

2 Biologischer und technischer Hintergrund

2.1 Begriffsbestimmungen

In dieser Arbeit werden verschiedentlich Begriffe aus der Alltagssprache, der Psychologie und der Informatik verwendet. Während die meisten Informatik-Fachbegriffe wohldefiniert sind, sind Alltagswörter in ihrer Bedeutung häufig nicht genau festgelegt, und Begriffe aus den Kognitionswissenschaften wechseln ihre Bedeutung vielfach mit ihrem Benutzer. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt die später verwendeten Begriffe definiert. Die angegebene Begriffsbestimmung schränkt die Bedeutung eines Begriffs in der Umgangssprache ein, ohne den Sinn zu entstellen. Kurzdefinitionen weiterer verwendeter Begriffe finden sich im Glossar.

Als wichtigstes Organ des Tastsinns wird oft die Haut betrachtet. Die Wahrnehmung mechanischer Reize über Rezeptoren in der Haut wird als *taktile Wahrnehmung* bezeichnet. Reize, die über die Haut wahrgenommen werden, also taktile Stimuli, treten beim Tasten aber so gut wie nie ohne gleichzeitige Stimulierung der Mechanorezeptoren in Muskeln und Gelenken auf. Die Perzeption dieser Reize nennt man *kinästhetische Wahrnehmung*. Die physiologischen Unterschiede und deren Bedeutung für (computergenerierte) bildliche Darstellungen werden im Abschnitt 2.2, Seite 11, erläutert. Die Kombination aus taktilen und kinästhetischen Sinneseindrücken ist die *haptische Wahrnehmung*. Daher wird (nach [MATLIN & FOLEY 91, S. 376]) allgemein die Wahrnehmung von Objekten durch Tasten haptische Wahrnehmung genannt. Da beim Tasten ohnehin stets taktile *und* kinästhetische Reize gemeinsam auftreten und in ihrer Gesamtheit den Tasteindruck bilden, ist es sinnvoll, von der haptischen Wahrnehmung zu sprechen, wenn es um allgemeine Tasthandlungen und -wahrnehmungen geht.

„*Grafik*“ ist der Oberbegriff für zweidimensionale (flächige) Darstellungen verschiedener Art, also für Diagramme (grafische Darstellungen abstrakter Sachverhalte), Bilder (flächige, meist farbige Darstellung insbesondere gegenständlicher Szenen, s.u.) und Zeichnungen. Grafiken definieren sich *nicht* durch ihre Wahrnehmungsmodalität, vielmehr können Grafiken sowohl visuell als auch gegebenenfalls haptisch wahrgenommen werden. Diese Aussage ändert nichts daran, daß die meisten Grafiken für die visuelle Wahrnehmung produziert werden. Auf die Unterschiede visueller und haptischer Grafiken wird im Kapitel 3 eingegangen.

Der Begriff *Bild* wird in verschiedenen Bedeutungen verwendet. Zunächst ist ein Bild „das, was man meist mit Farben und besonders auf künstlerische Weise auf eine Fläche (besonders auf Papier) malt“ [MS ENCARTA 97]. Ausdrucksmittel sind verschiedenfarbige Flächen oder Farbverläufe, die sich an den Farben des Abgebildeten und deren Wirkung orientieren, beispielsweise Fotos und Gemälde. Außerdem wird der Terminus auch metaphorisch verwendet: Man spricht von einem Bild als der „Vorstellung, die man sich von etwas macht oder machen kann“ [MS ENCARTA 97]. Hier wird schon am Begriff deutlich, daß die Vorstellung (das „mentale Modell“ (s.u.)) eines Gegenstands eng mit der bildlichen Darstellung dieses Gegenstands verknüpft ist. Dies trifft insbesondere für die hier betrachteten „informierenden Bilder“ [WEIDENMANN 94A] zu, also solchen, deren Zweck nicht in erster Linie künstlerisch ist.

Eine *Zeichnung* ist eine linienhafte Darstellung. Linien einer Zeichnung können sich an optischen Eigenschaften (Schatten, Überdeckungen) orientieren oder auf anderen Eigenschaften, auch abstrakten Zusammenhängen, beruhen. In dieser Arbeit werden nur Zeich-

nungen betrachtet, die reale Gegenstände bzw. deren Modelle darstellen, nicht jedoch solche, die auf abstrakten Zusammenhängen, z.B. Hierarchien oder Diagrammen im mathematischen Sinne beruhen.

Eine *Darstellung* ist die Präsentation gewisser (oder aller) Eigenschaften des Dargestellten in einer bestimmten Darstellungsform. Gegenstände, Szenen und Zusammenhänge können z.B. verbal oder grafisch dargestellt werden. Die Darstellungsform richtet sich vor allem nach dem Zweck der Darstellung. Hier werden grafische Darstellungen als zweidimensionale Abbildungen räumlicher Modelle verwendet. Rezipient der Darstellung ist in aller Regel ein Mensch.

Als *flächiges Medium* wird hier auch das Medium für taktile Grafiken betrachtet (z.B. Schwellpapier), obwohl im eigentlichen Sinn erst die dritte Dimension eine Linie überhaupt erst tastbar macht. Wenn die Ausdehnung einer Grafik in die dritte Dimension im Verhältnis zu ihrer Ausdehnung in die beiden anderen Dimensionen sehr klein ist und wenn das absolute Maß dieser Ausdehnung einen bestimmten Schwellwert nicht überschreitet, wird die Grafik hier noch als zweidimensional bezeichnet. Andere Definitionen, wie z.B. über den Zweck der Linien (nämlich einen 2D-Verlauf zu charakterisieren), wären ebenfalls denkbar.

Als *Modell* bezeichnet man im allgemeinen Sprachgebrauch ein Vorbild, Muster, den Entwurf von Gegenständen und auch gedankliche Konstruktionen [LEXIROM 96]. Sinnvollerweise definiert man den Modellbegriff über seine Funktion und Eigenschaften:

Ein Modell hat die *Funktion*, bestimmte Eigenschaften des Modellierten, die am Gegenstand selbst nicht handhabbar sind, einer Untersuchung oder Manipulation zugänglich zu machen.

Die *Eigenschaften* des Modells richten sich nach eben dieser Funktion: Ein Modell erfüllt seine Funktion genau dann, wenn die am Gegenstand selbst nicht zugänglichen Eigenschaften identisch mit denen des Modells sind (oder wenn leicht von den Modell- auf die Gegenstandseigenschaften geschlossen werden kann). Dies kann nur erreicht werden, wenn andere, für die geplante Untersuchung oder Manipulation nicht relevante, Eigenschaften des Modells sich grundlegend von denen des Gegenstands unterscheiden.

Beispiel: Ein Kalottenmodell eines chemischen Moleküls hat die Funktion, die relative Lage der Atome im Molekül zueinander zu verdeutlichen. Der Gegenstand selbst (das Molekül) ist der Beobachtung nicht zugänglich, weil er zu klein ist. Die Atome werden im Modell durch Kugelabschnitte (Kalotten) dargestellt, die wesentlich größer sind als die Atome, die sie darstellen. Durch die mechanische Konstruktion der Kalotten und ihrer Verbindungen haben die Kugelabschnitte (Atome) im modellierten Molekül die gleichen räumlichen Relationen wie im realen Molekül. In dieser Eigenschaft stimmen Modell und Gegenstand also überein, nicht jedoch in nahezu allen anderen. Ein Modell, das alle Eigenschaften des modellierten Gegenstands hätte, wäre von diesem Gegenstand nicht zu unterscheiden und daher auch nutzlos, weil es genauso unzugänglich wäre wie dieser.

In dieser Arbeit wird der Begriff „Modell“ mit drei Bedeutungen verwendet, die mit der obigen Definition und dem Gebrauch in den entsprechenden Wissenschaftsdisziplinen (Naturwissenschaften, Kognitionswissenschaften, Geometrie) verträglich sind:

1. In der *Computergrafik* ist (wie in den Naturwissenschaften und der Mathematik [LEXIROM 96]) das 3D-Modell eines Gegenstands (oder einer Szene) eine formale Beschreibung von Form, Größe und der Lage von geometrischen Primitiven, z.B. Polygonen. Herkömmliche Renderer erzeugen aus diesen Modellen (Beschreibungen) foto-

realistische Bilder (Grafiken) auf dem Bildschirm oder anderen flächigen Ausgabe-medien [FOLEY ET AL. 93].

