

Haptische Wahrnehmung rechnerinterner Freiformflächen

Erweiterung der Benutzungsschnittstelle eines 3D-CAD-Systemes
um ein Ein-/Ausgabegerät mit insgesamt fünf Freiheitsgraden

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur Jörg E. Blaurock
aus Augsburg

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Juli 2004

Dekan: Dr.-Ing. P. Steinmann

Promotionskommission:

Vorsitzende: Juniorprofessorin Dr.-Ing. K. Röse
Erster Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. C. W. Dankwort
Zweiter Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Haberland

Vorwort

Die hier vorgestellte Dissertation entstand während meiner Arbeit am Lehrstuhl für Rechneranwendung in der Konstruktion der Technischen Universität Kaiserslautern. Diese Zeit bot mir die Gelegenheit, in Zusammenarbeit mit meinen ehemaligen Kollegen und vielen Studierenden des Maschinenbaus wertvolle Erfahrungen auf dem Gebiet des Rechnerunterstützten Konstruierens zu sammeln und zu vertiefen.

Angeregt wurde die Arbeit vom Lehrstuhlinhaber, Professor Dr. rer. nat. C. W. Dankwort, durch die Vorgabe, auf dem Gebiet der Benutzungsschnittstelle von CAD-Systemen zu forschen. Er begeisterte er sich für meine Wahl, auf dem Gebiet der haptischen Benutzungsschnittstelle zu forschen und unterstützte mich nach Kräften. Daher gilt ihm mein besonderer Dank.

Herrn Professor Dr.-Ing. R. Haberland, Inhaber des Lehrstuhles für Feinwerktechnik an der TU Kaiserslautern, danke ich herzlich für das große Interesse an dieser Arbeit, für wertvolle Anregungen und für die freundliche Übernahme des Koreferats.

Frau Dr.-Ing. K. Röse, Juniorprofessorin an der TU Kaiserslautern, gilt mein Dank für die freundliche Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ferner möchte ich mich bei allen Studienarbeitern, Diplomarbeitern, studentischen Mitarbeitern und Studenten für ihren Beitrag zu dieser Arbeit bedanken und ihnen eine erfolgreiche berufliche Laufbahn wünschen.

Kaiserslautern, im August 2004

Jörg Blaurock

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Verwendete Akronyme	VI
Zusammenfassung	VIII
Abstract.	X
1 Wahrnehmung von Freiformflächen	1
1.1 Die Sinne des Menschen	2
1.2 Tastsinn und Haptik.	4
1.3 Professionelle Wahrnehmung von Freiformflächen	4
2 Benutzungsschnittstelle von Rechnern in der Konstruktion	6
2.1 Begründung der Forschung auf dem Gebiet der Haptik	11
2.2 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	12
3 Stand des Wissens	14
3.1 Mathematische Beschreibung von Freiformflächen	14
3.2 Der menschliche Tastsinn	17
3.2.1 Der Versuch von Aristoteles	17
3.2.2 Die Erklärung von Descartes.	18
3.2.3 Untersuchungen im 19. Jahrhundert	18
3.2.4 Beurteilung hautberührender Flächen	19
3.2.5 Zusammenhang zwischen inneren und äußeren Sinnesorganen	19
3.2.6 Untersuchungen von V. Henri.	20
3.3 Aufbau der Tastwelt am Beginn des 20. Jahrhunderts	20
3.4 Haptische Untersuchungen	21
3.5 Sinneshemmung.	22
3.6 Grenzwerte des Tastsinnes	22
3.7 Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen.	23
3.8 Verwendung der Hand oder Teilen der Hand zur haptischen Wahrnehmung.	26
4 Stand der Technik.	29
4.1 Das „PHANToM“ von SensAble Technologies, Inc.	32
4.2 Das „Tactile Display“ des Forschungszentrums Karlsruhe.	32
4.3 Das taktile Display „FEELEX“	33
4.4 Das haptische Display „Magnetschwebegerät“	34
4.5 Der „Cybergrasp“	35
4.6 Ergebnis.	36
5 Entwicklung der Versuchsanordnung	37

5.1	Erster Prototyp	37
5.2	Zweiter Prototyp	39
5.3	Dritter Prototyp	41
5.4	Vierter Prototyp	43
5.4.1	Konstruktionsparameter der Haptischen Hand	45
5.5	Zusammenfassung	52
5.6	Reaktionszeiten der Haptischen Hand	53
6	Versuchsreihen	56
6.1	Versuchsreihen nach Kirkpatrick und Douglas	56
6.1.1	Versuchsaufbau	61
6.2	Versuchsreihe zu VDA-Empfehlung 4955	64
6.2.1	Die VDA-Empfehlung 4955	64
6.2.2	Versuchsaufbau	66
6.2.3	Versuch „Sprung“	68
6.2.4	Versuch „Knickwinkel“	69
6.2.5	Versuch „Krümmung“	70
7	Versuchsergebnisse	72
7.1	Versuchsreihen nach Kirkpatrick und Douglas	72
7.1.1	Versuchsreihe mit Beschränkung auf haptische Wahrnehmung	72
7.1.2	Versuchsreihe mit sichtbaren Mauszeiger	76
7.1.3	Versuchsreihe mit verringerter Neigungsamplitude	79
7.1.4	Versuchsreihe mit Anregung des Handballens	82
7.2	Versuchsreihe zur VDA-Empfehlung 4955	84
7.2.1	Versuch „Sprung“	85
7.2.2	Versuch „Knickwinkel“	86
7.2.3	Versuch „Krümmungsverläufe“	87
8	Zusammenfassung und Interpretation	91
8.1	Versuchsreihen nach Kirkpatrick und Douglas	91
8.1.1	Interpretation der Versuchsreihe	93
8.1.2	Ergebnisse fremder Untersuchungen	94
8.2	Versuchsreihe zu VDA-Empfehlung 4955	96
8.3	Vergleich der Ergebnisse mit der These der Arbeit	100
9	Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	105
	Glossar	115

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Beispiele für die Entwicklung der Oberfläche gängiger Konsumgüter.	1
Abb. 1.2:	Gliederung des Empfindungsapparates des Körpers.	3
Abb. 2.1:	Konzept des Gesamtsystems	12
Abb. 3.1:	Kurven- bzw. Flächenbeschreibung nach Bézier	15
Abb. 3.2:	B-Spline-Kurven- bzw. Flächenbeschreibung nach de-Boor	16
Abb. 3.3:	Der Versuch von Aristoteles mit Bezeichnungen von Descartes	18
Abb. 3.4:	Versuchsanordnung bei Rubin.	21
Abb. 3.5:	Versuchsanordnung bei Békésy.	22
Abb. 3.6:	Mechanosensoren der unbehaarten und der behaarten Haut	24
Abb. 3.7:	Verteilung der Mechanosensoren in der Haut	25
Abb. 3.8:	Minimal notwendige Eindringtiefe und Reizmindestabstand.	25
Abb. 3.9:	Systematik der Greifarten	27
Abb. 4.1:	Das Gerät „PHANToM“ der Fa. SensAble Technologies.	32
Abb. 4.2:	Taktiler Display des FZ Karlsruhe	33
Abb. 4.3:	FEELEX1 und FEELEX2	34
Abb. 4.4:	Magnetisch schwebender Handgriff	35
Abb. 4.5:	Cybergrasp der Firma Immersion	36
Abb. 5.1:	Gesamtsystem der „Haptischen Hand“ Version 1.	37
Abb. 5.2:	Menüstruktur der Haptischen Hand Version 1	38
Abb. 5.3:	Gesamtsystem „Haptischen Hand“ Version 2.	39
Abb. 5.4:	Haptischen Hand Version 2, angekoppelt an UG V15 auf SGI IRIX	41
Abb. 5.5:	Tonmodell des dritten Prototypen	42
Abb. 5.6:	Gesamtsystem der „Haptischen Hand“ in der Version 3.	42
Abb. 5.7:	Haptische Hand Version 4.	44
Abb. 5.8:	Gesamtsystem der „Haptischen Hand“ in der Version 4.	45
Abb. 5.9:	Konstruktionsskizze zur Gestaltung der Taumelscheibe.	46
Abb. 5.10:	Zentrales Trägerstück der Haptischen Hand	47
Abb. 5.11:	Menü „Kalibrierung“ der „Haptischen Hand“ (Version 4)	49
Abb. 5.12:	Menüs „Geführtes Testen“ der „Haptischen Hand“ (Version 4).	50
Abb. 5.13:	Menü „Freies Testen“ der „Haptischen Hand“ (Version 4)	51
Abb. 6.1:	Flächennomenklatur nach Koenderink und van Doorn.	57
Abb. 6.2:	Flächen der Trainingsphase.	60
Abb. 6.3:	Versuchsaufbau	61
Abb. 6.4:	Anordnungen der menschlichen Hand auf der Haptischen Hand	62
Abb. 6.5:	Fünf Flächentypen mit einer Rotation von 0°, 30°, 60° und 90°.	63

Abb. 6.6:	Stetigkeitskriterium nullter Ordnung für „Class A Flächen“	65
Abb. 6.7:	Stetigkeitskriterium erster Ordnung für „Class A Flächen“	65
Abb. 6.8:	Stetigkeitskriterium zweiter Ordnung für „Class A Flächen“	65
Abb. 6.9:	Versuchsaufbau der Versuchsreihe	67
Abb. 6.10:	Ebenen mit verschiedenen starken Höhengsprüngen	68
Abb. 6.11:	Flächenübergänge mit verschiedenen starken Knickwinkeln	69
Abb. 6.12:	Flächen mit unterschiedlichen Krümmungsverläufen	70
Abb. 7.1:	Verteilung der Erkennungszeit bei rein haptischer Wahrnehmung	74
Abb. 7.2:	Weibull-Diagramm der Versuchsreihe bei rein haptischer Wahrnehmung	76
Abb. 7.3:	Verteilung der Erkennungszeit bei Anzeige von Position und Flächenrändern	78
Abb. 7.4:	Weibull-Diagramm der Versuchsreihe mit Positionsanzeige	79
Abb. 7.5:	Verteilung der Erkennungszeit bei reduzierter Neigungsamplitude	80
Abb. 7.6:	Weibull-Diagramm der Versuchsreihe mit reduzierter Neigungsamplitude	81
Abb. 7.7:	Verteilung der Erkennungszeit bei Anregung des Handballens	83
Abb. 7.8:	Weibull-Diagramm der Versuchsreihe bei Anregung des Handballens	84
Abb. 7.9:	Wahrnehmungswahrscheinlichkeit bei verschiedenen Höhengsprüngen	85
Abb. 7.10:	Wahrnehmungswahrscheinlichkeit bei verschiedenen Knickwinkel	86
Abb. 7.11:	Dargestellter Flächenquerschnitt Typ 1 und wahrgenommene Flächenverläufe	87
Abb. 7.12:	Dargestellter Flächenquerschnitt Typ 2 und wahrgenommene Flächenverläufe	88
Abb. 7.13:	Dargestellter Flächenquerschnitt Typ 3 und wahrgenommene Flächenverläufe	89
Abb. 7.14:	Dargestellter Flächenquerschnitt Typ 4 und wahrgenommene Flächenverläufe	90
Abb. 8.1:	Erkennungszeiten und Erkennungsraten aller Versuchsreihen	92
Abb. 8.2:	Weibull-Diagramm aller vier Versuchsreihen	93
Abb. 8.3:	Gelenkstellungen bei verschiedenen Neigungen der Taumelscheibe	94
Abb. 8.4:	Fehlerraten bei unterschiedlichen Sinneseindrücken	95
Abb. 8.5:	Erkennungswahrscheinlichkeiten mit Kennlinien	97

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Verfügbare Qualitätsprüfungswerkzeuge in der Konstruktion	9
Tab. 3.1:	Eigenschaften der vier wichtigsten menschlichen Mechanorezeptoren	24
Tab. 3.2:	Designkriterien für haptische Ausgabegeräte	26
Tab. 4.1:	Liste taktiler Ausgabegeräte mit charakteristischen Merkmalen	30
Tab. 5.1:	Liste der Kombinationen der möglichen Freiheitsgrade	48
Tab. 5.2:	Vergleich der Basisdaten der „Haptischen Hand“	52
Tab. 7.1:	Verschiedene Bezeichnungsschemata für die verwendeten Flächentypen	73
Tab. 7.2:	Gemessene Antwortzeiten bei rein haptischer Wahrnehmung	73
Tab. 7.3:	Gemessene Antwortzeiten (nach Kirkpatrick und Douglas) bei Proband Nr. 8 .	74
Tab. 7.4:	Kenngößen der Versuchsreihe bei rein haptischer Wahrnehmung	75
Tab. 7.5:	Gemessene Antwortzeiten bei Anzeige von Position und Flächenränder	77
Tab. 7.6:	Kenngößen der Versuchsreihe mit Anzeige der Flächenränder	78
Tab. 7.7:	Gemessene Antwortzeiten bei reduzierter Neigungsamplitude	80
Tab. 7.8:	Kenngößen der Versuchsreihe mit Anzeige der Flächenränder	81
Tab. 7.9:	Antwortzeiten bei Anregung des Handballens	82
Tab. 7.10:	Kenngößen der Versuchsreihe bei Anregung des Handballens	83

Verwendete Akronyme

α	Kippwinkel der Taumelscheibe
α_{Betrieb}	maximaler Kippwinkel bei Betrieb
α_{max}	maximaler theoretischer Kippwinkel
Abb.	Abbildung
AK	Arbeitskreis
AP	Arbeitsplatz
API	Application Programming Interface
CA	Computer Aided
CAD	Computer Aided Design
CAD/CAM	Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing
CAS	Computer Aided Styling
CAVE	Cave Automated Virtual Environment
cm	Zentimeter
cos	Cosinus
CPU	Central Processing Unit
D	Durchmesser der Taumelscheibe in der Ebene des Drehpunktes
D_{ES}	Kreisdurchmesser der Endabschalter
DMU	Digital Mockup
D_{Nutz}	Nutzflächendurchmesser der Taumelscheibe
DIN	Deutsche Industrie Norm
DOS	Disk Operating System
Fa.	Firma
FEM	Finite-Elemente-Methode
g	Gramm
H	Höhe der Taumelscheibe relativ zum Drehpunkt
HSC	High Speed Cutting
ISA	Industry Standard Architecture
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
Kap.	Kapitel

LOM	Laminated Object Manufacturing
mA	Milliampere
MC	Microcontroller
mm	Millimeter
N	Newton
NC	Numerical Control
Nm	Newtonmeter
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines
PC	Personalcomputer
PCI	Peripheral Component Interconnect
PL	Pariser Linie (Längeneinheit, 1 PL = 2,6 mm)
RC	Radio Controlled
RF	Reduktionsfaktor
RKK	hier: Lehrstuhl für Rechneranwendung in der Konstruktion
RPT	Rapid Prototyping Technology
sec	Sekunde
sin	Sinus
STL	Stereolithographie
Tab.	Tabelle
UG	Unigraphics
UXGA	Ultra XGA
VDA	Verband deutscher Automobilhersteller
VDA-FS	VDA-Flächenschnittstelle
VR	Virtual Reality
Vr i	Versuchsreihe Nr. i
WUXGA	Wide UXGA
XGA	eXtended Graphics Array

Zusammenfassung

Im industriellen Zeitalter stand zunächst die Funktionstüchtigkeit der Massenprodukte im Vordergrund. Insbesondere mit Einführung und Verbreitung der Rechnerunterstützten Konstruktion ist dieser Aspekt weitgehend beherrschbar geworden. Die Funktionstüchtigkeit wird zudem sowohl durch nationale Gesetze gefordert, als auch durch die in den meisten Fällen vorhandene globale Konkurrenzsituation. Als Folge nimmt die Bedeutung des „Designs“ von Konsumgütern aller Art zu, seien es Kaffeemaschinen, Staubsauger oder Automobile. Insbesondere die Entwicklung von Programmen zur rechnerinternen Modellierung von Freiformflächen hat zu diesem Trendwechsel einen Beitrag geliefert.

Mit der Aufwertung der Produktform hat auch die Bedeutung der „Entwicklungsschleifen“ im Bereich Design zugenommen. Das heißt, nach der rechnerinternen Modellierung und einiger optischer Begutachtungen am Bildschirm wird ein realer Prototyp hergestellt, um die Serienreife des Designs zu beurteilen. Diese wird nur in wenigen Fällen auf Anhieb erreicht, eine Überarbeitung der Flächen ist meistens notwendig. Diese Entwicklungsschleifen sind sowohl zeit- als auch kostenaufwendig. Um die Beurteilung rechnerinterner Freiformflächen zu verbessern, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Gerät entwickelt und getestet, das dem Designer die Möglichkeit eröffnen soll, an seinem CAS-/CAD-Arbeitsplatz die rechnerinternen Flächen nicht nur optisch, sondern auch haptisch und damit präziser beurteilen zu können.

Das entwickelte Gerät, „Haptische Hand“ genannt, präsentiert mit Hilfe einer in jeder Richtung neigbaren „Taumelscheibe“ die Tangentenebene eines beliebigen Punktes der rechnerinternen Flächen. Wenn nun der Designer eine zusammenhängende Folge von Ebenenwerten auf die Taumelscheibe überträgt, so soll er dadurch die Gestalt der Fläche wahrnehmen und erkennen. Es ist außerdem möglich die Taumelscheibe anzuheben, die damit über insgesamt drei von Servomotoren angesteuerte Freiheitsgrade verfügt. Ziel dieses einfachen Konzeptes ist, das Gerät mit einer Standard-Computermaus in einem Gehäuse zu integrieren, um ein preiswertes, marktfähiges Produkt zu erreichen.

Um die Behauptung der Wahrnehmbarkeit zu prüfen, wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. In einer ersten Versuchsreihe wurden fünf Flächen nach dem Flächenschema von Koenderink mit einem CAD-System modelliert und in vielen Variationen von mehreren Dutzend Versuchspersonen im wesentlichen haptisch wahrgenommen. Es ergab sich, dass die modellierten Flächen mit einer durchschnittlichen Erkennungsrate von 80% in einer durchschnittlichen Erkennungszeit von 25 sec erkannt werden konnten. In einer zweiten Versuchsreihe in Anlehnung an die VDA-Empfehlung 4955 wurden Unstetigkeiten, Tangentenunstetigkeiten und Krümmungsunstetigkeiten untersucht. Ergebnis war, dass die Versuchspersonen mehrheitlich dann Unstetigkeiten bei Flächenübergängen haptisch wahrnehmen können, wenn diese

mehr als 0,1mm beträgt. Bei tangentialer Unstetigkeit ist ein Mindestwert von $1,2^\circ$ die Voraussetzung für eine haptische Wahrnehmung durch die Mehrheit der Testpersonen. Die Untersuchung von Flächen mit variablen Krümmungsverläufen zeigte, dass die Mehrheit der Versuchspersonen die Flächenquerschnitte und damit die Krümmungswerte korrekt erkannte.

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe zeigen im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit einem anderen, kommerziell verfügbaren Gerät, dass die Eigenentwicklung ähnliche Leistungsmerkmale bei der haptischen Präsentation rechnerinterner Freiformflächen besitzt, zusätzlich aber den Vorteil einer einfacheren und damit preiswerteren Konstruktion aufweist. Aus der zweiten Versuchsreihe hingegen ergibt sich die Verpflichtung zur weiteren Erforschung der bemerkenswerten Unterschiede zwischen der haptischen Wahrnehmbarkeit bei rechnerinternen und bei realen Flächenübergängen.

Die Eigenentwicklung ist zum Patent angemeldet und die Anmeldungsschrift offengelegt, um eine Vermarktung zu sichern.

Zum Abschluß der Arbeit wird eine Reihe von Verbesserungs- und Ergänzungspotentialen aufgezeigt, die auch der Behebung der genannten Differenzen der Wahrnehmbarkeit zwischen rechnerinternen und realen Flächen dienen sollen.

Die durchgeführten Versuche haben ergeben, dass es möglich ist, rechnerinterne Freiformflächen durch eine Folge rechnerextern dargestellter Tangentenebenen haptisch wahrnehmbar zu machen. Mit dem entwickelten Gerät kann also ein Designer an seinem CAS-/CAD-Arbeitsplatz die modellierten Flächen in Echtzeit haptisch wahrnehmen und präziser beurteilen als es durch reine Ansicht der Flächen auf dem Monitor möglich ist. Als Folge einer solchen Erweiterung der Benutzungsschnittstelle von CAS-/CAD-Systemen wird die Notwendigkeit, reale Prototypen zur Beurteilung der rechnerinternen Modelle herstellen zu müssen, abnehmen. Auf diese Weise kann mit geringem Einsatz, verglichen mit kommerziell verfügbaren Geräten, zur notwendigen Senkung der Entwicklungszeiten und Entwicklungskosten beim Styling/Design von Massenprodukten beigetragen werden.

Abstract

In the first period of the industrial age, the functional efficiency of mass products stood in the foreground. Especially with the introduction and spreading of Computer Aided Design this aspect has become manageable to a large extent. Besides, this functional efficiency is promoted both by national laws and by the global competitive situation existing in most cases. As a consequence, the importance of the "Styling" of consumer goods of all kinds has increased, be it coffee machines, vacuum cleaners, or automobiles. In particular, the development of programs for the computer-internal modelling of free-form surfaces rendered a contribution to this change of trends.

By upgrading the products' shape, also the importance of 'development cycles' in design increased. I.e., after modelling computer-internally and after some optical evaluation at the screen, a real prototype has to be produced to assess the maturity phase of the design. Only in very few cases, this is achieved at first go, i.e. a revision of the shape is necessary in most of the cases. These 'development cycles' are both time-consuming and expensive. In order to improve the evaluation of free form surfaces, a device has been developed and evaluated in line with this thesis giving the stylist the possibility to assess the computer-internal surfaces not only optically but haptically as well from his/her desktop thus providing a higher precision.

The developed device, called "Haptic Hand", presents the tangent plane of any point of the computer-internal surfaces by the help of a disc tiltable in every direction. With the stylist now transferring a connected sequence of plane values to the disc he/she will be able to perceive and to recognize the surfaces' shape. Additionally, it is possible to lift the disc which thus offers a total of three degrees-of-freedom. The target of this simple concept is to integrate the device with a standard computer mouse into one body, thus obtaining an inexpensive marketable product.

In order to prove this thesis of shape perceptibility, two test series were performed. In the first series, five surfaces according to the surface scheme of Koenderink were modelled with a CAD system and were perceived haptically in many variations by several dozens of test persons. The result was that the modelled surfaces could be haptically perceived with an average recognition rate of 80% and an average recognition time of 25 seconds. In a second test series according to 'VDA recommendation 4955' surface transitions with discontinuities, tangential and curvature discontinuities were analyzed. The result was, that the majority of the test persons were able to haptically perceive discontinuities of 0,1 mm and more at a surface transition. Similar to this at tangential discontinuities an angle of 1,2° and more could be perceived haptically by the majority of the test persons. The analysis of surfaces with curvature disconti-

nities demonstrated that the majority of the test persons recognized surface profiles and thus curvature values correctly.

Compared to other research done with a commercially available product, the results of the first test series revealed that the proprietary development offers similar performance concerning the haptical presentation of computer-internal free-form surfaces with the advantage of a simpler and thus less expensive design. Yet, the second test series results in the obligation to further explore the remarkable differences between the haptical perceptibility of computer-internal and real surface-transitions.

For the proprietary development a patent was claimed to secure its marketing.

Finally, improvements and amendments are listed which shall serve for the elimination of the described differences concerning the perceptibility of internal and real surfaces.

The test series proved the thesis that it is possible to perceive a surfaces' shape by a sequence of connected tangent planes of surface points. By the help of the developed device it is thus possible for a stylist or a surface designer to perceive the modelled surfaces in real time at his desktop and to assess them more precisely than in a "view-only mode". As a consequence of such an enhancement of the user interface of a CAS-/CAD-system the necessity to produce real prototypes for the assessment of computer-internal models will decrease. Thus, this simple means, compared to commercially available products, can contribute to the necessary reduction of development times and costs during the styling and the design of mass products.

1 Wahrnehmung von Freiformflächen

Im Alltag begegnet man Freiformflächen an fast allen Konsumgütern, an Staubsaugern, Kaffeemaschinen ebenso wie an Automobilen. Diese Begegnungen sind nicht selbstverständlich.

Zum einen ist die knapp hundertzwanzigjährige Geschichte dieser Konsumgüter an sich kurz, wenn man sie beispielsweise vergleicht mit der Existenz des Homo sapiens auf der Erde (einige hunderttausend Jahre), oder der Geschichte des Universums (viele Milliarden Jahre). Die vorliegende Arbeit hat als Hintergrund das jüngste, das „automobile Zeitalter“.

Zum anderen erfuhr für das eingangs erwähnte Produktspektrum die Technik der Freiformflächen erst durch die Entwicklung von CAD/CAM-Systemen eine bemerkenswerte Verbreitung. Auch wenn die Kunst, Freiformflächen zu erzeugen, einige Tausend Jahre alt ist, so konnten zu Beginn des automobilen Zeitalters Freiformflächen nur an extrem teuren Luxusautomobilen betrachtet werden. Heute hingegen ist es selbstverständlich, dass Wagen der kleinsten Kategorie ohne eine einzige gerade Linie bzw. mit vollständig freigeformten Oberflächen in Großserie gefertigt werden. Das folgende Bild zeigt für die drei anfangs genannten Güter (Automobil, Staubsauger, Kaffeemaschine) jeweils ein Beispiel aus der Anfangszeit bzw. mit dem heutigen Stand der Technik.



Automobil: Kotflügel
1936 / 2003

Staubsauger
1950 / 2004

Kaffeemaschine
1900 / 2004

Quelle: Internet

Abb. 1.1: Beispiele für die Entwicklung der Oberfläche gängiger Konsumgüter

Dennoch fällt es schwer, eine ebenso leicht verständliche wie mathematisch präzise Definition für den Begriff „Freiformfläche“ zu geben. Nach Windelberg sind Freiformflächen „geometrische Gebilde, die in keinem Punkt einen natürlichen, leicht erkennbaren Anfangspunkt besitzen (beispielsweise Knochen oder Schaufeln)“ /Win-2002/. Lutz definiert Freiformflächen „als solche Flächen oder Oberflächen..., die in der Regel nicht mehr einfach durch analytische Flächengleichungen, wie Zylinder- oder Ebenengleichungen, beschreibbar sind“ /Lut-2002/. Auf eine Diskussion am Lehrstuhl für Rechneranwendung in der Konstruktion (RKK) geht folgende Definition zurück:

Definition: Eine Freiformfläche ist eine Fläche, die mit Hilfe einer einzigen beliebigen, in einer Ebene liegenden Kurve (Schablone) durch Rotation um eine Achse oder Verschiebung entlang einer Geraden nicht eindeutig hergestellt werden kann.

Aus der Definition ergibt sich zwangsläufig, dass Rotationskörper, insbesondere Kugel, Kegel oder Torus ebenso wenig wie Quader oder Zylinder zu den Freiformflächen zu zählen sind.

Ihren historischen Ursprung haben Freiformflächen im sogenannten „Straken“. Straken heißt mittels einer elastischen Latte (sog. „Straklatte“) eine harmonisch verlaufende Kurve durch vorgegebene Punkte zu bilden. Benutzt wird die Straktechnik seit einigen Tausend Jahren im Schiffbau. Vom Standpunkt der Physik ist dabei der Umstand bemerkenswert, dass der Strak die Linie geringster Biegeenergie beschreibt. Das heißt, ein gestrakter Spant oder eine gestrakte Planke kann ein Höchstmaß an äußerer Belastung ertragen. Das Straken führte also bei Vorgabe einzuhaltender Raumpunkte (welche der Erreichen eines Nutzvolumens beziehungsweise einer Nutzlast dienen) zu der (Schiffs-) form, die sich mit geringstem Materialeinsatz realisieren läßt. Eine gestrakte Schiffsform ist damit die effizienteste Schiffsform.

Das Straken wurde mit Beginn des Industriezeitalters unter anderem in den Automobilbau übernommen. Wie im Schiffsbau wurden jeweils mehrere Querschnitte eines großflächigen Karosserieteiles „gestrakt“ und anschließend die Flächen zwischen den Querschnitten interpoliert. Ähnliche Techniken wurden beim Bau von Flugzeugrümpfen, Flügeln, und Turbinen angewandt.

Die Qualitätsprüfung gestrakter Linien und Flächen erfolgt auf zwei Wegen. Die Einhaltung vorgegebener Raumpunkte wird mit Messmaschinen überprüft. Früher hoffte man mit Hilfe der Messmaschinen auch Tangenten- und Krümmungsstetigkeiten an Flächenübergängen prüfen zu können. Diese Hoffnung hat sich nicht erfüllt. Bei Flächenübergängen werden Stetigkeiten, Tangentenstetigkeiten und Krümmungsstetigkeiten vom Stylisten optisch oder tastend geprüft. Der ästhetische Charakter der Freiformflächen wird ebenfalls mit dem Auge und/oder mit der Hand wahrgenommen.

Die Frage, ob noch weitere Sinne zur Beurteilung von Freiformflächen zur Verfügung stehen könnten, führt uns zur Betrachtung der menschlichen Sinne.

1.1 Die Sinne des Menschen

Vor über zweitausend Jahren versuchte Aristoteles (384 v. Chr. bis 322 v. Chr.) die menschlichen Sinne zu benennen. Nach seiner Meinung verfügte der Mensch über fünf Sinne: Sehsinn,

Hörsinn, Geruchssinn, Geschmackssinn und Tastsinn /Ari-350v.Chr./. Dieser Kanon, der von seinen Schülern in dem Werk „Peri psyches“ (lat.: „De anima“, dt.: „Über die Seele“) am Beginn des dritten Kapitels notiert wurde, ist auch heute noch allgemein gebräuchlich, obwohl er sich nur auf die Sinne der Hautoberfläche bezieht.

Genauere Kenntnisse über die menschlichen Sinne wurden erst gut zweitausend Jahre später gewonnen. Die Sinnessysteme der Haut, der Gelenke, Skelettmuskeln und Eingeweide werden heute unter dem Begriff „Somatoviszzerale Sensibilität“ zusammengefasst. Die folgende Übersicht veranschaulicht den heutigen Wissensstand in Anlehnung an Birbaumer und Schmidt /BiS-1999/.

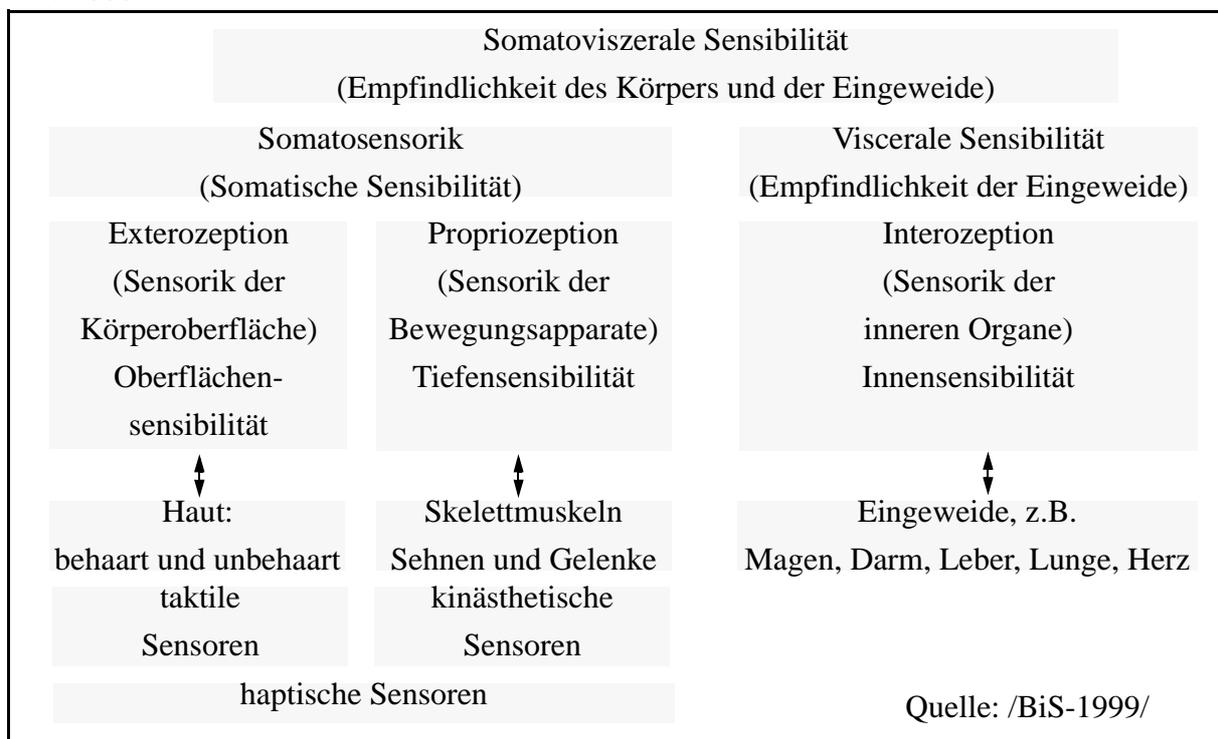


Abb. 1.2: Gliederung des Empfindungsapparates des Körpers

Die Übersicht zeigt beispielsweise, dass der menschliche Empfindungsapparat gebildet wird durch Sensoren der Körperoberfläche (Exterozeption), des Bewegungsapparates (Propriozeption) und der inneren Organe.

Im Kontext der Benutzungsschnittstelle von Rechnern haben sich allerdings nicht die Begriffe „Exterozeption“ und „Propriozeption“, durchgesetzt, sondern die Begriffe „Haptik“, „Taktilität“ und „Kinästhetik“. Daher wird in Anlehnung an Zwisler die folgende Definition verwendet:

Definition: Als haptischer Wahrnehmungssinn wird die Summe von taktilen Sinn (Rezeptoren der Haut) und kinästhetischem Sinn (Rezeptoren der Muskeln und Gelenke) bezeichnet /Zwi-1998/, /Kur-1997/.

1.2 Tastsinn und Haptik

Der Tastsinn begleitet uns in jedem Augenblick. Selbst wenn wir bewegungslos stehen oder liegen, spüren wir Teile unserer Umgebung mit Hilfe von Nervenendigungen in unserer Haut. Im einfachsten Fall spüren wir die Erde unter unseren Füßen mit den Nervenendigungen in der Fußsohle /Gib-1973/.

Ein Computer wird nur in Ausnahmefällen, beispielsweise bei einer entsprechenden Behinderung, mit den Füßen bedient werden. Gewöhnlicherweise kommuniziert der Computerbenutzer mit dem Rechner über den Monitor, d.h. den Sehsinn und Tastatur und Maus, d.h. einem erheblich reduzierten Tastsinn. In diesem Fall nimmt der Tastsinn nur die Aufgabe wahr zu kontrollieren, ob eine Taste auf der Tastatur oder der Maus betätigt wurde. Diese Kontrolle erfolgt natürlich redundant über den Monitor.

1.3 Professionelle Wahrnehmung von Freiformflächen

Freiformflächen werden im Alltag gewöhnlich mit dem Auge wahrgenommen. Dies trifft besonders auf Automobile zu. Meistens wird die Umgebung für die Wahrnehmung benutzt, die sich in Form von Hell-Dunkel-Kontrasten auf der Karosserie spiegelt. Quasi „en passant“, d.h. im Vorbeigehen, werden diese Kontraste über die Karosserie bewegt und liefern die Informationen zur Beurteilung der Karosseriequalität. Stylisten benutzen diesen Effekt ebenfalls in modifizierter Form. Sie lassen das Licht einer oder mehrerer paralleler Neonröhren auf die Karosserie fallen und erzeugen damit streifenförmige Hell-Dunkel-Kontraste. Steht nur das Tageslicht oder eine einzige Lichtquelle zur Verfügung, so wird durch einen scheckkartenähnlichen Gegenstand das Licht bis auf einen schmalen Spalt abgeblendet. Der Gegenstand, der eine elastische Latte simuliert, wird über die Fläche geführt unter Beobachtung des Spaltes zwischen Oberfläche und Gegenstand.

Reicht die visuelle Wahrnehmung nicht aus, so wird von Stylisten der Handballen benutzt. Dabei gleitet der Handballen unter leichtem Druck über die Oberfläche zur Erkennung feinsten Fehler in der Fläche. In diesem Fall besitzt der Tastsinn eine „höhere Auflösung“, d.h. eine höhere Genauigkeit, als der Sehsinn /Schn-2001/. Oberflächenfehler treten beispielsweise dann auf, wenn ein Tonmodell manuell in verkleinertem Maßstab (1:n) geschaffen wurde.

Manuell nicht wahrnehmbare Flächenfehler werden bei der Abtastung mit einer Koordinatenmessmaschine digitalisiert und durch Überführung in den Endmaßstab (1:1) vergrößert. Nun werden die entstandenen Punktwolken mit einem halbautomatischen Algorithmus in rechnerinterne Freiformflächen überführt. Bei der Überführung werden durch Fehler des Tonmodells in einigen Flächen „Wellen“ erzeugt, die durch die Flächen laufen. Ebenso kann der Algorithmus, der aus den Punktwolken Flächen erzeugt, der Verursacher weiterer Flächenschwingungen sein.

Häufig lassen sich diese Wellen auf dem Monitor mit bloßem Auge erkennen. Als Hilfsmittel werden an jedem Flächenpunkt Krümmungswerte berechnet und mit Hilfe unterschiedlicher Farben optisch dargestellt: Wellen werden dann als Streifen mit abwechselnder Farbe sichtbar. Dies ist jedoch nicht immer der Fall. Erst wenn letztlich ein Modell in einem geeigneten Maßstab hergestellt wurde, können alle fehlerhafte Ergebnisse von den Stylisten optisch und haptisch wahrgenommen werden. Derartige reale Modelle sind jedoch sehr zeit- und kostenaufwendig.

Um den Kosten- und Zeitaufwand für die Beurteilung rechnerinterner Freiformflächen bzw. die Erkennung von Flächenfehlern zu senken, ist es naheliegend, zwischen der optischen Fehlersuche am Bildschirm und der haptischen Fehlersuche am realen Modell eine weitere Beurteilungsmöglichkeit zu schaffen. Diese Methode sollte dem Flächenkonstrukteur die haptische Beurteilung seines rechnerinternen Modells direkt an seinem CAD-Arbeitsplatz ohne Erstellung eines physikalischen Modells erlauben.

Mit diesem Ziel ist es notwendig, ein Verfahren oder/und ein Gerät zu entwickeln und zu erproben, welches die optische (grafische) Benutzungsoberfläche eines CAD-Systems um eine haptische Komponente erweitert. Die vorliegende Arbeit zielt damit auf eine Erweiterung der Benutzungsschnittstelle von Rechnern in der Konstruktion. Mit dem folgenden Kapitel soll eine Übersicht über das Thema „Benutzerschnittstelle von Rechnern in der Konstruktion“ gegeben werden. Es sei an dieser Stelle bemerkt, dass häufig der Begriff „Benutzerschnittstelle“ benutzt wird. Genau genommen bezeichnet dieser Begriff die „Schnittstelle des Benutzers“. Dies ist weder logisch noch gemeint. Daher wird im folgenden das präzisere Wort „Benutzungsschnittstelle“ verwendet /Wik-2004/.

2 Benutzungsschnittstelle von Rechnern in der Konstruktion

Das vorangegangene Kapitel betrachtete den Sinn zur Wahrnehmung von Flächen als Bestandteil der menschlichen Sinne. Die Anwendung dieses Sinnes im professionellen Bereich der Designer und Stylisten führt zum strategischen Ziel der vorliegenden Arbeit, die bisher primär optische Benutzungsschnittstelle von Rechnern, insbesondere von CAD-Arbeitsplätzen, um eine haptische Komponente zu erweitern. In diesem Kapitel wird nun die historische Entwicklung der Benutzungsschnittstelle von Rechnern in der Konstruktion betrachtet. In diesen Kontext fügt sich das Projekt „FIORES“, auf dem sich wiederum die vorliegende Arbeit gründet. Das Kapitel schließt mit der operationalen Zielsetzung der Arbeit ab.

Die Weiterentwicklung der Rechnerunterstützung in Konstruktion und Fertigung steht in Beziehung zu mehreren Faktoren. Der wichtigste Faktor ist die Globalisierung der Märkte, die seit dem 19. Jahrhundert stattgefunden hat. Diese Globalisierung hat den Vorteil größerer Einkaufs- und Absatzmärkte, also die Erzielung niedrigerer Einkaufspreise und die Vergrößerung der Zahl möglicher Kunden. Beispielsweise wird das Kupfer für in Europa hergestellte Automobilelektronik aus Südamerika bezogen, die in Europa gefertigten Automobile oft nach Nordamerika exportiert. Nachteil der Globalisierung ist die Zunahme an Konkurrenz. Die erhöhte Konkurrenz führte zu Firmenschließungen oder Zusammenschlüssen. Beispielsweise werden die meisten aller weltweit eingesetzten Düsenjets von nur zwei Firmen produziert.

Ein weiterer, zur Globalisierung paralleler Faktor resultiert aus der Verkürzung des Produktionszeitraumes. Einerseits verliert ein Produkt heute schneller seine Akzeptanz beim Kunden, andererseits wird die Kurzlebigkeit auch vom Produkthersteller gewünscht. Um den dadurch sinkenden Produktionserlösen gerecht zu werden, versuchen die produzierenden Unternehmen die Entwicklungszeiten und -kosten ihrer Produkte zu reduzieren.

Marktglobalisierung und Verkürzung von Entwicklungszeiten stehen in Beziehung zu Kommunikations- und Konstruktionswerkzeugen. Wurde vor dreißig Jahren noch überwiegend innerhalb nationaler Grenzen auf Papier gezeichnet und mit Hilfe der beschriebenen Papiere kommuniziert, so wird heutzutage mit Hilfe elektronischer Datenverarbeitungsanlagen konstruiert und über Datenleitungen kommuniziert. Ohne diese Technik ist eine globale Unternehmung nicht denkbar; umgekehrt hat gerade der Wunsch nach globalen Strukturen auch die Entwicklung der digitalen Techniken beschleunigt.

Bei der Entwicklung von Automobilen und anderer Konsumgüter wird als dritter Faktor das Design immer höher bewertet. Technische Aspekte verlieren demgegenüber für die Differenzierung im Wettbewerb an Bedeutung. Zum Beispiel beruhen die meisten 4-Zylinder-Benzin-

motoren des VW Modells „Golf“ der Serien I-III auf einer einzigen Motorblockentwicklung aus den sechziger Jahren /Hac-1994/. Das heißt, einerseits steigen die Anforderungen an die Qualität des Karosseriedesigns, andererseits sind diese Anforderungen in sinkender Zeit zu bewältigen.

Zur Bewältigung dieser Vorgaben werden die entsprechenden Abteilungen der Hersteller mit den bestmöglichen "Werkzeugen" ausgerüstet. Werkzeugverbesserung bedeutet hier im weiteren Sinne neben der Weiterentwicklung der Rechnersysteme und Softwareprogramme auch die Weiterqualifikation der Mitarbeiter /Sym-2000/.

Rechnerunterstütztes Konstruieren (engl.: CAD = Computer Aided Design) verlangt von den verwendeten Rechnern zunächst hohe Rechenleistungen, die von einer zentralen Recheneinheit (engl.: CPU = Central Processing Unit) (oder mehreren) und entsprechend dimensioniertem Hauptspeicher bereitgestellt wird. Zur Darstellung der Ergebnisse sind hohe Grafikleistungen notwendig. Als Beispiel für die technische Entwicklung auf diesem Gebiet seien einige technische Daten genannt. So kostete ein CAD-fähiger Rechner im Jahre 1996 der Marke SGI, Typ Indigo2 inklusive Bildschirm ca. 70.000DM. Dieser hatte in etwa die Rechenleistung eines PC, Typ Pentium II mit 300Mhz Taktfrequenz. Heutige (2004) CAD-Arbeitsplätze haben eine nahezu zehnfache Taktfrequenz bei einem Zehntel der Kosten des Rechners von 1996. Ähnlich entwickelten sich die Leistungen der Recheneinheit für die grafische Ausgabe auf dem Monitor (engl.: GPU = Geometric Processing Unit). Als Maßstab diene hier die Größe von Texturspeichern. Ein Texturspeicher legt ein Muster („Textur“) auf eine geometrisch glatte Fläche und erhöht damit die Realitätsnähe deutlich. Je größer der Texturspeicher, umso komplexere Muster sind möglich, um so realitätsnäher ist die Darstellung. Verfügte die beste Grafikkarte für die schon genannte SGI Indigo2 aus dem Jahr 1996 noch über einen Texturspeicher von maximal 4MB, so sind im Jahr 2003 Texturspeicher von 256MB (SUN Microsystems, XVR-1000 oder 3Dlabs Wildcat III 6210) möglich.

Demgegenüber haben sich Ein- und Ausgabegeräte nur geringfügig entwickelt, zeitweilig sogar zurückentwickelt. So gab es Anfang der achtziger Jahre manchmal zwei CAD-Monitore, die zu einem Rechner bzw. Terminal gehörten, oder neben dem eigentlichen CAD-Monitor noch „Alpha“-Schirme. Alpha-Schirme sollten die kleinflächigen, teuren Grafikmonitoren von der Ausgabe reinen Textes entlasten. Diese Doppel-Monitorlösungen waren zwischenzeitlich, d.h. in den neunziger Jahren, nicht mehr gebräuchlich. Standard-CAD-Arbeitsplätze verfügten im Jahr 1996 über einen Monitor mit einer SXGA-Auflösung von 1280x1024 Bildpunkten auf einer Bilddiagonalen von 21Zoll, resp. 53,3cm. Heutige Standard-CAD-Monitore bieten bis zu 1600x1200 (UXGA-Auflösung) Bildpunkte auf einer Bilddiagonalen von bis zu 21 Zoll, resp. 61cm. Zur Erhöhung der Darstellungsfläche zeichnet sich derzeit wieder ein Trend zur Zwei-

Monitor-Lösung ab. Dadurch können mehr Bildpunkte genutzt werden als bei einer Ein-Monitor-Lösung. Zudem sind zwei Standardmonitore billiger als ein einziger, großer Monitor. Zum Beispiel kosten zwei 18-Zoll-TFT-Monitore mit SXGA-Auflösung mit zusammen 2,62 Mio. Bildpunkte weniger als ein 24“TFT-Monitor mit UXGAW-Auflösung, entsprechend 2,3 Mio. Bildpunkten. Der entsprechende Preisverfall wird durch die folgenden Zahlen verdeutlicht: Sommer 2002: ca. 4000,-- EUR für zwei 18-Zoll-Monitore respektive 5000,-- EUR für einen 24-Zoll-Monitor; Sommer 2003: ca. 2000,-- EUR für zwei 18-Zoll-Monitore, resp. ca. 3500,-- EUR für einen 24-Zoll-Monitor. Die weitere Entwicklung in diesem Punkt könnte zu einer Rückkehr von digitalen Konstruktionsflächen der Größe DIN A0 führen. Eine solche Konstruktionsfläche würde beim derzeit üblichen Bildpunktabstand von ca. 0,25mm Millimeter zu einer Gesamtzahl von 16 Mio. Bildpunkten (Pixel) führen. Seit Ende 2001 ist ein LCD-Monitor (Einführungspreis im Jahr 2001: ca. 22000,-- EUR, heutiger Preis: ca. 7000,-- EUR) mit einer Bilddiagonalen von 22,2 Zoll (56,4cm) und einer Auflösung von 9,2 Mio Bildpunkten verfügbar. Um diese Auflösung zu nutzen sind derzeit vier Grafikkarten notwendig. Diese technische Entwicklung könnte Wegbereiter zu deutlich größeren CAD-Konstruktionsflächen sein.

