

I Einleitung

Durch die immer stärkere Verbreitung von Computertechnologie im Alltags- und Berufsleben ergaben sich für Blinde in den achtziger Jahren ganz neue Chancen, Tätigkeiten auszuführen, die ihnen vorher nicht möglich waren. Im wesentlichen konnten sie dabei auf die gleichen Systeme (Rechner und Anwendungsprogramme) zurückgreifen wie Sehende; sie benötigten lediglich Apparate, die ihnen den Text auf dem Bildschirm zugänglich machten, sogenannte *screen reader* [APH 93]. Mit dem Siegeszug grafischer Benutzungsoberflächen und der zunehmenden Verwendung grafischer Informationsrepräsentation schien die erreichte Integration Blinder in den Berufsalltag wieder auf der Strecke zu bleiben [PETRIE & GILL 93]. Es zeigte sich nämlich, daß der für zeichenbasierte Anzeigen (Textbildschirme) entwickelte Ansatz, die anzuzeigenden Daten erst unmittelbar vor der physischen Materialisierung auf eine Anzeige für eine nicht-visuelle Modalität umzuleiten, für moderne Anwendungen nicht mehr brauchbar ist: Es hat keinen Sinn, ein Pixel, das auf einem grafischen Bildschirm eine bestimmten Farbe und Position hat, nicht-visuell zu präsentieren, dies wäre auch wegen der gewaltigen Anzahl solcher Pixel nur mit kaum vertretbarem Aufwand zu realisieren [MYNATT & WEBER 94].

Das eben genannte Problem, Blinden Tätigkeitsfelder zu eröffnen oder zu erhalten, die eine Arbeit am Computer erfordern, läßt sich in zwei Teilprobleme aufteilen, die mit prinzipiell ähnlichen Mitteln bearbeitet werden können: Erstens muß die Benutzungsschnittstelle der Anwendungsprogramme zugänglich gemacht werden, und zweitens müssen die Informationen, die von diesen Anwendungsprogrammen angezeigt und verarbeitet werden, nicht-visuell zu erfassen sein. In beiden Fällen muß die formale Repräsentation, die der Visualisierung zugrunde liegt, analysiert und zugänglich gemacht werden. Im Fall der Benutzungsschnittstellen müssen z.B. Menü- und Meldungsfensterinhalte präsentiert werden, was durch entsprechende Eingriffe in die Steuerung der Benutzungsoberfläche, also z.B. in das Betriebssystem, möglich ist [WEBER 92A]. Die vom Anwendungsprogramm verwendeten Daten, also die Informationen, mit denen der Benutzer¹ seine Arbeitsaufgabe erfüllt, sind ebenfalls auf einer möglichst hohen Abstraktionsebene zu analysieren und für die nicht-visuelle Präsentation aufzubereiten. Schon textuelle Informationen müssen oft extrahiert werden, *bevor* sie durch die Benutzungsoberfläche zur Anzeige gebracht werden, weil sie bereits vom Anwendungsprogramm in eine an der visuellen Wahrnehmung orientierte Form gebracht wurden. In noch stärkerem Maß gilt dies für grafische Informationen, wie im folgenden kurz und im Laufe dieser Arbeit ausführlich gezeigt wird.

Grafische Informationen präsentieren sich dem Erfasser (dem sehenden Betrachter oder dem blinden Tastenden) in der Regel als Grafik (zweidimensionale Darstellung, siehe auch Abschnitt 2.1 zur genaueren Definition). Grafiken sind zweidimensionale Repräsentationen, bei denen Informationen sowohl in den grafischen Elementen selbst als auch in deren Position zur Verfügung gestellt werden. Bei visuellen Grafiken² tragen die Farbe und die Lage jedes Bildpunkts (*Pixel*) Informationen, die bei der visuellen Wahrnehmung (ggf. im Kontext der umgebenden Pixel) dekodiert werden. Bei der nicht-visuellen Wahrnehmung muß die Dekodierung zum gleichen Ergebnis führen. Dies ist nur möglich, wenn die visuell

¹ Wann immer in dieser Arbeit von Personen die Rede ist, sind Menschen jedes Geschlechts gemeint, wenn das biologische Genus nicht ausdrücklich erwähnt ist. Ein Blinder ist also nur eine Person, die die Eigenschaft hat, blind zu sein. Entsprechendes gilt für Benutzer, Programmierer, Mitglieder usw.