2. In den *Kognitionswissenschaften* spricht man von einem „mentalen Modell“ und meint damit die Vorstellung eines Menschen von einem Gegenstand und dessen Eigenschaften. Bei diesem Gegenstand kann es sich sowohl um ein reales Objekt wie um abstrakte Zusammenhänge handeln (siehe auch Unterkapitel 3.4).
3. Schließlich werden im Rahmen der Untersuchungen mit Versuchspersonen *Kunststoffmodelle* realer Gegenstände (z.B. Spielzeugautos) verwendet, womit die im alltäglichen Sprachgebrauch häufigste Bedeutung des Modellbegriffs zum Einsatz kommt

2.2 Physiologische Grundlagen des Tastsinns

Der menschliche Tastsinn ist der einzige Sinn, der *kein eigenes Organ* hat [ZIMMERMANN 95]. Tasten geschieht mit verschiedenen Rezeptoren, die in der gesamten Körperoberfläche (Haut) und innerhalb des Körpers vorkommen. Man faßt diese Rezeptoren und ihre Wahrnehmungen unter dem Begriff „Somatosensorisches System“ zusammen [SCHMIDT 85]. Wie aus Tabelle 2-1 ersichtlich ist, bildet das somatosensorische System einen Teil des somatovisceralen Systems. Dem gesamten somatovisceralen System werden prinzipiell die gleichen Rezeptortypen zugewiesen, d.h. für die im klassischen Sinne taktile Wahrnehmung über die Haut werden die gleichen Rezeptoren verwendet wie für Wahrnehmungen des Zustandes der inneren Organe. Dies legt die Vermutung nahe, daß die Signale der Rezeptoren auch auf vergleichbare Weise verarbeitet werden. Der Tastsinn ist also ein Nahsinn nicht nur in dem Sinne, daß er nur Reize aus der unmittelbaren Nähe des Tastenden erfassen kann, sondern auch insoweit, als seine Rezeptoren auch für die Wahrnehmung der eigenen Befindlichkeit zuständig sind, also für den Körper selbst.

Wie noch gezeigt werden wird, spielt bei der Wahrnehmung von Zeichnungen nicht nur die taktile Reizung der Rezeptoren der Haut an den Fingern eine Rolle, sondern auch die Stimuli der Rezeptoren in Muskeln und Gelenken. Die tastende Wahrnehmung hat also eine ganz persönliche Qualität: Einerseits nimmt die tastende Wahrnehmung der Umwelt ihren Platz innerhalb der körperlichen Wahrnehmung ein. Andererseits kann die tastende Wahrnehmung mit niemandem geteilt werden, weil (insbesondere bei Details) immer nur *ein* Tastender den zu ertastenden Gegenstand abtasten kann, da hierfür der direkte Körperkontakt nötig ist. Diese Tatsache wird von einigen Systemen (AudioTouch [LÖTZSCH 94] und TGuide [FISCHER ET AL. 96]) verwendet, die aus der Position des abtastenden Fingers und dem der abgetasteten Grafik unterlegten Datenmaterial Aktionen bzw. Informationen für den Benutzer ermitteln.

Wie Tabelle 2-1 zeigt, gibt es neben Mechanorezeptoren noch drei weitere Typen von Rezeptoren, die zum somatovisceralen System gehören, sich aber für die Mensch-Computer-Interaktion nicht oder nur sehr bedingt eignen:

- **Thermorezeptoren:** In [DEBAETSELIER ET AL. 95] wurde gezeigt, daß Konstruktion und Bau eines auf Wärme beruhenden Ausgabegeräts prinzipiell möglich ist. Der apparative Aufwand, insbesondere zur schnellen Aufheizung und Abkühlung einzelner Regionen der Anzeigefläche ist enorm. Der größte je gebaute Prototyp bestand aus einer 12*12-Matrix von Thermoelementen. Die erzielten Wahrnehmungsergebnisse beim ertasten waren eher unbefriedigend: Da Wärme ohnehin meist als Temperaturunterschied wahrgenommen wird, muß zum Verfolgen einer Linie diese stets *überquert* werden, damit sie als solche wahrgenommen wird. Damit ist eine Wahrnehmung der Linienführung sehr erschwert. Entsprechendes gilt für Punkte, z.B. Braillezeichen.

Gegenwärtig wird der Ansatz des thermischen Bildgenerators nicht weiter verfolgt. Trotzdem könnte es sich lohnen, das Forschungsgebiet im Auge zu behalten: Um gewisse Effekte bei der tastenden Wahrnehmung zu erzielen, z.B. die Illusion von Feuchtigkeit auf einer Oberfläche, könnte die steuerbare Temperatur von Flächen im Falle ihrer Verfügbarkeit durchaus eingesetzt werden.

- Chemorezeptoren kommen in der Haut nur sehr vereinzelt vor. Da es weder geeignete Ausgabegeräte noch einen „Zeichenvorrat“ für die Interaktion gibt, scheiden diese Rezeptoren für die Kommunikation aus, wenn man von vereinzelt Versuchen absieht, den Geruchssinn, der nicht zum somatovisceralen System gehört, in die MCI einzubeziehen. Außerdem sind die Wahrnehmungen chemischer Eigenschaften eher unbewußter Natur, so daß sie zur Informationscodierung unbrauchbar sind.
- Nozizeptoren haben in erster Linie eine *Schutzfunktion* für den Körper. Ihre Reizung ist für den Menschen unangenehm, so daß sie (falls sie für die MCI benutzt würden) die Interaktion schmerzhaft gestalten würden. Eine Desensibilisierung (z.B. durch häufige Reizung zum Zwecke der Kommunikation) der Nozizeptoren wiederum würde sie ihrer Schutzfunktion berauben. Außerdem gibt es auch für Nozizeptoren keinen Kommunikationsstandard.

Tabelle 2-1: Einordnung des Tastsinnes in das sensorische System (hier das somatoviscerale System, nach [SCHMIDT 85])

Somatoviscerale Sensibilität		
Somatosensorisches System (<i>Tastsinn</i>)		Viscerale Sensibilität
Oberflächensensibilität	Tiefensensibilität	„Viscera“ (Magen, Leber, Herz, ...)
Haut (behaart und unbehaart)	Muskeln, Sehnen und Gelenke	
↓	↓	↓
Rezeptor	Beispiele für entsprechende Stimuli	
Mechanorezeptor	Druck, Berührung, Vibration, Spannung, Streckung, Kitzeln	
Thermorezeptor	Kälte, Wärme	
Chemorezeptor	pH-Wert, pO ₂ , Glucose	
Nozizeptor	Gewebeschaden, Hitze, Quetschung (Schmerz)	

2.2.1 Mechanorezeption der Haut

Für die haptische Mensch-Computer-Interaktion kommen also nur die Mechanorezeptoren in Betracht. Abbildung 2-1 zeigt die Lage der verschiedenen Mechanorezeptoren in der Haut. Die verschiedenen Arten von Mechanorezeptoren unterscheiden sich in ihren Eigenschaften (Reiztyp, Reizschwelle, Art der Entladung und der Adaption). Auf diese Eigenschaften und ihre Auswirkungen für die MCI, insbesondere für die Bilderkennung, wird in diesem Abschnitt eingegangen.

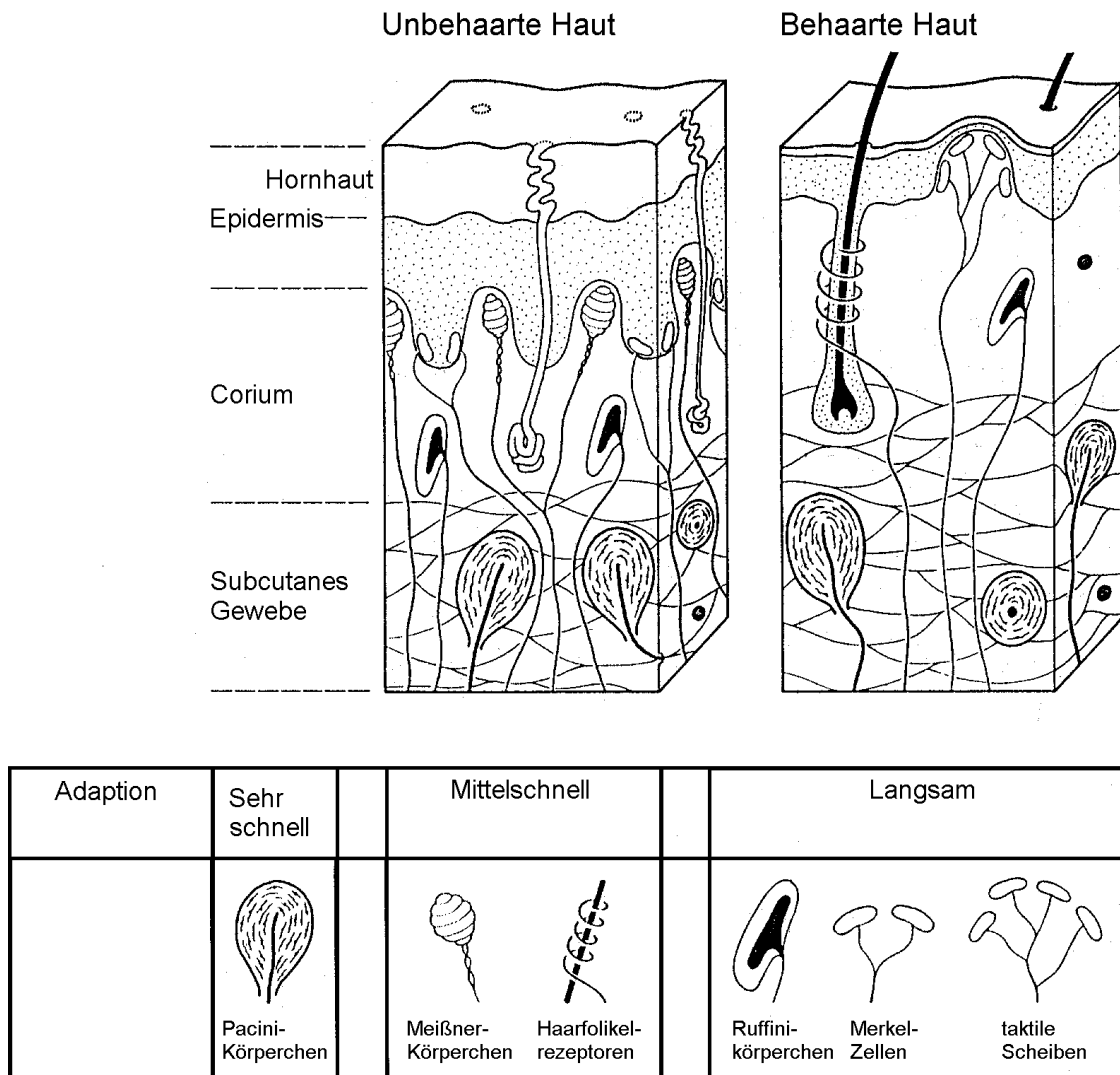


Abbildung 2-1: Schnitte durch die unbehaarte und die behaarte Haut (nach SCHMIDT 85).

