

# *Konstruktive Exploration räumlicher Daten*

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

angenommen durch die Fakultät für Informatik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von: Diplominformatiker Jochen Schneider,  
geboren am 08.02.1970 in Köln.

Gutachter:

Prof. Dr. Thomas Strothotte

Prof. Dr. Frieder Nake

Prof. Dr. em. Rul Gunzenhäuser

Promotionskolloquium:

23. November 2001 in Magdeburg



## Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein neues Medium zur Darstellung räumlicher Strukturen für Blinde entwickelt, virtuelle taktile Karten. Dabei handelt es sich um ein flächiges, computerbasiertes Medium zur Darstellung räumlicher Daten, das mit tastähnlichen Bewegungen bedient wird. Die Ausgabe erfolgt akustisch und über Krafterückkopplung.

Es wird der Ansatz der konstruktiven räumlichen Exploration vorgestellt. Dabei handelt es sich um eine neuartige Technik zur Erlangung räumlicher Informationen durch angeleitetes stückweises Zusammensetzen einer physischen Repräsentation mit Hilfe eines interaktiven Computersystems. Es werden Methoden zur konstruktiven Exploration virtueller taktiler Karten entwickelt, mit denen ertastbare räumliche Darstellungen erkundet und erlernt werden können. Diese Methoden werden in zwei verschiedenen Interaktionsansätzen umgesetzt: einerseits in einem System mit physischen Bausteinen, deren Positionen von einem Bildverarbeitungssystem bestimmt werden, und andererseits in einem System mit Krafterückkopplung zur dreidimensionalen tastbaren Darstellung von simulierten Bausteinen.

Der Entwurf und die Implementierung von Systemen zur konstruktiven Exploration werden beschrieben. Es werden die neuentwickelten Methoden vorgestellt, mit denen die verwendeten digitalen Kartendaten an die beiden Ausgabegeräte angepasst werden. Die formale Evaluation des ersten und ein Kurztest des zweiten Ansatzes werden beschrieben, welche die Benutzbarkeit der Systeme zeigen.

## Abstract

In this work, a new medium to display spatial structures to blind people is presented: virtual tactile maps. A virtual tactile map is a planar, computer-based medium for the display of spatial data which is operated by touch. Data is presented acoustically and via force feedback.

The constructive spatial exploration approach is introduced. This is a novel technique to learn spatial information through guided piece-wise assembly of a physical representation with the aid of an interactive computer system. Methods for constructive exploration of virtual tactile maps are presented, by which haptic spatial models can be explored and learned. The approaches are implemented through two different interaction techniques: a system with physical building blocks being tracked by an image processing system, on the one hand, and a system with force feedback for the three-dimensional haptic display of simulated building blocks on the other hand.

The design and implementation of systems for constructive exploration are described and novel methods to adapt digital map data to the two output devices are presented. The formal evaluation of the first approach and a small test of the second approach are described, which show the usability of the systems.



---

# *Vorwort*

Diese Arbeit entstand am Institut für Simulation und Graphik (ISG) der Fakultät für Informatik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Zuerst möchte ich meinem Doktorvater Prof. Thomas Strothotte danken für grundsätzliche Ideen zur Entwicklung und Hinweise zur Strukturierung meiner Arbeit, außerdem für die gewährte Abschlussförderung.

Ich danke meinen Kollegen am ISG für das gute Klima, welches am Institut herrscht und für die Geduld bei der Beantwortung der vielen Fragen, die ich manchen von ihnen gestellt habe. Ich danke den Mitarbeiterinnen des Sekretariats für die Hilfe, die sie mir im Umgang mit der Verwaltung und vielem anderen geleistet haben.

Ich danke auch Dr. Arne Harder für die gute Zusammenarbeit sowohl während der Entwicklung der Ideen und Programme als auch bei der Evaluation. Schließlich danke ich meinem ehemaligen Diplomanden und jetzigen Kollegen Henry König vor allem für die Hilfe bei der praktischen Umsetzung mancher meiner Ideen.



---

# Inhalt

<b>KAPITEL 1</b>	<b><i>Einleitung</i></b>	<b>1</b>
	1.1 Ziele dieser Arbeit	2
	1.2 Methoden	3
	1.3 Ergebnisse	4
	1.4 Gliederung	4
<b>KAPITEL 2</b>	<b><i>Räumliche Informationen für Blinde</i></b>	<b>9</b>
	2.1 Zielgruppe	10
	2.2 Grundlagen nichtvisueller Wahrnehmung	10
	2.2.1 Akustische Wahrnehmung	10
	2.2.2 Haptische Wahrnehmung	12
	2.3 Räumliche Vorstellungen	14
	2.3.1 Überblicks- und Routenperspektive	16
	2.3.2 Routennavigation	19
	2.3.3 Orientierung und Navigation bei Blinden	20
	2.4 Räumliches Leitmedium Karte	21
	2.4.1 Kartographie	22
	2.4.2 Kartosemiotik	26
	2.4.3 Karten als Modelle	27
	2.5 Taktile Darstellungen	28
	2.5.1 Taktile Grafiken	29
	2.5.2 Taktile Karten	30
	2.6 Kartenbenutzung	32
	2.6.1 Kartenbenutzung durch Sehende	32
	2.6.2 Kartenbenutzung durch Blinde	33
	2.7 Zusammenfassung	34
<b>KAPITEL 3</b>	<b><i>Virtuelle taktile Karten</i></b>	<b>37</b>
	3.1 Definitionen	38
	3.2 Virtuelle taktile Karten als Medien	38
	3.2.1 Computer als Medium	38
	3.2.2 Verwandte Medien	39
	3.3 Verwandte Arbeiten	41
	3.3.1 Karten und Virtual Reality-Umgebungen	41
	3.3.2 Orientierungshilfen	42

3.4 Gestaltung virtueller taktiler Karten	44
3.4.1 Darstellung in virtuellen taktilen Karten	44
3.4.2 Praktische Aspekte	46
3.5 Zusammenfassung	47
<b>KAPITEL 4</b> <i>Konstruktive räumliche Exploration</i>	<b>49</b>
4.1 Definitionen	50
4.2 Gedächtnispsychologie	50
4.3 Pädagogik	52
4.3.1 Erfahrungsorientiertes Lernen bei DEWEY	52
4.3.2 PIAGET und seine Stadientheorie	53
4.3.3 Didaktik	55
4.3.4 Konstruktives Lernen bei Erwachsenen	56
4.4 Umgebungskognition und aktives räumliches Lernen	57
4.4.1 Kognitives Kartieren als Konstruktion	58
4.4.2 Bauen zur Überprüfung des räumlichen Vorstellungsvermögens	59
4.4.3 Konstruktives Lernen mit Hilfe des Computers	60
4.5 Konstruktive Exploration durch Blinde	62
4.5.1 Erstellen und Erkennen von Zeichnungen durch Blinde	62
4.5.2 Bauen zum räumlichen Lernen	63
4.5.3 Konstruktion von Funktionsgraphen	64
4.6 Anforderungen an Systeme zur konstruktiven Exploration	64
4.7 Zusammenfassung	66
<b>KAPITEL 5</b> <i>Methoden und Werkzeuge zur konstruktiven Exploration</i>	<b>69</b>
5.1 Räumliche Eingabegeräte	70
5.1.1 Grafische Eingabegeräte	70
5.1.2 Räumliche Sensoren	71
5.2 Krafrückkopplungsgeräte zur Ein- und Ausgabe	73
5.2.1 Entwicklung von Krafrückkopplungsgeräten aus der Robotertechnik	73
5.2.2 Taktile Ausgabegeräte	74
5.2.3 Eigenschaften aktueller Krafrückkopplungsgeräte	75
5.3 Akustische Ausgabe	79
5.3.1 Eigenschaften computergesteuerter akustischer Ausgaben	79
5.3.2 Akustische Ausgaben in Benutzungsoberflächen	79
5.4 Interaktionstechniken für die konstruktive Exploration	81
5.5 Konstruktive Exploration mit physischen Objekten	83
5.5.1 Verwandte Arbeiten	83
5.5.2 Objekterkennung und Verfolgung mittels Bildverarbeitung	85
5.5.2.1 Segmentierung	86
5.5.2.2 Merkmalsberechnung	88
5.5.2.3 Eigener Ansatz zur Objekterkennung	89
5.5.3 Interaktion durch physische Objekte	89
5.6 Konstruktive räumliche Exploration mit simulierten Objekten	90
5.6.1 Verwandte Arbeiten	90
5.6.2 Haptische Exploration räumlicher Daten	94
5.6.3 Konstruktive räumliche Exploration mit einem Krafrückkopplungsgerät	96
5.7 Vergleich räumlicher Medien für Blinde	99
5.8 Zusammenfassung	102
<b>KAPITEL 6</b> <i>Systeme zur konstruktiven Exploration</i>	<b>103</b>
6.1 Modellierung	103



6.2 Entwurf	<b>105</b>
6.2.1 <i>System mit physischen Bausteinen</i>	<b>105</b>
6.2.1.1 Akustische Ausgabe	<b>106</b>
6.2.1.2 Objekterkennung	<b>108</b>
6.2.1.3 Anpassung der Strecken an die Steine	<b>109</b>
6.2.2 <i>System mit Krafrückkopplung</i>	<b>113</b>
6.3 Implementierungen	<b>114</b>
6.3.1 <i>Digitale Kartendaten und ihre Verarbeitung</i>	<b>114</b>
6.3.2 <i>Kamerabasierter Ansatz</i>	<b>116</b>
6.3.2.1 Entwurf der Steine	<b>116</b>
6.3.2.2 System zur Exploration virtueller taktiler Karten	<b>118</b>
6.3.2.3 System zur konstruktiven Exploration mit physischen Objekten	<b>120</b>
6.3.3 <i>Virtuelle taktile Realität</i>	<b>122</b>
6.3.3.1 Speicherung der digitalen Karten als Relief	<b>122</b>
6.3.3.2 Interaktion durch den Phantom	<b>125</b>
6.4 Zusammenfassung	<b>128</b>
<b>KAPITEL 7</b> <i>Fallstudien</i>	<b>129</b>
7.1 Kamerabasierter Ansatz	<b>129</b>
7.1.1 <i>Versuchsaufbau</i>	<b>130</b>
7.1.2 <i>Hilfsmittel</i>	<b>132</b>
7.1.3 <i>Durchführung</i>	<b>134</b>
7.1.4 <i>Ergebnisse</i>	<b>135</b>
7.1.5 <i>Diskussion</i>	<b>137</b>
7.2 Konstruktive Exploration mit simulierten Objekten	<b>140</b>
7.3 Zusammenfassung	<b>142</b>
<b>KAPITEL 8</b> <i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	<b>145</b>
8.1 Zusammenfassung	<b>145</b>
8.2 Ausblick	<b>147</b>
8.2.1 <i>Erweiterung der bisherigen Ansätze</i>	<b>147</b>
8.2.2 <i>Fragen der Mensch-Computer-Interaktion</i>	<b>147</b>
8.2.3 <i>Kombination von simulierten und echten Objekten</i>	<b>148</b>
8.2.4 <i>Erweiterung des Phantom</i>	<b>148</b>
8.2.5 <i>Konstruktive Exploration für Sehende</i>	<b>148</b>
<b>KAPITEL 9</b> <i>Literatur</i>	<b>151</b>
<b>ANHANG A</b> <i>Implementierungen</i>	<b>161</b>
<b>ANHANG B</b> <i>Objekterkennung mit Momenten</i>	<b>163</b>



„Faire la carte, et pas le calque.“  
Deleuze u. Guattari, *Rhizome: introduction*.

Die Fähigkeit zur selbstständigen Mobilität in bekannten, aber auch in unbekanntem Gebieten stellt ein wichtiges Moment persönlicher Freiheit dar. Für eine solche Mobilität sind räumliches Erkennen und räumliches Wissen notwendig. Das Sehen stellt dabei die wichtigste Möglichkeit dar, weil es zur Fernwahrnehmung mit großer Unterscheidungsfähigkeit geeignet ist. Das Fehlen des Sehens bei Blindheit bedeutet daher eine große Einschränkung der Mobilität: „To leave the familiar and secure walls of one’s home is difficult and confusing for many blind people and dangerous to all of them“ (GOLLEDGE U. STIMSON 1997, 504).

Das Hören als für Blinde wichtigste Wahrnehmungsart ihrer Umgebung ist in innerstädtischen Bereichen von Störgeräuschen überflutet und kann generell weniger genau lokalisieren als das Sehen. Der Tastsinn kann dagegen relativ genau lokalisieren und wird seltener gestört, arbeitet jedoch nur im Nahbereich und für die genaue Erkennung nur punktuell.

Beschränkungen der Mobilität Blinder ergeben sich jedoch nicht nur bei der Begehung eines Gebietes selbst. Blinde müssen bei der Fortbewegung mehr Informationen aus ihrem Gedächtnis abrufen und benötigen daher eine bessere Vorbereitung als Sehende, weil sie weniger Möglichkeiten zur Fernwahrnehmung haben, während Sehende kurzfristig benötigte Informationen (wie eine gesuchte Straße an einem Straßenschild oder den Verlauf eines Weges) visuell mühelos erkennen können (BARTH U. FOULKE 1979). Blinde können zwar auf Erfahrungen in einem bestimmten geographischen Gebiet oder dem Gehen in Stadtgebieten allgemein zurückgreifen, sind jedoch bei der Antizipation und Planung der Reaktion auf unerwartete Situationen benachteiligt (ebd.).

Einer umfangreichen Vorbereitung auf eine Reise steht der Mangel an leicht verfügbaren, für Blinde geeigneten medialen Darstellungen von geographischen Gebieten gegenüber. Solche Dar-

stellungen existieren zwar in Form verbaler Streckenbeschreibungen, die aber generell ungenau sind und von Sehenden jeweils für einen bestimmten Weg erzeugt werden müssen. Wenn ein Blinder schließlich einen Weg ohne mediale Vermittlung durch eigenes Begehen erlernen möchte, erfordert dies sogar die Anwesenheit eines Mobilitätstrainers.

Dreidimensionale Modelle oder zweidimensionale Abbildungen von bestimmten Gebäuden und Gegenden sind für Blinde ertastbar, zum Beispiel als taktile Karten mit Reliefdarstellungen. Solche Modelle und Abbildungen sind aber aufwendig in der Herstellung und liegen daher nicht zu jedem gewünschten Gebiet vor. Abbildungen für Sehende werden inzwischen häufig elektronisch gespeichert, übermittelt und auf einem Computerbildschirm dargestellt. Für Blinde existieren jedoch keine großflächigen zwei- oder gar dreidimensionalen Ausgabegeräte, die in größeren Stückzahlen hergestellt werden.

### 1.1 Ziele dieser Arbeit

Für Sehende ist der Einsatz von Computern als Medien inzwischen selbstverständlich und hat zu der starken Verbreitung von Computern erheblich beigetragen. Dabei werden die entsprechenden Daten überwiegend durch den Grafikbildschirm vermittelt, auch die Interaktion mit den Daten erfolgt grafisch. Vor allem aber kann mit grafischen Daten auf diese Weise leicht umgegangen werden, zum Beispiel mit räumlichen Daten, die in Plänen übersichtlich dargestellt werden können.

Auch Blinde können Computer als Medien benutzen, allerdings werden dabei nur selten grafische Daten vermittelt. Neue Interaktionstechniken für Sehende zur Steuerung von Computern mittels physischer Objekte oder zur Simulation solcher Objekte können grafische Daten tastbar darstellen. Ziel dieser Arbeit ist es, die genannten Interaktionstechniken so anzupassen, dass sie Blinden den Zugang zu grafischen Daten ermöglichen.

In derzeitigen Systemen zur Erkundung räumlicher Daten nimmt der Benutzer bei der Erkundung selbst eine passive Rolle ein. Zwar können in Systemen zur grafischen Anzeige von Karten wie beispielsweise Stadtplanausschnitten häufig Strecken ausgewählt werden, worauf diese dann hervorgehoben dargestellt werden. Der Benutzer hat aber keine Möglichkeit zum aktiven Umgang mit diesen Strecken. In Virtual Reality-Systemen andererseits können Benutzer zwar in der virtuellen Welt Strecken ablaufen, erhalten dadurch aber keinen Überblick über die Lage von Strecken zueinander.

