

7 Kurzbeschreibung der Werkzeuge

7.1 Überblick

Die in dieser Arbeit untersuchten Verfahren zur Herstellung von und zur Interaktion mit haptischen Grafiken insbesondere von Blinden und für Blinde lassen sich in drei Bereiche gliedern:

1. Ermittlung von Zeichenverfahren blinder Menschen unter Berücksichtigung nicht-grafischer Anreicherungen,
2. Entwurf, Herstellung und Anreicherung maschinell erstellter Zeichnungen und
3. nicht-visuelle Erkundung von Grafiken einschließlich deren eventueller Anreicherungen mit und ohne aktive Erkundungsunterstützung.

Es wurden für jeden dieser Bereiche Werkzeuge entworfen, implementiert und getestet. Nach einem groben Überblick, der die Einzelsysteme kurz im Zusammenhang darstellt, werden in den folgenden drei Unterkapiteln diese Werkzeuge beschrieben, wobei sowohl auf die entwickelten Geräte (Hardware) eingegangen wird als auch auf die Algorithmen, die mit ihnen (oder auch separat) zum Einsatz kommen. Die experimentellen Ergebnisse werden in Kapitel 8 beschrieben.

Die drei Werkzeuge, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, sind je einem der oben genannten Bereiche zuzuordnen:

Um Blinden ein taktiler computergestütztes Zeichnen zu ermöglichen, wurde *TDraw* entwickelt (siehe 7.2 und [KURZE 96A]). *TDraw* ist ein System aus Hard- und Software: Ein Stift, der einerseits auf Schwellpapier tastbare Linien hinterläßt und andererseits seine Position auf dem Zeichenpapier für den Computer zur Verfügung stellt, dient als Basis. Die Zeichnungen können so schon während sie erstellt werden als Vektorgrafik im Rechner verwaltet, digital verarbeitet und z.B. auch versendet werden. Über eine Spracheingabe wird sowohl die Semantik erfaßt, indem den gezeichneten Primitiven Objektnamen zugeordnet werden, als auch die Steuerung des Systems vorgenommen, indem verbale Kommandos gegeben werden. Das Ergebnis der Arbeit mit *TDraw* für Blinde sind eine taktile Zeichnung und eine abstrakte - semantisch angereicherte - Beschreibung des Dargestellten. Zusätzlich lassen sich aus den beim Zeichnen durch Blinde gewonnenen Informationen Rückschlüsse über allgemeine Zeichenverfahren Blinder ziehen.

Solche Informationen führten zur Entwicklung von *TRender*, einem Programm, das aus einem 3D-Modell in der Sprache VRML [VRML Spec 96] Zeichnungen für die haptische Erkundung und eine abstrakte - semantisch angereicherte - Beschreibung der dargestellten Szene generiert (siehe 7.3 und [KURZE 97A, KURZE 97B]). Die Zeichnungen sind vom System so entworfen, daß sie räumliche Eigenschaften nicht gemäß ihren optischen, sondern entsprechend ihren tastbaren Eigenschaften darstellen, also ohne perspektivische Verzerrungen und ähnliche optische Effekte. Sie können tastbar ausgedruckt und sowohl ohne als auch mit Tast- oder Digitalisieretafelt erkundet werden. Kommt ein solches Tfelt zum Einsatz, können Programme wie AudioTouch [LÖTZSCH 94], NOMAD [PARKES 88] oder auch TGuide (Abschnitt 7.4) die hinterlegte semantische Information auswerten und den Erfasser per Sprachausgabe unterstützen.

Haptische Zeichnungen können besonders effektiv erkundet werden, wenn der Blinde von einem pro-aktiven Hilfsmittel unterstützt wird. *TGuide* bietet neben den re-aktiven Unterstützungsverfahren von NOMAD oder AudioTouch auch diese pro-aktive Unterstützung

durch Vorschläge für die Richtung, in der die Erkundung fortgesetzt werden sollte (siehe 7.4 und [KURZE 98A]). Das System wurde vollständig im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelt und besteht aus einer „Vibratormaus“ sowie Erkundungs- und Führungssoftware. Die Software ermittelt eine Richtung, in der die tastende Hand sinnvollerweise weiter suchen sollte, und präsentiert diese Richtung taktil, indem sie eines von acht kreisförmig angeordneten Vibrator-Elementen an der Außenseite des Geräts aktiviert. So erhält der Blinde Hinweise, ohne gegängelt zu werden.

Mit dem hier entwickelten Werkzeugsatz lassen sich sämtliche Bereiche von Problemen und Aufgaben angehen, die beim Umgang Blinder mit gegenständlichen (und anderen) Grafiken von Bedeutung sind. In den folgenden Abschnitten (7.2 bis 7.4) werden diese Werkzeuge näher beschrieben.

7.2 TDraw

In diesem Unterkapitel wird ein System zum taktilen Zeichnen vorgestellt. Der Name „TDraw“ ist aus dem englischen „**T**actile **D**rawing System“ abgeleitet. Bevor TDraw im Einzelnen beschrieben wird, soll im folgenden Abschnitt zunächst auf Hintergründe und Motivation der Systementwicklung eingegangen werden.

7.2.1 Problemanalyse

Blinde können zeichnen. Mit den entsprechenden deformierbaren Materialien und geeigneten Werkzeugen konnten und können Blinde taktile Zeichnungen erstellen. Soweit besteht in der aktuellen Forschung Einigkeit und Klarheit. Die Methoden, die Blinde beim Zeichnen insbesondere räumlicher Gegenstände verwenden, sind noch nicht restlos geklärt. Untersuchungen von Kennedy [KENNEDY 82, KENNEDY 93] zeigen jedoch, daß die Ergebnisse teilweise erheblich von Zeichnungen Sehender abweichen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit galt es daher, Methoden für die Abbildung räumlicher Gegenstände auf eine zweidimensionale Fläche zu bestimmen, wobei nach der Literaturrecherche [KENNEDY 82, KENNEDY 93, EDMAN 92] und nach persönlichen Erkenntnissen die Bedeutung einer semantischen Anreicherung der grafischen Elemente hoch eingeschätzt werden muß.

Ein Zeichensystem für Blinde hat im Zusammenhang der Erforschung von Zeichnermethoden also zur Beantwortung der folgenden Fragen beizutragen:

1. Wie sehen taktile Zeichnungen Blinder aus? (Ergebnis)
2. Wie gehen Blinde beim Zeichnen vor? (Verfahren)
3. Welche textuellen Elemente fügen sie der Grafik bei? (semantische Anreicherung)

Insbesondere die beiden letzten Fragen wurden von der bisherigen Forschung nicht zufriedenstellend beantwortet, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, daß bisher keine Werkzeuge existierten, die zu ihrer Beantwortung eingesetzt werden konnten. Ein solches Werkzeug muß vom (blinden) Benutzer möglichst intuitiv verwendet werden können, damit er sich nicht auf den Umgang mit dem Werkzeug, sondern auf seine Aufgabe, das Zeichnen, konzentrieren kann. Daher ergeben sich Anforderungen, die in Tabelle 7-1 aufgelistet sind.

Tabelle 7-1: Anforderungen an Eigenschaften eines taktilen Zeichensystems

Eigenschaft	Anforderung	Zweck
Grundlegende Anforderungen an die Benutzbarkeit		
Zeichenfläche	angemessene Größe	• Ausreichend viele Details sind darstellbar. • Schnelle Gesamterfassung ist möglich.
gezeichnete Linien	sofort tastbar	• Orientierung am schon Gezeichneten ist notwendig.
grafische Auflösung	sehr hoch (kein (tastbares) Raster)	• Linien jeder Richtung und Form sind darstellbar.
grafische Grundelemente	geeignete Auswahl	• Benutzer hat schöpferische Freiheit. • Benutzer kann die <i>wesentlichen</i> Eigenschaften sofort darstellen.
semantische Anreicherungen	integrierbar, ohne die Hände von der Zeichnung zu nehmen	• Andernfalls ist eine langwierige Neuorientierung notwendig.
Medium	kommunizierbar	• Zeichnungen mit semantischen Anreicherungen sollten anderen (ebenfalls Blinden) in vervielfältigter Form zugänglich zu machen sein.
Daraus sich ergebende weitere Anforderungen		
Vorgehen beim Zeichnen	rekonstruierbar	• Auswertung z.B. für wissenschaftliche Zwecke wird ermöglicht. • Die Zeichnung selbst kann orts- und zeitunabhängig vom Zeichner gedruckt werden.
zeichnerische Elemente und Texte	einander zuzuordnen	• Für spätere Erkundungsunterstützung (z.B. mit TGuide) notwendig.

