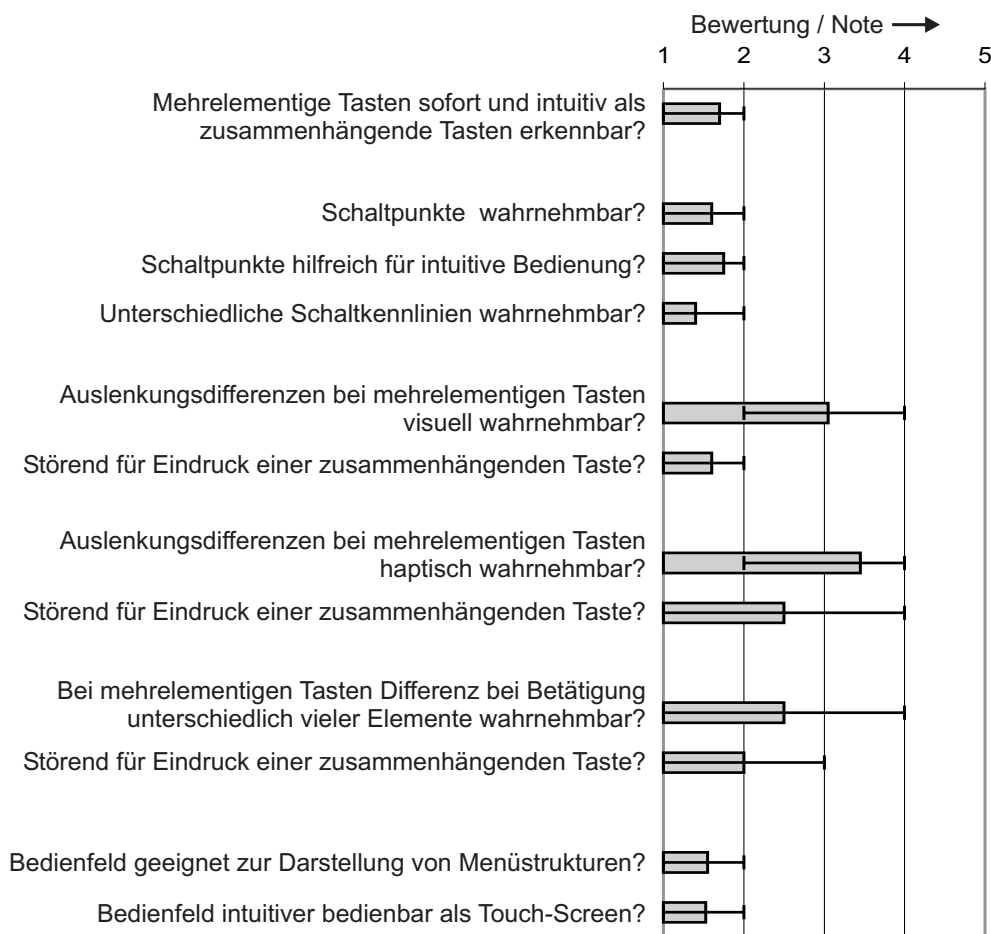


Abbildung 10.10: Auswertung der Fragebögen zur subjektiven Beurteilung der Nutzbarkeit des HapKey-Feldes.

Aufgetragen sind die Mittelwerte aller 20 Teilnehmeraussagen, sowie die Intervalle, in denen 70% aller Antworten liegen (15% der höchsten und niedrigsten Bewertungen unberücksichtigt). Bei der Punktvergabe entsprechen niedrige Werte guten Noten für das System HapKeys (sehr gut, nicht störend), entsprechend hohe Werte schlechten Noten (sehr schlecht, stark störend).

- Große Tasten werden trotz Zusammensetzung aus mehreren Einzelsegmenten intuitiv als zusammenhängende Bedienelemente erkannt.
- Die Schaltpunkte sind bei Tastenbetätigung eindeutig wahrnehmbar und bei unterschiedlichen Kraft-Weg-Kennlinien auch unterscheidbar. Der Nutzen dieser haptischen Rückmeldung für eine einfache und sichere Bedienung wird durch die einheitlich gute Bewertung bestätigt.
- Bei mehrelementigen Tasten sind Auslenkungsdifferenzen zwischen den einzelnen Elementen zwar visuell wahrnehmbar, stören den Gesamteindruck einer zusammenhängenden Taste jedoch nur wenig.
- Ähnliches gilt für die haptische Wahrnehmung der Auslenkungsdifferenzen. Die Höhenunterschiede zwischen den Elementen einer Taste sind deutlich ertastbar, beeinträchtigen den Gesamteindruck einer zusammenhängenden Taste jedoch individuell unterschiedlich stark. Dies wird durch die breite Streuung der Antworten gezeigt. Durchschnittlich belastet die haptisch wahrnehmbare Differenz den Gesamteindruck stärker als die visuelle Wahrnehmung.
- Wird die Anzahl der gleichzeitig berührten Elemente bei Betätigung einer mehrelementigen Tasten variiert, so entstehen nicht völlig identische haptische Eindrücke. Die Stärke der Wahrnehmungsdifferenz ist deutlich personenabhängig (große Streuung), führt aber allgemein nur zu einer geringen Beeinträchtigung des Gesamteindrucks einer zusammenhängenden Taste.

Dass die Anzahl der berührten Elemente den haptischen Eindruck beeinflusst, ist nach den quantitativen Vermessungen der Kraft-Weg-Kennlinien (s.o.) unerwartet. Ursache für die Wahrnehmungsdifferenz ist vermutlich das etwas trägere Regelverhalten bei gleichzeitiger Betätigung mehrerer Elemente.
- Das Bedienfeld ist gut zur Darstellung von Menüstrukturen mit Tasten unterschiedlicher Größe geeignet und einem Touch-Screen bezüglich der intuitiven Bedienbarkeit überlegen. Diese Aussagen wurden unter der Annahme getroffen, dass die Tasten auf dem HapKey-Feld beschriftet seien (s. Abschn. 10.3).

Die Auswertung der Fragebögen zeigt, dass das Bedienfeld die grundlegenden Zielstellungen auch bei der subjektiven Beurteilung durch Versuchspersonen erfüllt: Tasten variabler Größe mit deutlich wahrnehmbaren Schaltpunkten sind generierbar. Schwachstellen des geregelten Sensor-Aktor-Systems sind zwar wahr-

nehmbar, führen jedoch nicht zu einer kritischen Beeinträchtigung der Gesamtfunktion. Weiterhin muss beachtet werden, dass durch die Art der Fragestellungen die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen gezielt z.B. auf die Auslenkungsdifferenzen zwischen den Elementen gelenkt wurde. Im alltäglichen Betrieb sind Benutzer auf solche Details voraussichtlich weniger konzentriert. Dennoch gilt es bei einer zukünftigen Weiterentwicklung des Systems, die genannten Wahrnehmungs-Irritationen besonders zu beachten.

10.3 Resümee und Ausblick

Betrachtet man das geregelte Sensor-Aktor-Array als Gesamtsystem, so erfüllt es mit seiner Leistungsfähigkeit, wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben, den Großteil der gestellten Anforderungen. Durch die Bereitstellung von in Größe und Anzahl flexibel konfigurierbaren Tasten wird mit dem HapKey-Feld eine menübasierte Bedienung technischer Geräte ermöglicht. Die bei Tastenbetätigung spürbare Kraft-Weg-Kennlinie z.B. in Form eines „Schaltknacks“ garantiert die für eine intuitive Bedienbarkeit notwendige haptische Rückmeldung.