In dieser Arbeit werden im neuentwickelte Methoden und ihre Implementierung vorgestellt, mit denen Benutzer Gegensatz dazu in eine wirklich aktive Rolle beim Erlangen räumlicher Informationen versetzt werden. Sie können so nicht nur Karten erkunden und Kartenelemente wie beispielsweise Strecken auswählen, sondern sich diese Elemente auch selbst aneignen, indem sie diese mittels Computerhilfe aufbauen. Bereits bei der Präsentation der Daten werden die Benutzer involviert – nicht erst in einer anschließenden Lernphase, wie es bei Lernprogrammen häufig üblich ist.

Wenn Computer zur Datenpräsentation eingesetzt werden, dann besteht oft die Tendenz, möglichst viele Daten auf einmal darstellen zu lassen. Dabei wird als Vorteil gesehen, dass sich der Benutzer die ihn interessierenden Aspekte herausuchen kann. Der Benutzer benötigt oft Hilfen, wie er sich die ihn interessierenden Informationen aneignen kann. Der Benutzer wird andererseits nicht selten unterfordert, weil die Struktur und Herkunft der Daten unterschlagen werden. Die Daten werden monolithisch präsentiert, ohne den Aufbau aus ihren Teilen zu berücksichtigen.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es also, Methoden zu entwickeln, mit deren Hilfe sich der Benutzer räumliche Strukturen nach und nach aneignen kann. Wenn dabei der Computer an der Lösungssuche eines Problems wie beispielsweise dem Finden eines Weges zwischen zwei Orten beteiligt ist, dann wird die Lösung, in diesem Fall der Verlauf des Weges, nicht einfach in einem Rutsch dargestellt, sondern es wird dem Benutzer durch den Computer ermöglicht, sich die Lösung schrittweise zu erarbeiten.

### 1.2 Methoden

In dieser Arbeit werden neue Interaktionstechniken entwickelt, mit denen sich Blinde räumliche Daten aneignen können. Eine Herausforderung bei der Entwicklung dieser Interaktionstechniken besteht darin, die Daten während der Interaktion erscheinen zu lassen, um dem Benutzer schrittweises Erarbeiten zu ermöglichen. Es müssen also hochgradig interaktive Darstellungsformen entwickelt werden. Andererseits ermöglichen es die neuentwickelten Interaktionstechniken auch, relevante Aspekte zunächst für das Erarbeiten auszuwählen, um sie nach dem Konstruieren schließlich komplett erfassen zu können.

Es gibt seit einiger Zeit neue Interaktionstechniken, die in der Lage sind, physische Objekte mit der digitalen Welt zu verbinden. Dabei handelt es sich um Verfahren der sogenannten Augmented Reality und der virtuellen haptischen (ertastbaren) Realität. Eine Richtung der Augmented Reality erweitert physische Objekte durch eingebettete oder angeschlossene Computer. Diese Art ist für die Darstellung räumlicher Strukturen für Blinde besonders geeignet, weil dadurch digitale Daten tastbar dargestellt werden können. Ähnliches gilt für die haptische virtuelle Realität, bei der physische Objekte durch Kraftrückkopplungsgeräte simuliert werden.

Bezüglich der Adressierung des Tastsinnes werden in dieser Arbeit folglich zwei Ansätze verfolgt: Einerseits werden physische Objekte benutzt, um als Bausteine des Konstruierens zu dienen. Andererseits wird Kraftrückkopplung zur ertastbaren Simulation physischer Objekte benutzt. Dabei ergibt sich der Vorteil der „Handhabbarkeit“ der Daten.

Bestehende Augmented Reality-Systeme, bei denen reale Objekte Computer erhalten oder mit Computern verbunden sind, sind bisher vornehmlich für die Benutzung durch Sehende ausgelegt. In dieser Arbeit werden Methoden entwickelt, mit denen auch Blinde über bausteinartige Objekte, deren Position mittels Bildverarbeitung bestimmt wird, ein Computerprogramm steuern können und umgekehrt Informationen zu den Bausteinen über akustische Computerausgabe erhalten. Es wird eine Interaktionstechnik entwickelt, durch die das Platzieren von Streckenelementen auf einer Ebene auf einen eindimensionalen Fall reduziert werden kann, so dass die zum Legen nötigen Daten leicht vermittelt und überprüft werden können.

Für die Erkundung räumlicher Daten mit einem Kraftrückkopplungsgerät werden Methoden der Aufbereitung der zugrundeliegenden räumlichen Daten entwickelt, so dass die Daten ertastet werden können. Zusätzlich werden Interaktionstechniken zum Konstruieren von simulierten taktilen Repräsentanten dieser Daten entworfen und implementiert.

### 1.3 Ergebnisse

In dieser Arbeit werden *virtuelle taktile Karten* als ein neuer Ansatz zur Darstellung räumlicher Strukturen mit Hilfe des Computers vorgestellt. Dabei handelt es sich um planartige Medien, die mit tastähnlichen Bewegungen erkundet werden können. Blinde erlangen die Daten dabei vornehmlich über den Tastsinn und zusätzlich über das Gehör.

Ein weiterer neuer Ansatz stellt die *konstruktive räumliche Exploration* dar. Dabei handelt es sich um eine Technik zur Erlangung räumlicher Informationen durch angeleitetes stückweises Zusammensetzen einer physischen Repräsentation mit Hilfe eines interaktiven Computersystems. Nach der Konstruktion kann die Repräsentation als Ganzes ertastet werden.

In dieser Arbeit werden Algorithmen entwickelt, mit denen digitale Kartendaten auf die Größenverhältnisse der gewählten Darstellungsmedien skaliert werden. Durch diese Algorithmen können die Daten an die Größen von physischen Objekten als Bausteinen und an den Arbeitsbereich und die Auflösung eines Krafrückkopplungsgerätes angepasst werden.

Die genannten Konzepte werden auf Basis der Erkenntnisse verschiedener Disziplinen über räumliche Informationen und über Medien zur Darstellung der entsprechenden Daten entwickelt. Es werden dazu zwei verschiedene Interaktionsansätze entworfen und implementiert: einmal ein Augmented Reality-System mit physischen Bausteinen mit Computererfassung und andererseits ein System auf Basis eines Krafrückkopplungsgerätes. Diese Entwicklung wurde in Zusammenarbeit mit potentiellen Anwendern durchgeführt. Schließlich wird über Evaluierungen der Implementierungen berichtet, um ihre Effektivität und Effizienz zu belegen.

### 1.4 Gliederung

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Im Kapitel 2 werden räumliche Informationen für Blinde auf theoretischer Basis beschrieben. Zunächst wird die Zielgruppe der vorliegenden Arbeit umrissen. Anschließend werden physikalische und psychophysische Grundlagen der nichtvisuellen Wahrnehmung in Form der akustischen und haptischen Wahrnehmung beschrieben. Daraus werden Unterschiede zwischen den Sinnen abgeleitet, die bei der nichtvisuellen Darstellung räumlicher Daten beachtet werden müssen. Danach wird untersucht, wie Sehende und Blinde ein geographisches Gebiet erlernen können. Dabei werden verschiedene Vorstellungen beschrieben, die sich ein Mensch von einem solchen Gebiet aneignen kann. Es werden die besonderen Anforderungen untersucht, welche die Orientierung und Navigation an Blinde stellt. Danach werden Karten als Hauptmedien zur Darstellung räumlicher Strukturen beschrieben. Es werden Untersuchungen zu taktilen Grafiken und Karten geschildert. Schließlich wird auf Kartentheorien und Kartenbenutzung eingegangen, sowohl bezüglich Sehender als auch Blinder.

Die Auseinandersetzung mit den verschiedenen Vorstellungen, die Menschen von einem geographischen Gebiet entwickeln können, ist wichtig für den Entwurf eines neuen Mediums zur Darstellung räumlicher Strukturen, weil die bestimmten Vorstellungen entsprechenden Medien unterschiedlich ausfallen. So müssen visuelle Darstellungen bei Anpassung an nichtvisuelle Sinne generell vereinfacht werden. Aus den Eigenschaften einer streckenorientierten Perspektive als Basis für Überblicksperspektiven und den Bedürfnissen blinder Fußgänger wird die Darstellung einer Strecke als

Anwendung der konstruktiven Exploration in dieser Arbeit festgelegt. Aus der Untersuchung der bereits existierenden Medien werden weitere Anforderungen für den Entwurf von Systemen zur konstruktiven Exploration abgeleitet. Vor allem an den taktilen Karten zeigt sich, wie wichtig sich aus der Taktilität ergebende Benutzungsmöglichkeiten (in diesem Fall das Nachziehen von Strecken) zum Erlernen sind. Im zweiten Kapitel werden außerdem Anforderungen an gedruckte Karten wie Angemessenheit und leichte Erfassbarkeit der Darstellung zusammengestellt, aus denen später weitere Anforderungen an virtuelle taktile Karten abgeleitet werden.

In Kapitel 3 werden virtuelle taktile Karten als neuartige Medien zur Darstellung räumlicher Strukturen eingeführt und definiert. Sie werden von verwandten Medien wie Spielen und räumlichen Modellen abgegrenzt. Die Gestaltung virtueller taktiler Karten wird vorgestellt, sowohl bezüglich ihrer Darstellung räumlicher Strukturen als auch bezüglich praktischer Aspekte, die den Umgang mit ihnen betreffen, wie ihre Größe und Handhabung.

Es werden in Kapitel 3 also neuartige Medien auf der Basis von interaktiven Computersystemen mit Multimediatechnik entwickelt, mit denen Blinde planhafte Daten erkunden können. Es werden Anforderungen an die Umsetzung dieser Medien zusammengetragen, die das Verhältnis der Medien zu den dargestellten Daten, die Interaktion mit den Daten und die virtuellen Karten an sich betreffen. Dabei werden Fragen der Darstellungstreue, Verständlichkeit und Handhabbarkeit berührt.

In Kapitel 4 wird das Konzept der konstruktiven räumlichen Exploration zum aktiven Erlernen räumlicher Informationen eingeführt. Nach der Definition des Begriffes werden Vorbilder aus der Gedächtnispsychologie, der Pädagogik, der Didaktik und der Umgebungskognition beschrieben. Weiterhin wird die bereits existierende Praxis der Überprüfung räumlichen Wissens von Sehenden und Blinden durch physische Modelle untersucht. Es werden Ansätze zum konstruktiven Lernen mit Computersystemen vorgestellt. Am Ende des Kapitels werden Anforderungen an Systeme zur konstruktiven räumlichen Exploration formuliert, welche die Art der zu vermittelnden Daten, die Methoden zur Konstruktion und die speziellen Anforderungen an die Interaktion betreffen.

Die Erkenntnisse aus den genannten Gebieten machen deutlich, dass Wissensvermittlung durch aktiven und manuellen Umgang mit entsprechenden Darstellungen schon lange als sinnvoll erkannt wurde. Der relativ seltene Einsatz des handelnden Lernens lässt sich unter anderem auf die Aufwendigkeit der Umsetzung zurückführen. Kapitel 4 zeigt aber, dass es dafür vielversprechende Möglichkeiten durch den Einsatz von Computertechnik gibt, wodurch der Aufwand auf die Entwicklung eines entsprechenden Mediums für eine bestimmte Inhaltsart reduziert wird. Die formulierten Anforderungen an ein solches Medium stellen wichtige Orientierungspunkte zu seiner Umsetzung in ein interaktives System dar. Die Betrachtung von Systemen zum aktiven Umgang mit geometrischen Elementen unter Einsatz der Programmiersprache Logo ergibt, dass dort, ebenso wie bei der konstruktiven Exploration, das schrittweise Erarbeiten von Konzepten ‚auf Augenhöhe‘ im Vordergrund steht. Die konstruktive Exploration ist noch konkreter, weil sie dem Erlernen bestimmter Aspekte der Umwelt dient und nicht dem Erlernen abstrakter Konzepte.

Kapitel 5 beschreibt Methoden und Werkzeuge zur konstruktiven Exploration virtueller taktiler Karten in zwei Ausprägungen: einerseits als kamerabasiertes System, bei dem Bewegungen von Händen und physischen Objekten mittels Bildverarbeitung verfolgt werden, andererseits auf der Basis von Krafrückkopplungsgeräten, die das Hantieren mit simulierten dreidimensionalen Objekten erlauben. Dabei werden verwandte Arbeiten betrachtet. Es werden taktile Karten, computerbasierte Orientie-

rungshilfen und die beiden in dieser Arbeit entwickelten Systeme zur konstruktiven Exploration verglichen. Der Vergleich basiert auf der in Kapitel 2 entwickelten Gegenüberstellung von Vorstellungen, die Menschen von einem geographischen Gebiet besitzen.

Die neuentwickelten Methoden und Werkzeuge dienen dem — durch den Computer erfassten und angeleiteten — Zusammenbau von Strecken mit Bausteinen. Es wird zunächst erläutert, wie Streckenbausteine mittels Bildverarbeitung erfasst werden und ihre einzunehmende Position durch Formschluss und akustisch vermittelt wird. Anschließend werden Methoden der Simulation von taktilen Karten und von Bausteinen für ein Kraftrückkopplungsgerät vorgestellt.

In Kapitel 6 wird die Modellierung, der Entwurf und die Implementierung von Systemen zur konstruktiven Exploration vorgestellt. Es werden die für die beiden entworfenen Ansätze jeweils implementierten Ein- und Ausgabemethoden auf der Basis von Bildverarbeitung, Kraftrückkopplung und akustischer Darstellung einschließlich des Zusammenspiels der Systemkomponenten erläutert und die Verarbeitung der Karten beschrieben.

Zunächst wird die allgemeine Modellierung von Systemen zur konstruktiven Exploration erläutert. Danach werden zwei Entwürfe auf Basis der beiden Ein-/Ausgabetechniken vorgestellt. Zunächst wird für das System mit Bildverarbeitung der Entwurf der akustischen Ausgabe, der Objekterkennung und der Anpassung von Strecken an Bausteingrößen erläutert. Anschließend wird der Entwurf eines Systems mit Kraftrückkopplung zur dreidimensionalen Kartendarstellung und zur Kräftedarstellung von Bausteinen und Positionierungshilfen vorgestellt. Schließlich wird die Implementierung der Systeme und das für beide Ein-/Ausgabetechniken entwickelte GIS beschrieben. Es wird die Gestaltung und Herstellung der Bausteine dargestellt. Danach wird die Implementierung eines Systems zur Exploration mit physischen Bausteinen vorgestellt, welches in Smalltalk und C programmiert ist. Anschließend wird die Umsetzung eines Systems zur konstruktiven Exploration mit diesen Bausteinen in C++ beschrieben. Schließlich wird die Umwandlung einer digitalen Karte in eine dreidimensionale Darstellung und die Programmierung der Interaktion mit simulierten Steinen für das Kraftrückkopplungsgerät Phantom vorgestellt.

In Kapitel 7 folgen Fallstudien und Evaluationen. Es wird eine quantitative Evaluation des Systems zur konstruktiven Exploration virtueller taktiler Karten mit physischen Objekten beschrieben, bei der 16 Versuchspersonen mitgewirkt haben. Dabei wird sowohl die Konstruktionsgeschwindigkeit als auch die Behaltensleistung von Zusatzinformationen auf Karten mit entsprechenden durch einen nicht computerbasierten Konstruktionsansatz erzielten Werten verglichen. Dazu wurde ein Ansatz zur automatischen Generierung von Versuchskarten entworfen und implementiert. Weiterhin wurde für das System zur konstruktiven Exploration mit simulierten Objekten die Exploration virtueller taktiler Karten und die Konstruktion von Strecken getestet.

Entsprechend den vor der quantitativen Evaluation formulierten Hypothesen konnte mit dem computerbasierten Ansatz eine Strecke schneller konstruiert werden als mit dem nicht computerbasierten Ansatz. Entgegen den Hypothesen war aber die Behaltensleistung der Zusatzsymbole beim System zur konstruktiven Exploration nicht höher als beim Vergleichsansatz. Es werden Überlegungen zur Erklärung dieses Ergebnisses vorgestellt und daraus weitere Versuchsansätze abgeleitet. Der Test des Systems zur konstruktiven Exploration mit simulierten Objekten hat ergeben, dass die entwickelten Interaktionstechniken effizient benutzbar sind, in Details aber noch verbessert werden können. Die Verbesserungsmöglichkeiten werden aufgezeigt.