Es zeigt sich, daß für ein Zeichensystem, das den obigen Anforderungen entspricht, rechnergestützte Methoden und Geräte Anwendung finden müssen. Die Struktur eines kompletten Zeichensystems wird im folgenden Abschnitt erläutert (siehe auch [KURZE 96C]).

7.2.2 Systemstruktur

Das Gesamtsystem besteht im wesentlichen aus drei Komponenten:

1. Das taktilen *Zeichenwerkzeug* ist ein modifizierter Thermo-Stift, mit dem auf Schwellpapier gezeichnet wird.
2. Die *Aufzeichnungskomponente* besteht aus einem Digitalisiertablett zur Ermittlung von Stiftposition und -status sowie einer Spracherkennung, die gesprochene Objektnamen in Textform umwandelt und mit den Linien des Objekts speichert.

3. Die *Systemsteuerung* des Gesamtsystems synchronisiert die Aufzeichnung der Zeichenbewegungen des Benutzers mit der Eingabe von Objektnamen und von gesprochenen oder per Tastatur eingegebenen Befehlen und stellt Dienste zur Dateiverwaltung und zur Einstellung des Systemverhaltens zur Verfügung.

Die Protokollierung der Stiftbewegung liefert *Linienzüge*. Um *Flächen* als weitere geometrische Primitive verwenden zu können, kann jeder Linienzug als „geschlossen“ definiert und seine umschlossene Fläche als Polygon betrachtet werden, was die Darstellung von flächenhaften Objekten ermöglicht.

An dieser Stelle sei angemerkt, daß das Schließen des Linienzuges auf der Originalzeichnung vom Benutzer selbst durchgeführt werden muß, da hierzu ein Aufheizen der entsprechenden Stellen des Schwellpapiers notwendig ist, was z.B. durch den Thermo-Stift erfolgen kann, nicht aber allein vom Rechner oder dem Digitalisieretablett. Bei späteren Versionen der Zeichnung wird diese ja ohnehin zunächst herkömmlich mit Tinte oder Toner gedruckt und erst anschließend dem Schwellprozeß unterzogen. Dadurch können bei diesen Kopien die vom Rechner beim Schließen der Linienzüge eingefügten Linien tastbar gemacht werden.

Das System ist in Abbildung 7-1 schematisch dargestellt.

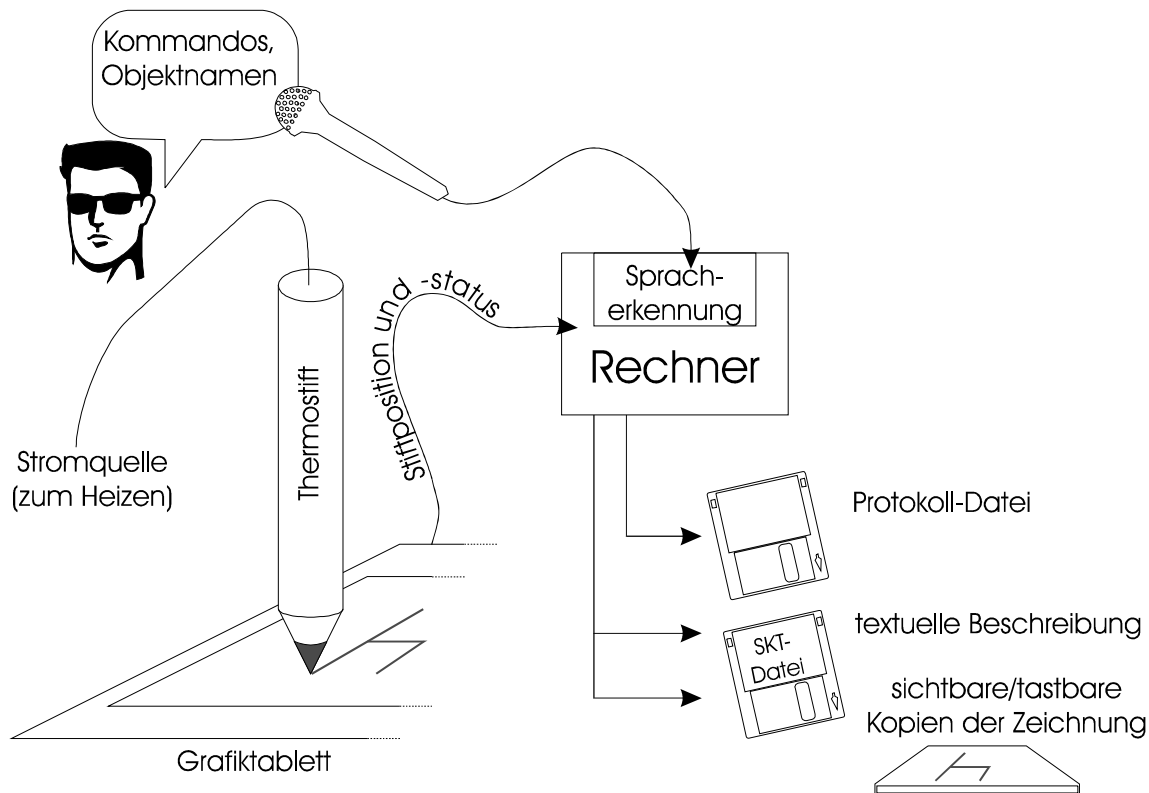


Abbildung 7-1 Schematische Übersicht über die Komponenten des taktilen Zeichensystems TDraw.

Ein System wie das hier skizzierte wird den genannten Anforderungen sehr gut gerecht:

1. Ein Digitalisieretablett und Schwellpapier im DIN A4-Format bilden einen angemessenen Kompromiß zwischen benötigtem Raum für Details und guter Erfäßbarkeit.
2. Da Schwellpapier sofort nach dem Zeichnen mit dem Thermo-Stift tastbare Linien aufweist, erhält der Zeichner eine unmittelbare Rückkopplung.
3. Schwellpapier ist rasterlos und daher gut für detaillierte Zeichnungen geeignet.

4. Da der Benutzer beim hier verwendeten Freihand-Zeichnen keinen Einschränkungen bezüglich der möglichen Formen unterliegt, kann alles „Zeichenbare“ auch gezeichnet werden, nämlich Linien und Flächen.
5. Durch die Verwendung von Spracheingabe können die zeichnenden/tastenden Hände immer auf der Arbeitsfläche bleiben.
6. Die Protokolldatei kann jederzeit wieder inspiziert und die protokollierten Stiftaktionen können mit einem virtuellen Stift auf dem Ausgabegerät (Bildschirm, Drucker oder Plotter) wiederholt werden. Parallel dazu steht die textuelle semantische Anreicherung zur Verfügung und gestattet die Erkundung mittels Tasttablett.

Die vorgestellte Struktur eignet sich recht gut zum computergestützten Zeichnen, einzig ein Löschen von Linien ist nicht ohne weiteres möglich. Da man tastbare Linien auf Schwellpapier manuell oder gar automatisch nicht ohne weiteres wieder entfernen kann, bedeutet eine fehlerhafte Linie in dieser Form der Systemstruktur, daß von neuem mit dem Zeichnen begonnen werden muß.

Durch die modulare Struktur des Systems können einzelne Komponenten leicht durch andere ersetzt werden. Beispielsweise kann der Thermo-Stift mit Schwellpapier als Zeichenwerkzeug durch den Digitalisierstift mit Folie auf Gummiunterlage ersetzt werden. Als Zeichenwerkzeug ist diese Kombination aus herkömmlichem Stift mit Folie recht verbreitet. Daher kann sie zur Eingabe von Zeichnungen dienen. Lediglich bei der Ausgabe der Ergebnisse auf einem tastbaren Medium kann sie nicht ohne weiteres eingesetzt werden, weil sie die mechanische Umformung der Folie voraussetzt, wozu allenfalls ein Schneidplotter geeignet wäre (siehe Abschnitt 2.4).

Das beschriebene System kann nicht nur im Kontext der Forschung, sondern auch von Blinden für sich und andere Blinde in jedem Zusammenhang verwendet werden, wenn es darum geht zu zeichnen, zu kommentieren, die Zeichnungen anderen zugänglich zu machen und zu archivieren.