Zusätzliche Tablett mit Tasten oder Felder für Spezialfunktionen, die ebenfalls eine Erweiterung der knappen Bildschirmfläche darstellen, sind unüblich geworden. War anfangs im konstruktiven Bereich eine 3-Tasten-Maus, die den Mauszeiger auf dem Bildschirm in zwei Dimensionen bewegt, üblich, so können heute mit entsprechenden Geräten rechnerinterne 3D-Objekte in allen drei Raumrichtungen verschoben und um alle drei Raumachsen gedreht werden.

Heute steht der Entwicklung und Konstruktion nicht nur der Monitor als Werkzeug zur Prüfung der Arbeitsergebnisse zur Verfügung. Die folgende Tabelle zeigt gebräuchliche Möglichkeiten mit ihren wichtigsten Eigenschaften wie Kosten, Zeitverbrauch, Anzahl gleichzeitiger Nutzer und Ergebnishaltbarkeit.

Werkzeug	Werkzeugkosten	Werkstückkosten	Zeitverbrauch	Personenzahl	Ergebnishaltbarkeit
AP-Monitor	ca. 10^3 EUR	keine	keine	max. 2 Pers.	temporär
AP-Monitor mit VR-Shutter-Brille	ca. 10^3 EUR	keine	keine	max. 2 Pers.	temporär
VR-AP-Monitor	$> 10^4$ EUR	keine	keine	max. 2 Pers.	temporär

Grossbildprojektor	ca. 10^5 EUR	keine	keine	Gruppen	temporär
Raumgrosse VR	10^5 - 10^6 EUR	keine	keine	Klein- gruppen	temporär
RPT-Maschinen	$> 10^6$ EUR	10^5 Euro	Stunden bis Tage	Klein- gruppen	permanent

Legende:

AP = Arbeitsplatz, VR = Virtual Reality

RPT = Rapid Prototyping Tool = Maschinen zur schnellen Herstellung von Prototypen mittels Stereolithographie (STL), Laminated Object Manufacturing (LOM), Hochgeschwindigkeitsfräsen (engl. HSC = High-Speed-Cutting), Lasersintern und anderen Verfahren.

Tab. 2.1: Verfügbare Qualitätsprüfungswerkzeuge in der Konstruktion

Wie aus der Tabelle hervorgeht, dienen der Prüfung der rechnerinternen Ergebnisse vermehrt vom Arbeitsplatz abgekoppelte großflächige oder großräumige Visualisierungstechniken, z.B. (2D-)Grossbildprojektionen oder virtuelle 3D-Simulationen mit Hilfe von VR mit mehreren Metern an Diagonale (je nach eingesetztem Projektionssystem CAVE, HoloBench oder Powerwall genannt /IAO-2003/). Ein weiteres Prüfwerkzeug sind physikalische Prototypen, die mit Rapid Prototyping Technology (RPT) hergestellt werden. Sie sind zeit- und kostenintensiver als die Visualisierungstechniken. Ihr Vorteil ist die "Permanenz" einerseits und die Nutzung bekannter Fertigungstechniken. Mit Hilfe von RPT-Verfahren konnten enorme Kosten- und Zeiteinsparungen erreicht werden. Zum Beispiel konnten laut Scharf /Sch-2001/ die Herstellkosten eines realen Motorenmodells für Montageuntersuchungen von einigen hunderttausend Euro auf sechzigtausend Euro gesenkt werden. Ebenso sank die Herstellungszeit von einigen Monaten auf einige Wochen. Metallen und Legierungen werden im RPT-Bereich zukünftig eine größere Bedeutung als bisher erlangen /Hof-1998/. Dies wird zu weiteren Einsparungen führen.

Direkt am Arbeitsplatz hat der Konstrukteur den Bildschirm mit einer Diagonale von 20-24 Zoll (50-60cm) als Werkzeug zur Prüfung seiner Arbeit. Für Montagesimulationen ist der Bildschirm häufig als sogenannter „VR-Bildschirm“ (VR = Virtual Reality) aufgebaut. In diesem Fall wird jedem Auge des Betrachters ein eigenes Bild (mit mindestens 60 Hz) angeboten. Dadurch erhält der Betrachter den Eindruck, vor dem eigentlichen Bildschirm ein dreidimensionales Bild des Gegenstandes zu sehen.

Visuelle Techniken erlauben nicht die Darstellung aller Fehler bei Flächen höchster Qualität. Diese Flächen werden in der deutschen Automobilindustrie gemäß der Empfehlung 4955 „Umfang und Qualität von CAD/CAM-Daten“ als „Class-A-Flächen“ bezeichnet. Gemeint sind explizit „styling- bzw. designrelevante Geometrien, z.B. Sichtflächen bei Karosserieteilen /VDA-1999/. Um Class-A-Flächen schon am Monitor prüfen zu können, werden die verfügbaren Visualisierungstechniken permanent verbessert. Um Class-A-Flächen unter höchsten Ansprüchen beurteilen zu können, ist die Fertigung eines physikalischen Prototypen notwendig. Dieser benötigt zur Herstellung Tage oder Wochen und ist entsprechend kostenintensiv.

Beim Ansatz der „virtuellen Realität“, genauer gesagt: der optischen VR, wird dem Benutzer der modellierte Gegenstand dreidimensional optisch vorgetäuscht. Verändert der Benutzer bei letzterem Fall seinen Blickwinkel, ändert sich wie beim einem realen Gegenstand auch der Anblick, im Gegensatz zum 2D-Bild. Die Erhöhung der Dimension, bezogen auf einen normalen Monitor, entspricht einerseits eher der Realität. Das heißt, die 3D-Bilder sind reeller als 2D-Bilder, ebenso wie eine Statue (um eine, die dritte Dimension) reeller ist als ein Bild. Andererseits ist die Erhöhung der Dimensionen verbunden mit einer Potenzierung der Geräteleistung. Folglich sind die Anwendungsfälle bis heute aus Kostengründen beschränkt.

Zudem wurden bei den ersten VR-Aufbauten Akzeptanzprobleme beim Benutzer deutlich. Ein Übermaß an vorgetäuschten Objekten führt gegebenenfalls zu widersprüchlichen Sinneswahrnehmungen bei dem Benutzer. Um diese negativen Folgen einer virtuellen Welt zu vermeiden, beschränkt man sich derzeit darauf, eine reale Umgebung um virtuelle Objekte zu ergänzen. Dieser Weg wird als „Augmented Reality“, auf deutsch „angereicherte Realität“ bezeichnet. Als Mittel dienen dabei Spezialbrillen. Kleinste Projektoren, die an der Brille montiert sind, projizieren Bilder virtueller Objekte auf halbdurchsichtige Brillengläser. Der Brillenträger sieht dabei sowohl die reale Welt als auch eingeblendete virtuelle Objekte. Bewegt er den Kopf, wird die Projektion entsprechend nachgeführt. Ein derartiges System wurde unter anderem im vom BMBF geförderten Projekt „ARVIKA“ (umschrieben mit „Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service) entwickelt /ZIM-2001/. ARVIKA war ein von 1999 bis 2003 vom BMBF gefördertes Konsortialprojekt unter Leitung von Siemens. Um die Akzeptanzprobleme bei Virtual Reality zu erhöhen wird zum anderen versucht, visuelle Wahrnehmungen mit den Wahrnehmungen anderer Sinne zu kombinieren.

Um haptische Wahrnehmungen virtueller, d.h. rechnerinterner, Gegenstände zu ermöglichen wurden eine große Zahl von Geräten entwickelt. Kommerzielle Verbreitung hat das Gerät "Phantom" der Firma Immersion erfahren. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen passiven Roboterarm, der vor einem VR-Bildschirm arbeitet. Passiv heißt, dass die Spitze des Roboterarmes vom Benutzer bewegt wird. Die Position der Spitze wird permanent gemessen. Stellt der

Rechner eine Kollision zwischen Spitze und dem VR-Modell fest, so wird ein weiteres Eindringen der Spitze in das Modell je nach Materialeigenschaft des virtuellen Modells be- oder verhindert. Das Gerät wird wegen seiner geringen Arbeitsreichweite (max. 1 m Raumdiagonale) in Kombination mit VR-Bildschirmen unter anderem für Einbauuntersuchungen benutzt /FPA-2001/.

Gleichermaßen verbreitet ist der „Cybergrasp“ der Firma Immersion. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen aktiven Handschuh. Dieser Handschuh kontrolliert den Bewegungsraum der Fingergelenke. Der Cybergrasp wird vom Benutzer getragen und erzeugt in einer metergrossen 3D-VR-Szene das Gefühl, kleinere virtuelle Geräte greifen zu können. Eine detailliertere Auflistung von Geräten, die der haptischen Ein- oder Ausgabe rechnerinterner Modelle dienen, ist mit Angabe wesentlicher technischer Merkmale in Kapitel 4 ab Seite 29 zu finden.

Der Vollständigkeit halber seien auch Forschungsansätze und Produkte erwähnt, die darauf zielen, den Wärmesinn des Systemnutzers anzusprechen /How-2002/ /CMR-2000/.

2.1 Begründung der Forschung auf dem Gebiet der Haptik

Während des Forschungsprojektes FIORES wurde 1997 von Dagefoerde vorgeschlagen, (rechnerinterne) Freiformflächen nicht nur durch bessere Software-Algorithmen zu modifizieren sondern auch durch ein virtuelles Schleifgerät, einen „Haptischen Schleifstein“ /Dag-1997/. Dabei sollte die Bewegung einer Spacemouse zu einer verzögerungsfreien Veränderung von Freiformflächen führen. Naheliegender Ansatz war dabei, die Bewegungsdaten der Spacemouse an ein FEM-System zu koppeln. Die Kopplung mit einem FEM-System in Echtzeit schien nicht realisierbar. Ähnliche Versuche wurden innerhalb des Grossprojektes IVIP unternommen, auch dort musste nach Zimmermann "bei den momentan zur Verfügung stehenden Rechenleistungen ein Kompromiss zwischen Realismus und Echtzeit gesucht werden" /Zim-2001/. Schon davor war am MIT ein entsprechender Ansatz als technisch nicht realisierbar verworfen worden /ZIL-1995/. Mit heute verfügbaren Rechenleistungen könnte eine Echtzeit-FEM allerdings durchaus realisierbar sein. Erfolgreiche Ansätze sind jedoch nicht bekannt.

Aus dem "Haptischen Schleifstein" wurde eine "Haptische Hand" herausgelöst. Dieses Gerät sollte zunächst nur die Flächennormale eines beliebigen Punktes einer rechnerinternen Freiformfläche fühlbar machen. Dazu war die aktive Neigung einer kleinen Fläche um zwei Achsen (Taumelscheibe) zu realisieren, also eines Gerätes mit 2 Freiheitsgraden (Fhg). Diese Taumelscheibe sollte durch Motoren geneigt werden, die Motoren sollten durch Menüs eines CAD-Systems gesteuert werden. Die Aufgabe schien mit vertretbarem Aufwand realisierbar.

Ein Konzept des angedachten Gesamtsystemes zeigt das folgende Bild.

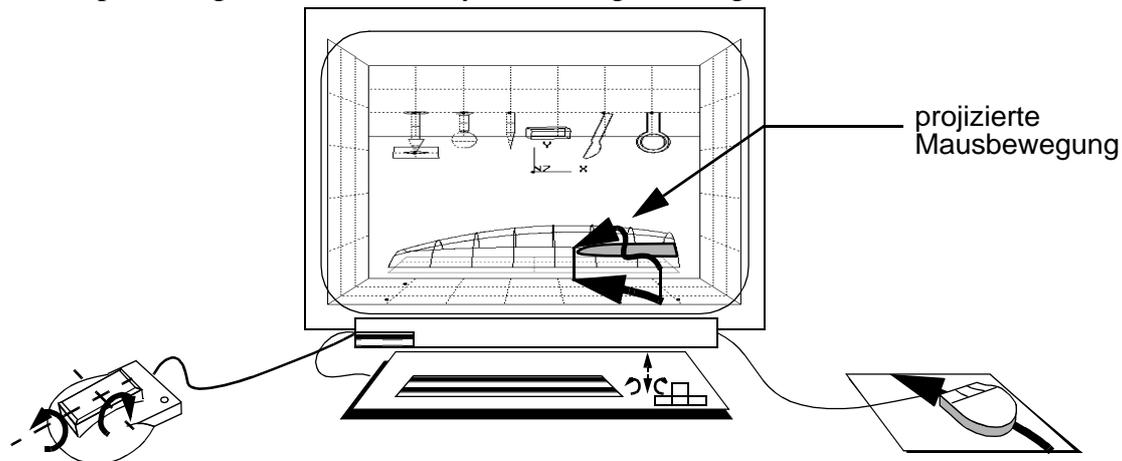


Abb. 2.1: Konzept des Gesamtsystems

Im Rechner ist eine beliebige Freiformfläche dargestellt. Der Benutzer bewegt eine normale Computermouse entlang einer beliebigen Kurve. Die Bewegung der Maus entspricht einer Bewegung des Mauszeigers über dem Bildschirm. Der Mauszeiger wird zunächst auf eine Referenzfläche projiziert. Der gefundene Projektionspunkt wird wiederum parallel zum Normalenvektor der Referenzfläche auf die Freiformfläche projiziert. Sind beide Projektionen erfolgreich, wird dadurch ein Punkt auf der Freiformfläche ermittelt. Der Normalenvektor am gefundenen Flächenpunkt wird auf die links dargestellte Taumelscheibe übertragen. Abb. 2.1 zeigt auch, dass die graphische Benutzeroberfläche als „virtuelle Werkstatt“ konzipiert war, mit Boden und Seitenflächen sowie virtuellen Werkzeugen.

Im Lauf der Prototypenentwicklung zeigte sich, dass die Neigung um zwei Achsen kinästhetische Wahrnehmungen auslöst, also Wahrnehmungen in den Mechanorezeptoren der Gelenke. Um auch taktile Wahrnehmungen präsentieren zu können, wurde ein dritter, translatorischer Freiheitsgrad eingeführt, mit dem die Taumelscheibe in der Hochachse bewegt werden kann. Damit werden Wahrnehmungen in den Mechanorezeptoren der Haut möglich, zum einen durch Krafrückkopplung, zum anderen durch mögliche Vibrationen.

Dieser Ansatz führte zur Zielsetzung der vorliegenden Arbeit.

2.2 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Das vorangegangene Kapitel begründet die Auswahl des Forschungsgebietes „Fühlbare Darstellung rechnerinterner Freiformflächen“. Diese Auswahl führt zu der Frage, welche Eigenschaften einer Fläche fühlbar sein müssen. Je mehr Eigenschaften gleichzeitig fühlbar sein müssen, desto größer wird der konstruktive Aufwand. Eine prinzipiell unnötig hohe Zahl an

Freiheitsgrade führt auch praktisch nicht zwangsläufig zu einer besseren Leistung /GöF-2002/. Hier zeigt sich die Eleganz der in Kapitel 2.1 beschriebenen „Haptischen Hand“. Sie verfügt über zwei passive (durch den Benutzer bediente) Freiheitsgrade und über maximal drei aktive (durch Motoren gesteuerte) Freiheitsgrade. Damit kann sie nur die Eigenschaften eines einzigen Punktes einer rechnerinternen Fläche fühlbar machen. Die Maus muss bewegt werden, um eine Fläche mittels einer Summe von Eindrücken haptisch darzustellen. Der Ansatz führt schließlich zur zentrale These der vorliegenden Arbeit:

"Es wird behauptet, dass eine rechnerinterne Freiformfläche durch eine rechnerexterne, in maximal 3 Freiheitsgraden vom Rechner gesteuerte und in weiteren zwei Freiheitsgraden vom Benutzer bewegbare, Referenzfläche mit dem haptischen Wahrnehmungssinn wahrgenommen und eindeutig interpretiert werden kann."

Mit dem Begriff „externer Referenzfläche“ sei eine reale Fläche mit kleinen Abmessungen bezeichnet, die sich ausserhalb des Rechners befindet. Die Abmessungen müssen die Auflage von mindestens drei Fingern und/oder eines Handballens zulassen. Diese Fläche habe drei Freiheitsgrade: zwei rotatorische und einen translatorischen Freiheitsgrad. Die Fläche muss sich mit geringstmöglicher Verzögerung der Normale und Höhe an einem beliebigen Flächenpunkt der rechnerinternen Freiformfläche relativ zu einer Bezugsebene anpassen.

Unter dem Begriff “eindeutige Interpretation“ wird verstanden, dass die Versuchspersonen eine eindeutige und reproduzierbare Beziehung zwischen ihrer optischen und ihrer haptischen Wahrnehmung herstellen können.

Der Beweis der These erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst wird im folgenden Kapitel der Stand des Wissens dargestellt. Dieser Darstellung folgt die Darstellung der derzeit verfügbaren Technik im Kapitel 4 ab Seite 29. In Kapitel 5 ab Seite 37 wird die Entwicklung der Versuchsausrüstung beschrieben. Die Beschreibung der mit Hilfe der Versuchsausrüstung durchgeführten Versuchsreihen findet sich in Kapitel 6 ab Seite 56. Die Versuchsergebnisse, gegliedert nach den einzelnen Versuchsreihen, finden sich in Kapitel 7 ab Seite 72. Eine Zusammenfassung der Versuchsergebnisse, ihre Interpretation, Vergleich mit anderen Forschungsergebnissen und der Vergleich mit der These der vorliegenden Arbeit finden sich im Kapitel 8 ab Seite 91. Abschließend enthält das Kapitel 9 eine Gesamtzusammenfassung und einen Ausblick auf weitere notwendige und mögliche Arbeiten.

3 Stand des Wissens

Im vorangegangenen Kapitel wurde die zentrale These der vorliegenden Arbeit abgeleitet. Der Beweis dieser These wird mit der Erarbeitung des Wissensstandes begonnen. Die Betrachtungen über den Stand des Wissens teilen sich in zwei Themengebiete auf. Zum einen wird das Wissen über den menschlichen Tastsinn behandelt, also physiologische Fakten und Abhängigkeiten. Zum anderen ist das Wissen über taktile Ausgabegeräte dargestellt. Die Gegenüberstellung soll dazu dienen, ein technisches Ausgabegerät auszuwählen, dessen Informationen vom menschlichen Tastsinn optimal ausgewertet werden können.

3.1 Mathematische Beschreibung von Freiformflächen

Mitte/Ende der fünfziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts wurde es laut Lutz /Lut-2002/ „immer wichtiger, Flächengeometrien von Bauteilen in einer computergerechten Form zu speichern“. Grundlage waren wiederum Raumpunkte, die beim „Digitalisieren“, d.h. dem Abtasten einer Oberfläche mit einer Messanlage, entstanden. Jeder Tastvorgang führt dabei zu einem Raumpunkt.

Ab Ende der fünfziger Jahre formulierten die Konstruktionsabteilungen den Wunsch, nicht nur bestehende Oberflächen in rechnerinterne Punktemengen zu überführen, sondern mit geeigneten Verfahren zusammenhängende Flächen zu erzeugen und zu verändern.

Erste Beiträge zur Kurvenbeschreibung auf der Basis von Kontrollpunkten wurden 1959 von de Casteljeau, einem Mitarbeiter der Firma Citroen, Frankreich, geliefert, 1961 auch von Bézier, einem Mitarbeiter der Firma Renault, Frankreich. De Boor und Gordon von General Motors, USA, sowie Ferguson von der Firma Boeing, USA, stellten 1963 die mathematische Beschreibung von „Splinekurven“ vor. 1967 gab Coons vom Massachusetts Institute of Technology, (MIT) USA, eine Formel zur Beschreibung von Flächen auf Basis existierender Formen an /Pri-2004/. Das folgende Bild zeigt die Kurven- bzw. Flächenbeschreibung nach Bézier (zitiert von Hoschek und Lasser /HoL-1992/) und erklärt ihre Bestandteile.

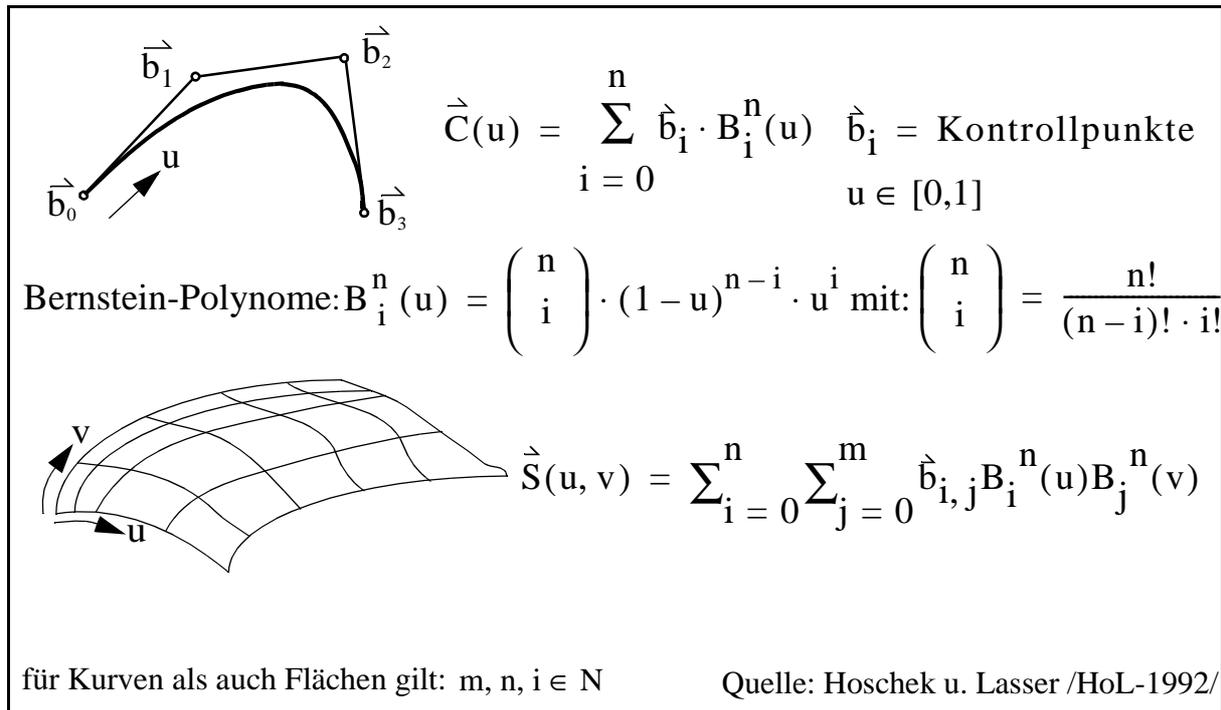


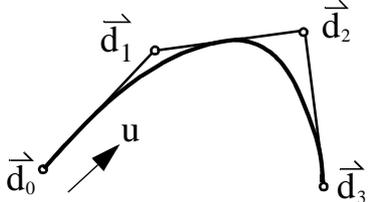
Abb. 3.1: Kurven- bzw. Flächenbeschreibung nach Bézier

Aus dem Bild geht hervor, dass eine beliebige Raumkurve mit Hilfe von Punkten im Raum, den sogenannten Kontrollpunkten oder Bézierpunkten, modelliert wird. Die Werte der Kontrollpunkte können vom Benutzer beliebig verändert werden. Damit können Freiformkurven und Freiformflächen beliebiger Art modelliert werden.

Der Erfolg der Ende der fünfziger Jahre bzw. in den sechziger Jahren vorgestellten Kurven- und Flächenbeschreibungen geht auch auf eine andere Eigenschaft zurück. Zur damaligen Zeit wurde die Rechenleistung eines Computers noch - oder schon - in Kilohertz (1000 Schaltvorgänge pro Sekunde) und der Speicherplatz in Kilobytes (1024 resp. 2^{10} Gruppen aus gewöhnlich acht Speicherzellen, von denen jede den Wert 1 oder 0 annehmen kann) angegeben /Hec-2000/. Für die Anwendung der Kurven- bzw. Flächenbeschreibungen auf Basis weniger Kontrollpunkte wurde weniger Speicherplatz und Rechenleistung als zur Speicherung und Verarbeitung von Punktwolken benötigt. Lediglich die schattierte Darstellung der rechnerinternen Flächen auf dem Monitor war in den sechziger Jahren unmöglich im Gegensatz zur Darstellung von Punkten. Als Ausweg wurden daher nur einige wenige charakteristische Linien der Flächen auf den Bildschirmen dargestellt.

Der Ansatz nach Bézier leidet unter zwei Mängeln. Zum ersten ist der Kurvengrad gleich der Kontrollpunktezahl -1. Daher neigen Bézierkurven bzw. -flächen mit vielen Kontrollpunkten zu unerwünschten Schwingungen. Zum zweiten wird bei Änderung eines einzigen Kontroll-

punktes die Form der gesamten Kurve verändert, eine lokale Modifizierbarkeit ist also nicht gegeben. Diese Nachteile wurden mit der Entwicklung der B-Splines umgangen. Die mathematische Formulierung der Beschreibung von Kurven bzw. Flächen mit Hilfe von B-Splines ist in Anlehnung an Dankwort im folgenden Bild dargestellt /Dan-2004/.



$$\vec{C}(u) = \sum_{i=0}^n \vec{d}_i N_{ik}(u)$$

$$N_{i, k=1}(u) = \begin{cases} 1 & \text{für } [u_i, u_{i+1}] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$k = \text{Kurvenordnung} = \text{Kurvengrad} + 1$

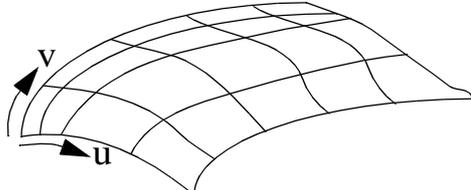
$\vec{d}_i = \text{de-Boor-Punkt} = \text{Kontrollpunkt}$

$n = \text{Anzahl der Kontrollpunkte} + 1$

$k > 1$: Rekursionsformel, d.h. Entwicklung aus zwei Polynomen niedrigeren Grades:

$$N_{i, k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k-1} - u_i} N_{i, k-1}(u) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} N_{i+1, k-1}(u)$$

Die Polynome $N_{i,k}(u)$ werden mit Hilfe eines Trägervektors $T=(u_0, u_1, \dots, u_{n+k})$ definiert. Bei einem „offenen“ B-Spline sind die ersten k Werte gleich und die letzten k Werte gleich.



$$\vec{S}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \vec{d}_{ij} N_{ik}(u) N_{jl}(v)$$

Quelle: Dankwort /Dan-2004/

Abb. 3.2: B-Spline-Kurven- bzw. Flächenbeschreibung nach de-Boor

Es ist offensichtlich, dass die B-Spline-Kurvendarstellung komplexer ist als die Bézier-Kurvendarstellung. Mit dieser mathematischen Darstellung werden jedoch die Nachteile der Bézier-Kurvendarstellung umgangen. Vorteil der B-Spline-Kurvendarstellung ist in erster Linie eine Entkopplung des Kurvengrades von der Zahl der Kurvenkontrollpunkte. Es könnte theoretisch sogar $k=1$ gewählt werden, also Kurvengrad=0, damit ergäbe sich eine Kurve „nullten“ Grades - die „Kurve“ würde dann von Punkt zu Punkt „springen“. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist, dass ein Kontrollpunkt immer nur einen Abschnitt der Freiformkurve bzw. ein Teilgebiet der Freiformfläche beeinflusst. Durch diese Eigenschaft der „lokalen Modifizierbarkeit“ erhöht sich die Anwendbarkeit dieser mathematischen Beschreibung im Designbereich erheblich.

Bei Wahl geeigneter Randbedingungen vereinfacht sich die B-Spline-Beschreibung zur Bézierkurvenbeschreibung, d.h. Bézierkurven und -flächen sind Spezialfälle von B-Spline-Kurven bzw. -flächen. Ebenso ist die in Abb. 3.2 gezeigte B-Spline-Kurvenbeschreibung ein Spezialfall der Kurven- bzw. Flächenbeschreibung mit Hilfe von NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) /Dan-2004/. Für die vorliegende Arbeit werden Freiformflächen benutzt, die in der B-Spline-Beschreibung vorliegen, daher wird auf die Darstellung der NURBS-Beschreibung an dieser Stelle verzichtet.

3.2 Der menschliche Tastsinn

3.2.1 Der Versuch von Aristoteles

Weitverbreitet in der Literatur ist der „Versuch des Aristoteles“ /Ari-340v.Chr./. Aristoteles stellte die Frage „Warum erscheint ein zwischen zwei überkreuzten Fingern gehaltener Gegenstand doppelt?“ Er selbst gab die folgende Antwort darauf: „Doch wohl deshalb, weil wir ihn mit zwei Sinneswerkzeugen berühren. Denn wenn wir die Hand in der natürlichen Stellung halten, können wir den Gegenstand nicht mit den Außenseiten der beiden Finger berühren“. Diese Gedanken finden sich im Werk „Problemata Physica“, im dortigen Buch XXXV „Was die Wirkung der Berührung betrifft“ in Absatz 10. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass das Werk „Problemata Physica“ heute den Schülern des Aristoteles zugeschrieben wird.

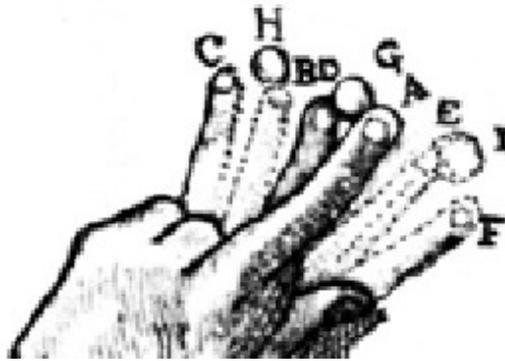
Der sogenannte „Versuch des Aristoteles“ wird in der späteren Literatur wiederholt diskutiert, zum Beispiel bei Descartes im 17. Jahrhundert /Des-1637/, bei Henri im 19. Jahrhundert /Hen-1898/ oder Ewald /Ewa-1910/ im zwanzigsten Jahrhundert.

Ewald ergänzt fast zweitausend Jahre später den Versuch um eine „Umkehrung“. Er beobachtet, ohne eine Erklärung zu geben, dass „zwei gleichartige Gegenstände, die zwei (benachbarte) Finger von außen her berühren, einfach wahrgenommen“ werden.

Der folgende Abschnitt zeigt die Erklärung von Descartes für den Versuch des Aristoteles.

3.2.2 Die Erklärung von Descartes

Um die Erklärung von René Descartes, gegeben in seinem Werk „Dioptrique“ aus dem Jahr 1637, verstehen zu können, ist die Versuchsanordnung mit den Bezeichnungen von Descartes an dieser Stelle eingefügt /Des-1637/.



Quelle: Descartes /Des-1637/

Abb. 3.3: Der Versuch von Aristoteles mit Bezeichnungen von Descartes

Descartes erklärt die Beobachtung des Aristoteles folgendermaßen:

„...wenn zwei gekreuzte Fingerspitzen A und D eine kleine Kugel G halten, meint man, es seien zwei, denn während diese in jener Weise gekreuzten Finger zusammenhalten, tendieren die jeweiligen Muskeln beider Finger dazu, sie auseinanderzuhalten, A nach C und D nach F, wobei die Hirnregionen, aus denen die Nerven stammen, die diese Muskeln bedienen, derart angeordnet sind, dass man das Gefühl bekommt, A tendiere nach C und D nach F, und somit meint man, zwei verschiedene Kugeln H und J zu halten“.

Unter anderem bemerkenswert an dieser Erklärung ist, dass diese Erklärung von Descartes in seinem Werk „Dioptrique“ (deutsch: Dioptrik), dort im sechsten Absatz „De la vision“ (dt.: „Über das Sehen“) erscheint. Mit anderen Worten: Empfindungen des Tastsinnes bedürfen offensichtlich nicht einer eigenen Abhandlung. Ferner dokumentiert die Erklärung den Wissensfortschritt: Ist die Antwort des Aristoteles nur auf die Hautoberfläche bezogen, so spricht Descartes schon von inneren Nerven. Jedoch spricht die Erklärung nur von den Muskelnerven und berücksichtigt nicht mögliche freie Nervenendigungen in der Haut.

3.2.3 Untersuchungen im 19. Jahrhundert

Im neunzehnten Jahrhundert wurde der Tastsinn wiederentdeckt. Wissenschaftler aus dem Bereich Medizin und Psychologie befassten sich mit dem Tastsinn der Haut. Einer der bedeutendsten Wissenschaftler war Weber /Web-1846/. Seine „Zirkelversuche“, in der Mitte des 19. Jahrhunderts durchgeführt, haben auch heute noch Gültigkeit. Weber berührte mit einem geöff-

neten Zirkel verschiedene Körperregionen. Damit die Zirkelspitzen zu zwei Wahrnehmungen führen ist eine je nach Körperregion unterschiedliche Zirkelöffnung notwendig. Auf der Zungenspitze beträgt der notwendige Abstand der Zirkelspitzen 0,5 „Pariser Linien“ (abgekürzt: PL). Eine „Pariser Linie“ entspricht 2,26mm. Diese Längeneinheit, durch französische Uhrmacher im Mittelalter entstanden /Wor-2004/, war zur Zeit Webers im deutschsprachigen Raum noch gebräuchlich, bis 1871 durch die „Maß- und Gewichtsordnung“ der Meter als Normalmaß eingeführt wurde. Auf der Innenseite des ersten Fingergliedes beträgt der notwendige Abstand der Zirkelspitzen 1 PL (2,26mm) und in der Mitte von Oberarm oder Oberschenkel 30 PL (67,8mm). Mit Weber beginnen die wissenschaftlichen Untersuchungen des haptischen Sinnes.

3.2.4 Beurteilung hautberührender Flächen

Ende des 19. Jahrhunderts führte der Arzt Max Eisner Untersuchungen durch, welche die Weber'schen Zirkelversuche ergänzen sollten /Eis-1887/. Er berührte unterschiedliche Stellen der Haut mit runden Hartgummischeiben verschiedener Größe. Diese Untersuchungen führten zu folgenden Erkenntnissen über das Sinnesvermögen, das Eisner als „Flächenempfindung“ bezeichnet:

Die Feinheit der „Flächenempfindung“ hat an verschiedenen Stellen der Haut verschiedene Grenzen. Am empfindlichsten ist die Zungenspitze. Hier kann eine Scheibe mit 0,5 mm Durchmesser unterschieden werden von einer Scheibe mit 1mm Durchmesser. An den Fingerspitzen kann eine Scheibe mit 1 mm Durchmesser unterschieden werden von einer Scheibe mit 2mm Durchmesser. Am Oberarm oder Oberschenkel hingegen können diese Scheibendurchmesser nicht mehr voneinander unterschieden werden.

Die ermittelten Werte sind nur annähernd proportional zum „Ortssinn“, d.h. den von Weber ermittelten Abstandswahrnehmungen.

Die Feinheit der „Flächenempfindung“ ist subjektiv. Das heißt die gefundenen Mittelwerte haben von Person zu Person deutliche Abweichungen. Ebenso ist die Wahrnehmungsfähigkeit zeitlich schwankend. Ungeübte Hautstellen können durch Übung an Empfindlichkeit gewinnen. Finger und Zunge hingegen ermüden bei längeren Versuchsreihen, das heißt sie werden unempfindlicher /Eis-1887/.

3.2.5 Zusammenhang zwischen inneren und äußeren Sinnesorganen

Von Bechterew /Bec-1896/ berichtet vom Einfluss der Gleichgewichtsorgane auf die Bildung der Raumvorstellungen, insbesondere den Tastsinn. Im wesentlichen beeinflusst von Bechte-

rew die Signale der Gleichgewichtsorgane durch galvanische Ströme am Hinterkopf. Bechterew erkennt neben den bekannten Wirkungen der inneren Gleichgewichtsorgane den Einfluss der äußeren Haut-Muskelempfindungen auf die räumliche Wahrnehmung. Auch der Umkehrschluss wird sichtbar, d.h. die Wirkung der Gleichgewichtsorgane auf die Haut-Muskelempfindung. So wird zum Beispiel bei Versuchspersonen ein Drehschwindel erzeugt, und als Folge nehmen die Versuchspersonen anschließend rauhe Flächen als glatte Flächen wahr.

3.2.6 Untersuchungen von V. Henri

Victor Henri untersucht in seinem Buch „Über die Raumwahrnehmungen des Tastsinnes“ zwei Fragestellungen /Hen-1898/. Im ersten Teil untersucht er die menschliche Fähigkeit, Ausdehnungen von Gegenständen, die die Haut berühren, wahrzunehmen. Im zweiten Teil untersucht er die menschliche Fähigkeit, den Ort der Berührungen der Gegenstände anzugeben. Der erste Teil beinhaltet eine gründliche Wiederholung der sogenannten „Zirkelversuche“. Hier werden zwei Spitzen eines Zirkels auf verschiedene Hautstellen gesetzt. Die Variation des Zirkelabstandes erlaubt die Ermittlung von „Schwellenwerten“. Diese geben an, welche kleinste Gegenstandsgröße an den untersuchten Hautstellen gefühlt werden kann. Bei allen Untersuchungen kommt er zu dem Schluss, dass „es noch viel Unbestimmtes und Unbekanntes hinsichtlich der einfachsten Fragen über die Raumwahrnehmungen im Gebiete des Tastsinnes gibt, so dass man zur Zeit (Ende d. 19. Jh., Anm.) eine vollständige Theorie überhaupt nur mit Hilfe einer ganzen Anzahl von willkürlichen Hypothesen entwickeln kann“.

Bemerkenswert ist der Hinweis auf extreme Differenzen der menschlichen Fähigkeiten in Abhängigkeit von der psychischen Verfassung. So ist offenbar die Fähigkeit geometrische Formen zu erkennen bei hysterischen Personen extrem erhöht. Leider wird dieser Punkt nur erwähnt, aber nicht näher untersucht.

Wenn man die verschiedenen zitierten Untersuchungen aus der Distanz betrachtet, dann fällt eine Gemeinsamkeit auf: in der Regel werden Versuchspersonen mit technischen Instrumenten „vermessen“. Es drängt sich der Vergleich mit den Betrachtungen von Leonardo da Vinci auf. Da Vinci versuchte den Menschen mit einem geometrischen Muster zu vergleichen.

3.3 Aufbau der Tastwelt am Beginn des 20. Jahrhunderts

D. Katz untersuchte in seinem Werk „Der Aufbau der Tastwelt“ /Kat-1925/ die Wahrnehmungsfähigkeiten von Menschen bei der Betastung unterschiedlicher Oberflächenmuster. Seine Ergebnisse sind überwiegend dokumentatorischer Natur. Qualitative Abhängigkeiten der Fähigkeiten von der menschlichen Physiologie gelingen nicht. Dies beruht auf dem Umstand,

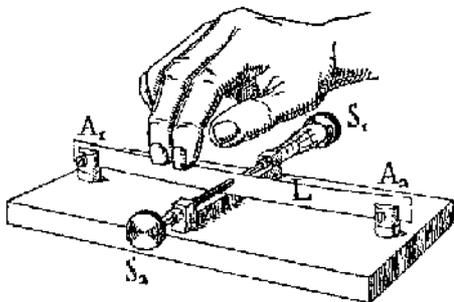
dass zum damaligen Zeitpunkt kein Wissen über taktile Rezeptoren der menschlichen Haut existierte.

Nebenbei weist Katz auf die Bedeutung des Tastsinnes hin. Nach Katz garantiert erst der Tasteindruck die Realität eines Gegenstandes (/Kat-1925/, S. 258). Der optische Eindruck provoziert nur einen Anschein. Zusammengefasst könnte man die folgende Beziehung aufstellen: Das Verhältnis von Optik zu Taktilität entspricht dem Verhältnis von Schein zu Sein.

Diese Bemerkung zeigt das Grundproblem virtueller Realitäten auf. Solange diese dem Betrachter keine taktile Empfindungen anbieten können, bleiben virtuelle Welten nur Scheinwelten minderer Qualität.

3.4 Haptische Untersuchungen

Rubin untersucht in seinem Werk „Haptische Untersuchungen“ /Rub-1936/ die Wahrnehmung gerader und gekrümmter Linien durch eine geringe Anzahl an Versuchspersonen. Hierzu benutzt er eine einfache Versuchsapparatur, die in folgendem Bild dargestellt ist. Diese Versuche führt er teilweise mit geschlossenen Augen, teilweise mit geöffneten Augen durch.



Zwischen zwei geschlitzten Drehgelenken wird mit Hilfe einer Schraube ein schmaler Balken definiert gebogen. Der Proband fühlt unter diversen Bedingungen, ob die Kante gerade ist oder negativ oder positiv gekrümmt. Quelle: Rubin /Rub-1936/

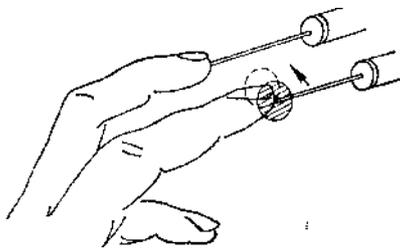
Abb. 3.4: Versuchsanordnung bei Rubin

Rubin ermittelt mit der beschriebenen Versuchsapparatur „Schwellenwerte“. Ein Schwellenwert beschreibt den Auslenkungswert, bei dem die Versuchspersonen anstelle eines geraden Lineales ein negativ oder ein positiv gekrümmtes Lineal wahrnehmen. Variiert wird die Zahl der bewegbaren Hand- bzw. Armgelenke durch Fixierung der Hand, des Unterarmes, des Oberarmes oder der Schulter. Näherungsweise könnte man die Auslenkung des Balkens in eine Krümmung umrechnen und ermitteln, welche Krümmungen ertastbar sind. Hier werden jedoch Krümmungen untersucht, die quer zur Handfläche verlaufen. Krümmungen, die als Höhe oder Winkel unter der Hand oder den Fingern auftreten, werden nicht untersucht. Daher ergibt sich kein näherer Zusammenhang mit den eigenen Versuchen. Ähnliche Versuche wurden von Hunter /Hun-1954/ und Davidson /Dav-1972/ vorgenommen. Hunter vergleicht die Fähigkeiten

blinder Versuchspersonen im Vergleich mit nicht sehbehinderten Personen. Wenig überraschend stellt er fest, dass blinde Versuchspersonen bessere Fähigkeiten zur Unterscheidung von Krümmungen haben. Davidson verfeinerte diese Untersuchungen durch Videoaufzeichnungen. Er zeigt verschiedene Strategien zur Erforschung von Krümmungen auf, die mehr oder weniger erfolgreich sind.

3.5 Sinneshemmung

In der Tradition von Aristoteles und Ewald stehen auch die Versuche von G. v. Békésy /Bek-1970/. Auch dieser weist Wahrnehmungssillusionen nach. Dazu benutzt er eine Versuchsanordnung mit mehreren „Stimulatoren“, wie das folgende Bild beispielhaft zeigt.



Zwei Stimulatoren regen die Fingerspitzen mit einer Frequenz an. Die Frequenzen sind zueinander phasenverschoben. Der Proband beschreibt seine Wahrnehmungen.

Quelle: Békésy /Bek-1970/

Abb. 3.5: Versuchsanordnung bei Békésy

V. Békésy wies, offenbar ohne Kenntnis des Versuches von Aristoteles, nach, dass der Aristotel'sche Versuch umkehrbar ist. Bei Aristoteles bewirkt die permanente Berührung eines Gegenstandes an zwei Hautstellen den Eindruck, zwei Gegenstände zu berühren. Békésy zeigt, dass die vibrierende Berührung an zwei Hautstellen (Fingern) mit geringen Phasenverschiebungen den Eindruck hervorruft, ein einziger Gegenstand würde die Haut in der nicht vorhandenen Mitte (zwischen den Fingern) berühren (/Bek-1970/, Seite 189ff).

3.6 Grenzwerte des Tastsinnes

Kalawski unterscheidet in Anlehnung an die Mess- und Regeltechnik drei unterschiedliche Arten der mechanischen Anregung die haptische Wahrnehmungen auslösen: Stufenfunktionen, Rechteckfunktionen und Periodische Funktionen. /Kal-1993/. Nach Kalawski existieren Schwellenwerte für die Reizung der Nervenendigungen. Diese sind primär von den vorgestellten Funktionstypen der Hautregion und der betroffenen Hautregion abhängig.

Nach Hill /Hil-1967/ ist zudem zumindest im Bereich der Fingerkuppe auch eine Abhängigkeit der Schwellenwertamplitude A (in μm) von der Anregungsdauer t (in msec) gemäß der folgenden empirisch gewonnenen Formel gegeben: $A(t) = 2 / (1 - e^{-(t/1,5)})$. Bei Hill, der den Bereich

der Fingerkuppen untersuchte, wurde ein mechanischer Kontaktstift mit einem Durchmesser von 0,6mm benutzt. Aus der Gleichung geht hervor, dass der Schwellenwert einer Wahrnehmung mit der Zeit abnimmt, da das Nervensystem offensichtlich eine zeitliche Summierung der einzelnen Eindrücke vornehmen kann. Dieser Fall ist jedoch nicht allgemein gültig. Nach Kalawski kann ebenso der Fall eintreten, dass bei einer anhaltenden Anregung von Nervenendigungen die Wahrnehmung der Anregung gänzlich verschwindet.

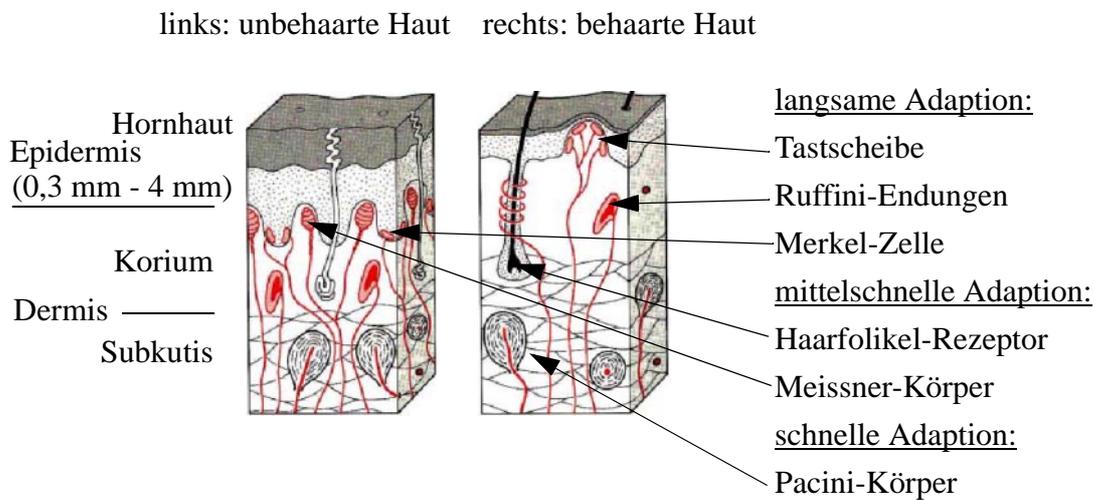
3.7 Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen

Waren die Untersuchungen bis zum Ende des zweiten Weltkrieges gemäß der technologischen Entwicklungen begrenzt auf mechanische und einfache elektromechanische Versuchsaapparaturen, so ergibt sich in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts die Möglichkeit, mit elektronischen Apparaturen Untersuchungen vorzunehmen.

Benachteiligt wurden Untersuchungen des Tastsinnes durch zwei Faktoren. Zum einen wird der Tastsinn als nachrangig empfunden, verglichen mit dem Seh- und dem Hörsinn. Zum anderen konnten die Tastempfindungen bis in das zwanzigste Jahrhundert hinein weit weniger gut erklärt werden. Letzteres liegt an dem Verständnis der Tastsensoren. Beispiel hierfür ist die Darstellung der Tastsensoren nach Gibson aus den sechziger Jahren. Hier wird nur ein Tastsensor gezeigt. Dreißig Jahre später hingegen sind vier Tastsensoren bekannt.