² In dieser Arbeit werden Begriffe im allgemeinen dort definiert, wo sie zum ersten Mal verwendet werden. Zusätzlich findet sich ein Glossar im Anhang, das alle relevanten Begriffe mit ihren hier verwendeten Definitionen enthält.

Visuelle Grafiken sind solche, die für die visuelle Wahrnehmung entworfen wurden, also nahezu alle gängigen Grafiken. Auf die Unterschiede zu haptischen Grafiken wird im Kapitel 3 genauer eingegangen.

durch eine Pixelmatrix repräsentierte Information selbst zur Verfügung steht und nicht-visuell präsentiert werden kann³.

Auch wenn man dem Kommunikationswissenschaftler Marshall McLuhan [MC LUHAN & FIORE 67] nicht bedingungslos folgen will, wenn er behauptet, das Medium sei die Nachricht, kann man gleichwohl feststellen, daß das Medium „Grafik“ in den meisten Fällen bewußt gewählt worden ist, um Information zweidimensional darzustellen, insbesondere wenn es sich bei der Information um räumliche Relationen handelt. Eine nicht-visuelle Repräsentation dieser Information sollte also möglichst auch grafische Form haben, um diese Zweidimensionalität zu erhalten⁴.

Aus der Sicht des Informatikers stellt sich hier das interessante Problem, räumliche Information so zu kodieren, daß sie nicht-visuell erfaßt werden kann. Im Rahmen des Fachgebiets Mensch-Computer-Interaktion (MCI) läßt sich diese Problemstellung einbetten in den Forschungsbereich „Grafische Dialogsysteme“. Hier stellt sich neben der Kodierung der Information das Problem der Interaktion von Menschen mit dieser Repräsentation. Diese Einbeziehung des Menschen verursacht einerseits Schwierigkeiten, die in anderen Gebieten der Informatik unbekannt sind, birgt andererseits aber auch einen besonderen Reiz, da sie Interdisziplinarität erfordert *und* zu anwendungsnahen Ergebnissen führt. Die aus der Problemskizze abzuleitenden Ziele der vorliegenden Arbeit werden im folgenden Unterkapitel näher vorgestellt.

1.1 Ziele der Arbeit

Das Problem, räumliche Informationen, insbesondere 3D-Modelle realer Gegenstände, nicht-visuell darzustellen, läßt sich unter verschiedenen Gesichtspunkten näher spezifizieren. Neben der Berücksichtigung von Anwendungsaspekten, die sich aus den unmittelbaren Bedürfnissen der primären Zielgruppe ergeben, sollen auch Werkzeuge für kognitions- und perzeptionswissenschaftliche Untersuchungen bereitgestellt werden. Das zentrale Ziel der vorliegenden Arbeit ist es jedoch, Methoden und Verfahren zum Darstellen⁵ dreidimensionaler Objekte auf zweidimensionalen haptischen Medien und Prinzipien der Interaktion mit solchen haptischen Repräsentationen zu entwickeln und zu untersuchen. Damit liegt der Fokus im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion, wobei - wie sich noch zeigen wird - intensive Zusammenarbeit mit benachbarten Disziplinen innerhalb und außerhalb der Informatik erwünscht und notwendig ist.

Wie Emiliani et al. in [EMILIANI ET AL. 91, S. 396] darlegen, „one of the major obstacles to the socio-economic and cultural integration of blind people into society is the problem of making graphic information accessible to them in the various application environments that they face in everyday life“. Die Tatsache, daß das Alltagsleben immer stärker von visuell-grafischen Stimuli geprägt ist, reicht allein noch nicht aus, um die Notwendigkeit des Zugangs zu Grafiken für Blinde zu begründen. Diese Notwendigkeit ergibt sich erst, wenn

³ Vanderheiden schreibt in [VANDERHEIDEN 95]: „In many cases, the information being displayed is not itself visual in nature, but is simply displayed for sighted users“.