7.2.3 Implementierung

Das hier beschriebene System ist in Form des taktilen Zeichenwerkzeugs TDraw im Rahmen der vorliegenden Arbeit realisiert worden [KURZE 96A]. Die Struktur ist in Abbildung 7-1 dargestellt. Der Thermo-Stift stammt von „Innovative Techniken e.V.“, als Digitalisiertablett dient ein Genius NewSketch 1212 mit Digitalisierstift. Die beiden Stifte wurden aneinander fixiert, so daß die Funktionalitäten beider Einzelstifte erhalten blieben, die Lokalität des Thermo-Stifts und sein Status (auf dem Papier oder in der Luft) jedoch an die des Digitalisierstifts gebunden bleibt und damit nachverfolgbar ist. Als Spracherkenner kann beispielsweise DragonDictate verwendet werden.

Die Software der Aufzeichnungs- und Systemsteuerungskomponenten wurde in C++ unter MS-Windows 3.1x entwickelt und verwendet. Als Ausgabe-Dateiformate werden SKT (wie in AudioTouch von „Innovative Techniken e.V.“) und Windows Metafile (WMF) unterstützt.

Abbildung 7-2 zeigt die Anordnung der Komponenten bei der Benutzung.

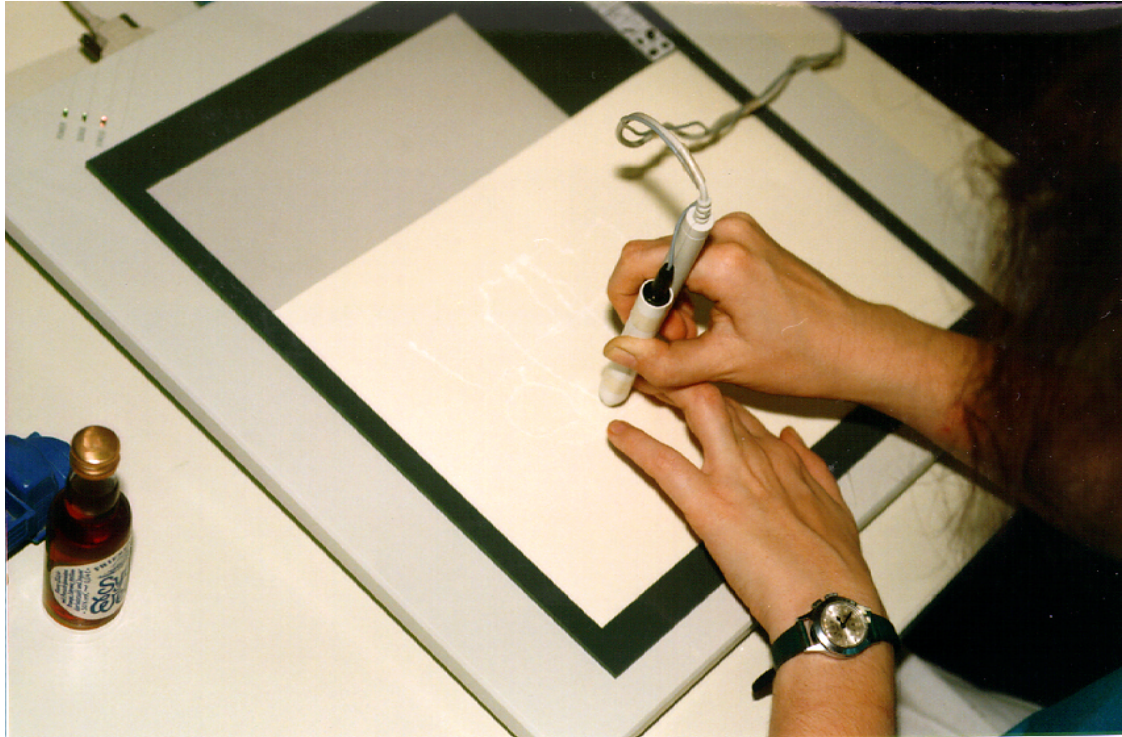


Abbildung 7-2 Eine blinde Versuchsperson beim Zeichnen mit TDraw. Die eine Hand führt den kombinierten Thermo-Digitalisier-Stift, die andere sorgt für die Orientierung.

Der Abstand zwischen der Spitze des Thermo-Stifts und der des Digitalisierstifts bereitet bei der Protokollierung keine Probleme, weil er ebenso wie die Ausrichtung der Stifte zueinander konstant ist und so als Offset bei der Weiterverarbeitung berücksichtigt werden kann.

Die Zeichnung kann während ihrer Entstehung und nach dem Speichern jederzeit auf dem Bildschirm visuell betrachtet werden (siehe Abbildung 7-3).

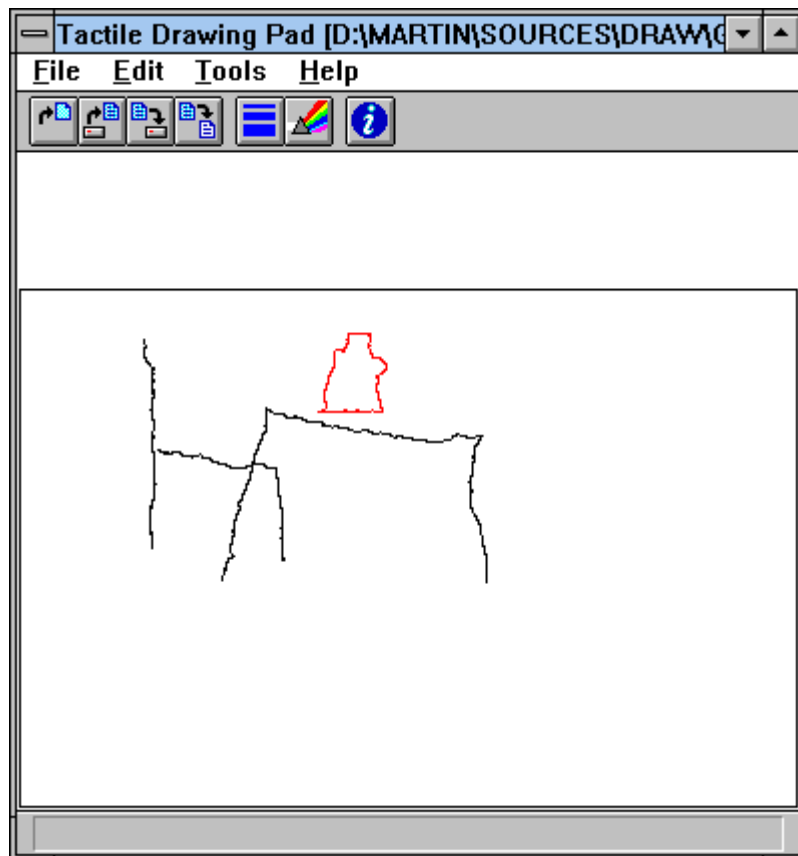


Abbildung 7-3 Bildschirmabzug von TDraw. Die Flasche auf dem Tisch erscheint für den sehenden Beobachter auf dem Bildschirm rot, weil sie als geschlossenes Polygon gezeichnet wurde. Damit wird jeder Punkt innerhalb ihres Umrisses mit dem Objekt „Flasche“ assoziiert und nicht nur die Umrißlinien selbst wie bei dem Stuhl und dem Tisch.

Die mit TDraw und aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse und Methoden wurden beim Entwurf und der Implementierung der haptischen Rendering-Pipeline in prototypischer Form im Programm TRender berücksichtigt, das im folgenden Abschnitt dargestellt wird.

7.3 TRender

Die Realisierung des haptischen Renderers beruht auf den in Abschnitt 5.3 beschriebenen Verfahren. Der Name „TRender“ leitet sich aus der Bezeichnung „**T**aktiler **R**enderer“ ab, die dem eigentlichen Programm zunächst gegeben wurde. Da es sich bei der Wahrnehmung der mit ihm erzeugten Zeichnungen um haptische Perzeption handelt (siehe Abschnitt 2.2), ist TRender eigentlich ein haptischer Renderer, eine Implementierung der haptischen Rendering Pipeline. In diesem Abschnitt wird das System kurz beschrieben. Eine detailliertere Darstellung findet man in [KURZE 97B] und [EITEL 96].

7.3.1 Problemanalyse

Aufgabe des haptischen Renderers ist es, aus einer dreidimensionalen Szenenbeschreibung eine zweidimensionale Zeichnung zu generieren und gleichzeitig die textuelle Anreicherung in Form von Objektnamen zu erstellen.