Man unterscheidet verschiedene Reiztypen innerhalb der Klasse der mechanischen Stimuli, die wiederum an verschiedenen Hautstellen verschiedene Reizschwellen haben:

Einstülpungen werden an den Fingerspitzen schon in der Größenordnung von $6\ \mu\text{m}$ wahrgenommen, während in der Handfläche die Schwelle bei ca. $20\ \mu\text{m}$ liegt [SCHMIDT 85, S. 33]. Die Intensität eines Stimulus wird subjektiv von verschiedenen Personen unterschiedlich empfunden, jedoch individuell konstant zu verschiedenen Versuchszeitpunkten.

Die *räumliche Auflösung* wird als kleinster wahrnehmbarer Abstand zwischen zwei taktilen Stimuli gemessen. Dabei werden zwei stumpfe Nadeln zur Stimulierung verwendet, damit die Nozizeptoren nicht angeregt werden. Bei *gleichzeitiger* Stimulierung liegt die räumliche Auflösung bei ca. 2 mm an den Fingerspitzen und bei ca. 12 mm in der Handfläche. Bei *sukzessiver* Stimulierung liegt die Schwelle wesentlich darunter (1 mm an den Fingerspitzen und 4 mm in der Handfläche). Die räumliche Auflösung ist an den Fingerspitzen und im Gesicht (auch und vor allem an der Zunge) besonders hoch, an den Gliedmaßen und am Rumpf des Körpers jedoch sehr gering (50-100 mm). Daher sind Versuche, taktile Muster über computergesteuerte Stiftmatrix-Geräte beispielsweise auf die Rückenhaut zu übertragen, nicht erfolgreich verlaufen [ZAGLER & MAYER 93].

Vibrationen werden vom Tastsinn besonders gut erkannt. Abhängig von der Vibrationsfrequenz werden Amplituden in der Größenordnung von 1 μm noch wahrgenommen [SCHMIDT 85, S. 33; PHYSIOLOGIE 94, S. 558].

Susan Lederman [LEDERMAN 78] untersuchte ein Phänomen, das erstmals 1975 von Gordon und Cooper [GORDON & COOPER 75] beschrieben wurde: Sehr feine Oberflächenstrukturen sind besser zu ertasten, wenn man sie nicht unmittelbar, sondern durch ein dünnes Stück Papier oder Tuch (dünne Handschuhe) abtastet. Dies ist vermutlich eine Folge verstärkender Resonanzvibrationen der Zwischenmedien und davon, daß eine größere Anzahl Rezeptoren gleichzeitig stimuliert wird. Es stellt sich der Effekt einer „*taktilen Lupe*“ ein.

Entgegen landläufigen Vermutungen haben Blinde gegenüber Sehenden keine besseren taktilen Fähigkeiten. Sowohl ihre Reizschwelle als auch die räumliche Auflösung ihres Tastsinnes unterscheiden sich nicht von denen Sehender [SCHMIDT 85, S. 34].

Die verschiedenen Mechanorezeptoren unterscheiden sich in erster Linie in ihrer Adaptionzeit, d.h. der Zeitdauer, in der die Zellen Impulse an das Nervensystem senden:

- Pacini-Körperchen adaptieren sehr schnell, sie senden nach einem Druckstimulus nur ein bis zwei Impulse. Unabhängig von Stärke und Dauer des Stimulus wird jeweils ein Signal gesendet. Da diese Rezeptoren sehr schnell adaptieren, können sie kurz hintereinander auftretende Impulse einzeln erkennen und weiterleiten (bis 1000 Hz, größte Empfindlichkeit bei 200-300 Hz Impulsfrequenz [PHYSIOLOGIE 94, S. 558]). Sie eignen sich daher zur *Vibrationserkennung* und für die Feststellung von *Beschleunigung*.
- Meißner-Körperchen und Haarfolikelrezeptoren adaptieren etwas langsamer, in 50-500 ms. Sie reagieren nur auf *Änderungen* ihrer unmittelbaren Umgebung, also der umgebenden Hautzellen oder der Lage der ihnen zugeordneten Haare. Solange die Haare (z.B. des Handrückens) oder die Zellen der Epidermis in der neuen Position bleiben, findet keine Entladung der Zellen, d.h. keine Signalausendung statt. Deswegen werden sie auch *Geschwindigkeits-* oder *Berührungsrezeptoren* genannt.
- Merkel-Zellen, taktile Scheiben und Ruffini-Körperchen adaptieren sehr langsam. Sie entladen Stimulus-induzierte Aktionspotentiale auch, wenn der Druckreiz über einen langen Zeitraum beibehalten wird. Wegen ihrer langsamen Adaption dienen diese Rezeptoren zur Bestimmung von *Intensität* und *Dauer* von Druckreizen.

Die Adaptionzeit spielt im Rahmen der MCI insbesondere eine Rolle, wenn man taktile Ausgabegeräte betrachtet: Werden durch ein Gerät immer die gleichen Hautstellen gereizt, tritt bald eine generelle Adaption ein, und Reize werden nicht mehr weitergeleitet.

2.2.2 Direkte elektrische Reizung

Da die Reizauslösung und die Weiterleitung auf elektrochemischen und elektrischen Vorgängen beruhen, liegt der Versuch nahe, die Rezeptoren nicht mechanisch, sondern elektrisch zu reizen oder sie zu umgehen und die ableitenden Nerven mit elektrischen Reizen zu versorgen, die denen der Rezeptoren entsprechen. Versuche in dieser Richtung ergaben jedoch, daß die Reizung von Nerven oder Rezeptoren von außen über die Haut (ohne eine Nadelelektrode mechanisch direkt zum Nerv zu führen) extrem schwierig ist [BRÜMMER 95]:

- Die Leitfähigkeit der Haut ist individuell unterschiedlich und hängt zudem von der Hautfeuchtigkeit ab.

- Messungen der Empfindlichkeit verschiedener Regionen der Hand für elektrische Reizungen ergaben, daß sehr unempfindliche Regionen oft direkt neben empfindlichen liegen (z.B. Zeigefingerspitze und Zeigefingerbeere (-kuppe)). Das würde eine sehr genaue Positionierung der Elektroden erfordern.
- Die von außen induzierten Ströme erzeugen nur eine Wahrnehmung von Vibration oder „Kribbeln“; Deformation oder Reibung wie beim „echten“ Tasten werden nicht empfunden.
- Wegen der Adaption der Rezeptoren an die elektrische Reizung muß die Reizstärke während des Betriebs stetig erhöht werden.
- „Vagabundierende Ströme“ können gegebenenfalls zu Gesundheitsgefährdungen führen.

Der beschriebene Ansatz und seine Variationen werden wegen dieser Schwierigkeiten nicht weiter verfolgt. Die Leitfähigkeit der Haut kann allerdings zur Positionsbestimmung des tastenden Fingers auf einer Oberfläche benutzt werden [BRÜMMER 95].

2.2.3 Propriozeption

Werden ausschließlich Mechanorezeptoren der *Haut* gereizt, kann man aus diesen Reizen nahezu keinen Rückschluß über deren Ursprung ziehen. D.h. allein das Gefühl, an einer bestimmten Stelle der Haut Druck, Vibration oder ähnliches zu spüren, reicht nicht aus, um taktil verwendbare Informationen zu sammeln. Mindestens müssen noch die Lage- und Bewegungssensoren in *Muskeln* und *Gelenken* berücksichtigt werden, die bei der Wahrnehmung die Position der stimulierten Hautstelle in Relation zum Rest des Körpers feststellen. Diese Sensoren liefern auch Informationen über die Richtung, in der die stimulierende Kraft wirkt. Die Wahrnehmung solcher Kräfte über Mechanorezeptoren im Innern des Körpers nennt man *Propriozeption* [SCHMIDT 85, S. 46]. Beispielsweise kann mit Hilfe der Propriozeption festgestellt werden, ob ein auf der Handfläche wahrgenommener Druckreiz daher rührt, daß die Hand auf eine Tischplatte nach unten drückt, oder daß die Hand nach oben gegen ein Tablett drückt.

Der Positionssinn, der dem Menschen die Lage seiner Körperteile meldet, adaptiert praktisch nicht, man ist sich seiner Position stets bewußt. Für Blinde gilt dies im besonderen Maße, da sie zur Positionsbestimmung praktisch *nur* die Propriozeption einsetzen. Eine visuelle Kontrolle entfällt naturgemäß.