Kapitel 8 enthält eine Zusammenfassung dieser Arbeit und einen Ausblick auf weitere Forschungsansätze. Dabei werden Fragen an die Psychologie bezüglich der Erlangung räumlicher Informationen aufgeworfen und ein Vorschlag für die Erweiterung von Krafrückkopplungsgeräten für die konstruktive Exploration geliefert.

Es werden Fragen an die Mobilitätspsychologie identifiziert, welche die Verbesserung eines in einem interaktiven Computersystem umgesetzten Kartenmediums betreffen. Weiterhin sind auch Fragen der Exploration dreidimensionaler Darstellungen mit einem Krafrückkopplungsgerät offen, vor allem bezüglich der Wahrnehmung von Größenverhältnissen. Anschließend werden Fragen formuliert zu weiteren formalen Evaluationen der konstruktiven Exploration mit physischen Objekten und der erstmaligen formalen Evaluation der konstruktiven Exploration mit simulierten Objekten. Schließlich werden Erweiterungsmöglichkeiten von Krafrückkopplungsgeräten aufgeführt, die zu einer besseren Umsetzbarkeit der konstruktiven Exploration führen.



# Räumliche Informationen für Blinde

Räumliche Informationen spielen eine große Rolle für Menschen, ob es sich dabei um solche für das Fortbewegen in einer Stadt oder um Vorstellungen von entfernten Orten handelt. In vielen Fällen nimmt eine Person räumliche Informationen auf, ohne dass sie sich dessen bewusst ist, weil sie sich währenddessen fortbewegt. Explizit geschieht dieses Lernen mit Hilfe räumlicher Medien.

In dieser Arbeit werden haptische Medien entwickelt, die räumliches Lernen durch konstruktive Exploration ermöglichen. Da die neuen Medien mehr als nur eine Erweiterung der alten Medien zum räumlichen Lernen für Blinde (wie taktile Karten) darstellen, ist es notwendig, zunächst herauszuarbeiten, welche Informationen Benutzer durch sie erlangen können. Dabei handelt es sich um Informationen über räumliche Zusammenhänge. Sie werden in der Kognitions- und Mobilitätspsychologie untersucht.

Im folgenden wird zunächst auf Blinde als Zielgruppe für Anwendungen der konstruktiven räumlichen Exploration eingegangen. Anschließend werden physikalische und psychophysische Grundlagen der nichtvisuellen Sinne in Form der akustischen und haptischen Wahrnehmung beschrieben. Daraus werden Fakten abgeleitet, die bei der medialen Vermittlung räumlicher Daten über einen nichtvisuellen Sinn beachtet werden müssen. Danach wird auf die Psychologie zurückgegriffen, um zu beschreiben, wie Sehende und Blinde Vorstellungen über eine Umgebung erlangen und wie sie diese zur Orientierung und Navigation benutzen. Weiterhin wird der Begriff der Karte untersucht, ausgehend von Arbeiten der Kartographie, Modelltheorie und Semiotik. Es werden taktile Grafiken und taktile Karten beschrieben. Schließlich werden Aspekte der Kartenbenutzung beleuchtet.

## 2.1 Zielgruppe

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes gab es in Deutschland Ende 1999 etwa 300.000 Blinde und Sehbehinderte (STATISTISCHES BUNDESAMT 2000). Der Deutsche Blinden- und Sehbehindertenverband setzt diese Zahl höher an. Laut seinen Statistiken leben in Deutschland etwa 155.000 Blinde (Stand: 1995) und 500.000 Sehbehinderte (hochgerechnet aus Statistiken der DDR, genaue Zahlen liegen nicht vor) (DBSV 2001). Die Zielgruppe der hier vorgestellten Arbeit sind vornehmlich Blinde, teilweise auch stark Sehbehinderte.<sup>1</sup> Blinde stellen auch dann keine einheitliche Benutzergruppe im Sinne der Softwaretechnik dar, wenn es um die Entwicklung von Orientierungshilfen im speziellen geht.

Nach dem Zeitpunkt der Erblindung unterscheidet man:

1. Geburtsblinde (Erblindung vor Ende des ersten Lebensjahres)
2. Frühblinde (vor dem Schuleintritt)
3. Jugendblinde (vor Erreichen der Volljährigkeit)
4. Späterblindete (bis zum Erreichen des 60. Lebensjahrs)
5. Altersblinde (nach Erreichen des 60. Lebensjahrs)  
(BRAMBRING U. SCHNEIDER 1986)

Etwa ein Drittel aller Blinden sind Altersblinde, wobei neben dem Verlust des Sehens meist auch andere altersbedingte Einschränkungen vorliegen. Geburtsblinde haben im allgemeinen eine entsprechende Ausbildung seit frühester Kindheit absolviert, wodurch sie (zumindest in Europa) Brailleschrift und taktile Medien beherrschen. Späterblindete besitzen entgegen verbreiteter Vorstellungen kein besseres räumliches Vorstellungsvermögen als Geburtsblinde (HOLLYFIELD U. FOULKE 1983), welches das Fehlen der genannten Ausbildung teilweise kompensieren könnte. (Sie sind jedoch durch ihre Erziehung als Sehende besser auf ein Leben unter Sehenden eingestellt, was beispielsweise soziales Verhalten betrifft, wofür der Sehsinn eine Rolle spielt, zum Beispiel das Richten der Augen auf einen Gesprächspartner.)

## 2.2 Grundlagen nichtvisueller Wahrnehmung

Blinde Menschen erlangen räumliche Informationen durch ihren Hör-, Tast- und Geruchssinn. Im folgenden werden der Hör- und der Tastsinn sowie ihre physikalischen und psychophysischen Grundlagen beschrieben. Der Geruchssinn wird ausgelassen, weil er für die mediale Vermittlung (mit dem Computer oder durch herkömmliche Medien wie Karten) keine Rolle spielt und es auch keine entsprechenden Ausgabegeräte für Computer in größerer Stückzahl gibt.

### 2.2.1 Akustische Wahrnehmung

Blinde erlangen räumliche Informationen häufig akustisch. Klänge werden oft als ihre wichtigste Hilfe für Orientierung und Navigation beschrieben, unter der Voraussetzung, dass es sich um die eigene Wahrnehmung der entsprechenden Örtlichkeiten handelt (DOWNS U. STEA 1977, 75f). Durch Hören können Signale aus der Ferne wahr-

---

1. Computeranwendungen für Sehbehinderte unterscheiden sich darin von der für Blinde, dass sie den vorhandenen Restsehsinn soweit wie möglich ausnutzen, zum Beispiel Vergrößerungen einsetzen. Ähnliches gilt für Mobilitätshilfen. Darauf wird in der hier vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen.

genommen werden, ohne dass Kontakt mit dem entsprechenden Objekt bestehen muss, analog zum Sehen. Landmarken kündigen sich häufig akustisch an, zum Beispiel Hauptstraßen durch die entsprechenden Verkehrsgeräusche (WIENER U. LAWSON 1997).

Blinde können jedoch auch Objekte akustisch wahrnehmen, die selbst keinen Schall produzieren. So können Blinde beispielsweise auf eine Wand zugehen und vor ihr anhalten, ohne sie zu berühren, weil sie die Wand akustisch wahrnehmen. Dieses Phänomen war fälschlicherweise ‚Gesichtssehen‘ genannt worden (auf der Vorstellung beruhend, dass dabei mit dem ganzen Gesicht gesehen wird, nicht mit den Augen) und heißt Echolokation (KRECH U.A. 1985). Es basiert auf der Reflexion von Schall durch feste Gegenstände, wobei dieser Schall auch durch die wahrnehmende Person selbst erzeugt werden kann. Nicht alle Blinde sind zu Echolokation in der Lage, Sehende sind es quasi gar nicht (ebd.).

Der Hörsinn basiert auf der Wahrnehmung von Schall. Unter Schall versteht man Druckveränderungen, die sich in einem elastischen Medium wie der Luft ausbreiten. Schall lässt sich physikalisch als Wellen beschreiben, also mit den Attributen Frequenz, Amplitude und Phase. Bei einem reinen Ton handelt es sich um Schall, der durch eine reine Sinusschwingung folgender Form beschrieben werden kann:

$$f(t) = a \times \sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{GL 1})$$

wobei  $\omega$  die Frequenz,  $a$  die Amplitude und  $\varphi$  die Phase bezeichnet.

Der (reine) Ton stellt die einfachste Form eines Klanges dar. Er kommt in der Natur nicht vor, kann aber (näherungsweise) mit synthetischen Klanggeneratoren erzeugt werden. Musikalische (oder auch komplexe) Töne, physikalisch Klänge genannt, stellen periodische Überlagerungen reiner Töne dar, bestehend aus einem Grundton und mehreren Obertönen. Die Frequenz eines Klanges ergibt sich aus seiner Grundfrequenz, also der Frequenz des Grundtones. Die Frequenzen der Obertöne sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. (Daraus resultiert die Periodizität des Gesamtklanges.) Der Anteil der einzelnen Obertöne eines Klanges wird Frequenzspektrum genannt. Eine im Gegensatz zu einem Klang unperiodische Überlagerung reiner Töne heißt Geräusch (BÖLKE 1997, 9ff).

Neben ihren physikalischen Eigenschaften können Klängen entsprechende die Wahrnehmung betreffende (perzeptive) Eigenschaften zugesprochen werden. Klänge können perzeptiv nach den Attributen Tonhöhe, Lautstärke und Klangfarbe unterschieden werden. Die Tonhöhe ist die perzeptive Entsprechung der (physikalischen) Tonfrequenz, die Lautstärke die Entsprechung der Amplitude (eigentlich: des Schalldruckes). Zwischen den sich entsprechenden Größen besteht jedoch kein linearer Zusammenhang. Weiterhin ändert sich die Lautstärke eines Klanges bei konstanter Amplitude mit der Frequenz.

Die Klangfarbe ist abhängig von der Wellenform. Sie stellt die ‚Qualität‘ eines Klanges dar; Klänge eines Klaviers oder einer Geige werden durch ihre jeweilige Klangfarbe unterschieden. Diese Klangfarbe kann von Menschen leicht erkannt werden, sie ist jedoch nur schwer definierbar. Sie ist multidimensional, es sind jedoch nicht alle Dimensionen der Klangfarbe bekannt. Möglicherweise gibt es unterschiedliche Dimensionen für unterschiedliche Arten von Klängen. Zwei häufig beschriebene Dimensionen sind die spektrale und die temporale (BREWSTER 1994, 17ff), die sich also auf die Frequenz bzw. die Zeit beziehen.

Klänge werden von Menschen in Form von Klangquellen wahrgenommen. Sie werden perzeptiv einer gemeinsamen Klangquelle zugesprochen, wenn sie ähnlich und

bezüglich Zeit und Frequenz nahe beieinander liegen, wenn sie weiche Übergänge voneinander darstellen und wenn sie beispielsweise bezüglich Lautstärke und Tonhöhe kohärent sind (BREWSTER 1994, 33f).<sup>1</sup>

Ähnlich wie bei grafischen Zeichen können Menschen den Ort eines Klages erkennen. Bezüglich dieser Ortsbestimmung wird binaurales und monaurales Hören unterschieden, also horizontale Ortswahrnehmung als Effekt der Wahrnehmung unterschiedlicher Signale durch die Entfernung zwischen den beiden Ohren bzw. vertikale Ortswahrnehmung als Effekt der Signalformung durch den Aufbau der Ohren an sich.

Der horizontale akustische Richtungseindruck entsteht vor allem durch die relativen Zeit- und Intensitätsunterschiede der Tonwellen an den beiden Ohren. Diese beiden Unterschiede werden in der Psychoakustik ‚Interaural Time Difference‘ (ITD) und ‚Interaural Intensity Difference‘ (IID) genannt (BEGAULT 1994, 39ff). Bei der ITD handelt es sich um das Phänomen, dass der Klang einer Quelle aufgrund der Entfernung zwischen den Ohren und damit jeweils unterschiedlicher Entfernung zur Quelle zu unterschiedlichen Zeiten an dem jeweiligen Ohr ankommt. Da Klänge periodisch sind, kann nicht der Zeitunterschied an sich, sondern nur die Phasenverschiebung wahrgenommen werden. Bei hohen Frequenzen kann diese nicht eindeutig bestimmt werden. Die ITD tritt daher nur bei einer Tonhöhe unterhalb 1000 Hz auf und beträgt maximal 0,065 ms (ebd.).

Unter der IID versteht man den Intensitätsunterschied eines Tones einer Quelle zwischen den beiden Ohren, der entsteht, wenn der Kopf einen ‚akustischen Schatten‘ für ein Ohr erzeugt. Die IID ist proportional zur Tonfrequenz und tritt bei Wellen auf, die kleiner als der Kopfdurchmesser sind und daher dem akustischen Schatten unterliegen. Die entsprechenden Frequenzen sind größer als ca. 1,5 kHz (ebd., 40f).

Binaurales Hören über ITD und IID vermittelt eine Position nur bezüglich einer horizontalen Achse. Dies liegt an der symmetrischen Anordnung der Ohren. Die Orte von Klangquellen, die bezüglich ITD und IID gleich wahrgenommen werden, befinden sich auf der Oberfläche von Kegeln, deren Spitze jeweils am Gehörgang beginnt und deren Grundfläche parallel zur den Ohrmuscheln liegt, die sogenannten Verwechslungskegel (*Cones of confusion*). Diese Verwechslung tritt nicht auf, wenn sich der Kopf relativ zur Klangquelle bewegt. (Sie tritt aber auf bei der Benutzung von Kopfhörern.)

Monoaurales Hören ermöglicht die Bestimmung der Position einer Klangquelle auf der Meridianebene, die sich senkrecht zum Gesicht befindet, auch bei unbewegtem Kopf. Es basiert auf frequenz- und ortsabhängigen Amplituden- und Zeitverzögerungsunterschieden, die durch die Umformung des Klages durch jeweils ein Außenohr (die Ohrmuschel) nach Reflexion des Klages vom Oberkörper auftreten. Mathematisch kann diese Umformung durch die sogenannte Außenohrübertragungsfunktion beschrieben werden (Head-Related Transfer Function, HRTF). Bei der HRTF handelt es sich um eine spektrale Filterung von Klängen (BEGAULT 1994, 52).

### 2.2.2 Haptische Wahrnehmung

Durch Berührung können Eigenschaften von Objekten im Nahbereich bestimmt werden, die teilweise visuell nicht erfahrbar sind. Bei diesen Charakteristika handelt es sich u.a. um die Größe, die Form, das Gewicht, die Oberflächenbeschaffenheit und die

---

1. Bezüglich physischer Eigenschaften werden Tonquellen nach Grundtönen, Position, Rhythmus, Skalen und Tonarten identifiziert (BREWSTER 1994, 33f), auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

Elastizität eines Objekts (SEKULER U. BLAKE 1994, 379). Der Berührungseindruck wird durch den Tastsinn vermittelt, der auch als haptischer Sinn bezeichnet wird. Obwohl der Sehsinn der wichtigste Sinn für Sehende ist, wird bei widersprüchlicher Wahrnehmung von Seh- und Tastsinn dem Tastsinn der Vorrang gegeben (ebd., 380).

Der Tastsinn kann in den taktilen und den kinästhetischen Sinn unterschieden werden (ebd., 401). Der taktile Sinn besteht aus Rezeptoren in der Haut. Die Haut ist an den Händen besonders empfindlich. Zusätzlich wird die Tastwahrnehmung durch das Bewegen der Hände unterstützt, was „aktive Berührung“ genannt wird (ebd., 400f).

Der kinästhetische Sinn ist propriozeptisch, er registriert Bewegungs- und Lageveränderungen des Körpers. Er besteht aus Sensoren in den Muskeln, Sehnen und Gelenken. Durch den kinästhetischen Sinn kann Information über die Körperhaltung und damit indirekt über Ausmaße eines Objektes gewonnen werden, wenn dieses an mehreren Stellen berührt wird. Die kinästhetische Wahrnehmung stellt einen Bezugsrahmen für die taktile Wahrnehmung dar. Jede Berührungswahrnehmung wird also bezüglich ihrer Position eingeordnet (ebd.).