⁴ In [WOA ET AL. 90] wird ein Ansatz skizziert, der eine Aufteilung der Fläche in der Art eines Quad-Trees vorschlägt, in dessen Blättern sich geometrische Grundelemente befinden können. Der Zugang erfolgt nur symbolisch/textuell über die Pfade zu den Blättern. Dies verlangt, daß die Grafik komplett mental rekonstruiert werden muß, bevor ihr Inhalt erkannt werden kann. Das Medium ist also im angesprochenen Sinn nicht grafisch, was die Wahrnehmung enorm erschwert. Der Ansatz ist nach 1990 nicht weiter verfolgt worden.

⁵ Den Prozeß dieses Darstellens auf der Basis einer geometrischen Modellbeschreibung nennt man in der Informatik/Computergrafik „Rendering“ (engl. für „Wiedergabe, Übersetzung, Übertragung“). Im Kapitel 4 wird dieser Prozeß ausführlicher dargestellt. Eine kurze Erläuterung dieses wie auch anderer verwendeter Fachbegriffe ist außerdem im Glossar zu finden.

man berücksichtigt, daß immer mehr Informationen ausschließlich grafisch zur Verfügung gestellt werden, sei es, weil sie ihrer Natur nach überwiegend zweidimensional sind, oder sei es, weil die grafische Repräsentation den Zweck der Informationspräsentation besser erfüllt als andere Formen (z.B. Text).

Auch beim Umgang mit Computern werden Bilder immer häufiger eingesetzt: Als Hinweise auf Interaktionsoptionen (*icons*), in Multimedia-Datenbanken, bei der Ausbildung und in Nachschlagewerken und zunehmend auch eingebettet in Dokumente, beispielsweise zu druckende Texte einer Textverarbeitung oder Hypertext-Dokumente wie sie im WWW vorkommen [KURZE & STROTHOTTE 93]. Gerade auch im Freizeit- und Heimanwendungsbereich hat die grafische Anreicherung von Computerapplikationen große Verbreitung gefunden und damit Bedeutung erhalten. Um Blinden den Zugang zu diesen Anwendungen und Inhalten zu geben bzw. zu erhalten, muß ihnen auch die grafisch repräsentierte Information vermittelt werden. Einige Typen von Grafiken und mögliche Präsentationsformen wurden in [GUIB 93] vom Autor aufgelistet. Allen nicht-visuellen Präsentationen ist gemeinsam, daß ihnen ein *Modell* des zu präsentierenden Inhalts zugrunde liegt (siehe auch [REICHERT ET AL. 94]).

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, dreidimensionale Modelle, die herkömmlich für die visuelle Wahrnehmung als „fotorealistisch“⁶ gerenderte Computergrafiken präsentiert oder in *Virtual Reality*-Umgebungen als Benutzungsschnittstellen bei räumlichen Tätigkeiten verwendet werden, blindengerecht taktil anzubieten. Es soll also eine Methode gefunden werden, ausgehend von den gleichen geometrischen Modellen, die auch in der Computergrafik für Sehende verwendet werden, angemessene Grafiken für Blinde zu erzeugen. Dazu gehört die Ermittlung geeigneter Darstellungsverfahren ebenso wie die methodische Gestaltung der Interaktion mit den erzeugten Grafiken (siehe auch [KURZE 95B, KURZE 97A, KURZE 98A]).

Neben diesem anwendungsbezogenen Ziel sollen die Darstellungsverfahren und die in ihrem Zusammenhang entwickelten Werkzeuge sowie die gewonnenen Beobachtungen wissenschaftlichen Nachbardisziplinen zur Verfügung gestellt werden. Dabei ist in erster Linie an die *Kognitionswissenschaften* wie z.B. die Psychologie gedacht. Probleme der Repräsentation und Präsentation des Raumes und seiner Eigenschaften gehören zu den grundlegenden Forschungsrichtungen dieser Wissenschaft [KOGWIS 96]. Hier sind insbesondere die Beziehungen zwischen realer Welt, deren (ausschnittsweiser) Modellrepräsentation im Rechner und im denkenden Menschen sowie die Abbildung dieser Modelle auf einem zweidimensionalen Medium Gegenstand der Untersuchung. Sowohl separat als auch im Zusammenhang mit der Kognition soll auch die *Wahrnehmung* von Raum und Abbildung im gegebenen Kontext untersucht werden.