Zimmermann (zitiert von Irtel /Irt-2002/) gibt als Auflösungsvermögen eines Fingers den Wert 0,6 mm an. Für die Handballenfläche beträgt der Wert zwischen 0,1mm und 0,2mm. Diese experimentell ermittelten Werte zeigen eine Übereinstimmung mit der Technik der Flächenbeurteilung durch Designer. Designer streifen mit dem Handballen über die zu beurteilenden Flächen und nicht mit den Fingern.

Der derzeit aktuelle Stand der Forschung über die Mechanosensorik der menschlichen Haut findet sich bei Birbaumer und Schmidt /BiS-1999/, Goldstein /Gol-1999/, Kalawski /Kal-1993/ und anderen Autoren. Demzufolge befinden sich in den verschiedenen Hautschichten verschiedene taktile Sensoren. Die verschiedenen Sensortypen in der Haut sind im folgenden Bild dargestellt.



Quelle: Birbaumer u. Schmidt /BiS-1999/

Abb. 3.6: Mechanosensoren der unbehaarten und der behaarten Haut

Die Eigenschaften der vier wichtigsten Mechanorezeptoren der Haut zeigt die folgende Tabelle /Gol-1999/.

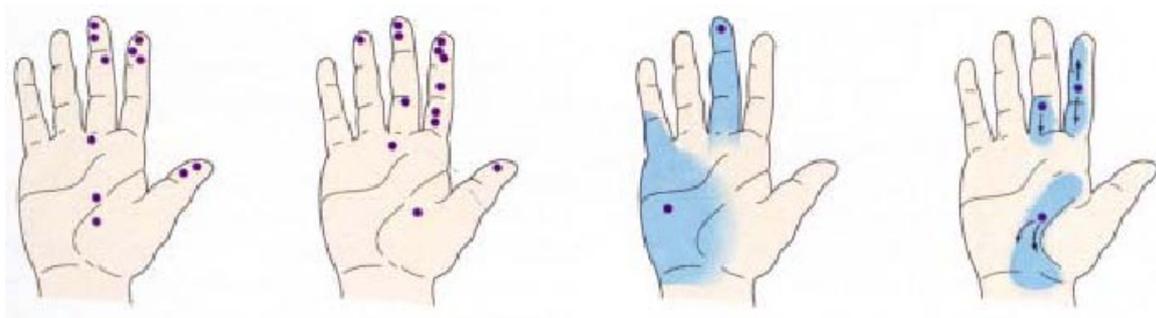
	Merkel'sche Zellen	Ruffini Endungen	Meissner Körperchen	Pacini Körperchen
Funktion	Intensitäts-sensor	Intensitäts-sensor	Geschwindigkeitssensor	Beschleunigungs-sensor
optimaler Reiz	Druck	Hautdehnung / Gelenkbewegg.	Berührung der Haut	schnelle Vibration
Schnelligkeit	langsame Adaption	langsame Adaption	schnelle Adaption	schnelle Adaption
Anregungs-frequenz [Hz]	0,3 - 3	15-400	3-40	10 - >500Hz
beeinflussende Hautfläche	klein (11mm ²) scharf begrenzt	gross (60mm ²) unscharfe Grenze	klein (12mm ²) scharf begrenzt	groß (100mm ²) unscharfe Grenze

Tab. 3.1: Eigenschaften der vier wichtigsten menschlichen Mechanorezeptoren

Aus der Tabelle und der vorangegangenen Abbildung geht hervor, dass relativ nahe an der Hautoberfläche die langsamen Sensoren angeordnet sind. In der Hauttiefe hingegen sind schnelle Sensoren angeordnet.

Zu beachten ist auch die Verteilung der Sensoren auf die Hand und damit das räumliche Auflösungsvermögen, hier zitiert nach Birbaumer und Schmidt /BiS-1999/:

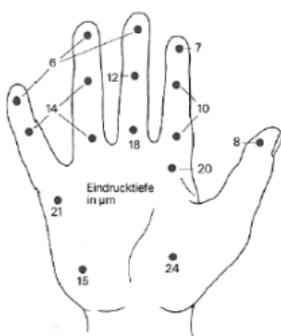
Meissner-Körperchen	Merkel'sche Zellen	Pacini-Körperchen	Ruffini-Endungen
Handballen: 20/cm ² Fingerspitzen: 140/cm ²	Handballen: 10/cm ² Fingerspitzen: 80/cm ²	Handballen: 10/cm ² Mittelfinger: 20/cm ²	Zeigefinger: 15/cm ² Handfurche: 20/cm ²



Quelle: Birbaumer u. Schmidt /BiS-1999/

Abb. 3.7: Verteilung der Mechanosensoren in der Haut

Aus dem Bild geht hervor, dass sich die meisten Meissner-Körperchen und Merkel'sche Zellen an den Fingerspitzen befinden, Pacini-Körperchen und Ruffini-Endigungen hingegen meist an der Handinnenfläche und den Fingergliedern. Das folgende Bild zeigt die notwendigen Eindruckstiefen nach Gegenfurtner /Geg-2002/.



Fingerspitzen: mindestens 0,006 mm Eindrucktiefe,
Mindestabstand zweier benachbarter Reize: 2-2,5mm

Erstes Fingerglied: mindestens 0,007 mm Eindrucktiefe
Mindestabstand zweier benachbarter Reize: nicht bekannt.

Handinnenfläche: mindestens 0,021 mm Eindrucktiefe
Mindestabstand zweier benachbarter Reize: 10mm

Quelle: Gegenfurtner /Geg-2002/

Abb. 3.8: Minimal notwendige Eindrucktiefe und Reizmindestabstand

Aus Abbildung 3.7 und Tabelle 3.1 geht hervor, dass Fingerspitzen aufgrund der Häufigkeit von Meissner-Körperchen und Merkel'scher Zellen vorwiegend auf niederfrequente (0,3-

40Hz) und scharfbegrenzte Reize geringer Amplitude reagieren. Der Handballen hingegen reagiert vorwiegend aufgrund der Häufigkeit von Pacini-Körperchen und Ruffini-Endungen auf höherfrequente (100-500Hz) großflächige Reize mit höherer Amplitude.

Für haptische Geräte gelten damit folgende Designkriterien:.

Bei Anregung der Fingerspitzen	Bei Anregung des Handballens:
niedrigen Reizfrequenzen 0,3-50 Hz	höheren Frequenzen 100 Hz - 500 Hz
Amplitude: mindestens 0,007 mm	Amplitude: mindestens 0,02 mm
punktuelle Anregung	flächige Anregung

Tab. 3.2: Designkriterien für haptische Ausgabegeräte

Aus der Tabelle 3.2 folgt, dass die Anregung der Fingerspitzen niederfrequent erfolgen muss, aber nur eine niedrige Eindringtiefe notwendig sind. Hingegen kann die Anregung der Handballen hochfrequent erfolgen, in diesem Fall sind jedoch größere Eindringtiefen notwendig.

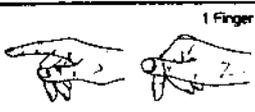
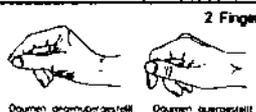
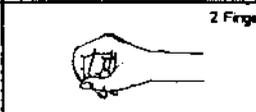
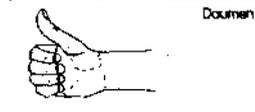
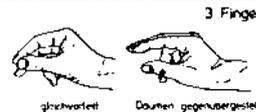
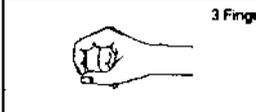
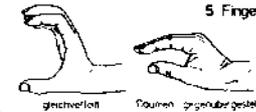
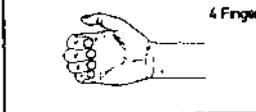
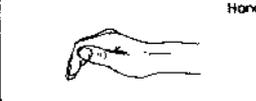
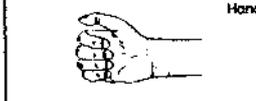
3.8 Verwendung der Hand oder Teilen der Hand zur haptischen Wahrnehmung

Es stellt sich die Frage, welche Kombination von Fingerspitzen, Fingergliedern und Handballen optimal ist, um Informationen über die geometrische Beschaffenheit einer freigeformten Oberfläche zu gewinnen. Ebenso muss unterschieden werden, ob der Tastsinn aktiv oder passiv eingesetzt wird /Mue-1998/, gleichbedeutend mit haptischem Einsatz, oder taktilen Einsatz. Bei aktivem taktilen Einsatz, also Bewegung der Muskeln und/oder Gelenke, werden Objekte als Ganzes erkannt. Bei passivem Einsatz werden zwangsläufig nur Eigenschaften der Objekte erkannt, aus denen wiederum auf die Objekte selbst geschlossen werden kann. So wird bei dem aktiven Ergreifen einer Tasse mit Hilfe eines Umfassungsgriffes diese schnell als Tasse erkannt werden. Erfolgt jedoch eine passive Berührung eines Teiles der Tasse durch einen Teil der Hand, so werden meist mehrere Berührungen notwendig sein, um die Tasse als solche zuerkennen. Folglich wird mehr Vorstellungskraft notwendig, um aus den Eigenschaften der Objekte auf die Objekte selbst zu schließen. Als dritte, ähnliche Differenzierung ist zu unterscheiden zwischen ruhender oder bewegter Hand. Bei 5 Fingerspitzen, 15 Fingergliedern und einem Handballen ergibt sich eine unüberschaubare Zahl an Kombinationsmöglichkeiten. Folglich muss dieser logische Ansatz verworfen werden.

Ein zweiter Ansatz bietet sich in einem Analogon zur Systematik der Greifarten /BKS-1985/. Dieser Ansatz basiert auf der Vermutung, dass jede bedeutende Greifart eine entsprechende Fühlart besitzt. Ein Beispiel ist der 1-Finger-Kontaktgriff. Diese Handstellung und Kontaktflä-

che wird auch benutzt, um Oberflächenmuster zu ertasten, wie z.B. bei der Braille-Schrift. Damit existiert für den 1-Finger-Kontakt-“griff“ auch ein 1-Finger-Kontakt-“gefühl“. Natürlich ist für jeden Griff eine gewisse Menge an haptischen Informationen nötig. Es kann daraus aber nicht automatisch gefolgert werden, dass eine 1:1 Beziehung vorliegt, d.h. dass zu einem bestimmten Griff auch eine ganz bestimmte Menge an haptischen Informationen gehört und diese bestimmte Menge auch nur zu einem einzigen bestimmten Griff. Dieser Ansatz ist allerdings leichter zu verfolgen als der in Absatz 1 genannte theoretische Ansatz der theoretisch denkbaren Kombinationen.

Die Systematik des Greifens ist in folgendem Bild dargestellt.

Kontakt-Griff	Zufassungs-Griff	Umfassungs-Griff
 <p>1 Finger</p>	 <p>2 Finger Daumen gegenübergestellt Daumen quergestellt</p>	 <p>2 Finger</p>
 <p>Daumen</p>	 <p>3 Finger gleichverteilt Daumen gegenübergestellt</p>	 <p>3 Finger</p>
 <p>Hand</p>	 <p>5 Finger gleichverteilt Daumen gegenübergestellt</p>	 <p>4 Finger</p>
 <p>Handkamm</p>	 <p>Hand</p>	 <p>Hand</p>

Quelle: Bandera et al.
/BKS-1985/

Abb. 3.9: Systematik der Greifarten

Im vorangegangenen Absatz wurde der 1-Finger-Kontaktgriff diskutiert. Mit einem Finger werden Konturen gefühlt. Für den Kontaktgriff mit dem Daumen, wie er beispielsweise zum Drücken größerer Schalter benutzt wird, existiert kein entsprechender Fühlvorgang. Hingegen wird die Hand als ganzes durchaus zum Fühlen größerer Flächen benutzt. Für den Handkamm ist jedoch wiederum kein Fühlvorgang bekannt. Aus diesen Beispielen kann geschlossen werden, dass es keine Systematik der Fühlvorgänge gibt, die in einer engen Analogie zur Systematik der Greifarten steht.

Hippius, zitiert von Obitz /Obi-2001/, gliedert in "Erkennendes Tasten als Wahrnehmung und als Erkenntnisvorgang" die Tastinformationen in drei Klassen /Hip-1934/:

- die Empfindungsdaten der ruhenden Hand (passives Tasten)
- die Empfindungsdaten der streichenden Hand (aktives Tasten)
- die Empfindungen der greifenden Hand

Für das Tasten mit bewegter Hand gibt er vier weitere Unterscheidungen an:

- das hin- und hergleitende Tasten, vor allem zum Wahrnehmen von Modifikationen der Oberfläche, wie Materialeigenschaften,
- das streichende Tasten, vor allem zum Wahrnehmen von Flächen, Konturen, Linien und geometrischen Beziehungen, wie Dimensionen, Richtungen, Grundgestalten, Proportionen. Es wird teils mit dem Zeigefinger, teils mit allen drei Mittelfingern ausgeführt,
- das streichende-greifende Tasten, das eine Modifikation der ersten beiden mit Unterstützung des Daumens ist, vor allem zum Wahrnehmen von Struktur und Gliederung der Objekte, die mit dem einfachen streichenden nicht zugänglich waren,
- die kinematische Form des greifenden Tastens, die eigentliche Körpertastung, der durchgreifende, umfassende, zergliedernde, aufbauende, alle materiellen und formalen Eigenschaften eines Tastobjektes erkennende Tastvorgang.

Im Rahmen des Hippius'schen Ordnungsschemas, zeigt der angedachte Arbeitsablauf (Abbildung 2.1 auf Seite 12), dass die vorliegende Arbeit sich mit dem aktiven Tasten (Tasten mit bewegter Hand), bzw. mit dem speziellen Fall des hin- und hergleitenden Tastens befasst.

Die Darstellung des Wissenstandes über die menschlichen Sinne, insbesondere den haptischen Sinn, zeigt, dass erst in den letzten Jahrzehnten ein grundlegendes Verständnis der menschlichen Sensorik entstanden ist. Dazu gehört die Charakterisierung der vier Sensoren der Haut durch technische Eigenschaften wie Reizfrequenz, Reiztiefe und Reizabstand. Eine Erklärung der „Arten des Greifens“ mit Hilfe dieser Sensoreigenschaften ist bisher nicht erfolgt. Eine Katalogisierung der menschlichen „Arten des Fühlens“ existiert nicht. Daher kann bisher aus der Theorie nicht abgeleitet werden, welcher Fühlvorgang am besten zur Wahrnehmung von Freiformflächen geeignet ist. Als Ausweg bieten sich die Fühlvorgänge an, wie sie in der professionellen Praxis existieren und wie sie in Kapitel 1.3 ab Seite 4 geschildert wurden.

4 Stand der Technik

Nach der Beschreibung des Wissensstandes zu den Wahrnehmungsfähigkeiten der menschlichen Hand ist die Beschreibung des Standes der Technik Ziel dieses Kapitels. Die Betrachtung des technischen Standes soll die Frage beantworten, ob ein schon existierendes Gerät oder eine Entwicklung zur angestrebten Zielsetzung (siehe Seite 13) führen kann. Ist dies nicht gegeben, so ist eine Eigenentwicklung notwendig.

Seit Beginn der sechziger Jahre (des vergangenen, d.h. des 20. Jahrhunderts) verfolgen sehr viele Forschergruppen das Ziel, visuell virtuelle Objekte auch fühlbar zu machen. Minsky listet für die Jahre 1965 bis 1995 über vierzig Projekte auf /Min-1995/. Mit der Verbreitung von Webservern in den neunziger Jahren entstanden sowohl öffentlich geförderte Projektlisten für Forschungen auf dem Gebiet der haptischen Mensch-Maschine-Kommunikation, wie zum Beispiel Online-Projektlisten der North-Western-University, Chicago, Illinois, USA /NWU-2002/ /CLP-2002/ oder der Universität von Utah /Tho-2000/ als auch private Projektlisten /Ver-2002/.

Um die vorhandenen Geräte bzw. Entwicklungen beurteilen zu können hinsichtlich ihrer Eignung zur Erreichung der Zielsetzung dieser Arbeit, werden eine Vielzahl an Geräten mit Hilfe der folgenden Tabelle vorgestellt. In der Tabelle sind für jedes Gerät die Anzahl an einzeln beweglichen Elementen (n) und deren nutzbare Freiheitsgrade (Ntzb. Fhg.) aufgeführt. Die Freiheitsgrade sind unterteilt nach translatorisch (trl.) und rotatorisch (rot). Es ist angegeben, ob es sich um ein reines Eingabegerät (E), ein reines Ausgabegerät (A) oder ein kombiniertes Ein-/Ausgabegerät (E+A) handelt. In der vorletzten Spalte findet sich die Angabe, ob es sich um ein leicht transportables Gerät (T) oder ein nur mit größerem Aufwand transportierbares Gerät (S) handelt. Die letzte Spalte gibt eine zugehörige Quelle an.

Name / Projekt	n	Ntzb. Fhg.	trl.	rot.	E/A	T/S	Quelle
M. Minsky: Sandpaper Syst.	1	2	0	2	E+A	T	/Min-1995/
P. Buttolo: Pen Based Force Display	1	2	2	2	E+A	T	/But-1995/
ATR Labs: Palmtop display	1	6	3p	3f	E+A	S	/NMK-1996/
Carnegie Mellon Univ.: MagLev Wrist	1	6	3p	3p	E+A	S	/BBH-1996/
Carnegie Mellon Univ. WYSIWYF Display	1	3(of 6)	3p		E+A	S	/YHK-1996/
Cybernet Systems Corp. Cyberimpact 6 DOF hand controller	1	6	3p	3p	E+A	S	/WHC-1997/
Immersion Corp. Laparoscopic Impulse Engine	1	5	1p	3p+ 1	E+A	S	/IMM-2003/

Immersion Corp.: Impulse Engine 2000	1	2	0	2	E+A	T	/IMM-2001/
SensAble Technologies, Inc. : PHANToM	1	6		6	E+A	T	/Sen-2004/
Immersion Corp.: CYBERGRASP	5	2	2	0	E+A	S	/IMM-2004/
Rutgers Univ.: Rutgers Master II	4	1	1	0	E+A	S	/GhB-1995/
FCS: Haptic Master	1	3	2p	1	E+A	T	/FCS-2002/
Southern Methodist Univ. Pneumatic Haptic Interface	1	4	0	4	E+A	S	/Hur-1998/
McGill Univ.: Pantograph	1	2	0	2	E+A	T	/RaH-1994/
Univ. of Tsukuba: FEELEX I / II	36(I) 23(II)	1	1	0	E+A	S	/YIN-2001/
Univ. of Washington High Bandwidth Force Display	1	2	2	0	E+A	S	/Mor-1998/
Forschungszentrum Karlsruhe Tactile Display	64	1	1	0	A	u	/NWU-2002/
Projektgruppe HASASEM	1000	1	1	0	A	u	/HAS-2001/
Taktiler Display	1000	1	1	0	A	S	/JuS-2002/
Tactile Shape Display	36	1	1	0	A	T	/WLH-2002/
Forschungszentrum Karlsruhe HIT Force Feedback	1	5	1+1	3	E+A	S	/FZK-1997/
Univ. of Stanford: Haptic Moose	1	2	2	0	E+A	T	/MoG-1997/
3dconnexion: SpaceMouse	1	6	3	3	E	T	/MoG-1997/
Univ. of Colorado Five DOF haptic interface	1	5	3	2	E+A	S	/LPD-2002/
Projektname	n	Ntzb. Fhg.	trl.	rot.	Inp/ Outp	T/S	Quelle
<p>Legende:</p> <p>n= Anzahl angesteuerter Elemente</p> <p>Ntzb. Fhg. = Anzahl unterschiedlicher Freiheitsgrade, soweit vom Benutzer feststellbar</p> <p>trl.= translatorischer Freiheitsgrad</p> <p>rot. = rotatorischer Freiheitsgrad</p> <p>Inp./Outp. = Eingabegerät / Ausgabegerät</p> <p>T/S/u = Transportables Gerät / Stationäres Gerät / unbekannt</p>							

Tab. 4.1: Liste taktiler Ausgabegeräte mit charakteristischen Merkmalen

Aus der Übersicht geht hervor, dass z.B. das Gerät FEELEX I mit 32 Einheiten ausgestattet ist, die alle aktiv gesteuert werden. Jede Einheit verfügt über einen, in diesem Fall translatorischen

Freiheitsgrad. Da die Einheit mit Krafrückkopplung ausgestattet sind, also auch Daten erfassen kann, ist es ein kombiniertes Input/Output-Gerät. Es ist ein nur mit größerem Aufwand bewegliches Gerät.

Die Klassifikation der Geräte wird erschwert dadurch, dass die in den vorhandenen Beschreibungen angegebenen Freiheitsgrade häufig nur die Zahl der Gelenke des Gerätes darstellen. Diese können durchaus größer sein als die Zahl der nutzbaren Freiheitsgrade, also den Freiheitsgraden, die dem Benutzer zur Verfügung stehen. So wird häufig ein Roboterarm mit 6 Freiheitsgraden benutzt. Der Benutzer kann das Endglied des Armes jedoch dennoch nur in drei Richtungen translatorisch und nicht um drei weitere Achsen rotatorisch bewegen. In dieser Tabelle werden nur die Freiheitsgrade genannt, die vom Benutzer wahrgenommen werden können. Umgekehrt hat der „Rutgers Master II“ nur ein „Force Feedback“-element mit einem steuerbaren translatorischen Freiheitsgrad pro Finger, dieses Element „behindert“ jedoch Bewegung der Fingerspitze in zwei Richtungen.

Burdea und Coiffet /BuC-1994/ unterscheiden zwischen „Touch Feedback“ (Berührungsempfindung) und „Force Feedback“ (Kraftempfindung). Sie differenzieren diesen Ausdruck durch die Beschreibung einer haptischen Wahrnehmung. So führt die Berührung einer Wand zunächst zu einer „Berührungsempfindung“. Wird dann verstärkt gegen die Wand gedrückt, führt dies zu einer „Kraftempfindung“. Es ist erkennbar, dass Burdea und Coiffet damit verschiedene Reizschwellen und verschiedene Nervenendigungen meinen. Dies ist in der folgenden kleinen Tabelle dargestellt.

Berührungsempfindung	minimale Kontaktkräfte	Nervenendigungen der Haut
Kraftempfindung	hohe bis maximale Kontaktkräfte	Nervenendigungen der Muskeln

Diese Unterscheidung erlaubt ein leichtes Aussortieren geeigneter Geräte: Geräte, die darauf zielen maximale Kontaktkräfte auf den Benutzer auszuüben, sind zur Verfolgung des Zieles, rechnerinterne Flächen dem menschlichen Tastsinn zu erschließen, nicht geeignet. Dies trifft auf sogenannte „Joysticks mit „Force Feedback“ zu, die möglichst hohe Impulse kurzer Dauer auf den Benutzer ausüben.

Einige, den gesetzten Zielen (siehe Seite 13) erkennbar ähnliche Geräte werden im folgenden detailliert vorgestellt.

4.1 Das „PHANToM“ von SensAble Technologies, Inc.

Zu den Geräten, die eine „Berührungsempfindung“ ermöglichen, zählt das Gerät „PHANToM“ der Fa. SensAble Technologies (Woburn, Massachusetts, USA) /Sen-2004/. Es ermöglicht die Wahrnehmung von Oberflächen rechnerinterner Modelle.



Quelle: SensAble
/Sen-2004/

Abb. 4.1: Das Gerät „PHANToM“ der Fa. SensAble Technologies

Die Abbildung zeigt ein Gerät vom Typ PHANToM, welches mit einem VR-Arbeitsplatz (Monitor und Shutterbrille) gekoppelt ist. Der Benutzer sieht das rechnerinterne Modell vor dem VR-Bildschirm dreidimensional vorgetäuscht. Er kann den PHANToM frei bewegen, bis er auf eine Oberfläche des vorgetäuschten Modelles stößt. Versucht der Benutzer weiter in das Modell einzutauchen, so wird diese Bewegung je nach definierter Elastizität des virtuellen Modelles behindert oder verhindert. Hierfür besitzt das Gerät pro Achse je eine Bremse.

An den Auflagepunkten der Finger können keine Flächenneigungen aktiv simuliert werden. Um diesen Nachteil zu umgehen, wird eine Pulsierung der Haltekraft vorgeschlagen /HaY-2002/. Die erreichbaren Taktraten der Haltekraft in Kombination mit den geringen Stellkräften der Aktuatoren ermöglichen in erster Linie die Simulation von Oberflächentexturen. Hier ist nur ein Nachgeben der Hautoberfläche notwendig. Für ein Nachgeben der Finger bzw. Hand zur Simulation virtueller Landschaften sind Kräfte notwendig, die von den Aktuatoren nicht aufgebracht werden können.

4.2 Das „Tactile Display“ des Forschungszentrums Karlsruhe

Am Forschungszentrum Karlsruhe wurde laut einer amerikanischen Webseite ein taktiles Display aufgebaut, das relativ klein ist verglichen mit den vorgestellten anderen Entwicklungen.

Das folgende Bild zeigt das Gerät.



Quelle: North Western University
/NWU-2002/

Abb. 4.2: Taktiler Display des FZ Karlsruhe

Das Display ist aus 8x8 Stiften aufgebaut, die sich in der Höhe um wenige Millimeter heben können. Da keine weiteren Veröffentlichungen über dieses Display zu finden sind, kann eine weitere Beschreibung nicht gegeben werden. Ein Zusammenhang mit dem „Taktilem Display“ von Jungmann und Schlaak /JuS-2002/ ist zu vermuten. Jungmann und Schlaak verwendeten gestapelte elektrostatische Aktuatoren mit elastischem Dielektrikum in einer 5x5 Matrixanordnung. Sie geben an, dass 1000 Stimulatorelemente als notwendig sind für die Stimulation der gesamten Handinnenfläche. Dieselbe Elementzahl wird beim Projekt HASASEM (www.hasasem.de) angestrebt. Bei diesen Elementen sollen elektro-rheologische Flüssigkeiten benutzt werden.

4.3 Das taktile Display „FEELEX“

An der Universität von Tsukuba, Japan, wird seit 1995 von Iwata et al. ein taktiles Display aus Stiften aufgebaut /IYN-2001/. Dabei kann wie bei HASASEM und der FZK-Entwicklung eine Menge von Stiften axial angehoben werden. Ebenso wie bei den anderen Projekten ist jeder Stift mit Kraftrückkopplung versehen. Zusätzlich allerdings sind die Stifte mit einer „Haut“ aus Gummi ähnlichen Material überzogen. Die erste Studie bestand aus einer Reihe von 5 Aktuatoren. Die folgenden beiden Bilder zeigen die beiden daraus abgeleiteten offiziellen Prototypen FEELEX1 und FEELEX2



Abb. 4.3: FEELEX1 und FEELEX2

FEELEX1, im linken Bild zu sehen, besteht aus einem Feld von 6x6 Aktuatoren (Gleichstrommotoren) und einer „Tastfläche“ von 24cm x 24cm. Dieser Prototyp wurde im Jahr 1997 vorgestellt. FEELEX2, besteht aus einem Feld von 23 Aktuatoren (Servomotoren) und einer kreisförmigen Tastfläche von 5cm Durchmesser. Dieser Prototyp wurde im Jahr 2001 vorgestellt. Wurde bei FEELEX1 zur Kraftrückkopplung an jedem Aktuator ein Kraftsensor angebracht, so ermittelt man bei FEELEX2 die Stromstärke von jedem Servo. Diese ist zur einwirkenden Kraft proportional /IYN-2001/.

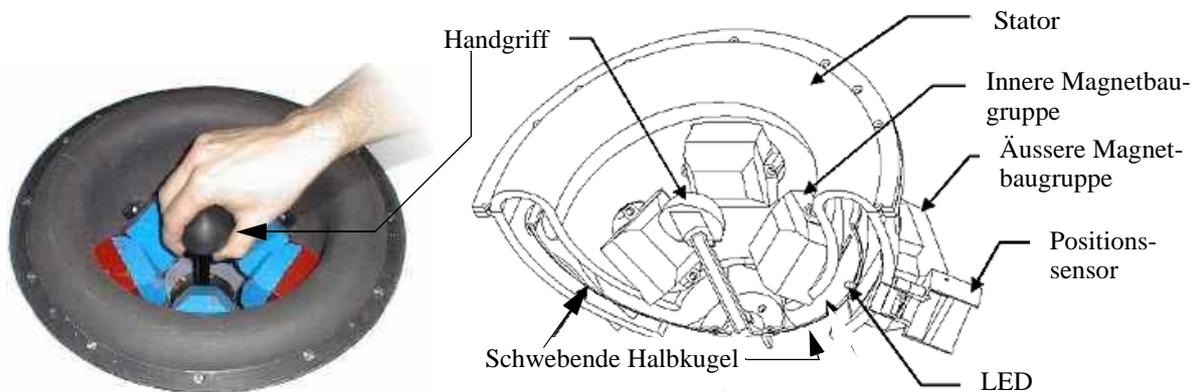
Es sei auch auf eine weitere Entwicklung mit demselben Ansatz hingewiesen. Von Shinohara, Shimizu und Mochizuki wurde schon 1998 ein Display mit 4096 selbstentwickelten Aktuatoren vorgestellt /SSM-1998/. Von dieser Literaturstelle abgesehen existieren keine weiteren Veröffentlichungen.

Wie bei den FEELEX-Geräten werden auch beim „Tactile Display“ von Wagner et al. /WLH-2002/ handelsübliche, verdichtet angeordnete Servomotoren benutzt. Dabei werden allerdings deutlich kleinere Motoren benutzt, die zu einem kompakten, mit einer normalen Computer-Maus gekoppelten Gerät führen.

4.4 Das haptische Display „Magnetschwebegerät“

Am Labor für Microdynamics der Carnegie Mellon Universität, Pittsburgh, USA, wurde von Berkelman et al. ein schwebender Handgriff entwickelt /BBH-1996/. Dieser hat sechs Freiheitsgrade, bis zu 20 Grad Winkelfreiheit in den rotatorischen und 25mm Schiebefreiheit in den translatorischen Achsen. In den rotatorischen Achsen kann es auf den Benutzer ein Drehmoment von 6 Nm, in den translatorischen Achsen kann es eine Kraft von 55N auf den Benut-

zer ausüben. Das Gerät ist im folgenden sowohl als Photo als auch als Schemazeichnung dargestellt.



Quelle: Berkelman et al. /BBH-1996/

Abb. 4.4: Magnetisch schwebender Handgriff

Das Bild zeigt den Handgriff, der mittels einer Stange auf einer Halbkugel montiert ist. Die Halbkugel kann sich in den Magnetfeldern wie angegeben rotatorisch und translatorisch bewegen. Es handelt sich um ein Tischgerät, welches als Eingabegerät gedacht ist. Einsatzzweck könnten Flugzeugsteuerungen sein: der Handgriff könnte als Steuerknüppel ausgeführt werden. Man kann es als Weiterentwicklung einer SpaceMouse (s. Tabelle 4.1) ansehen: Während die SpaceMouse als reines Eingabegerät mit 6 Freiheitsgraden ausgestattet ist, können mit dem Magnetschwebegerät zusätzlich Kräfte in 6 Freiheitsgraden auf den Benutzer ausgeübt werden. Aus der Zeichnung geht ebenfalls hervor, dass es sich um eine komplexe Konstruktion mit einer ebenfalls komplexen Ansteuerung handelt. Dies ist einer der möglichen Gründe, warum die Entwicklung keine weitere Verbreitung, zumindest im konstruktiven Bereich, erfahren hat.

4.5 Der „Cybergrasp“

Von der Firma Immersion (San Jose, Kalifornien, USA) wird der „Cybergrasp“ vertrieben / Imm-2004/. Dieses Gerät ist in folgendem Bild dargestellt



Quelle: Immersion
/Imm-2004/

Abb. 4.5: Cybergrasp der Firma Immersion

Das Bild zeigt ein außenliegendes Skelett („Exoskelett“) für alle fünf Finger. Pro Finger wird der Bewegungsradius kontrolliert. Berührt der Benutzer mit einem Finger ein virtuelles Objekt, so versucht der dazugehörige Aktuator den Finger von einem weiteren Eingreifen abzuhalten.

4.6 Ergebnis

Ergebnis der Recherche ist, dass verfügbare Geräte, soweit bekannt und trotz umfangreicher Recherche, nicht für einen Beweis der These (siehe Kapitel 2, Seite 12) benutzt werden können. Dies liegt einerseits in der Art und Zahl der Freiheitsgrade, andererseits an der Philosophie des „Force Feedback“. Der Begriff „Force Feedback lässt sich hier dem Sinne nach übersetzen mit „Kraftrückmeldung“ und soll verdeutlichen, dass von den Geräten eine möglichst hohe Kraft auf den Benutzer ausgeübt werden soll über einen endlichen Zeitraum. Dies steht der Zielsetzung der Arbeit gegenüber: hier soll eine möglichst niedrige Kraft über einen beliebig langen Zeitraum auf Finger oder Handballen des Benutzers ausgeübt werden. Einige Geräte, wie zum Beispiel FEELEX1, FEELEX2 oder HASASEM hingegen verfolgen die Vermittlung einer niedrigen Kraft, resp. eines „Gefühles“. Bei diesen Geräten jedoch ist die Zahl der aktiv gesteuerten Freiheitsgrade und damit der konstruktive Aufwand hoch. Dies dürfte zu entsprechend hohen Produktionskosten bzw. Preis führen und in der Folge zu geringen Stückzahlen.

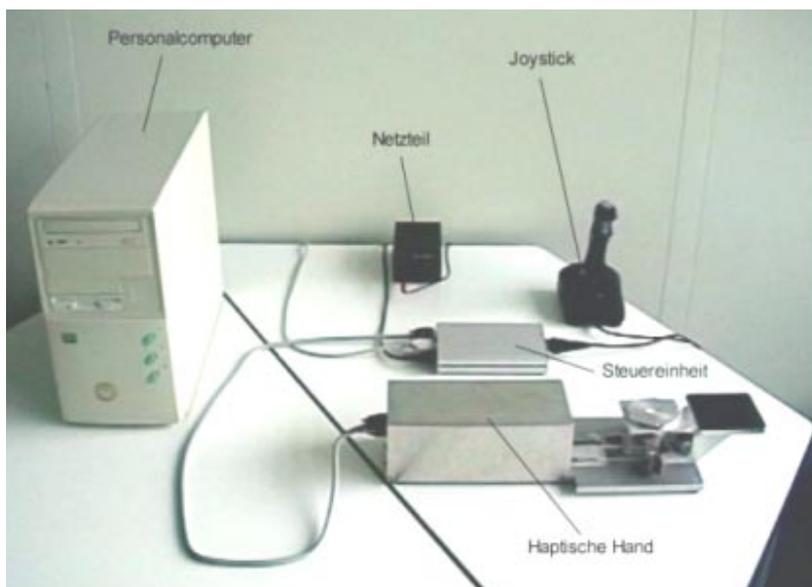
Da existierende Geräte ungeeignet sind zum Beweis der aufgestellten These, ist für die Erreichung des gestellten Zieles die eigene Entwicklung eines Systems notwendig, mit der geometrische Eigenschaften rechnerinterner Freiformflächen auf ein externe Referenzfläche übertragen werden können. Der Entwicklungsablauf ist im folgenden Kapitel beschrieben.

5 Entwicklung der Versuchsapparatur

Die Betrachtung des Standes der Technik ergab, dass kein existierendes Gerät in der Lage dazu benutzt werden kann, um die aufgestellte These zu beweisen. Die Entwicklung eines geeigneten Gerätes vollzog sich zwischen Sommer 1998 und Sommer 2002 in vier Schritten. Gekennzeichnet vom Entwicklungsstand der Mechanik wurden bisher vier Prototypen gebaut. Die Entwicklung wird in den folgenden Kapiteln 5.1 bis 5.4 vorgestellt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 5.5.

5.1 Erster Prototyp

Erste Schritte wurden 1998 von M. Haasenritter durchgeführt /Haa-1998/ (Diplomarbeit am RKK). Er steuerte die Neigung einer in zwei Richtungen kippbaren Platte von einem handelsüblichen PC aus. Zu seinen Aufgaben gehörte Auswahl und Konstruktion einer geeigneten Motor-Getriebe-Kombination, und die Programmierung einer vorhandenen Steuergerätes zur Umsetzung der PC-Signale in Steuerungssignale für Servomotoren. Die Servosteuerung der kippbaren Platte erfolgte durch Eingabe von Zahlenwerten an einem PC im DOS-Modus des Betriebssystems Windows95 (Microsoft Corporation, USA). Hintergrund der Betriebssystemwahl war die ursprüngliche Absicht, den Prototypen in ein einfaches CAD-System einzubinden. Derartige Systeme benutzten Ende der neunziger Jahre fast ausschließlich Windows95, seltener Linux als Betriebssystem. Den Gesamtaufbau zeigt das folgende Bild.



Taumelscheiben mit Fadenzügen und Umlenkrollen

Abb. 5.1: Gesamtsystem der „Haptischen Hand“ Version 1

Links im Bild ist der PC zu sehen, auf dem das DOS-Programm ausgeführt wird. Das DOS-Programm gibt über die serielle Schnittstelle ASCII-Daten an ein Steuergerät aus. Das Steuergerät, ausgestattet mit einem Microcontroller der Firma Pontech, Californien/USA, wandelt die ASCII-Daten in Stellimpulse für die Servos um. Anstelle der ASCII-Daten kann das Gerät auch Spannungswerte des Joysticks (im Bild rechts zu sehen) verarbeiten. Dem Gesamtsystem wurde die Bezeichnung "Haptische Hand" gegeben, da die Mechanik, hier im vorderen Bildteil zu sehen, an einen ausgestreckten Arm erinnerte, mit einer „Taumelscheibe“ anstelle der Handfläche. Als Konstruktionswerkzeug wurde das 2D-CA-Drafting System „AutoCAD“, Release 14, (Fa. Autodesk) eingesetzt. Aufgrund der beschränkten Funktionalität der benutzten Version dieser Software besteht dieser erste Prototyp aus Bauteilen mit einfacher Geometrie.

Die Menüs zur Steuerung dieser ersten Version der haptischen Hand hatten einen noch einfachen Aufbau. Sie sind in folgendem Bild zu sehen.

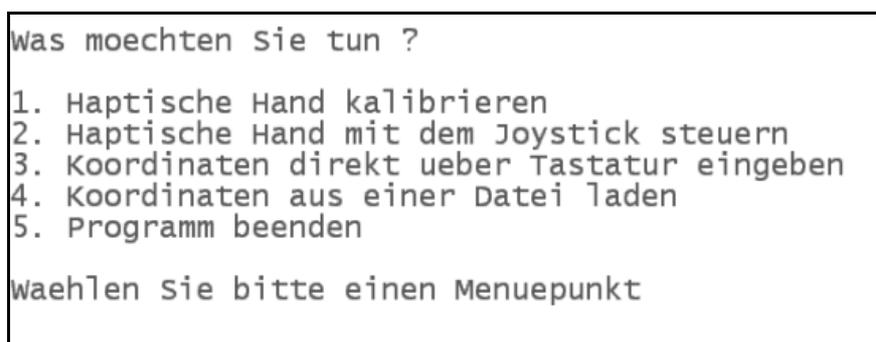


Abb. 5.2: Menüstruktur der Haptischen Hand Version 1

Bei unterschiedlichen Fadenlängen zwischen Taumelscheibe und Motoren führt z.B. der Befehl, die Motoren in ihre Mittenposition zu bringen, zu einer Fehlstellung der Taumelscheibe. Der Menüpunkt 1 dient dem Ausgleich der Fehlstellung.

Die Taumelscheibe kann durch Wahl des Menüpunktes 2 mit einem Joystick analog gesteuert werden. Sie reagiert ohne wahrnehmbare Verzögerung auf die Auslenkung des Joysticks durch den Benutzer. Das bedeutet, dass zwischen der Bewegung des Joysticks und der Taumelscheibe keine Totzeiten, Proportional- oder Differentialglieder gemessen wurden.

Mit dem Menüpunkt 3 werden Stellwinkel einzeln oder gemeinsam eingegeben. Die Umsetzung der Winkel in die Stellposition ist abhängig vom geometrischen Aufbau und den gemessenen Kalibrierungswerten.

Mit dem Menüpunkt 4 können in einer Datei abgelegte Stellwinkel eingelesen werden und an das Steuergerät übergeben werden. Hier zeigte sich deutlich, dass die Software um ein Vielfaches schneller ist als die Mechanik: Einzelne Befehle werden häufig nicht oder nur unvollständig

dig ausgeführt. Hier müsste zwischen Winkelinlese und Winkelübergabe eine Totzeit eingehalten werden, die proportional zur Differenz zwischen Stellwinkel und Istwinkel ist. Der Geschwindigkeitsvorteil der Software ist allerdings vor dem Hintergrund zu sehen, dass diese nur Werte, die schon in einer Datei abgelegt waren, auslesen und an den Microcontroller übergeben muss.

Diese erste Version der „Haptischen Hand“ funktionierte prinzipiell. Wurde mit dem Joystick die Neigung einer Oberfläche simuliert, so konnte man mit Hilfe der Taumelscheibe ein grobes Gefühl für die Gestalt der Oberfläche entwickeln. Um konstruktive Schwachstellen zu beseitigen und die Präzision der Taumelscheibe zu erhöhen erfolgte die Entwicklung eines zweiten Prototypen.

5.2 Zweiter Prototyp

In einem zweiten Schritt wurde die "Haptische Hand" von M. Sattel optimiert /Sat-2000/. Es wurde ein geschlossenes Gehäuse konstruiert unter Verwendung kleinerer und schnellerer Servos. Das Gewicht und die Abmessungen wurden verringert. Die seitliche, zueinander orthogonale, Anordnung der Servos anstelle der linearen Anordnung bei Prototyp 1 vereinfachte die Kraftübertragung und erhöhte die Präzision. Das in Abbildung 5.2 auf Seite 38 gezeigte Programm wurde überarbeitet. Den Gesamtaufbau mit dem zweiten Prototypen zeigt das folgende Bild.

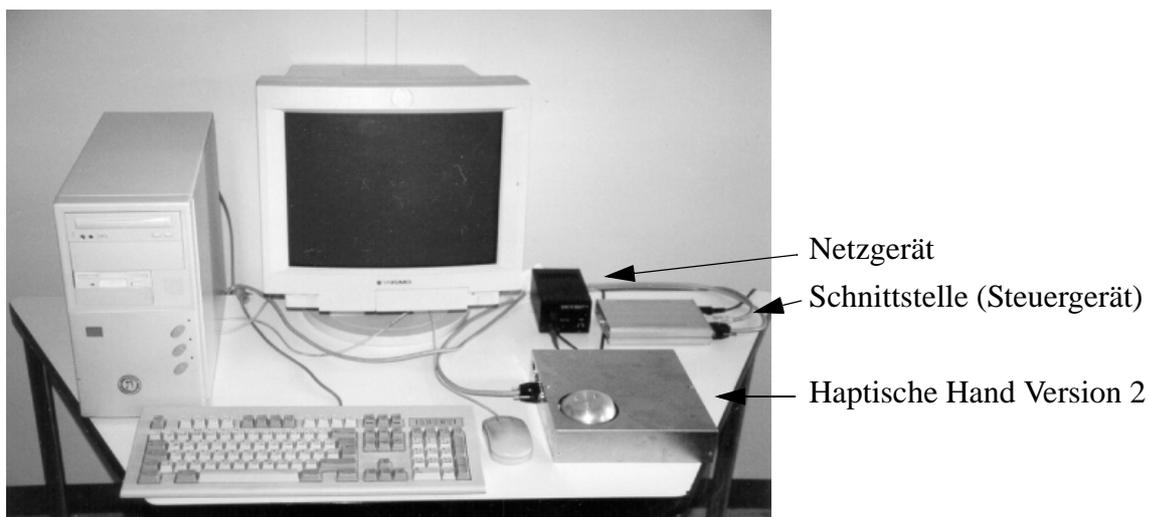


Abb. 5.3: Gesamtsystem „Haptischen Hand“ Version 2

Die Gesamtstruktur entspricht dem Aufbau der Entwicklung von Haasenritter. Als Konstruktionswerkzeug wurde ebenfalls das 2D-CA-Drafting System „AutoCAD“, Release 14, eingesetzt. Daher besteht auch dieser zweite Prototyp aus Bauteilen einfacher Geometrie.

Hinzugenommen wurde die Anforderung, ein einziges, räumlich geschlossenes System zu entwickeln. Mit dieser Forderung verbunden war das Ziel, die Verletzungsgefahr beim Kippen der Taumelscheibe zu minimieren.

Mit dem Bau des zweiten Prototypen wurde mit der Anbindung beider Prototypen an ein CAD-System begonnen. Versuche mit dem CAD-System „Microstation“ (Bentley Systems Incorporation, Exton, Pennsylvania, USA) mit Windows95 als Betriebssystem wurden durchgeführt. Fehlerhafte Algorithmen und eine mangelhafte Dokumentation der „Programmierschnittstelle“ des Systems führten zum Abbruch der Anbindung an Microstation. Untersucht wurde ebenfalls das Erzeugen von Steuersignalen durch „Macroprogrammierung“ am System Unigraphics V15 auf WindowsNT. Allerdings erlaubt die Funktionalität dieser Programmier-technik nur die Erzeugung einzelner Normalenvektoren auf einer Freiformfläche, nicht jedoch die Erzeugung einer kontinuierlichen Folge von Normalenvektoren. Eine „Offline-Kopplung“ an das CAD-System STRIM100 wurde programmiert. Dieses System hat Funktionen zur effizienten Erzeugung einer Anzahl von Normalen auf einer Flächenkurve /Bec-2000/. Allerdings war die Dokumentation des API (Application Programming Interface) dieses Systems nicht aussagekräftig genug, um eine Realtime-Kopplung zu erreichen.

Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde die Anbindung an das 3D-CAD-System Unigraphics (Firma EDS, USA), Version 15 (abgekürzt: UG V15) mit SGI IRIX (eingetragene Handelsmarke der SGI, USA) als Betriebssystem begonnen. Für diese CAD-Software stand eine übersichtliche Schnittstelle zum Einbau eigener Menüstrukturen (GUI-Builder) in die Menüs des CAD-Moduls zur Verfügung. Ebenso stand eine gut dokumentierte Schnittstelle zur Programmierung beliebiger Menüinhalte (API) zur Verfügung. Notwendige Compilerlizenzen waren am RKK vorhanden. Mit Verfügbarkeit der deutlich verbesserten Version 17 von Unigraphics erfolgte ein Umstieg auf V17. Erstes Zwischenergebnis war eine „Echtzeit-Kopplung“ der Haptischen Hand an Unigraphics V17 im Sommer 2001. Die programmierten Menüumfänge orientierten sich zunächst an den Menüs des ersten Prototypen (siehe Seite 38). Zusätzlich konnten erstmals in Echtzeit die Normalenwerte von Freiformflächen an beliebigen Flächenpunkten berechnet und mit geringen Verzögerungen (im Bereich von Millisekunden)

mit dem dritten Prototypen dargestellt werden. Das folgende Bild zeigt das aufgebaute System.