Für das aktive Tasten (siehe folgendes Unterkapitel 2.3, S. 16) werden die *Muskeln* nicht nur zur Bewegung des tastenden Fingers über die Oberfläche benötigt. Sie liefern auch Information über die Lageänderung des Fingers bezogen auf den Rest des Körpers und geben weiterhin Aufschluß über die Kraft, die aufgewendet werden muß, um den Finger gegen den Reibungswiderstand über die Oberfläche zu führen [McCLOSKEY & GANDEVIA 78]. Die Sinne, die diese Informationen liefern, heißen *Bewegungs- und Kraftsinn* [SCHMIDT 85, S. 48].

Bei der Darstellung realer Gegenstände als analoge haptische 2D-Repräsentationen kommt es darauf an, für die tastende Wahrnehmung möglichst Stimuli zu generieren, die den Reizen der realen Gegenstände entsprechen. Da der Tastsinn eine gegenüber dem visuellen Kanal geringere Bandbreite hat (siehe Tabelle 2-2), müssen sowohl Mechanorezeption als auch Propriozeption angesprochen werden.

Tabelle 2-2 Vergleich des neuronalen Informationsflusses (gesamte Kanalkapazität) mit dem Informationsfluß der bewußten Wahrnehmung (psychophysische Kanalkapazität) der fünf menschlichen Sinne (vgl. [SCHMIDT 85], [SCHULZ 94]).

Sinnesmodalität	Anzahl der Rezeptoren	gesamte Kanalkapazität [bit/s]	psychophysische Kanalkapazität [bit/s]
Gesichtssinn	$2 \cdot 10^8$	10^7	40
Hautsinn	10^7	10^6	5
Gehörsinn	$3 \cdot 10^4$	10^5	30
Geruchssinn	$7 \cdot 10^7$	10^5	1
Geschmackssinn	$3 \cdot 10^7$	10^3	1

In der Regel treten taktile Reize als Kombination mehrerer Einzelreize der verschiedenen Rezeptortypen auf. Erst im Laufe der weiteren Wahrnehmungsaktivität werden die Einzelreize (unbewußt) zu einer Gesamtwahrnehmung zusammengesetzt [PHYSIOLOGIE 94, S. 555; SCHMIDT 85, S. 50]. Es ist sogar möglich, daß der Positionssinn nicht ständig Impulse der zugehörigen Rezeptoren des propriozeptiven Systems erhält, sondern über einen „Speicher“ für die jeweils aktuelle Position verfügt, der nur bei Lageänderungen aufgefrischt bzw. aktualisiert werden muß.

2.3 Aktives und passives Tasten

Beim Ertasten von Information (reale räumliche Gegenstände, Braille oder Zeichnungen) kann man zwei Vorgehensweisen unterscheiden [SCHMIDT 85, S. 52; MATLIN & FOLEY 91, S. 371-376; WEBER 89]:

Beim *passiven Tasten* wird der abzutastende Gegenstand unter der ruhenden Hand entlang geführt. Bei Brailledisplays zum passiv tastenden Lesen werden einzelne Braillezeichen von einem unbeweglichen Anzeigemodul an den ebenfalls unbewegten Finger übertragen; lediglich die Stifte des Anzeigemoduls werden gesetzt bzw. eingefahren und erzeugen so an immer den gleichen sechs bis acht Punkten Druckreize am (passiv) tastenden Finger.

Beim *aktiven Tasten* wird die tastende Hand über den Gegenstand geführt, oder er wird sogar angehoben und „manipuliert“, d.h. gedreht und von allen Seiten abgetastet. Bei Brailledisplays wird zunächst eine Zeile komplett aufgebaut, und die Hand tastet sie dann hinterher ab, wobei sie sich über die Zeile bewegt.

Verschiedene Untersuchungen [PAILLARD ET AL. 78, MATLIN & FOLEY 91, S. 376; SCHMIDT 85, S. 52; WEBER 89] und Überlegungen [GIBSON 79] belegen, daß aktives Tasten dem passiven in jeder Hinsicht überlegen ist. Die Erkennungsrate und -geschwindigkeit sind wesentlich höher als beim passiven Tasten. Sogar die Reizschwelle für Einstülpungen (siehe S. 13) liegt beim aktiven Tasten bei nur ca. $1 \mu\text{m}$ gegenüber $6\text{--}20 \mu\text{m}$ beim passiven Tasten [MATLIN & FOLEY 91]. Bestimmte Eigenschaften, wie das Gewicht, können durch passives Tasten allein überhaupt nicht wahrgenommen werden. Gründe für diese Beobachtungen sind einerseits, daß beim aktiven Tasten wesentlich mehr Hautrezeptoren angesprochen werden als beim passiven; Adaption wird dadurch umgangen. Wichtiger ist in diesem Zusammenhang, daß die während der Bewegung der Hand stattfindende Propriozeption ihren Anteil zur Wahrnehmung beisteuern kann. Wenn man davon ausgeht, daß aktives Tasten eine Wahrnehmungs*handlung* ist, die wie jede Handlung kognitiv gesteuert

wird, kommen noch die Effekte hinzu, die aus der Lerntheorie bekannt sind: Handlungen prägen sich besser ein als passiv aufgenommene Informationen.

2.4 Geräte und Techniken

Seit es Blinde gibt, werden von Sehenden für sie taktile Darstellungen hergestellt. Insbesondere Eltern blinder Kinder sind hier sehr einfallsreich [siehe insbesondere EDMAN 92, FROMM 95]. Einige der von Polly Edman oder Wolfgang Fromm beschriebenen oder entwickelten Techniken lassen sich auch computergesteuert anwenden. Zusätzlich eröffnen der Computer und moderne mechanische Technologien weitere Möglichkeiten, taktile Medien herzustellen bzw. Informationen tastbar auszugeben (siehe auch [PROBERT 96]). In diesem Abschnitt sollen zunächst einige manuelle Techniken dargestellt werden, und anschließend werden die computergestützten Verfahren zur taktilen Ausgabe und/oder Interaktion beschrieben.

Das taktile Medium ist grundsätzlich unabhängig von der Klasse der dargestellten Information (geometrisch-konkret, symbolisch-abstrakt oder textuell). In jedem Fall muß eine Umsetzung der Information in eine tastbare Form stattfinden. Tastbar im engeren Sinne sind nur dreidimensional-räumliche Strukturen: Eine unstrukturierte Fläche enthält keinerlei Information. Noch nicht einmal ihre Größe kann als Träger von Information dienen, da diese nur dann ertastbar ist, wenn die Begrenzung der Fläche sich in der dritten Dimension von der Fläche selbst unterscheidet, also wenn z.B. ein Blatt Papier auf einem Tisch liegt und sich durch seine (geringe) Höhe von der Tischplatte abhebt, oder wenn die Tischplatte eine tastbar andere Mikrostruktur hat (z.B. Holzmaserung).

Wie im Abschnitt 2.2 beschrieben, sind alle haptischen Wahrnehmungen räumlicher Natur. Infolgedessen kommen für tastbare Darstellungen prinzipiell nur dreidimensionale Medien in Frage. Diese Erkenntnis führt auch unmittelbar zu der ersten Klasse tastbarer Medien, die hier behandelt werden sollen.

2.4.1 Räumliche Festkörpermodelle

Räumliche Festkörpermodelle von nicht unmittelbar tastbar zugänglichen Objekten, wie z.B. Häusern oder Insekten, die manuell aus Holz, Papier, Knetgummi oder ähnlichem hergestellt werden, haben viele Eigenschaften des abgebildeten Originals, sind jedoch im Gegensatz zu diesen, da sie handhabbar sind, tastend zu erfassen. Die Nachteile solcher Modelle sind, daß sie recht aufwendig herzustellen sind und viel Platz einnehmen.

Man kann räumliche Festkörpermodelle aus rechnerinternen räumlichen Datensätzen (Modellen) mit verschiedenen Techniken erzeugen: Rechnergesteuerte Fräsen können aus einem Kunstharzblock die gewünschte Form herausfräsen; oder man kann mittels Laserstrahlen das Festkörpermodell schichtweise aus flüssigem Kunststoff erzeugen (Stereolithografie, [PETZOLD ET AL. 96]), indem man diesen an den Stellen, die zum Festkörper gehören sollen, anregt und so partiell aushärtet; später wird dann der flüssige Kunststoff abgelassen, und das fertige Festkörpermodell steht zur Verfügung. Der Aufwand, der für die Produktion eines Festkörpermodells auf diese Weise betrieben werden muß, ist groß, so daß sich der Einsatz am Einzelarbeitsplatz kaum lohnen wird.

Für viele Zwecke sind derartige räumliche Darstellungen geeignet, insbesondere, wenn es um die Darstellung räumlicher Objekte in Unterrichtssituationen geht. Die Feinstruktur eines Insektenbeines oder der Aufbau eines Gebäudes lassen sich mit solchen Festkörpermodellen gut vermitteln.