Bei dem realisierten Prototyp der HapKeys ist aufgrund der geringen Anzahl von 15 Elementen die freie Konfigurierbarkeit des Bedienfeldes eingeschränkt. Zukünftiges Ziel ist es, die Anzahl der Elemente zu steigern und dabei deren Abmessungen möglichst zu reduzieren. Anzustreben sind mindestens 100 Elemente mit einer lateralen Ausdehnung von $5 \times 5 \text{ mm}^2$. Ideal wäre eine Verkleinerung auf $1 \times 1 \text{ mm}^2$, denn die Vielfalt der darstellbaren Tasten-Formen wächst antiproportional zu der Elementgröße. Könnten Abmessungen ähnlich der Pixelgröße bei TFT-Bildschirmen erreicht werden (man spräche dann von Taxeln), wäre ein nahezu frei programmierbares Tastfeld möglich. Solche Aufbauten sind sinnvollerweise nur mit Technologien zur zeitlich parallelen Herstellung aller Elemente (Batch-Prozess) zu realisieren. Aufgrund der geforderten Abmessungen und Toleranzen bieten sich Technologien der Mikrosystemtechnik an. Problematisch ist jedoch, dass auch bei reduzierten Elementabmessungen ein Aktorhub von mindestens 3 mm erreicht werden muss, um zur haptischen Reizung ausreichend große Tastenbewegungen zuzulassen. Bisher erfolgreich umgesetzte Aktoren mit Mikrotechnologien weisen in der Regel deutlich geringere Hübe auf. Vielversprechend erscheint die Technik von elektrostatischen Aktoren mit elastischem Dielektrikum (s. Abschn. 7.1). Hierbei wird eine dünne Silikonschicht beidseitig und flächig mit nachgiebigen Elektroden kontaktiert. Das Anlegen einer elektri-

schen Spannung führt zu einer Kontraktion einer Einzelschicht bis zu 30 % der Schichtdicke [84]. Stapelt man eine Vielzahl solcher Schichten aufeinander, sind entsprechend große Hübe erzielbar. Die laterale Strukturierung erfolgt durch eine Maskierung beim Aufbringen der Elektroden und ermöglicht eine Strukturbreite von 0,1 - 0,5 mm. Die Technologie zur Fertigung solcher Aktorstapel befindet sich noch im Forschungsstadium [47]. Vorläufige Ergebnisse weisen eine Auslenkung von 2 % der Aktordicke und eine Kraftausgabe pro Fläche von maximal 5 N/cm^2 auf [46]. Durch Prozessoptimierung wird eine Dehnung im Bereich von 10 % für gestapelte Aktorschichten erwartet. Das Aktorprinzip bietet zusätzlich einen Ansatz für eine integrierte Positionsmessung durch Kapazitätsauswertung der Aktorschichten.

Soll ein optimiertes HapKey-Feld erneut mit konventioneller Feinwerktechnik hergestellt werden, kann zur Lagerung der Translatoren statt Kugelbuchsen der Einsatz von ferrofluidischem Material geprüft werden. Hierbei wird eine Suspension mit ferromagnetischen Partikeln im Stator der Anordnung durch ein Magnetfeld „fixiert“. Dieses Ferrofluid umfließt den Translator und sorgt für eine Führung mit geringer Reibung [24].

Bei einer Erweiterung der Elementzahl des Bedienfeldes ist die Umsetzung der Regelung nochmals zu prüfen. In der momentanen Realisierung wird jedes Sensor-Aktor-System kontinuierlich geregelt, so dass mit deren Anzahl auch der Bedarf an Rechenleistung für die digitale Regelung wächst. Effektiver ist bei großer Elementzahl daher ein Konzept, in welchem nur die Elemente der aktuell betätigten Taste geregelt werden. Alle anderen Elemente werden am oberen oder unteren Endanschlag z.B. durch einen konstanten Spulenstrom fixiert. Somit wird die Anzahl der gleichzeitig geregelten Systeme reduziert, und damit ebenso die notwendige Leistung der Regelungs-Hardware und deren Peripherie. Jedoch muss für dieses Konzept die Berührung von Tasten detektiert werden, beispielsweise anhand der Auslenkung der Elemente.

Ein in der bisherigen Projektbeschreibung noch nicht behandelter Aspekt ist die Beschriftung der Tasten auf dem Bedienfeld. Da sich die Tastenkonfiguration auf dem Bedienfeld verändern kann, muss auch die Tastenbeschriftung variabel ausgelegt werden. Andernfalls kann dem Benutzer nicht die aktuelle Funktion der einzelnen Tasten angezeigt werden. Der vorgestellte Prototyp weist keine Vorrichtung zur Beschriftung auf, da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der haptischen Komponente der Mensch-Maschine-Schnittstelle liegt. Dennoch sollen im Folgenden die unterschiedlichen Möglichkeiten der Tastenbeschriftung diskutiert werden:

- Anordnung von optischen Displays an den Rändern des Bedienfeldes: Ordnet man LC- oder TFT-Displays an den Rändern des Bedienfeldes an, so können die Funktionen der Tasten in deren unmittelbarer Nähe dargestellt werden. Eine Zuordnung zwischen Beschriftung und Taste ist jedoch nur möglich, solange sich alle Tasten in Randnähe des Bedienfeldes befinden. Diese Lösung eignet sich daher nur für kleine Bedienfelder.
- Integration von optischen Displays in den Kappen der Elemente: Die Miniaturisierung von LC- oder TFT-Displays lässt bei entsprechender Elementgröße eine direkte Montage in die Tasten-Kappen zu (s. Fa. NKK SWITCHES [79]). Wird eine Taste aus mehreren Elementen gebildet, so kann deren Funktion auf der Gruppe der Kappen visualisiert werden. Nachteilig ist neben dem hohen konstruktiven und elektrischen Aufwand die Notwendigkeit einer mitzubewegenden Kontaktierung.
- Bildprojektion auf die Bedienfeldoberfläche: Eine frei gestaltbare visuelle Information kann auf dem Bedienfeld unter Verwendung einer Bildprojektion erreicht werden. Diese Lösung ist jedoch konstruktiv und finanziell kaum praktikabel, da ein Projektor mit einem gewissen Abstand zum Bedienfeld montiert werden müsste. Zusätzlich entsteht das Problem des Schattenschwurfs, wenn der Benutzer in den Strahlengang des Projektors eindringt.
- Bespannung des Bedienfeldes mit mechanisch hochflexiblen optischen Displays: Die eleganteste und technisch sinnvollste Lösung kann mit dünnen, hochflexiblen Display-„Folien“ erreicht werden. Solche Komponenten sind zur Zeit noch nicht verfügbar, befinden sich jedoch in der Entwicklung [39][54][57][63]. Wird das gesamte Bedienfeld mit einem solchen optischen Display bespannt, kann an jeder beliebigen Position eine visuelle Information dargestellt werden. Bei Veränderung der Menükonfiguration kann sich das Display elastisch mit den einzelnen Elementen nach oben oder unten mitbewegen. Ein weiterer Vorteil wäre das geschlossene Erscheinungsbild des Bedienfeldes, da durch die Überspannung der Aufbau aus einzelnen Elementen nicht mehr erkennbar ist.

Da diese optimale Lösung momentan noch nicht realisiert werden kann, wurde auf die Beschriftung der Tasten des HapKey-Feldes bisher vollständig verzichtet. Eine Umsetzung durch dünne, hochflexible optische Displays sollte in Zukunft jedoch möglich sein [106].

Betrachtet man das System HapKeys in seiner Gesamtheit, so kann abschließend eine erfolgreiche Realisierung des neuartigen Bedienkonzeptes festgehalten

werden. Als Prototyp weist das System zwar erwartungsgemäß Optimierungspotenzial auf, liefert jedoch den Beweis der prinzipiellen Umsetzung und Zweckmäßigkeit, was als eigentliches Projektziel zu verstehen ist. Dies rechtfertigt auch den großen mechanischen, elektrischen und regelungstechnischen Aufwand zur Verwirklichung eines Eingabefeldes mit nur 15 Elementen.