Es gibt Fälle, in denen der Tastsinn eine genauso gute oder sogar bessere Auflösung besitzt wie der Sehsinn. Das ist zum Beispiel für die Erkennung kleiner Unebenheiten in einer Oberfläche oder das Erfühlen von Stoff der Fall. In den meisten Fällen ist die Auflösung des Tastsinnes jedoch viel geringer als die des Sehsinnes (JANSSON 2000B). Akustische Signale sind im Gegensatz zu visuellen und taktilen flüchtig. Weiterhin ist der Tastsinn anders als die anderen besprochenen Sinne ein Nahsinn, er ist also an den Körper gebunden. Dadurch könnten weiter entfernte Objekte nicht wahrgenommen werden; zusätzlich ist der Körper beim Ertasten stärker gefährdet als bei der Wahrnehmung durch die anderen genannten Sinne.

Tabelle 1 bietet eine Übersicht über den visuellen, akustischen, taktilen und kinästhetischen Sinn.

	<b>visuell</b>	<b>akustisch</b>	<b>taktil</b>	<b>kinästhetisch</b>
physikalische Basis	Licht	Schall	Oberflächen	Kraft, Länge und Geschwindigkeit
Zeitverlauf	flüchtig und statisch	flüchtig	flüchtig und statisch	flüchtig und statisch
Sensoren	Netzhaut	Trommelfell	in der Haut	in Muskeln und Sehnen
Reichweite	räumlich, global	räumlich, global	körpergebunden, fokussiert	körpergebunden, fokussiert
Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Inhalt	Bilder schnell, Text langsam	Geräusche schnell, Sprache langsam	langsam	langsam

Tabelle 1. Eigenschaften der medial vermittelbaren Sinne (nach FRITZ 1996, 6)

Aus ihr lassen sich die Besonderheiten ablesen, die bei der medialen Darstellung räumlicher Strukturen beachtet werden müssen. Der visuelle Sinn kann umfangreiche und detaillierte visuelle Signale verarbeiten, die zum Beispiel für die Tiefenwahrnehmung benötigt werden. Die sehr geringe Auflösung (und Lokalität) des haptischen Sinnes führt dazu, dass visuelle Darstellungen bei Übertragung in seine Domäne praktisch immer vereinfacht werden müssen.

## 2.3 Räumliche Vorstellungen

In der vorliegenden Arbeit werden Methoden und Werkzeuge entwickelt, mit denen räumliche Informationen erlernt werden können. Bei den hier interessierenden räumlichen Gebiete handelt es sich hauptsächlich solche einer Stadt, wie zum Beispiel den Verlauf von Straßen, die Lage von Häusern, usw. Verwandt damit sind Aufteilungen von Gebäuden oder anderen kleinen, abgeschlossenen Gebilden. Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass solche Informationen erlernt werden, um sich in dem entsprechenden Gebiet oder Gebäude (vornehmlich zu Fuß) fortzubewegen.

Die mit Fortbewegung zusammenhängenden Begriffe Mobilität, Orientierung und Navigation werden in der Literatur uneinheitlich verwendet (JANSSON 2000A, 359). In dieser Arbeit werden sie wie folgt benutzt:

- *Mobilität* bezeichnet die allgemeine Fähigkeit von Tieren und Menschen zu selbstständiger Fortbewegung, sowohl als Ausweichen von Hindernissen als auch dem Bewegen auf ein Ziel zu (in Anlehnung an STRELOW 1985). Bei ‚Mobilität‘ schwingt immer die Einschränkung der Fähigkeit zur Fortbewegung mit.
- *Navigation* bedeutet das Verfolgen eines bestimmten Weges.
- *Orientierung* bezeichnet das Wissen um die eigene Position bezüglich der Positionen anderer Objekte oder um die Positionen der Objekte zueinander (DOWNS U. STEA 1977, 124f).

Menschen besitzen keine angeborene Fähigkeit zur Orientierung. Sie müssen sich jeweils einen Weg suchen; vorgezeichnete Wege gibt es nur im Märchen: „If we only were as fortunate as Dorothy in the *Wizard of Oz*, who simply had to follow the yellow brick road“ (DOWNS U. STEA 1977, 133). Menschen können ohne externe Orientierungshilfe (zum Beispiel eine Bürgersteigkante) nicht einmal eine gerade Linie beim Gehen einhalten (MUEHRCKE 1978, 447).

Räumliches Lernen ist Menschen so vertraut, dass es selten allein betrachtet wird, sondern meistens im Zusammenhang der dazu benötigten Wahrnehmung, bei Untersuchungen von Mobilität oder für den Bau von sich selbstständig bewegendem Robotern. Räumliches Lernen wird in der Psychologie hauptsächlich in der Form von Laborversuchen mit Menschen oder Tieren untersucht (s. die klassischen Labyrinthversuche der Kognitionspsychologie, zum Beispiel TOLMAN 1948).

Die Forschung über räumliche Wahrnehmung und räumliches Lernen wird sowohl von Psychologen als auch Geographen verfolgt (DOWNS U. STEA 1977, 213). Dadurch kommt es zu einer uneinheitlicher Begriffsbildung, die neben den bereits angesprochenen Gründen die Nutzung der Erkenntnisse durch Fachfremde, wie zum Beispiel im vorliegenden Fall Informatikern, die alternative Medien für die Darstellung räumlicher Strukturen entwickeln wollen, erschwert.

Die Kognitionspsychologie befasst sich mit Prozessen des Erkennens und Wissens beim Menschen. Die Kognition der räumlichen Umgebung wird Umgebungskognition (*Environmental cognition*) genannt. Sie umfasst nach einer sehr weitgehenden Definition von MOORE UND GOLLEDGE alle subjektiven Informationen, den Glauben, das Bewusstsein, die Bilder und Eindrücke von Menschen, welche sie über elementare, strukturelle, funktionale und symbolische Aspekte von echten oder vorgestellten physischen, sozialen, kulturellen, ökonomischen und politischen Umgebungen haben (MOORE U. GOLLEDGE 1976B, 3ff).

Es gibt relativ wenig gesicherte Erkenntnisse über das Verfolgen von Wegen, obwohl es zum alltäglichen Leben gehört: „We probably know more about wayfinding



in birds such as pigeons [...] than we do about how people get to and from the local supermarket“ (DOWNS U. STEA 1977, 124). Eine Schwierigkeit bei der Erforschung räumlicher Phänomene ist, dass räumliches Lernen gewöhnlich beim Ausüben anderer Aktivitäten gewonnen wird und daher nur selten in das Zentrum des Interesses rückt (DOWNS U. STEA 1977, 219). Wenn eine räumliche Vorstellung eines Gebietes erst einmal vorhanden ist, erscheint das Abrufen dieser Vorstellung zum Beispiel beim Verfolgen eines Weges trivial (DOWNS U. STEA 1977, 58f).

Es ist selbst für die entsprechenden Fachleute schwer, gesicherte Erkenntnisse auf dem Gebiet der Raumkognition zu erhalten. So schreibt eine Kognitionspsychologin über ihren Wissenschaftszweig: „Die theoretischen Erklärungsmodelle zum Thema räumlicher Kognition sind sehr umfassend und überschreiten meiner Ansicht nach die wirkliche Aussagekraft der empirischen Studien deutlich“ (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 140).

Unter räumlicher Kognition verstehen verschiedene Autoren unterschiedliche Dinge. Selbst der zentrale Begriff der Karte wird in den Kognitionswissenschaften auf unterschiedliche Weise verwendet. Er wird einmal im Zusammenhang mit Wissen verwendet, welches durch das Lesen von tatsächlichen Karten erworben wurde, andererseits auch für räumliche Vorstellungen, welche die Versuchspersonen entwickeln (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 138).

Solche kartenähnliche Vorstellungen werden häufig *kognitive Karten* genannt. Dieser Begriff geht auf TOLMAN zurück, der ihn zur Beschreibung von Labyrinthexperimenten mit Ratten geprägt hat (TOLMAN 1948). Es gibt jedoch auch Forscher, die das Vorhandensein von kognitiven Karten leugnen. Der prominenteste war GIBSON, der dem kognitiven den ökologischen Ansatz der Wahrnehmung gegenüberstellt hat (s. GIBSON 1979).

Es soll zunächst anekdotisch geschildert werden, wie unterschiedliche Menschen dieselbe Stadt wahrnehmen. Unter der Überschrift „Learning a New City“ beschreiben DOWNS U. STEA, wie eine hypothetische (und stereotypische) Familie in eine neue Stadt ohne gut ausgebautes Personennahverkehrssystem zieht und die einzelnen Familienmitglieder jeweils die Stadt erlernen. Als Hilfsmittel hat die Familie einen Stadtplan zur Verfügung. Weiterhin können sie sich an Straßenschildern, Ampeln, usw. und an der Regelmäßigkeit einiger Straßenblocks orientieren (1977, 214ff).

Der Vater kennt die Stadt aus früheren Reisen und kennt außerdem andere Städte ähnlicher Größe. Er lernt zunächst Routen von seinem Haus zur Arbeitsstelle. Sie bestehen aus Landmarken und Straßenschildern und den Aktionen, die er dort jeweils auszuführen hat. Mit der Zeit entwickelt sich aus diesen Routen eine mentale Karte der Stadt (DOWNS U. STEA 1977, 215).

Die Mutter kann nur wenig mit gedruckten Karten umgehen und benutzt daher hauptsächlich verbale Routenbeschreibungen zur Navigation (DOWNS U. STEA 1977, 216f), also nichtaufbereitete Informationen aus zweiter Hand. Die Routen, die fast alle das Haus oder ein Einkaufszentrum beinhalten, sind kaum zu einer Karte verbunden. Eine neue Route bereitet ihr daher Schwierigkeiten. Die Mutter kann dafür aber häufig benutzte Routen fast automatisch mit dem Auto befahren (DOWNS U. STEA 1977, 217f).

Die beschriebenen Personen haben die Stadt also vermittelt und durch die eigene Wahrnehmung erlernt. Räumliche Informationen aus eigener oder vermittelter Wahrnehmung werden nach Wichtigkeit einerseits und Unterscheidbarkeit bzw. Vorstellbarkeit andererseits ausgewählt. Räumliche Objekte sind wichtig, wenn an ihnen eine Entscheidung bezüglich des weiteren Weges getroffen oder sich für solche Entscheidungen an ihnen orientiert wird, was zum Beispiel für Kreuzungen gilt. Unterscheid-

<b>Kartenwissen</b>	<b>Straßenwissen</b>
zweidimensional	dreidimensional
betrachterzentriert	objektzentriert
orientierungsabhängig	orientierungsfrei
ganzheitlich simultan vorgegeben	in Ausschnitten sukzessive erworben
statisch	bewegungsgezogen
euklidische Distanz symmetrisch	Straßendistanz asymmetrisch
schematische Symbole	realistische Orientierungspunkte

*Tabelle 2.* Vergleich von Karten- und Straßenwissen (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 137)

barkeit und Vorstellbarkeit beziehen sich auf Unterschiede zwischen räumlichen Objekten: Wenn die generelle räumliche Struktur eintönig ist, müssen mehr Details erlernt werden (DOWNS U. STEA 1977, 78f).

### 2.3.1 Überblicks- und Routenperspektive

In der Literatur werden verschiedene Gebietsvorstellungen verschieden eingeteilt. Häufig wird in Vorstellungen von einzelnen Strecken einerseits und eines zusammenhängenden Gebietes andererseits unterschieden, wie auch in der obigen Anekdote angeklungen. Eine solche Einteilung ist die in Routen- und Überblicksperspektive (TAYLOR U. TVERSKY 1996). BYRNE und SALTER unterscheiden entsprechend Netzwerk- und Vektorkarten (BYRNE U. SALTER 1983, 298), SCHUMANN-HENGSTLER nennt die beiden Varianten Straßen- und Kartenwissen (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 136). Die Unterschiede von Karten- und Straßenwissen nach SCHUMANN-HENGSTLER sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Vor allem in den Routenvorstellungen unterscheiden sich diese Theorien. Es wird entweder von einer Folge von Eindrücken ausgegangen, wie sie beim Gehen entstehen, oder als Abstraktion davon als Streckenvorstellungen, die jedoch noch nicht zu einer Kartenvorstellung integriert sind. Es müssen also drei statt zwei Vorstellungen unterschieden werden. Wenn man davon ausgeht, dass Vorstellungen von einem Gebiet bezüglich ihrer Abstraktheit auf dem Kontinuum zwischen dem Eindruck, wie er beim Gehen entsteht und einer echten Karte liegen, ergibt sich diese Abstraktionsfolge:

- Eindruck beim Gehen
- Routenperspektive, Straßenwissen
- Horizontperspektive, sequentielle Routenkarte, Netzwerkkarte
- Überblicksperspektive, Vektorkarte, räumliche Routenkarte
- physisches Medium Karte

Räumliches Wissen entsteht hauptsächlich von den beiden Enden der Abstraktionsfolge her, also durch die eigene Anschauung beim Gehen einerseits oder aus Karten andererseits. Die Stufen dazwischen lassen sich jedoch auch auf verbreitete Methoden der Vermittlung bzw. Erlangung räumlichen Wissens abbilden: Verbale Routenbeschreibungen entsprechen etwa der sequentiellen Routen- bzw. Netzwerkkarte, Blicke von gebauten oder natürlichen Erhebungen aus der Überblicksperspektive.

Eine Routenperspektive kann sich entweder auf eine Folge von Bewegungen und Abbiegungen (Kinästhetik) oder auf eine Folge von Szenen und Landmarken (visuelle Eindrücke) beziehen (DENIS U.A. 1999, 168). Im zweiten Fall basiert die Routenpers-

pektive auf aufeinanderfolgenden Ansichten, die entstehen, wenn eine Person sich durch das Gelände bewegt (DENIS U.A. 1999, 168).

Das der Routenperspektive entsprechende Straßenwissen ist dreidimensional und basiert unter anderem auf Landmarken. Entfernungen basierend auf Straßenwissen sind nicht euklidisch, also möglicherweise unterschiedlich, je nachdem ob man von einem Punkt zu einem anderen oder umgekehrt misst (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 136).

Aus der Routenperspektive kann eine Folge von Strecken und Winkeln zwischen ihnen (zu einer sequentiellen Routenkarte) abstrahiert werden; die Routen sind dabei unabhängig (STEA 1973, 116). Der Bezugsrahmen ist intern, und die Beschreibungen sind egozentrisch (sie können mit Ausdrücken wie ‚links‘, ‚rechts‘, ‚vorne‘ und ‚hinten‘ verbalisiert werden) (DENIS U.A. 1999, 168).

Bei einer durch Abstraktion entstandenen sequentiellen Routenkarte sind Anfangs- und Endpunkt in der Vorstellung durch einen Pfad verbunden, auf dem sich eine Folge von Landmarken befindet. Durch die Landmarken sind die kognitive Karte und die Umgebung verbunden. Die Landmarken ermöglichen es daher während der Begehung des entsprechenden Gebietes, auf dem Pfad zu bleiben und den Fortschritt auf ihm zu prüfen (DOWNS U. STEA 1977, 133).

Die den sequentiellen Routenkarten entsprechenden Netzwerkkarten bestehen aus Strecken, die durch Kreuzungen verbunden sind. Orte werden als Knoten auf den Strecken abgespeichert. In Netzwerkkarten aus der Theorie von BYRNE und SALTER fehlen Streckenlängen und Winkel zwischen Strecken. Sie ergeben sich aus der Anzahl von Knoten (also zum Beispiel von abbiegenden Straßen) bzw. aus groben Richtungsangaben (BYRNE U. SALTER 1983, 298).

Die Überblicksperspektive entspricht einem Blick auf das Gelände von oben. Es wird dabei in einen externen Bezugsrahmen eingepasst und mit den üblichen räumlichen Vokabeln wie den vier Himmelsrichtungen belegt (DENIS U.A. 1999, 168). Das entsprechende Kartenwissen besteht aus Pfaden, Ecken, Distrikten, Knoten und Orientierungspunkten oder Plätzen, Relationen zwischen diesen Elementen und Wegen (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 136).

Die Überblicksperspektive ist einem euklidischen Graphen vergleichbar; in ihr sind also Entfernungen und Richtungen mehr oder weniger genau abgespeichert (BYRNE U. SALTER 1983, 298). Kartenwissen ist also zweidimensional und ganzheitlich, aber auch schematisch (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 136). Die entsprechenden Vektorkarten sind die Voraussetzung für die Fähigkeit von Menschen, Abkürzungen zu bestimmen, die auch Strecken enthalten, die noch nicht begangen wurden. Außerdem sind sie wahrscheinlich die Basis für das Zeichnen einer Karte mit Standardausrichtung (meist Nordung) (BYRNE 1979).