Weder manuell noch computergesteuert hergestellte Modelle dieser Art erlauben die einfache Hinterlegung von Einzelteilen des Modells mit Informationen *über* das Dargestellte. Das bedeutet, daß beispielsweise die Bezeichnung eines Teilobjekts nicht direkt mit dem Teilobjekt verknüpfbar ist. Eine Beschriftung mit Braille-Etiketten scheidet aus, weil die Braillezeichen entweder schwer lesbar wären oder die Erkennbarkeit von Objektdetails beeinträchtigen würden oder beides. Die Bedeutung einer Verknüpfung von Teilobjekten mit Information über sie wird im Kapitel 3 erläutert.

2.4.2 Nicht-flüchtige flächige Darstellungen

Alternativ zu den „echten“ räumlichen Darstellungen gibt es eine Reihe von nahezu flächigen Darstellungsformen, bei denen auf ein flächiges Medium, wie z.B. Papier oder Kunststoff, entweder anderes Material aufgebracht oder das Medium stellenweise verformt wird, wodurch sich tastbare Konturen oder Flächen ergeben:

Manuell kann mit Klebstoff ein *Wollfaden* auf die Fläche geklebt werden, dessen Linienführung später tastbar ist; entsprechendes gilt für Sandpapier oder Stoffgewebe; Auch die Kombination von Sprühkleber auf Papier, das später mit Sand bestreut wird, hat sich bewährt.

Manuell oder computergesteuert kann man Grafiken auf Stoff *sticken* (lassen) [MUSCHALEK 95]. Dabei lassen sich nicht nur Linienzüge und verschiedene Linientypen über verschiedene Fadenarten darstellen, sondern es ist auch möglich, Flächen mit einer tastbaren Mikrostruktur zu versehen: Die Stichrichtung leitet den tastenden Finger und nutzt so nicht nur Kanten, sondern auch die Fläche selbst zur Informationsdarstellung. Abbildung 2-2 zeigt eine solche von einem computergesteuerten Stickautomaten erzeugte tastbare Grafik.

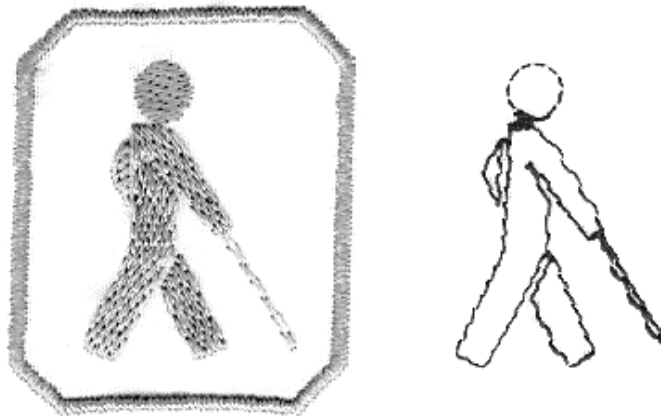


Abbildung 2-2: Gestickte tastbare Grafik (links: flächig, rechts nur Konturen). Die Stichrichtung führt den tastenden Finger. Im gestickten **Original** ist die Figur ca. 3 cm hoch.

Größerer technischer Aufwand muß betrieben werden, wenn man *Tiefziehfolien* herstellen will. Zunächst muß eine Negativ-Form für die Tiefziehmaschine erstellt werden, die dann zur Herstellung der eigentlichen Folien dient. Bei der Herstellung dieser Folien ist man meist noch auf Handarbeit angewiesen. Allerdings ist auch schon der Versuch unternommen worden, eine computergesteuerte Fräsmaschine von einem Grafikeditor gesteuert die Form aus dem Material fräsen zu lassen [SEILER ET AL. 93]. Auch hier ist der apparative Aufwand so groß, daß sich der Einsatz nur lohnt, wenn größere Auflagen der taktilen Darstellung hergestellt werden sollen.

Einfach in der Herstellung und schnell zu produzieren sind taktile Grafiken mit *Riffelfolie*. Dabei wird mit einem Kugelschreiber oder einem ähnlich spitzen Stift auf eine weiche Kunststoff-Folie gezeichnet, die ihrerseits auf einer Gummimatte liegt. Die Folie verformt sich dadurch lokal und „riffelt“ sich an den Stellen, die mit dem Stift verformt wurden, auf, so daß eine tastbare Linie zurückbleibt [HAHN 95]. Prinzipiell kann dieses Verfahren auch computergesteuert mit einem präparierten Stiftplotter oder einem Schneidplotter eingesetzt werden. Es sind allerdings noch keine Versuche in dieser Richtung bekannt.

Ein klassisches Medium für taktile Grafiken ist das *Schwellpapier*. Dieses auch Mikrokapsel- oder Quellpapier genannte Papier besteht aus einem Trägermaterial aus Papier oder Kunststoff und einer Beschichtung, in der Buthangas (in „Mikrokapseln“) eingelagert ist. In der Regel wird die Grafik auf dieses Papier zunächst normal gedruckt oder kopiert, und danach wird es in einem speziellen Heizgerät („Fuser“) von einer heißen Lampe bestrahlt (siehe Abbildung 2-3). Die dunklen (bedruckten) Stellen nehmen die Strahlungswärme besser auf als die unbedruckten weißen Gebiete. Unter dem Einfluß der Wärme dehnen sich die Buthan-Mikrokapseln aus und bringen die Beschichtung zum Schwellen. So können tastbare Strukturen erzeugt werden. Im Wesentlichen sind zwei Zustände des Papiers einstellbar: flach und erhaben. Die erhabenen Stellen stehen etwa 1 mm aus der flachen Papierfläche hervor. So lassen sich Linien, aber auch feine flächige Strukturen und erhabene Flächen sowie natürlich auch Braillezeichen darstellen.

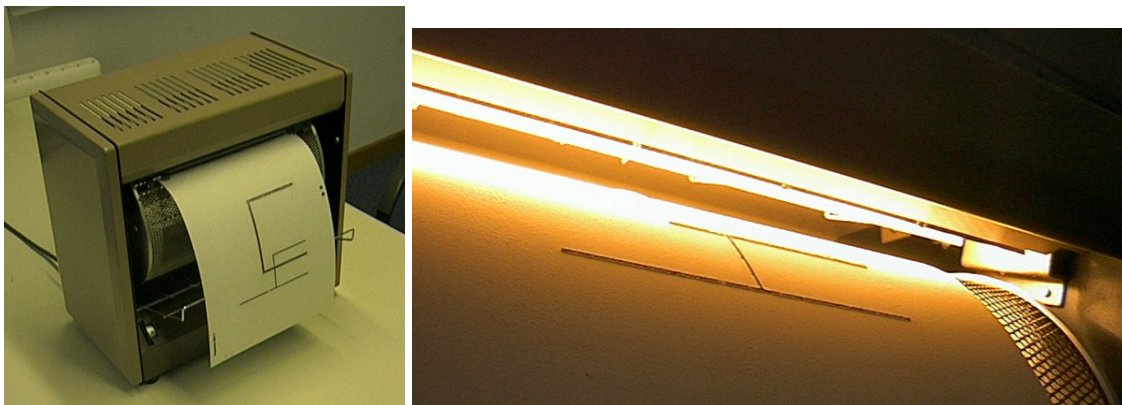


Abbildung 2-3 Ein Fuser, mit dem geschwärzte (bedruckte) Bereiche des Mikrokapselpapiers zum Schwellen gebracht werden. Rechts ist die rotierende Trommel zu erkennen, die das Papier an der über ihm montierten Heiz-Lampe vorbei zieht.

Beim Bedrucken des Papiers muß darauf geachtet werden, daß der Drucker es nicht stark aufheizt. Laserdrucker fixieren in der Regel den aufgetragenen Toner auf dem Papier durch eine beheizte Walze, die das Schwellpapier insgesamt zum Aufquellen bringt und so ggf. im Drucker einen Papierstau erzeugt. Man behilft sich in der Regel, indem man die Grafiken zunächst auf normales Papier druckt und dann auf Schwellpapier fotokopiert, wobei man einen Fotokopierer verwenden muß, der selbst nicht zu viel Wärme auf die Kopie überträgt. Da sich dieses Verfahren prinzipiell für alle gedruckten Grafiken (unabhängig von ihrem Ursprung) eignet, werden Schwellpapiergrafiken auch *Schwellkopien* genannt.

Alternativ zu diesem Verfahren kann man mit einem speziellen Stift, der an seiner Spitze die nötige Wärme erzeugt, auch direkt auf Schwellpapier zeichnen [THERMOSTIFT 95]. Der Thermostift hat eine elektrisch auf ca. 130°C heizbare Spitze, mit der man über das Papier fahren und Linien verschiedener Stärke durch verschieden schnelles Bewegen des Stifts erzeugen kann. Der Umweg über dunkle Pigmente und deren höhere Aufnahmefähigkeit

für Strahlungswärme entfällt. Wird der Thermostift in einen geeigneten Stiftplotter⁹ eingesetzt, kann man auch direkt vom Computer aus taktile Grafiken auf Schwellpapier erzeugen.

Bisweilen werden Braille-Drucker für die Ausgabe grafischer Information auf Braille-Papier verwendet. Diese Drucker können prinzipbedingt nur tastbare Punkte (von hinten) in das Papier stanzen. Dies ist für die Darstellung von Braillezeichen angemessen und ausreichend. Um grafische Elemente (wie Linien) auszugeben, ist der Punktabstand in vielen Fällen unzureichend. Daher bieten einige Braille-Drucker einen halbierten Punktabstand für grafische Ausgaben an. Werden die einzelnen Punkte jedoch sehr nahe nebeneinander gesetzt, so daß der Eindruck einer grafischen Linie entsteht, kommt es oft zu Schäden am Papier, das dann entlang der gestanzten Linien bricht.