Unter Berücksichtigung der ins Auge gefaßten Anwendungen und der kognitionswissenschaftlichen Überlegungen soll vor allem die Mensch-Computer-Interaktion als Teilgebiet der *Informatik* um Erkenntnisse, Werkzeuge und Methoden bereichert werden, welche die Interaktion Blinder mit dem Computer und seinen Anwendungen, aber auch die haptische MCI insgesamt betreffen. Da es bei der behandelten Thematik auch um Fragen geht, die im Rahmen der Computergrafik für die visuelle Wahrnehmung schon seit längerem gestellt werden, soll die vorliegende Arbeit auf diesem Gebiet zwei Ziele erreichen: Einerseits soll

⁶ Als „fotorealistisch gerendert“ bezeichnet man Computergrafiken, die einem *Foto* des Abgebildeten möglichst ähnlich sind, möglicherweise sogar nicht mehr von einem Foto zu unterscheiden sind. Allgemein wird „Fotorealismus“ als höchstes qualitatives Ziel der Computergrafik angesehen. Den Begriff des Realismus an eine *Kamera* zu binden und nicht an die menschliche Wahrnehmung, läßt bei genauerer Betrachtung Zweifel an der Anwendbarkeit dieses Optimalitätskriteriums aufkommen, die im Kapitel 3.4, das sich mit Überlegungen zum Realismus beschäftigt, näher erläutert werden.

eine alternative (nicht-visuelle) Methode der Darstellung räumlicher Gegenstände demonstriert werden, andererseits soll die Bedeutung von semantischen Anreicherungen⁷ geometrischer Modelle in einem bestimmten Anwendungskontext gezeigt werden.

Zusammenfassend läßt sich die Fragestellung, mit der sich diese Arbeit beschäftigt, wie folgt formulieren:

Wie kann eine räumliche Szene für die interaktive haptische Wahrnehmung insbesondere durch Blinde zweidimensional⁸ dargestellt werden, und wie kann die computerunterstützte Interaktion mit solchen Darstellungen effektiv gestaltet werden?

Im oben erwähnten Zusammenhang stellen Emiliani et al. [EMILIANI ET AL. 91, S. 412] fest: „We do not yet know how to encode information in a way that fully utilizes the capability of the haptic system. A (...) problem concerns the representation of depth in the tactile pictures.“ Die vorliegende Arbeit möchte dieses Wissensdefizit verringern.

Es soll nicht verschwiegen werden, daß hier nicht sämtliche Probleme, die sich aus der Zunahme grafischer Information für Blinde (und andere) ergeben, gelöst werden können. Vielmehr soll ein Teilproblem untersucht werden, und die dabei gefundenen Lösungen sollen möglichst vielseitig einsetzbar sein. Auf die in dieser Arbeit *nicht* behandelten verwandten Probleme wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

1.2 Abgrenzung zu verwandten Problemen

Oft findet sich unter den Bemerkungen zum Thema „Nicht-visueller Zugang zu Informationen für Blinde mit dem Computer“ der Hinweis, daß es in naher Zukunft wegen der rasanten Entwicklung von Sensoren und Rechnertechnik keine Blinden mehr geben werde, da entsprechende „Sehprothesen“ schon in der Entwicklung seien. Ansätze, die den Sehsinn wiederherstellen wollen, sind bekannt [HAMILTON 96].

Für bestimmte Formen der *Gehörlosigkeit* sind schon beachtliche Erfolge erzielt worden (Cochleaimplantate). Wegen der ungleich größeren Komplexität des Auges und des Sehvorgangs insgesamt ist die Forschung im Bereich der Augen-Neuroprothetik bei weitem noch nicht so weit. Am fortgeschrittensten scheint die Entwicklung einer "Retina-Prothese" zu sein, die dann eingesetzt werden soll, wenn die Blindheit durch eine Krankheit der Netzhaut (Retinitis pigmentosa) verursacht wurde. Die Auflösung der entsprechenden Sensoren ist bisher um mehrere Zehnerpotenzen geringer als die der Netzhaut. Das Problem der Anbindung der Sensoren an den Sehnerv ist noch weitgehend ungelöst. Außerdem nützt eine Retina-Prothese nichts, wenn die Ursache der Blindheit nicht in der Netzhaut liegt. Da von der Medizintechnik in absehbarer Zeit keine allgemeine Lösung für das Problem der fehlenden visuellen Wahrnehmung zu erwarten ist, ist eine Beschäftigung mit der Untersuchung alternativer Wahrnehmungsformen unabdingbar.