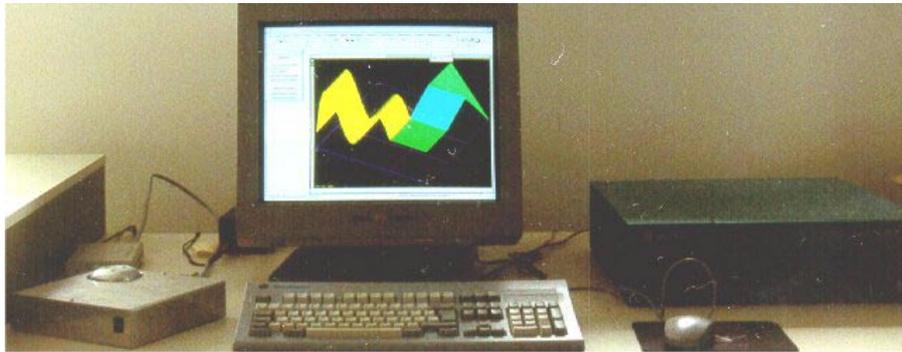


Abb. 5.4: Haptischen Hand Version 2, angekoppelt an UG V15 auf SGI IRIX

Links im Bild ist der zweite Prototyp zu sehen. Hinter dem Prototypen befindet sich das Steuergerät. Auf dem Bildschirm ist die Benutzungsschnittstelle von Unigraphics V17 erkennbar und einige Freiformflächen. Rechts im Bild befindet sich der benutzte Rechner, eine Indigo2 mit XZ-Grafik der Firma Silicon Graphics.

Obwohl der zweite Prototyp viele prinzipielle Verbesserungen aufwies, erschien die Handhabung unpraktisch. So erwies sich die Gestaltung einer ergonomischen Handauflage als notwendig. Auch wurde die Integration eines Trafos in das Gehäuse als sicherheitskritisch betrachtet. Daher wurde die Entscheidung getroffen, einen dritten Prototypen zu entwickeln.

5.3 Dritter Prototyp

Parallel zu der Migration von einem Steuerungsprogramm unter DOS zu Unigraphics auf SGI IRIX wurde eine dritte Version der "Haptischen Hand" von M. Hoff konstruiert /Hof-2001/. Die beiden ersten Prototypen waren gebaut als Geräte zur reinen Datendarstellung. Der dritte Prototyp sollte, neben einer ergonomischen Handauflage, die vorhandene Funktionalität mit der Funktionalität einer 3-Tasten-Maus vereinen und damit auch der Dateneingabe dienen. Der Prototyp sollte sich also auf einer planen, glatten Unterlage kräfteschonend bewegen lassen. Zu diesem Zweck musste das Gewicht reduziert und das Gerät mit einer ergonomisch geformten Handauflage versehen werden. Bei Konstruktion und Entwicklung des dritten Prototypen wurde das CAD-System Unigraphics Version 17 (abgekürzt: UG V17) eingesetzt. Dies ermöglichte einen rechnerinternen dreidimensionalen Zusammenbau aller verwendeten Bauteile (Digital Mock-Up, engl.: DMU) bei Verwendung beliebiger Teilegeometrien. Unter anderem

wurde eine ergonomische Oberfläche aus Ton modelliert, die in der folgenden Abbildung zu sehen ist.

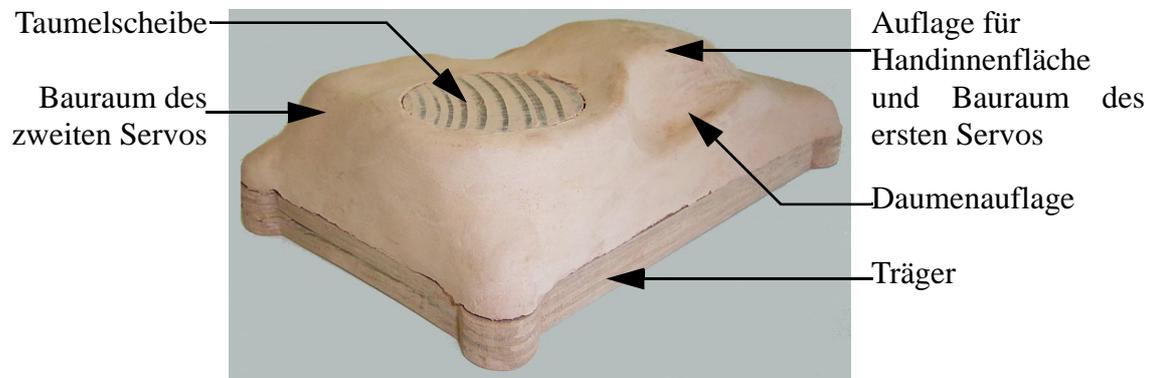


Abb. 5.5: Tonmodell des dritten Prototypen

Dieses Tonmodell wurde mit einer Messmaschine abgetastet und mit der Software STRIM100 in ein CAD-Flächenmodell umgesetzt. Der Prototyp wurde zur Gewichtssenkung fast vollständig aus Kunststoff gefertigt mit Ausnahme der Aufhängung der Taumelscheibe. Diese "Haptische Hand" kann wie eine normale Maus benutzt und bewegt werden. Bei der Bewegung liegen die Finger auf der Taumelscheibe auf. Das folgende Bild zeigt das aufgebaute Gesamtsystem.



Abb. 5.6: Gesamtsystem der „Haptischen Hand“ in der Version 3

Rechts im Bild ist der von Hoff entwickelte dritte Prototyp mit ergonomischer Handauflage zu sehen /Hof-2001/. Dahinter befinden sich Steuergerät und Netzteil. Der Rechner ist eine SGI Indigo2 mit dem Betriebssystem IRIX 6.5. Auf dem Monitor ist die Software UG V17 zu sehen, am rechten Rand neben dem Versuchsteil das Hauptmenü zur Steuerung der „Hapti-

schen Hand“. Voraussetzung für die Integration der Maus in die „Haptische Hand“ war unter anderem eine Überarbeitung des Steuergerätes.

Die „Migration“ (von „migrare“, dt.: bewegen) vom Betriebssystem IRIX der SGI -Workstation auf das Betriebssystem Windows2000 wurde im Sommer 2002 abgeschlossen. Ziel der Umstellung ist die Benutzung eines mobilen Laptops anstelle einer im Bild gezeigten stationären Workstation.

Mit diesem dritten Prototyp waren mehrere Ziele erreicht worden. Das Gewicht wurde deutlich reduziert trotz Integration einer handelsüblichen Drei-Tasten-Maus. Das bedeutet, dass die Haptische Hand auch wie eine Maus bewegt werden kann. Parallel zur Bewegung können Flächennormalen durch die Taumelscheibe dargestellt werden.

Die ersten drei Prototypen sprechen über die Winkeländerungen der Taumelscheibe in erster Linie die Nervenendigungen der Gelenke an, also den kinästhetischen Sinn (siehe Seite 4). Um das Gesamtziel einer haptischen Präsentation erreichen zu können, muss auch der taktische Sinn angesprochen werden. Dies ist nur mit Hilfe von translatorischen Freiheitsgraden erreichbar. Aus diesem Grund wurde ein vierter Prototyp entwickelt, der einen weiteren, translatorischen Freiheitsgrad umschließt.

5.4 Vierter Prototyp

Parallel zur Migration von SGI IRIX auf Windows2000 wurde ein vierter Prototyp entwickelt. Ziel der Entwicklung war die Erweiterung der Freiheitsgrade der „Haptischen Hand“. Bei diesem Prototypen wurde die Zahl der steuer- und nutzbaren Freiheitsgrade der Taumelscheibe um einen translatorischen Freiheitsgrad in der Hochachse erweitert. Das bedeutet, dass die Taumelscheibe nicht nur in zwei Achsen geneigt, sondern auch insgesamt angehoben werden kann. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Entwicklung war die Fortsetzung der Gewichtsreduktion. Diese konnte trotz eines weiteren notwendigen Servomotors und einer komplexeren Mechanik durch Absenkung von Wandstärken erreicht werden. Das folgende Bild zeigt eine Explosionszeichnung des vierten Prototypen. Diese Explosionszeichnung soll die Komplexität und Integrationsdichte veranschaulichen. Hierbei sind die Kabelstränge nicht modelliert.

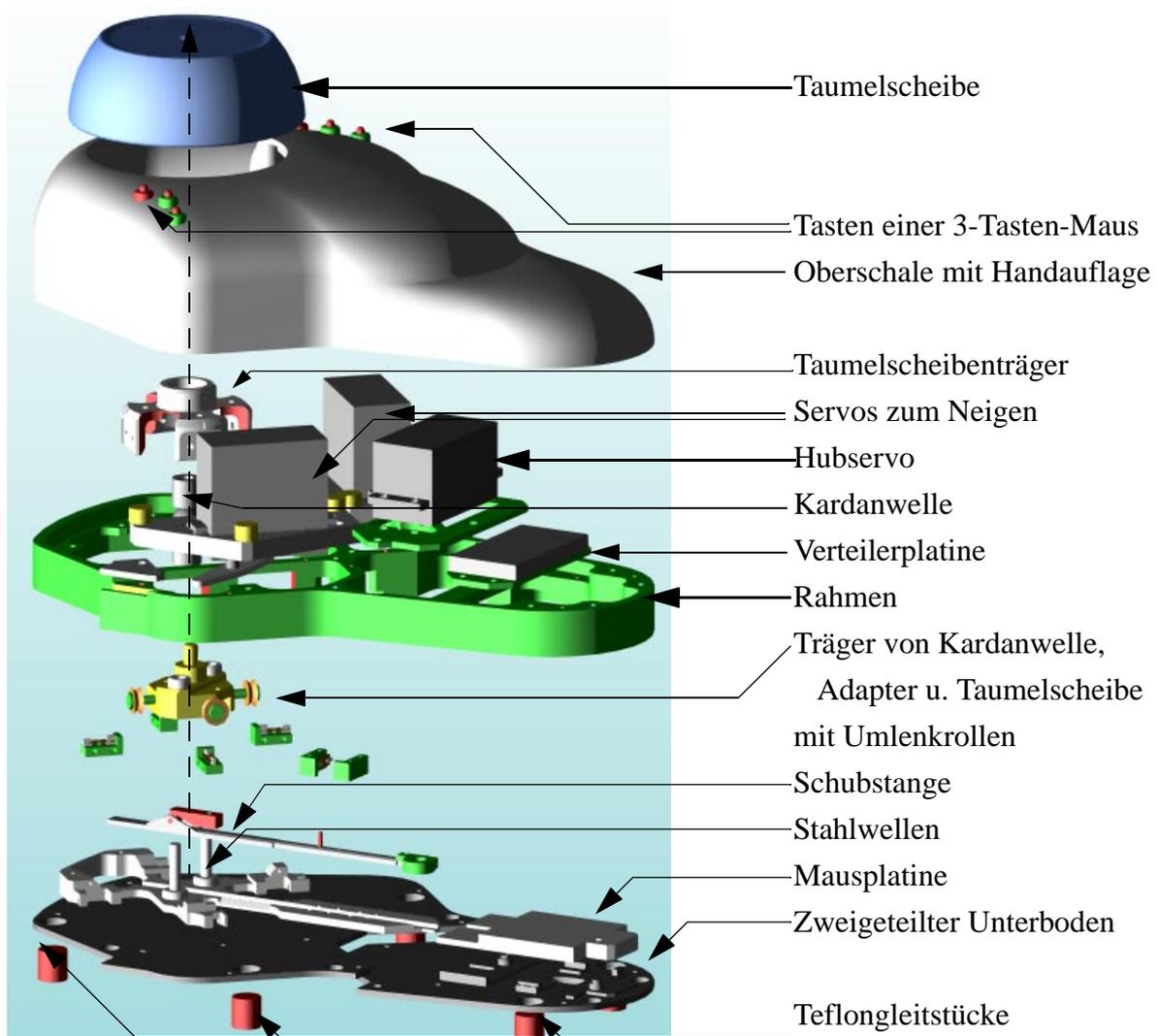


Abb. 5.7: Haptische Hand Version 4

Im Bild ist an oberster Stelle die Taumelscheibe zu sehen, darunter die ergonomisch geformte Oberschale. Unter der Oberschale befinden sich drei Servos, die vom Rahmen getragen werden. Unterhalb des Rahmens ist der Träger der Taumelscheibe mit vier Umlenkrollen zu erkennen. Die Vertikalbewegung der Taumelscheibe wird mittels einer Schubstange vom Servo zum Träger übertragen. Der Rahmen wird auf der Unterseite durch einen zweigeteilten Boden geschlossen. Teflingleitstücke stellen die Beweglichkeit des vierten Prototypen der haptischen Hand sicher.

Das Gesamtsystem ist in folgendem Bild zu sehen.

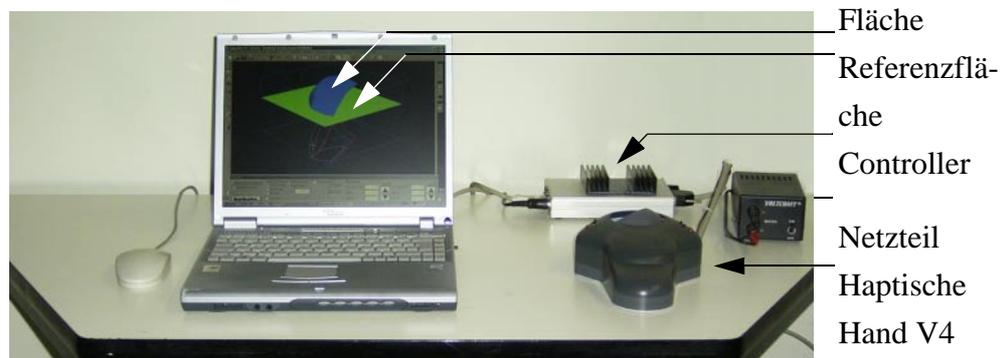


Abb. 5.8: Gesamtsystem der „Haptischen Hand“ in der Version 4

Das Bild zeigt auf dem Bildschirm des tragbaren Rechners die zu untersuchende Fläche über der Referenzfläche. Rechts neben dem tragbaren Computer ist die vierte Version der „Haptischen Hand“. Hinter der „Haptischen Hand“ befindet sich der Microcontroller, der über den seriellen COM-Port des Computers angesteuert wird. Rechts neben dem Controller ist das Netzteil zu sehen. Das Betriebssystem (Windows2000) erlaubt den gleichzeitigen Betrieb zweier „Mäuse“. Eine „Maus“ ist in die „Haptischen Hand“ integriert und über den USB-Port angeschlossen, die andere arbeitet davon unabhängig über den PS/2-Anschluss, sie ist links neben dem Computer zu sehen. Die Standardmaus dient der Navigation durch die Menüs, die integrierte Maus führt den Cursor über die zu untersuchende Fläche.

5.4.1 Konstruktionsparameter der Haptischen Hand

Die Konstruktion der Haptischen Hand beruht im wesentlichen auf zwei Parametern. Frei wählbar sind der Nutzdurchmesser D_{Nutz} der Taumelscheibe und der mögliche maximale Kippwinkel α_{Betrieb} pro Achse.

Der Nutzdurchmesser D_{Nutz} wurde gewählt unter der Vorgabe, dass drei Finger auf die Taumelscheibe gelegt werden sollen, dies führt zu $D_{\text{Nutz}} < 60\text{mm}$. Als maximaler Kippwinkel pro Achse im Betrieb wurde festgelegt $\alpha_{\text{Betrieb}} = 30^\circ$. Werden beide Achsen um jeweils 30° geneigt, so ergibt sich ein maximaler Kippwinkel von $\alpha = 41,4^\circ$ gegenüber der Hochachse. Der Einfachheit halber wurden die Berechnungen mit $\alpha_{\text{max}} = 45^\circ$ weitergeführt. Um den Spalt zwischen Taumelscheibe und der oberen Abdeckung der Haptischen Hand gering zu halten, wurde eine „Schürze“ konstruiert. Das heißt, vom Rand der Nutzfläche verläuft eine Seitenwand „schür-

zenförmig“ nach unten. Die folgende Konstruktionsskizze zeigt die sich daraus ergebende Geometrie.

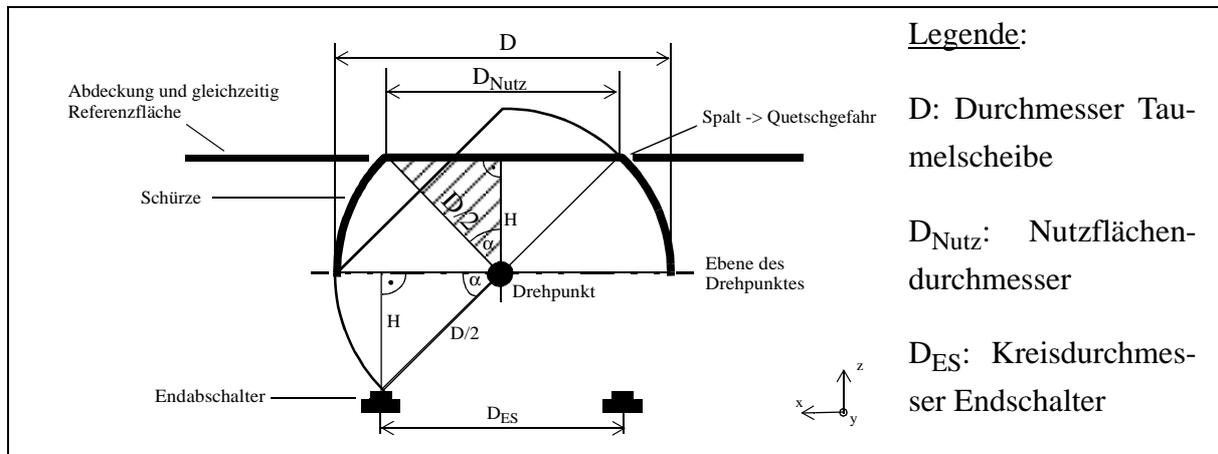


Abb. 5.9: Konstruktionsskizze zur Gestaltung der Taumelscheibe

Laut Abbildung gilt für den Nutzfächendurchmesser D_{Nutz} wie für den Kreisdurchmesser D_{ES} , auf dem die Endabschalter angeordnet sind:

$$D_{\text{Nutz}} = D_{\text{ES}} = \cos(\alpha_{\text{max}}) \cdot D = 56,6 \text{ mm}$$

Der Abstand H des Drehpunktes zur Ebene des Druckpunktes ist identisch mit der Höhe der Schürze und berechnet sich zu:

$$H = \sin(\alpha_{\text{max}}) \cdot \frac{D}{2} = 28,3 \text{ mm}$$

Die Neigung der Taumelscheibe ist realisiert durch eine Kardangelenke. Zwischen Taumelscheibe und Kardangelenke ist ein Adapter aus Aluminium befestigt. An den Auslegern dieses Adapters sind vier Fäden befestigt. Diese vier Fäden übertragen die Bewegung der zwei Neigungsservos unabhängig von einander auf die Taumelscheibe. Der Adapter ermöglicht ebenfalls den schnellen Austausch von verschiedenen gestalteten Taumelscheiben.

Das folgende Bild zeigt den zentralen Träger von Kardangelen, Adapter, Taumelscheibe und Umlenkrollen.

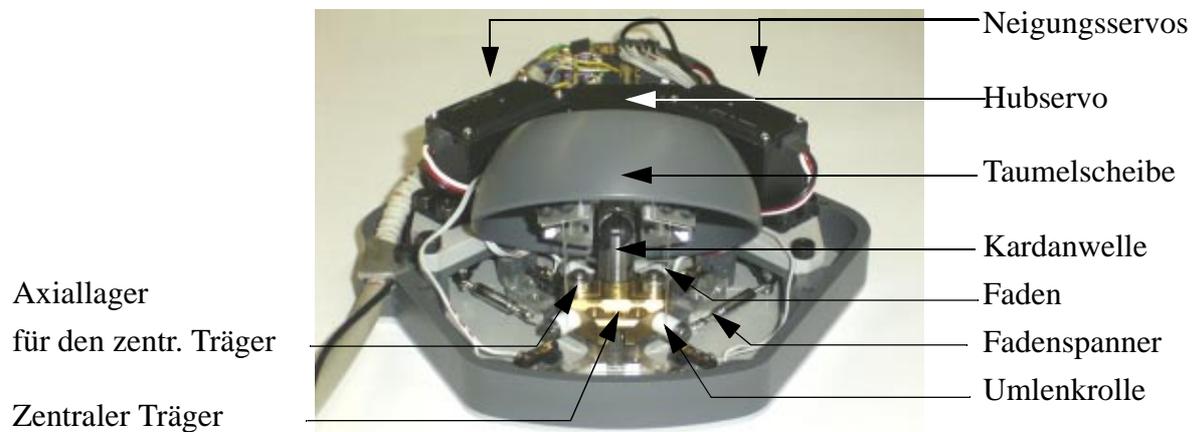


Abb. 5.10: Zentrales Trägerstück der Haptischen Hand

Auf dem Träger sitzt das Kardangelen. An den Seiten des Trägers befinden sich vier Umlenkrollen aus Polyfluorethylen (Teflon). Über diese Rollen werden die Nylonzüge von den Ruderhörnern der Servos zu dem Taumelscheibe umgelenkt. Die vertikale Bewegung des Trägers wird durch kleine Axiallager ermöglicht, die auf Stahlwellen laufen ähnlich wie bei einer Hubbühne.

Die Erweiterung um den genannten translatorischen Freiheitsgrad erfordert eine Modifikation der bisher verwendeten Steuerung. Es wurde eine Steuerung gebaut, welche drei Servos mit Daten und Strom versorgt.

Dieser vierte Prototyp bietet den in der These geforderten translatorischen Freiheitsgrad. Die Taumelscheibe neigt sich nun einerseits analog einer Fläche an einem willkürlich gewähltem Flächenpunkt, andererseits ist ein Anheben der Scheibe vorgesehen zur Simulation der Höhe der Fläche. Mit Hilfe der Software kann zwischen den geometrischen Eigenschaften der Fläche am gewählten Flächenpunkt und den Stellwerten der Servomotoren jede beliebige Funktion geschaltet werden.

Da die Servomotoren voneinander unabhängig angesteuert werden, ist es möglich, folgende Freiheitsgrade bzw. Kombinationen von Freiheitsgraden zu nutzen:

- Ansteuerung des translatorischen Freiheitsgrades: d.h. nur die Höhe der Fläche am Flächenpunkt relativ zu einem Bezugsniveau wird auf den Hubservo übertragen. Da der Hubservo einen maximalen Hub von ca. 4mm hat, ist es notwendig, die Flächenhöhe relativ zur Hubhöhe zu skalieren.
- Ansteuerung der rotatorischen Freiheitsgrade: d.h. nur die Neigung der Fläche am Flächenpunkt relativ zu einem Bezugsniveau wird auf die Neigungsservos übertragen. Auch hier kann die Flächenneigung relativ zur Servoneigung skaliert werden.
- Ansteuerung aller Freiheitsgrade: d.h. Höhe und Neigung der Fläche am Flächenpunkt relativ zu einem Bezugsniveau werden auf Hubservo und Neigungsservos übertragen.
- Ansteuerung der rotatorischen Freiheitsgrade mit Ausgleich des Höhenfehlers der Taumelscheibe. Derjenige Punkt der Taumelscheibe, der sich genau in der Flucht der z-Achse befindet, steigt in die Höhe, je weiter sich die Taumelscheibe neigt. Hier wird der Hubservo als Korrekturservo benutzt: er lässt die Scheibe sinken, je mehr sich der theoretische Mittelpunkt aufgrund der Neigung heben will.

Tab. 5.1: Liste der Kombinationen der möglichen Freiheitsgrade

Die in Abbildung 5.2 auf Seite 38 gezeigte Menüstruktur der ersten Version wurde vollständig überarbeitet. Es existieren nun folgende Menüs:

- Kalibrierung
- Geführtes Testen durch automatisches Abfahren von Flächenkurven
- Freies Testen durch manuell gesteuertes Auswählen von Flächenpunkten
- Freies Testen „Pro“: durch manuell gesteuertes Auswählen von Flächenpunkten mit interaktiver Auswahl der Lage zur Bezugsebene.

Diese vier Menüs für den vierten Prototypen wurden mit Visual C++ programmiert und über das GUI-Builder (engl.: Graphical User Interface Builder, dt.: Programm zur Erweiterung der graphischen Benutzungsschnittstelle) in die Menüstruktur von Unigraphics V17 integriert. Das folgende Bild zeigt den Inhalt des Menüpunktes „Kalibrierung“.



Abb. 5.11: Menü „Kalibrierung“ der „Haptischen Hand“ (Version 4)

Mit den ersten vier Schaltern kann der Benutzer das Vorzeichen der Stellwinkel invertieren. Dies erlaubt es, die Haptische Hand in normaler Richtung als auch um 180° gedreht zu benutzen. Diese Variationen werden durch die zwei Bilder rechts veranschaulicht. Bei einer Drehung um 180° liegen nicht mehr die Finger auf der Taumelscheibe, sondern der Handballen. Die Einstellung der Winkel-Mittellage wird manuell durch den Anwender vorgenommen. Anschließend erfolgt automatisch das Anfahren der Endabschalter. Die Umrechnung der Stellwinkel in Servomotorenstellwerte erfolgt nun mittels einer Kurve zweiten Grades. Dies berücksichtigt Nichtlinearitäten in den Servomotoren.

Vor Versuchsbeginn muss das Kalibrierungsmenü ausgeführt werden. Die automatische Endkalibrierung ermittelt Korrekturwerte für den aktuellen Versuchsaufbau. Diese Werte werden in einer lesbaren Datei abgelegt, um anschließend von den anderen Menüs benutzt zu werden. Aufgrund der Lesbarkeit können sie vom Benutzer zudem kontrolliert und manuell modifiziert werden.

Nach Kalibrierung der Servos entscheidet der Benutzer der „Haptischen Hand“, ob er Freiformflächen in einem „freien“ Modus Flächen untersuchen will oder in einem „geführten“ Modus.

Im „geführten“ Modus wird die „Haptische Hand“ als Ausgabegerät genutzt und nicht bewegt. Eine beliebige Raumkurve wird auf die Freiformflächen projiziert. Die erzeugte Flächenkurve wird automatisch abgefahren und die Normalenvektoren der Flächenkurve werden an die „Haptische Hand“ übertragen.

Das folgende Bild zeigt das Menü „Geführtes Testen“

Abb. 5.12: Menü „Geführtes Testen“ der „Haptischen Hand“ (Version 4)

Das Menü „Geführtes Testen“ beginnt mit der Auswahl der zu untersuchenden Freiformflächen. Der Abtastbereich auf den ausgewählten Flächen kann eingeschränkt werden. Im zweiten Schritt wird der Modus der Flächenvermittlung, wie auf Seite 48 beschrieben, gewählt. Im einfachsten Fall wird zum Beispiel nur die relative Höhe des Flächenpunktes zu einem Bezugsniveau vermittelt. Im dritten Schritt wird eine Kurve bzw. werden mehrere Kurven ausgewählt, die auf die ausgewählten Flächen projiziert werden. Auch hier gibt es eine große Zahl von Parametern. Zum Beispiel besteht kein Zwang, die komplette Kurve abzufahren. Durch Einschränkung des Start- und des Zielparameters kann interaktiv die Flächenkurve auf den wesentlichen Bereich der Untersuchungen eingeschränkt werden.

Im „freien“ Modus wird die „Haptische Hand“ aktiv benutzt. Durch Bewegung der „Haptischen Hand“ wird ein beliebiger Punkt auf den zu untersuchenden Freiformflächen gewählt. Die geometrischen Eigenschaften des Flächenpunktes wie Neigungswinkel oder/und Höhenwerte werden auf die Taumelscheibe übertragen.

Das Menü „Freies Testen“ ist in folgendem Bild dargestellt.

Als erster Schritt werden beim Menü „Freies Testen“ die zu untersuchenden Flächen ausgewählt. Auch hier kann der zu untersuchende Bereich durch Angabe von Unter- und Obergrenzen (gemessen an der Z-Achse) eingeschränkt werden. Im Vergleich zum Menü „Geführtes Testen“ fehlt nun der Schritt zur Auswahl der Führungskurven. Identisch mit dem vorhergehenden Menü ist der Schritt, in dem der Modus der Flächenvermittlung gewählt wird.

Schliesslich kann ein Reduktionsfaktor angegeben werden. Die Neigungswerte am frei gewählten Flächenpunkt werden mit diesem Faktor multipliziert, das Ergebnis an die Neigungsservos ausgegeben. Diese Winkelreduktion verbessert implizit auch die Reaktion der Servos, deren Stellzeit sich bei dem (hier sichtbaren) Reduktionsfaktor von „0,5“ ebenfalls um 50% sinkt.

Abb. 5.13: Menü „Freies Testen“ der „Haptischen Hand“ (Version 4)

Der Normalenvektor am ausgewählten Flächenpunkt wird mit geringstmöglicher Verzögerung auf die Taumelscheibe gegeben, die sich entsprechend dem gewählten Menü und seinen Optionen neigt bzw. hebt.

Im Menü „Freies Testen“ müssen die Flächen mit dem Konstruktionsbefehl „Transformation“ zuerst in die richtige Lage und Orientierung gebracht werden, bevor das Menü aufgerufen wird. Im Menü „Freies Testen Pro“ ist der Ablauf der Flächenauswahl erweitert dahingehend, dass die relative Lage der ausgewählten Flächen zur Bezugsebene interaktiv bestimmt wird.

5.5 Zusammenfassung

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten technischen Daten der vier Prototypen zusammengefasst.

	„Haptische Hand“ V. 1	„Haptische Hand“ Version 2	„Haptische Hand“ Version 3	„Haptische Hand“ Version 4
Freiheitsgrade	2 rotatorisch, aktiv	2 rotatorisch, aktiv	2 rotatorisch, aktiv	2 rotat., 1 transl., alle aktiv
Endschalter	2 x 2	2 x 2	2 x 2	3 x 2
integrierte Maus	keine, Gerät unbeweglich	keine, Gerät unbeweglich	konventionell arbeitend	optisch arbeitend
Abmessungen gesamt	495x160x90 (mm)	220x220x65 (mm)	225x144x65 (mm)	235x135x62 (mm)
Höhe der Handauflage	75 mm	65 mm	62 mm	58-62 mm
Gewicht (Mechanik)	2700 g	1500 g	950 g	750 g
Kippauslenkung	ca. - 45° bis ca. + 45°	ca. - 37° bis ca. + 37°	ca. - 45° bis ca. + 45°	ca. - 35° bis ca. + 35°
Kippgeschwindigkeit	0,18s / 45°	0,09s / 45° bei 4,8V (robbe S 9450)	0,14s / 45° bei 4,8V (hitec HS-77BB)	0,09s / 45° bei 4,8V (robbe S 9450)
Anhebung	---	---	---	0 - 4 mm
Hubgeschwindigkeit	---	---	---	0,4s / 4mm (hitec HS-77BB)
Drehmoment / Hubkraft	150 Ncm / ---	80 Ncm / ---	44 Ncm / ---	70 Ncm (bei 4,8V) 200 N (bei 4,8V)
Microcontroller	Version 1	Version 1 später: Version 2	Version 2, für zwei Servos	Version 3 für drei Servos
Betriebssystem	Windows 95	Windows 95 später: SGI IRIX	SGI IRIX später: Win2000	Windows2000
Steuerprogramm	DOS basiert	DOS basiert	C basiert UG-Applikation	C basiert UG-Applikation
CAX-Technik	AutoCAD+	AutoCAD / NC-Maschinen	UG V17 / CNC-Maschinen	UG V17 / CNC-Maschinen

Tab. 5.2: Vergleich der Basisdaten der „Haptischen Hand“

Aus der Tabelle geht unter anderem hervor, dass das Gewicht der Prototypen permanent gesenkt wurde. Die deutliche Gewichtsreduzierung bei der Entwicklung der dritten Version der „Haptischen Hand“ ist auf den Einsatz eines 3D-Systems mit Freiformflächenmodul zurückzuführen. Diese Basis erlaubte eine räumliche Verdichtung aller Bauteile und eine ergonomisch geformte Handauflage mit dünner Wandstärke. Die Gewichtsreduzierung konnte trotz Integration einer Mausplatte erreicht werden. Ein ähnlicher Erfolg bei der Entwicklung des vierten Prototypen ist ebenfalls auf das CAD-System zurückzuführen. Hier konnte der durch den Hubmechanismus (Hubservo, Messingadapter, Kugellagerbuchsen, Stahlwellen) bedingte Gewichtszuwachs mehr als ausgeglichen werden.

5.6 Reaktionszeiten der Haptischen Hand

Ziel dieses Kapitels ist die theoretische Betrachtung der technischen Grenzwerte der Prototypen. Wären Stellbefehle mit einer Wiederholrate von 25Hz realisierbar, dann müsste zumindest das Auge bei einer optischen Betrachtung der Haptischen Hand eine kontinuierliche Umsetzung der rechnerinternen Normalenvektoren wahrnehmen. Es ist derzeit nicht bekannt, welche Stellraten haptischer Art vorliegen müssen, um eine haptisch kontinuierliche Bewegung zu simulieren.

Hierzu werden im folgenden die Geschwindigkeiten der Servos, des Microcontrollers und des Rechners getrennt betrachtet, um das langsamste Glied von der Ermittlung des Normalenvektors bis zur exakten Darstellung des Normalenvektors zu bestimmen.

Die Stellraten der Haptischen Hand scheinen zunächst von den Servos abhängig. Die zwei Servos für die Neigung der Taumelscheibe weisen Winkelgeschwindigkeiten von 90msec/45° bei 4,8V Versorgungsspannung auf. Der benötigte Strom ist von der Last abhängig und erreicht kurzzeitig bis zu 500mA. Die Stellraten sind somit vom zurückgelegten Weg abhängig, daher werden beispielhaft drei Fälle berechnet: Vollpendelbewegung, Stellweg von zehn Grad sowie eine Minimalpendelbewegung.

Ein Vollausschlag führt von der Nulllage zu einem Anschlag (ca. 35 Grad), dann zu einer Bewegung zum gegenüberliegenden Anschlag (Differenz: 70 Grad) und wieder zurück in die Nulllage (plus 35 Grad), also insgesamt 140 Grad. Bei einer theoretischen Winkelgeschwindigkeit von 90 msec/45° benötigen die Servos folglich mindestens 270 msec. Hinzuzufügen ist die Zeit für eine Bewegungsumkehr, die allerdings nicht gemessen werden konnte. Unter Einbeziehung einer Brems- und Beschleunigungszeit für die Bewegungsumkehr wird bei maximaler Amplitude eine Vollpendelbewegung mit maximal 3Hz realisierbar sein. Vollausschläge dieser Art sind selten, sie können nur mit einer sägezahnartigen und in der Praxis nicht existierenden Flächenfolge bewirkt werden.

Normalerweise sind die Differenzen zwischen zwei berechneten und an die Servos übermittelten Stellbefehle geringer als zehn Grad. Im Falle einer Winkelbewegung von 10° wird diese innerhalb von 0.02 sec ausgeführt, bzw. eine Pendelbewegung innerhalb 0.04sec. Dies entspricht einer durchschnittlichen Servostellfrequenz von maximal 25Hz. Bei geringeren Winkelbewegungen erhöht sich dieser Wert.

Wenn ein minimales Zittern der Servos um eine beliebige Position erfolgen soll, dann entspricht dies einem wiederholten Erhöhen und Erniedrigen der Stellsignale um 1 Stelleinheit, also die Übermittlung eines Signales wie z.B. „128-129“ bei „129“ als Ausgangsposition an den Microcontroller. Da die Auflösung der Servos 0,72 Grad/Stelleinheit beträgt, würde der Servo in diesem Fall eine Pendelbewegung mit einer Amplitude von $0,36^\circ$ Grad ausführen. Der zugehörige Weg wäre bei einer Herstellerangabe von 90msec/45Grad in $(2 \cdot 0,72^\circ \cdot 90\text{msec}/45^\circ)$ 2,8msec zuzüglich der unbekanntenen Bewegungsumkehrzeit zurückgelegt, d.h. ca. 3msec. Damit wäre eine Zitterfrequenz mit max. $1\text{sec}/3\text{msec}=333\text{Hz}$ möglich.

Die entsprechenden Werte für die Hubbewegung ergeben sich analog. Zur Erreichung des maximalen Hubes von 4mm muss sich die Schubstange um 10mm bewegen. Der Hubservo muss sich dafür um 114° drehen. Mit den angegebenen 120msec/45° folgt eine Zeitdauer von 304msec pro 4mm Hub. bzw. 600msec pro Maximalpendelhub, entsprechend 1,66 Hz. Dies entspricht $114^\circ/0,72^\circ/1\text{Pw}$ respektive 160 Pulsweiteneinheiten. Eine Bewegung von Zmin nach Zmax oder umgekehrt wird während der haptischen Simulation von Flächen nur bei Flächensprüngen auftreten, eine Bewegung von Zmax-Zmin-Zmax nur bei Durchfahren von Löchern. In der Regel wird ein Höhengsprung zwischen zwei Flächenpunkten nur zu einem Teil des maximalen Hubes führen. Das heißt, ein Teilhub von 1mm kann mit einer Stellzeit von 76msec bzw. einer Stellrate von 13Hz; ein Teilhub von 0,5mm folglich einer Stellrate von 26Hz ausgeführt werden. Ein minimales Zittern des Hubservos um eine Stelleinheit bzw. $2 \cdot 0,72^\circ$ würde bei der vom Hersteller vorgegebenen Geschwindigkeit von 120msec/45° innerhalb von $2 \cdot 1,92\text{msec}$ ausgeführt bzw. mit einer Frequenz von 260Hz.

Der Versuchsrechner benötigt zur Berechnung der Normale und Höhenwerte an einem Flächenpunkt ungefähr 200msec entsprechend einer Frequenz von 5 Hz. Diese Zeitdauer ist primär abhängig von dem verwendeten Rechner, einem Laptop mit Pentium III Prozessor und 1GHz Taktrate. Vergleichsweise geringen Einfluss hat die Zahl der verwendeten Flächen.

Der Rechner sendet an das Steuergerät seriell mit 9600bit/sec, bei 8bit/byte also 1200bytes/sec. Ein kompletter Stellbefehl für Board 1 (es wird nur ein Board benutzt, d.h. dieser Wert wird nur einmal übermittelt), z.B. „SV3 M129/r“ (= Servo 3, Position129, Zeilenumbruch) umfasst 9 bytes, entsprechend 7,5 msec/Befehl. Zwischen den Befehlen muss der Microcontroller eine Wartezeit von mindestens 3 msec, derzeit 4 msec haben. Das heißt ein kompletter

Stellbefehl kann alle 11,5 msec an den Microcontroller übergeben werden, also mit 87Hz. Werden beide Servos gleichzeitig gestellt, dann ergibt sich als Stellbefehl z.B. „SV3 M129 SV1 M167/r“, das sind 18bytes entsprechend 15msec bei 1200bytes/sec. Zusammen mit der Wartezeit von 4msec kann dieser Befehl alle 19msec wiederholt werden. Der Rechner kann in diesem Fall die berechneten Normalenvektoren mit einer Stellrate von maximal 52,6Hz an den Microcontroller übergeben.

Für eine Pendelbewegung beider Servos zu einer beliebigen Position und zurück resultiert daraus eine rechnerbedingte minimale Frequenz von 26,3Hz. Soll nur ein Servo zu einer beliebigen Position und zurück bewegt werden, dann ist nur ein einmaliger Befehl mit 9bytes (z.B. „SV3 M129/r“) notwendig, darauffolgend muss abwechselnd der Stellbefehl „M128/r“ „M129/r“ entsprechend 5Bytes, entsprechend 4,17msec, übergeben werden. Dieser Befehl kann wegen der Wartezeit von 4msec also nach 8,17 msec wiederholt werden. Dies entspricht einer Frequenz von 122,5. bzw. für eine Pendelbewegung eine Frequenz von 61,25Hz. Der Microcontroller sendet alle empfangenen Stellbefehle mit einer Periode von 14-20msec bzw. mit 50-71Hz an die Servos.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich die Folgerung, dass das Softwaremodul das langsamste Glied in der Signalkette ist. Eine Beschleunigung der Berechnungen im Softwaremodul ist durch Einsatz schnellerer Hardware möglich. Bei Verwendung eines Pentium IV (2Ghz) ist näherungsweise mit einer Halbierung der Berechnungszeiten im Softwaremodul, verglichen mit dem bisher verwendeten Pentium III (1Ghz) zu rechnen. In diesem Fall würde die Ausgabe der Stellbefehle mit einer Frequenz von 10Hz erfolgen. Dieser Wert liegt immer noch deutlich unter den Stellfrequenzen der Servos, die zwischen 25-333Hz liegen und ebenso unter der Übertragungsrate der seriellen Schnittstelle von ca. 50Hz.

Die Stellbefehle werden von der Software also langsamer berechnet, als sie von der Schnittstelle, dem Microcontroller und den Servomotoren verarbeitet werden können. Dies erklärt, warum die Servo-Taumelscheiben-Einheit nicht klirrt. In der Realität ist allerdings auf ebenen Flächen zu beobachten, dass die Taumelscheibe „zuckt“. Die Ursache ist derzeit nicht bekannt, allerdings wird sie in den verwendeten Servomotoren vermutet. Begründung ist, dass der Prototyp 3 dieselbe Software und Hardware, allerdings langsamere Servomotoren benutzt und bei diesem Gerät kein „Zucken“ zu beobachten war.

Diesen technischen Überlegungen steht gegenüber, dass eine menschliche Hand Vibrationen mit einer Frequenz von 0,3Hz bis über 500Hz wahrnehmen kann und eine Tastfähigkeit von minimal 0,06 mm an den Fingerspitzen besitzt. Eine menschliche Hand ist also um das fünffache empfindlicher bei Vibrationen und um das zehnfache empfindlicher bei Erhebungen als es das aufgebaute System darstellen kann.

6 Versuchsreihen

In Kapitel 5 ist die Entwicklung der Versuchsapparatur beschrieben. Eine Zusammenfassung der Werte der verwendeten Hardware ist in Kapitel 5.5 gegeben, gefolgt von einer Diskussion der Reaktionszeiten der „Haptischen Hand“ in Kapitel 5.6. Unter Berücksichtigung dieser Systemeigenschaften ist in Kapitel 6 die Planung und Durchführung der Versuchsreihen beschrieben.

Ziel der Versuchsreihen ist es, Daten zu erheben, aus denen sich die in Kapitel 2 behauptete These (siehe Seite 13) beweisen lässt, nämlich, ob sich eine rechnerinterne Freiformfläche simulieren lässt als „gefühltes zeitlich-räumliches Integral“ von Normalenvektoren und/oder Höhe über der Zeit mittels einer kleinen externen „Einheits-“fläche mit drei Freiheitsgraden, die mit dem Normalenvektor und der Höhe eines Flächenpunktes gekoppelt sind.

Die Antwort auf diese Frage ist nicht objektiv messbar mit Hilfe von Drehmomenten, Kräfte, Massen oder Massenträgheiten. In dieser Studie wird die Antwort durch Versuchspersonen gegeben und die Interpretation ihrer Antworten. Es handelt sich also an einen „user-perceived quality approach“ /GfI-1996/.

Es bietet sich an die von Kirkpatrick und Douglas entwickelten Versuche, die zur Beurteilung des Gerätes „PHANToM“ entwickelt wurden, auf die „Haptische Hand“ zu übertragen /KiD-2000/.

6.1 Versuchsreihen nach Kirkpatrick und Douglas

Kirkpatrick und Douglas untersuchten das haptische Gerät „PHANToM“ der Firma Immersion (siehe Seite 32). Ziel der Untersuchung war die Frage, wie schnell und präzise sich mit diesem Gerät verschiedene Typen rechnerinterner Freiformflächen haptisch erkennen lassen /KiD-2000/. Diese Fragestellung kann zur Beurteilung der „Haptischen Hand“ unverändert übernommen werden.

Für die Untersuchungen wurden Flächentypen nach dem Schema von Koenderink et al. /KoD-1992/ /KKL-1994/ benutzt. Daher werden im folgenden die Flächen nach Koenderink und ihre Verwendung bei Kirkpatrick und Douglas detailliert vorgestellt.

Koenderink klassifiziert Flächen durch ein qualitatives Merkmal, die Form S (für „shape“) und ein quantitatives Merkmal, die Krümmung C (für „curvedness“). Diese beiden Werte berechnen sich an jedem Flächenpunkt nach den im folgenden angegebenen Formeln.

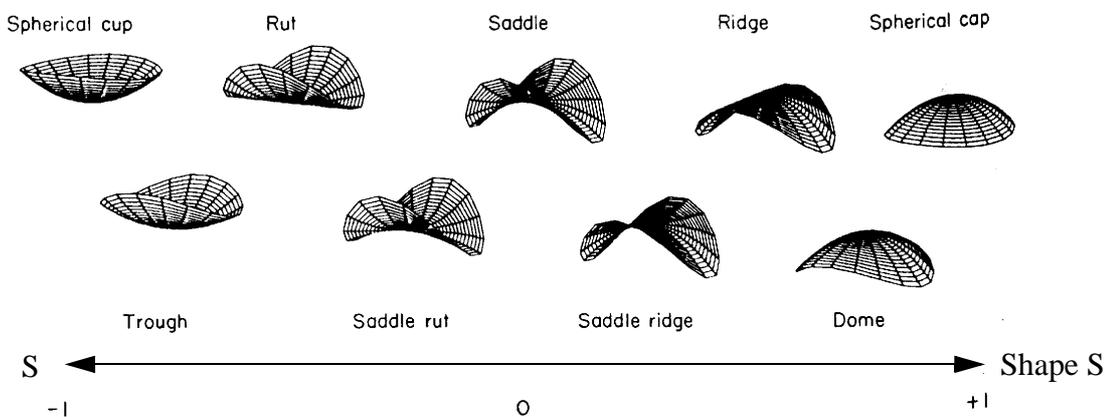
$$s = \frac{2}{\pi} \cdot \operatorname{atan}(\kappa_2 + \kappa_1) / (\kappa_2 - \kappa_1) \quad c = \sqrt{1/2 \cdot (\kappa_1^2 + \kappa_2^2)}$$

κ_1 und κ_2 sind Hauptkrümmungen eines Flächenpunktes, es gilt: $\kappa_1 > \kappa_2$

Formel 6.1: Berechnung von Flächenform S und Krümmung C nach Koenderink

Für eine Kugel mit dem Radius R ergibt sich aus Abb. 6.1 ein Wert $S=+1$ und $C=1/r$. Für einen Zylinder mit dem Radius R ergibt sich ein Wert von $S=+0.5$ und $C=1/r * ((0,5)^{0,5})$.

Das folgende Bild zeigt verschiedene, von Koenderink explizit benannte Flächentypen.



Quelle: Koenderink und van Doorn /KoD-1992/

Abb. 6.1: Flächennomenklatur nach Koenderink und van Doorn

Aus der Abbildung geht hervor, dass die gefundenen Flächentypen auch mit den Merkmalen „konvex“ und „konkav“ beschrieben werden können. Ein „Cup“ (dt.: Becher, Napf) ist konkav-konkav gekrümmt, ein „Saddle“ (dt.: Sattel) ist konkav-konvex gekrümmt und ein „Cap“ (dt.: Kappe, Kuppe) ist konvex-konvex gekrümmt. Neuartig an dem Schema ist, dass Koenderink diese zwei Merkmale zu einem einzigen Merkmal zusammenfasst.

Koenderink fertigt eine Vielzahl von physikalischen Modellen mit unterschiedlichen Formen S und Krümmungen C. Er untersucht die Wahrscheinlichkeit, S-C-Kombinationen voneinander zu unterscheiden. Das Ergebnis ist, dass die Wahrscheinlichkeit, S-C-Kombinationen voneinander zu unterscheiden mit der Krümmung zunimmt. Mit anderen Worten: Formen mit dem Formfaktor S lassen sich leichter erkennen bei höheren Krümmungswerten C.