Der Prototyp (s. Abb. 10.11) erfüllt alle wesentlichen Anforderungen, die an das Bedienfeld aus der Konzeptableitung gestellt wurden. Er kann zukünftig als Experimentierfeld zur Überprüfung von haptischen Anforderungen und der Auswirkungen bei Variation wichtiger Entwurfparameter eingesetzt werden. Vor allem jedoch wurde gezeigt, wie ein flexibel konfigurierbares Eingabefeld zur Darstellung von Menüstrukturen auch unter Berücksichtigung der haptischen Anforderungen für intuitive Nutzbarkeit realisiert werden kann.

Zusammenfassung:

Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems „HapKeys“ weist alle Merkmale zur Bestätigung des Bedienkonzeptes auf. Tasten variabler Anzahl und Größe sind auf dem Bedienfeld darstellbar. Zur haptischen Rückmeldung werden bei Tastenbetätigung Kraft-Weg-Kennlinien erzeugt, die von den eingestellten Soll-Kennlinien typischerweise weniger als 150 mN abweichen. Neben den quantitativen Vermessungen diente der Prototyp zur Ermittlung subjektiver Beurteilungen. Versuche mit Testpersonen zeigten die intuitive Nutzbarkeit des Bedienfeldes auf. Abschließend wurde das Entwicklungspotenzial zur Weiterführung und Verbesserung des Projektes dargelegt.

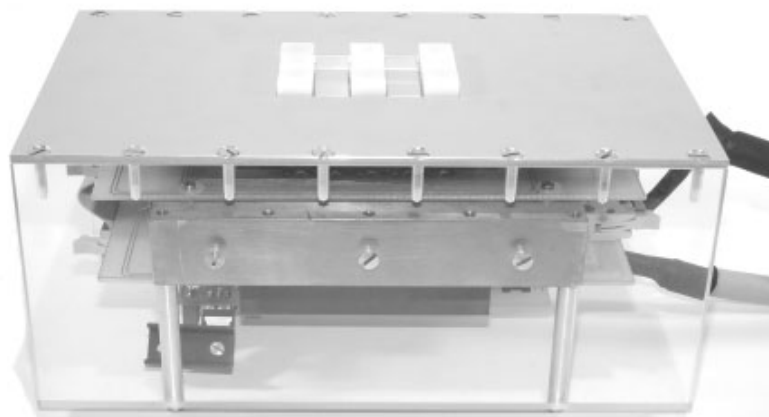


Abbildung 10.11: Gesamtansicht des HapKey-Bedienfeldes.

11 Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Konzeptbildung und Realisierung eines neuartigen Eingabefeldes für technische Geräte. Es zeichnet sich durch eine flexibel konfigurierbare Erscheinungsform und angemessene haptische Reizung für intuitive Nutzbarkeit aus. Folgende Forschungsschwerpunkte stehen bei der Arbeit im Vordergrund:

- Erarbeitung und Schwachstellenanalyse des Stands der Technik von Bediensystemen für komplexe technische Geräte.
- Ableitung eines neuartigen Konzeptes für variabel konfigurierbare Eingabesysteme mit haptischer Rückmeldung.
- Ingenieurwissenschaftliche Betrachtung des haptischen Sinneskanals und dessen Stellenwert für intuitive Handlungsabläufe. Definition der haptischen Mensch-Maschine-Schnittstelle durch eine umfangreiche Zusammenstellung quantitativer technischer Merkmale beruhend auf Ergebnissen einer Literaturrecherche und eigenen Experimenten.
- Systematische Entwicklung des elektromechanischen Gesamtsystems zur Umsetzung des Konzeptes. Auswahl geeigneter Aktoren, Sensoren und Regelungsalgorithmen mit anschließender Festlegung der Entwurfsparameter der Teilkomponenten.
- Realisierung der Ergebnisse als Prototyp eines Bediensystems.
- Experimentelle Erprobung und Charakterisierung des Eingabefeldes zum Nachweis der Zweckmäßigkeit der vorgeschlagenen Lösung.

Motivation

Der Umgang mit technischen Geräten nimmt in allen Lebensbereichen zu. Der gleichzeitig ansteigende Funktionsumfang dieser Geräte macht deren Mensch-Maschine-Schnittstelle zu einem entscheidenden Produktmerkmal. Menübasierte Bedienkonzepte sind zukunftsweisend, da hier die Funktionsvielfalt übersichtlich

zur Auswahl gestellt werden kann. Für Menüstrukturen sind geeignete Eingabefelder mit Bedienelementen variabel in Anzahl und Größe erforderlich. Touch-Screens erfüllen diese Anforderungen, geben dem Benutzer jedoch keine angemessene haptische Rückmeldung, also keine auswertbare Information an den Tastsinn. Er wurde gezeigt, dass für eine intuitive Bedienung durch unterbewusste Handlungsabläufe die haptische Reizung jedoch von großer Bedeutung ist. Ziel ist daher die Entwicklung eines neuartigen Bedienkonzeptes, welches flexibel konfigurierbare Tasten ermöglicht, deren Begrenzungen, Bewegungen und Schaltpunkte bei Betätigung haptisch zu spüren sind.

Konzept

Das Eingabefeld „HapKeys“ setzt sich aus matrixförmig angeordneten Einzelementen zusammen, die im passiven Zustand eine ebene Oberfläche bilden. Jedes Element ist individuell in vertikaler Richtung auslenkbar. Durch gezielte Ansteuerung können sich somit Tasten aus der Ebene hervorheben. Unterschiedlich große Tasten werden durch Gruppierung benachbarter Elemente umgesetzt. Diese müssen sich stets gleichförmig bewegen, um den visuellen Eindruck einer zusammenhängenden Taste aufrecht zu erhalten. Weiterhin ist dem Benutzer bei Tastenbetätigung ein wahrnehmbarer Schaltpunkt als haptische Rückmeldung zu vermitteln. Die Betätigungskraft muss bei mehrelementigen Tasten unabhängig von der Anzahl der gleichzeitig berührten Elemente sein.

Umsetzung

Um die genannte Funktionalität des neuen Bedienkonzeptes zu verwirklichen, muss jedes Element des Tastfeldes als geregeltes Sensor-Aktor-System ausgelegt werden. Zur Festlegung der Anforderungen an die einzelnen Komponenten wurden als Ergebnis einer Literaturrecherche quantitative technische Merkmale für *haptische Displays* zusammengestellt. Solche Displays stellen gezielt dem menschlichen Tastsinn Informationen dar. Die exakten Spezifikationen hängen jedoch vom speziellen Anwendungsfall ab. Daher wurden Voruntersuchungen mit einem Tastensimulator durchgeführt, dessen Kraftverlauf bei Betätigung (Kraft-Weg-Kennlinie) variabel einstellbar ist. Die Ergebnisse besagen, dass sprunghafte Änderungen der dem Finger entgegenwirkenden Tastenkraft bis zu 100 mN nicht wahrnehmbar sind. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die Benutzer individuell sehr unterschiedliche Erwartungen an den Kraftverlauf von intuitiv und angenehm bedienbaren Tasten haben.

Der Prototyp des Eingabefeldes wird zur Begrenzung des mechanischen und elektrischen Aufwandes mit nur 15 Elementen von je $1 \times 1 \text{ cm}^2$ Grundfläche ausgelegt. Eine solche Anordnung ermöglicht zum Funktionsbeweis eine ausreichende Anzahl darstellbarer Tastenkonfigurationen.

Aktorik

Aus unterschiedlichen Aktorprinzipien wurde für diesen Anwendungsfall das elektrodynamische Wirkprinzip ausgewählt. Es zeichnet sich durch Kräfte und Stellwege im geforderten Bereich, die Unabhängigkeit der Kraft von der Auslenkung, die Linearität zwischen Kraft und Spulenstrom und durch die feinwerktechnische Realisierbarkeit aus. Der schematische Aufbau besteht aus zwei feststehenden Spulen und einem auslenkbaren Permanentmagnet. Somit werden bewegliche Kabelzuführungen vermieden.