Das Problem, Blinden bildliche Information zugänglich zu machen, ist umfassender als die Fragestellung, die in dieser Arbeit behandelt werden kann. Für verschiedene Fälle gibt es in der Literatur Ansätze, die hier kurz angeführt werden sollen. Teilaspekte, insbesondere die

⁷ Als *semantische Anreicherung* werden hier Informationen bezeichnet, die den Gegenständen des Modells zugeordnet sind, jedoch nicht in der Grafik selbst dargestellt werden, z.B. Objektnamen.

⁸ Zweidimensionale Darstellungen, insbesondere linienbasierte Zeichnungen, und nicht dreidimensionale Darstellungen, wie z.B. Plastiken oder Skulpturen, werden untersucht, weil es einerseits keine geeigneten Techniken, Geräte und Medien zur dreidimensionalen haptischen Darstellung gibt und weil andererseits zweidimensionale Darstellungen den Vorteil besitzen, in der dritten Dimension eben *keine* nennenswerte Ausdehnung zu haben. Erst dadurch werden sie transportabel und handhabbar.

Verwendung von Meta-Information *über* das Dargestellte, überschneiden sich mit der vorliegenden Studie.

- *Fotografien* in Onlinedokumenten oder Papierform können - wie in [Kurze 95a] beschrieben - in eine Modellform überführt und dann mittels geeigneter nicht-visueller Ausgabemechanismen präsentiert werden.
- Numerische Diagramme (z.B. Balken- oder Liniendiagramme) können, nachdem sie in ihre Modellform - also die ihnen zugrundeliegende Tabellen - umgewandelt wurden, als musikalische Tonfolge präsentiert [KURZE ET AL. 94B, KURZE ET AL. 95, KURZE 95A] oder auf der Stiftplatte [SCHWEIKHARDT 85] nach geeigneter Umsetzung auch taktil [FOREHT & KOWGIER 90] ausgegeben werden.
- Struktogramme oder Schaltdiagramme lassen sich mit der Stiftplatte ebenfalls darstellen [POH 95].
- Die taktile Ausgabe von **TeX**-Dokumenten auf der Stiftplatte ist in [ERAMIAM 97] und ihre Präsentation per Sprachausgabe in [RAMAN & GRIES 95, RAMAN 94] beschrieben.
- Tabellen und Diagramme können, wie in [KENNEL 96B] beschrieben, per Tasttablett und Sprachausgabe zugänglich gemacht werden.
- Schriftlich aufgezeichnete mathematische Formeln haben auch grafische Eigenschaften, durch die sie zu Kandidaten für die nicht-visuelle Präsentation werden [NOON 92]. Ansätze wie der von Raman [RAMAN & GRIES 95] versuchen hier, durch Sprachsynthese und nonverbale Geräusche Zugang zu schaffen.
- Grafische Benutzungsoberflächen erfordern neben dem Zugang zu ihren grafischen Interaktionselementen einen großen zusätzlichen Aufwand, um sie für Blinde nutzbar zu machen. Mögliche Lösungen dieses Problems beschreiben [GUIB 93] und [RAMSTEIN ET AL. 96].

Diese Arbeit beschäftigt sich mit *informierenden* Bildern, also solchen, „die erstellt werden, um Aussagen zu bestimmten Inhalten zu machen“ [WEIDENMANN 94A]. Mit *künstlerischem* Hintergrund oder zur reinen Unterhaltung erstellte Bilder werden hier nicht betrachtet. Othman und Levanto [OTHMAN & LEVANTO 96] beschreiben einen Ansatz, Werke der bildenden Kunst für Blinde per verbaler Beschreibung, musikalischer Untermalung und taktiler Information zu vermitteln.