Im Einzelnen läßt sich die Aufgabe wie folgt konkretisieren:

1. Eine Szenenbeschreibung in VRML 1.0 [VRML SPEC 96], die Objektnamen enthalten kann (aber nicht muß), soll eingelesen werden.

2. Vereinfachungen, wie sie in Abschnitt 5.2 beschrieben sind, sollen durchgeführt werden können; es sollen also relativ flache Körper (wie z.B. Tischplatten usw.) zu absolut flachen Facetten (Polygonen) umgewandelt werden, und relativ lange, schmale Körper sollen zu Linien werden.
3. Die Manipulationen am Modell, die zu einer zweidimensionalen Abbildung führen und die in Abschnitt 5.3 beschrieben sind, sollen vorgenommen werden.
4. Aus dem so manipulierten Modell soll das Bild synthetisiert werden, und gegebenenfalls sollen Linien keilförmig gestaltet werden, die in die Tiefe des Bildes ragende Kanten abbilden (Abschnitt 5.4).
5. Die Vereinfachungen, Manipulationen und die Verwendung von Tiefenhinweisen sollen vom Benutzer steuerbar sein.
6. Die fertige Zeichnung soll in den zweidimensionalen Vektorgrafikformaten SKT und WMF exportiert werden können, wobei in der SKT-Datei den Linien und Polygonen ihre Objektnamen assoziiert sein müssen.

Diese Aufgaben ergeben sich unmittelbar aus dem Zweck des Systems und aus den in Kapitel 3.3 beschriebenen theoretischen Überlegungen.

7.3.2 Vorgehen bei der Herstellung haptischer Grafiken

Vergleichbar mit dem Vorgehen beim konventionellen, visuellen Rendering (siehe Kapitel 4.1) werden nun mehrere Schritte durchgeführt, deren theoretische Grundlagen im Kapitel 4.3 behandelt wurden. Bei der praktischen Implementierung spielen allerdings einige Aspekte eine Rolle, die bei einer rein theoretischen Betrachtung unberücksichtigt bleiben konnten und wurden. Insbesondere das gewählte 3D-Dateiformat (VRML, Virtual Reality Modeling Language [VRML SPEC 96]) bestimmt mit seinen Möglichkeiten und Grenzen, *ob* und insbesondere *wie* einzelne Schritte der Rendering-Pipeline realisiert werden können.

Ein *Pre-parser* liest die VRML-Datei ein und bringt sie in die vom Renderer direkt interpretierbare Form. Dabei bleiben die Gliederungsinformationen der Baumstruktur des VRML-Modells erhalten, und Objektnamen werden gegebenenfalls aus **Info**-Knoten extrahiert. Der eigentliche *Parser* liest nun die Objekte des Modells als Knoten in die Baumstruktur ein. Komplexe Objekte werden in ihre Polygone (Facetten, *faces*) aufgeteilt.

Als Knoten kommen verschiedene - an VRML angelehnte - Typen vor, auf deren Behandlung in Tabelle 7-2 näher eingegangen wird. Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang, daß alle VRML-Geometrieobjekte bis auf die Ebene der sie konstituierenden Punkte im Raum zerlegt werden. Bei im Modell angegebenen Polygonen werden deren explizit bezeichnete Eckpunkte verwendet. Bei Objekten, deren Eckpunkte im Modell nicht explizit angegeben wurden, werden diese durch eine Analyse der implizit für die Darstellung von Formen - wie z.B. Zylindern - verwendeten Polygone ermittelt.

Tabelle 7-2

Behandlung der im VRML-Modell vorkommenden Knoten durch den Parser

VRML-Knoten	Behandlung beim Abbilden auf zwei Dimensionen
Face	Endknoten („Blätter“) des Modellbaums. Die räumliche Orientierung des Polygons und seine topologischen Verbindungen werden mit dem Polygon gespeichert. Auf die Objekte, die das Polygon berühren (oder schneiden), werden Zeiger gehalten, die einerseits später den Zusammenhang von Polygonen festzustellen erlauben und andererseits Folge-transformationen bei der Vereinfachung und der 3D-zu-2D-Abbildung erleichtern. Dabei wird die reine Baumstruktur der Modellrepräsentation aufgegeben, sie steht jedoch als Substruktur weiter zur Verfügung.
Cube, Cylinder	Objekte, die nicht direkt als Menge von Flächen modelliert wurden. Diese Objekte werden in ihre Einzelflächen zerlegt. Dabei werden für alle entstandenen Flächen eigene Punkte zur Definition ihrer Ecken erstellt. Dadurch werden zwar beispielsweise für einen Eckpunkt eines Würfels drei Punkte verwaltet, dies macht aber später das Auffalten erst möglich.
Rotation, Translation	Diese gängigsten Transformationen kommen in vielen VRML-Modellen zur Ortsfestlegung von Objekten zum Einsatz. Außerdem werden Knoten dieses Typs im Laufe der Manipulation durch den Renderer eingefügt.
Separator	Solche Knoten trennen einzelne Äste des Modellbaums. Während normalerweise bei der Traversierung eines Modells die Transformationen akkumuliert werden, werden Knoten innerhalb von Separator-Klammern zwar traversiert, der Systemzustand vor dem Eintritt in eine Separator-Klammer wird hinterher jedoch wieder hergestellt.
Info	Knoten dieses Typs können in VRML beliebige Informationen enthalten. TRender verwendet Textinformationen aus Info-Knoten als Objektnamen für das auf den Info-Knoten folgende Objekt (das wiederum durch einen Teilbaum definiert wird). Diese Objektnamen können später als Informationsanreicherung einzelnen Linien und Flächen in 2D zugeordnet werden.

Die dem Modell zugrunde liegende Baumstruktur bleibt als Teilgraph der neuen Datenstruktur erhalten, jedoch wird (anders, als dies in VRML in der Regel der Fall ist) jeder Punkt im Raum nur für die Konstruktion eines einzigen Polygons verwendet. Stoßen an einer Stelle im Raum mehrere Polygone aneinander, wird für jedes dieser Polygone ein Eckpunkt (mit identischen Raumkoordinaten) explizit erzeugt. Die Einzelpunkte der Polygone enthalten in der aufgebauten Datenstruktur nun jedoch zusätzliche Information über Nachbarschafts- und Identitäts-Beziehungen. Diese wird später bei der Optimierung und der Manipulation der Modelle benötigt und verwendet.

Nach der Polygonalisierung erfolgt die optionale Optimierung/Vereinfachung der inzwischen durch die Umorganisation (Zerlegung in Polygone, Vervielfachung von Punkten) angewachsenen Szene.

Die Optimierung besteht im wesentlichen aus einer Skalierung komplexer Objekte in eine Raumrichtung: Die „Dicke“ einer Tischplatte wird auf Null gesetzt, so daß sie nicht mehr aus sechs Polygonen (Oberseite, Unterseite, die vier Flächen der „Tischkante“) besteht,

sondern nur noch aus einem Polygon. Hierzu wird das Verhältnis der Höhe des Objekts zu seiner senkrecht auf der Höhe stehenden Flächendiagonale berechnet (siehe Abbildung 7-4). Ist es kleiner als ein vom Benutzer vorgegebenes Maß, wird die Höhe auf Null gesetzt. Dieses Vorgehen wird für alle drei Raumrichtungen durchgeführt, so daß sehr schlanke Gegenstände in zwei Raumrichtungen auf das Maß Null gesetzt werden können; sie werden zu Linien.

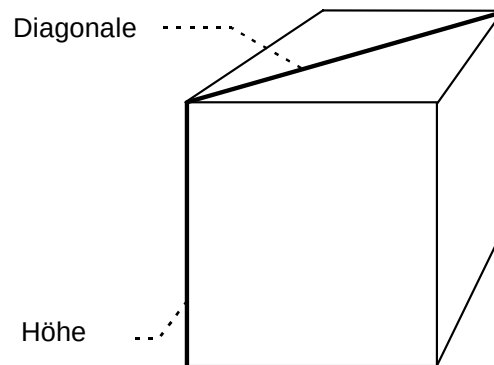


Abbildung 7-4 Das Verhältnis „Höhe zu Diagonale“ eines Quaders legt fest, ob er zu einem Polygon vereinfacht wird oder nicht.