Der Magnetkreis der einzelnen Elemente wurde zunächst analytisch betrachtet, um die Abhängigkeit der Aktorkraft von der geometrischen Dimensionierung zu erkennen. Dabei ist auch das thermische Verhalten bei Bestromung der Aktorspulen untersucht worden. Die qualitativen Feldverläufe von FEM Simulationen wurden zur Ableitung konstruktiver Details ausgewertet.

Die realisierten Aktoren weisen bei einem Bauraum von $10 \times 10 \times 35 \text{ mm}^3$ eine Maximalkraft von ca. 1,5 N und einen Stellweg von 5 mm auf. Die Anforderungen werden damit erfüllt. Der lineare Zusammenhang zwischen Spulenstrom und Aktorkraft zeigt eine geringe Abhängigkeit von der Translatorposition als systematischen und damit korrigierbaren Fehler auf. An einer konstanten Position beträgt die absolute Linearitätsabweichung ca. 20 mN.

Sensorik

Nach Bewertung unterschiedlicher Sensorprinzipien fiel die Entscheidung auf den Einsatz von Reflexlichtschranken zur Positionsmessung der einzelnen Tastenelemente. Sie bieten eine hohe Genauigkeit bei niedrigen Kosten, kleinen Abmessungen, geringer Komplexität der Signalauswertung und günstigen Applikationsmöglichkeiten für die gewählte Aktorkonstruktion. Die erreichte Auflösung der Positionssensorik liegt für den Messbereich von 5 mm zwischen 5 und $35 \mu\text{m}$.

Zur Bestimmung der ausgeübten Aktorkraft wird wegen Fehlens geeigneter Kraftsensoren auf den linearen Zusammenhang zwischen Spulenstrom und Kraft des elektrodynamischen Wirkprinzips zurückgegriffen. Aus der Steuergröße Strom wird rechnerisch auf die Ausgangsgröße Kraft geschlossen.

Regelung

Die Regelung verknüpft die aktorischen und sensorischen Komponenten zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem. Sie hat zwei Aufgaben: Zum einen müssen die Elemente, die zu einer größeren Taste gruppiert werden sollen, gleichförmig bewegt werden. Zum anderen ist dem Benutzer bei Tastenbetätigung eine Kraft-Weg-Kennlinie (spürbarer Schaltpunkt) zu vermitteln.

Die Realisierung erfolgt mit einem Konzept, das für jedes Sensor-Aktor-Element eine eigenständige Positionsregelung (PID-Regler) mit übergeordneter Sollwert-Vorgabe vorsieht. Größere Tasten werden generiert, indem die zugehörigen Elemente stets auf die gleiche Auslenkung eingeregelt werden. Die Kraft-Weg-Kennlinien werden mit Hilfe der Sollpositions-Vorgabe realisiert: Aus den Spulenströmen der Elemente kann auf die ausgeübte Tastenkraft, die der aktuell anliegenden Fingerkraft entspricht, geschlossen werden. Diese Kraft wird mit der Soll-Kraft, welche nach der Kraft-Weg-Kennlinie an der aktuellen Tastenposition vorherrschen sollte, verglichen. Entsprechend der Kraftdifferenz wird die Sollwertvorgabe für die Positionsregelung nach oben oder unten korrigiert. Dadurch bewegt sich die Taste auf- oder abwärts.

Die Umsetzung der Regelung erfolgt digital auf einem PC mit AD/DA-Wandlerkarten. Die Regelschleife wird mit ca. 6 kHz durchlaufen.

Gesamtsystem

Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems „HapKeys“ weist alle Merkmale zur Bestätigung des Bedienkonzeptes auf. Tasten variabler Anzahl und Größe sind auf dem Eingabefeld darstellbar. Zur Generierung der haptischen Rückmeldung sind bei Tastenbetätigung Kraft-Weg-Kennlinien spürbar. Der Verlauf der Kennlinien ist frei programmierbar und wird mit einer Abweichung von typischerweise weniger als 150 mN wiedergegeben. Bei mehrelementigen Tasten ist der haptische Eindruck in anwendungsnahen Fällen weitgehend unabhängig von der Anzahl der gleichzeitig berührten Elemente.

Bei der Parametrierung der PID-Regler muss ein Kompromiss zwischen der Güte der Positionsregelung (verantwortlich für das visuelle Erscheinungsbild bei mehrelementigen Tasten) und der haptischen Reizung (verantwortlich für die intuitive Rückmeldung) eingegangen werden. Da der haptische Eindruck in diesem Projekt im Vordergrund steht, wurde zu dessen Gunsten bei der Parametereinstellung eine Auslenkungsdifferenz zwischen den Elementen einer Taste von maximal 0,8 mm akzeptiert. Aus der Erfahrung dieses Projektes kann allgemein für

haptische Displays in der Prototypenphase die Verwendung eines Reglers mit veränderbarem Verhalten empfohlen werden. So kann in praktischen Versuchen der haptische Eindruck durch Variation der Reglereigenschaften optimiert werden.

Die subjektive Beurteilung durch Versuchspersonen zeigte die intuitive Nutzbarkeit des Bedienfeldes auf. Die Auswertung der Aussagen ergab, dass einige Schwachstellen, wie z.B. Auslenkungsdifferenzen zwischen Elementen, zwar wahrnehmbar sind, jedoch den Gesamteindruck einer zusammenhängenden Taste nicht kritisch beeinträchtigen.

Ausblick

Die Umsetzung des Bedienkonzeptes zeigt die prinzipielle Realisierbarkeit eines Eingabefeldes, das variabel konfigurierbare Tasten mit angepasster haptischer Rückmeldung aufweist. Anwendungsfälle für solche Bedienfelder sind in technischen Einrichtungen zu sehen, die trotz umfangreichem Funktionsangebot intuitive Handhabung ermöglichen sollen. Beispielsweise ist in Kraftfahrzeugen aufgrund der hohen visuellen Belastung die Verwendung von Eingabefeldern ohne haptische Rückmeldung wie Touch-Screens unangemessen. Hier ist die verstärkte Nutzung des haptischen Sinneskanals zur Informationsübermittlung wünschenswert.

Zur Weiterführung des Projektes ist zunächst die Beschriftung der Tasten auf dem Eingabefeld zu realisieren, welche bisher noch nicht verwirklicht werden konnte. Darüber hinaus wäre es erstrebenswert, die Anzahl der Elemente zu steigern und deren Abmessung zu reduzieren. Dafür ist der Einsatz anderer Aktorprinzipien und Herstellungsverfahren, z.B. durch Mikrotechnologien im Batch-Prozess, zu prüfen.

Resümee

Aufbauend auf einer Analyse aktueller Bediensysteme für technische Geräte wurde ein neuartiges Bedienkonzept abgeleitet und systematisch umgesetzt. Die Bedeutung einer haptischen Rückmeldung und die daraus folgenden technischen Anforderungen für die Mensch-Maschine-Schnittstelle wurden für diesen Zweck erarbeitet.

Praktisches Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist die erstmalige Entwicklung eines flexibel konfigurierbaren Eingabefeldes mit haptischer Rückmeldung als Basis zur intuitiven Gerätebedienung. Der Prototyp konnte die Zweckmäßigkeit der vorgeschlagenen Lösung bestätigen.