2.4.3 Dynamische taktile Anzeigen

Zu den taktilen grafischen Anzeigen für Blinde im weiteren Sinne gehören auch Ansätze, die mittels einer Fotodiode oder einer Kamera helle von dunklen Stellen unterscheiden und diese Unterschiede tastbar machen.

Der klassische Vertreter dieser Gerätegattung ist das *Optacon* [CRAIG & SHERRICK 82]: Eine kleine Kamera wird über das Papier oder den Bildschirm geführt, und das Bild eines etwa 1,1 cm × 2,7 cm großen Bereichs auf eine Matrix von 6 × 24 Stiften (Optacon I) bzw. 5 × 21 Stiften (Optacon II) Fläche von vibrierenden Stiften übertragen, die mit einem ruhenden Finger (passiv) abgetastet wird. Die Kamera wird mit der einen Hand geführt, ein Finger der anderen ruht auf der Stiftanzeige. Eine Fläche muß sukzessive abgetastet werden und die Linien aus den Vibrationen der Anzeige unter dem ruhenden Finger müssen mental rekonstruiert werden.

Ein weitere Variante dieses Prinzips wird in [GUHA & ANAND 92] beschrieben: An einem Lichtsensor ist ein einzelnes vibrierendes Element befestigt, das anzeigt (vibriert), wenn sich unter dem Sensor, der über den Monitor geführt wird, ein heller Bereich befindet, z.B. ein Teil einer weißen Linie auf schwarzem Hintergrund. Der Benutzer drückt dann ein Stück Knetgummi an dieser Stelle auf den Monitor. Mit der Zeit können so der gesamte Bildschirm abgetastet und die Linien mit Knetgummi markiert werden. Nun kann der Blinde die Zeichnung haptisch erkunden.

In den folgenden zwei Abschnitten werden Geräte vorgestellt, die mit relativ großem technischen Aufwand speziell für die haptische Interaktion mit räumlichen (2D oder 3D) Daten entwickelt wurden.

2.4.3.1 Stiftbasierte taktile Anzeigen

Bei Überlegungen zu haptisch-grafischer Mensch-Computer-Interaktion stößt man sehr schnell auf das Konzept einer zweidimensionalen Matrix aus einzeln ansteuerbaren Stiften, die den Pixeln eines Bildschirms vergleichbar (Braille-)Zeichen und grafische Elemente abbilden können [FRICKE 95, METEC 96]. Dieses Konzept liegt verschiedenen Prototypen zugrunde [SCHMID-LADEMANN 85, SCHWEIKHARDT 85, SCHULZ 94, SHINOHARA ET AL. 95, SHINOHARA ET AL. 96, SCHULZ & WOLF 96]. Primäres Ziel dieser Arbeiten war es, nahezu in „Echtzeit“ grafische Darstellungen anzuzeigen und dabei auch Braillezeichen

⁹ Da die meisten Plotter heute nicht mehr mit Stiften als Flachbettplotter arbeiten, sondern solche Geräte emulieren und mit Tintenstrahl- oder Laser-Drucktechnik arbeiten, ist eine Implementierung heute in erster Linie mittels eines umgebauten Schneidplotters möglich. Dabei muß die Auflagekraft des Stiftes angepaßt werden und die Zeichengeschwindigkeit steuerbar sein, um die Linienstärke beeinflussen zu können.

lesbar darzustellen. Aus der Forderung nach Braille-Fähigkeit und wegen technischer Rahmenbedingungen ergaben sich Auflösungen von 1,5 bis 3 mm in zwei orthogonalen Richtungen¹⁰.

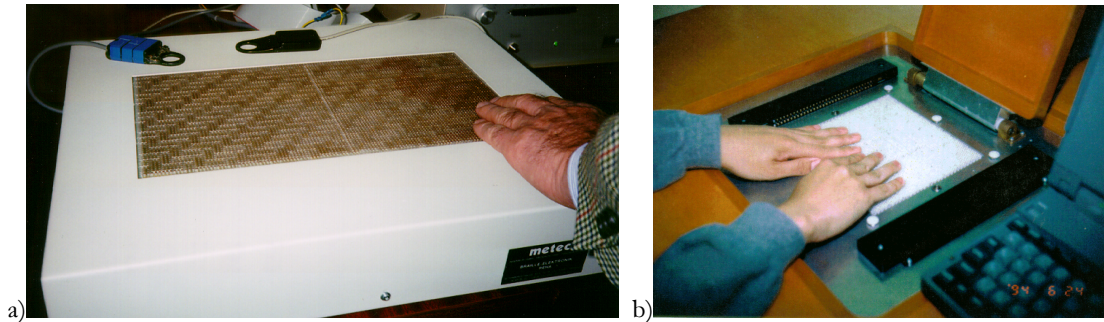


Abbildung 2-4 a) Stiftplatte [SCHWEIKHARDT 85] und b) Relief [SHINOHARA ET AL. 95], zwei stiftbasierte taktile Anzeigen für zweidimensionale Grafiken

Wie beim Drucken mit Braille-Druckern lassen sich feine Strukturen oder schräge Linien schlecht darstellen. Abgesehen von diesen grundsätzlichen Überlegungen, spricht der sehr hohe technische (und damit finanzielle) Aufwand gegen die Verwendung solcher Stiftmatrixanzeigen für Grafiken. Abbildung 2-4 zeigt zwei Beispiele für Stiftmatrixanzeigen. Auf die Mechanismen, die im einzelnen bei dynamischen taktilen Anzeigen verwendet werden, soll hier nicht näher eingegangen werden. Schulz hat eine klassifizierende Übersicht erstellt, die diese Informationen enthält [SCHULZ 94, S.39].

Der vorliegende Abschnitt befaßt sich mit der prinzipiellen Eignung solcher Anzeigen für die Ausgabe grafischer Informationen.

Die verbreitetste Form stiftbasierter taktiler Anzeigen ist das Braille-Display (auch „Braille-Zeile“ genannt). Ursprünglich für die Textausgabe in Braille gedacht, lassen sich Braille-Displays auch bis zu einem gewissen Maß für die Darstellung grafischer Information verwenden. Insbesondere Braille-Displays mit mehr als einer horizontalen Anzeigezeile können für die Ausgabe von Balkendiagrammen verwendet werden [KURZE ET AL. 95, KURZE 95A]:

Die Anzeige besteht aus n Zeilen mit jeweils m nebeneinander angeordneten Modulen, die jeweils 2 Spalten a 4 Stifte enthalten. Mit einem Modul läßt sich so ein Braillezeichen ($2 * 3 = 6$ Stifte) mit einem von 4 möglichen Zusatzattributen (2 zusätzliche Stifte) darstellen. Löst man sich von der Zuordnung eines Moduls zu einem Zeichen, ergeben sich bei n parallelen Zeilen $4 * n$ Zeilen mit je $2 * m$ Stiften.

Theoretisch können also auch mit herkömmlichen Braille-Displays Grafiken ausgegeben werden. Durch die Anordnung der Module und ihre interne Bauweise ist jedoch eine echt flächige Darstellung nicht möglich: Zwischen den Modulen besteht ein größerer seitlicher Abstand als innerhalb des Moduls zwischen den zwei Stiftspalten. Außerdem sind die Module unterhalb der (relativ kleinen) Anzeigefläche mit den 8 Stiften in einer Richtung wesentlich länger als die Anzeigefläche selbst (sie stehen unter der 2 cm langen Fläche noch weitere 5 cm vor). Durch entgegengesetzt ausgerichtete Anordnung der Module kann man

¹⁰ In einem Fall ist in Japan von der orthogonalen Anordnung abgewichen worden [SHISHIMO95]. Die Notwendigkeit für die Darstellung europäischer Braillezeichen war hier nicht gegeben. Es wurde ein hexagonales Gitter verwendet, das theoretisch für Grafiken und Linien allgemeiner Art geeigneter ist, weil der durchschnittliche Punktabstand bei Linien unterschiedlicher Ausrichtung geringer ist und weniger mit dem Winkel schwankt.

Da in der Praxis jedoch sehr oft rechtwinklige grafische Elemente wie Koordinatenachsen oder Struktogramme vorkommen, ist man auch bei diesem Ansatz inzwischen zur orthogonalen Anordnung zurückgekehrt.

erreichen, daß sich die Anzeigeflächen von zwei Displayzeilen fast berühren. Der Abstand zur nächsten Zeile muß allerdings dann wesentlich größer sein. Wenn sich an eine Doppelzeile eine weitere anschließen soll, liegt zwischen beiden Doppelzeilen ein Abstand von 10 cm, der es praktisch unmöglich macht, einen grafischen Zusammenhang zwischen beiden Bereichen festzustellen. In der Praxis kommt allerdings auch nur maximal eine Doppelzeile ($n = 2$) in einem Braille-Display vor.