Durch die Skalierung verschieben sich Polygone des Ursprungsobjekts. Dadurch könnten Topologie-Probleme entstehen, weil Einzelteile jeweils für sich schrumpfen und dadurch den Zusammenhalt mit ihren Nachbarobjekten verlieren. Dies wird verhindert, indem nach der Verschiebung des Ursprungsobjekts alle von der Verschiebung von Polygonen dieses Objekts betroffenen Teile um den selben Vektor verschoben werden. Hierzu werden die in der entsprechenden Liste der Polygone gehaltenen Verknüpfungslisten verwendet. Dieses Vorgehen wiederholt sich rekursiv, so daß die Gesamt-Topologie immer erhalten bleibt. Durch eine Markierung schon behandelter Knoten wird eine zirkuläre Traversierung des Verknüpfungsgraphen vermieden.

Das Auffalten geschieht, indem zunächst die größte Teilfläche eines Objekts ermittelt wird, die von der momentanen Erfasser-Position aus parallel zur Darstellungsebene liegt. Ausgehend hiervon wird jede an diesem Polygon hängende Teilfläche dahingehend untersucht, ob sie gefaltet werden kann: Fällt sie (ggf. teilweise) mit einer Fläche eines anderen Objekts zusammen, die nicht mitgefaltet werden kann, so wird die betrachtete Fläche nicht weiter manipuliert (Bsp.: Seitenwände aneinander stehender Schränke). Diese Eigenschaft wird aus den topologischen Verbindungen der **face**-Knoten (Polygone) ermittelt. Kann die Fläche gefaltet werden, so wird die Kante, die als Rotationsachse verwendet werden soll, ermittelt, im allgemeinen die Verbindungskante zur zentralen (größten) Teilfläche. Der Rotationswinkel ergibt sich aus dem Winkel zwischen den Normalen der Polygone.

Beim Spreizen werden Objekte geklappt, die (da sie Liniencharakter haben) nur an einem Punkt die Zentralfläche berühren. Abbildung 7-5 zeigt das Vorgehen dabei: Der Rotationswinkel ergibt sich aus dem Vektor V_1 vom Mittelpunkt der Fläche zum Verbindungspunkt (P_1) mit dem zu spreizenden Teilobjekt und der Richtung dieses Objekts, einer Linie. Die Rotationsachse steht senkrecht auf V_1 und läuft durch P_1 und P_2 , der auf der Zentralfläche liegt.

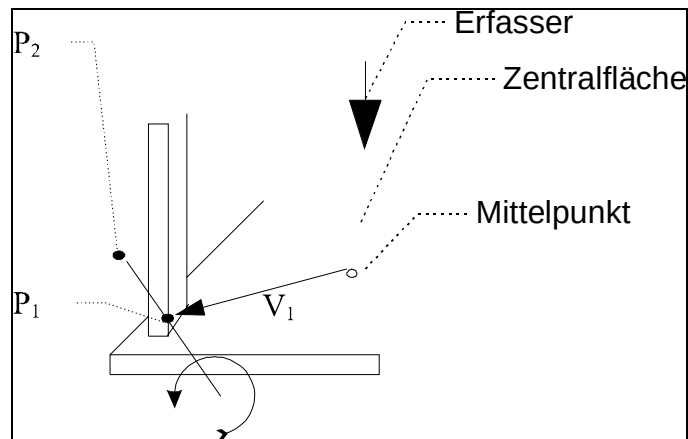


Abbildung 7-5 Ermittlung der Rotationsachse und des Rotationswinkels beim Spreizen.

Liegt im Topologie-Graphen ein Ringschluß vor, d.h. berührt ein Teilobjekt mit zwei Linien die Zentralfäche, so werden P_1 und P_2 aus den Berührungspunkten ermittelt, wie in Abbildung 7-6 gezeigt.

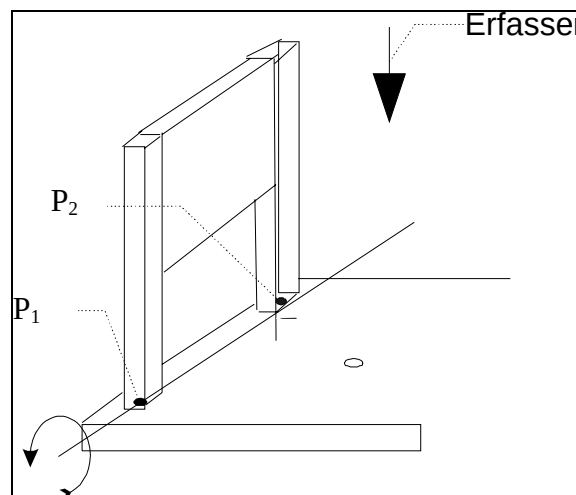


Abbildung 7-6 Ermittlung der Rotationsachse bei zwei Berührungspunkten mit der Zentralfäche.

Die Rotationen werden in den Modellbaum eingetragen und beim Traversieren berücksichtigt, so daß das fertige Bild die Teilobjekte „aufgefaltet“ oder „gespreizt“ zeigt.

Sämtliche Manipulationen lassen die Info-Knoten unverändert, so daß stets der Name eines bearbeiteten Objekts zur Verfügung steht, auch wenn die ihm zugehörigen Linien und Polygone durch Rotationen und andere Manipulationen nicht mehr an ihrem alten Ort im Raum liegen.

Die Herstellung der Zeichnung wie auch der SKT-Datei erfolgt, indem die Einzelobjekte von hinten nach vorn gezeichnet werden. Dabei wird die ursprüngliche Lage der Gegenstände als Kriterium verwendet.

7.3.3 Implementierung

Die Implementierung der haptischen Rendering Pipeline führte zu einem Programm (TRender), das in C++ unter MS-Windows realisiert wurde und das wie oben beschrieben funktioniert. Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8 zeigen Ergebnisse des Renderers und vergleichbare Objekte der visuellen Welt.

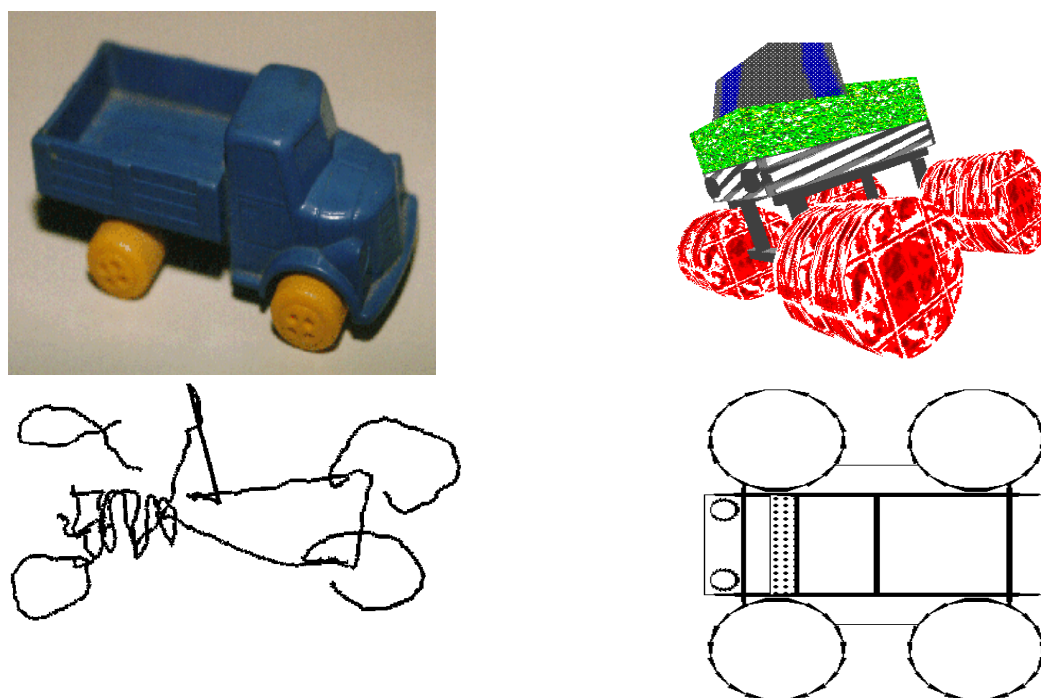


Abbildung 7-7 Ein Spielzeug-LKW, ein visuell gerendertes VRML-Modell, eine Zeichnung einer Blinden des LKW und eine von TRender produzierte taktile Zeichnung. Die Schraffur auf der Fahrerkabine zeigt, daß die echte räumliche Ausrichtung der Fläche schräg verläuft.