Die haptische Informationsverarbeitung, insbesondere das Erfassen taktiler Grafiken und die Interaktion mit diesen, ist ein vielschichtiger Prozeß. In Annäherung an das ISO-OSI Referenzmodell der Telekommunikation [TANENBAUM 96 S. 29, DAY & ZIMMERMANN 83] hat Schulz in [SCHULZ 94, S. 16] ein Schichtenmodell der Informationsvermittlung zwischen einem Rechner mit taktilem Anzeigemedium und dem Menschen vorgeschlagen.

Er unterteilt die sieben Schichten der Kommunikation in vier mechanismusorientierte (Übertragungs-, Umsetzungs-, Vermittlungs- und Transportschicht) und drei anwendungsorientierte Schichten (Kommunikations-, Darstellungs- und Anwendungsschicht). Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich, wenn man diese Systematik trotz ihrer hier nur beschränkten Anwendbarkeit übernimmt, vorrangig mit den anwendungsorientierten Schichten: Der Rechner entwirft, kodiert und vereinfacht eine 2D-Darstellung, die dann auf einem taktilen Medium ausgegeben wird (mechanismusorientierte Schicht, hier Schwellpapier). Der Mensch erfaßt die tastbaren Elemente, erkennt und dekodiert Strukturen und interpretiert sie schließlich als das Dargestellte. Dieser Vorgang wird im Abschnitt 3.3 näher erläutert.

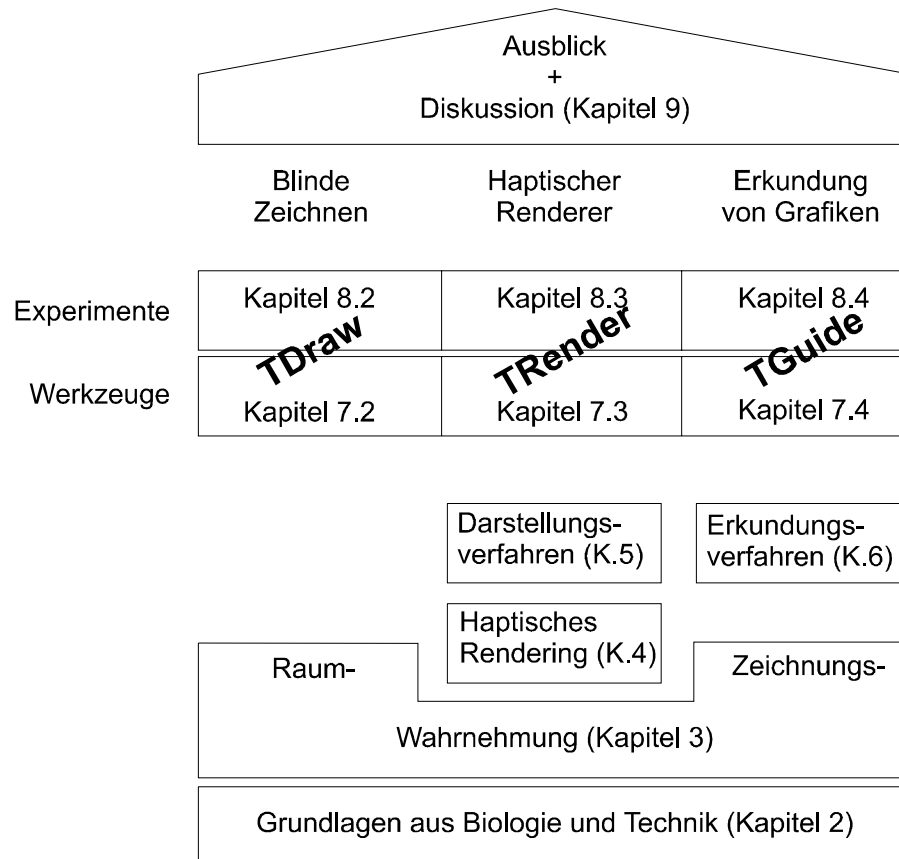
Die mechanismusorientierten Schichten der Kommunikation werden als vorhanden vorausgesetzt. Da die oberen Schichten konzeptionell grundsätzlich unabhängig von der mechanischen Realisierung in den unteren Schichten sind, wurde hier ein besonders geeignetes Medium, nämlich Schwellpapier, beispielhaft verwendet. Dies bedeutet keine Einschränkung der Allgemeingültigkeit der Aussagen, die über die anwendungsorientierten Schichten und ihre Instanzierungen in dieser Arbeit gemacht werden.