A Aktordimensionierung

Entsprechend den Ausführungen und Randbedingungen aus Kap. 7 gelten die folgenden Zusammenhänge (Geometrie nach Abb. A.1):

$$F = B_0 \cdot i \cdot l$$

$$\text{mit } d_{\text{Sp}_a} = \sqrt{d_{\text{RS}_a}^2 - d_{\text{M}}^2} = f(d_{\text{M}})$$

$$d_{\text{PS}} = d_{\text{M}} + \Delta d = f(d_{\text{M}})$$

$$d_{\text{Sp}_i} = d_{\text{M}} + 2 \cdot \Delta d = f(d_{\text{M}})$$

$$B_0 = B_{\text{M,max}} \cdot \left(\frac{A_0}{S \cdot A_{\text{M}}} + a_{\text{M}} \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \frac{l_0}{h_{\text{M}}} \right)^{-1}$$

$$\begin{aligned} A_0 &= h_{\text{PS}} \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{Sp}_a} + d_{\text{PS}}}{2} \quad (\text{gemittelt}) \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot h_{\text{PS}} \left(\sqrt{d_{\text{RS}_a}^2 - d_{\text{M}}^2} + d_{\text{M}} + \Delta d \right) = f(d_{\text{M}}, h_{\text{PS}}) \end{aligned}$$

$$A_{\text{M}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{M}}^2 = f(d_{\text{M}})$$

$$\begin{aligned} l_0 &= \frac{d_{\text{Sp}_a} - d_{\text{PS}}}{2} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{d_{\text{RS}_a}^2 - d_{\text{M}}^2} - (d_{\text{M}} + \Delta d) \right) = f(d_{\text{M}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l &= 2 \cdot k_0 \cdot \overline{l_{\text{Wi}}} \\ &= 2 \cdot A_{\text{Sp},0} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot \overline{d_{\text{Wi}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \cdot \frac{d_{Sp_a} - d_{Sp_i}}{2} \cdot h_{PS} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot \frac{d_{Sp_a} + d_{Sp_i}}{2} \\
&= \frac{\pi}{2} \cdot \gamma \cdot h_{PS} \cdot ((d_{RS_a}^2 - d_M^2) - (d_M + 2 \cdot \Delta d)^2) = f(d_M, h_{PS})
\end{aligned}$$

Setzt man diese Gleichungen ineinander ein, so ergibt sich:

$$\begin{aligned}
F &= \frac{\pi}{2} \cdot B_{M,max} \cdot i \cdot \gamma \cdot \frac{d_{Sp_a}^2 - d_{Sp_i}^2}{\frac{2 \cdot (d_{Sp_a} + d_{PS})}{S \cdot d_M^2} + \frac{a_M \cdot (d_{Sp_a} - d_{PS})}{\mu_0 \cdot h_M \cdot h_{PS}}} \\
&= \frac{\pi}{2} \cdot B_{M,max} \cdot i \cdot \gamma \cdot \frac{d_{RS_a}^2 - d_M^2 - (d_M + 2 \cdot \Delta d)^2}{\frac{2 \cdot (\sqrt{d_{RS_a}^2 - d_M^2} + d_M + \Delta d)}{S \cdot d_M^2} + \frac{a_M \cdot (\sqrt{d_{RS_a}^2 - d_M^2} - d_M - \Delta d)}{\mu_0 \cdot h_M \cdot h_{PS}}} \\
&= \frac{\pi}{2} \cdot B_{M,max} \cdot i \cdot \gamma \cdot \frac{G1}{G2 + \frac{G3}{h_M \cdot h_{PS}}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{mit } G1 &= (d_{RS_a}^2 - d_M^2) - (d_M + 2 \cdot \Delta d)^2 = f(d_M) \\
G2 &= \frac{2}{S \cdot d_M^2} \cdot (\sqrt{d_{RS_a}^2 - d_M^2} + d_M + \Delta d) = f(d_M) \\
G3 &= \frac{a_M}{\mu_0} \cdot (\sqrt{d_{RS_a}^2 - d_M^2} - d_M - \Delta d) = f(d_M)
\end{aligned}$$

Bis auf d_M , h_M und h_{PS} sind alle Größen festgelegt:

$$\begin{aligned}
B_{M,max} &= 1,2 \text{ T} \\
a_M &= 1,311 \cdot 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \\
i &\leq 1 \text{ A} \\
\gamma &\approx 30 \text{ mm}^{-2} \\
d_{RS_a} &= 10 \text{ mm} \\
\Delta d &= 0,5 \text{ mm} \\
S &= 0,8 \quad [65]
\end{aligned}$$

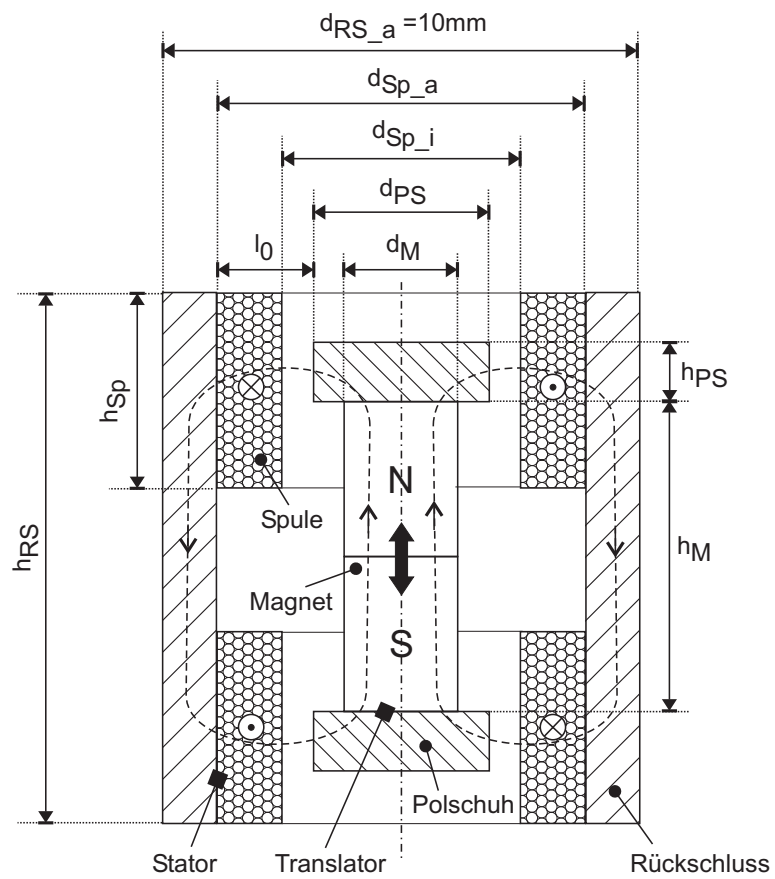


Abbildung A.1: Geometrie des rotationssymmetrischen Aktors.

Literaturverzeichnis

- [1] BABER, C.; FAINT, M.; WALL, S.; WING, A. M. (Hrsg.): *Conference Proceedings of Eurohaptics 2001*, Birmingham, U.K., 2001.
- [2] BAR-COHEN, Y. (Hrsg.): *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles*. SPIE Press, Bellingham, Washington, 2001.
- [3] BARFIELD, W.; FURNESS, T. A. (Hrsg.): *Virtual Environments and Advanced Interface Design*. Oxford University Press, New York, 1995.
- [4] BAUMANN, K.; LANZ, H.: *Mensch-Maschine-Schnittstelle elektronischer Geräte*. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [5] BAUMANN, R.: *Haptic Interface for Virtual Reality Based Laparoscopic Surgery Training Environment*. Dissertation Nr. 1734, Département de Microtechnique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1997.
- [6] BERGAMASCO, M.: *Haptic Interfaces: The Study of Force and Tactile Feedback Systems*. Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, S. 15–20, 1995.
- [7] BLUME, H.-J.; BOELCKE, R.: *Mechanokutane Sprachvermittlung*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Fortschritt-Bericht Nr. 137, Reihe 10: Informatik/Kommunikationstechnik, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [8] BROOKS, T. L.: *Telerobotic Response Requirements*. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, S. 113–120, 1990.
- [9] BUBB, H.; SCHMIDTKE, H.: *Systemergonomie*. Kap. 5, S. 305–458. In: SCHMIDTKE, H. [95], 1993.
- [10] BÜHLMANN, A.: *Der Lack ist die Lösung - Eingabesysteme mit Piezoleistung zum Preis von Membranschaltern*. Elektronik Praxis, Nr. 6, S. 74–77, Vogel Industrie Medien, Würzburg, 2002.