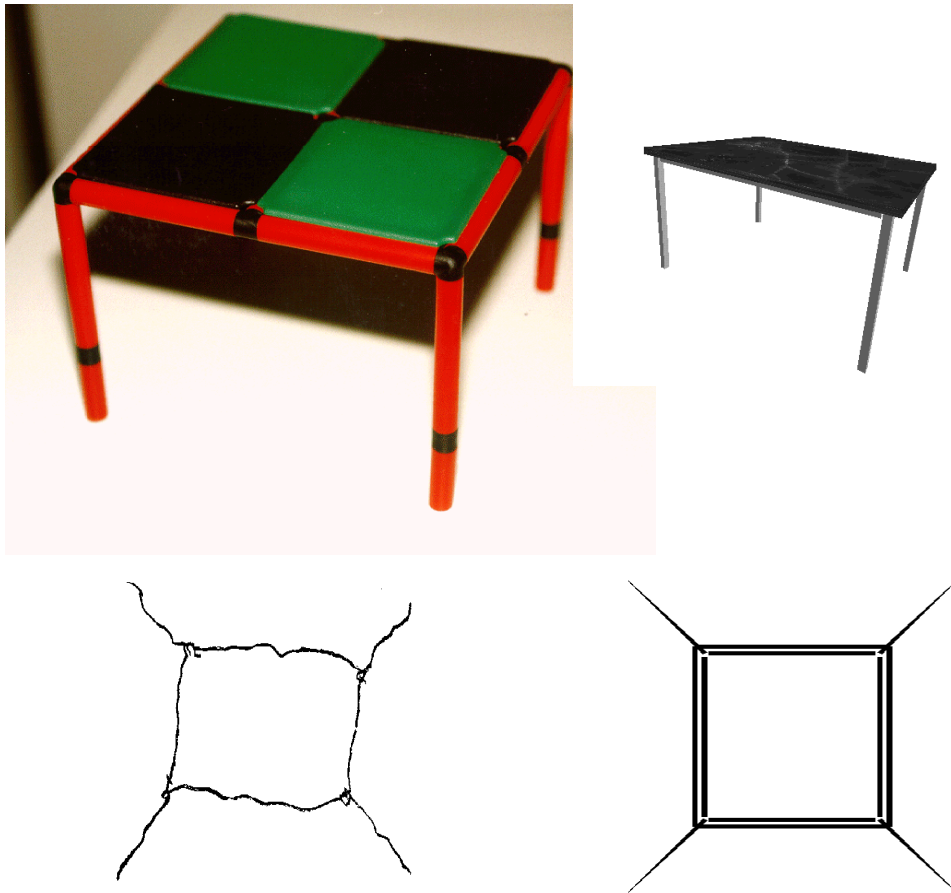


Abbildung 7-8 Ein Tisch als Spielzeug, visuell gerendertes Modell, von einem Blinden gezeichnet und von TRender vereinfacht, gespreizt und mit Tiefenhinweisen (Keilen) gezeichnet.

Die Produktion der Zeichnungen ist ein interaktiver Prozeß, bei dem ein (sehender) Benutzer stets einen Überblick darüber hat, wie das endgültige Ergebnis aussehen wird. Abbildung 7-9 zeigt die Arbeitsansicht und ein Dialogfenster von TRender.

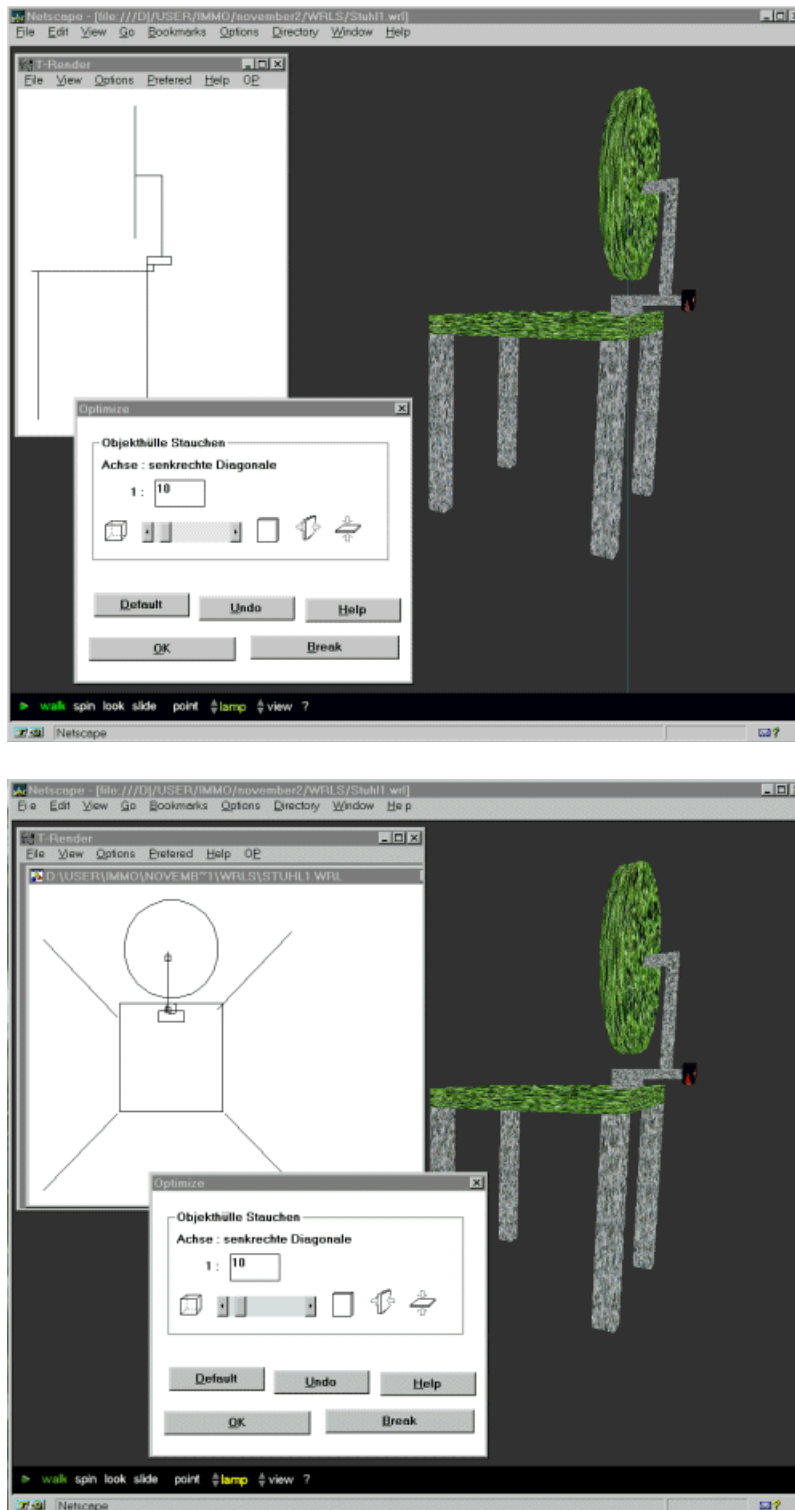


Abbildung 7-9 Zwei Bildschirmabzüge von TRender (im Vordergrund) mit einer vom Netscape Live3D-Viewer visuell gerenderten Version im Hintergrund. Oben: nach dem Optimieren und vor dem Spreizen; unten: nach dem Spreizen.

Die Ergebnisse sowohl von TDraw (Abschnitt 7.2) als auch von TRender können mit AudioTouch interaktiv erkundet werden. Ein um eine Führungskomponente erweitertes und mit zusätzlicher Hardware unterstütztes Erkundungssystem wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

7.4 TGuide

In diesem Abschnitt werden Komponenten beschrieben, die zur interaktiven Erkundung taktiler Grafiken verwendet werden können (siehe auch [KURZE 98A]). Zusätzlich werden einige pro-aktive Erweiterungen dargestellt, die den Benutzer aktiv bei der haptischen Wahrnehmung führen und unterstützen. Sowohl die hier verwendete Hardware (die „Vibratormaus“) als auch die Software wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und in [KURZE 98A] näher beschrieben.