Für Blinde ist *Sprache* ein besonders wichtiges Kommunikationsmedium. Daher wird Sprachausgabe in vielen Fällen verwendet, um ihnen Informationen zu vermitteln. Auch im Folgenden findet synthetische Sprache Anwendung. Sie wird jedoch *nicht* benutzt, um Blinden eine Szene verbal zu beschreiben. Die vorliegende Arbeit geht davon aus, daß das Medium Grafik für Blinde ebenso absichtsvoll eingesetzt werden sollte wie für Sehende. Um einen Medienbruch zu vermeiden und solche Informationen, die Sehenden zweidimensional dargeboten werden, auch Blinden in dieser Form zugänglich zu machen, kann Sprache nicht verwendet werden, da sie ein eindimensionales Medium ist. Die verbale Beschreibung einer zwei- bzw. dreidimensionalen Szene ist notwendig eine Interpretation und nimmt dadurch möglicherweise Einfluß auf die Wahrnehmung des Dargestellten. Daher wird Sprache in dieser Arbeit nicht zur Präsentation der geometrischen Information verwendet, sondern zur Ausgabe solcher Informationen, die grafisch nicht darstellbar sind oder sich der haptischen Wahrnehmung komplett entziehen (z.B. Farbe). Die automatische Generierung sprachlicher Beschreibungen räumlicher Szenen aus deren Modellen bleibt gleichwohl ein interessantes Feld für zukünftige Forschungen (siehe auch [DEL BIMBO ET AL. 89]).

Sowohl sprachliche als auch non-verbale akustische Informationen können mit einem gewissen technischen Aufwand heute im 2D- oder 3D-Raum synthetisch erzeugt werden, was dem Benutzer (dem Zuhörer) den Eindruck vermittelt, eine Geräuschquelle befände sich an einer bestimmten Stelle im Raum. Insbesondere für virtuelle Umgebungen kommt dieser synthetischen Raumakustik eine wachsende Bedeutung zu. Auf dem Gebiet der Darstellung räumlicher Eigenschaften für Blinde hat hier Crispian [CRISPIEN & PETRIE 93] Untersuchungen durchgeführt. Raumakustik eignet sich nach diesen Untersuchungen jedoch nicht dazu, feine geometrische Details und kleine Gegenstände zu präsentieren. Insofern ergänzt der raumakustische Ansatz den haptischen in idealer Weise, wenn es um die Präsentation akustisch kodierbarer Eigenschaften der weiteren Umgebung (außerhalb der Griffweite des Blinden) geht.

1.3 Struktur der Arbeit

Nach diesem einleitenden ersten Kapitel, in dem das Thema sowie seine Nähe und seine Abgrenzung zu anderen Forschungsansätzen beschrieben wurden, gliedert sich die Dissertation in acht weitere Kapitel. Abbildung 1-1 zeigt den Aufbau dieser Arbeit und ihre Beziehungen zu anderen Wissenschaften. Zu jedem Thema ist die Nummer des Kapitels angegeben, in dem es behandelt wird.

**Abbildung 1-1**

Aufbau dieser Arbeit und ihre Beziehungen zu anderen Fachgebieten. Man erkennt deutlich die zentrale Rolle der Darstellungsverfahren, die aus den grundlegenden Ergebnissen anderer Wissenschaftsdisziplinen und den Beobachtungen erster eigener Experimente entwickelt wurden, zum haptischen Renderer weiterentwickelt und anschließend experimentell untersucht wurden. Der praktische Teil (die dreispaltige Tabelle, Kapitel 7 und 8) bildet gleichzeitig die Bestätigung der vorher theoretisch entwickelten Verfahren und die Basis für weitere Forschungen in der Informatik und in anderen Wissenschaften.