- [11] BURDEA, G. C.: *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. Wiley–Interscience, New York, 1996.
- [12] CALDWELL, D. G.; LAWTHOR, S.; WARDLE, A.: *Multi-Modal Cutaneous Tactile Feedback*. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, S. 465–472, 1996.
- [13] CALDWELL, D. G.; TSAGARAKIS, N.; WARDLE, A.: *Mechano Thermo and Proprioceptor Feedback for Integrated Haptic Feedback*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, S. 2491–2496, 1997.
- [14] CHALLIS, B. P.; EDWARDS, A. D. N.: *Design Principles for Tactile Interaction*. Proceedings of the Workshop on Haptic Human-Computer Interaction, Glasgow, Scotland, S. 98–101, 2000.
- [15] CLAUSER, H.; WIESEMANN, G.: *Grundgebiete der Elektrotechnik I*. Oldenburg Verlag, München, 4. Aufl., 1990.
- [16] CLEARY, K.; CARIGNAN, C.; TRAYNOR, L.: *Realistic Force Feedback for a Spine Biopsy Simulator*. Proceedings of the First International Workshop on Haptic Devices in Medical Applications, Paris, France, S. 66–75, 1999.
- [17] DA CAMPO, S.: *Funktionsweise und Modellierung der haptischen Reizung*. Studienarbeit Nr. 1470, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, 2000.
- [18] DOERRER, C.: *Eingabefeld mit haptischer Rückmeldung zur Bedienung technischer Geräte*. Offenlegungsschrift DE 101 28 908 A 1, Deutsches Patent- und Markenamt, 2002.
- [19] DOERRER, C.; KERN, T.; WEBER, T.; WERTSCHÜTZKY, R.: *Actuator-Sensor-System for a Haptic Display to Operate Machines*. Conference Proceedings of Mechatronics 2002, 8th Mechatronics Forum, Twente, Netherlands, S. 1181–1190, 2002.
- [20] DOERRER, C.; KISSEL, R.; WERTSCHÜTZKY, R.; WEISSMANTEL, H.: *Man-Machine Interaction with Haptic Feedback*. Proceedings of the Tunisian-German Conference on Smart Systems and Devices, Hammamet, Tunisia, S. 255–262, 2001.

- [21] DOERRER, C.; WERTSCHÜTZKY, R.: *A New Approach to Operating Machines with High Functionality*. S. 105–107. In: BABER, C. et al. [1], 2001.
- [22] DOERRER, C.; WERTSCHÜTZKY, R.: *Simulating Push-Buttons Using a Haptic Display: Requirements on Force Resolution and Force-Displacement Curve*. S. 41–46. In: WALL, S. A. et al. [114], 2002.
- [23] DOHMEYER, V.; HOFMANN, P.; LINKOHR, J.: *Tastschirm*. Offenlegungsschrift DE 199 62 552 A 1, Deutsches Patent- und Markenamt, 2001.
- [24] DOLLE, M.; MEISS, T.; LOTZ, P.; SÖHN, M.: *Konstruktion eines ferrofluidgeführten Linearaktors*. Projektseminar Nr. 18.282.4.1, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, 2002.
- [25] DUDEL, J.: *Erregungsübertragung von Zelle zu Zelle*. Kap. 3, S. 43–66. In: SCHMIDT, R. F. et al. [96], 2000.
- [26] DUDEL, J.: *Grundlagen der Zellphysiologie*. Kap. 1, S. 3–19. In: SCHMIDT, R. F. et al. [96], 2000.
- [27] DUDEL, J.: *Informationsvermittlung durch elektrische Erregung*. Kap. 2, S. 20–42. In: SCHMIDT, R. F. et al. [96], 2000.
- [28] DUDEN: *Fremdwörterbuch*. Dudenverlag, Mannheim, 1982.
- [29] DUMAS, J. S.; REDISH, J. C.: *A Practical Guide to Usability Testing*. Ablex Publishing Corporation, Norwood, New Jersey, 1993.
- [30] EBLE, B.: *Normungsaktivitäten zur Mensch-Maschine-Interaktion*. S. 171–183. In: ZÜHLKE, D. [121], 1996.
- [31] EN-60447: *Europäische Norm EN 60447: Mensch-Maschine-Schnittstelle - Bedienungsgrundsätze*, 1993.
- [32] GOODWIN, J. G.; ISENSEE, S. H.; POSTON, R. L.; TSAO, I.-H.: *Tactile Feedback Keyboard*. United States Patent Nr. 6.218.966 B1, 2001.
- [33] HAJIAN, A. Z.; HOWE, R. D.: *Identification of the Mechanical Impedance at the Human Finger Tip*. Journal of Biomechanical Engineering - Transactions of the ASME, Vol. 119, Nr. 1, S. 109–114, 1997.
- [34] HANDWERKER, H. O.: *Allgemeine Sinnesphysiologie*. Kap. 11, S. 195–215. In: SCHMIDT, R. F. et al. [96], 2000.

- [35] HANNAFORD, B.; VENEMA, S.: *Kinesthetic Displays for Remote and Virtual Environments*. Kap. 10, S. 415–436. In: BARFIELD, W.; FURNESS, T. A. [3], 1995.
- [36] HASSER, C. J.: *Force-Reflecting Anthropomorphic Hand Masters*. Report AL/CF-TR-1995-0110, Armstrong Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1995.
- [37] HASSER, C. J.; DANIELS, M. W.: *Tactile Feedback with Adaptive Controller for a Force-Reflecting Haptic Display - Part I: Design*. Proceedings of the Fifteenth Southern Biomedical Engineering Conference, S. 526–529, 1996.
- [38] HEINBOKEL, T.: *Hausgeräte für den Menschen: Benutzerzentrierte Gestaltung von Alltagstechnik*. S. 15–33. In: ZÜHLKE, D. [121], 1996.
- [39] HEINRICH, J.: *Bedienen im Dunklen: Beleuchtungslösungen bringen Tastaturen nachts zum Leuchten*. Elektronik Praxis, Nr. 11, S. 98–100, Vogel Industrie Medien, Würzburg, 2002.
- [40] HOWE, R. D.: *A Force-Reflecting Teleoperated Hand System for the Study of Tactile Sensing in Precision Manipulation*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, S. 1321–1326, 1992.
- [41] ISERMANN, R.: *Digitale Regelsysteme, Band I*. Springer Verlag, Berlin, 2. Aufl., 1988.
- [42] ISERMANN, R.: *Mechatronische Systeme*. Springer Verlag, Berlin, 1999.
- [43] JANDURA, L.; SRINIVASAN, M. A.: *Experiments on Human Performance in Torque Discrimination and Control*. Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Dynamic Systems and Control, DSC-Vol. 55-1, S. 369–375, 1994.
- [44] JANSSON, G.: *The Potential Importance of Perceptual Filling-In for Haptic Perception of Virtual Object Form*. S. 72–75. In: BABER, C. et al. [1], 2001.
- [45] JENDRITZA, D. J.; 16 MITAUTOREN: *Technischer Einsatz Neuer Akto- ren*. Kontakt & Studium, Band 484. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995.