Geht man von einer typischen Modulanzahl $n = 80$ aus, so ergibt sich bei einer zweizeiligen Anzeige eine Matrix von 160 Spalten mit je 8 Stiften. Für die Darstellung von Balkendiagrammen können die Stifte jetzt z.B. reihenweise zusammengefaßt werden, wodurch bis zu 8 Balken einer Länge zwischen 0 und 160 gleichzeitig dargestellt werden können (oder 7 Balken und eine Skala). Man kann auch einen Teil der Anzeige für die Braille-Ausgabe (z.B. der Balkenbeschriftung) verwenden und eine kleinere Matrix für die Diagrammdarstellung.

Steht neben der horizontalen Braille-Zeile auch eine vertikale zur Verfügung, können Balken auch senkrecht dargestellt werden. Außerdem können die zwei Display-Zeilen für die Ausgabe zweidimensionaler Koordinaten bei der Interaktion mit zweidimensionalen Grafiken dienen [CEBIT 93, STROTHOTTE ET AL. 93]. Auf die Besonderheiten einer solchen Interaktion wird noch einzugehen sein (siehe Abschnitt 3.3).

2.4.3.2 Geräte zur kinästhetischen Interaktion

Während bei zweidimensionalen stiftbasierten Anzeigen die Grafik selbst physisch in Form von erhobenen Punkten auf einer ebenen Grundfläche vorhanden ist und unmittelbar mit den Fingern abgetastet werden kann, liegt sie bei der Ausgabe über *force-feedback-devices* (Geräte mit Krafrückkopplung, [SHIMOGA 93A, SHIMOGA 93B]) nur als Datenstruktur im Rechner vor, aus der dann während des Abtastens über die Position des abtastenden Fingers (bzw. der verwendeten Sonde) die Gegenkraft errechnet wird, die den Eindruck von auf der Fläche befindlichen Linien/Punkten vermitteln soll. Das Konzept hat den großen Vorteil, daß die ursprüngliche Grafik nicht auf eine grobe Punktmatrix-Repräsentation reduziert werden muß. Der größte konzeptionelle Nachteil dieser Form der Präsentation ist, daß lediglich die kinästhetische Wahrnehmung angesprochen wird. Das Ertasten von Linien geschieht immer indirekt über eine Sonde (z.B. in Form eines Fingerhuts, wie in Abbildung 2-5 a)

Da im allgemeinen zu einem Zeitpunkt nur ein Gerät zur Verfügung steht, muß die Erkundung einer Darstellung streng sequentiell ablaufen. Man kann nicht mit einer Hand den Anfangspunkt einer Linie/Kante festhalten und deren Verlauf mit der anderen verfolgen. Man kann haptische Interaktion nur unzureichend beschreiben oder abbilden, man muß sie „begreifen“; das Ertasten einer Form mit einem dieser Geräte ist vergleichbar mit dem Ertasten einer realen Form ausschließlich mit einem einzigen Finger, der in einem Fingerhut steckt (oder auch mit einem Stift [IWATA 93], je nach Art der Sonde).

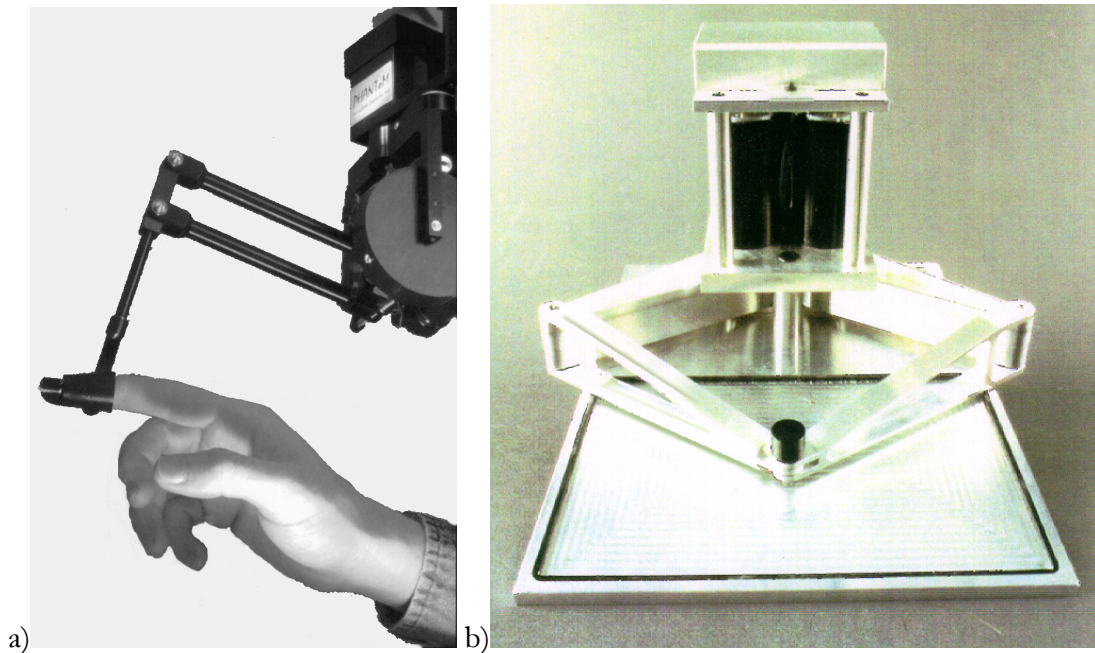


Abbildung 2-5 a) Phantom [MASSIE & SALISBURY 94] für 3D-force-feedback und b) Pantograph [RAMSTEIN & HAYWARD 94] als 2D-Ausführung.

Andererseits lassen sich durch diese Geräte auch sehr feine Strukturen wie z.B. Sandpapier oder andere Oberflächeneigenschaften nachbilden. Außerdem bieten sie die Möglichkeit, dynamische Vorgänge darzustellen: Die einem Punkt im Raum bzw. auf der Fläche¹¹ zugewiesene Kraft kann programmgesteuert angepaßt werden. Schließlich sind die Geräte zu geringeren Kosten herzustellen als die im Abschnitt 2.4.3.1 erwähnten Stiftmatrixanzeigen.

2.4.4 Rolle des Computers beim Umgang mit haptischen Grafiken

Der Computer wird heute im Wesentlichen an zwei Stellen beim Umgang mit haptischen Grafiken eingesetzt:

Einerseits dient er in der Entwurfsphase als Zeichenwerkzeug für die sehenden Entwerfer haptischer Grafiken. Diese verwenden herkömmliche Zeichenprogramme (wie Corel Draw[®]), um Grafiken zu entwerfen, die dann auf Schwellpapier gedruckt werden [LÖTZSCH 94]. Mit dem Ziel, Formen für die Herstellung haptischer Grafiken als Tiefziehfolie zu fräsen, wurde auch ein spezielles Zeichenprogramm und eine Schnittstelle zu einer computergesteuerten Fräse erstellt [SEILER ET AL. 93].

Andererseits wird der Computer zur unterstützenden Präsentation von Information verwendet, die in der taktilen Grafik nicht explizit, wohl aber im zugrunde liegenden Modell implizit vorhanden ist. Nomad [PARKES 88] und AudioTouch [LÖTZSCH 93, LÖTZSCH 94] sind Beispiele für diese Anwendung des Computers. Hier wird der Computer eingesetzt, um die momentane Abtastposition des Fingers auf der Grafik festzustellen und dann aus einer entsprechenden Datenbank textuelle Informationen verbal über Text-to-Speech-Systeme auszugeben.

¹¹ Mit dem Pantograph lassen sich nur zweidimensionale Interaktionen ausführen, während mit dem Phantom 3D-Interaktion möglich ist. Es zeigt sich jedoch in der Anwendung, daß auch letzterer vor allem für 2D-Aufgaben verwendet wird: Der dargestellte Raum ist meist leer bis auf eine frei im Raum schwebende (oft horizontale) Fläche, die entweder selbst eine gewünschte Form hat, oder auf der die zu tastenden Linien wiederum erhaben sind. Insofern sind Phantom und Pantograph in gleicher Weise geeignet (oder ungeeignet), haptische Zeichnungen zu erkunden.

Im Pantograph-System [RAMSTEIN & HAYWARD 94, RAMSTEIN 96] wird der Computer einerseits verwendet, um die Position des Abtast-Fingers zu ermitteln, andererseits wird die taktile Präsentation der Grafik selbst ständig vom Computer errechnet. D.h. abhängig von der Position der Sonde werden die auf sie wirkenden Kräfte errechnet und an das Gerät ausgegeben. Damit liegt ein echtes "haptisches" Gerät vor, das dem menschlichen Tastempfinden in mancher Hinsicht recht nahe kommt: Sensor und Aktor in einem Element werden von einer "intelligenten" Instanz verwendet. Auf die Potentiale, die ein kombinierter Einsatz von Pantograph und flächigem tastbaren Medium (z.B. Schwellpapier) bietet, wird noch einzugehen sein (siehe Abschnitt 6.2).

Der Sonderfall einer Anwendung des Computers beim manuellen haptischen Zeichnen wird in Kapitel 8.2 behandelt (siehe auch [CAUBET & TRUQUET 90, FITZMAURICE ET AL. 95, KURZE 96A]).