Kirkpatrick und Douglas wählen aus den theoretisch beliebig vielen Formen die fünf Hauptformen „cup“ (dt.: „Napf“, „Senke“) mit $S=-1$, „rut“ (dt.: „Furche“, „Rinne“) mit $S=-0,5$,

„saddle“ (dt.: „Sattel“) mit $S=0$, „ridge“ (dt.: „Rücken“) mit $S=+0,5$ und „cap“ (dt.: „Deckel“, „Kuppe“) mit $S=+1$.

Kirkpatrick und Douglas modellieren diese Flächen rechnerintern. Sie koppeln ein „PHANToM“ der Firma Immersion (siehe Seite 32) an die rechnerinternen Flächen. Sie messen die Zeit, in der ein Proband eine dieser fünf Flächentypen erkennen kann.

Die Versuchsdurchführung gliedert sich bei Kirkpatrick und Douglas in drei Teile. Im ersten Teil, der Trainingsphase A, werden die fünf Flächentypen haptisch vorgestellt. Im zweiten Teil, der Trainingsphase B, wird geprüft, ob der Proband einen Flächentyp wiederholt korrekt erkennen kann. Im dritten Teil, der Testphase, werden die Zeiten gemessen, die ein Proband zum Erkennen einer Fläche benötigt.

Kirkpatrick und Douglas führen mit 12 Probanden jeweils 60 Versuche durch. Die eine Hälfte, also 30 Versuche werden mit sichtbaren Mauszeiger, die anderen 30 Versuche ohne sichtbaren Mauszeiger durchgeführt. Jede Hälfte à 30 Versuche spaltet sich wiederum auf in fünfzehn Versuche mit Flächen von $1,5\text{cm} \times 1,5\text{cm}$ und fünfzehn Versuche mit Flächen von $7\text{cm} * 7\text{cm}$

Ein Hauptergebnis dieser Untersuchungen ist eine Erkennungszeit von durchschnittlich 22,5 sec mit einer Trefferwahrscheinlichkeit von 84,5%. Nur von untergeordneter Bedeutung ist dabei die Größe der gefühlten Fläche. Bei Abnahme der Flächengröße von $7\text{cm} \times 7\text{cm}$ auf $1,5\text{cm} \times 1,5\text{cm}$, also einer Abnahme um mehr als 75% nimmt die Erkennungszeit um nur 12% zu. Nicht relevant ist, ob der Proband dabei die Position des Cursors sieht oder nicht sieht.

Mit der Erkenntnis von Kirkpatrick und Douglas, dass das Zeigen des Cursors ebenso wie die Flächengröße nur von untergeordneter Bedeutung sind, können die Versuche eingeschränkt werden auf jeweils 15 Versuche. Diese Versuchszahl ergibt sich aus den fünf Flächentypen, die nicht parallel präsentiert werden wie in der Trainingsphase, sondern in drei verschiedenen Lagen schief zur Bezugsfläche. Qualität und Quantität der Schiefwinkligkeit ist nicht angegeben. Es findet sich aber die Aussage, dass die Schiefwinkligkeit durch Rotation erreicht wurde, derart, dass die Flächenvorderseite immer noch zum Probanden zeigte.

Diese Differenzierung der Versuche in Flächen mit unterschiedlichen Schieflagen kann mit dem vorliegenden Gerät nicht übernommen werden. Der Grund hierfür sind die Neigungsgrenzen der Taumelscheibe der Haptischen Hand. Die Scheibe kann maximal um 30 Grad in jede Richtung geneigt werden. Werden höhere Neigungswerte an einem Flächenpunkt errechnet, kann nur der Maximalwert von 30 Grad mit der Taumelscheibe genutzt werden. Die Versuchsflächen von Kirkpatrick haben in fast allen Fällen maximale Neigungswerte von mehr als 30 Grad. Eine Schieflage würde diese maximalen Neigungswerte noch erhöhen.

Kirkpatrick benutzt rechnerinterne Flächen nach der Typologie von Koenderink. Im Gegensatz zu Koenderink, der Flächenmodelle mit kreisrunden Grundriss nutzt, benutzt Kirkpatrick Flächenmodelle mit rechteckigem Querschnitt. Wenn man dem Probanden die Cursorposition und den Grundriss zeigen will, dann hat ein kreisrunder Grundriss einen Vorteil: Werden die Flächen um ihre Hochachse gedreht, bleibt der Grundriss derselbe und erlaubt keinen Aufschluss über die Richtung der Hauptwölbung.

Ein weiterer Unterschied liegt in der Krümmung der verwendeten Flächen. Koenderink benutzte Flächen mit jeweils konstanter Krümmung. Kirkpatrick benutzt Flächen mit parabolischem Querschnitt, daraus resultiert eine variable Krümmungsverteilung auf der jeweiligen Fläche. Koenderinks Wahl erlaubt Untersuchungen von Flächen mit verschiedenem Formfaktor aber dennoch gleichen Krümmungswerten.

Daraus folgt:

- Die Versuchsflächen sind immer parallel zur x-y-Ebene ausgerichtet. Dadurch kann der Neigungsspielraum der Haptischen Hand am besten ausgenutzt werden.
- Der maximale Neigungswinkel der Versuchsflächen beträgt 30 Grad. Dadurch können Neigungswerte im Maßstab 1:1 auf die Haptische Hand übertragen werden.
- Eine Rotation der Flächen ist möglich um die z-Achse. In der Trainingsphase werden die Wölbungen der fünf Flächen parallel zur x- bzw. y-Achse ausgerichtet. In der Testphase werden die Flächen um 30°, 60° und 90° um die Hochachse gedreht.
- Die Versuchsflächen haben einen kreisförmigen Grundriss.
- Die Versuchsflächen haben einen auf der jeweiligen Fläche konstanten Krümmungswert.
- Je fünf Flächen müssen sich waagrecht nebeneinander auf der Grafikfläche des CAD-Systems darstellen lassen bei einer Bildschirmdiagonalen von 14 Zoll. Daraus folgt ein Grundrissdurchmesser von ca. 40 mm.

Im folgenden Bild sind die dadurch entstandenen Flächentypen dargestellt.

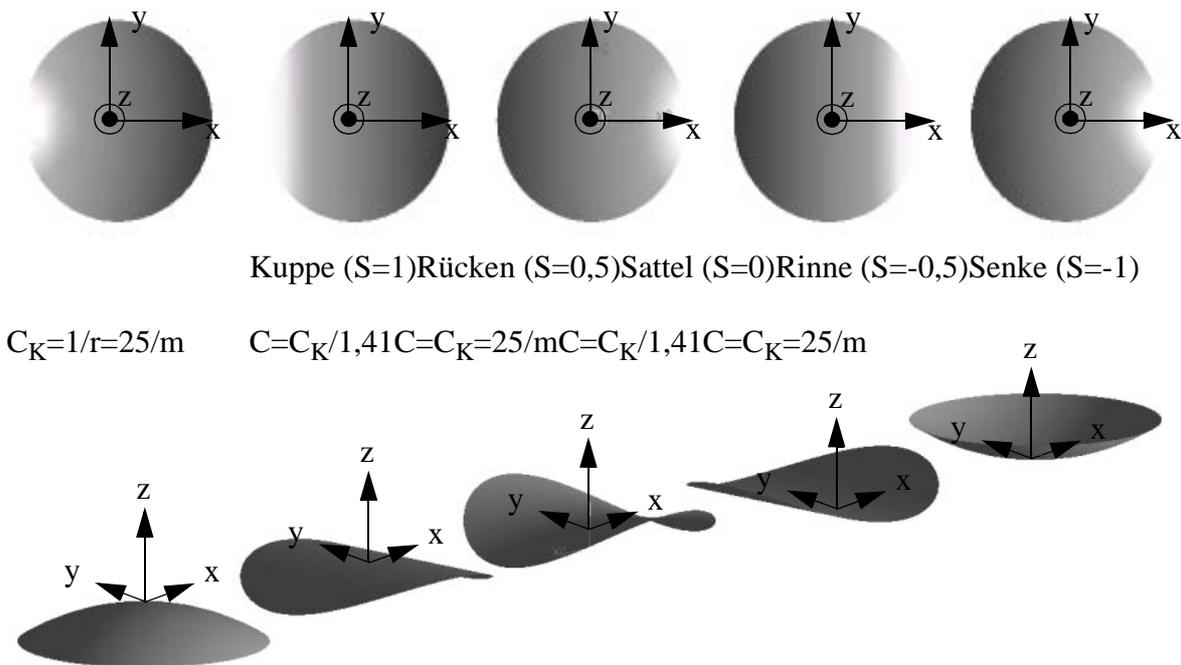


Abb. 6.2: Flächen der Trainingsphase

Das Bild zeigt fünf nebeneinanderliegende Flächen mit kreisförmigem Grundriss und dem Typ Kuppe, Rücken, Sattel, Furche und Senke. Der Grundrissdurchmesser von 40 mm liegt zwischen den zwei von Kirkpatrick verwendeten Flächengrößen von 15 mm und 70 mm.

Zur Konstruktion der Flächen wird im Fall von Senke und Kuppe eine Kugel von 40 mm Radius benutzt. Mit der Formel von Koenderink (siehe Seite 57) ergibt sich ein Krümmungswert $C=1/r=25/m$. Die Oberfläche dieser Kugel wird zwischen 90° Breite und 60° Breite benutzt. So ergibt sich bei einem Grundrissdurchmesser von 40 mm ein maximale Neigungswinkel von 30° relativ zur Hochachse am Rand der Fläche. Zur Konstruktion der Flächen im Fall von Rinne und Rücken wird ein Zylinder mit einem Radius von 40 mm benutzt. Mit der Formel von Koenderink (siehe Seite 57) ergibt sich ein Krümmungswert, der um den Faktor $1/\sqrt{2}$ niedriger ist als der Krümmungswert der Kugel, also $C=C_K/1,41$. Die Oberfläche des Zylinders wird begrenzt durch den geforderten kreisförmigen Grundriss. Damit ergibt sich am tiefsten Punkt der derart begrenzten Oberfläche wiederum ein Neigungswinkel von 30° relativ zur Hochachse des Grundrisses. Zur Konstruktion der Fläche im Fall des Sattels werden zwei Zylinder mit Radius 40 mm benutzt. Mit der Formel von Koenderink (siehe Seite 57) ergibt sich ein Krümmungswert $C=1/r=25/m$. Diese liegen orthogonal zueinander und durchdringen sich. Die Ausdehnung der Durchdringung erreicht parallel zu den Längsachsen der Zylinder 40 mm. Der Rand der Schnittmenge der Zylinder ergibt eine annähernd kreisrunde

Linse. Der Rand der Linse wird in vier gleiche Segmente geteilt und zwischen den Segmenten eine Fläche aufgespannt. Diese Fläche wird im letzten Schritt noch einmal auf einen kreisförmigen Grundriss begrenzt.

6.1.1 Versuchsaufbau

Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Flächen werden in den Versuchsreihen entweder nur rein haptisch oder, parallel, haptisch und optisch präsentiert.

Das folgende Bild zeigt den Versuchsaufbau der Versuchsreihe für beide Fälle.

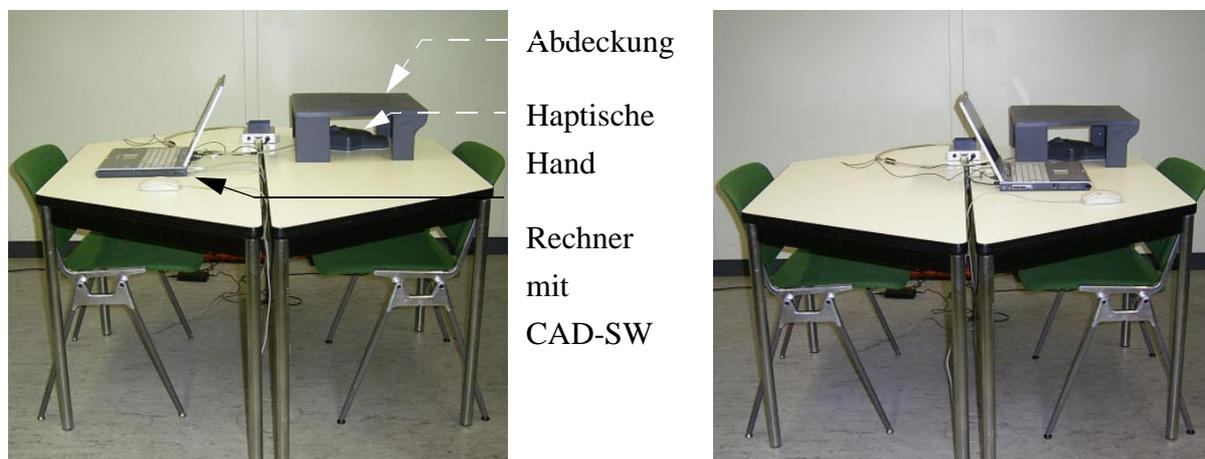


Abb. 6.3: Versuchsaufbau

Das linke Bild zeigt den Aufbau bei Versuchen mit rein haptischer Wahrnehmung. Hier sitzen sich Versuchsleiter und Proband gegenüber. Der Versuchsleiter bedient das Betriebssystem und die CAD-Software. Dem Probanden wird das Gerät, die „Haptische Hand“, zur Verfügung gestellt. Der Mausmodus ist aktiviert, d.h. das Gerät wird sowohl als Maus (Gerät zur Eingabe der Position des Zeigers auf dem Bildschirm) als auch als haptisches Ausgabegerät benutzt. Damit der Proband nur haptische Eindrücke wahrnehmen kann, wird das Gerät durch einen Kasten abgedeckt. Wahlweise kann der Proband das Gerät mit seiner linken oder seiner rechten Hand benutzen.

Das rechte Bild zeigt den Aufbau bei Versuchen mit sowohl haptischer als auch optischer Wahrnehmung. Dem Probanden werden bei dieser Versuchsart sowohl das Gerät als auch im wesentlichen der Bildschirm zur Verfügung gestellt. Alternativ hätte auch ein externer Monitor an den Laptop angeschlossen und dem Probanden zur Verfügung gestellt werden können. Auch hier wird die „Haptische Hand“ durch einen Kasten abgedeckt.

Der Versuchsleiter gibt zu Beginn eines Versuches vor, wie die Hand des Probanden auf der Haptischen Hand aufliegt. Bei der Konstruktion der Haptischen Hand wurde davon ausgegangen, dass entweder mehrere Finger oder der Handballen auf der Taumelscheibe aufliegen. Die möglichen Anordnungen der menschlichen Hand auf der Haptischen Hand zeigt das folgende Bild.



Abb. 6.4: Anordnungen der menschlichen Hand auf der Haptischen Hand

Das linke Bild zeigt die Haptische Hand mit Anregung des Handballens, das rechte Bild zeigt die Haptische Hand mit Anregung der mittleren drei Finger.

In der Trainingsphase werden die in Abbildung 6.2 gezeigten Flächen benutzt. Der Versuchsleiter bietet die verschiedenen Flächentypen der Reihe nach über die Haptische Hand an und nennt dazu jeweils ihren Namen. Dieser Durchgang wird einmal wiederholt, und auch beim zweiten Durchgang nennt der Versuchsleiter wieder die Namen. Im dritten Durchgang bietet der Versuchsleiter willkürlich eine der fünf Flächen an ohne Namen zu nennen. Der Proband nennt nun die zugehörigen Namen. Gelingt dies ohne Fehler in zwei aufeinanderfolgenden Reihen von je fünf in der Reihenfolge vertauschten Flächen, ist die Trainingsphase abgeschlossen.

An die Trainingsphase schließt sich die eigentliche Testphase an. Für die Testphase werden die Flächen um ihre Hochachse jeweils um 30° , 60° und 90° gedreht. Damit entstehen fünfzehn Testflächen, die das folgende Bild zeigt. Diese fünfzehn Testflächen können innerhalb der Grafikfläche des CAD-Systems angezeigt werden, das heißt ein Wechseln der Versuchsdateien während der Testphase ist nicht notwendig. Um ein Erraten des Flächentyps so weit als möglich zu behindern, werden die entstanden Flächen willkürlich vertauscht. Das Ergebnis der Vertauschung ist nur dem Versuchsleiter bekannt.

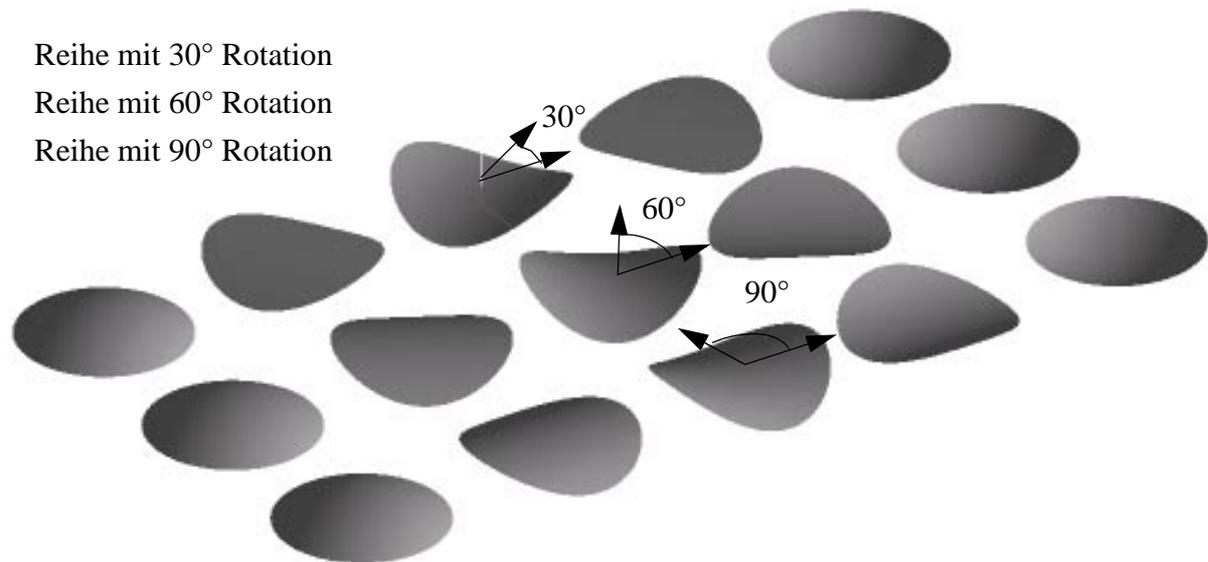


Abb. 6.5: Fünf Flächentypen mit einer Rotation von 0°, 30°, 60° und 90°

In der Testphase werden die fünfzehn Flächen, die mit unterschiedlichen Rotationen vorliegen, dem Probanden in einer willkürlichen Reihenfolge angeboten. Hierzu bewegt der Versuchsleiter mit seiner Maus den Mauszeiger in die Mitte der jeweiligen Fläche. Sobald der Proband die Haptische Hand bewegt startet die Zeitmessung. Sein Bewegungsspielraum beträgt vom Mittelpunkt aus in jeder Richtung ca. 40 mm. Der Bewegungsraum stimmt nicht im Maßstab 1:1 mit der Flächengeometrie überein. Die Abweichung wird durch die Maus mittels dreier Störfaktoren verursacht: Übersetzung („Geschwindigkeit“) und Beschleunigung sowie Fehler des optischen Sensors. Verlässt der Proband die Fläche, stellt sich die Taumelscheibe der Haptischen Hand waagrecht. Die Zeitmessung endet, wenn der Proband eine definitive Aussage zum vermuteten Flächentyp trifft. Die gemessene Zeit wird notiert, der Versuchsleiter wählt eine andere Fläche aus den fünfzehn Testflächen aus und startet die Zeitmessung erneut.

Bei den Versuchen von Kirkpatrick und Douglas wurde eine Versuchshälfte mit sichtbarem Mauszeiger, eine Versuchshälfte mit unsichtbarem Mauszeiger durchgeführt. In Anlehnung an diese Aufteilung werden sowohl Versuche durchgeführt, die nur auf der haptischen Darstellung der Versuchsflächen beruhen als auch Versuche, die neben der haptischen Präsentation auch optische Hilfen anbieten. In diesem Fall werden dem Probanden sowohl die Position des Mauszeigers als auch die Umrisse der Versuchsflächen angeboten. Das heißt, die Versuchsflächen werden im unshattierten Modus dargestellt, somit kann der Proband die Position des Mauszeigers relativ zum Grundriss der zu untersuchenden Fläche erkennen.

Den qualitativen Untersuchungen der fünf Flächentypen nach Koenderink schließen sich quantitative Untersuchungen an. Dies ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

6.2 Versuchsreihe zu VDA-Empfehlung 4955

Die Versuchsreihe nach Kirkpatrick behandelte die Frage, wie schnell und mit welcher Wahrscheinlichkeit fünf qualitativ verschiedene rechnerinterne Freiformflächen mit Hilfe der „Haptischen Hand“ erkannt werden können. Die Form der Freiformflächen wird hierbei durch den variablen Formfaktor S beschrieben. Die Ergebnisse dieser ersten Versuchsreihe finden sich in Kapitel 7.1 ab Seite 72.

Ziel dieser zweiten Versuchsreihe ist es, zu untersuchen in welchem Umfang die „Haptische Hand“ zur Beurteilung von Flächenübergängen eingesetzt werden kann. An Flächenübergänge werden durch die VDA-Empfehlung 4955 konkrete Anforderungen gestellt. Diese finden sich im folgenden Absatz, die Ergebnisse dieser Versuchsreihe finden sich in Kapitel 7.2 ab Seite 84.

6.2.1 Die VDA-Empfehlung 4955

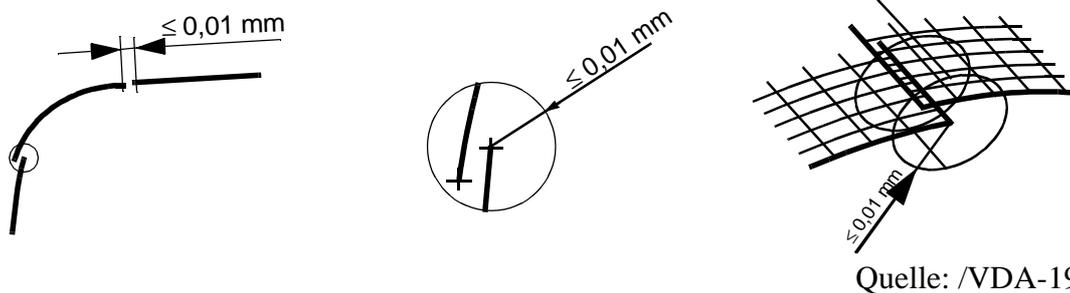
Die VDA-Empfehlung 4955 (VDA: Verband der Deutschen Automobilindustrie) entstand im Arbeitskreis (AK) „CAD/CAM“ in einer ersten Fassung im Oktober 1993. Diesem VDA-AK gehören ca. 20 Firmen von Audi, Ingolstadt über MAN, Augsburg bis ZF, Friedrichshafen an. Eine zweite, überarbeitete Fassung erschien im September 1999 /VDA-1999/. Im Kapitel 2.3 der VDA-Empfehlung 4955 werden unter anderem folgende Qualitätskriterien für Draht- und Flächengeometrien behandelt:

- Stetigkeiten „nullter“ Ordnung
- Stetigkeiten erster Ordnung
- Stetigkeiten zweiter Ordnung

Neben diesen Kriterien werden eine Vielzahl weiterer Kriterien behandelt. Diese sind jedoch definitiv nicht mit der „Haptischen Hand“ darstellbar. Beispielsweise können mit der „Haptischen Hand“ keine Polynomgrade, Minielemente, näherungsweise identische Elemente oder um 180° umklappende Normalen nachweislich fühlbar dargestellt werden.

Die VDA-Empfehlung 4955 unterscheidet dabei zwischen „Class A Flächen“ und „Class B Flächen“. „Class A Flächen“ sind Flächen höchster Güte, „Class B Flächen“ sind Flächen minderer Güte.

Die Forderungen der VDA-Empfehlung bei Unstetigkeiten von nullter Ordnung veranschaulicht das folgende Bild.

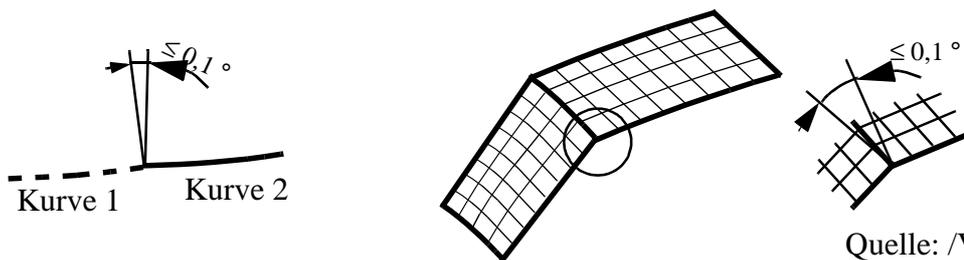


Quelle: /VDA-1999/

Abb. 6.6: Stetigkeitskriterium nullter Ordnung für „Class A Flächen“

Aus der Abbildung geht hervor, dass VDA 4955 bei Unstetigkeiten von nullter Ordnung für „Class A Flächen“ den maximalen Wert von 0,01mm empfiehlt. Dies gilt sowohl für Kurven- als auch für Flächengeometrie.

Die Forderungen der VDA-Empfehlung bei Unstetigkeiten von erster Ordnung veranschaulicht das folgende Bild.

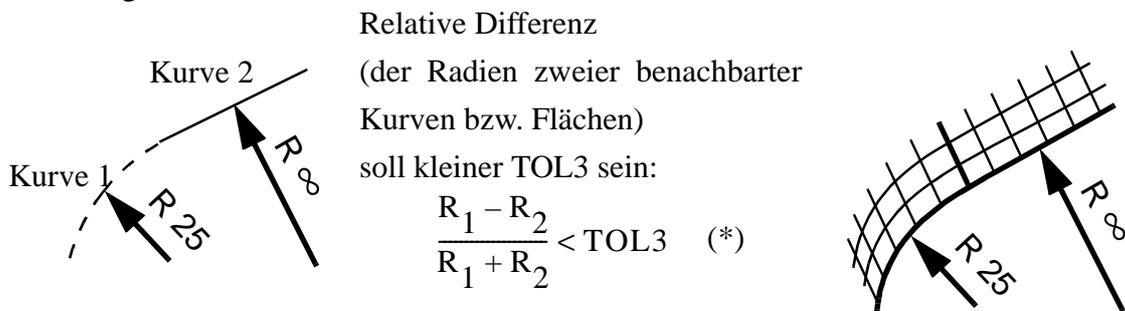


Quelle: /VDA-1999/

Abb. 6.7: Stetigkeitskriterium erster Ordnung für „Class A Flächen“

Die VDA 4955 empfiehlt bei Unstetigkeiten erster Ordnung für „Class A Flächen“ als maximal zulässigen Knickwinkel 0,1° Grad. Dieser Wert gilt für Kurven- und Flächenübergänge.

Die Forderungen der VDA-Empfehlung bei Unstetigkeiten von zweiter Ordnung veranschaulicht das folgende Bild.



Relative Differenz
(der Radien zweier benachbarter
Kurven bzw. Flächen)
soll kleiner TOL3 sein:

$$\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} < \text{TOL3} \quad (*)$$

(*) Formel nicht explizit gegeben!

Quelle: /VDA-1999/

Abb. 6.8: Stetigkeitskriterium zweiter Ordnung für „Class A Flächen“

In der VDA-Empfehlung ist die Formel zur Berechnung von Krümmungsstetigkeiten nicht explizit gegeben. Sie kann nur der folgenden Formulierung entnommen werden: „Wenn die relative Differenz der (benachbarten, Anm. d. Autors) Radien über einer Krümmungstoleranz TOL3 liegt, werden die betreffenden Elemente markiert“. Es ist nicht angegeben, auf welche Größe sich die Differenz der Radien beziehen soll. Möglich ist, wie in Abbildung 6.8 angegeben, die Summe beider Radien. Ebenso möglich wäre, als Bezugsmaß den größeren oder den kleineren Radius zu verwenden. Beide Alternativen, aber insbesondere der letztere Fall würde zu einer praktischen Einengung der Toleranz führen. In den in Abbildung 6.8 gezeigten praktischen Fällen wäre $R_2=25$ vernachlässigbar bei $R_1=\infty$, die relative Differenz der Radien würde dann gegen den Grenzwert $G=1$ konvergieren. Ein Übergang von gekrümmten in gerade Querschnitte darf also nur innerhalb einer Fläche mit stetigem Übergang von $r=\infty$ zu einem endlichen Wert erfolgen.

Ebenso wie die Formel ist auch der Wert TOL3 nicht explizit gegeben. Er ist Bestandteil der Vereinbarungen der zusammenarbeitenden Personen, Abteilungen oder Firmen. Einem beispielhaft ausgefülltem Formular im Anhang der VDA-Empfehlung 4955 kann der Wert $TOL3=10\%$ entnommen werden.

6.2.2 Versuchsaufbau

Grenzen der Wahrnehmbarkeit werden einerseits durch die Versuchspersonen, andererseits durch das Versuchsgerät gesetzt. Die Winkelauflösung der Servomotoren beträgt laut Herstellerangabe $1^\circ/\text{Stelleinheit}$. Die Winkelauflösung der zwei Servomotoren, die für die Neigung der Taumelscheibe benutzt werden, wird ohne weitere Übersetzung auf die Taumelscheibe übertragen. Die herstellerseitige Winkelauflösung des Hubservos von $1^\circ/\text{Stelleinheit}$ wird über Zahnrad, Zahnstange und schiefer Ebene in eine Hubauflösung von $0,05\text{mm}/\text{Stelleinheit}$ übersetzt. Damit können die Grenzwerte, die von der VDA-Empfehlung für Stetigkeiten von nullter und erster Ordnung gefordert werden (siehe Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7) nicht dargestellt werden, allerdings bietet sich ein Ausweg an.

Die Eigenschaften der rechnerinternen Flächen (Höhe relativ zur Bezugsebene, Winkel relativ zur Normalen der Bezugsebene) können vor der Darstellung mit Hilfe der „Haptischen Hand“ mit beliebigen Streck- oder Stauchfaktoren beaufschlagt werden. Beträgt die Neigung der rechnerinternen Bezu58

gsfläche am Punkt P relativ zu einer Bezugsebene beispielsweise 10° in x-Richtung, so könnte dieser Neigungswert mit dem Stauchfaktor 0,5 ebenso beaufschlagt werden wie mit dem Faktor 2 oder 3. Analoges gilt für die Höheneigenschaft der rechnerinternen Fläche/Flächen. Die VDA-Empfehlung 4955 verlangt, dass Höhengsprünge an den Grenzen zweier Flächen den

Wert von 0,01 mm nicht übersteigen dürfen (siehe Abbildung 6.6). Wird nun an der Grenze zweier Flächen ein Höhengsprung von 0,02 mm gemessen, dann kann auf der z-Achse des Gerätes willkürlich ein Höhengsprung von 2 mm, also der hundertfache Wert, dargestellt werden, um die Übersteigung des Grenzwertes von 0,01 mm zu verdeutlichen. Anschließend kann die Auslenkung wieder auf den Mittelwert zurückgefahren werden, um beliebig viele weitere Höhengsprünge darstellen zu können.

Der Versuchsaufbau der Versuchsreihe ist in folgendem Bild zu sehen.



Abb. 6.9: Versuchsaufbau der Versuchsreihe

Die Versuchsperson bedient mit einer normalen Maus die Menüs der CAD-Software und benutzt die „Haptische Hand“. Wahlweise kann die Versuchsperson das Gerät mit seiner linken oder seiner rechten Hand benutzen. Auf dem Versuchsbogen wird die Schreibhand notiert und die gewählte Hand.

Als rechnerinterne Flächen, die in den Versuchen ertastet werden sollen, werden drei verschiedene Typen untersucht:

- eine Anzahl ebener Flächen. Diese Flächen liegen auf unterschiedlichen Höhen parallel zur Referenzebene (x-y-Ebene). Die Versuchsperson soll beim Übergang zwischen zwei Flächen dokumentieren, ob er einen Höhengsprung wahrnehmen konnte oder nicht.
- eine Anzahl ebener Flächen, die zueinander geneigt sind. Der Neigungswinkel beträgt dabei zwischen 0,25 und 5 Grad Abweichung. Die Versuchsperson soll beim Übergang zwischen zwei Flächen dokumentieren, ob er einen Knickwinkel wahrnehmen konnte oder nicht.
- mehrere Flächen mit unterschiedlichem Krümmungsverlauf. Die Versuchsperson soll den Krümmungsverlauf mit Hilfe der haptischen Hand wahrnehmen und als Höhenlinie skizzieren.

6.2.3 Versuch „Sprung“

Ziel der Teilsreihe „Sprung“ der Versuchsreihe A ist die Untersuchung der haptischen Wahrnehmbarkeit von Höhengsprüngen zwischen rechnerinternen Flächen. Diese Flächen sind eben und parallel zu einander ausgerichtet. Sprungdifferenzen betragen 0,1 bis 1,9mm. Das folgende Bild zeigt die verwendeten Versuchsflächen.

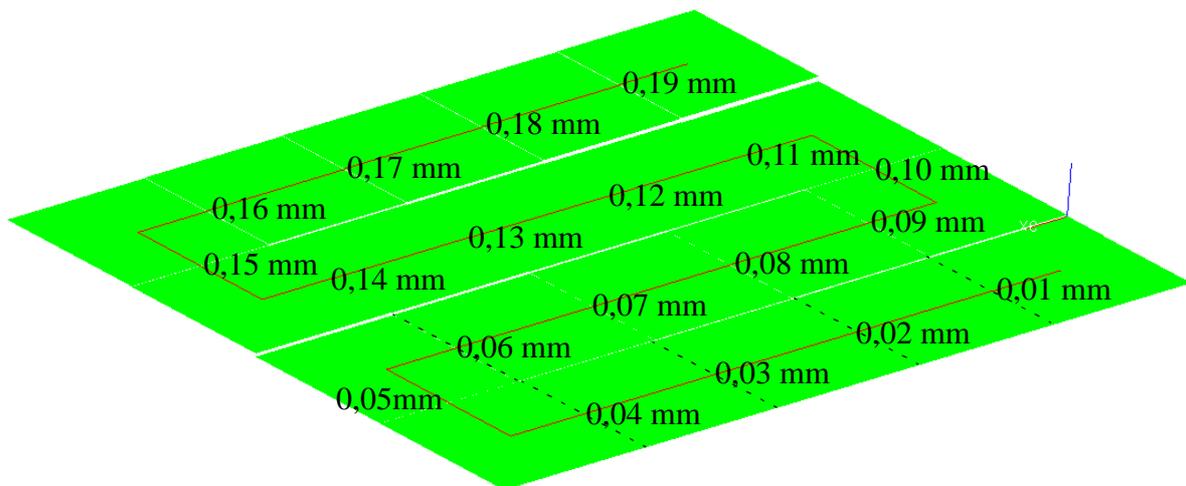


Abb. 6.10: Ebenen mit verschiedenen starken Höhengsprüngen

Abbildung 6.10 zeigt 4 Reihen mit je fünf Flächen. Über die Flächen führt eine S-förmige Kurve. Die Sprungdifferenz zwischen zwei benachbarten Flächen ist in der Abbildung ebenfalls angegeben. Die Flächenkurve beginnt vor dem kleinsten Höhengsprung (0,01 mm) und führt über alle Flächen bis zum größten Höhengsprung (0,19 mm). Die „Haptische Hand“ wird im passiven Modus benutzt, d.h. dass, sobald die Versuchsperson mit der normalen Maus auf ein „Start“-feld im Menü der „Haptischen Hand“ geklickt hat, der Mauscursor entlang dieser S-Kurve läuft. Entlang der S-Kurve werden bei diesem Versuch die Höhenwerte ermittelt und an die „Haptische Hand“ übertragen. Während des Versuches werden die Versuchsflächen aus positiver z-Richtung betrachtet. Damit ist ausgeschlossen, dass Lichtreflexe und Schattenwürfe, die vom CAD-System simuliert werden, Auskunft über die Eigenschaften der vier Flächen geben können.

Die Versuchsperson trägt auf einem Bogen für jeden Flächenübergang ein, ob an der betreffenden Stelle ein Höhengsprung wahrgenommen wurde, ob dies manchmal der Fall gewesen ist oder ob kein Höhengsprung wahrgenommen wurde.

6.2.4 Versuch „Knickwinkel“

Ziel der Teilsreihe „Knickwinkel“ ist die Untersuchung der haptischen Wahrnehmbarkeit eines Knickes zwischen zwei aneinanderstoßenden rechnerinternen Flächen. Die Knickwinkel beginnen mit 10° und nehmen dann konstant um 1° ab, bis die technische Auflösung von ca. 1° erreicht ist. Danach folgen Knickwinkel von $0,5^\circ$ und $0,25^\circ$. Der kleinste Knickwinkel soll dabei deutlich kleiner sein als die technische Auflösung der „Haptischen Hand“. Diese Vorgabe zielt darauf ab, „nur eingebildete“ Wahrnehmungen feststellen zu können. Das folgende Bild zeigt die verwendeten Versuchsflächen

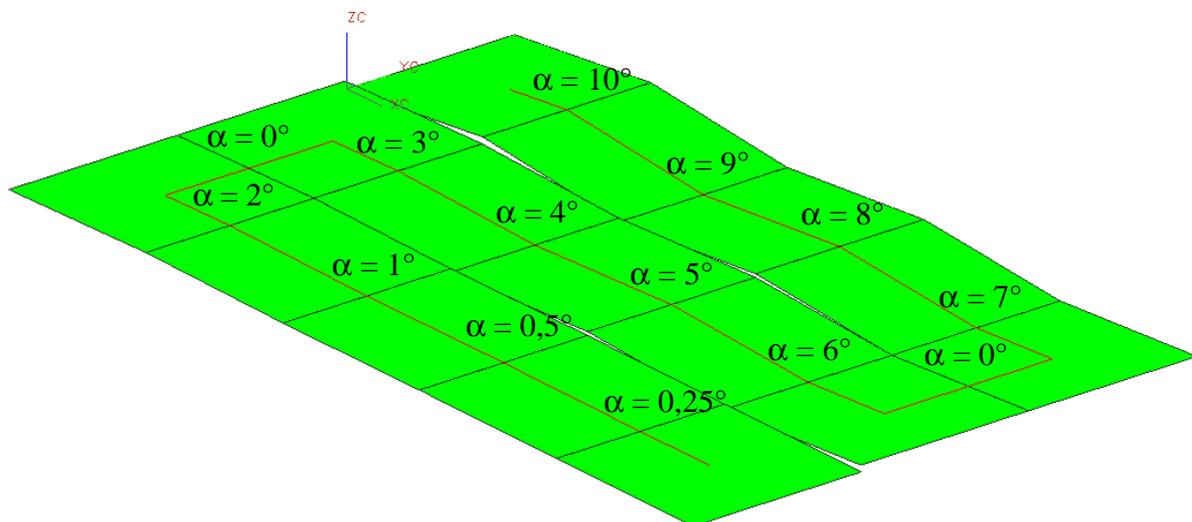


Abb. 6.11: Flächenübergänge mit verschiedenen starken Knickwinkeln

Das Bild zeigt drei Reihen mit je fünf Flächen. Über die insgesamt fünfzehn Flächen führt ein S-förmiger Pfad. Am gemeinsamen Rand zweier benachbarten Flächen ist der jeweilige Knickwinkel angegeben. Die „Haptische Hand“ wird im passiven Modus benutzt, d.h. dass, sobald die Versuchsperson mit der normalen Maus auf ein „Start“-feld im Menü der „Haptischen Hand“ geklickt hat, der Mauszeiger automatisch entlang dieser S-Kurve läuft. Entlang der S-Kurve werden bei diesem Versuch die Neigungswerte ermittelt und an die „Haptische Hand“ übertragen.

Während des Versuches werden die Versuchsflächen aus positiver z-Richtung betrachtet. Damit ist ausgeschlossen, dass Lichtreflexe und Schattenwürfe, die vom CAD-System simuliert werden, Auskunft über die Eigenschaften der vier Flächen geben können.

Die Versuchsperson trägt auf einem Bogen für jeden Flächenübergang ein, ob an der betreffenden Stelle ein Knick wahrgenommen wurde, ob dies manchmal der Fall gewesen ist oder ob kein Knick wahrgenommen wurde.

6.2.5 Versuch „Krümmung“

Nach Untersuchung von Höhengsprüngen und Knickwinkeln ist die Untersuchung unterschiedlicher Krümmungen naheliegend: alle bisher vorgestellten Versuchsflächen wiesen nur einen einzigen mittleren Krümmungswert pro Versuchsfläche auf.

Ziel der Teilserie „Krümmung“ ist die Untersuchung der haptischen Wahrnehmbarkeit von variabel gekrümmten rechnerinternen Flächen. Das folgende Bild zeigt die verwendeten Flächen. Die Gestaltung der Flächen ergibt sich aus praktischen Überlegungen und der Forderung nach geringen Krümmungsradien.

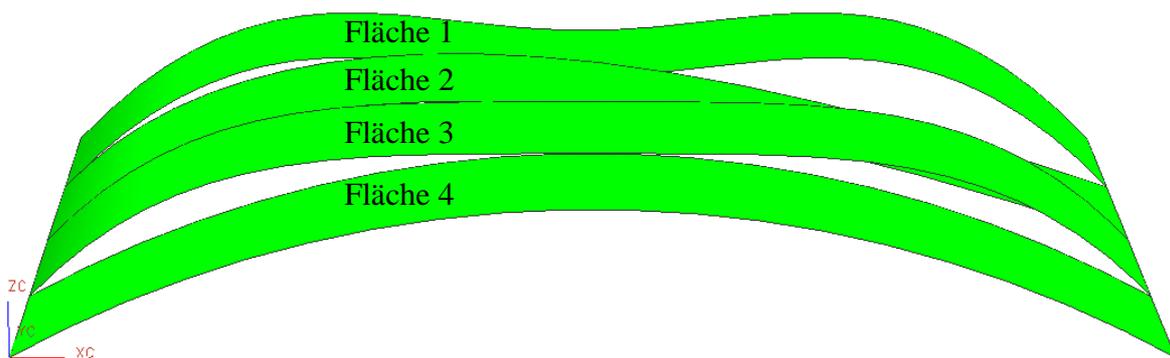


Abb. 6.12: Flächen mit unterschiedlichen Krümmungsverläufen

Alle vier Flächen haben dieselbe Grundfläche und dieselbe maximale Höhe. Fläche 1 weist mittig eine Senke auf. Fläche 2 hat ein Maximum links der Mitte, Fläche 3 eine Flachstelle in der Mitte und Fläche 4 hat ein Maximum in der Mitte.

Während des Versuches werden die Versuchsflächen aus positiver z-Richtung betrachtet. Flächen sind im minimalen Drahtmodellmodus dargestellt, das heißt, nur ihre Ränder können wahrgenommen werden. Damit ist ausgeschlossen, dass Lichtreflexe und Schattenwürfe, die vom CAD-System simuliert werden, Auskunft über die Eigenschaften der vier Flächen geben können. Damit sieht der Benutzer nur vier längs nebeneinanderliegende Rechtecke.

Die Versuchsperson kann wählen, ob sie die „Haptische Hand“ mit ihrer linken oder rechten Hand benutzt. Die „Haptische Hand“ wird im aktiven Modus benutzt. Durch Bewegung der

„Haptischen Hand“ über jeweils eine Fläche bzw. innerhalb eines Rechteckes wird deren Neigungsverlauf respektive die Krümmung wahrgenommen.

Bei diesem Versuch skizziert die Versuchsperson den Querschnitt der Fläche in ein vorgegebenes Feld.

Kapitel 6 präsentierte die Konzeption der Versuchsreihen. Eine erste Versuchsreihe benutzte einen von Kirkpatrick und Douglas entwickelten Benchmarktest, um die Fähigkeiten der „Haptischen Hand“ mit den Eigenschaften anderer VR-Geräte vergleichen zu können.

Um die Praxisnähe der Entwicklung, d.h. die Einsetzbarkeit im Bereich des Stylings, zu gewährleisten wurde eine zweite Versuchsreihe in Anlehnung an die VDA-Empfehlung 4955 geplant. Diese Konzeption ist in Kapitel 6.2 beschrieben.

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Versuche vorgestellt.

7 Versuchsergebnisse

Kapitel 3 zeigte den Stand des Wissens auf, Kapitel 4 den Stand der Technik. Kapitel 5 beschrieb den Versuchsaufbau, d.h. die Konstruktion der „Haptischen Hand“ in vier Schritten. Kapitel 6 beschrieb den Versuchsaufbau der verschiedenen Versuchsreihen. Das folgende Kapitel präsentiert die Ergebnisse der verschiedenen Versuchsreihen. Es folgt im Kapitel 8 ab Seite 91 eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

7.1 Versuchsreihen nach Kirkpatrick und Douglas

Ziel dieser Versuchsreihen ist, die Eignung der „Haptischen Hand“ zur haptischen Wahrnehmung rechnerinterner Flächen zu ermitteln. Das Resultat kann dann mit den Ergebnissen verglichen werden, die Kirkpatrick und Douglas bei der Eignungsuntersuchung des „PHANToM“ der Firma SensAble, USA, erreicht haben.

7.1.1 Versuchsreihe mit Beschränkung auf haptische Wahrnehmung

Der Versuchsaufbau dieser Versuchsreihe wurde in Kapitel 6.1 „Versuchsreihen nach Kirkpatrick und Douglas“ beschrieben. Bei dieser Versuchsreihe war die Position des Mauszeigers nicht sichtbar. Ziel der Versuchsreihe war die Messung, in welcher Zeit und mit welcher Wahrscheinlichkeit sich eine von fünf Flächentypen erkennen lässt.

Die Versuchsproubanden waren unbezahlte Personen. Diese Personen gehörten entweder zum engeren Kollegenkreis, zur Studentenschaft der Technischen Universität Kaiserslautern oder zum persönlichen Bekanntenkreis. Alle Probanden hatten Erfahrung mit der derzeit gängigen Rechnertechnik und kannten die Bedeutung der Begriffe „konkav“, „planar“ und „konvex“. Das heißt, dass die Probanden die fünf Flächentypen begrifflich voneinander unterscheiden konnten.

Die folgende Tabelle zeigt die bei Verwendung der „Haptischen Hand“ gemessenen Antwortzeiten. Es wurden dabei Versuchsflächen von 30mm Durchmesser und einem maximalen Neigungswinkel von 30° haptisch simuliert. Vorversuche zeigten, dass diese maximale Neigung nicht praktikabel war, insbesondere das Neigen der Taumelscheibe gegen die Finger („Aufstellen“) wurde als unangenehm empfunden. Für diese Versuchsreihe wurde daher die Neigung der Versuchsflächen mit dem Reduktionsfaktor $RF=0,5$ multipliziert. Damit reduziert sich die maximale Neigungsamplitude auf 15°.

Den fünfzehn Versuchsflächen entspricht jeweils eine Spalte F1 bis F15. Zu jeder Versuchsfläche ist der Flächentyp angegeben. Hierbei wurde folgende Übersetzung vorgenommen:

Umgangssprache	Schale	Rinne	Sattel	Rücken	Kuppe
Koenderink	Form S=-1	Form S=-0,5	Form S=0	Form S=+0,5	Form S=+1
Im Versuch	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5

Tab. 7.1: Verschiedene Bezeichnungsschemata für die verwendeten Flächentypen

Zeilenweise sind die Erkennungszeiten der einzelnen Probanden eingetragen. In der vorletzten Spalte ist die Erkennungszeit eines Probanden gemittelt über alle Versuchsflächen eingetragen. Die letzte Spalte zeigt die Anzahl falscher Angaben des jeweiligen Probanden. In der vorletzten Zeile sind die mittleren Erkennungszeiten bei der jeweiligen Fläche angegeben, darunter finden sich die Anzahl der Fehler bei allen Versuchen, diese Fläche zu erkennen.