Die Entfernungen in räumlichen Vorstellungen werden kognitive Distanzen genannt. BRIGGS nennt fünf Möglichkeiten für das Erlangen solcher Entfernungen:

1. *motorisch:*  
Energie, die für das Bewegen zwischen zwei Orten benötigt wird
2. *Zeit und Geschwindigkeit:*  
Berechnung aus dem Verhältnis von Zeit, Geschwindigkeit und Entfernung
3. *Wahrnehmung:*  
Aufsummierung der wahrgenommenen Entfernungen zwischen auf dem Weg liegenden Landmarken
4. *Regelmäßigkeiten der Umgebung:*  
Zählen von Ampeln oder Straßenblocks

### 5. *Symbolische Darstellungen:*

Messen mit der Hilfe von Karten und Wegweisern

(BRIGGS 1973, nach DOWNS U. STEA 1977, 140).

Die kognitiven entsprechen häufig nicht den euklidischen Distanzen. Die Abweichungen sind allerdings schwer zu messen und zu systematisieren (GOLLEDGE U. STIMSON 1997, 263).

BYRNE hat dazu Untersuchungen durchgeführt. Sie sollten zeigen, wie gut Fußgänger in der Lage sind, die Länge begangener Strecken zu schätzen (BYRNE 1979). Dabei hat sich herausgestellt, dass die Versuchspersonen bei diesen Schätzungen systematische Fehler machen und dass die Größe des jeweiligen Fehlers von der Art der Route abhängt: Strecken mit mehreren größeren Biegungen werden länger geschätzt als gerade Strecken, und Strecken in der Innenstadt werden länger geschätzt als solche am Stadtrand. Dieses Phänomen erklärt BYRNE damit, dass die Versuchspersonen sich Strecken nicht als Vektoren merken, sondern nach wichtigen Punkten auf ihnen und dass sie eine Strecke als um so länger schätzen, je mehr solcher Punkte sie enthält (ebd.).

Weiterhin hat BYRNE auch das Abschätzen von Winkeln zwischen Straßen untersucht. Dabei hat er herausgefunden, dass sich Versuchspersonen Winkel zwischen  $60^\circ$  und  $110\text{--}120^\circ$  als rechte Winkel merken. Dies erklärt BYRNE wieder damit, dass Versuchspersonen Vorstellungen benutzen, die auf der Heuristik basieren, dass Winkel an Kreuzungen  $90^\circ$  betragen. Diese Heuristik ist zwar offensichtlich in den meisten Fällen falsch, aber praktisch durchaus ausreichend. Die beschriebenen heuristischen Vorstellungen einer Umgebung ergeben eine Netzwerkkarte (BYRNE 1979).

Räumliches Lernen erfolgt in einem Prozess und beginnt mit dem Wissen über die Position einzelner Punkte. Diese Punkte werden anschließend zu Routen verbunden. Daraus ergibt sich dann also jeweils eine sequentielle Routenperspektive (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 139). Vor allem die Orientierungspunkte, aber auch die Route werden gewöhnlich durch eigene Anschauung erworben (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 139). Straßenwissen wird also in Ausschnitten erworben, die der Betrachter gewöhnlich aufnimmt, während er sich bewegt (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 136).

Wenn Routenkarten durch gemeinsame Punkte und Landmarken verbunden werden, entsteht im Idealfall bereits eine Überblicksvorstellung (DOWNS U. STEA 1977, 133). Begehungen des Geländes sind dazu aber nicht ausreichend (BYRNE U. SALTER 1983, 298). Für die Gesamtschau wird daher gewöhnlich auf medial, meist durch Karten vermitteltes Wissen zurückgegriffen (SCHUMANN-HENGSTLER 1995, 139).

Es existieren hauptsächlich zwei konkurrierende Theorien darüber, wie Sehende Streckenwissen erlangen. Diese Theorien unterscheiden sich darin, welche Elemente sie als Grundelemente annehmen: Nach der ersten Theorie werden zunächst Landmarken erlernt und Strecken erst im Anschluss. Es ergibt sich demnach eine Hierarchie von vorgestellten Objekten, auf deren oberster Ebene Landmarken stehen, auf den weiteren Ebenen folgen Strecken und Konfigurationen von Objekten. Nach der zweiten Theorie bilden Strecken die Basis für das weitere Lernen eines Gebietes, Landmarken werden also zu den Strecken hinzugefügt. Anhaltspunkte für diese Theorie ergeben sich aus der Auswertung von Karten, die von Versuchspersonen gezeichnet wurden (KITCHIN U.A. 1997, 235).

Weiteren Theorien zufolge dienen nicht ausschließlich Landmarken oder Strecken als Hauptknoten in einer Hierarchie von erlernten räumlichen Objekten, sondern es können generell verschiedene solche Objekte als Hauptknoten dienen, also sowohl

Landmarken als auch zum Beispiel Hauptstraßen (KITCHIN U.A. 1997, 235). GOLLEDGE und STIMSON sprechen daher davon, dass man zunächst die Topologie einer Umgebung lernt. Dabei herrschen räumliche Eigenschaften wie Nachbarschaft und Getrenntheit, Offenheit und Abgeschlossenheit, Zerstretheit und Häufung, usw. vor (GOLLEDGE U. STIMSON 1997, 161). Im nächsten Schritt entsteht eine Vorstellung, die noch nicht vollständig flächig ist, als Hierarchie von Ankerpunkten oder Wegen. Auf der obersten Ebene dieser Hierarchie befinden sich beispielsweise in einer Stadt der Wohn- und der Arbeitsort, im weiteren Städte und für Straßen die Hauptverkehrsstraßen. Wenn zwischen zwei Orten auf unterer Hierarchieebene eine Verbindung gesucht wird, so geschieht dies durch Rückgriff auf die oberste Ebene (GOLLEDGE U. STIMSON 1997, 251ff).

Überblicksperspektiven sind generell straßenorientierten Vorstellungen überlegen, weil sie vollständiger und kartenähnlicher sind. Welche räumliche Vorstellung sinnvoll ist, hängt jedoch auch vom Verwendungszweck ab: Geographische Karten werden von Sehenden eher als Vektorkarten, Mobilitätskarten eher als Netzwerkkarten aufgenommen (HOLLYFIELD 1987). Weiterhin kann die Überblicksperspektive nur durch aufwendiges Umkodieren (Abstrahieren) entstehen, weil die Umgebung, wie bereits besprochen, eher in Routenform wahrgenommen wird. Bei unvollständigen und verwirrenden Wegbeschreibungen scheinen daher diejenigen Personen, die Routenbeschreibungen bevorzugen, sogar im Vorteil zu sein. Sie können sich dann nämlich immer noch an Landmarken orientieren, selbst wenn deren Abfolge nur unvollständig beschrieben wurde (DENIS U.A. 1999, 169).

### 2.3.2 Routennavigation

Wie deutlich geworden ist, stellt die Routennavigation als Planen einer Route einerseits und Beibehalten der Route beim Begehen andererseits die Grundlage der Mobilität von Fußgängern dar. Dies gilt selbst dann, wenn Planen und Begehen von der betreffenden Person nicht als eigenständige Handlungen empfunden werden (MUEHRCKE 1978, 335). Der Prozess der Auswahl und des Begehens eines Weges wird ‚Wayfinding‘ genannt. Wayfinding umfasst die Streckenauswahl, das sich Orientieren, das Beibehalten der Strecke und das Finden des Ziels (DOWNS U. STEA 1977, 124).

Die Streckenauswahl beginnt mit der Wahl von Anfangs- und Endpunkt. Für die Strecke als Verbindung dieser beiden Punkte gibt es gewöhnlich mehrere Möglichkeiten, die sich unter anderem in Länge, Sicherheit und Anzahl von Richtungswechseln bzw. näherungsweise geraden Pfadsegmenten unterscheiden. Auf einer Route befinden sich daher gewöhnlich Wahlpunkte, an denen es unterschiedliche Fortsetzungsmöglichkeiten gibt. Diese Wahlpunkte müssen bei der Streckenplanung identifiziert und die einzuschlagende Richtung festgestellt werden.

Es lassen sich drei Klassen „kritischer Knoten“ eines Weges unterscheiden:

1. Startpunkt, weil es von dort aus in eine beliebige Richtung weitergehen kann
  2. „Reorientierungspunkte“ (Kreuzungen oder Plätze)
  3. Endpunkt (um zu wissen, dass man am Ziel angekommen ist)
- (DENIS U.A. 1999, 151)

Das Orientieren ist der wichtigste der genannten Aspekte des Wayfinding (DOWNS U. STEA 1977, 124f) Die drei Hauptverfahren zum Beibehalten einer Route (Navigation) heißen Piloting, Koppelnavigation (*Dead reckoning*) und Pfadintegration (Trägheitsnavigation). Piloting stellt eine positionsbasierte Navigation dar, bei der externe Merkmale für die eigene Position und Orientierung benutzt werden. Koppelnavigation

ist geschwindigkeitsbasiert, wobei die Geschwindigkeit intern oder durch Rückgriff auf externe Anhaltspunkte gemessen wird. Aus dem Ausgangspunkt und den unterwegs gemessenen Geschwindigkeitsvektoren werden die aktuelle Position und Richtung errechnet. Die Pfadintegration kommt schließlich ganz ohne externe Hilfsmittel aus, wenn der Ausgangspunkt bekannt ist. Bei ihr wird die aktuelle Position und Richtung aus den linearen und Drehbeschleunigungen errechnet (LOOMIS U.A. 1998, 193).

In städtischen Umgebungen erfolgt Piloting meist über bezeichnete Objekte, wie benannte Straßen oder nummerierte Gebäude (MUEHRCKE 1978, 335f). Durch ihre räumliche Ausdehnung erleichtern Straßen die Navigation noch mehr als andere Objekte, weil für die Straßenbegehung topologisches Vorwissen ausreicht. Die genaue geometrische Lage ergibt sich unterwegs (MUEHRCKE 1978, 336), für Sehende leichter als für Blinde.

Die für die Koppelnavigation nötigen Richtungen und Entfernungen relativ zum Ausgangspunkt werden meistens aus Reisezeiten und entsprechenden Geschwindigkeiten bestimmt (MUEHRCKE 1978, 338). Wenn eine Route für die Koppelnavigation geplant wird, wird nur der Kurs an sich in die Karte eingezeichnet, ohne Referenz zu Landmarken wie beim Piloting. Der Kurs besteht dabei aus geraden Kursabschnitten jeweils einer bestimmten Länge und Winkeln zwischen ihnen (MUEHRCKE 1978, 338). Koppelnavigation ist gewöhnlich weniger exakt als Piloting, weil die dafür benötigten Informationen selten genau bestimmt werden können (MUEHRCKE 1978, 338) (im Gegensatz zu Landmarken für das Piloting). Es können sich jedoch Fehler aufaddieren, weil der Ausgangspunkt den einzigen Referenzpunkt darstellt (MUEHRCKE 1978, 339f).

### 2.3.3 Orientierung und Navigation bei Blinden

Blinde oder sehbehinderte Reisende müssen zunächst ähnliche Aufgaben bewältigen wie sehende und planen Strecken häufig vor. Mehr noch als Sehende müssen Blinde und Sehbehinderte die Eigenschaften der jeweiligen Strecke und des gesamten Gebietes kennen (GOLLEDGE U. STIMSON 1997, 506).

Die Informationen, die Blinde benötigen, um sich in einer ihnen fremden Gegend zurechtzufinden, erfahren sie unter anderem aus verbalen Wegbeschreibungen, die für Blinde gängige Medien darstellen. Aus diesen Beschreibungen lässt sich ableiten, dass Blinde mehr Informationen für eine bestimmte Strecke benötigen als Sehende. Das kann dadurch erklärt werden, dass Sehende beim Gehen visuell mehr Informationen aus der Umgebung erhalten als Blinde, zum Beispiel über Wegbeschaffenheit, die Lage von Kreuzungen usw. In den Wegbeschreibungen der blinden Fußgänger sind weiterhin weniger Informationen enthalten, die sich aus der Umgebung ablesen lassen und mehr Informationen relativ zum Fußgänger, zum Beispiel über Entfernungen von Objekten zu ihm oder über Körperdrehungen (JANSSON 2000B).

Blinde lernen geographische Informationen meist durch gesprochene Beschreibungen, ergänzt durch eigene taktile oder akustische Erfahrungen (GOLLEDGE U.A. 1996, 216). Dadurch ergeben sich die Probleme, dass die ihnen gebotenen Informationen oft ungenügend und schwer verständlich sind. Generell können geographische Informationen nur schwer verbalisiert werden, was eine Ursache der genannten Probleme darstellt (ebd., 216f).

Um die nötigen detaillierten Informationen zu erhalten und verarbeiten zu können, entwickeln Blinde bestimmte Wegbegehungsstrategien (*Wayfinding skills*). Diese Strategien können durch Hilfsmittel ergänzt werden (GOLLEDGE U. STIMSON 1997, 507). Der Blindenhund und der weiße Langstock stellen die am meisten verbreiteten

Mobilitätshilfen für Blinde dar. Andere (auch elektronische Hilfen) liefern zu wenig relevante Informationen, meist nur solche über nahe Hindernisse (JANSSON 1991, 59).

Nach GOLLEDGE U.A. müssen sich Blinde zum Navigieren die entsprechende Umgebung einprägen, Pfadsegmente und Winkel erlernen und beim Gehen wiederfinden (GOLLEDGE U.A. 1996). Die genannten Autoren empfehlen als Strategien zum Erlernen einer fremden Umgebung durch Blinde:

1. systematische Erkundung des Gebietes
2. Wahl eines festgelegten Ausgangspunktes (Landmarke)
3. Angabe der Struktur der Umgebung (Regelmäßigkeit von Straßen, etc.)
4. Festlegung von Hinweisen auf Landmarken
5. Entwickeln einer kognitiven Repräsentation des Gebietes
6. Festlegung von Kriterien für die Streckenauswahl
7. Streckenauswahl (ebd.)

GOLLEDGE U.A. nennen als häufigste Hindernisse auf unseren Straßen, die Blinde in ihrer unabhängigen Mobilität gefährden, tiefhängende Schilder, wandmontierte Geräte wie Feuerlöscher, halbgeöffnete Türen, Bänke und Blumenkübel, Treppen ohne Geländer, halbe Telefonzellen, Fahrräder etc., flache Randsteine, unebenes Gelände und starke Steigungen (GOLLEDGE U.A. 1996, 237f).

## 2.4 Räumliches Leitmedium Karte

Entsprechend der Wichtigkeit räumlicher Informationen für die Fortbewegung und den darauf basierenden Handel bzw. die Einteilung von Land und den sich darauf stützenden Landbesitz gibt es schon lange kartenähnliche Aufzeichnungen. Karten sind das vorherrschende Medium zur visuellen Darstellung räumlicher Inhalte. Es existiert daher eine reiche Literatur über ihre Geschichte und ihre Herstellung, zudem einige Arbeiten über ihre Benutzung, aus dem Bereich der Geographie, Kartographie und der kognitiven bzw. Mobilitätspsychologie. Für ein neues Medium zur Darstellung räumlicher Strukturen, wie in dieser Arbeit entwickelt, dienen Karten daher als Vorbild. Allerdings gibt die Literatur zu Karten wenig Hinweise darauf, wie alternative räumliche Medien gestaltet werden können, wenn die Grundeigenschaften der Darstellung eines Überblicks bei der Übertragung in ein taktilen Medium nicht mehr gegeben ist.

Eine Karte stellt ein Gebiet dar, wie es ein Bild auch könnte. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Bild und Karte ist, dass ein Bild an jeder Stelle einen Teil einer Abbildung der Vorlage enthält, eine Karte jedoch nicht: „In pictorial linear perspective, where position in the picture space corresponds to a perceived view, real or imaginary, there are no ‚empty‘ spaces or voids. With a map, the plane may represent no more than notional surface, on which particular objects are located“ (KEATES 1996, 84).

Karten unterscheiden sich weiterhin von Bildern in der Darstellung der Erdkrümmung: „The essential difference between map and picture is that whereas the picture is concerned with three-dimensional pictorial space as a representation of a field of view, the map has to represent the three-dimensional surface of the spherical earth on a plane, and this curved surface cannot be represented without distortion“ (KEATES 1996, 86f). Wenn das darzustellende Gebiet klein ist, verwischt sich dieser Unterschied jedoch, weil sich die Erdkrümmung nur schwach auswirkt und der ent-

sprechend kleine Ausschnitt der Erdoberfläche als Ebene betrachtet werden kann (KEATES 1996, 88).