- [46] JUNGSMANN, M.; SCHLAAK, H. F.: *Electrostatic Actuators with Elastic Dielectric for Use on Tactile Displays*. Proceedings of the 8th International Conference on New Actuators: Actuator 2002, Bremen, Germany, S. 391–394, 2002.
- [47] JUNGSMANN, M.; SCHLAAK, H. F.: *Taktiler Display mit elektrostatischen Polymeraktoren*. Konferenzband des 47. Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquiums, Technische Universität Ilmenau, 2002.
- [48] KACZMAREK, K. A.; BACH-Y-RITA, P.: *Tactile Displays*. Kap. 9, S. 349–414. In: BARFIELD, W.; FURNESS, T. A. [3], 1995.
- [49] KACZMAREK, K. A.; WEBSTER, J. G.; BACH-Y-RITA, P.; TOMPKINS, W. J.: *Electrotactile and Vibrotactile Displays for Sensory Substitution Systems*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 38, Nr. 1, S. 1–16, 1991.
- [50] KALLENBACH, E.; EICK, R.; QUENDT, P.: *Elektromagnete*. B.G. Teuber Verlag, Stuttgart, 1994.
- [51] KAZEROONI, H.: *Human Induced Instability in Haptic Interfaces*. ASME Winter Annual Meeting: Advances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interfaces, New Orleans, DSC-Vol. 49, S. 15–27, 1993.
- [52] KERN, T.: *Bedienfeld mit variablen Tasten bezüglich Haptik und Größe - Aktorik und Mechanik*. Studienarbeit Nr. 1481, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, 2001.
- [53] KERN, T.; DOERRER, C.; SCHAEFFER, A.; RETTIG, A.; WERTHSCHÜTZKY, R.: *Virtuell operieren: Simulation und Darstellung von Kräften bei endoskopischen Eingriffen*. Technische Universität Darmstadt: Thema Forschung, Nr. 2: Bionik, S. 78–83, 2002.
- [54] KIENZLE, B.: *Elektrolumineszenz in Flacheingabesystemen*. F&M, Nr. 3, S. 12–16, Carl Hanser Verlag, München, 2001.
- [55] KISSEL, R.; WEISSMANTEL, H.: *Benutzerfreundliches und seniorenge-rechtes Design*. ntz - Innovationen der Kommunikationstechnik, Nr. 7-8, S. 50–52, VDE Verlag, Düsseldorf, 2002.

- [56] KIVISTÖ-RAHNASTO, J.; VUORI, M.; TOIVONEN, S.: *An Approach for Developing User Interfaces for Products of the Future*. 1st IFAC Conference on Mechatronic Systems, Darmstadt, Germany, Vol. 3, S. 1097–1100, 2000.
- [57] KIY, M.: *Molekulares Leuchten: Organische Displays auf dem Vormarsch*. c't Magazin für Computer und Technik, Nr. 20, S. 110–113, Heise Verlag, Hannover, 2000.
- [58] KONTARINIS, D. A.; HOWE, R. D.: *Tactile Display of Contact Shape in Dextrous Telemanipulation*. ASME Winter Annual Meeting: Advances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interfaces, New Orleans, DSC-Vol. 49, S. 81–88, 1993.
- [59] KORNBLUH, R.; PELRINE, R.; PEI, Q.; SHASTRI, S.: *Application of Dielectric Elastomer EAP Actuators*. Kap. 16, S. 457–496. In: BAR-COHEN, Y. [2], 2001.
- [60] KRAUTSTRUNK, A.; UHLER, R.; ZIMMER, M.; MUTSCHLER, P.: *Elektrisch Lenken: Handkraftaktor für Steer-by-Wire*. Technische Universität Darmstadt: Thema Forschung, Nr. 1: Mechatronische Systeme - Konzepte und Anwendungen, S. 104–113, 2000.
- [61] KRÖMKER, D.: *Mehr sehen - sicherer wissen - überzeugender gestalten: Die 3D-Computergraphik erobert den wissenschaftlichen Alltag*. Forschung Frankfurt, Wissenschaftsmagazin der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Nr. 2, S. 59–66, 2000.
- [62] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik*. Fachbuchverlag Leipzig, 16. Aufl., 1996.
- [63] KUHLMANN, U.: *Sichtbarer Fortschritt: Neue Display-Techniken, hochauflösende LCDs*. c't Magazin für Computer und Technik, Nr. 13, S. 22–23, Heise Verlag, Hannover, 2001.
- [64] KUNSTMANN, C.: *Handhabungssystem mit optimierter Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Mikromontage*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fortschritt-Bericht Nr. 751, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.

- [65] KÜPFMÜLLER, K.; KOHN, G.: *Theoretische Elektrotechnik und Elektronik - Eine Einführung*. Springer-Verlag, Berlin, 14. Aufl., 1993.
- [66] LANDAU, K. (Hrsg.): *Bericht zur Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Mensch-Maschine-Schnittstellen*. Verlag Institut für Arbeitsorganisation, Stuttgart, 1998.
- [67] LANGSDORF, J.; NOAK, J.; WITTE, C.; REINHARD, W.; BECKER, H.: *Messplatz für Array aus Aktor-Sensor-Systemen*. Projektseminar Nr. 18.122.4.2, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, 2002.
- [68] LENK, A.; PFEIFER, G.; WERTHSCHÜTZKY, R.: *Elektromechanische Systeme*. Springer Verlag, Berlin, 2001.
- [69] LINDE, R. Q. VAN DER; LAMMERTSE, P.; FREDERIKSEN, E.; RUITER, B.: *The Haptic Master, a New High-Performance Haptic Interface*. S. 1–5. In: WALL, S. A. et al. [114], 2002.
- [70] LOOS, H. R.: *Systemtechnik Induktiver Weg- und Kraftaufnehmer*. Expert Verlag, Ehningen, 1992.
- [71] LORSON, T.: *Eindimensionales haptisches Display zur Simulation von Tasten*. Diplomarbeit Nr. 1474, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, 2000.
- [72] MATYSEK, M.: *Entwurf und Programmierung einer Mikrocontroller-Umgebung zur Regelung eines Aktor-Sensor-Arrays*. Studienarbeit Nr. 1508, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, 2002.
- [73] MEEKER, D.: *Finite Element Method Magnetics - User's Manual*. <http://femm.berlios.de>, 1999.
- [74] MERZ, L.; JASCHEK, H.: *Grundkurs der Regelungstechnik*. Oldenbourg Verlag, München, 13. Aufl., 1996.
- [75] MESCHEDER, U.: *Mikrosystemtechnik - Konzepte und Anwendungen*. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 2000.
- [76] MICHELITSCH, G.; RUF, A.; VAN VEEN, H. A. H. C.; VAN ERP, J. B. F.: *Multi-Finger Haptic Interaction within the MIAMM Project*. S. 144–149. In: WALL, S. A. et al. [114], 2002.

- [77] MILNER, T. E.; FRANKLIN, D. W.: *Characterization of Multijoint Finger Stiffness: Dependence on Finger Posture and Force Direction*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 43, Nr. 11, S. 1363–1375, 1998.
- [78] MÜNCH, S.; DILLMANN, R.: *Haptic Output in Multimodal User Interfaces*. Proceedings of the International Conference on Intelligent User Interfaces, Orlando, Florida, S. 105–112, 1997.
- [79] NKK SWITCHES: *Firmen-Homepage*. www.nkksmartswitch.com.
- [80] NÜHRMANN, D.: *Das Große Werkbuch Elektronik*. Franzis' Verlag, Poing, 7. Aufl., 1998.
- [81] OBIER, T.: *Leistungsgrenzen elektrodynamischer Schallquellen bei tiefen Frequenzen dargestellt am Beispiel eines neuartigen Gleitlagerlautsprechers*. Dissertation, Fakultät Elektrotechnik, Technische Universität Dresden, 1998.
- [82] PANG, X. D.; TAN, H. Z.; DURLACH, N. I.: *Manual Discrimination of Force Using Active Finger Motion*. Perception & Psychophysics, Vol. 49, Nr. 6, S. 531–540, 1991.
- [83] PARKER, D. N.: *Three-Dimensional Display*. United States Patent Nr. 5.717.423, 1998.
- [84] PELRINE, R.; KORNBLUH, R.; JOSEPH, J.; HEYDT, R.; PEI, Q.; CHIBA, S.: *High-Field Deformation of Elastomeric Dielectrics for Actuators*. Materials Science and Engineering, Nr. 11, S. 89–100, Elsevier Science, 2000.
- [85] PRUTZ, D.: *Regelungskonzept für ein Aktor-Sensor-Array und dessen praktische Umsetzung*. Diplomarbeit Nr. 1507, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, 2002.
- [86] PSCHYREMBEL, W.: *Klinisches Wörterbuch*. Walter de Gruyter–Verlag, Berlin, 256. Aufl., 1990.
- [87] RASKIN, J.: *The Humane Interface*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 2000.
- [88] ROSENBERG, L. B.: *How to Assess the Quality of Force-Feedback Systems*. Journal of Medicine and Virtual-Reality, Vol. 1, Nr. 1, S. 12–15, 1995.