Die Kapitel 2 und 3 behandeln die physiologischen und technischen Probleme auf dem Gebiet der grafischen Darstellungen für Blinde, denen sich die bisherige Forschung gewidmet hat, sowie Fragestellungen aus dem Bereich der Wahrnehmungspsychologie. Dabei werden Begriffe und Techniken aus der Kognitionswissenschaft erläutert und übernommen. Insbesondere wird der Terminus des *mentalens Modells* behandelt. Die Wahl des Begriffs „Modell“ für die (immaterielle) Vorstellung des Menschen vom (materiellen) Wesen der Dinge ist nicht zufällig und zeigt die Parallelität zum (immateriellen) Modell einer Szene im Rechner. Der Weg vom realen Gegenstand zum mentalen Modell des Erfassers muß mindestens ansatzweise verstanden worden sein, bevor der Weg vom Rechnermodell über die Zeichnung zum mentalen Modell besritten oder geebnet werden kann.

Es wird deutlich gemacht, daß einerseits die haptische Wahrnehmung von Zeichnungen noch nicht hinreichend verstanden ist und andererseits Werkzeuge zu deren Untersuchung und für praktische Anwendungen noch fehlen. Den Kern der Arbeit bilden daher die Kapitel 4 bis 6, in denen Methoden zur Generierung solcher Grafiken und Verfahren für die Interaktion mit ihnen entwickelt werden.

Zunächst wird die *haptische Rendering Pipeline* vorgestellt. Diese Rendering Pipeline erhält ein 3D-Modell einer Szene als Eingabe-Datenstruktur und liefert eine Zeichnung, die für haptische Wahrnehmung ausgelegt ist. Zusätzlich werden semantische Anreicherungen, die

optional in dem Modell enthalten waren, den Elementen der Zeichnung hinterlegt, so daß für die spätere interaktive Erkundung sowohl die Zeichnung als auch die textuelle inhaltliche Information zur Verfügung stehen.

Unter den Algorithmen, die in den wichtigsten Teilen der haptischen Rendering Pipeline zum Einsatz kommen, sind hier vornehmlich zwei Gruppen von Verfahren besonders interessant:

1. Verfahren, die aus einem dreidimensionalen Modell eine zweidimensionale Abbildung generieren, ohne visuelle oder optische Verzerrungen zu verwenden.
2. Verfahren, die diesen Abbildungen Tiefeninformationen hinzufügen, die für die haptische Wahrnehmung geeignet sind.

Im sechsten Kapitel werden Algorithmen beschrieben, die bei der Erkundung von Grafiken durch Blinde eingesetzt werden. Behandelt werden dabei sowohl die selbständige Erkundung, bei der Blinde die Zeichnung abtasten und bei Bedarf Informationen über erfaßte Elemente abfragen können, als auch die geleitete, bei der Blinde durch aktive Unterstützung des Rechners angeleitet werden, die Grafik zu erkunden. Gerade die zweite Form der Erkundung ist bisher in der Literatur über taktile Grafiken noch nicht beschrieben worden.

Kapitel 7 und 8 befassen sich mit der praktischen Realisierung dieser Methoden und Verfahren und deren experimenteller Evaluation. Zur Identifikation von nicht-visuellen Zeichenmethoden wurde TDraw entwickelt, ein System aus Hardware und Softwarekomponenten, mit dem Blinde zeichnen und dabei ihre Zeichnungen mit Text hinterlegen können. TRender ist die Implementierung der haptischen Rendering Pipeline. Mit TGuide können verschiedene Komponenten der geleiteten Erkundung untersucht werden. Bei den Untersuchungen, die mit den entwickelten Werkzeugen und Verfahren durchgeführt wurden, handelt es sich um Experimente mit blinden und (im Fall eines taktilen Interaktionsgeräts) auch einigen sehenden Versuchspersonen. Diese Experimente zeigen die Anwendbarkeit der entwickelten Verfahren und Geräte wie auch deren Grenzen und Entwicklungsmöglichkeiten.

Eine Diskussion der Ergebnisse sowie das Aufzeigen von Perspektiven für die weitere Entwicklung schließen die Arbeit im Kapitel 9 ab. Der Anhang enthält neben dem Literaturverzeichnis ein Glossar mit Begriffsdefinitionen.