Im folgenden soll untersucht werden, wie der Kartenbegriff in verschiedenen Disziplinen verstanden wird. Zunächst kommt die Kartographie an die Reihe, die einen eher praktischen Zugang zu Karten hat. Anschließend werden mit der Semiotik Karten als Zeichen und mit der Modelltheorie Karten als Modelle eher theoretisch untersucht. Dabei interessiert vor allem der Zusammenhang zwischen einer Karte und dem auf ihr abgebildeten Gebiet.

#### 2.4.1 Kartographie

Unter einer Karte im engeren Sinn versteht man in der Kartographie ein „verebnetes, maßstabsgebundenes, generalisiertes und inhaltlich begrenztes Modell räumlicher Informationen. In der Regel wird darunter eine analoge Abbildung auf Papier o.ä. dauerhaften Trägern verstanden; [die] technische Entwicklung ermöglicht aber auch kurzfristige Kartendarstellungen auf Bildschirmen usw.“ (WILHELMY 1990, 18). (Auf die Generalisierung als kartographischer Abstraktionsschritt wird weiter unten eingegangen.) Unter Karten im weiteren Sinn versteht man sowohl digitale Daten als Basis für Karten im engeren Sinn, als auch, wie schon erwähnt, subjektive Vorstellungen räumlicher Sachverhalte, die sogenannten kognitiven Karten (ebd.).<sup>1</sup> HAKE schließt in seine Definition neben Karten im herkömmlichen Sinn explizit digitale Karten ein (HAKE 1988).

Gängige Unterscheidungskriterien für Karten sind Inhalt, Maßstab, Art der Darstellung, Hersteller, Größe und Aufkommen als Einzelkarte oder Atlas. Am häufigsten werden Karten nach ihrem Inhalt in topographische und thematische Karten unterschieden: „*Topographische Karten* stellen sichtbare Erscheinungen der Erdoberfläche, vermessen und lagerichtig kartiert, im Grundriss und z.T. durch Schrift erläutert dar“<sup>2</sup> (WILHELMY 1990, 19). „*Thematische Karten* stellen raumbezogene Themen unterschiedlichster Art dar, ohne als Abbildung der Erdoberfläche verstanden werden zu müssen“ (WILHELMY 1990, 20).

Als Plan bezeichnet man „eine Karte, die vorwiegend der Übersicht dienen soll und daher ihrem Maßstab entsprechend geometrisch und inhaltlich stärker vereinfacht ist (z.B. Stadtplan)“ (HAKE U. GRÜNREICH 1994, 18). Stadtpläne sind vereinfachte Karten von bestimmten Gebieten: „Von besonderer Bedeutung sind vor allem die Folgekarten, die in einem Blatt das gesamte Stadtgebiet darstellen. Die Kartenmaßstäbe [...] reichen von 1:5 000 bis 1:30 000, wobei die meisten Stadtkarten in den Bereich von 1:10 000 bis 1:20 000 [...] fallen. [...] Darstellungen, die vorwiegend nur der Übersicht und Orientierung dienen sollen und daher ihrem Maßstab entsprechend geometrisch und inhaltlich stärker vereinfacht sind, werden häufig auch als Stadtpläne bezeichnet“ (HAKE U. GRÜNREICH 1994, 407f).

Der Charakter einer Karte ist offensichtlich schon bei ihrer Erstellung (im weitesten Sinn) festzulegen. Auf den Maßstab bezieht sich eine der vier grundsätzlichen Fragen:

1. What are we interested in representing?
2. What viewpoint or perspective are we taking?
3. At what scale is the representation?

---

1. Als „verebnetes“ Modell ist eine Karte zweidimensional.

2. Wie man an der Verwendung des Wortes „kartiert“ in dieser Definition sehen kann, tun sich selbst Kartographen mitunter schwer damit, eine Kartendefinition ohne Verwendung des Kartenbegriffs zu geben.



4. How do we construct the representation?

We can summarize these decisions as questions of (1) *purpose*, (2) *perspective*, (3) *scale*, and (4) *symbolization*“ (DOWNS U. STEA 1977, 63f).

Sind diese vier Fragen beantwortet, ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Art und Darstellung der Karteinformation:

- „1. Karte sollte eine der mathematischen Grundforderungen erfüllen:  
*Flächentreue* oder *Winkeltreue*. *Längentreue* (Abstandstreue) [ist] nur auf großmaßstäblichen Karten oder für ausgewählte Strecken erreichbar.
2. Karte muß *genau* sein (im Unterschied zur Kartenskizze!).  
Umrisse und andere Angaben müssen maßstabsgetreu der Wirklichkeit entsprechen.
3. Karte muß möglichst *vollständig* sein.  
Vom Karteninhalt muß in Grenzen des gewählten Maßstabs Rückschluß auf Wissensstand [über das entsprechende Gebiet, JS] möglich sein.
4. Karte muß *zweckmäßig* sein.  
Projektion und Format müssen Darstellungs- und Verwendungszweck entsprechen. Orientierungs- und Vergleichskärtchen, Zuverlässigkeitsdiagramme, alphabetisches Namenverzeichnis erleichtern Benutzung, besonders bei Atlanten.
5. Karte muß *klar* und *verständlich* sein.  
Was veranschaulicht werden soll, muß unzweideutig ausgedrückt sein.  
Übersichtlichkeit darf nicht durch Stoffüberlastung beeinträchtigt werden.
6. Karte muß *übersichtlich* und leicht *lesbar* sein.  
Voraussetzungen dafür: saubere Zeichnung, überlegte Wahl und Anordnung der Zeichen, geschickte, auch ästhetisch befriedigende Wahl der Farben, technisch einwandfreier Druck“ (WILHELMY 1990, 18f).

Die ersten drei Forderungen sind eher von den zugrundeliegenden Daten her, die letzten drei eher von der Benutzung her motiviert. Wie deutlich wird, muss bei diesen Forderungen jeweils abgewogen werden, welche man bevorzugt umsetzen möchte. Sie widersprechen sich teilweise, zum Beispiel Übersichtlichkeit und Informationsfülle.

Die informationstragenden Elemente einer Karte heißen Signaturen. „Signaturen im engeren Sinn sind punkt- oder linienförmige Elemente einer Karte, denen qualitative (und eventuell quantitative) Aussagen zuzuordnen sind. Im weiteren Sinn [sind] auch Farb- und Rasterflächen als Signaturen aufzufassen“. Die ältere Bezeichnung für „Signatur“ ist „Symbol“ (WILHELMY 1990, 238).

Namen und Zahlen sind wesentlich für Karten. Unbeschriftete Karten heißen daher ‚stumme Karten‘ und dienen didaktischen Zwecken, als Arbeitskarten oder Unterlage für thematische Karten. Namen können anstatt grafischer Elemente (Signaturen) eingesetzt werden, zum Beispiel das Wort ‚Wald‘ anstatt einem Waldsymbol. Die Namensdichte einer Karte ist von Maßstab und Zweck abhängig. Da Namen Platz benötigen, wird ihre Dichte mit zunehmender Generalisierung geringer (WILHELMY 1990, 124).

Zahlen werden vor allem für Höhenangaben eingesetzt, aber auch für Einwohnerzahlen, Fernstraßennummern und Koordinaten (WILHELMY 1990, 125). Für unterschiedliche Objekte werden Schriften unterschiedlicher Form oder Farbe benutzt (WILHELMY 1990, 124f). Punktsymbole (zum Beispiel Orte) werden waagrecht, Linien (zum Beispiel Flüsse) ihrem Verlauf folgend beschriftet (WILHELMY 1990, 125).

Historisch wurden Karten zunächst durch das Bereisen von Wegen aufgenommen: Die „Wegeaufnahme (Itinerar) in noch nicht vermessenen Gebieten war klassische

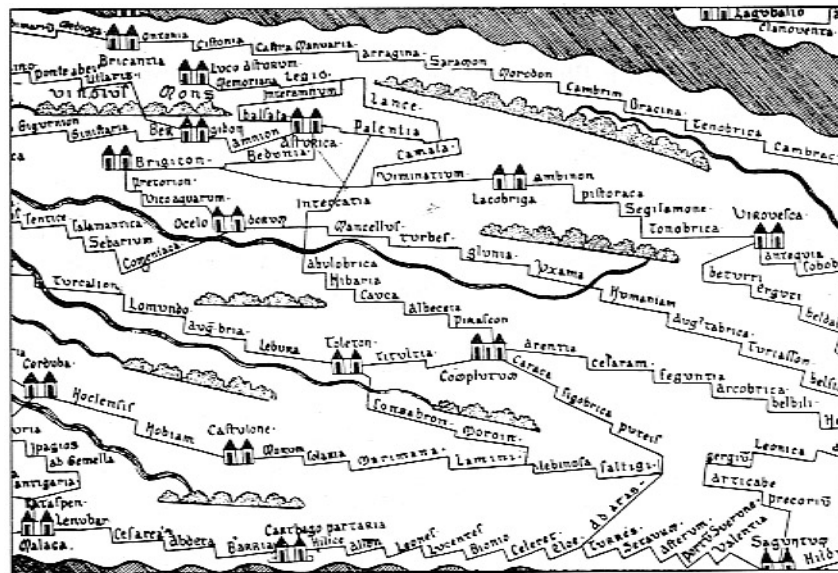


Abbildung 1. Itinarienkarte von ca. 375 (erhalten als Peutinger-Tafel aus dem 12. Jh.) (WILHELMY 1990, 104)

kartographische Aufnahmemethode früherer Forschungsreisender“ (WILHELMY 1990, 127). (Siehe Abbildung 1 für eine Itinarienkarte.) Wegabschnitte wurden in Entfernungen oder Reisezeit gemessen (WILHELMY 1990, 127f). „Mit wachsender Zahl der Forschungsreisen verdichten sich die Routenaufnahmen zu [einem] geschlossenen Bild einer Karte“ (ebd., 128). Heute werden Karten direkt flächenhaft aufgenommen (ebd., 129). Die historische Entwicklung von wegbasierten zu flächigen Karten lässt sich also mit der Entwicklung von Gebietsvorstellungen bei Individuen vergleichen, wie sie oben beschrieben wurde (s. Abschnitt 2.3.1).

Bei der Kartenerstellung muss aus der Fülle von möglichen Daten bezüglich eines bestimmten Gebietes ausgewählt werden. In der Kartographie wird das Erstellen einer Karte als Modellierungsschritt Generalisierung genannt. Die erste Generalisierung wird bereits bei der Datenerfassung vorgenommen, da nur bestimmte Aspekte der Realität überhaupt kartographisch erfasst werden. Das Ergebnis der Erfassungsgeneralisierung ist die Grundkarte (HAKE U. GRÜNREICH 1994, 110f).

Wenn aus der Grundkarte eine neue Karte geringerer Auflösung abgeleitet wird, so spricht man von der Modellgeneralisierung, eine weitere Form der Objektgeneralisierung. Als Generalisierung im engeren Sinn wird die kartographische Generalisierung bezeichnet. Dabei wird eine sogenannte Folgekarte aus einer anderen Karte (meist höheren Maßstabs) erzeugt. Die Übertragung einer Grundkarte in ein digitales Kartenmodell wird ebenfalls als kartographische Generalisierung bezeichnet (ebd.).

Da es sich bei einer Karte immer um eine Abstraktion im Vergleich des zugrundeliegenden Territoriums handelt, ist die Generalisierung, die ja gerade den Abstraktionsschritt bezeichnet, unausweichlich. Da von der Abstraktion nicht auf jedes Detail des Originals zurückgeschlossen werden kann, ist WILHELMY kaum zuzustimmen, wenn er schreibt: Ein „Kartenbenutzer muss [eine] klare Vorstellung vom Erscheinungsbild eines Flusslaufes haben und mit [dem] Problem der Generalisierung vertraut sein. [Ein] Geschulter Kartenleser weiß, dass [eine] Vereinfachung notwendig war; er kann daher von kartographischer Darstellung auf den wirklichen Verlauf des Flusses schließen“ (WILHELMY 1990, 184). (Da eine Generalisierung immer mit einem Informationsverlust einhergeht, ist nicht ganz klar, wie der Kartenleser den „wirklichen“ Flusslauf erkennen können soll.)





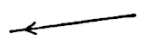




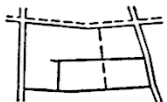








Elementarer Vorgang	Darstellung in der		
	Ausgangskarte	neuen Karte	
	Maßstab der Ausgangskarte		neuen Karte
<b>Rein geometrische Generalisierung</b>			
1 Vereinfachen			-
2 Vergrößern (vor allem Verbreitern)			=
3 Verdrängen (Folge von 2)			≠
<b>Geometrisch-begriffliche Generalisierung</b>			
4 Zusammenfassen			
5 Auswählen (bzw. Fortlassen)			
6 Klassifizieren bzw. Typisieren (einschließlich Umwandeln in Signaturen)			
7 Bewerten (z. B. Betonen)			

Abbildung 2. Beispiele für Generalisierungen (HAKE U. GRÜNREICH 1994, 112)

Die Generalisierung erfolgt nach HAKE UND GRÜNREICH entweder rein geometrisch oder geometrisch-begrifflich und umfasst die in Abbildung 2 gezeigten Schritte.

An die Ergebnisse der Generalisierung sind bestimmte Forderungen zu stellen:

- „1. graphisch:  
Einhaltung bestimmter Mindestgrößen von Strecken und Flächen und bestimmter Flächenverhältnisse von Bild- zu bildfreien Stellen, Beachtung des Zeichenschlüssels
2. geometrisch:  
Treue von Strecken, Proportionen, Flächen, Parallelitäten, Geradlinigkeiten und Rechtwinklichkeiten
3. strukturell:  
Nachbarschaft, Genese (z.B. aus einem Relief), Typus (z.B. Ort), funktionelle Verknüpfung (z.B. Häuser)“ (HAKE U. GRÜNREICH 1994, 113)

KEATES weist darauf hin, dass Karten nicht die einzigen Gebietsdarstellungen sind, die abstrahieren: „Although the subjective nature of generalization is often regarded as a kind of deficiency, generalization is unavoidably important because it is the means by which the bewildering detail of the experienced world is brought into a comprehensible order. As such, it is present in all kind of description and representation. [...] Maps are neither more nor less correct than other kinds of generalization“ (KEATES 1996, 99f)

Generalisierungen entstehen auch ohne menschliches Zutun durch automatische Aufnahmeverfahren: „Reduction in scale itself is not so unfamiliar to the map user, because virtually all the photographs and pictures he has viewed will have been reductions, less than life size. In the case of the photograph, generalization is either the result of objects being omitted because they are below the resolution of the recording system, or because the detail in the photograph is below the visual resolution of the viewer. With paintings, artists are aware that effects cannot be achieved by trying to copy the scene or object in every minute detail, because the process is self-defeating“ (KEATES 1996, 99f).

Die Generalisierung ist der Grund dafür, dass einige Aspekte eines Gebietes dargestellt, andere jedoch ausgelassen werden: „The elaborate symbol for a major road may indicate several different aspects by use of the graphic variables: its width, class or number of carriageways, its surface type, whether or not it is fenced, and its place in a route classification. All these are possible within the capacity of a multicolour symbol. But the ‚width‘ of a road symbol, especially at small scales, is not necessarily related to its physical width on the ground at all, but its relative importance, on either an objective or subjective basis“ (KEATES 1996, 102).

#### 2.4.2 Kartosemiotik

Die Semiotik ist die Wissenschaft von den Zeichen. Der Schweizer Linguist FERDINAND DE SAUSSURE und der U.S.-amerikanische Naturwissenschaftler und Philosoph CHARLES SANDERS PEIRCE sind die Begründer dieses Gebietes. Während DE SAUSSURES' Semiotik sich ihrer Herkunft entsprechend hauptsächlich mit sprachlichen Zeichen befasst, hat PEIRCE den Zeichenbegriff auch auf grafische Darstellungen angewandt. Daher wird in Arbeiten zur Semiotik von visuellen Zeichen vornehmlich der Zeichenbegriff von PEIRCE benutzt. Dieser Zeichenbegriff bietet daher auch die Grundlage für den folgenden kurzen Abriss der Kartosemiotik.