$\backslash F_i (t)$ P_j	F 1 (2)	F 2 (4)	F 3 (4)	F 4 (1)	F 5 (3)	F 6 (3)	F 7 (2)	F 8 (3)	F 9 (4)	F 10 (1)	F 11 (5)	F 12 (5)	F 13 (5)	F 14 (1)	F 15 (2)	M	F
P 1	17,0	15,0	10,0	9,0	20,0	19,0	30,0	11,0	49,0	12,0	9,0	11,0	9,5	12,0	10,0	16,2	0
P 2	25,0	18,0	8,0	7,0	18,0	31,0	28,0	19,0	15,0	13,0	27,0	14,0	23,0	8,0	13,0	17,8	4
P 3	20,0	66,0	188,0	12,0	93,0	38,0	48,0	14,0	49,0	33,0	9,0	12,0	12,0	15,0	15,0	41,6	6
P 4	75,0	58,0	36,0	14,0	26,0	85,0	75,0	9,0	25,0	19,0	14,0	24,0	19,0	14,0	44,0	35,8	2
P 5	19,0	20,0	27,0	10,0	51,0	26,5	22,0	13,0	36,0	6,5	9,0	10,0	7,5	9,0	19,0	19,0	0
P 6	16,0	22,0	26,0	14,0	32,0	54,0	63,0	23,0	6,5	8,0	10,0	11,5	13,0	12,0	8,0	21,3	3
P 7	66,0	50,0	33,0	71,0	68,0	77,0	42,0	29,0	26,0	16,0	29,0	41,0	50,0	49,0	19,0	44,4	6
P 9	31,0	21,0	21,0	11,0	34,0	29,0	19,0	17,0	17,0	18,0	17,0	21,0	13,0	16,0	16,0	20,1	1
P 10	24,0	13,0	38,0	15,0	36,0	26,0	26,0	31,0	18,0	21,0	10,0	9,0	9,0	18,0	8,0	20,1	3
P 11	109,0	22,0	14,0	31,0	117,0	40,0	91,0	23,0	39,0	24,0	15,0	12,0	13,0	9,0	17,0	38,4	1
P 12	41,0	66,0	27,0	26,0	95,0	39,0	38,0	78,0	41,0	15,0	24,0	29,0	29,0	35,0	28,0	40,7	1
P 13	12,0	21,0	22,0	17,0	19,0	15,0	25,0	10,0	37,0	9,0	7,0	15,0	7,0	12,0	18,0	16,4	4
P 14	30,0	12,0	27,0	7,0	7,5	10,0	53,0	9,0	21,0	13,0	8,0	15,0	15,0	10,0	6,0	16,2	2
P 15	170,0	47,0	25,0	16,0	105,0	38,0	76,0	32,0	54,0	13,0	26,0	19,0	36,0	12,0	21,0	46,0	2
P 16	48,0	15,0	20,0	10,0	58,0	70,0	33,0	25,0	22,0	8,0	14,0	16,0	14,0	10,0	38,0	26,7	2
Mittel	46,9	31,1	34,8	18,0	52,0	39,8	44,6	22,9	30,4	15,2	15,2	17,3	18,0	16,1	18,7	28,1	2,5
Fehler	4	0	1	7	6	6	2	1	2	1	1	1	1	4	0		

Legende: P j = Proband Nr. j F i = Fläche Nr. i (t) = Typ M = Mittelwert F = Fehler

Tab. 7.2: Gemessene Antwortzeiten bei rein haptischer Wahrnehmung

Aus der Tabelle geht z. B. hervor, dass Proband Nummer Nr. 5 bei Fläche Nr. 10 zum Erkennen der Fläche 6,5 Sekunden benötigte. Im Durchschnitt benötigt Proband Nr. 5 für das Erkennen einer Fläche 19,0 sec. Von fünfzehn Flächen wurden alle fünfzehn richtig erkannt. Fläche F1 wurde von den fünfzehn Probanden 11 mal richtig und 4 mal falsch erkannt mit einer mittleren Erkennungszeit von 46,9 sec.

In der Tabelle fehlen die Werte von Proband Nr. 8. Trotz gleicher Versuchsdurchführung wurde hier eine mittlere Erkennungszeit von 117,2 sec gemessen. Eine Diskussion nach dem Versuch

ergab, dass der Proband Wert gelegt hatte auf absolut fehlerfreie Erkennungsversuche. Dies ist ihm trotz der hohen Versuchszeiten nicht gelungen. Zehn Tage später wurde der Versuch mit dem Probanden wiederholt. Diesmal zeigten sich „normale“ Werte. Die Werte beider Versuche mit dem Probanden Nr. 8 sind in folgender Tabelle gezeigt.

Fi (t)	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	F 10	F 11	F 12	F 13	F 14	F 15	M	F
Pj	(2)	(4)	(4)	(1)	(3)	(3)	(2)	(3)	(4)	(1)	(5)	(5)	(5)	(1)	(2)		
P 8 / I	167,0	122,0	85,0	158,0	156,0	172,0	145,0	131,0	150,0	32,0	17,0	70,0	77,0	259,0	17,0	117,2	2
P 8 / II	33,0	29,0	63,0	7,0	7,0	38,0	21,0	19,0	10,0	11,0	7,0	16,0	30,0	6,0	6,0	20,2	0

Tab. 7.3: Gemessene Antwortzeiten (nach Kirkpatrick und Douglas) bei Proband Nr. 8

Für die Auswertung wurden die Werte dieser zwei Versuche nicht verwendet. Die Werte des ersten Versuches mit diesem Probanden P8/I könnten Verwendung finden für eine Versuchsreihe mit der expliziten Vorgabe, den vermuteten Flächentyp erst zu benennen, wenn der Proband sich absolut sicher ist. Ebenso werden die Werte der Versuchswiederholung P8/II nicht verwendet, da diese zu einer Versuchsreihe mit Versuchswiederholungen zu zählen sind.

Das folgende Bild zeigt die Verteilung der Antwortzeiten aus Tabelle 7.2. Dabei wurden die Erkennungszeiten in Klassen von 0-5 sec, 5-10sec, 10-15 sec. usw. eingeteilt. Auf der Abszisse sind die Erkennungszeiten aufgetragen, auf der Ordinate die Häufigkeit einer Erkennungszeit.

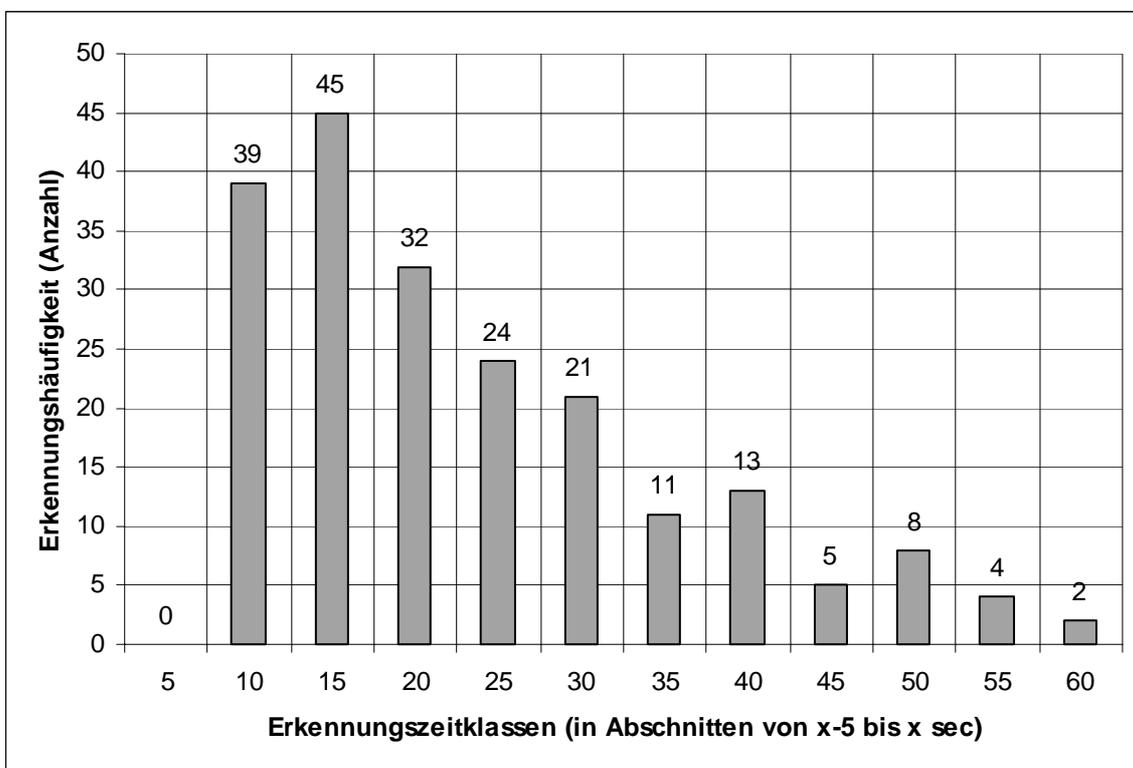


Abb. 7.1: Verteilung der Erkennungszeit bei rein haptischer Wahrnehmung

Aus dem Diagramm geht hervor, dass in 45 Fällen eine Erkennungszeit zwischen 10 und 15 Sekunden gemessen wurde. In diesem Bereich liegt das Maximum der Erkennungszeiten. In 21 Fällen wurde eine Erkennungszeit über 60 Sekunden gemessen. Diese Fälle sind aus Gründen der Übersicht in dem Diagramm nicht dargestellt.

Um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen anderer Forschergruppen zu erleichtern, sind die Kenngrößen dieser Versuchsreihe für eine Normalverteilung in der folgenden Tabelle angegeben. Es wurden alle Zeiten der Tabelle 7.2 auf Seite 73 berücksichtigt.

Mittelwert [sec]	Geometr. Mittel [sec]	Median [sec]	Mittlere Abwchg.	Varianz [sec]	Standard-abwchg.	Fehler-rate [n]
28,1	25,5	22,9	11,1	164,6	12,8	37,0

Tab. 7.4: Kenngrößen der Versuchsreihe bei rein haptischer Wahrnehmung

Aus der Tabelle geht hervor, dass der arithmetische Mittelwert der Erkennungszeit 28,1 Sekunden beträgt mit einer mittleren Abweichung von 11,1 Sekunden und einer Standardabweichung von 12,8 Sekunden.

Aus Abbildung 7.1 wird jedoch ersichtlich, dass es sich um eine Weibull-verteilte Größe handelt. Die Weibull-Verteilungsfunktion lautet in der dreiparametrischen bzw. in der vereinfachten zweiparametrischen Form nach DIN 55303-7 /DIN-1996/:

$$W(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$$

$$W(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

$$H(i) = \frac{i}{n+1} * 100\%$$

$$w(t) = \frac{d}{d(t)}W = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

w: Erkennungszeitverteilung
W: Erkennungszeitwahrscheinlichkeit
H(i): Häufigkeit nach Gumbel für Probenzahl n>50
T: Charakteristische Erkennungsdauer, bei der 63,2% der Flächen erkannt werden
t₀: Zeit, die bis zur theoretisch schnellsten Erkennung einer Fläche verstreicht
b: Formparameter, Steigung der Ausgleichsgeraden

Formel 7.1: Berechnung charakteristischer Werte einer Weibull-Verteilungsfunktion

Als Methode zur Bestimmung von b und T wird die Maximum-Likelihood-Abschätzung verwendet. Den Wert t₀ kann man sich als den Schnittpunkt der Kurve mit der Nulllinie vorstellen. Zur Bestimmung von t₀ gibt es verschiedene Methoden. Eine mathematisch eindeutige Formel hierfür gibt es jedoch nicht. Grundsätzlich kann man bei der ausfallfreien Zeit t₀ sagen, dass

sie zwischen 0 und dem Wert des ersten ausgefallenen Teiles liegen muss. In der Regel liegt t_0 auch sehr nahe kurz vor dem Wert des ersten Ausfalles. Die Schätzung von t_0 kann zu numerischen Instabilitäten führen, in jedem Fall nimmt die Steigung b zu und täuscht damit engere Messwertbereiche vor. Daher wird die zweiparametrische Weibull-Verteilung herangezogen.

Die folgende Abbildung zeigt die Werte aus Tabelle 7.2 nach Eintragung in ein nach DIN 55303 genormtes Weibull-Diagramm.

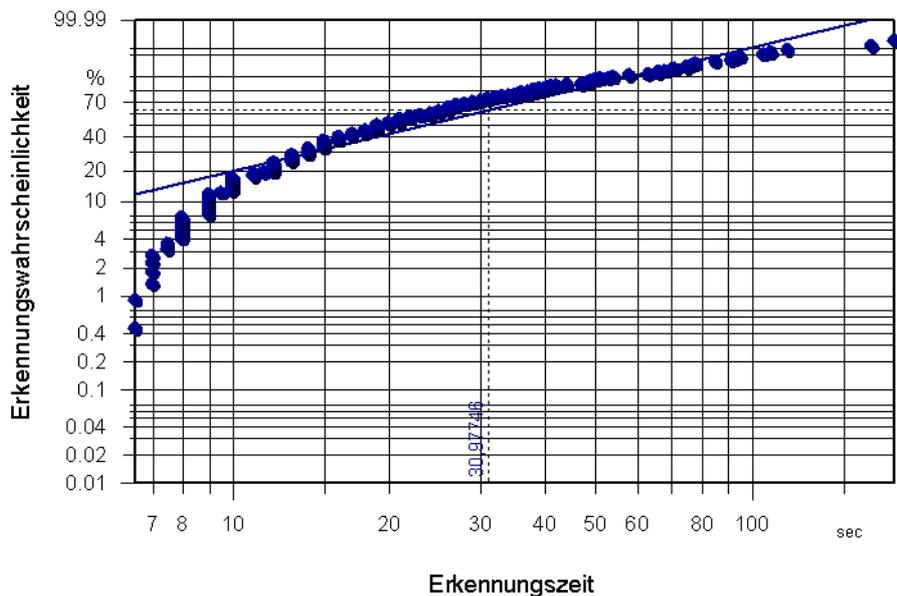


Abb. 7.2: Weibull-Diagramm der Versuchsreihe bei rein haptischer Wahrnehmung

Aus dem Weibull-Diagramm geht hervor, dass eine Erkennungszeit von $t=T=30,98$ sec zu der Erkennungswahrscheinlichkeit $W(t)=63,2\%$ führt.

Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt in diesem Fall $b=1,33$. Die Steigung b ist niedrig, bedingt durch eine große Streuung der Versuchswerte (zwischen 6 sec und 188 sec). Würde $b=1$ auf eine konstante Ausfallrate hinweisen, so wäre für eine Normalverteilung ein Steigungswert $3,2 < b < 3,6$ notwendig. Beide Kriterien werden nicht eingehalten, und bestätigen erneut, dass es sich um eine Weibull-verteilte Größe handelt.

7.1.2 Versuchsreihe mit sichtbaren Mauszeiger

Bei dieser Versuchsreihe wurde der Versuchsperson der Rand aller Versuchsflächen und der Mauszeiger optisch angezeigt. Die Anzeige der Grundrisse erleichterte den Versuchspersonen die Positionierung der „Haptischen Hand“ auf den Versuchsflächen.

Es wurden dabei Versuchsflächen von 30mm Durchmesser und einer maximalen Neigung von 30° relativ zur z-Achse haptisch simuliert. Die Neigung der Versuchsflächen wurde mit einem Reduktionsfaktor RF=0,5 multipliziert, da sich in ersten Experimenten eine Flächenneigung von 30° als unpraktikabel erwies. Damit reduziert sich die maximale Neigungsamplitude auf 15°.

Die folgende Tabelle zeigt die gemessenen Antwortzeiten.

\Fi(T) Pj	F 1 (2)	F 2 (4)	F 3 (4)	F 4 (1)	F 5 (3)	F 6 (3)	F 7 (2)	F 8 (3)	F 9 (4)	F 10 (1)	F 11 (5)	F 12 (5)	F 13 (5)	F 14 (1)	F 15 (2)	M	F
P 1	24,0	23,0	39,5	8,0	12,0	26,0	17,0	33,0	18,0	10,5	10,0	8,5	11,0	6,5	7,5	17,0	3
P 2	14,0	19,0	15,0	17,0	36,0	36,0	54,0	18,0	19,0	16,0	10,5	15,0	22,0	10,5	11,0	20,9	2
P 3	19,0	29,5	32,0	6,0	23,5	26,0	35,0	21,5	27,0	4,5	4,5	3,5	5,0	5,5	17,5	17,3	2
P 4	17,0	20,5	13,5	14,0	24,5	65,0	20,0	32,0	18,0	8,0	13,5	13,0	9,5	11,5	13,0	19,5	1
P 5	55,0	41,5	41,0	11,0	43,0	17,5	11,0	30,5	18,0	7,0	11,0	16,0	12,0	8,0	15,0	22,5	6
P 6	20,0	5,5	10,5	9,5	10,0	12,0	15,5	6,0	16,5	7,0	5,5	8,5	8,5	16,0	12,5	10,9	4
P 7	20,0	24,5	16,0	8,0	26,5	84,0	29,0	16,0	29,0	13,0	12,0	12,5	16,5	10,0	8,0	21,7	2
P 8	21,5	12,5	6,0	7,0	12,0	6,5	8,0	6,0	5,0	4,0	4,5	6,0	5,5	5,5	3,0	7,5	2
P 9	17,5	29,0	14,5	14,0	55,0	59,5	18,0	28,0	14,0	6,0	12,0	6,0	6,5	3,0	15,5	19,9	3
P 10	44,5	37,0	21,0	7,5	29,0	30,0	10,5	116,0	24,5	9,0	10,5	14,5	12,5	10,5	13,0	26,0	1
P 11	10,0	8,5	8,5	6,5	15,0	13,0	11,0	20,0	13,0	4,5	5,0	6,0	9,0	5,0	11,0	9,7	5
P 12	13,5	15,0	9,0	6,0	12,0	13,0	7,5	9,0	11,5	7,5	7,0	5,0	5,0	5,5	8,0	9,0	4
P 13	39,0	38,0	17,0	11,0	55,5	38,0	21,5	39,0	16,0	11,0	11,0	13,5	11,5	10,5	14,5	23,1	0
P 14	90,0	22,5	13,0	14,0	31,0	53,5	21,0	26,0	23,5	8,0	7,0	13,0	17,0	11,0	10,0	24,0	0
P 15	4,0	7,5	24,0	21,0	14,0	32,5	16,0	29,5	16,0	14,0	12,0	23,0	31,0	9,0	18,0	18,1	3
P 16	8,5	8,0	40,0	22,0	8,5	45,5	10,5	17,5	40,5	14,0	7,5	8,5	10,0	8,0	7,0	17,1	4
P 17	10,0	21,5	132,0	14,0	26,0	42,0	25,0	27,0	15,0	4,5	5,5	9,5	8,0	15,0	10,5	24,4	1
P 18	29,0	59,5	28,5	24,5	66,0	82,0	21,0	23,5	37,0	15,5	16,0	9,5	12,0	10,0	12,0	29,7	0
P 19	36,5	14,0	13,5	11,0	7,5	15,0	42,0	10,0	7,5	4,0	4,5	5,0	6,5	4,0	4,0	12,3	0
Mittel	25,9	23,0	26,0	12,2	26,7	36,7	20,7	26,8	19,4	8,8	8,9	10,3	11,5	8,7	11,1	21,9	2,3
Fehler	4	4	3	2	3	4	7	4	7	0	1	2	1	1	0		
Legende:	P j = Proband Nr. j			Fi = Fläche Nr. i (T) = Typ			M = Mittelwert			F = Fehler							

Tab. 7.5: Gemessene Antwortzeiten bei Anzeige von Position und Flächenränder

Aus der Tabelle geht hervor, dass z.B. Proband 10 bei Fläche F3 (Typ 4, einfach konkav) eine Erkennungszeit von 8,5 Sekunden aufwies. Seine durchschnittliche Erkennungszeit betrug 26 Sekunden. Bei den 15 Versuchen ist Proband 10 genau ein Fehler unterlaufen. Vertikal lässt sich aus der Tabelle ablesen, dass die Fläche F6 (Typ 3, konvex-konkav), im Durchschnitt die höchsten Erkennungszeiten erforderten: 36,7 sec. Bei den 19 Versuchen, diese Fläche zu erkennen, wurden vier falsche Angaben gemacht.

Das folgende Bild zeigt die Verteilung der Antwortzeiten. Dabei wurden die Erkennungszeiten in Klassen von 0-5 sec, 5-10sec, 10-15 sec. usw. eingeteilt. Auf der Abszisse sind die Erkennungszeiten aufgetragen, auf der Ordinate die Häufigkeit einer Erkennungszeit. 7 Messungen zeigten Erkennungszeiten von 65 sec oder mehr auf und sind nicht in das Diagramm eingetragen.

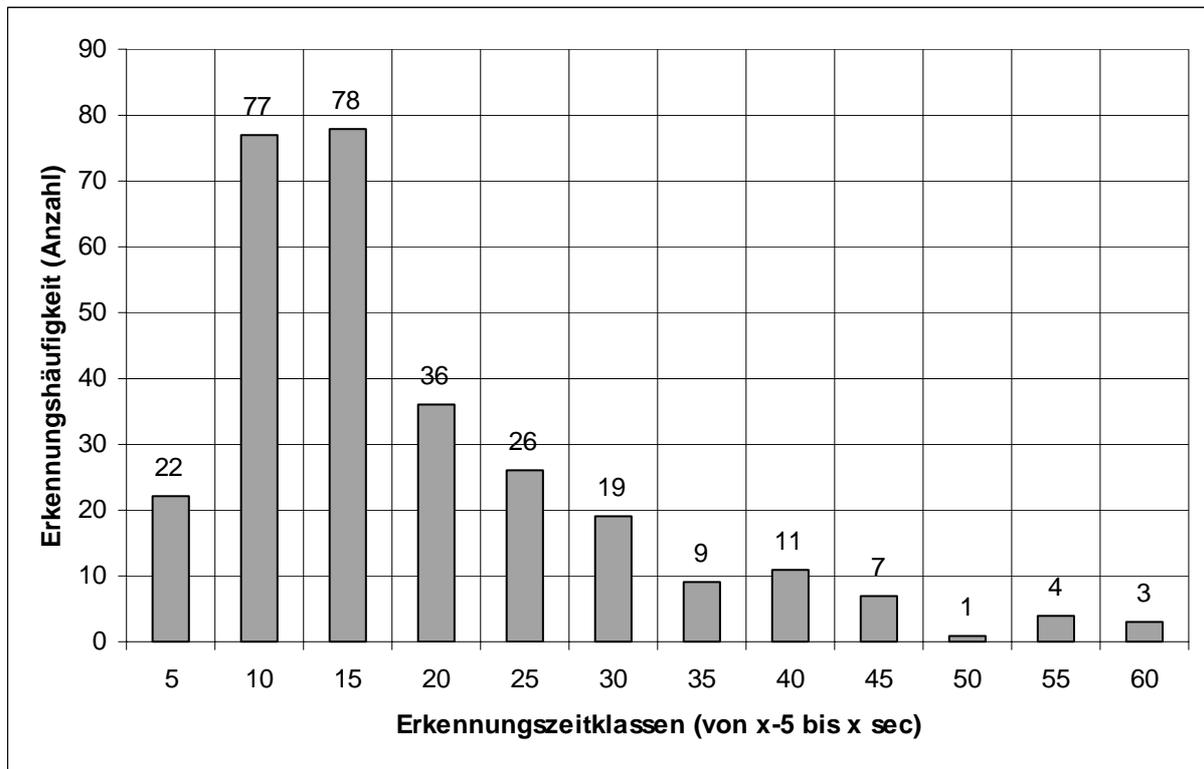


Abb. 7.3: Verteilung der Erkennungszeit bei Anzeige von Position und Flächenrändern

Abbildung 7.3 zeigt, dass am häufigsten eine Erkennungszeit zwischen 10 und 15 Sekunden gemessen wurde. 7 Fälle wiesen eine Erkennungszeit von über 60 sec auf und wurden aus Gründen der Übersicht in dem Diagramm nicht dargestellt.

Die folgende Tabelle zeigt die Kenngrößen der Versuchsreihe für eine normalverteilte Funktion. Es wurden alle Erkennungszeiten aus Tabelle 7.5 einbezogen.

Mittelwert [sec]	Geometr. Mittel [sec]	Median [sec]	Mittlere Abwchg.	Varianz [sec]	Standardabwchg.	Mittl. Fehler rate [n]
18,3	16,4	18,8	7,6	77,6	8,8	2,3

Tab. 7.6: Kenngrößen der Versuchsreihe mit Anzeige der Flächenränder

Aus der Tabelle 7.6 geht hervor, dass die mittlere Erkennungszeit bei dieser Versuchsreihe 18,3 Sekunden betrug bei einer Standardabweichung von 9,2 Sekunden. Im Mittel wurden bei den fünfzehn Teilversuchen 2,3 Flächen falsch erkannt.

Da auch Abbildung 7.3 eine Weibull-Verteilung erkennen lässt, sind die Werte aus Tabelle 7.5 in folgender Abbildung in ein nach DIN 55303 genormtes Weibull-Diagramm eingetragen.

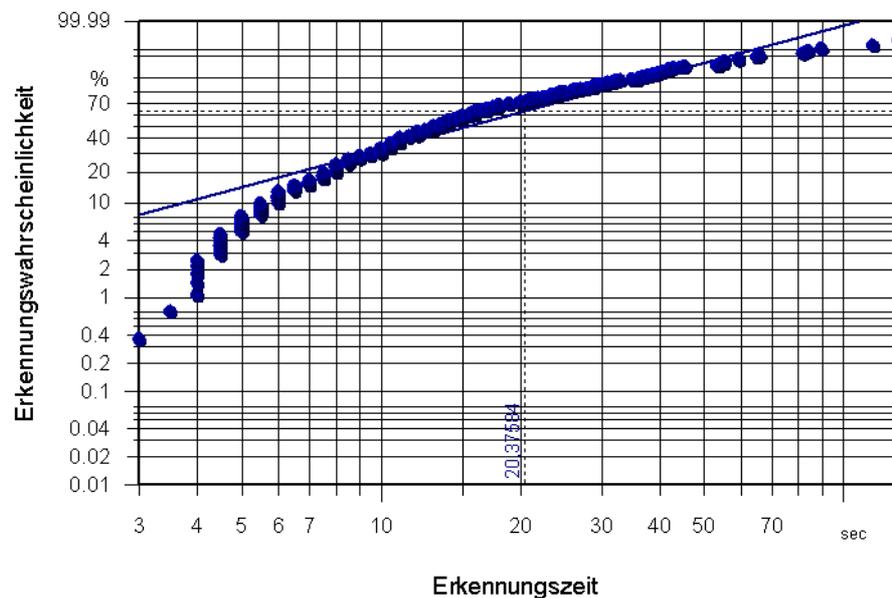


Abb. 7.4: Weibull-Diagramm der Versuchsreihe mit Positionsanzeige

Aus dem Weibull-Diagramm geht hervor, dass 63,2% aller Erkennungszeiten $t=T=20,38$ sec oder weniger betragen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt wie im vorangegangenen Versuch 1,33 und resultiert aus dem grossen Messwertbereich von 3 sec bis 132 sec.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss der Krümmung auf die Erkennungszeit untersucht.

7.1.3 Versuchsreihe mit verringerter Neigungsamplitude

Wie bei der vorangegangenen Versuchsreihe wurde der Versuchsperson der Rand aller Versuchsflächen und der Mauszeiger optisch angezeigt.

Es wurden dabei Versuchsflächen von 30mm Durchmesser und einer maximalen Neigung von 30° relativ zur z-Achse haptisch simuliert. Die Neigung der Versuchsflächen wurde mit dem Faktor $RFak=0,25$ multipliziert. Damit verringert sich die Neigungsamplitude auf maximal $7,5^\circ$, bzw. im Vergleich mit den vorangegangenen Versuchen um 50%.

Ziel dieser Versuchsreihe ist ein Vergleich der Erkennungszeiten bei unterschiedlichen maximalen Neigungsamplituden der Taumelscheibe.

Die folgende Tabelle zeigt die gemessenen Antwortzeiten.

\Fi (t) Pj	F 1 (2)	F 2 (4)	F 3 (4)	F 4 (1)	F 5 (3)	F 6 (3)	F 7 (2)	F 8 (3)	F 9 (4)	F 10 (1)	F 11 (5)	F 12 (5)	F 13 (5)	F 14 (1)	F 15 (2)	M	F
P 1	13,0	18,0	12,5	10,0	11,5	13,0	9,5	26,5	9,0	6,0	16,0	6,0	7,0	7,5	14,5	12,0	3
P 2	71,0	73,5	33,0	51,0	99,0	37,0	47,5	18,5	81,0	28,5	32,0	34,0	135,0	45,0	51,5	55,8	2
P 3	38,5	139,0	68,0	72,0	94,0	162,0	70,0	62,0	40,0	30,0	50,0	61,5	114,0	48,0	41,0	72,7	4
P 4	16,0	12,0	12,5	6,0	29,0	38,5	19,0	25,5	15,0	10,0	11,0	9,5	9,0	9,5	14,0	15,8	2
P 5	11,0	15,0	15,5	6,5	6,0	28,5	30,5	12,0	7,0	5,5	4,5	8,5	5,0	6,5	6,0	11,2	1
P 6	12,0	11,0	19,5	15,5	14,5	16,5	23,5	31,0	20,0	7,0	6,0	6,0	8,5	13,0	18,0	14,8	2
P 7	17,5	33,0	31,0	24,0	28,0	70,5	34,0	26,0	18,0	14,0	16,5	18,5	16,5	14,0	16,5	25,2	0
Mittel	25,6	43,1	27,4	26,4	40,3	52,3	33,4	28,8	27,1	14,4	19,4	20,6	42,1	20,5	23,1	13,0	2,0
Fehler	4	3	1	0	1	1	0	1	2	0	0	1	0	0	0		

Legende: P j = Proband Nr. j Fi = Fläche Nr. i (t) = Typ M = Mittelwert F = Fehler

Tab. 7.7: Gemessene Antwortzeiten bei reduzierter Neigungsamplitude

Das folgende Bild zeigt die Verteilung der Antwortzeiten. Auch hier sind die Erkennungszeiten in Klassen von 0-5 sec, 5-10sec, 10-15 sec. usw. eingeteilt. Auf der Abszisse sind die Erkennungszeiten aufgetragen, auf der Ordinate die Häufigkeit einer Erkennungszeit.

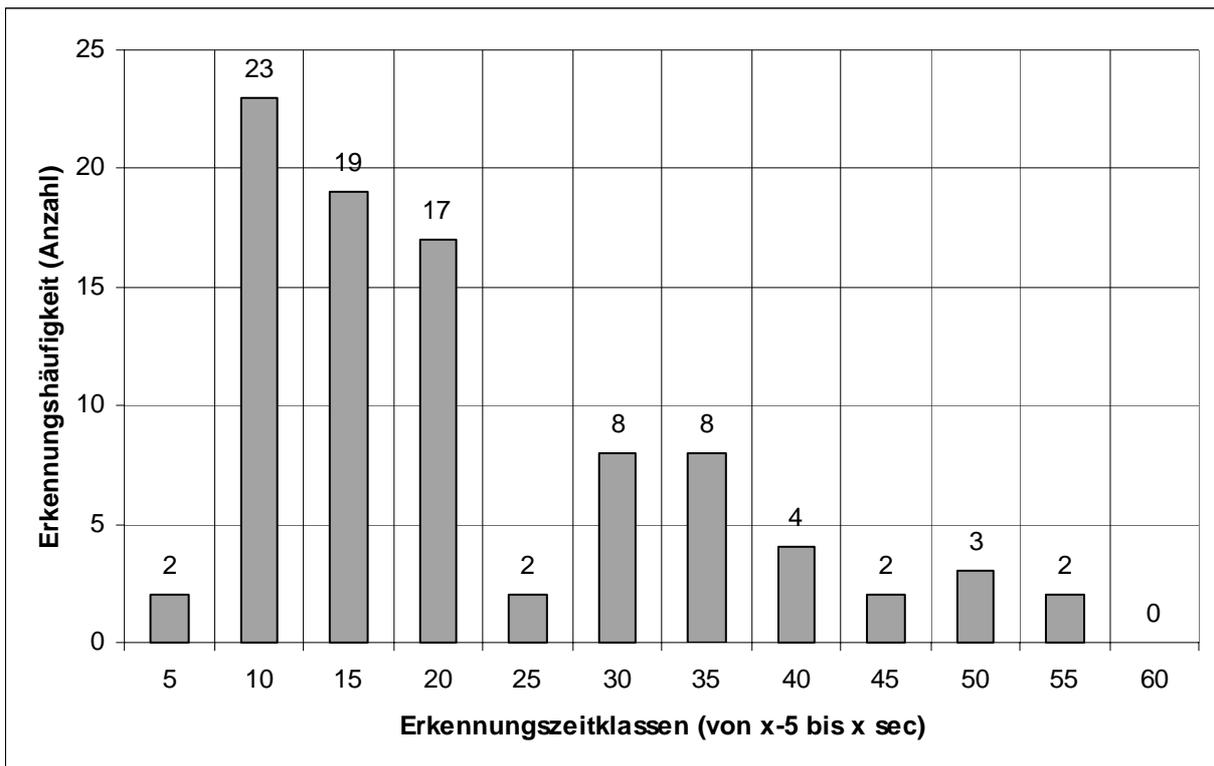


Abb. 7.5: Verteilung der Erkennungszeit bei reduzierter Neigungsamplitude

Abbildung 7.5 zeigt, dass am häufigsten, d.h. in 23 Fällen, eine Erkennungszeit zwischen 5 und 10 Sekunden gemessen wurde.

Die folgende Tabelle zeigt die Kenngrößen der Versuchsreihe. Hier wurden alle Erkennungszeiten einbezogen.

Mittelwert [sec]	Geometr. Mittel [sec]	Median [sec]	Mittlere Abwchg.	Varianz [sec]	Standard-abwchg.	Erknngs-rate [%]
29,6	28,0	27,1	8,4	111,5	10,6	84,44

Tab. 7.8: Kenngrößen der Versuchsreihe mit Anzeige der Flächenränder

Aus der Tabelle geht hervor, dass die mittlere Erkennungszeit bei dieser Versuchsreihe 29,6 Sekunden betrug bei einer Standardabweichung von 10,6 Sekunden. Im Mittel wurden bei den fünfzehn Teilversuchen 84,44% aller Flächen richtig erkannt.

Auch Abbildung 7.5 weist auf eine Weibull-Verteilung hin. Die Verteilung der aller gemessenen Erkennungszeiten aus ist in folgendem Diagramm gezeichnet.

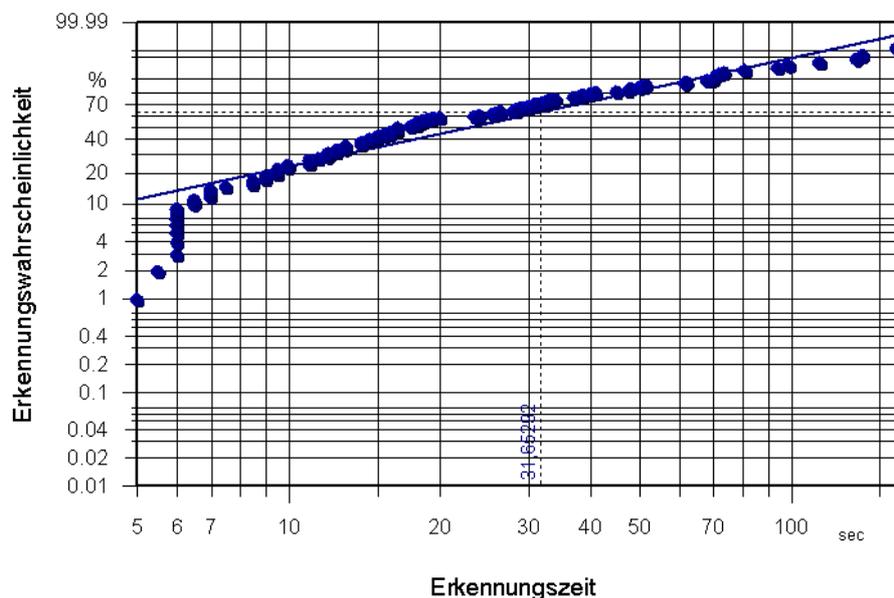


Abb. 7.6: Weibull-Diagramm der Versuchsreihe mit reduzierter Neigungsamplitude

Aus dem Weibull-Diagramm kann abgelesen werden, dass eine Erkennungszeit von $t=T=31,65$ sec zu der Erkennungswahrscheinlichkeit $W(t)=63,2\%$ führt. Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt $b=1,15$ und resultiert aus dem großen Messwertbereich von 4,5 sec bis 162 sec.

Bei diesen ersten drei Versuchsreihen wurden die rechnerinternen Flächen dadurch wahrgenommen, dass die mittleren drei Finger der Schreibhand des Probanden auf der Taumelscheibe der „Haptischen Hand“ auflagen. In der folgenden Versuchsreihe wurde nun der Handballen der Schreibhand auf die Taumelscheibe aufgelegt.

7.1.4 Versuchsreihe mit Anregung des Handballens

Bei dieser Versuchsreihe wird die Lage der menschlichen Hand auf der „Haptischen Hand“ variiert. Bei den bisherigen Versuchen wurden drei Finger auf die Taumelscheibe gelegt. Bei diesem Versuch wird der Handballen auf die Taumelscheibe gelegt. Alle anderen Parameter werden im Vergleich zur vorangegangenen Versuchsreihe konstant gehalten.

Wie in den vorangegangenen Versuchen werden Versuchsflächen von 30mm Durchmesser und einer maximalen Neigung von 30° relativ zur z-Achse haptisch simuliert. Die Neigung der Versuchsflächen wurde mit dem Reduktionsfaktor $RF=0,25$ multipliziert. Damit verringert sich die Neigungsamplitude auf maximal 7,5°.

Die folgende Tabelle zeigt alle gemessenen Antwortzeiten.

$\backslash F_i(t)$ P _j	F 1 (2)	F 2 (4)	F 3 (4)	F 4 (1)	F 5 (3)	F 6 (3)	F 7 (2)	F 8 (3)	F 9 (4)	F 10 (1)	F 11 (5)	F 12 (5)	F 13 (5)	F 14 (1)	F 15 (2)	M	F
P 1	28,0	24,5	31,5	20,0	34,0	51,0	30,0	37,5	30,0	22,5	8,5	41,0	50,5	31,5	10,0	30,0	3
P 2	35,5	41,5	26,0	28,0	39,0	72,0	25,5	25,0	10,0	26,5	15,0	48,0	19,5	20,0	14,0	29,7	7
P 3	17,0	7,5	8,0	11,0	18,0	58,0	27,0	16,0	12,5	7,5	13,5	20,0	42,5	7,0	13,0	18,6	5
P 4	9,0	8,0	14,0	5,0	15,5	11,0	10,0	8,0	8,0	6,0	6,0	11,5	13,0	6,0	6,0	9,1	1
P 5	13,0	19,0	7,5	11,0	100,0	86,0	26,0	41,0	10,0	14,0	20,5	33,0	24,0	12,0	6,0	28,2	2
P 6	8,0	27,5	6,5	7,5	11,0	16,5	5,5	39,5	23,0	22,0	14,0	17,0	20,0	34,0	14,5	17,8	4
P 7	7,5	9,0	6,5	5,0	10,0	8,0	5,5	14,0	8,5	4,0	4,5	4,0	3,0	3,0	4,5	6,5	4
P 8	16,0	16,5	20,5	10,0	73,0	36,0	32,5	18,5	26,0	18,0	17,0	30,0	32,5	18,5	14,0	25,3	0
Mittel	16,8	19,2	15,1	12,2	37,6	42,3	20,3	24,9	16,0	15,1	12,4	25,6	25,6	16,5	10,3	20,6	3,3
Fehler	4	3	3	0	3	1	2	3	2	1	2	0	0	1	1		

Legende: P_j = Proband Nr. j F_i = Fläche Nr. i (t) = Typ M = Mittelwert F = Fehler

Tab. 7.9: Antwortzeiten bei Anregung des Handballens

Aus der Tabelle geht hervor, dass Proband 2 durchschnittlich 29,7 sec bis zum Erkennen einer Fläche benötigte und bei 15 Erkennungsversuchen sieben Fehler machte. Im Mittel benötigte ein Proband bei dieser Versuchsreihe 20,6 sec bis zur Erkennung eines Flächentyps bei einer Fehlerrate von 3,3 Fehlern bei 15 Versuchen.

Das folgende Bild zeigt die Verteilung der Antwortzeiten.

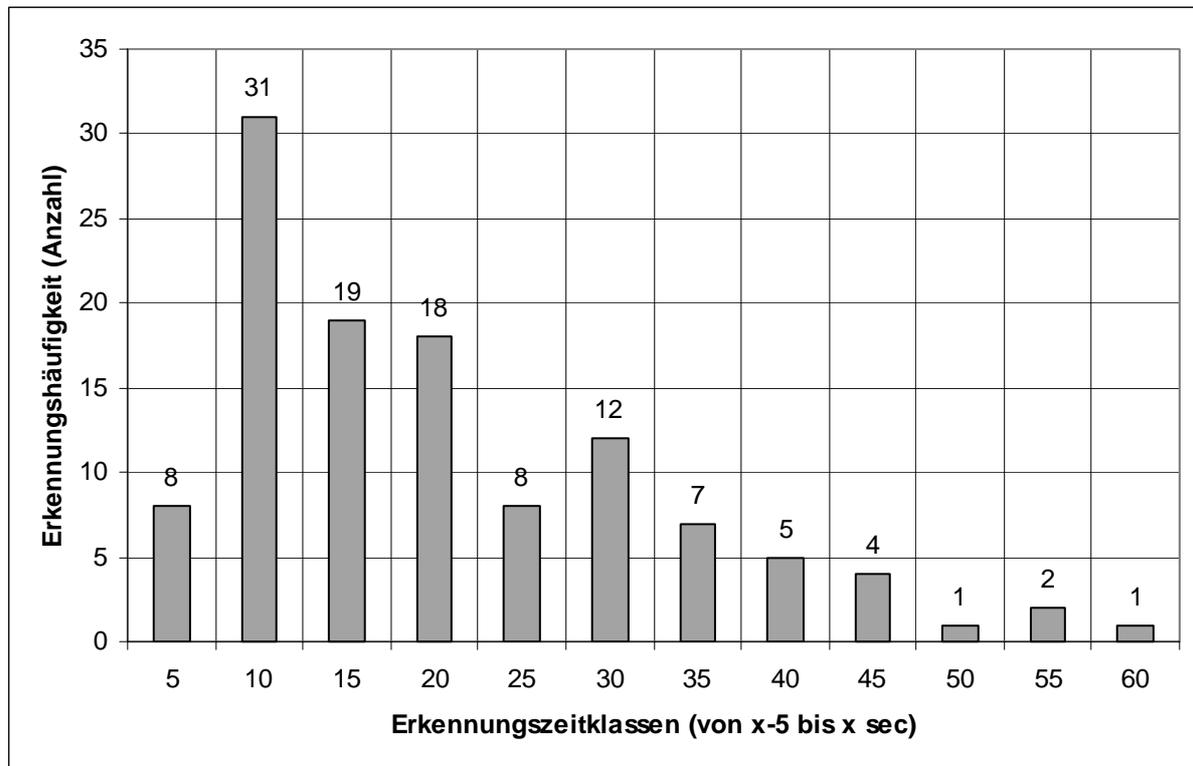


Abb. 7.7: Verteilung der Erkennungszeit bei Anregung des Handballens

Abbildung 7.7 zeigt, dass am häufigsten, d.h. in 30 Fällen eine Erkennungszeit zwischen 5 und 10 Sekunden gemessen wurde.

Die folgende Tabelle zeigt die Kenngrößen der Versuchsreihe. Hier wurden alle Erkennungszeiten einbezogen..

Mittelwert [sec]	Geometr. Mittel [sec]	Median [sec]	Mittlere Abwchg.	Varianz [sec]	Standard-abwchg.	Mittl. Fehler-rate [n]
20,6	19,0	16,8	7,0	85,0	9,2	3,1

Tab. 7.10: Kenngrößen der Versuchsreihe bei Anregung des Handballens

Aus der Tabelle geht hervor, dass die mittlere Erkennungszeit bei dieser Versuchsreihe 20,6 Sekunden betrug bei einer Standardabweichung von 9,2 Sekunden. Im Mittel wurden bei den fünfzehn Teilversuchen 3,1 Flächen falsch erkannt.

Auch die Abbildung 7.7 weist auf eine Weibull-verteilte Erkennungszeit hin. In der folgenden Abbildung ist die zugehörige Weibull-Verteilung zu sehen.

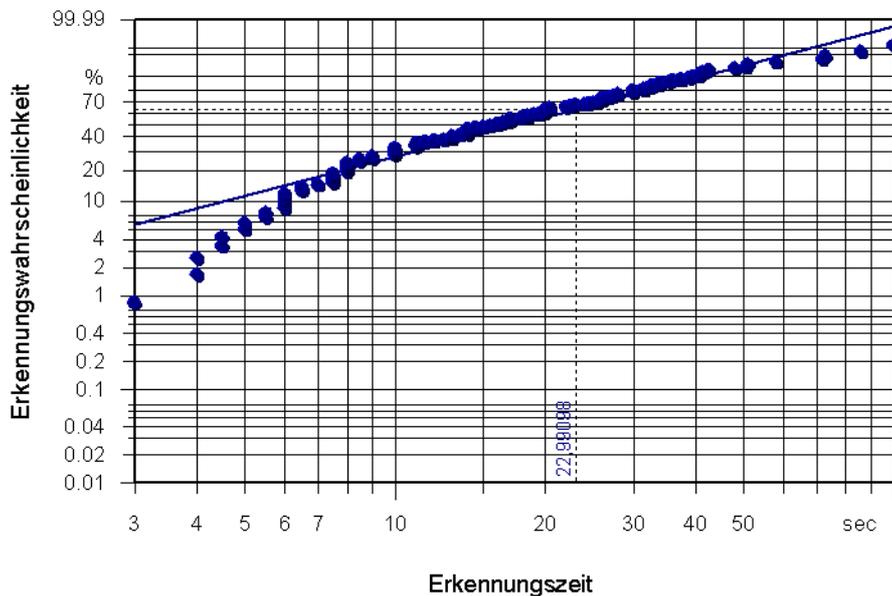


Abb. 7.8: Weibull-Diagramm der Versuchsreihe bei Anregung des Handballens

Aus dem Weibull-Diagramm geht hervor, dass 63,63% aller Erkennungszeiten $t=T=22,99$ sec oder weniger betragen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt $b=1,39$.

Kapitel 7.1 präsentierte die Versuchsergebnisse der vier Versuchsreihen, die in Anlehnung an Kirkpatrick und Douglas (siehe Kapitel 6.1 ab Seite 56) durchgeführt wurden. Dies ermöglicht auch einen direkten Vergleich zwischen der selbst entwickelten „Haptischen Hand“ und einem käuflich erwerbbares Gerät, dem „PHANTOM“ der Firma SensAble. Versuchsobjekte waren dabei einzelne Flächen.