2.5 Bisheriger Einsatz tastbarer Grafiken

Bisher wurden taktile Grafiken in verschiedenen Bereichen [TAKTILE MEDIEN 95] eingesetzt, von denen einige hier kurz aufgezählt werden sollen:

Der wichtigste Einsatzbereich taktiler grafischer Darstellungen ist sicherlich der Bereich *taktiler Karten*. Taktile Karten werden in verschiedenen Maßstäben für verschiedene Zwecke mit verschiedenen Techniken hergestellt [KOCH 95].

Für den *Geografie-Unterricht* gibt es vorgefertigte Welt- und Landkarten in Tiefziehfolien-Technik [ARMSTRONG 78].

Für das *Mobilitätstraining* werden Karten der zu erlernenden Umgebung entweder in Tiefziehtechnik oder als Schwellkopien hergestellt. Vergleichbare grobmaßstäbige Karten werden auch als Orientierungshilfe im öffentlichen Bereich eingesetzt [JANSSON 95, KÖNIG 95].

Im Rahmen des Projekts *MoBIC*¹² wurden Karten von Reisezielen gemäß den individuellen Bedürfnissen Blinder erstellt und auf Schwellpapier ausgedruckt [HAMEL ET AL. 95]. Es handelt sich hierbei um einen Versuch, den *Entwurf* tastbarer Grafiken vom Computer unterstützen zu lassen. Die blindenspezifische Entwurfsunterstützung besteht aus einer Analyse einer vorgegebenen Route auf einer digitalen Karte, die dann in einer Weise verzerrt wird, die sicherstellt, daß die Linien der Route nicht zu dicht an anderen Linien der Karte liegen.

Im *Mathematikunterricht* haben taktile Medien ihren festen Platz [HAHN 95]. Der Verlauf einer Sinus-Kurve oder einer Parabel kann rein verbal nur sehr unzureichend erklärt werden, daher greifen viele Lehrer zu Tiefziehfolien oder zu selbst erstellten Grafiken aus Schwellpapier oder Riffelfolie. Frühe Formen der Rechnerunterstützung in diesem Bereich beschreibt [SCHWEIKHARDT 81].

Auch in anderen Unterrichtsfächern, wie z.B. Biologie, werden taktile Grafiken von Lebewesen und Organen verwendet. Hier tritt dann allerdings verstärkt das Problem der Dreidimensionalität der dargestellten Objekte auf: Bildliche Darstellungen realer Objekte in Schulbüchern sind besonders dann wichtig, wenn das Dargestellte selbst nicht zugänglich ist, z.B. weil es zu klein (Amöbe), zu groß (Gebäude) oder zu gefährlich (Löwe) ist. Während für Sehende (des westlichen Kulturkreises) die visuelle Abbildung zum Erfahrungs-

¹² MoBIC = *M*obility of *B*lind and elderly people *I*nteracting with *C*omputers, ein im Rahmen des TIDE-Programms EU-gefördertes Projekt, das die Unterstützung Blinder bei der Orientierung und Navigation in unbekannten Umgebungen zum Ziel hat

hintergrund gehört, auf dem aufbauend von Darstellungen unbekannter Objekte auf deren Eigenschaften geschlossen werden kann, ist dies Blinden zunächst nicht möglich, weil es für die Abbildung räumlicher Gegenstände noch keine etablierten Regeln gibt, die es ihnen erlauben würden, einen entsprechenden Erfahrungshorizont aufzubauen.

Spezialentwicklungen für blinde Geschäftsleute erstellen tastbare Versionen von Diagrammen (Linien- oder Balkendiagramme), die auf Braille-Druckern ausgegeben werden können und als gerasterte Grafiken zur Verfügung stehen. Ähnlich können auch Organisations- und Hierarchiediagramme relativ einfach taktil ausgegeben werden.

Ein wichtiger Einsatzbereich grafischer Darstellungen ist der der Unterhaltung bzw. der Kunst. Es existiert eine Vielzahl von Kinderbüchern, die z.T. aus Bilderbüchern für sehende Kinder abgeleitet wurden [z.B. VINCENT 91]. Hier, wie bei taktil-grafischen Kunstwerken, spielt der Aspekt der Informationsvermittlung eine eher untergeordnete Rolle. Der "Erfasser" soll vielmehr beim Erkunden der Grafik Genuß empfinden. Um diesen Effekt zu erreichen, ist die Einbeziehung entsprechend befähigter Künstler unabdingbar. Zur (bildenden) Kunst gehörende Werke, auch taktiler Art, sollen hier nicht näher behandelt werden, da sie sich der Automatisierbarkeit weitgehend entziehen.

Erwähnung finden sollte jedoch der Ansatz der finnischen Nationalgalerie in Helsinki [OTHMAN & LEVANTO 96]: Hier werden Werke der bildenden Kunst nicht-visuell präsentiert, indem eine einfühlsam formulierte verbale Beschreibung eines Kunsthistorikers mit Musik und anderen Geräuschen untermalt wird und dem blinden Rezipienten von CD oder Kassette vorgespielt wird. Dazu erhält er eine stark vereinfachte taktile Umsetzung des Bildes. Durch den großen museumspädagogischen Aufwand, der hier betrieben wurde, gelingt es, wesentliche Elemente des Bildes zu vermitteln. Die Kritik, die von anderen Experten an diesem Verfahren geübt wird, richtet sich vor allem gegen den Anspruch, das visuelle Kunstwerk zu präsentieren [HOLMES & ERIKSON 96]. Vielmehr handelt es sich um eine persönliche Interpretation des Kunsthistorikers, ein Kunstwerk für sich. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit muß insbesondere festgestellt werden, daß zwar die Beschreibung der Bilder (sofern es sich um Darstellungen realer Szenen handelt) räumlich erfolgt, die taktile Version jedoch eine direkte Umsetzung der Farbverteilung auf der Leinwand in tastbare Flächen auf dem Schwellpapier ist.

Bisher wurden nur wenige Versuche unternommen, räumliche Gegenstände und Verhältnisse in taktilen 2D-Grafiken darzustellen. Einige Heuristiken, die sich dabei als nützlich herausstellten, werden in den folgenden Kapiteln zu behandeln sein [EDMAN 92].

2.6 Wertende Zusammenfassung der technischen und psychophysischen Rahmenbedingungen

Es existiert eine Reihe technischer Einrichtungen und Verfahren, um einerseits tastbare Grafiken und andererseits computergesteuert haptische Stimuli zu erzeugen. Die genannten Geräte und Verfahren werden zur Zeit nahezu ausschließlich zur Darstellung abstrakter grafischer Information genutzt. Es ist (noch) nicht möglich, Liniengrafiken dynamisch tastbar anzuzeigen. Abgesehen von diesem *hardware*-technischen Problem lassen sich die gravierendsten Lücken beim Zugang zu grafischer Information für Blinde wie folgt zusammenfassen:

- Räumliche Gegenstände und Verhältnisse werden bisher gar nicht oder nicht erfolgreich, also erfaßbar, dargestellt. Allein die Anhebung der Linien einer visuellen Grafik, z.B. als Schwellkopie, führt nicht dazu, daß die in der Grafik kodierte räumliche Information erkannt wird. Solche naive Herangehensweise führt dazu, daß Grafiken entste-

hen, die beim Rezipienten auf Ablehnung stoßen, weil sie auf derartigen „Nebelfolien“ (Zitat eines blinden Gymnasiasten) nur ein Gewirr von Linien ertasten, aber keine Gestalt wahrnehmen können.

Gesucht sind also Verfahren zur Darstellung *räumlicher Gegenstände* und Verhältnisse für die haptische Wahrnehmung.

- Heuristiken, die Entwickler haptischer Grafiken einsetzen, aber auch feste Regeln, wie minimale Linienabstände und Objektgrößen, sind kaum bekannt, insbesondere gibt es kein computergestütztes Zeichensystem, das sie dem Benutzer zur Verfügung stellt (etwa in Form eines *critiquing systems*) oder gar selbst anwendet. Lediglich bei der Gestaltung von Karten sind die grundlegenden Regeln der haptischen Differenzierbarkeit von [HAMEL ET AL. 95] berücksichtigt worden, jedoch eignet sich das dort vorgeschlagene Verzerrungsverfahren ausschließlich zur Darstellung einer Route in taktilen Karten.

Gesucht ist also eine Methode, den *Entwurfsprozeß* haptischer Grafiken (insbesondere räumlicher Gegenstände) zu *unterstützen* bzw. zu automatisieren.

- Auch die beste haptische Grafik muß zeitaufwendig ertastet werden, wobei die Sequentialität dieses Prozesses die Erkennungsdauer oft verlängert. Die Informationstechnologie bietet Möglichkeiten der zusätzlichen Unterstützung beim Erkunden von Grafiken an, die bisher aber nur ansatzweise bei Nomad [PARKES 88] und AudioTouch [LÖTZSCH 94] (siehe Abschnitt 2.4.4) verwirklicht sind. Eine geleitete Erkundung oder eine Hinführung des tastenden Fingers zu einem gesuchten Objekt der Zeichnung sind bisher noch nicht verwirklicht worden.

Gesucht ist mithin ein Verfahren, das Blinde bei der *Erkundung* von tastbaren Grafiken passiv und aktiv *unterstützt*, indem es einerseits Hinweise zu aktuell ertasteten Objekten liefert und andererseits den Rezipienten zu gesuchten Objekten hinführt.