7.4.1 Problemanalyse

Taktile Grafiken, die mit den in dieser Arbeit dargestellten Methoden entworfen wurden, können prinzipiell auch ohne textuelle Anreicherung erkannt werden. Jedoch wird dann eine angemessene Lernphase und bisweilen viel Zeit zum Erkunden benötigt. Es hat sich gezeigt, daß die selbständige Erkundung mit Unterstützung durch gesprochene Objekt-namen den Erkundungsprozeß erheblich beschleunigt [KURZE 97B]. Diese Beobachtung wurde auch schon an anderer Stelle im Zusammenhang mit nicht unbedingt gegenständlichen Grafiken gemacht. Daraus resultierten Systeme, die der taktilen Information Texte oder Geräusche hinterlegten, um ihre Erkennung zu erleichtern [PARKES 88, LÖTZSCH 94]. Ein Erkundungssystem muß zumindest die von den schon existierenden Lösungen (Nomad von Parkes und AudioTouch von Löttsch u.a.) gebotene Leistung umfassen.

Allerdings kann die Unterstützung, die solche Systeme bieten, scheitern, wenn der Erfasser bestimmte Stellen der Zeichnung überhaupt nicht findet oder die Zeichnung entlang eines verwirrenden Pfades abtastet. Abhilfe kann hier nur eine pro-aktive Unterstützung bieten: Dem Benutzer muß eine Bewegungsrichtung bzw. ein Erkundungspfad vorgeschlagen werden.

Als nicht-visuelle Kanäle bieten sich hörbare Sprache und der Tastsinn an. Vor der Ausgabe einer vorgeschlagenen Untersuchungsrichtung muß deren Ermittlung in Abhängigkeit von der momentanen Handposition stehen. Danach muß der Richtungsvorschlag in einer Weise ausgegeben werden, die den Erfasser unterstützt, ohne ihn zu gängeln oder kognitiv zu sehr von seiner eigentlichen Aufgabe abzuhalten. In den folgenden zwei Unterkapiteln werden eine Führungssoftware und ein vibro-taktiler Ausgabegerät vorgestellt. Im anschließenden Kapitel 8 werden die Ergebnisse der Evaluation der Komponenten behandelt.

7.4.2 Erkundungs-, Such- und Führungssoftware

Die Erkundungs- und Führungssoftware TGuide lädt eine SKT-Datei, deren tastbare Version auf dem Digitalisiertablett liegt. Diese Datei kann von TDraw, TRender oder Audio-Touch stammen. Die aus der Datei extrahierbare Grafik (die in tastbarer Form auf dem Digitalisiertablett liegt) wird auf dem Bildschirm angezeigt.

Die Grundfunktion des Systems besteht darin, die Gegenstände zu benennen, auf deren grafischer Repräsentation sich die Hand bzw. der Digitalisierstift befindet. Drückt der Benutzer nahe an einer Linie oder innerhalb einer Fläche auf den Stift, wird der Name des unterliegenden Objekts per Sprachsynthese ausgegeben. Als Sprachausgabe wurde eine Anbindung an den „Talking Blaster“ implementiert. Insoweit entspricht TGuide Audio-Touch.

Zusätzlich kann die erkundende Hand (bzw. der Stift) über die Grafik von Objekt zu Objekt geführt werden. Dazu wird die (grobe) Richtung bestimmt, in die der Stift zu bewegen ist, um das nächste Objekt zu finden. Die Richtungsangabe wird aus einer Menge von acht vordefinierten Werten gewählt, die den acht Richtungen auf einer Kompaßrose ent-

sprechen. Die am besten passende Richtung wird als Pfeil auf dem Bildschirm an der Cursorposition angezeigt, die gleichzeitig die Position des Stifts auf der Zeichnung ist. Für die nicht-visuelle Navigation kann die Richtung per Sprachausgabe ausgegeben oder mit der Vibratormaus angezeigt werden (siehe Abschnitt 7.4.3).

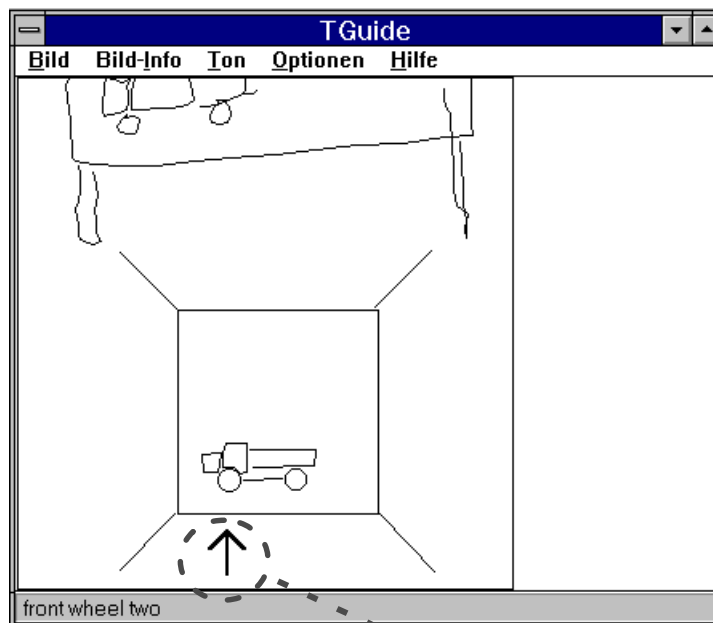


Abbildung 7-10 Bildschirmabzug von TGuide: Im Rahmen der geleiteten Erkundung wird der Benutzer zum Vorderrad geführt. In der Statuszeile und per Sprache wird das nächste Ziel („front wheel two“) ausgegeben. Der Mauscursor-Pfeil zeigt in die entsprechende Richtung, die auch nicht-visuell ausgegeben werden kann.

Zusätzlich zur Erkundungsunterstützung und zur geleiteten Erkundung bietet TGuide auch die Möglichkeit, Objekte der Szene suchen zu lassen: Aus der Liste der enthaltenen Gegenstände kann der gesuchte durch Eingabe seiner Nummer ausgewählt werden (siehe Abbildung 7-11). Hierzu sind Tastatur und Spracheingabe einsetzbar. TGuide leitet den Benutzer dann wie im Führungsmodus zum gesuchten Objekt auf der Zeichnung.

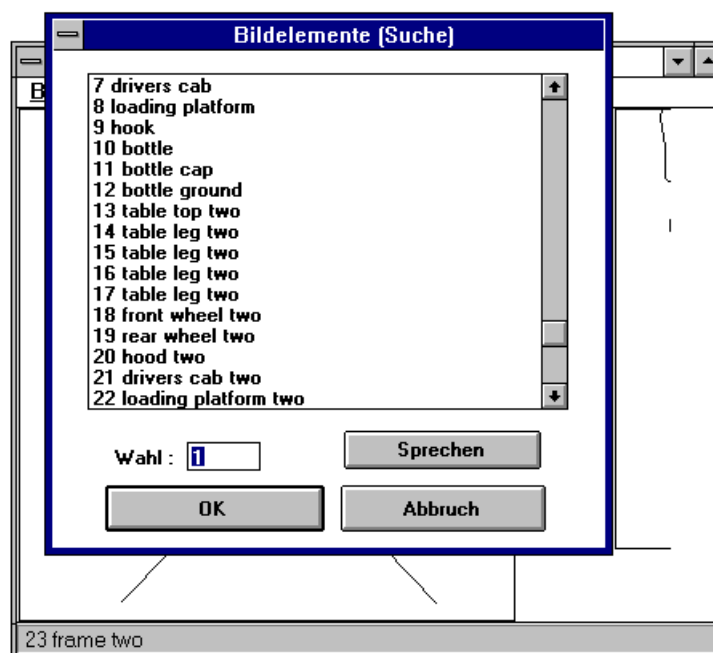


Abbildung 7-11 Bildschirmabzug der Dialogbox zur Auswahl eines auf der Zeichnung zu suchenden Gegenstands.

Schließlich können die aus TRender übernommenen räumlichen Informationen gegebenenfalls auch sprachlich ausgegeben werden: Die Information, welches Objekt sich hinter welchem anderen befindet, kann abgerufen werden. Diese Anwendung ist allerdings nur als „Abfallprodukt“ der Entwicklung von TRender und TGuide entstanden. Sie widerspricht den im Abschnitt 3.3 aufgestellten Forderungen, räumliche Eigenschaften grafisch darzustellen.