Die folgenden Kapitel behandeln die Ergebnisse der Versuchsreihe in Anlehnung an die VDA-Empfehlung 4955. Diese Versuchsreihe untersucht im wesentlichen nicht mehr einzelne Flächen, sondern die Übergänge zweier aneinander grenzenden Flächen.

7.2 Versuchsreihe zur VDA-Empfehlung 4955

In Kapitel 6.2 (ab Seite 64) wurde die Versuchsreihe zur VDA-Empfehlung 4955 vorgestellt. Diese Empfehlung beinhaltet Vorgaben an die mathematische Qualität von Freiformflächen, unter anderem auch Vorgaben zur Stetigkeit nullter, erster und zweiter Ordnung. Die Versuchsreihe ist dementsprechend in drei Teile gegliedert. Der für alle drei Teile gültige Versuchsaufbau ist in Kapitel 6.2.2 ab Seite 66 beschrieben.

7.2.1 Versuch „Sprung“

Im ersten Teil dieser Versuchsreihe wurden den zehn Versuchspersonen an insgesamt 19 rechnerinternen Flächenübergängen Höhengsprünge zwischen 0,1 mm und 1,9 mm präsentiert (siehe Kapitel 6.2.3, Seite 68). Bei jedem Übergang mussten die Versuchspersonen eine Beurteilung abgeben. Möglich waren die Aussagen:

- „Höhensprung wurde so gut wie nie erkannt“,
entsprechend einer Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 10%
- Höhengsprung wurde hin und wieder erkannt“,
entsprechend einer Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 50%
- „Höhensprung wurde so gut wie immer erkannt“,
entsprechend einer Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 90%.

Antwortmöglichkeiten wie „nie“ (0%) bzw. „immer“ (100%) wurden verworfen, um Tendenzen zur Aussage „hin und wieder“ (50%) möglichst gering zu halten. Die Übersetzung der Aussagen „so gut wie nie“ bzw. „so gut wie immer“ in mathematische Wahrscheinlichkeitswerte erfolgte subjektiv. Ebenso könnte an Stelle der Einteilung (10%; 50%; 90%) die Einteilung (1%; 50%; 99%) benutzt werden. Diese Einteilung hätte zwar eine deutlichere Graphik zur Folge, könnte aber mit den Aussagen „nie“, „hin und wieder“ bzw. „immer“ verwechselt werden und damit die Gefahr einer Fehlinterpretation erhöhen.

Die Mittelung der jeweils angegebenen Erkennungswahrscheinlichkeiten führte zu folgendem Diagramm.

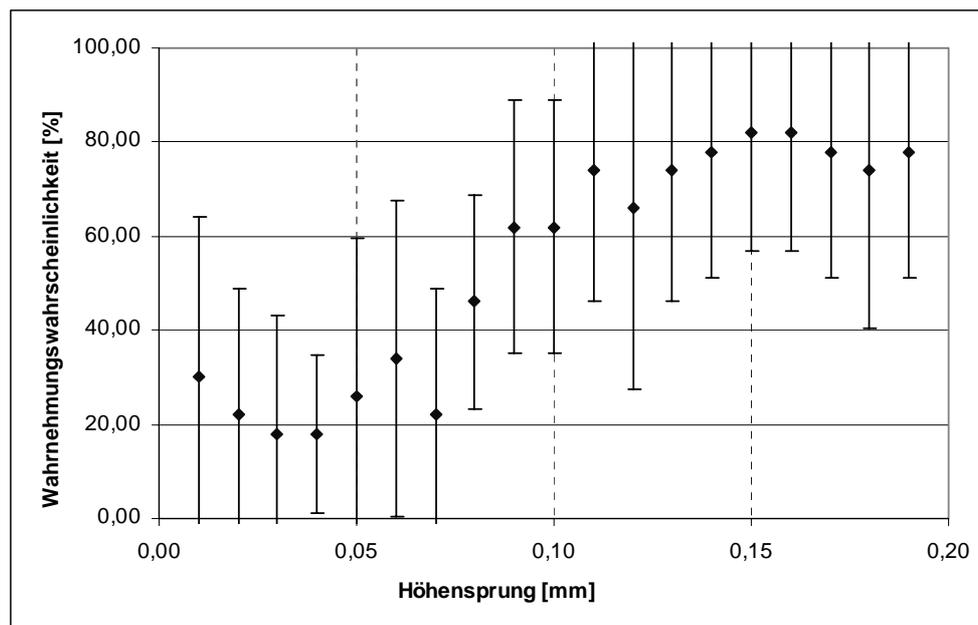


Abb. 7.9: Wahrnehmungswahrscheinlichkeit bei verschiedenen Höhengsprüngen

In Abb. 7.9 ist der Höhengsprung 0,0 mm nur aus darstellungstechnischen Gründen aufgeführt. Dieser Höhengsprung wurde nicht untersucht, da er haptisch nicht dargestellt und somit auf diese Weise nicht erkannt werden kann.

Aus der Abbildung ergibt sich z.B., dass ein Höhengsprung von 0,05mm mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 25% wahrgenommen werden kann. Ein Höhengsprung von 0,1 mm kann mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 60% wahrgenommen werden. Im Diagramm sind auch die Balken der jeweiligen Standardabweichung eingetragen. Eine Diskussion dieser Versuchsergebnisse findet sich in Kapitel 8.2 (Versuchsreihe zu VDA-Empfehlung 4955).

7.2.2 Versuch „Knickwinkel“

Den Versuchspersonen wurden im zweiten Versuchsteil an jedem Übergang zweier Flächen Knickwinkel präsentiert (Kapitel 6.2.4, Seite 69). Zwischen den rechnerinternen Versuchsflächen wurde ein Reduktionsfaktor $RF=0,5$ geschaltet. Damit reduzierten sich die in Kapitel 6.2.4 ab Seite 69 vorgestellten Knickwinkel (10° bis $0,25^\circ$) auf Werte zwischen 5° und $0,125^\circ$. Pro Übergang mussten die Versuchspersonen eine dem ersten Versuch entsprechende Beurteilung abgeben. Die Ergebnisse sind in folgendem Diagramm dargestellt.

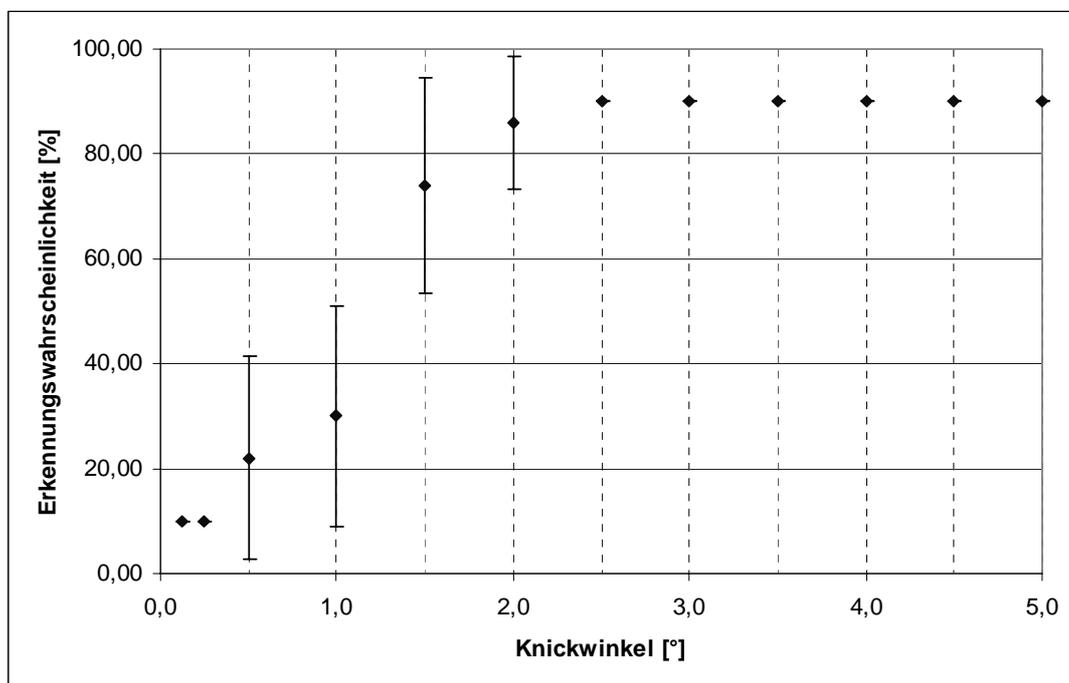


Abb. 7.10: Wahrnehmungswahrscheinlichkeit bei verschiedenen Knickwinkel

In Abb. 7.10 ist der Knickwinkel 0° nur aus darstellungstechnischen Gründen aufgeführt. Dieser Knickwinkel wurde nicht untersucht, da er haptisch nicht erkannt werden kann. Die Unter-

suchung von Knickwinkeln unterhalb der technischen Auflösung der Haptischen Hand dient der Prüfung auf „eingebildete Wahrnehmungen“.

Aus der Abbildung ergibt sich z.B., dass ein Knickwinkel von 1° mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 30% wahrgenommen werden kann, also selten. Ein Knickwinkel von $1,5^\circ$ kann mit einer Wahrscheinlichkeit von über 70% wahrgenommen werden. Ab $2,5^\circ$ Knickwinkel beträgt die Erkennungswahrscheinlichkeit konstant 90%, d.h. alle Versuchsteilnehmer gaben an, diese Knickwinkel „so gut wie immer“ wahrgenommen zu haben. Eine Diskussion dieser Versuchsergebnisse findet sich in Kapitel 8.2 ab Seite 96.

7.2.3 Versuch „Krümmungsverläufe“

Im dritten Teil der Versuchsreihe wurden den Versuchspersonen vier Flächen mit Hilfe der „Haptischen Hand“ präsentiert (siehe Kapitel 6.2.5 ab Seite 70). Die Versuchspersonen mussten anhand der wahrgenommenen Neigungsverläufe den Querschnitt der Flächen zeichnen. In den nun folgenden Diagrammen ist der Querschnitt der Flächen (vergleiche Abb. 6.12 auf Seite 70) dargestellt und darunter jeweils alle Querschnittsverläufe, die von den Versuchspersonen gezeichnet wurden.

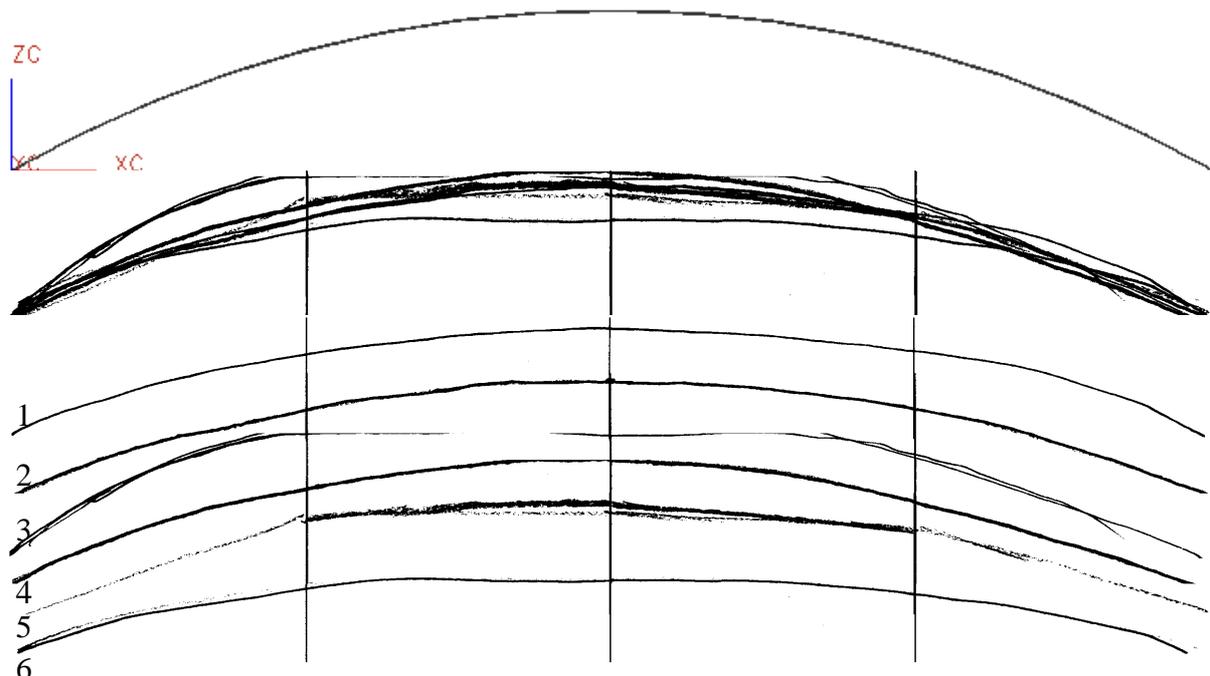


Abb. 7.11: Dargestellter Flächenquerschnitt Typ 1 und wahrgenommene Flächenverläufe

Bei der Fläche Typ 1 liegt eine symmetrische Parabel mit einem mittigen absoluten Maximum vor. Im oberen Viertel der Abbildung ist der Querschnitt der rechnerinternen Fläche abgebil-

det, im zweiten Viertel die übereinandergelegten gezeichneten Wahrnehmungen von fünf Probanden. In der unteren Hälfte der Abbildung sind diese fünf gezeichneten Wahrnehmungen einzeln dargestellt zur einfacheren Interpretation.

Versuchsperson 1 hat den Querschnitt präzise wiedergegeben, ebenso Versuchsperson 2. Der Proband 3 hat hingegen einen unsymmetrischen Kurvenverlauf und eine breite Ebene als Maximum skizziert. Person 4 hat den Querschnitt gut erkannt, Person 5 hat im linken und rechten Randbereich Geraden gezeichnet. Person 6 hat eine am rechten Rand leicht verkürzte und niedrige Kurve gezeichnet.

Es fällt auf, dass die Flächenquerschnitte von 1, 2, 4, 5 und 6 ähnlich sind. Bei Teilnehmer 3 stellt sich die Frage, ob er die Kurve wirklich anders wahrgenommen hat, oder ob seine Fähigkeit, den wahrgenommenen Querschnitt korrekt zu zeichnen, schlechter ist.

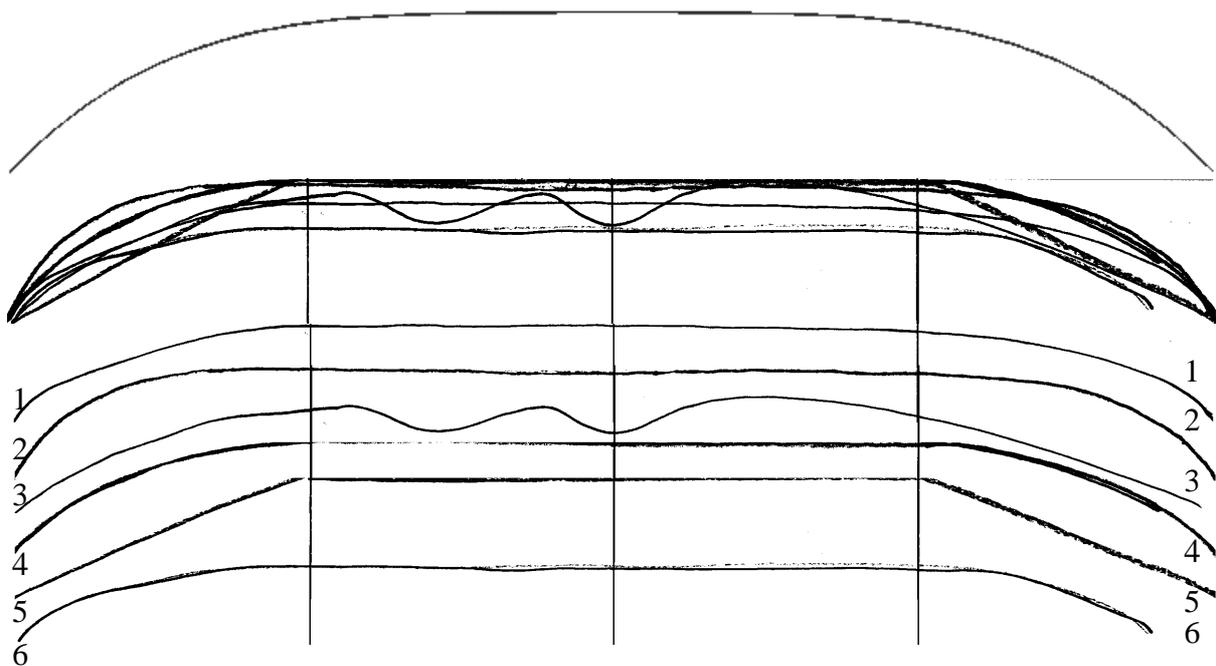


Abb. 7.12: Dargestellter Flächenquerschnitt Typ 2 und wahrgenommene Flächenverläufe

Die Fläche Typ 2 hat einen hyperbelförmigen Querschnitt mit einem breiten mittig angeordneten Maximum. Die kompakte Darstellung der fünf gezeichneten Kurvenquerschnitte zeigt, dass die Probanden den Querschnitt überwiegend erkannt haben. Der Anstieg im ersten Viertel ist in jedem Fall symmetrisch zum Abfall im letzten Viertel. In den beiden Vierteln links und rechts der Mittel wurde bis auf einen Fall ein breites Maximum gezeichnet. Allerdings ist eine wellenförmige Kurve in der Mitte zu erkennen. Eine Erklärung für diese Kurve liefern die Einzeldarstellung in der unteren Hälfte der Abbildung.

Die Einzeldarstellung der Querschnittskurven weisen dieselben spezifische Abweichungen wie bei der Fläche Typ 1 (siehe Abb. 7.11) auf:

- Wieder zeichnet der Proband 3 im Mittelteil deutliche Abweichungen ein,
- Proband 5 setzt den Kurvenverlauf komplett aus mehreren Geraden zusammen,
- Proband 6 stellt die Kurve am rechten Rand verkürzt dar mit einer niedrigen maximalen Höhe, d.h. er hat die zu Verfügung stehende Zeichenfläche weder der Länge noch der Höhe nach voll ausgenutzt. Dies trifft bei Proband 6 für alle gezeichneten Kurvenverläufe zu.

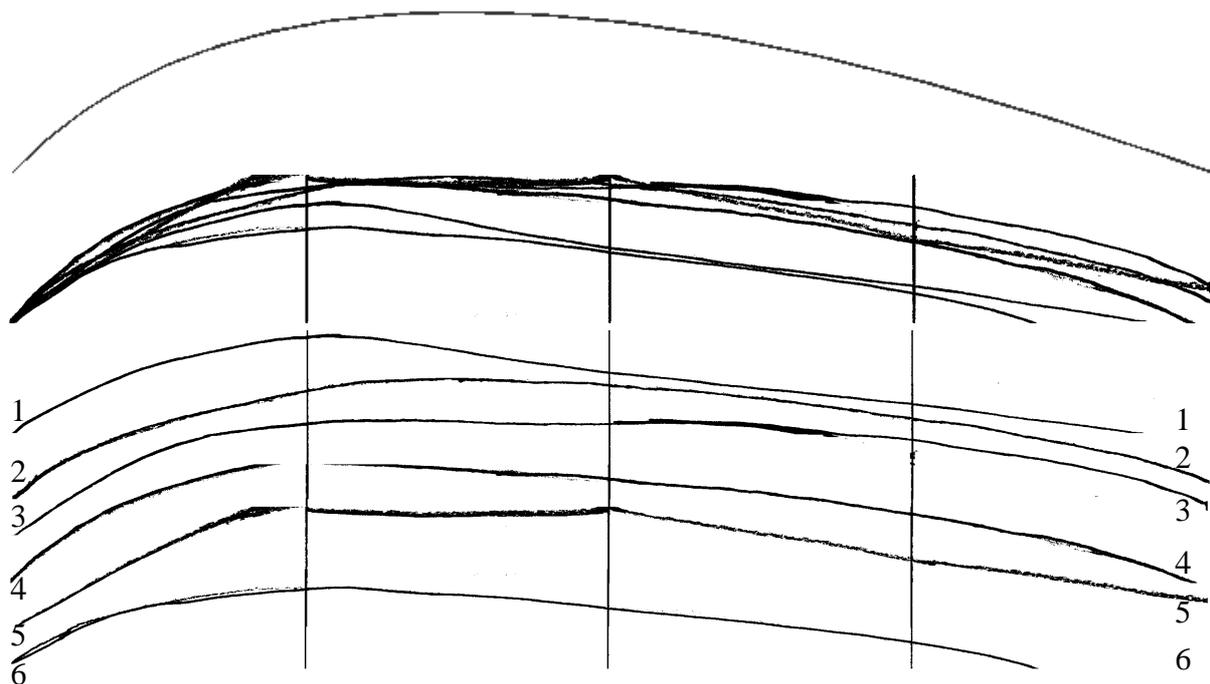


Abb. 7.13: Dargestellter Flächenquerschnitt Typ 3 und wahrgenommene Flächenverläufe

Die Fläche vom Typ 3 hat einen parabelförmigen Querschnitt. Am Rand liegen zwei absolute Minima vor, links der Mitte ein absolutes Maximum.

Die übereinandergelegte Darstellung aller fünf wahrgenommenen Flächenquerschnitte zeigt, dass der Flächenquerschnitt prinzipiell erkannt wurde. In jedem Fall ist ein deutlicher Anstieg im ersten Viertel zu beobachten, gefolgt von einem relativ schwachen Absinken in den rechten drei Vierteln.

Die einzelne Darstellung der gezeichneten Flächenquerschnitte zeigt bei

- Teilnehmer 3 im Mittelteil wiederum deutliche Abweichungen,
- von Teilnehmer 5 wird der Querschnitt der Versuchsfläche erneut aus mehreren Geraden zusammengesetzt

- Teilnehmer 6 zeichnet wie bei den vorherigen Kurvenverläufen eine wiederum am rechten Rand verkürzte und niedrige Kurve.

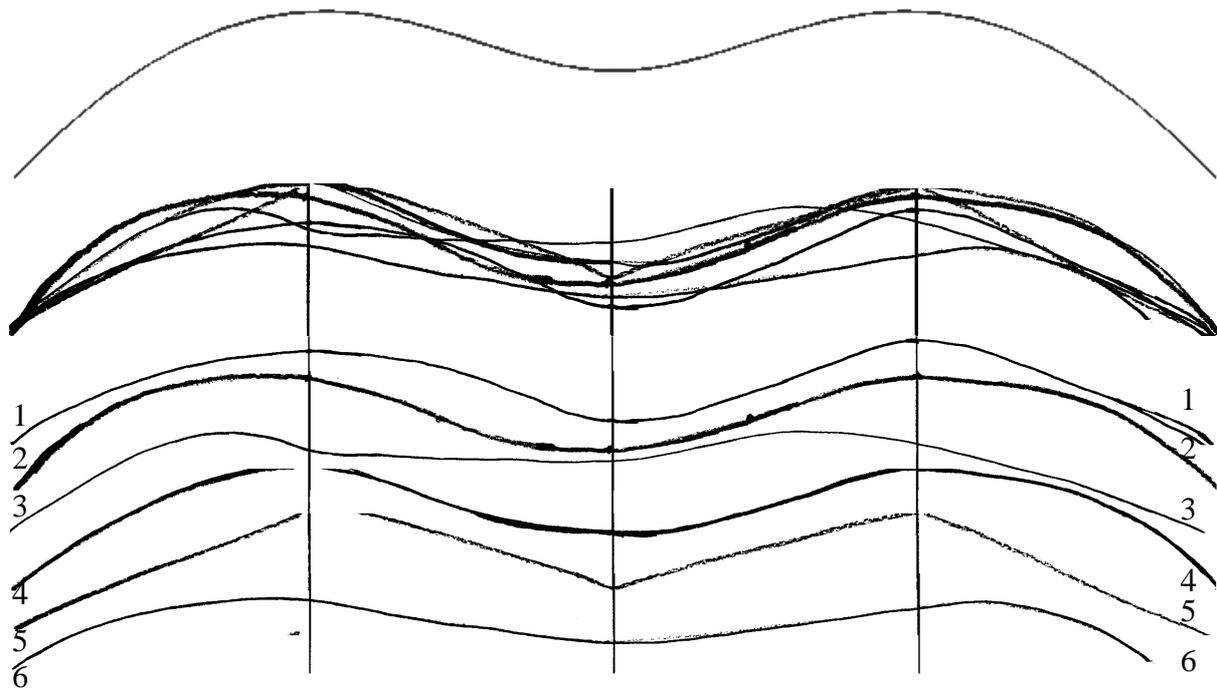


Abb. 7.14: Dargestellter Flächenquerschnitt Typ 4 und wahrgenommene Flächenverläufe

Die Fläche Typ 4 hat als Querschnitt eine zur Mittellinie symmetrische Kurve von Grad 4. Es liegen zwei absolute Minima am Rand, zwei absolute Maxima seitlich der Mitte und mittig ein lokales Minimum.

Die gezeichneten Flächenquerschnitte zeigen bei der übereinandergelegten Darstellung, dass der präsentierte Flächenquerschnitt prinzipiell von allen Versuchspersonen erfasst wurde. Die einzeln dargestellten gezeichneten Flächenquerschnitte zeigen die gleichen individuellen Abweichungen wie bei den anderen drei Versuchsflächen:

- Person 3 zeichnete den Querschnittsverlauf mit Verzerrungen im mittleren Bereich,
- Person 5 hat den Flächenquerschnitt wiederum aus mehreren Geraden zusammengesetzt,
- Person 6 hat die Kurve erneut am rechten Rand verkürzt und insgesamt niedrig gezeichnet.

Damit ist die Darstellung der Ergebnisse der verschiedenen Versuchsreihen in diesem Kapitel abgeschlossen. Das folgende Kapitel fasst die Versuchsergebnisse zusammen und interpretiert die Ergebnisse. Die Interpretation schließt einen Vergleich mit den Arbeiten anderer Forschungsergebnisse ein.

8 Zusammenfassung und Interpretation

In Kapitel 7 wurden die Versuchsergebnisse der einzelnen Versuchsreihen vorgestellt. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst und interpretiert. Es folgt ein Vergleich mit anderen Forschungen. Das Kapitel schließt mit einem Vergleich der Arbeitsergebnisse mit der These der Arbeit.

8.1 Versuchsreihen nach Kirkpatrick und Douglas

Ziel dieser Versuchsreihen war es zu untersuchen, ob sich einzelne Flächen, die nach dem Schema von Koenderink (siehe Seite 57) erzeugt wurden, von einander unterscheiden lassen. In Anlehnung an die Untersuchungen von Kirkpatrick und Douglas wurden aus diesem Schema fünfzehn Flächen generiert, die von den Versuchspersonen primär durch Nutzung der „Haptischen Hand“ erkannt werden mussten.

Es wurden vier Versuchsreihen durchgeführt. Versuchsreihe 1 (abgekürzt: Vr 1) wurde durchgeführt ohne Anzeige von Mauszeiger und Umrisse der Flächen, also mit rein haptischer Wahrnehmung. Die Ergebnisse finden sich in Kapitel 7.1.1 ab Seite 72. Bei Versuchsreihe 2 (abgekürzt: Vr 2) wurden Mauszeiger und Flächenränder angezeigt (Kapitel 7.1.2, Seite 76). Bei Versuchsreihe 3 (abgekürzt: Vr 3) wurde die Neigung der Taumelscheibe der Haptischen Hand um 50% reduziert (Kapitel 7.1.3, ab Seite 79). Die Versuchsreihe 4 (abgekürzt: Vr 4) wurde mit Anregung des Handballens anstelle der drei mittleren Finger durchgeführt.

Die folgende Grafik zeigt die Erkennungszeiten der vier Versuchsreihen (Rautensymbole) mit der errechneten Standardabweichung in Balkenform. Ebenso eingetragen wurden die durchschnittlichen Erkennungsraten der vier Versuchsreihen (viereckige Symbole). Auch für diese Werte wurde die berechnete Standardabweichung in Balkenform eingezeichnet. Aus Gründen der Vollständigkeit wurde auch der jeweilige T-Wert der Weibull-Verteilung jeder Versuchsreihe in die Graphik eingetragen.

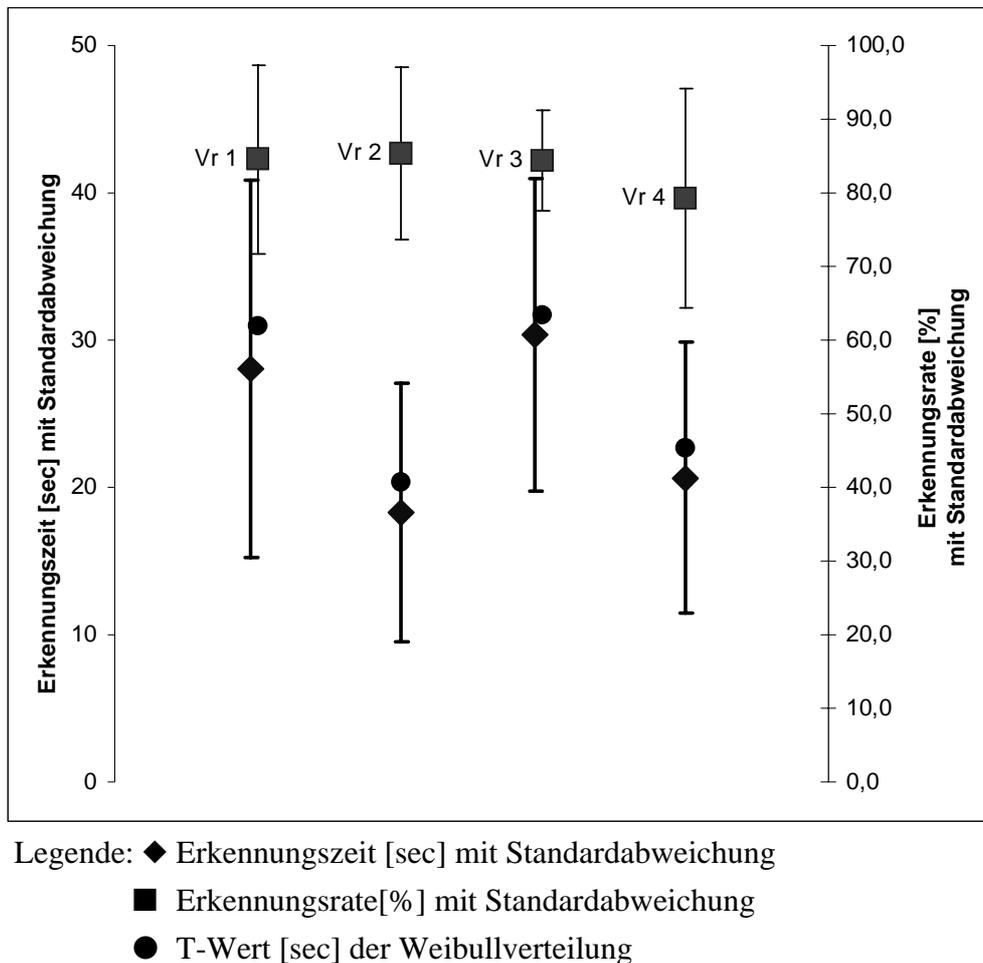


Abb. 8.1: Erkennungszeiten und Erkennungsraten aller Versuchsreihen

Aus der Abbildung geht hervor, dass sowohl die durchschnittliche Erkennungszeit als auch der T-Wert der zugehörigen Weibull-Verteilung abnimmt, wenn anstelle einer rein haptischen Wahrnehmung (Vr 1) Mauszeiger und Flächenränder angezeigt werden (Vr 2). Wird die Neigung der Taumelscheibe um 50% verringert (Vr 3), dann nimmt die durchschnittliche Erkennungszeit ebenso wie der T-Wert der zugehörigen Weibull-Verteilung zu. Wird derselbe Versuch mit Anregung des Handballens anstelle der mittleren drei Finger durchgeführt (Vr 4), dann nimmt die durchschnittliche Erkennungszeit zusammen mit dem T-Wert der zugehörigen Weibull-Verteilung ab.

Die mittlere Erkennungsrate ist bei den Versuchsreihen 1, 2 und 3 fast identisch, bei Versuchsreihe 4 ist eine leichte, jedoch nicht signifikante Absenkung zu beobachten.

Zum einfachen Vergleich sind die vier Weibull-Diagramme der vier Versuchsreihen in folgendem Bild gemeinsam dargestellt.

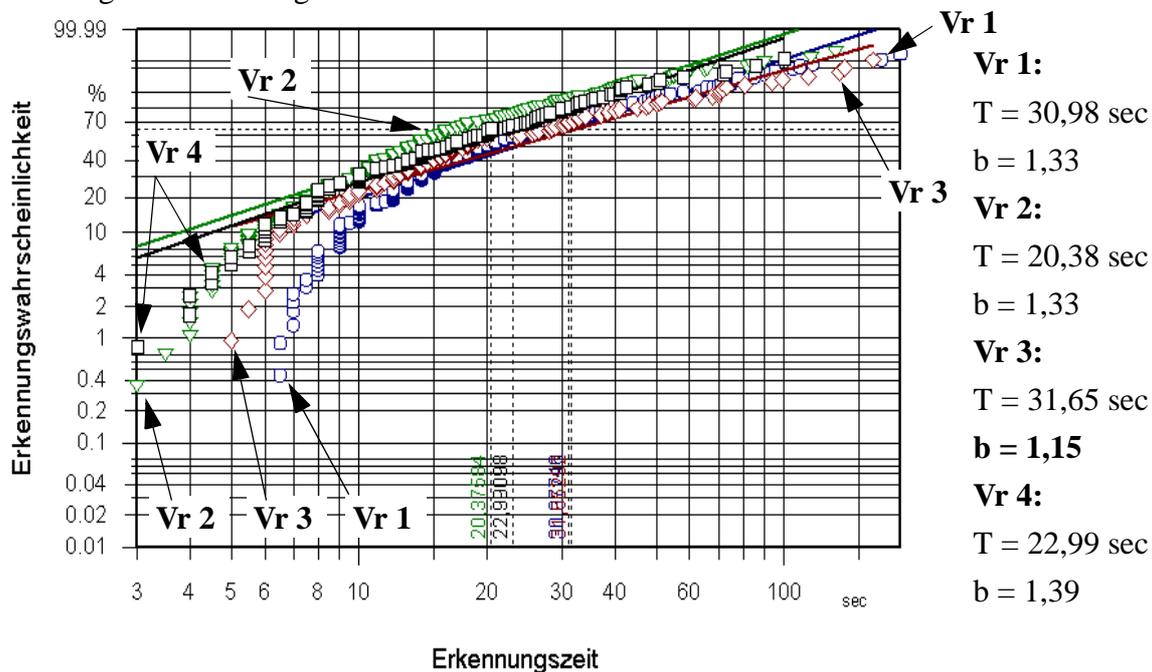


Abb. 8.2: Weibull-Diagramm aller vier Versuchsreihen

Das Weibull-Diagramm verdeutlicht die in allen Versuchsreihen große Spannweite der Messwerte und damit verbunden vier niedrigen Steigungswerte von $b=1,15$ bis $b=1,33$. Die vier charakteristischen Erkennungszeiten T_{VR_i} lassen die gleichen Aussagen wie die Kenngrößen zu, die sich aus der vorangegangenen als „Gauss-verteilt“ dargestellten Messwerte ergeben. Das heißt, auch die Darstellung der Messwerte als Weibull-Verteilungen führt zu dem Ergebnis, dass die Erkennungszeiten sinken, wenn die Versuchspersonen auch die Position von Mauszeiger relativ zum Flächenrand optisch wahrnehmen können. Wird die Neigung der Tauselscheibe um 50% gesenkt, steigen die Erkennungszeiten an. Die Erkennungszeiten sinken wieder, wenn die Wahrnehmung der Flächen nicht mit Hilfe der Finger erfolgt, sondern mit Hilfe des Handballens.

8.1.1 Interpretation der Versuchsreihe

In Versuchsreihe 1 erfolgte die Flächenwahrnehmung rein haptisch. Wenn der Proband in Versuchsreihe 2 sowohl Mauszeiger als auch den Rand der zu untersuchenden Fläche sieht, kann der Proband die Fläche bis an ihre Ränder „erfahren“ und entsprechend starke Neigungswerte spüren, gleichzeitig das Verlassen der Fläche, also Irritationen vermeiden. Der Einfluss der maximalen Neigungswerte wird durch Versuchsreihe 3 bewiesen. Werden Mauszeiger und Flächenrand angezeigt, die Neigung der Tauselscheibe aber um 50% verringert, dann verringert

sich damit die Intensität der haptischen Eindrücke und die Erkennungszeit steigt an. Zunächst überraschend ist die signifikante Absenkung der Erkennungszeiten in Versuchsreihe 4 bei Benutzung des Handballens anstelle der Fingerspitzen.

Eine Erklärung dieser Veränderung könnte durch die unterschiedlichen Sensortypen der Haut gegeben werden (siehe Abbildung 3.7 auf Seite 25). Das würde bedeuten, dass die wenigen, aber schnell adaptierenden Sensoren des Handballens (Pacini Körperchen) für diese Wahrnehmungsaufgabe besser geeignet sind als die vielen, langsam bzw. mittelschnell adaptierenden Sensoren der Fingerspitzen (Meissner Körperchen und Merkelsche Zellen).

Werden die Fingerspitzen auf die Taumelscheibe aufgelegt, so tragen auch die Mechanorezeptoren der Fingergelenke zur Wahrnehmung der Taumelscheibe bei. Dies veranschaulichen die folgenden Bilder.



Abb. 8.3: Gelenkstellungen bei verschiedenen Neigungen der Taumelscheibe

Bei waagerechter Ausrichtung der Taumelscheibe ergibt sich ein leicht negativer Winkel zwischen erstem und zweitem Fingerglied. Bei den beiden anderen Fällen jedoch, d.h. bei Aufstellung der Scheibe gegen die Hand bzw. beim Neigen der Scheibe von der Hand weg ergibt sich ein positiver Knickwinkel. Aus den Abbildungen folgt, dass die Rezeptoren der Gelenke keine eindeutigen Beiträge zur Neigung der Taumelscheibe liefern. Die Bedeutung dieser Zweideutigkeit ist derzeit unklar, laut Birbaumer und Schmidt liefern die mechanosensitiven Gelenksensoren wahrscheinlich nur Beiträge zur Bewegung von Gelenken, weniger jedoch zur Stellung von Gelenken. Hierzu ist eine gleichzeitige Aktivierung verschiedener Sensorsysteme und deren zentrale Integration notwendig /BiS-1999/.

8.1.2 Ergebnisse fremder Untersuchungen

Kirkpatrick und Douglas verwenden die durchschnittliche Zeit, die ein Proband zum Erkennen einer Testfläche benötigt hat, als Maß für die Güte des haptischen Gerätes PHANTOM. Mit

Hilfe des Gerätes Phantom konnte eine von fünf Flächentypen mit einer durchschnittlichen Erkennungszeit von 22,5 Sekunden bei einer Erkennungsrate von 84,5% auf rein haptischer Basis erkannt werden. Dabei wurden Flächen mit 70mm Durchmesser verwendet. Bei Verwendung von Flächen mit 15mm Durchmesser wurden um 10% höhere Erkennungszeiten gemessen.

Lederman, Klatzky und Reed benutzen drei verschieden elliptische Körper mit unterschiedlichem Verhältnis von Länge zu Durchmesser. Die Körper mussten bei Benutzung beider Hände erkannt und voneinander unterschieden werden. Bei dieser sehr einfachen Aufgabe wurden Erkennungszeiten von 1 Sekunde gemessen bei einer vernachlässigbaren Fehlerrate /KLR-1993/. Werden die Erkennungsfähigkeiten eingeschränkt, z.B. durch Verhüllung der Körper mit Hilfe eines Tuches, ergeben sich durchschnittliche Erkennungszeiten von 6 Sekunden mit einer Erkennungsrate von 95%. Wurden von Lederman et al. anstelle dreidimensionaler Alltagsgegenstände nur deren zweidimensionale Konturen benutzt, sank die mittlere Erkennungsrate unter 30% und die mittlere Erkennungszeit stieg auf über 60 Sekunden /KLL-1993/.

Burdea et al. gaben eine virtuelle Blechbüchse vor, die mit Hilfe des „ForceFeedback“-Gerätes „Rutgers Master“ gedrückt, aber nicht verbeult werden sollte. Wurde der „Force Feedback“-Modus genutzt, sank die durchschnittliche Fehlerrate von 23% bei nur optischer Wahrnehmung auf 18%, und von 13% auf 6%, wenn statt rein haptischer Wahrnehmung eine haptisch und optische Wahrnehmung der Blechbüchse möglich war /BGL-1995/. In weiteren Versuchen wurden haptische, optische, akustische Wahrnehmungen bzw. haptisch-optische und haptisch-akustische Wahrnehmungen ermöglicht /BRC-1996/. Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt das folgende Bild.

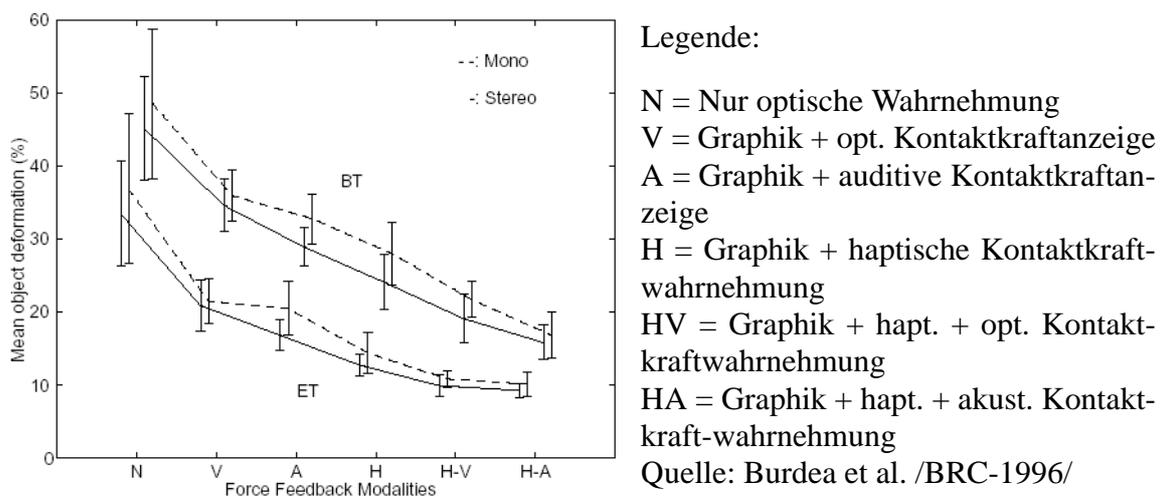


Abb. 8.4: Fehlerraten bei unterschiedlichen Sinneseindrücken

Die Graphik zeigt vier Versuchsreihen. Die obersten beiden Reihen präsentieren Messdaten zu Beginn der Tests (BT), die unteren Reihen zeigen Messdaten am Ende des Tests. Jeweils eine Reihe wird mit planarer Graphikanzeige durchgeführt, der Arbeit an einem normalen 2D-Bildschirm entsprechend, eine zweite Reihe wird mit 3D-VR-Graphik durchgeführt, um Verbesserungen bei dreidimensionalem Sehen zu messen.

Bemerkenswert ist die deutliche Verbesserung der Ergebnisse bei Anzeige der Kontaktkräfte auf optische Art auf dem Bildschirm. Die Kombination von graphischer Anzeige, haptischer und akustischer Kontaktkraft-Rückmeldung führt zu den besten Versuchsergebnissen. Aus den Versuchen folgt auch, dass zumindest bei diesen Versuchen 3D-VR-Graphik im Vergleich zu 2D-Bildpräsentationen keine besseren Ergebnisse erzielen konnte.

Besonders auffällig erscheint die Übereinstimmung der eigenen Messwerte mit den Ergebnissen von Kirkpatrick und Douglas /KiD-2000/. Wie bei diesen werden Erkennungszeiten im Bereich von 20 Sekunden gemessen und ebenso eine Erkennungsrate von 80%.

Jansson et al. hingegen zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Erkennungszeiten und -raten von der Größe der Versuchsobjekte auf. Bei diesen Versuchen wurden ebenfalls mit einem PHANToM virtuelle Quader, Kugel, Zylinder, Kegel mit Kantenlängen von 5mm bis 100mm ertastet, den Versuchspersonen wurden dabei die Augen verbunden. Bei einer Kantenlänge von 5mm ergaben sich Erkennungszeiten von 38sec im Durchschnitt und einer Erkennungsrate von 70%, bei einer Kantenlänge von 100mm sanken die Erkennungszeiten auf unter 20sec und die Erkennungsrate stieg auf über 90% /JaB-1999/ /JPC-1999/.

Derzeit kann jedoch noch keine Gesetzmäßigkeit entwickelt werden für den Informationsverlust im haptischen Bereich bei Verwendung von VR-Technologie.

8.2 Versuchsreihe zu VDA-Empfehlung 4955

Ziel dieser Versuchsreihe war die Untersuchung, ob sich Höhengsprünge, Knickwinkel und Krümmungen mit Hilfe der „Haptischen Hand“ wahrnehmen lassen.

Die Ergebnisse zu dieser Versuchsreihe wurden in Kapitel 7.2 ab Seite 84 vorgestellt. Die folgende Abbildung zeigt noch einmal sowohl die gemessenen Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Höhengsprüngen als auch in Abhängigkeit von Knickwinkel. Im Gegensatz zu den Abbildungen auf Seite 85 und Seite 86 wurden interpretierende Kennlinien hinzugefügt.