Die Kartosemiotik als Angewandte Semiotik liefert neben der Kartographie einen weiteren Beitrag zur Klärung des Kartenbegriffes. Zunächst eine Gegenüberstellung von Sprache, Bildern und Karten aus der Sicht eines Semiotikers: „Wegen ihrer Zweidimensionalität sind sowohl Bilder als auch Karten in ihrem räumlichen Darstellungspotential der Sprache überlegen, denn die Sprache kann die Dreidimensionalität des Raums nur durch die Eindimensionalität der Lautkette wiedergeben. Im Gegensatz zu Bildern sind Karten jedoch insofern der Sprache ähnlicher, als sie ein elaboriertes System arbiträrer Symbole verwenden, um geographische Orte auf der Karte zu lokalisieren oder zu beschreiben“ (NÖTH 1998, 26).

NÖTH stützt sich bei seiner semiotischen Betrachtung von Karten auf den dreiwertigen Zeichenbegriff von PEIRCE. Nach PEIRCE hat jedes Zeichen ein Repräsentamen, ein Objekt und einen Interpretanten. NÖTH erklärt diese Zeichenelemente für Karten so: „Jedes Kartenzeichen besteht danach erstens aus einem Repräsentamen, dem Zeichenträger, wie er von uns in der Regel visuell, in Sonderfällen auch akustisch oder taktil wahrgenommen wird, zweitens gehört zum Zeichen das Objekt, auf das es sich

bezieht, also in etwa die geographische Welt, und drittens der Interpretant, die Art und Weise, wie der Zeichenbenutzer das Zeichen interpretiert“ (NÖTH 1998, 29). Das Repräsentamen des kartographischen Zeichens liegt also beispielsweise auf Papier vor. „Das Objekt des kartographischen Zeichens besteht aus dem Weltwissen und den geographischen Daten, die der Karte vorausgehen, während der Interpretant des Kartenzeichens die neue Vorstellung ist, die wir uns durch die Karte von der Welt bilden“ (NÖTH 1998, 30).

Nach PEIRCE lassen sich allgemeine Zeichen zunächst in drei Hauptklassen unterteilen: „Firstly, there are *likenesses*, or icons; which serve to convey ideas of the things they represent simply by imitating them. Secondly, there are *indications*, or indices; which show something about things, on account of their being physically connected with them. Such is a guidepost, which points down the road to be taken, or a relative pronoun, which is placed just after the name of the thing intended to be denoted, or a vocative exclamation, as „Hi! there,“ which acts upon the nerves of the person addressed and forces his attention. Thirdly, there are symbols, or general signs, which have become associated with their meanings by usage. Such are most words, and phrases, and speeches, and books, and libraries“ (PEIRCE 1998, 5).

Zeichen können zu mehr als einer Kategorie gehören. Fotografien zum Beispiel sind das Paradebeispiel für ikonische Zeichen, weil sie in gewissen Aspekten ihren Vorlagen ähneln. „But this resemblance is due to the photographs having been produced under such circumstances that they were physically forced to correspond point to point to nature. In that aspect, then, they belong to the second class of signs, those by physical connection“ (PEIRCE 1998, 6), also Indizes.

Eine Karte ist – ähnlich wie eine Fotografie – ein ikonisches Zeichen. Sie muss aber auch ein indexikalisches Zeichen sein, wenn sie räumliche Informationen liefern soll: „So no place can be described, except relatively to some known place; and the unit of distance used must be defined by reference to some bar or some other object which people can actually use directly or indirectly in measurement. It is true that a map is very useful in designating place; and a map is a sort of picture. But unless a map carries a mark of a known locality, and the scale of miles, and the points of the compass, it no more shows where a place is than the map in *Gulliver's Travels* shows the location of Brobingnag“ (PEIRCE 1998, 8).

Wie Fotografien sind Karten auch bezüglich ihrer Entstehung indexikalisch, weil sie „durch Gesetzmäßigkeiten der optischen Projektion“ (NÖTH 1998, 35) mit dem dargestellten Gebiet zusammenhängen. In Karten finden sich schließlich auch symbolische Elemente, zum Beispiel in den Beschriftungen (NÖTH 1998, 35f).

### 2.4.3 Karten als Modelle

Karten werden auch als spezielle Modelle bezeichnet: „Die Karte ist ein maßgebundenes und strukturiertes Modell räumlicher Bezüge. Sie ist im weiteren Sinne ein digitales, graphikbezogenes Modell, im engeren Sinne ein graphisches (analoges) Modell“ (HAKE 1988). „Dazu gilt für das graphische Modell inhaltlich das, was allgemein alle kartographischen Darstellungen kennzeichnet, nämlich die Verwendung eines Zeichenvorrats mit vereinbarten Bedeutungen“ (HAKE U. GRÜNREICH 1994, 16).

Die letzten beiden Definitionen benutzen den Begriff ‚Modell‘, wobei HAKE U. GRÜNREICH „graphisches Modell“ näher erläutern. Eine umfangreichere Behandlung des Modellbegriffs von der intuitiven bis zur formalen Verwendung findet man in der *Allgemeinen Modelltheorie* von STACHOWIAK (1973). Aus dieser Arbeit sollen kurz „die

drei Hauptmerkmale des allgemeinen Modellbegriffs“ (ebd., 131) zitiert werden, weil sie zur weiteren Erhellung des Kartenbegriffes beitragen:

1. Abbildungsmerkmal: „Modelle sind stets Modelle *von etwas*, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können.“
2. Verkürzungsmerkmal: „Modelle erfassen im allgemeinen *nicht alle* Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant erscheinen.“
3. pragmatisches Merkmal: „Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion a) für *bestimmte* – erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende – *Subjekte*, b) innerhalb *bestimmter Zeitintervalle* und c) unter Einschränkung auf *bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen*“ (STACHOWIAK 1973, 131f).

STACHOWIAK zählt auch Landkarten als Beispielmuster auf, er nennt sie „stark analogisierende graphische Modelle“ (STACHOWIAK 1973, 177). Graphische Modelle sind für ihn dabei „wesentlich zweidimensionale anschaulich-räumliche Originalabbildungen“, wobei sich das „wesentlich“ darauf bezieht, dass physische Modelle immer dreidimensional sind, diese dritte Dimension aber keinen Modellinhalt transportiert (STACHOWIAK 1973, 159). Die dritte Dimension graphischer Modelle entspricht also nicht der dritten Dimension ihrer jeweiligen Originale.

Unter Analogmodellen versteht STACHOWIAK Modelle, bei denen jedes Attribut des Originals (aus einer endlichen Menge von Attributen), soweit es im Modell ebenfalls vorhanden ist, semantisch umkodiert wird. Von dem Original übernimmt ein analoges Modell also nur die Struktur (STACHOWIAK 1973, 152): „Übrig bleiben nach solcher Abstraktion also Zahlen und Zahlenverhältnisse, Zeichenkontexte, Strukturen, eben *formale Gegebenheiten*“ (STACHOWIAK 1973, 141).<sup>1</sup> MÜLLER gibt als Beispiel für Analogie in diesem Sinn: „der elektrische Schwingkreis (Spule und Kondensator) und der mechanische Schwingkreis (Masse und Feder) sind isomorph (strukturähnlich) zueinander, haben aber eine minimale materiale Angleichung; sie sind deshalb analoge Systeme“ (MÜLLER 1998, 51, Fußnote).

## 2.5 Taktile Darstellungen

Karten im herkömmlichen Sinn stellen spezielle Grafiken dar. Der Begriff der Grafik ist vornehmlich mit dem Sehsinn verbunden. Weil dieser Sinn bei Abwesenheit unter anderem wegen seiner Flächenhaftigkeit nicht unmittelbar durch einen anderen ersetzt werden kann, liegt die Verwendung von Grafiken durch Blinde zunächst nicht nahe. Sie ist aber durchaus verbreitet, und in blindenpädagogischen Einrichtungen wird die Benutzung grafischer Hilfsmittel gelehrt, für die Mobilität in Form von taktile Karten.

---

1. Strukturelle Ähnlichkeit zum Original machen gerade ein Modell aus (STACHOWIAK 1973, 145).

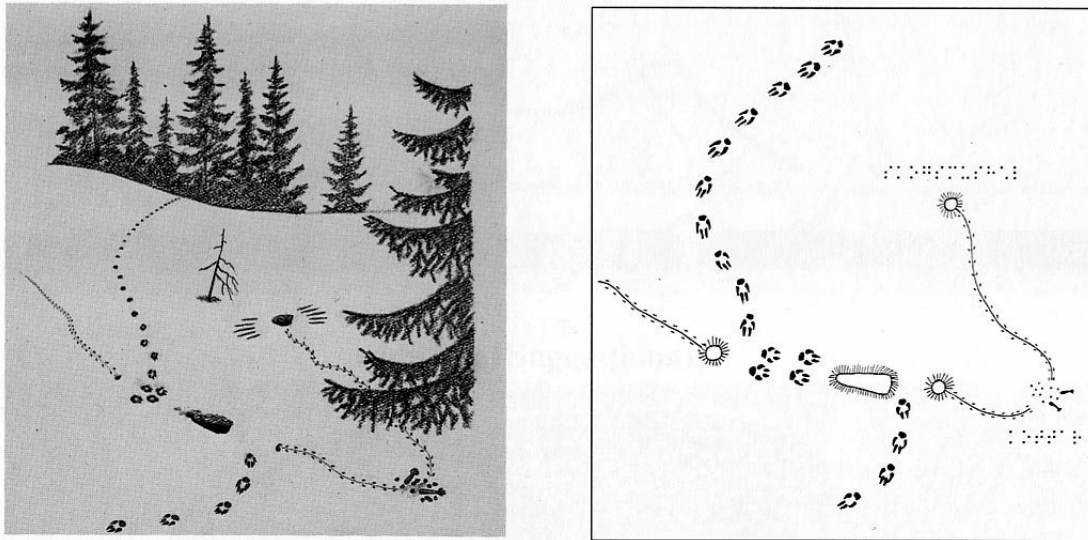


Abbildung 3. Bild aus einem Rätselbuch: Original für Sehende (links) und taktile Entsprechung für Blinde (rechts) (EDMAN 1992, 124)

### 2.5.1 Taktile Grafiken

Taktile (ertastbare) Darstellungen werden von Blinden für ähnlichen Zwecke benutzt wie gedruckte Darstellungen von Sehenden: weil Objekte vermittelt werden sollen, die abwesend, zu groß oder zu klein sind, es um die Vermittlung von abstrakten, physischen oder geographischen Zusammenhängen geht. Ein Unterschied der beiden Modalitäten besteht darin, dass manche Objekte gesehen, aber nicht ertastet werden können, weil dies die Tastenden verletzen oder die Objekte beschädigen würde (EDMAN 1992, 8).

Blinde können mit eigentlich visuellen Konzepten durch Tasten auf ähnliche Weise umgehen wie Sehende, zum Beispiel mit Perspektive, Verdeckung, der Vorstellung nach sogar mit Farben (PITT 1998, 178). Sie können taktile Zeichnungen sowohl verstehen als auch anfertigen, wobei einige ihrer Zeichnungen systematisch anders aussehen als die von Sehenden (KENNEDY 1980). Dies ist aber vermutlich auf mangelnde Übung zurückzuführen, weil blinde Kinder auch Zeichnungen erstellen können, die denen ihrer sehenden Altersgenossen entsprechen (EDMAN 1992, 181ff).

Taktile Skizzen können auf speziellen Zeichenbrettern mit Gummiüberzug erstellt werden, bei denen der Druck mit einem Stift zu einer Erhebung auf einer Plastikfolie führt. Solche Zeichenbretter stellen wichtige grafische Ausdrucks- und Lehrmittel für blinde Kinder dar. Dauerhafte taktile Darstellungen werden oft per Hand mit Papier, Pappe und Stoff in einem aufwendigen Prozess hergestellt. Sie werden seltener vervielfältigt als gedruckte Darstellungen, weil auch das Vervielfältigen aufwendiger ist (es ist aber durchaus möglich, zum Beispiel mittels Tiefziehen).

Es existiert sogar eine auf Fotokopieren bzw. Computerdruck basierende Technik der Vervielfältigung für einfache Darstellung auf Schwellpapier. Dabei wird spezielles Papier benutzt, das Harz enthält, wobei das Harz bei Erhitzung an den Stellen aufschwillt, die vorher geschwärzt wurden. Zur Erstellung einer taktilen Darstellung wird eine Vorlage zunächst mit einem Fotokopierer oder Computerdrucker auf dieses Papier übertragen. Danach wird das Papier in einem speziellen Gerät erhitzt.

Wie bei anderen Medien auch, müssen Inhalt und Form taktiler Grafiken bei der Herstellung nach verschiedenen Gesichtspunkten abgewogen werden: die inhaltlichen



Abbildung 4. Geschnitzte Holzkarten der Inuit (PAPANÉK 1995)

Hauptaspekte, die Zielgruppe (beispielsweise unterschieden nach der Fähigkeit, Braille zu lesen), ob die Grafiken gemeinsam benutzt werden (von mehreren Blinden oder von Blinden und Sehenden), ob sie zusammen mit anderen Grafiken oder taktilem Objekten benutzt werden und schließlich, wo sie benutzt werden (in der Schule, zu Hause, unterwegs, etc.) (EDMAN 1992, 8f).

Weil der Tastsinn eine geringere Auflösung hat als der Sehsinn, müssen gedruckte Vorlagen bei der Übertragung auf taktile Medien angepasst, vor allem vereinfacht werden (s. Abbildung 3). Dabei kann ein Computer helfen, wenn die Vereinfachung automatisierbar ist, wie es teilweise für Landkarten der Fall ist (s. MICHEL 2000). Allgemeiner können CAD-Programme zum Modellieren taktilem Darstellungen und die entstandenen Modelle auch zum Ansteuern von Maschinen benutzt werden, die Vorlagen für die Vervielfältigung taktilem Darstellungen liefern.

Generell besitzen taktile Darstellungen den Nachteil, dass sie weniger Interaktion erlauben als gedruckte Darstellungen. So können zum Beispiel visuelle Darstellungen durch das Heranziehen an die Augen oder durch Benutzung einer Lupe in Ausschnitten vergrößert betrachtet werden, taktile Darstellungen jedoch nicht. Weiterhin werden taktile Darstellung je nach Herstellungsart durch häufige Benutzung abgeflacht und daher immer schlechter erkennbar (RAMLOLL U.A. 2000, 19).

### 2.5.2 Taktile Karten

Taktile Karten können als Sonderform taktilem Grafiken betrachtet werden. Die Inuit haben bereits vor 300 Jahren aus Treibholz geschnitzte Karten hergestellt, die als primitive taktile Karten betrachtet werden können (s. Abbildung 4). Auf ihnen sind Küstenlinien abstrahiert dargestellt. Die Karten wurden für die Navigation auf See benutzt, wobei sie aufgrund ihres Materials schwimmen, wenn sie aus dem Boot fallen und als taktile Medien auch nachts eingesetzt werden können (PAPANÉK 1995, 229f).

Taktile Karten spielen eine große Rolle bei der Darstellung räumlicher Strukturen für Blinde. HOLMES U.A. nennen als Vorteile von taktilem Karten gegenüber anderen ge-



ographischen Informationsmedien für Blinde, dass sie portabel sind und daher auf Reisen mitgenommen werden können (HOLMES U.A. 1995, 87). Als Nachteile nennen sie Mangel an kurzfristiger Verfügbarkeit und einheitlicher Gestaltung, die Notwendigkeit von Braillekenntnissen zum Lesen der Beschriftungen und schwere Verständlichkeit für viele Angehörige der Zielgruppe (ebd., 82). Immerhin gibt es Bausätze wie das Euro-Town-Kit der Deutschen Blindenanstalt in Marburg, die durch ihre Verbreitung eine gewisse Einheitlichkeit erreichen (EDMAN 1992, 36).

EDMAN nennt folgende Gründe für den Mangel an taktilen Karten bezüglich ihrer Herstellung: Zeit und Kosten, mangelndes Wissen über Techniken und Fehlen von Material und Maschinen für die Ausführung. Sie vermutet aber auch mangelndes Wissen bei Herstellern und Kunden über das Vorhandensein von Karten eines bestimmten Gebietes (EDMAN 1992, 193).