7.4.3 Die Vibratormaus

Der Vibratormaus liegt folgende Überlegung zugrunde: Zur unmittelbaren Navigation der tastenden Hand sollte die Hand selbst stimuliert werden und nicht das Auge, weil sonst eine Auge-Hand-Koordination nötig wäre. Gibt man Richtungsanzeigen verbal-akustisch, muß die Richtungsangabe aus der symbolischen Form der Sprache zunächst in eine konkrete Handlungsplanung umgesetzt werden, was eine zusätzliche kognitive Belastung darstellen würde. Eine 2D-raum-akustische Maus, wie sie mit dem von Crispien [CRISPIEN & PETRIE 93] beschriebenen System möglich wäre, würde erstens eine Ohr-Hand-Koordination erfordern und zweitens den akustischen Wahrnehmungskanal belegen, der eventuell von anderen Teilen der Anwendung benötigt würde. Also sollte die Hand selbst die Richtungsinformation für die ihr vorgeschlagene Erkundungsrichtung erhalten.

Zur Führung auf einer Zeichnung wäre offensichtlich auch ein force-feedback-Gerät geeignet, wie z.B. der Pantograph [RAMSTEIN & HAYWARD 94]. Gegen dessen Einsatz sprechen einerseits sein hoher Preis sowie seine geringe Verfügbarkeit und andererseits, daß die Führung durch ein „Bewegt-werden“ ersetzt wird: Der Erfasser bewegt seine Hand nicht mehr selbst, sondern läßt sie vom Gerät bewegen. Dagegen spricht die zu erwartende geringe Akzeptanz bei der Benutzergruppe und die Ähnlichkeit dieses Vorgehens mit dem passiven Tasten (siehe Abschnitt 2.3), das gegenüber dem aktiven Tasten schlechtere Erkennungsergebnisse zeigt.

Die Alternative zum Pantograph ist die Stimulation der Hand an der Stelle, die dem Ziel am nächsten liegt. Der Reiz kann so als Vorschlag interpretiert werden, der befolgt werden kann oder auch nicht. Zugleich ist keine Umsetzung von visuellen oder akustischen Reizen nötig, was die kognitive Belastung gering hält.

Aus diesen Überlegungen folgt das Funktionsprinzip der Vibratormaus: An der Außenseite der (mehr oder weniger kreisförmigen) Maus werden - gleichmäßig verteilt - acht Vibratorelemente integriert, wie es Abbildung 7-12 zeigt. Der Ansatz unterscheidet sich also grundlegend von solchen, bei denen einer regulären Maus ein einzelnes taktils Element angefügt wurde (z.B. [MÜNCH & STANGENBERG 96]).

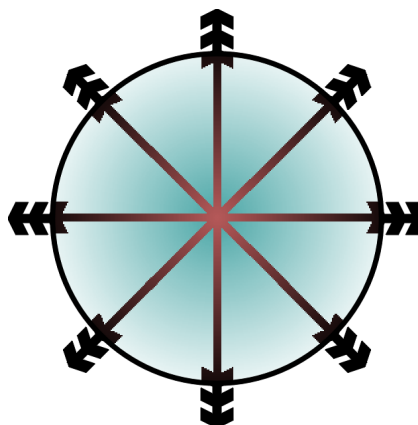


Abbildung 7-12 Prinzip der Vibratormaus: Jedes der acht Vibratorelemente zeigt eine mögliche Richtung für die weitere Erkundung an, wobei immer nur jeweils ein Element aktiv ist.

Zur prototypischen Implementierung kam ein Gerät, das acht Vibratorelemente in einem Gehäuse vereinigt, welches mit dem Digitalisierstift auf dem Tablett bewegt werden kann. Abbildung 7-13 zeigt den schematischen Aufbau:

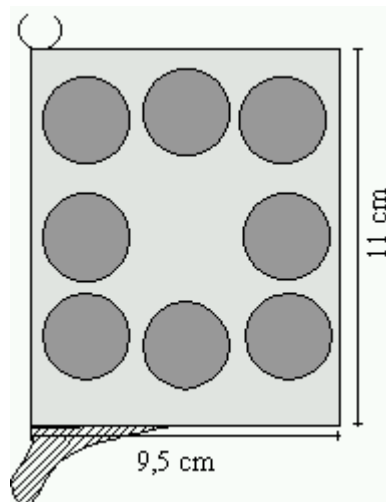


Abbildung 7-13 Aufbau des vibro-taktilen prototypischen Navigationsunterstützungsgeräts, der Vibratormaus. Man erkennt die Anordnung der Vibratorelemente. Oben links im Bild die Halterung für den Digitalisierstift.

Die einzelnen Vibratorelemente bestehen aus einem Permanentmagneten, der in einer Spule steckt, die unter Spannung selbst zum Magneten wird und den Dauermagneten aus ihrem Kern zu drücken bestrebt ist. Durch Ein- und Ausschalten des elektrischen Stroms kann der Dauermagnet zum Vibrieren gebracht werden. Die Rückstellkraft hierzu ist entweder die Schwerkraft oder stammt von der über das Element gespannten Gummischicht.

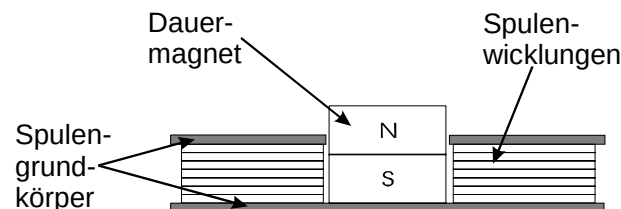


Abbildung 7-14 Prinzipieller Aufbau eines Vibratorelements.

Die Positionen der Vibratorelemente folgen aus der gewünschten kompaß-artigen Anordnung (Abbildung 7-12), der Physiologie der menschlichen Hand und konstruktiven Randbedingungen, die sich aus dem Außenmaß der Spulen und den Wechselwirkungen zwischen den Spulen und Magneten im Betrieb ergeben.

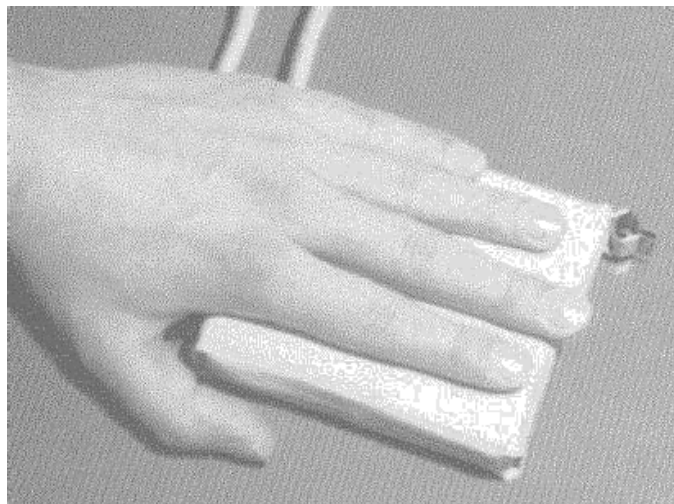


Abbildung 7-15 Der endgültige Prototyp der Vibratormaus mit darauf liegender Hand, welche die vibrierenden Elemente verdeckt.

Das vibro-taktile Ausgabegerät kann auf dem Digitalisiertablett mit Digitalisierstift als Maus verwendet werden. Alternativ hierzu bietet sich der stationäre Einsatz an: Das Gerät liegt an einem Ort (mit vibrierenden Anzeigeelementen) neben dem Benutzer, der es bei Bedarf konsultiert, um Richtungshinweise zu erhalten. Beide Varianten des Einsatzes sind untersucht worden (siehe Abschnitt 8.4).

Insbesondere in Verbindung mit TGuide (vgl. [KURZE 98A] und Kapitel 8.4) lassen sich mit der Vibratormaus geleitete Erkundungen taktiler Zeichnungen verschiedenster Art durchführen. Durch die einfache Konstruktion ist das Konzept auch auf andere Geräte und Bereiche anwendbar, z.B. bei Schulungen und zur Benachrichtigung „normaler“ (sehender) Computerbenutzer über nicht sichtbare Ereignisse oder Zustände ihrer Anwendungsumgebung (verdeckte Fenster o.ä.).

Da die vibrierenden Signale immer nur Vorschlagscharakter haben, also den Benutzer nie zu einer Handlung (Bewegung in eine bestimmte Richtung) zwingen, ihn wohl aber zum Tun auffordern, ist das Gerät als pro-aktives Hilfsmittel gut einsetzbar.