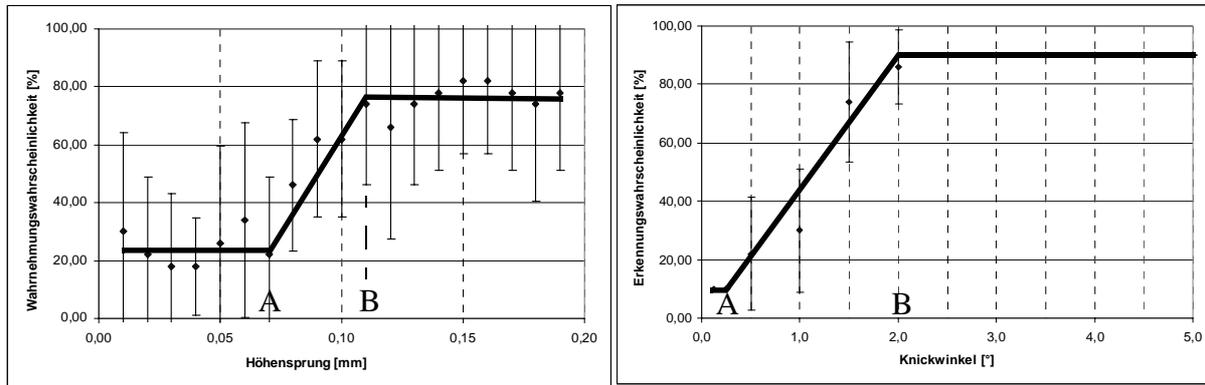


Abb. 8.5: Erkennungswahrscheinlichkeiten mit Kennlinien

Die gemessenen Erkennungswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Höhengsprünge (linke Grafik) werden durch eine Rampenfunktion approximiert. Bis zu einem Höhengsprungwert $A = 0,07$ mm ist kein deutlicher Zuwachs der Erkennungswahrscheinlichkeiten zu beobachten. Daher wird dieser Bereich mit einer Geraden approximiert, die als Wert den Durchschnitt der Messwerte bis $0,07$ mm hat (24,3% Erkennungswahrscheinlichkeit). Ebenso ist ab $0,11$ mm keine deutliche Zunahme zu beobachten. Auch dieser Bereich wird durch eine Gerade angenähert, deren Niveau durch den Durchschnitt der Messwerte ab $0,11$ mm hat (76,2% Erkennungswahrscheinlichkeit). Bei den Messwerten ist zu berücksichtigen, dass die Versuchspersonen als Erkennungswahrscheinlichkeit zwischen den Werten „10%“, „50%“ und „90%“ wählen konnten. Die zur Interpretation der wahrgenommenen Höhengsprünge benutzte Rampenfunktion wird begründet dadurch, dass die theoretische Auflösung des Hubservos ohne Last laut Hersteller und geometrischer Umrechnung $0,05$ mm beträgt. Theoretisch müssten mindestens bis zu diesem Wert die angegebenen Wahrscheinlichkeiten dem Minimalwert „10%“ entsprechen. Gleiches ergibt sich analog am oberen Niveau der Rampenfunktion: ab einem Höhengsprungwert „B“ müssten von allen Teilnehmern der Maximalwert „90%“ angegeben werden. Dieser Maximalwert wird jedoch in keinem Fall erreicht, auch bei Höhengsprüngen größer als „B“ nicht.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei den gemessenen Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Knickwinkeln (rechte Grafik). Auch hier werden die Messwerte mit Hilfe einer Rampenfunktion interpretiert. Bemerkenswert ist, dass bei Knickwinkeln von $0,125^\circ$ und $0,25^\circ$ von allen Teilnehmern der Mindestwert „10%“ angegeben wurde, im Gegensatz zu den Messungen bei unterschiedlichen Höhengsprüngen. Ebenfalls bemerkenswert ist, dass schon bei $0,5^\circ$ und 1° die Wahrnehmung von Knickwinkeln zunimmt, obwohl die theoretische Auflösung der Neigungsservos ohne Last laut Hersteller bei 1° liegt. Hier gibt es wiederum einen Knickwinkelwert „B“, oberhalb dessen die Erkennungswahrscheinlichkeit nicht mehr ansteigt

und konstant gleich dem Maximalwert ist. Das bedeutet, dass alle Versuchsteilnehmer den Maximalwert angegeben haben.

Zusammenfassend lässt sich für die Wahrnehmung von Höhengsprüngen, Knickwinkeln und Krümmungsverläufen feststellen:

1. Damit ein Höhengsprung bei Auflage der Fingerspitzen auf der Taumelscheibe mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 75%, entsprechend dem oberen Niveau der Rampenfunktion, wahrgenommen werden kann, muss dieser eine Mindesthöhe von 0,11 mm haben. Dies ist deutlich mehr als die technische Auflösung des Hubfreiheitsgrades von 0,05 mm und um ein Vielfaches größer als die Höhe minimaler, von Fingerspitzen wahrnehmbaren, Erhebungen von 0,006mm (siehe Abb. 3.8 auf Seite 25). Als Ursache für diese Unterschiede kommen drei Möglichkeiten 1a), 1b) und 1c) in Betracht:

1a) Elastizitäten zwischen dem Servo und der sich hebenden Taumelscheibe. Der Hubmechanismus besteht aus Festkörpern, die bedingt durch das Eigengewicht der Taumelscheibe permanent unter einer Grundlast stehen. Diese Last wird vom Servo aufgefangen: selbst in ausgeschaltetem Zustand ist eine deutliche Kraftanstrengung nötig, um die Schubstange, die die Höhenbewegung der Taumelscheibe auf den Hubservo überträgt, gegen den Hubservo zu bewegen. Es ist möglich, dass der Servo bei kleinen Stellbefehlen nicht in der Lage ist, diese Grundlast zu überwinden. Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass eine Stellbewegung des Servos mit einem Geräusch verbunden ist: dieses Geräusch fehlt bei kleinen Hubbewegungen. Dieser Ansatz führt zu dem Schluss, dass vom Servohersteller nur eine mittlere Servoauflösung angegeben wird, die aber für kleine Stellbefehle bei der Randbedingung der Grundlast nicht zutrifft.

1b) Unterschiedliche Größen der Versuche. Die Taumelscheibe der Haptischen Hand ist um ein Vielfaches größer als die Stößel, die zur Messung der für eine Hautreizung minimalen Eindrucktiefe benutzt wurden. Zudem wurde der Stößel über eine Zeitdauer von maximal 10msec auf die Haut gedrückt /BiS-1999/. Folglich ist für die Wahrnehmung eines Höhengsprunges nicht nur die geometrische Höhe, sondern auch die Relativgeschwindigkeit zwischen Haut und externem Körper verantwortlich, die zu einer dynamischen Hautverformung führt. Ein Beispiel: Eine Blattkante kann wahrgenommen werden, wenn der Finger quer über die Kante streicht, nicht aber wenn der Finger auf der Blattkante ruht, und nur wenig wenn der auf die Kante aufgelegte Finger an der Kante entlangfährt. Bei der Messung der Wahrnehmbarkeit von Höhengsprüngen ist die Geschwindigkeit der Taumelscheibe jedoch konstant.

1c) Überwiegend kinaesthetischer Reiz. Wenn die Finger durch ihr Eigengewicht permanent auf der Taumelscheibe aufliegen, dann handelt es sich um ein System von Taumelscheibe und

den Fingergliedern. Wenn der Servo seine offenbar geringe Startauflösung überwindet, dann werden die aufgelegten Finger um ihr erstes Fingergelenk dynamisch gedreht. Als Beispiel „schnippe“ man einen Finger z.B. der linken Hand „von unten“, also von der Handunterseite der rechten Hand, gegen einen Finger der rechten Hand. Man kann feststellen, dass sich der geschlagene Finger um eine Querachse im Gelenk zwischen Finger und Handfläche dreht. In diesem dynamischen Fall wird also sowohl ein taktiler Reiz auf der Fingerkuppe des geschlagenen Fingers beim Zusammentreffen der Finger ausgelöst also auch ein kinaesthetischer Reiz im ersten Fingergelenk. Wird jedoch eine Fingerkuppe z.B. mit dem Fingernagel eines Fingers der anderen Hand um einem möglichst kleinen Weg angehoben, dann ist der taktile Reiz an der Fingerkuppe spürbar niedriger als der Reiz, der durch die Drehbewegung des angehobenen Fingers um das innerste Fingergelenk ausgelöst wird. Der kinaesthetische Reiz überwiegt also.

2. Damit ein Knickwinkel bei Auflage der Fingerspitzen auf der Taumelscheibe mit einer Wahrscheinlichkeit von 90%, entsprechend dem oberen Niveau der Rampenfunktion, wahrgenommen werden kann, muss dieser mindestens 2° betragen. Dies ist deutlich mehr als die technische Auflösung der Neigungsservos von 1° . Es muss davon ausgegangen werden, dass die theoretische Auflösung nur im lastfreien Zustand zutrifft, d.h. dass die Taumelscheibe durch ihr Trägheit und die Grundlast der aufliegenden Finger zu einem „Totwinkel“ neigt. Wird dieser Totwinkel überwunden, kann es im Gegensatz zu den Höhengsprüngen zu taktilen Empfindungen an der Fingerkuppe kommen, da sich die berührte Fingerkuppenfläche ändert. Zudem kann es wiederum durch die Änderung der Lage des gesamten Fingers zu einer kinaesthetischen Empfindung im inneren Fingergelenk kommen.

3. Krümmungsverläufe größerer Bauteile können mit der „Haptischen Hand“ prinzipiell wahrgenommen werden. Bei den untersuchten Krümmungsverläufen (siehe Kapitel 6.2.5, Seite 70) liegen die Neigungswinkel der Flächen oberhalb der minimal fühlbaren Winkeln. Hier wird jedoch nicht nur die menschliche haptische Sensorik angesprochen, sondern auch das übergeordnete neuronale System des Benutzers. Dieser muss im Gegensatz zu den vorangegangenen Versuchen keine einzelne Signale wahrnehmen, sondern aus einer Folge von Signalen eine Vorstellung (von der Fläche) gewinnen. Dies ist in jedem Versuch gelungen, obgleich die Darstellung der Kurvenverläufe bei zwei Probanden deutlich von der Mehrheit der Versuchspersonen abwich. Es kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht geklärt werden, ob dies bedingt war durch eine abweichende Vorstellungskraft dieser Probanden oder einer abweichenden Fähigkeit bei der Zeichnung der gewonnenen Vorstellung. Dies lässt insbesondere Proband Nr. 5 vermuten.

8.3 Vergleich der Ergebnisse mit der These der Arbeit

Zielsetzung der Arbeit ist, am CAS-/CAD-Arbeitsplatz rechnerinterne Freiformflächen nicht nur sehen, sondern auch fühlen zu können (Kapitel 2.2). Mit diesem Ziel ergab sich als These der Arbeit, siehe Seite 13,

"Es wird behauptet, dass eine rechnerinterne Freiformfläche durch eine rechnerexterne, in maximal 3 Freiheitsgraden vom Rechner gesteuerte und in weiteren zwei Freiheitsgraden vom Benutzer bewegbare, Referenzfläche mit dem haptischen Wahrnehmungssinn wahrgenommen und eindeutig interpretiert werden kann."

Die durchgeführten Versuche ergaben, dass

- haptisch wahrgenommene rechnerinterne Flächen mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 80%-85% erkannt werden können bei einer mittleren Erkennungszeit von 20-30 Sekunden.
- zur haptischen Wahrnehmung von rechnerinternen Freiformflächen mittels einer aktiv gesteuerten Referenzfläche nur 2 aktiv gesteuerte Freiheitsgrade, nämlich Rotationsfreiheitsgrade um x- und y-Achse (Neigungsfreiheitsgrade), notwendig sind.

Obwohl die anfangs aufgestellte These bewiesen ist, bleiben wegen der eingeschränkten Erkennungswahrscheinlichkeit Fragen über die Ursachen offen.

Der nicht notwendige dritte, translatorische Freiheitsgrad lässt folgende Schlussfolgerungen zu: Entweder kann das Gerät um diesen Freiheitsgrad verringert, das heißt vereinfacht werden, oder dieser Freiheitsgrad kann für andere Aufgaben genutzt werden. So wurde beispielsweise eine Korrekturfunktion implementiert, bei der der translatorische Freiheitsgrad zum Ausgleich eines ungewünschten Hebens beziehungsweise Senkens bei der Neigung der Taumelscheibe genutzt wurde (siehe Tabelle 5.1 auf Seite 48).

9 Ausblick

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Versuchsergebnisse zusammengefasst und unter Einbeziehung fremder Untersuchungen interpretiert. Mit den Ergebnissen ist der Bereich möglicher Untersuchungen nicht abgeschlossen. Im folgenden wird ein Ausblick auf weitere Schritte gegeben.

Die zum Beweis der These dieser Arbeit entwickelte Versuchsapparatur (siehe Kapitel 5 ab Seite 37) bietet folgende Entwicklungspotentiale, die in der Reihenfolge ihrer Realisierbarkeit aufgeführt werden:

Zunächst seien die Entwicklungsmöglichkeiten genannt, die mit relativ geringem baulichen Aufwand zu einem deutlichen Erkenntniszuwachs führen sollten.

- Durch eine Softwaremodifikation kann die Taumelscheibe der „Haptischen Hand“ als gedämpftes System ausgelegt werden. Das heißt, dass die haptisch dargestellte Neigung eines Punktes einer rechnerinternen Fläche (gemessen relativ zu einer Bezugsebene) innerhalb einer wählbaren Zeitspanne automatisch auf Null reduziert werden könnte. Dieser Ansatz würde die Spannweite an möglichen darstellbaren Neigungswerten erhöhen, nur begrenzt durch die Vorstellungskraft des Benutzers.
- Da die Wahrnehmung von Flächenneigungen über den Handballen erfolgversprechender als die Wahrnehmung über Fingerspitzen ist, kann die Taumelscheibe für Handballen ergonomischer ausgeführt werden und auch mehrere auf haptischen Wege voneinander unterscheidbare Bereiche beinhalten.
- Die Stellgenauigkeit der Motoren kann erhöht werden mit der Verwendung digital programmierbarer Servos. Wurde bisher nur ein Teil der gesamten Impulsbandbreite benutzt, um Stellwinkel zwischen $+45^\circ$ und -45° ausführen zu können, so würde bei Benutzung programmierbarer Servos die Übersetzung der gesamten Impulsbandbreite in beliebige Drehwinkelamplituden vom Benutzer im Servo einprogrammiert /HIT-2003a/ /HIT-2003b/. Ebenso kann ein anderer Microcontroller verwendet werden, an dem die Übersetzung von Stellbefehl in Impulsweite veränderbar ist /LYN-2002/. Mit beiden Ansätzen ließe sich die durch die Servomotoren bedingte Genauigkeit von ca. 1° auf ca. $0,5^\circ$ in der Neigungsbewegung bzw. von ca. 0,04 mm auf ca. 0,02 mm in der Hubbewegung verbessern.

Mit den folgenden Maßnahmen wäre eine grundlegende Überarbeitung der „Haptischen Hand“ verbunden.

- Neigungswinkel über 15° wurden als unangenehm empfunden, daher kann der maximale Neigungswinkel von 30 Grad im Betrieb bzw. 35 Grad bei Kalibrierung reduziert werden auf 20° bei Kalibrierung, ggf. sogar noch weniger. Damit verringert sich die Bauhöhe im

Bereich der Taumelscheibe deutlich und die Ergonomie nimmt zu. In diesem Fall würde die Verwendung von programmierbaren Servos sogar zu einer Motoreseitigen Genauigkeit von ca. $0,25^\circ$ in der Neigungsbewegung bzw. ca. 0,01 mm in der Hubbewegung führen

- Um die Bauhöhe im Bereich der Motoren zu verringern, sind entweder andere Servomotoren zu verwenden oder eine andere Motorenart, z.B. auf Basis der Mikro- oder der Nanotechnik. Derzeit ist allerdings nicht bekannt, dass derartige, handelsübliche Motoren entsprechende Stellkräfte aufbringen könnte: im direkt unterhalb der Taumelscheibe verfügbaren Bauraum (ca 10x10x20mm) wäre bei einem Hubweg von 5 mm eine Kraft von 50 N, bedingt durch die Masse der anzuhebenden Hand und einem Beschleunigungsfaktor, aufzubringen. Eine Verwendung schnellerer Motoren, steiferer und direkterer Kraftflüsse könnte zur Beseitigung noch vorhandener systembedingter Totzeiten und Störgrößen führen.
- Die „Haptische Hand“ kann prinzipiell an einen Roboterarm gekoppelt werden. Dies würde die Restriktion aufheben, nur geringe Neigungen absolut darstellen zu können. Praktisch würde diese Kopplung zu einer sehr komplexen und damit teuren Konstruktion führen. Eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit zu schon kommerziell verfügbaren Produkten erscheint bei dieser Kopplung allerdings kaum möglich.

Methodisch kann das Gerät ebenfalls aufgewertet werden.

- Zwischen der Taumelscheibenoberfläche und dem darunterliegenden Adapter ist ein Raum mit einem Durchmesser von ca. 65 mm und einer Höhe von ca. 10 mm. Dieser kann der Aufnahme weiterer Aktuatoren oder Sensoren dienen.
- Die vom Benutzer auf die Taumelscheibe ausgeübten Kräfte könnten indirekt oder direkt gemessen werden. Für eine direkte Messung müssten Kraftsensoren im Bereich der Taumelscheibe installiert werden. Auf die Taumelscheibe, und damit auf die Servos, ausgeübte Kräfte führen zu einem Stromanstieg der Servos. Im Microcontroller könnten die Stromstärken gemessen, über den seriellen Port zurückgemeldet und vom Rechner in beliebiger Form ausgewertet werden. Damit wäre eine Erweiterung der Haptischen Hand zu einem kombinierten Ein-/Ausgabegerät möglich. So könnte zum Beispiel auf eine Positionierung des Mauszeigers auf einer rechnerinternen Fläche und Drücken der Taumelscheibe die Fläche an dem gewählten Punkt nachgeben oder eine andere Neigung annehmen.

Für die Umsetzung der skizzierten Entwicklungspotentiale eröffnen sich prinzipiell zwei Wege. Ein Weg ist die Industrialisierung des Gerätes, d.h. seine Weiterentwicklung zu einem kommerziell verfügbaren Produkt. Mit diesem Ziel wurde das entwickelte Gerät zum Patent beim Deutschen Patentamt angemeldet (Anmeldung DE 10203318A1). Ein zweiter Weg ist die Weiterentwicklung im Sinne einer funktionellen Aufwertung und weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen. Beide Wege können und sollten parallel besritten werden.

Mit der vorliegenden Arbeit ist der Beweis gelungen, dass ein Taumelscheibe mit nur zwei aktiv gesteuerten Freiheitsgraden in der Lage ist, rechnerinterne Freiformflächen haptisch darzustellen. Das heißt, dass die Erweiterung der Benutzungsschnittstelle von CAS/CAD-Systemen vom rein optischen auf optisch und haptische Wahrnehmung mit einfachen Mitteln erfolgreich bewerkstelligt werden kann.

Würden, wie vorgeschlagen, die Kräfte gemessen, die der Benutzer auf die Taumelscheibe ausübt, so könnte damit ein Beitrag zum 1997 von Dagefoerde vorgeschlagenen „Haptische Schleifstein“ geliefert werden (siehe Kapitel 2.1., Seite 11) /Dag-1997/. Schien damals die erforderliche Rechnerleistung nicht realisierbar, so dürften die heutigen Rechnerkapazitäten für die notwendige Echtzeit-FEM bereits ausreichen. Angesichts der zu erwartenden Verdoppelung der Rechenleistung innerhalb weniger Jahren könnte sich ein Echtzeit-FEM-Modul sogar in überschaubarer Zeit zu einem normalen Bestandteil von CAD-Systemen entwickeln.

Eine Ausweitung der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet Haptik für CAS-/CAD-Anwendungen ist empfehlenswert auch deshalb, um eklatante Rückstände in Europa aufzuarbeiten: die überwältigende Mehrheit an Forschungen und kommerziellen Lösungen auf diesem Gebiet hat ihren Ursprung in USA.

Das entwickelte Gerät, die „Haptische Hand“, ist nicht für den Einsatz mit 3D-Großraum-VR, z.B. CAVE, Powerwall oder Holobench gedacht, sondern für den Einsatz am normalen CAS-/CAD-Arbeitsplatz, vorwiegend in Kombination mit 2D-Monitoren. Ob eine Kombination mit 3D-VR-Monitoren erfolgreich sein könnte, ist anzuzweifeln, da von Burdea kein signifikanter Vorteil von 3D-VR-Monitoren gegenüber 2D-Monitoren gemessen werden konnte /BRC-1996/.

Mit der Nutzung des haptischen Sinnes als Werkzeug zur Qualitätsprüfung rechnerinterner Freiformflächen, z.B. mit der „Haptischen Hand“, sollte die Zahl der Reverse-Engineering-Zyklen im Produktdesignprozess sinken. Eine Absenkung dieser Zyklen bedeutet eine Verringerung der Zeit bis zum Produktionsbeginn und damit einen Wettbewerbsvorteil. Unabhängig davon werden die Ansprüche der Kunden an ein möglichst individuelles Design zunehmen und damit eine Zunahme an Designvarianten herbeiführen. Zusammengefasst werden die Produktentwicklungszeiten sinken, die freigesetzten Kapazitäten aber durch zusätzliche Entwicklungsvarianten wieder gebunden werden.

Literaturverzeichnis

- /Ari-350v.Chr./ Aristoteles: Über die Seele. Griechisch – Deutsch. Hrsg. H. Seidl. Hamburg: Meiner Verlag 1995
Ebenso: <http://classics.mit.edu/Aristotle/soul.3.iii.html>
zuletzt überprüft am 24. Mai 2004.
- /Ari-340v.Chr./ Aristoteles: *Problemata Physica*. Übersetzt von H. Flashar. Hrsg. E. Grumach. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1962.
- /Bec-2000/ Becker, B.: Haptische Darstellung von Freiformflächen - Applikation zur Übersetzung von Freiformflächen über Flächenpfad, Flächennormale und Formatkonversion in Ansteuersequenzen für ein existierendes Ausgabegerät. Studienarbeit an der Universität Kaiserslautern, Fachbereich MV, Lehrstuhl für Rechneranwendung in der Konstruktion (RKK) 2000
- /BBH-1996/ Berkelman, P.; Butler, Z.; Hollis, R.: Design of a Hemispherical Magnetic Levitation Haptic Interface Device. 1996 ASME IMECE, Atlanta, November 17-22, 1996, DSC-Vol. 58, pp. 483-488 ebenso:
URL: <http://www-2.cs.cmu.edu/~msl/publications/asme96.design.pdf>
zuletzt überprüft am 20.05.2004.
- /Bec-1896/ Bechterev, W. v.: Über die Empfindungen, welche mittels der sogenannten Gleichgewichtsorgane wahrgenommen werden, und über die Bedeutung dieser Empfindungen in Bezug auf die Entwicklung unserer Raumvorstellungen. *Archiv für Anatomie und Physiologie*. Berlin 1896, S. 105ff.
- /BeH-1997/ Becker-Carus, Ch.; Hille, P.: Forschungsarbeiten: Untersuchungen zum Tastsinn, Untersuchungen zur Gleich-/Ungleich-Begriffsbildung, Untersuchungen zum intermodalen Transfer. Universität Münster 1997.
URL: http://wwwpsy.uni-muenster.de/inst2/vgl_tier/forschungsarbeiten.html,
zuletzt überprüft am 26.03.2003.
- /Bek-1970/ von Békésy, G.: *Physiologie der Sinneshemmung*. München: Wilhelm Goldmann Verlag 1970.
- /BGL-1995/ Burdea G.; Gomez, D.; Langrana, N.; Roskos, E.; Richard, P.: Virtual reality graphics simulation with force feedback. *International Journal of Computer Simulation* (1995) No. 5, S. 287-303.
- /BiS-1999/ Birbaumer, N.; Schmidt, R.: *Biologische Psychologie*. Heidelberg: Springer,

- 1999.
- /BKS-1985/ Bandera, J.; Kern, P.; Solf, J.: Ergonomische Kenngrößen fuer Kontaktgreifarten. Bremerhaven : Wirtschaftsverl. NW, 1985.
- /BRC-1996/ Burdea, G.; Richard, P.; Coiffet, P.: Multi-modal virtual reality: input / output devices, system integration and human factors. State University of New Jersey, USA. University of Paris VI, France, 1996.
- /BuC-1994/ Burdea, G.; Coiffet, P.: Virtual Reality Technology. New York: Wiley, 1994
- /But-1995/ Buttolo, P.: Haptic Interfaces / The pen based force display.
URL: brl.ee.washington.edu/Research_Active/Haptics/Device_03_PBHI/PBFD.html,
zuletzt überprüft am 25.03.2003.
- /CLP-2002/ Colgate, E.; Lynch, K.; Peshkin, M.: Haptic display. Laboratory for intelligent mechanical systems. Northwestern University. Evanston. USA.
URL: <http://lims.mech.northwestern.edu/projects/index.htm>,
zuletzt überprüft am 28.05.2003.
- /CMR-2000/ CM Research: Displaced Temperature Sensing System X/10. Houston/USA: CM Research 2000.
URL: www.cmresearch.com/haptic.html, zuletzt überprüft am 27.03.2003.
- /Dag-1997/ Dagefoerde, K.: Haptic Grindstone. Interner Bericht zum Forschungsprojekt FIORES, Brite-EuRam Project No BE96-3579. Kaiserslautern, Technische Universität, 1997.
- /Dan-2004/ Dankwort, C. W.: Skriptum zur Vorlesung „Rechnerunterstütztes Konstruieren“. TU Kaiserslautern, 2004.
- /Dav-1972/ Davidson, P.W.: Haptic judgments of curvature by blind and sighted humans. Journal of experimental psychology Vol. 93 (1972) No. 1, S. 43/55.
- /Des-1637/ Descartes, R.: La Dioptrique, 1637.
URL: http://www.uqac.quebec.ca/zone30/Classiques_des_sciences_sociales/classiques/Descartes/dioptrique/dioptrique.pdf
zuletzt überprüft am 28. Mai 2004.
- /DIN-1996/ DIN 55303-7: Schätz- und Testverfahren bei zweiparametrischer Weibull-Verteilung. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth-Verlag 1996.
- /Eis-1887/ Eisner, M.: Beurteilung der Größe und der Gestalt von Flächen, welche die Haut berühren. Dissertation. Friedrich-Alexanders-Universität Erlangen 1887.

- /Ewa-1910/ Ewald, J.R.: Die Umkehr des Versuchs von Aristoteles. Zeitschrift für Sinnesphysiologie. Bd. 44 (1910), S. 1-5.
- /FCS-2002/ FCS Control Systems B.V.: Haptic master.
URL: www.fcs-cs.com/robotics/content/hapticmaster.htm,
zuletzt überprüft am 27.03.2003.
- /FPA-2001/ Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung: Hannover Messe 2001 - Das VR-Systemkonzept / Teil: Haptik im Virtual Prototyping. Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung.
- /FZK-1997/ Forschungszentrum Karlsruhe: The HIT Force Feedback Device
<http://www-kismet.iai.fzk.de/DYNAMIK/html/hifee.html#HIT%20Force%20Feedback%20Device>
zuletzt überprüft am 28. Mai 2004.
- /Geg-2002/ Gegenfurter, K.R.: Vorlesung: Sinnesphysiologie und Wahrnehmung.URL:
www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/Wahrnehmung/Wahr-09-haut.htm,
zuletzt überprüft am 24.03.2003.
- /GfI-1996/ Gesellschaft für Informatik e.V.: Ergonomische Gestaltung von Benutzungsschnittstellen von CAD-Systemen. Leitfaden. Bonn: 1996.
- /GhB-1995/ Gharaybeh, M.A.; Burdea G.C.: Investigation of a shape memory alloy actuator for dextrous force-feedback masters. Advanced Robotics (1995) Vol. 9 No. 3, S. 317-329.
- /Gib-1973/ Gibson, James J.: Die Sinne und der Prozeß der Wahrnehmung. Bern, Stuttgart, Wien: Huber, 1973.
- /Gol-1999/ Goldstein, B.: Sensation & Perception. Pittsburgh: Brooks/Cole 1999.
- /GöF-2002/ Göbel, M.; Friesdorf W.: Evaluation of input devices for 3D-navigation in medical applications. Institute of Work Science and Product Ergonomics. Berlin University of Technology.
- /Haa-1998/ Haasenritter, M.: Konstruktion eines Geräts zur haptischen Darstellung von Freiformflächen - Servogesteuerte Taumelscheibe mit Ansteuerung durch ein Programm in C-Code über RS232-Schnittstelle und Microcontroller. Diplomarbeit an der Universität Kaiserslautern, Fachbereich MV, Lehrstuhl für Rechneranwendung in der Konstruktion (RKK) 1998
- /Hac-1994/ Hack, G.: Prinz Eisenherz. Auto Motor Sport. Nr. 9 (1994), S. 158-161.
- /HAS-2001/ Verbundprojekt HASASEM: Haptisches Sensor-Aktor-System: Virtuelle Rea-

- lität und Haptik / Haptisches Sensor-Aktor-System / Nutzungsperspektiven. Bochum, Würzburg, Mainz, Regensburg: Verbundprojekt 2001.
URL: www.hasasem.de,
zuletzt überprüft am 27.03.2003.
- /HaY-2002/ Hayward, V.; Yi, D.: Change of height: An approach to the haptic display of shape and texture without surface normal. Center for intelligent machines. McGill University. Montreal. Canada 2002.
- /Hec-2000/ Heckbert, P.: A History of Computer Graphics. URL: <http://www-2.cs.cmu.edu/afs/andrew/scs/cs/15-463/99/pub/www/notes/history.pdf>,
zuletzt überprüft am 30.12.2003.
- /Hen-1898/ Henri, V.: Über die Raumwahrnehmung des Tastsinnes. Berlin, v. Reuther & Reichard, 1898.
- /Hil-1967/ Hill, J. W.: The Perception of Multiple Tactile Stimuli. Stanford Electronics Laboratory Technical Report Nr. 4823-1. Stanford University, USA, 1967.
- /Hip-1934/ Hippus, R.: Erkennendes Tasten als Wahrnehmung und als Erkenntnisvorgang. München: Beck, 1934.
- /HIT-2003a/ Hitec RCD: Specification of HS-5925MG Servo.
URL: www.hitecrd.com/Servos/hs5925.pdf, zuletzt überprüft am 25.05.2004.
- /HIT-2003b/ Hitec RCD: Digital Servo Programmer: Instruction Manual.
URL: www.hitecrd.com/Support/Manuals/HFP-10.pdf, zuletzt überprüft am 25.05.2004.
- /Hof-1998/ Hoffmann, J.: Verfahren des Rapid Prototyping - Möglichkeiten und Grenzen. URL: http://mciro.nw.tu-dresden.de/pas/pazat_lit/for_ber/1998/1998-03.pdf
zuletzt überprüft am 30. 12. 2003.
- /Hof-2001/ Hoff, M.: Gerät zur haptischen Darstellung von Freiformflächen - Konstruktive Integration eines Eingabegerätes. Studienarbeit an der Universität Kaiserslautern, Fachbereich MV, Lehrstuhl für Rechneranwendung in der Konstruktion (RKK) 2001
- /HoL-1992/ Hoschek, J.; Lasser, D.: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. Stuttgart, Teubner Verlag, Zweite Auflage 1992.
- /How-2002/ Howe, R.: Introduction to haptic display: Tactile display. Harvard University. USA.
URL: haptic.mech.nwu.edu/TactileDisplay.html,

- zuletzt überprüft am 26.03.2003.
- /Hun-1954/ Hunter, I.: Tactile-kinesthetic perception of straightness in blind and sighted humans. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* (1960) Nr. 6, S. 149/154.
- /Hur-1998/ Hurmuzlu, Y.: Pneumatic haptic interface. Master arm.
URL: cyborg.seas.smu.edu/syslab/PHI/MasterArm.html,
zuletzt überprüft am 26.03.2003.
- /IAO-2003/ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation: Virtual and Interactive Environments for Workplaces of the Future
URL: <http://www.view.iao.fraunhofer.de/description.html>,
zuletzt überprüft am 27.02.2004.
- /Imm-2001/ Immersion Corporation: Impuse Engine 2000.
Immersion Corporation. San Jose, USA. 2001
URL: http://www.immersion.com/industrial/docs/iesdk4_2.pdf,
zuletzt überprüft am 28.04.2004.
- /Imm-2003/ Immersion Corporation: TouchSenseTechnology - Laparoscopic Impulse Engine. Immersion Corporation. San Jose. USA.
URL: http://www.immersion.com/medical/docs/virt_lap.pdf,
zuletzt überprüft am 28.03.2003.
- /Imm-2004/ Immersion Corporation: TouchSenseTechnology - Cyber Grasp.
Immersion Corporation. San Jose, USA 2004
URL: http://www.immersion.com/3d/products/cyber_grasp.php,
zuletzt überprüft am 28.04.2004.
- /Irt-2002/ Irtel, H.: Vorlesung: Psychologie und Wahrnehmung. Teil: Hautsinne.
URL: www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/lehre/vorlesung/folien/1/v12hautsinne.pdf,
zuletzt überprüft am 24.03.2003.
- /IYN-2001/ Iwata, H.; Yano, H.; Nakaizumi, F; Kawamura R.: Project FEELEX: Adding haptic surface to graphics.
URL: http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/vrlab_web/publish/PDF/SIGGRAPH01.pdf,
zuletzt überprüft am 27.04.2004.
- /JaB-1999/ Jansson, G., Billberger, K.: The PHANToM Used without Visual Guidance. *Proceedings of the First PHANToM Users Research Symposium (PURS99)*,

- May 21-22, 1999, Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg, Germany. Ebenso: URL: <http://mbi.dkfz-heidelberg.de/purs99/proceedings/jansson.pdf>.
- /JPC-1999/ Jansson, G., Petrie, H., Colwell, C., Kornbrot, D., Fanger, J., König, H., Billberger, K., Hardwick, A., Furner, S.: Haptic virtual environments for blind people: exploratory experiments with two devices. *Int. Journal of Virtual Reality*, 4 (1), 10 - 20, (1999).
- /JuS-2002/ Jungmann, M.; Schlaak, H. F.: Taktiles Display mit elektrostatischen Polymeraktoren. 47. Internat. Kolloquium TU Ilmenau 2002. Auch: thor.emk.e-technik.tu-darmstadt.de/forsch/publikationen/mj_ilm02.pdf (zuletzt überprüft am 30. 12. 2003).
- /Kal-1993/ Kalawsky, R.S.: *The science of virtual reality and virtual environments. A technical, scientific and engineering reference on virtual environments.* Wokingham, England: Addison-Wesley 1993.
- /Kat-1925/ Katz, D.: *Der Aufbau der Tastwelt.* Zeitschrift für Psychologie Ergänzungsband 11 (1925).
- /KiD-2000/ Kirkpatrick, A.E.; Douglas, S.A.: A shape recognition benchmark for evaluating usability of a haptic environment. *Lecture Notes in Computer Science Vol. 2058* (2001), S.151/156.
- /KKL-1994/ Kappers, A.; Koenderink, J.; Lichtenegger, I.: Haptic identification of curved surfaces. *Perception & Psychophysics* (1994) Vol. 56 (1), S. 53/61, Psychonomic Society, Inc. 1994.
- /KLL-1993/ Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Lederman, S. J., Wake, H., & Fujita, N. Haptic perception of objects and their depictions. *Perception & Psychophysics*, (1993) Vol. 54, S. 170/178.
- /KLR-1993/ Klatzky, R.; Lederman, S.; Reed, C.: Constraints on haptic integration of spatially shared object dimensions. *Perception* 22 (1993), S. 723/743.
- /KoD-1992/ Koenderink, J.J.; van Doorn, A.J.: Surface shape and curvature scales. *Image and vision computing* Vol. 10 (1992) Nr. 8, S. 557/565.
- /Kur-1997/ Kurze, M.: *Interaktion Blinder mit virtuellen Welten auf der Basis von zweidimensionalen taktilen Darstellungen..* Institut für Informatik. Universität Berlin.
URL: www.page.inf.fu-berlin.de/~kurze/publications/se_97/SE97_10.html, zuletzt überprüft am 26.03.2003.

- /LPD-2002/ Lawrence, D.; Pao L.; Dougherty A.: Haptic Interface. Research at the University of Colorado. USA.
URL: osl-www.colorado.edu/Research/haptic/hapticInterface.shtml,
zuletzt überprüft am 28.03.2003.
- /Lut-2002/ Lutz, M.: Bézier, Coons und andere Namen.
URL: <http://www.fh-friedberg.de/users/mlutz/JavaKurs/applets/Bezier/Bezier-Historie.htm>
zuletzt überprüft am 20.05.2003.
- /LYN-2002/ Lynxmotion Inc.: Servo Controller Information. Lynxmotion Inc. Pekin. USA.
URL: www.lynxmotion.com/ssc.htm, zuletzt überprüft am 28.03.2003.
- /Mei-1999/ Meier, K.: Sehendes Silizium – Hoffnung für Blinde. Universität Heidelberg.
URL: www.uni-heidelberg.de/uni/presse/ruca99_2/silizium.htm, zuletzt überprüft am 26.03.2003.
- /Min-1995/ Minsky, M.: Computational Haptics: The Sandpaper System for Synthesizing Texture for a Force-Feedback Display. Promotionsschrift am Massachusetts Institute of Technology 1995.
- /MoG-1997/ Modhrain, O', M.S.; Gillespie, B.: The Moose: A Haptic User Interface for Blind Persons
URL: <http://ccrma.stanford.edu/~sile/papers/www6-paper.html>
zuletzt überprüft am 25. Mai 2004.
- /Mor-1998/ Moreyra, B.: The High-Bandwidth Force Display.
URL: http://brl.ee.washington.edu/Research_Active/Haptics/Device_01_HBFD/HBFD.html
zuletzt überprüft am: 27. Mai 2004.
- /Mue-1998/ Müller, R.: Entwicklungspsychologische Theorien als Grundlage für die Wahrnehmungsförderung in der Sonderpädagogik. Wissenschaftliche Hausarbeit zur ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Sonderschulen. Pädagogische Hochschule Heidelberg, FB Sonderpädagogik, Frühjahr 1998
URL: <http://www.hausarbeiten.de/rd/faecher/hausarbeit/pap/2922.html>
zuletzt überprüft am 22. Mai 2004.
- /NMK-1996/ Noma, H.; Miyasato, T.; Kishino, F.: A palmtop display for dextrous manipulation with haptic sensation. ATR Communication Systems Research Laboratories. Kyoto. Japan.
URL: www.acm.org/sigchi/chi96/proceedings/papers/Noma/nh_txt.html,

- zuletzt überprüft am 26.03.2003.
- /NWU-2002/ Northwestern University: Haptics Photo Gallery. Haptics Community Web Page.
URL: haptic.mech.nwu.edu/intro/gallery/index.html,
zuletzt überprüft am 27.05.2004.
- /Obi-2001/ Obitz, F.: Haptische Wahrnehmung und Tastsinn. Universität Essen.URL:
www.uni-essen.de/industrial-design/unsichtbar/forschung/literaturausw3.htm,
zuletzt überprüft am 27.03.2003.
- /Pri-2004/ Pries, M.: Geschichte des CAD.
URL: <http://www.tfh-berlin.de/~pries/Vorlesungen/CAD1/Einleitung.pdf>
zuletzt überprüft am 27.04.2004.
- /Pry-2002/ Prytherch, D.: So what is haptics anyway? Reseach Issues in Art Design and Media (2002) No. 2
URL: <http://www.biad.uce.ac.uk/research/riadm/issueTwo/riadmIssue2.pdf>
zuletzt überprüft am: 18.05.2003.
- /RaH-1994/ Ramstein, C.; Hayward, V.: The Phantograph - a Large Workspace Haptic Device for a Multi-Modal Human-Computer Interaction
CHI'94, Conference on Human Factors in Computing Systems ACM/SIGCHI Companion-4/94. S. 57-58; ebenso:
URL: <http://www.cim.mcgill.ca/~haptic/pub/CR-VH-CHI-94.pdf>
zuletzt überprüft am 28. Mai 2004.
- /Rub-1936/ Rubin, E.: Haptische Untersuchungen. Acta Psychologica Band I (1936), S. 285/380.
- /Sat-2000/ Sattel, M.:Gerät zur haptischen Darstellung von Freiformflächen - Technische Konzeptvalidation und Evolution. Studienarbeit an der Universität Kaiserslautern, Fachbereich MV, Lehrstuhl für Rechneranwendung in der Konstruktion (RKK) 2000
- /Sch-2001/ Scharf, A.: Simulation auf dem Vormarsch. InformationWeek (2001).
URL: www.informationweek.de/print.php3?/channels/channel106/011328.htm,
zuletzt überprüft am 27.03.2003.
- /Schn-2001/ Schneider, J.: Konstruktive Exploration räumlicher Daten. Dissertation. Fakultät für Informatik. Universität Magdeburg.
URL: isgwww.cs.uni-magdeburg.de/~josch/Diss/DissIVZ.html,
zuletzt überprüft am 27.03.2003.

- /Sen-2004/ Homepage der Firma SensAble,
URL: www.sensable.com, bzw.
<http://www.sensable.com/images/products/3.0%20dof%20large.jpg>
zuletzt überprüft am 22. Mai 2004.
- /SSM-1998/ Shinohara, M.; Shimizu, Y.; Mochizuki, A.: Three-Dimensional Tactile Display for the Blind. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 6, No. 3, September 1998.
- /Sym-2000/ Symietz, M.: Echtzeitbasierte Generierung und Verlegung von Leitungsobjekten in einem digitalen Fahrzeugmodell mit einem Virtual-Reality-System. Dissertation. Technische Fakultät. Universität Bielefeld 2000.
- /Tho-2000/ Thompson, T.: Summaries of Haptic Devices.
URL: <http://www.cs.utah.edu/~tthompo/haptics.html>
zuletzt überprüft am 25.05.2004.
- /VDA-1999/ VDA-Empfehlung 4955: Umfang und Qualität von CAD/CAM-Daten. Hrsg. Verband der Deutschen Automobilindustrie. Aug. Sept. 1999. Ebenso:
URL: http://www.vda.de/de/vda/intern/organisation/abteilungen/downloads/log_vda_4955_de.pdf
zuletzt überprüft am 18.05.2003.
- /Ver-2002/ Verzeal, T.: Survey of Haptic Interfaces: Force Feedback. Commercially available interfaces.
URL: home-3.12move.nl/~sh290334/dbase_force/,
zuletzt überprüft am 25.05.2004.
- /Web-1846/ Weber, E. H.: Tastsinn und Gemeingefühl. Handwörterbuch der Physiologie, Vol 3. Braunschweig: Verlag Vieweg 1846, S. 481/588
- /WHC-1997/ Wilhelmsen, K. C.; Hurd, R. L.; Couture, S.: Tele-Robotic/Autonomous Control Using Control Shell
URL: http://www.llnl.gov/automation-robotics/ans_final.html
zuletzt überprüft am 28. Mai 2004.
- /Wik-2004/ Wikipedia: Die freie Enzyklopädie. Stichwort: Benutzerschnittstelle
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Benutzerschnittstelle>
zuletzt überprüft am 28. Mai 2004.
- /Win-2002/ Windelberg, D.: Konstruktion und Vergleich von Freiformflächen
URL: http://www-ifm.math.uni-hannover.de/~windelberg/search/vergleich_freiform/

- zuletzt überprüft am 3. Juni 2004.
- /WLH-2002/ Wagner, C.; Lederman, S.; Howe, R.: A Tactile Shape Display Using RC Servomotors
URL: http://biorobotics.harvard.edu/research/tactile_display.html
zuletzt überprüft am 25. Mai 2004.
Ebenso: 10th Annual meeting of Haptics Interfaces for Teleoperator and Virtual Environment Systems, Satellite meeting of the Annual IEEE VR02 meeting. Orlando/USA, 24./25. März 2002.
- /Wor-2004/ Enzyklopädie der Uhrmacherei: Lignes.
URL: http://www.worldtempus.com/pop_up_lex.php?lang=1&lex_id=7853
zuletzt überprüft am 23. März 2004.
- /YHK-1996/ Yokokohji, Y.; Hollis, R.; Kanade, T.: WYSIWYF display. A visual / haptic interface to virtual environment.
URL www-2.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/project/msl/www/virtual/virtual_desc.html,
zuletzt überprüft am 26.03.2003.
- /Zil-1995/ Zilles, C.: Haptic Rendering with the Toolhandle Haptic Interface. Master-These am Massachusetts Institute of Technology Mai 1995
URL: <http://www.cs.wisc.edu/~zilles/thesis.ps.gz>
zuletzt überprüft am 20.05.2003.
- /Zim-2001/ Zimmermann, P.: Virtual Reality – Forschung und Anwendung bei Volkswagen. VR-Labor der Konzern-Forschung Wolfsburg, 2001
URL: <http://www.ifmi.org/old/full/research/sonderheft/shvirt7.pdf>
zuletzt überprüft am 25. Mai 2004.
- /Zwi-1998/ Zwisler, R.: Virtuelle Realität und die Rolle von Haptik. Institut für Psychologie. Universität Regensburg. URL: www.zwisler.de/scripts/haptics/haptics.html (Teil: Angereicherte Realitäten), zuletzt überprüft am 26.03.2003.

Glossar

- Aktuator** Bauteil, das elektrische Signale in nichtelektrische Größen transformiert.
- COM-Port** Abkürzung für „COMmunication Port“; Bezeichnung für die seriellen Schnittstellen im PC.
- DMU** Digital Mockup (dt.: Rechnerinterner Zusammenbau); Zusammenbau einer komplexen Baugruppe im Rechner zu Montagetests, Kollisionstests, Funktionstests.
- Haptik** die; - [zu griech. háptein = berühren] (Psych.): Lehre vom Tastsinn
- Rapid Prototyping Verfahren:**
Verfahren, die auf CAD-Daten basierend direkt physikalische Modelle generieren. Im Vordergrund steht der aufbauende Prozeß, was diese Verfahren grundsätzlich vom abtragenden Charakter konventioneller Modellbauverfahren unterscheidet. Häufigste Verfahren: Stereolithographie (SL), Fused Deposition Modeling (FDM), Selektives Laser-Sintern (SLS), Laminated Object Manufacturing (LOM)
- SMD** Surface Mounted Device; Elektronische Bausteine, die auf eine direkt mit Leiterbahnen versehene Oberfläche gelötet werden. Gegensatz zu dieser Technik ist die klassische Einbauweise von der Unterseite der Platine her. Hier werden Löcher in die Platine gebohrt und die Bauteile auf der Unterseite verlötet.
- taktil** <Adj.> [lat. tactilis = berührbar, zu: tactum, siehe Takt] (Biol.): den Tastsinn betreffend, mithilfe des Tastsinns [erfolgend]
- Voxel** Kunstwort aus den englischen Wörtern „volume“ und „picture element“ (pixel). Voxel beschreiben ebenfalls 3D-Objekte. Ähnlich Pixel, aber in Form von kleinen Würfeln, beschreiben sie jede Objektform durch Anordnung von kleinen (gleich großen) Elementen. Unregelmäßige Formen lassen sich damit beliebig genau ausdrücken (z.B. Schädel).

Lebenslauf

Name: Jörg Edmund Paul Blaurock
Anschrift: Engerndorfer Strasse 12
83229 Aschau / Chiemgau

Geburtsdatum: 5. April 1966
Geburtsort: Augsburg, Regierungsbezirk Schwaben, Bayern

Familienstand: ledig

Schulbildung:

1972 - 1976 Grundschulbesuch in Landstuhl, Pfalz, und Troisdorf, Nordrhein-Westfalen
1976 - 1985 Besuch des Gymnasiums „Zum Altenforst“ in Troisdorf

Studium:

1985 - 1988 Studium des Allgem. Maschinenbaus an der TU Darmstadt (damals TH)
1988 - 1992 Studium des Allgem. Maschinenbaus an der Universität Karlsruhe (TH)

Studienbegleitende Praktika:

1985 Grundpraktika bei Dynamit Nobel AG (hte: Feldmühle AG) Troisdorf/NRW und LINCK Holzverarbeitungstechnik GmbH, Oberkirch/Baden
1986 Giessereipraktikum bei LINCK HVT GmbH, Oberkirch
1988 Fachpraktikum bei AUDI AG, Neckarsulm, Motorenentwicklung

Studien- und Diplomarbeiten:

1989/1990 AUDI AG, Neckarsulm: „Auswirkung von Verbrennungsausfall auf Abgasemissionen am Beispiel eines V8-Motors“
1991/1992: Forschungszentrum Informatik, Universität Karlsruhe (TH): „Entwicklung einer Methodik zur Konzeption organisatorischer Ablaufstrukturen“

Weiterbildung:

SS 1993 Interdisziplinäre Frankreichstudien an der Universität Freiburg, Breisgau
1993 - 1995 Wirtschaftswissenschaftliche Studien an der TU München

Berufstätigkeiten:

1992: Ingenieur am Forschungszentrum für Informatik der Universität Karlsruhe
Mitarbeit im Projekt PRISMA (Planung rechnergestützter Informationssysteme im Maschinenbau)

1993: Ingenieur bei der Fa. Flösch, Teningen: Untersuchung von BHKW-Abgasen

1. Nov. 1995 - Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Rechneranwendung in der Konstruktion im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Kaiserslautern:
Mitarbeit in der Lehre; Teilnahme am Forschungsprojekt FIORES; Erforschung der haptischen Wahrnehmung rechnerinterner Freiformflächen