- [89] ROSENBERG, L. B.; STREDNEY, D.: *A Haptic Interface for Virtual Simulation of Endoscopic Surgery*. In: SIEBURG, H.; WEGHORST, S.; MORGAN, K. (Hrsg.): *Health Care in the Information Age*, S. 371–387. IOS Press, 1996.
- [90] RÜHMANN, H.: *Schnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen*. Kap. 5.4, S. 420–445. In: SCHMIDTKE, H. [95], 1993.
- [91] RÜHMANN, H.: *Stellteilmgestaltung*. Kap. 6.7, S. 554–562. In: SCHMIDTKE, H. [95], 1993.
- [92] S.A.M. PRODUCTS: *Firmenschrift: Magnetische Werkstoffe*. Oberursel, www.sam-products.de.
- [93] SCHIESSLE, E.: *Sensortechnik und Meßwertaufnahme*. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1992.
- [94] SCHINKÖTHE, W.; FURCHERT, H.-J.: *Elektrodynamische Linear- und Mehrkoordinatenantriebe*. Kap. 4.2, S. 163–201. In: STÖLTING, H.-D.; KALLENBACH, E. [104], 2001.
- [95] SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. Hanser Verlag, München, 3. Aufl., 1993.
- [96] SCHMIDT, R. F.; THEWS, G.; LANG, F. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Springer Verlag, Berlin, 28. Aufl., 2000.
- [97] SCHNEIDER, G.: *Angepaßte Gestaltungskriterien und deren Umsetzung - Normen und Richtlinien, Quasistandards, Anwendungsbeispiele -*. S. 201–216. In: ZÜHLKE, D. [121], 1996.
- [98] SCHUENEMANN, M.; WIDMANN, H.: *Tactile Actuators for Tactile Feedback Systems*. In: DILLMANN, R.; SALB, T. (Hrsg.): *Proceedings of the 1st International Workshop on Haptic Devices in Medical Applications*, S. 23–32, Institute for Process Control and Robotics, Karlsruhe, 1999.
- [99] SHIMOGA, K. B.: *A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dextrous Telemanipulation: Part I. Finger Force Feedback*. Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS), Seattle, Washington, S. 263–270, 1993.

- [100] SHIMOGA, K. B.: *A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dextrous Telem Manipulation: Part II. Finger Touch Feedback*. Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS), Seattle, Washington, S. 271–279, 1993.
- [101] SHIMOJO, M.; SHINOHARA, M.; FUKUI, Y.: *Human Shape Recognition Performance for 3-D Tactile Display*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 29, Nr. 6, S. 637–644, 1999.
- [102] SILBERNAGL, S.; DESPOPOULOS, A.: *Taschenatlas der Physiologie*. Thieme Verlag, Stuttgart, 4. Aufl., 1991.
- [103] SRINIVASAN, M. A.; CHEN, J.-S.: *Human Performance in Controlling Normal Forces of Contact with Rigid Objects*. ASME Winter Annual Meeting: Advances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interfaces, New Orleans, DSC-Vol. 49, S. 119–125, 1993.
- [104] STÖLTING, H.-D.; KALLENBACH, E. (Hrsg.): *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*. Hanser Verlag, München, 2001.
- [105] STRASSMANN, B.: *Fühlen Sie Mal...* Die Zeit, Nr. 31, S. 29, Hamburg, 2003.
- [106] SZYSZKA, B.: *Substrate für flexible Displays (FlexLed)*. Jahresbericht 2002, Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik, Braunschweig, S. 52–53, 2002.
- [107] TAN, H. Z.; PANG, X. D.; DURLACH, N. I.: *Manual Resolution of Length, Force, and Compliance*. ASME Advances in Robotics, DSC-Vol. 42, S. 13–18, 1992.
- [108] TAN, H. Z.; SRINIVASAN, M. A.; EBERMANN, B.; CHENG, B.: *Human Factors for the Design of Force-Reflecting Haptic Interfaces*. Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting: Dynamic Systems and Control, DSC-Vol. 55-1, S. 353–359, 1994.
- [109] VAC VACUUMSCHMELZE GMBH & CO. KG: *Firmenschrift: Weichmagnetische Werkstoffe und Halbzeuge*. Hanau, 2002.

- [110] VAN ERP, J. B. F.: *Guidelines for the Use of Vibro-Tactile Displays in Human Computer Interaction*. S. 18–22. In: WALL, S. A. et al. [114], 2002.
- [111] VAN ERP, J. B. F.; VAN VEEN, H. A. H. C.: *Vibro-Tactile Information Presentation in Automobiles*. S. 99–104. In: BABER, C. et al. [1], 2001.
- [112] VÖHRINGER, K.-D.: *Innovationen – Basis für zukünftige Unternehmenserfolge*. S. 3–7. In: LANDAU, K. [66], 1998.
- [113] VOIT, M.: *Vibrotaktiler Display*. Diplomarbeit Nr. 1458, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, 1999.
- [114] WALL, S. A.; RIEDEL, B.; ANDREW, C.; MCGEE, M. R. (Hrsg.): *Conference Proceedings of Eurohaptics 2002*, Edinburgh, Scotland, 2002.
- [115] WANDMACHER, J.: *Einführung in die psychologische Methodenlehre*. Skriptum, Fachbereich Psychologie, TU Darmstadt, 2000.
- [116] WEBER, T.: *Bedienfeld mit variablen Tasten bezüglich Haptik und Größe - Sensorik, Elektronik, Regelung*. Studienarbeit Nr. 1480, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, 2001.
- [117] WIKER, S. F.; HERSHKOWITZ, E.; ZIK, J.: *Teleoperator Comfort and Psychometric Stability: Criteria for Limiting Master-Controller Forces of Operation and Feedback During Telemanipulation*. Proceedings of NASA Conference on Space Telerobotics, Vol. 1, S. 99–107, 1989.
- [118] ZIMMERMANN, M.: *Das somatoviszzerale sensorische System*. Kap. 12, S. 216–235. In: SCHMIDT, R. F. et al. [96], 2000.
- [119] ZÜHLKE, D.: *Analyse, Gründe, Vermeidungsansätze*. S. 185–200. In: [121], 1996.
- [120] ZÜHLKE, D.: *Mensch-Maschine-Kommunikation – heute*. S. 1–13. In: [121], 1996.
- [121] ZÜHLKE, D. (Hrsg.): *Menschengerechte Bedienung technischer Geräte*. VDI Berichte 1303, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [122] ZWISLER, R.: *Psychologische Methodenlehre*. Skriptum, Institut für Psychologie, Universität Regensburg, 1998.

Lebenslauf

Christoph Doerrer

Diplom-Ingenieur

geb. am 28. März 1972

in Kelkheim/Taunus

Familienstand

ledig

Schulbildung

1978 - 1988 Grund- und Gesamtschule
Eppstein

1988 - 1991 Gymnasiale Oberstufe
Hofheim

Studium

1991 - 1993 Grundstudium: Elektrotechnik
Technische Universität Darmstadt

1993 - 1998 Hauptstudium: Elektrotechnik
Fachrichtung: Elektromechanische Konstruktionen
Technische Universität Darmstadt

Berufliche Tätigkeit

1998 - 2003 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Institut für Elektromechanische Konstruktionen
Technische Universität Darmstadt

Darmstadt, 22. Oktober 2003