Wie schon erwähnt wurde, kann durch den Tastsinn nur schwer ein Überblick einer Karte gewonnen werden. EDMAN schlägt Sehenden das folgende Experiment zum Verständnis des Kartenlesens durch Blinde vor: Sehende sollen die Faust ballen, so dass sie gerade noch durch die Röhre sehen können, die durch die gebeugten Finger gebildet wird. Wenn sie dann diese Röhre dicht über einer gedruckten Karte bewegen, entspricht die gleichzeitig sichtbare Darstellung etwa der, die Blinde durch Tasten wahrnehmen können (EDMAN 1992, 194). Ein Überblick kann durch eine verbale Kartenbeschreibung zusätzlich zur Karte selbst vermittelt werden. Diese Beschreibung sollte sowohl Hinweise zu dem abgebildeten Gebiet als auch zum Lesen der Karte selbst enthalten. Angaben über die grobe Form des Abgebildeten können dabei das Lesen einer Karte erheblich erleichtern (JANSSON 2000B).

Neben taktilen Karten für den Geographieunterricht werden Orientierungskarten, Mobilitätskarten und topologische Karten unterschieden. Orientierungskarten bieten ihren Benutzern eine allgemeine Übersicht eines bestimmten Gebietes. Mobilitätskarten sind auf die Bedürfnisse von Reisenden zugeschnitten und enthalten daher Orientierungspunkte in einem Gebiet. Topologische Karten schließlich enthalten eine bestimmte Strecke, die für Sehbehinderte aufbereitet ist. Auf andere Details wird verzichtet, die Darstellung ist vereinfacht und verzerrt (EDMAN 1992, 194f). Es gibt auch Karten, die sowohl als geographische als auch als Mobilitätskarten angesehen werden können, zum Beispiel Stadtpläne (JANSSON 2000B). Taktile Karten erscheinen Lesern unterschiedlich, je nachdem, aus welcher Richtung sie gelesen werden. Daher müssen sie zunächst ausgerichtet werden. Danach werden sie einmal vollständig abgetastet, um ihre Größe, die Art, Anzahl und Lage ihrer Symbole und die Form großer Gebiete zu erfassen (EDMAN 1992, 196).

Einerseits sind Hände weniger gut in der Lage, kleine Objekte zu unterscheiden, so dass taktile Darstellungen großflächig sein sollten. Andererseits können die Hände von kleineren Darstellungen mehr Inhalt auf einmal erfüllen (EDMAN 1992, 104). Bei taktilen Karten ist zusätzlich zu beachten, ob sie transportiert und auf dem Weg gelesen werden sollen oder nicht. Taktile Darstellungen können daher so breit wie eine oder zwei Handspannen (ebd., 104f) oder gar im A3-Format gestaltet werden. Taktile Darstellungen werden von beiden Händen erfüllt, wobei eine Hand als Referenz dienen kann, während sich die andere bewegt. Für eine Übersicht tasten beide Hände gleichzeitig (EDMAN 1992, 106). Eine Hand kann auch an einem Ort bleiben und als Referenz dienen, während die andere Hand Details erfüllt.

Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass taktile Karten im Vergleich zu verbalen Beschreibungen und selbst dem geführten Begehen eines Gebietes die besseren Medien geographischer Informationen für Blinde darstellen (BRAMBRING U. WEBER 1981, ESPINOSA U.A. 1998), obwohl Blinden der Sehsinn als Übersichtssinn

nicht zur Verfügung steht. In einem Artikel zum Stand der Forschung zu taktilen Karten schreibt JANSSON, dass taktile Karten oft schwer zu lesen sind und die Informationen, die durch das Lesen gewonnen werden, oft fehlerhaft sind. Er sieht die Lösung für diese Probleme in der Erstellung besserer taktiler Karten und das Training ihrer Benutzer, damit sie die Karten besser lesen können (JANSSON 2000B). Die meisten taktilen Karten sind Pläne, benutzen die dritte Dimension nur zur Unterscheidung zwischen Objekten. Es gibt jedoch auch taktile Abbildungen als Miniaturisierungen einer Gegend, einschließlich Höheninformation (ebd.).

## 2.6 Kartenbenutzung

Karten werden häufig zur Begehung eines Gebietes benutzt. Es wird nun kurz das Zusammenspiel von Kartenbenutzung und Begehung von Sehenden und Blinden beschrieben.

### 2.6.1 Kartenbenutzung durch Sehende

Obwohl es sich um grafische Darstellungen handelt, wird im Zusammenhang mit Karten oft von ‚Lesen‘ gesprochen. WILHELMY weist darauf hin, dass im engeren Sinn nur eine solche Karte gelesen werden kann, die ausschließlich bekannte symbolische Darstellungen aufweist, weil Lesen ja gerade durch die Aufnahme symbolisierter Information in Form der Schrift gekennzeichnet ist. Einfache Kartensymbole sind dabei „konventionelle Signaturen und übliches Namengut“. Wenn jedoch Kartenaspekte vom Betrachter gedanklich kombiniert werden müssen, kann man von der „Kunst des Kartenlesens“ sprechen, welche unter anderem auf dem räumlichen Vorstellungsvermögen basiert (WILHELMY 1990, 184).

GALPERIN beschreibt die Orientierung von Wanderern in einem Gebiet ohne Weg (zum Beispiel einer Wüste) als Zusammenspiel zwischen Geländeschau und Konsultation und Erweiterung einer Karte: „Nach einer gewissen Zeit verlieren die Wanderer die Sicherheit über die Beibehaltung der eingeschlagenen Richtung. Sie müssen nun prüfen, wo sie sich befinden und ob dieser Ort einem der markierten Punkte der Marschroute entspricht. Um eine solche Orientierung zu gewinnen, wird einer der Wanderer zur Erkundung der Örtlichkeit ausgesickt. Er muss einen beliebigen hochgelegenen Punkt ersteigen (einen Hügel, einen Baum, einen Felsen), um einen möglichst großen Überblick über die Gegend zu erhalten und ins Auge fallende Orientierungspunkte festzustellen, darunter besonders solche, die laut Karte zu erwarten sind. Nach seiner Rückkehr zur Gruppe und nach erfolgter Information über die ermittelten Orientierungspunkte werden seine Feststellungen mit den Angaben auf der Karte verglichen. Die Wanderer bestimmen nun ihren Standort, ‚norden die Karte ein‘ und kennzeichnen den weiteren Weg. Bevor sie jedoch weitergehen, vermerken sie anhand der Karte die möglichen Orientierungspunkte dieses Weges, um sich beim Weitermarsch nach ihnen zu richten und mit ihrer Hilfe die Beibehaltung der eingeschlagenen Richtung zu kontrollieren“ (GALPERIN 1980, 86).

KEATES betont, dass die Karte als Draufsicht die perspektivische Sicht eines Fußgängers auf ein Gelände hervorragend ergänzt: „Transformation from the orthogonal projection of the map to the central perspective view of the terrain is also comparatively simple when both the map and the terrain are viewed together, for the limiting effect of a low angle of view on the ground is counterbalanced by the more extensive representation of the map. Obviously one of the advantages of the map is that it over-

comes the limitations of viewing the landscape from a single point, from which many lines of sight may be obscured“ (KEATES 1996, 57).

Der Perspektivenunterschied stellt jedoch ein Problem dar, wenn eine Karte alleine zur Vorbereitung benutzt wird: „In this case the interpretation of the terrain has to be derived directly from the map, and ‚memorized‘ if it is to be used to ‚recognize‘ locations or features when they are actually encountered. It is in this process that a purely visual transformation is unlikely, that is, an attempt to construct an ‚image‘ directly from the map. What is more likely is the deduction of a limited number of conclusions about key points, the relative position of landmarks, and so on, which will provide a framework of clues“ (ebd.).

Karten bieten gerade keinen Blick auf ein Gelände von einem Punkt innerhalb des Geländes aus, von dem aus andere Punkte des Geländes nicht sichtbar sind, sondern von ‚oberhalb‘ des Geländes. Wenn man sich also beim Begehen eines Geländes anhand einer Karte orientieren möchte, muss man die Sicht aus einer Karte mit der von innerhalb des Geländes zunächst in Übereinkunft bringen.

Karten können allerdings neben einer Ansicht von oben gleichzeitig eine seitliche darstellen: „It is evident that the map user is quite content with such a use of two viewpoints, accepting the orthogonally viewed plan as the basis of the map, but allowing individual objects to be viewed in profile, or even in linear perspective. Because the plan representation of buildings is so often uninformative, for a long period many maps continued to represent buildings, individually or collectively, either frontally or in oblique perspective. [...] The same device is used in many modern maps of cities, where the buildings are shown in elevation. In order to be able to present, at least in part, the sides of the buildings, an oblique parallel perspective is used, as this maintains a constant scale, and parallels remain parallel“ (KEATES 1996, 95f).

### 2.6.2 Kartenbenutzung durch Blinde

Blinde erkennen Straßen beim Ertasten taktiler Karten nicht dadurch, dass sich ein Finger zufällig quer zu einer Straße bewegt und die unterschiedlichen Eindrücke im Kopf zusammengeführt werden, sondern indem Straßenabschnitte längs mit dem Finger verfolgt werden, was „tracing“ (s. BENTZEN 1980, S. 312) genannt wird. Tracing ist bei den meisten Systemen zur Kartenerkundung ohne taktile Karte gerade nicht möglich.

Experimente haben gezeigt, dass Blinde zwar teilweise gute Abbildungen einer Umgebung erstellen können, diese Abbildungen jedoch generell eher schlecht organisiert und integriert sind, verglichen mit denen von Sehenden mit verbundenen Augen oder von Versuchspersonen mit geringer Sehfähigkeit erstellten (GOLLEDGE U.A. 1996, 219). Die Qualität der erstellten Abbildungen hängt stark von der Mobilität der Versuchspersonen ab (ebd.). Die schwächere räumliche Leistung von Blinden erklärt sich aus höheren Anforderungen an Kognition und Erinnerung durch ihre Art der Aufnahme (ebd., 217).

HARDER hat die „Aneignung von Wegen“ durch geburtsblinde Menschen untersucht, so der Titel seiner Arbeit (HARDER 1993). Unter der Aneignung eines Weges versteht er dabei den Erwerb der Fähigkeit zum selbstständigen Begehen des Weges bei unsystematischen Änderungen (Hindernisse, Mitpassanten, etc.) (HARDER 1993, 5 u. 29f): Die „Aneignung des Weges“ besteht darin, den Grad der Systematik von Veränderungen der Merkmale auf dem Wege zu ermitteln und ihn bei erneuter Begehung zur Verbesserung der Leistungen beim Gehen zu benutzen“ (HARDER 1993, 30).

Ein Ergebnis von HARDERS Arbeit lautet, dass für die Aneignung eines Weges sowohl Übersichts- als auch Detailpläne eingesetzt werden sollen (ebd., 102). Es scheint also auch für das hier beschriebene Vorhaben sinnvoll, Karten in verschiedenen Auflösungen explorieren zu lassen. HARDER gibt weiterhin folgende Empfehlungen für das Mobilitätstraining von Blinden: Ein taktiler Plan sollte solange ertastet werden, bis er beherrscht wird, unterstützt durch verbale Beschreibungen. (Wobei er nicht angibt, wie der Grad der Beherrschung überprüft werden kann.) Danach soll der Weg ein- oder zweimal mit einer Mobilitätstrainerin oder einem -trainer gegangen werden, unter Einbau von Hindernissen. Blinde sollen für einen Weg erlernen, woran sie erkennen können, dass sie sich noch auf ihm befinden (ebd., 114).

## 2.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst stark Sehbehinderte und Blinde als Zielgruppe der vorliegenden Arbeit beschrieben. Es wird dabei deutlich, dass dieser Personenkreis keine homogene Benutzergruppe darstellt. Der in späteren Kapiteln entwickelte Ansatz beschränkt sich daher auf die Teilgruppe der Blinden mit intaktem Tastsinn und Gehör, die ein gewisses Interesse für Technik besitzen.

Die physikalischen und psychophysischen Grundlagen nichtvisueller Wahrnehmung in Form der akustischen und haptischen Wahrnehmung wurden untersucht. Der Sehsinn diente dabei als Referenz. Es wurde dargelegt, dass Seh-, Tast- und Hörsinn sich in ihren Wahrnehmungsleistungen unterscheiden, aber auch einige Gemeinsamkeiten aufweisen. So sind Seh- und Hörsinn in der Lage, Signale aus einiger Entfernung aufzunehmen. Der Tastsinn ermöglicht es hingegen, die Aufmerksamkeit auf Teile einer Darstellung zu richten, ähnlich wie der Sehsinn. Bei der Entwicklung eines nichtvisuellen Mediums ist vor allem zu beachten, dass Darstellungen für den Hör- oder Tastsinn im Vergleich zu denen für den Sehsinn vereinfacht werden müssen.

Im Vordergrund der konstruktiven Exploration steht das räumliche Erfassen eines geographischen Gebietes. Wissen über ein solches Gebiet können Menschen entweder in Streckenform oder im Überblick lernen. Die Streckenperspektive entspricht der eines Fußgängers beim Begehen eines Weges. Das entsprechende Streckenwissen basiert also auf Wegstücken und ihren Verbindungen. Aus vielen verschiedener Streckenperspektiven eines einzelnen Gebietes und dem Blick von Anhöhen oder in Karten kann eine Überblicksperspektive entstehen. Dies gelingt jedoch Sehenden nicht immer.

Die verschiedenen Vorstellungen eines Gebietes und die Möglichkeiten zu ihrer Bildung wurden in eine Reihenfolge von Begehung eines Gebietes zu Konsultation einer Karte gebracht. Mit Hilfe dieser Abfolge werden später bereits existierende und in dieser Arbeit neuentwickelte räumliche Medien verglichen.

Die Routennavigation als Auswählen und Begehen eines Weges wurde beschrieben. Sie stellt die basale Form der planmäßigen Mobilität eines Fußgängers dar. Die in dieser Arbeit entwickelten Konzepte zielen daher vornehmlich auf die Vermittlung von Strecken ab. Es wurde dargelegt, dass Blinde andere Informationen für die Navigation benötigen als Sehende, vor allem mehr Details, sie diese andererseits aber schwerer selbst beschaffen können. Daraus ergeben sich zusätzliche Anforderungen an neue räumliche Medien.

Karten als Hauptmedien räumlicher Informationen wurden analysiert. Dabei wurde auf Ansätze aus der Kartographie, der Kartosemiotik und der Modelltheorie

zurückgegriffen. Es wird deutlich, dass Karten auch starke Schematisierungen aufweisen. Für ein räumliches Medium ist es daher durchaus zulässig, in einem gewissen Rahmen auf die exakte Darstellung der zugrundeliegenden Daten zu verzichten. Als die vier wichtigsten Aspekte bezüglich der Erstellung einer Karte haben sich Zweck, Perspektive, Maßstab und Symbolisierung erwiesen.

Nachdem ein kurzer Überblick über taktile Grafiken gegeben wurde, wurden zunächst taktile Karten besprochen. Es wurde deutlich, dass einerseits Blinde mit grafischen Konzepten erstaunlich gut umgehen können, andererseits taktile Darstellungen sich von visuellen Darstellungen in einigen wesentlichen Punkten unterscheiden und daher nur bedingt automatisch erzeugt werden können. Es wurde herausgestellt, dass taktile Karten gute Medien räumlicher Information darstellen, dass ihre Herstellung jedoch aufwendig ist. Es wurden die Besonderheiten bei der Benutzung taktiler Karten durch Blinde beschrieben. Schließlich wurde die Kartenbenutzung von Blinden und Sehenden beschrieben. Es wird deutlich, dass sich beim Begehen die Fußgängersicht und die Draufsicht eines Geländes ergänzen.



Obwohl es für Blinde Hilfsmittel zum räumlichen Lernen wie taktile Darstellungen gibt, sind diese nicht flexibel genug, damit Individuen durch sie kurzfristig spezielle Informationen erlangen können, die für das Alltagsleben notwendig sind. Dadurch sind Blinde bezüglich Tätigkeiten eingeschränkt, die für Sehende selbstverständlich sind. Der blinde Entwickler eines Orientierungs- und Navigationssystems für Blinde drückt das so aus: „In our visually dominated world, those less fortunate have an incredible time just walking to the corner store to pick up some milk. The visually impaired don't need our pity, but do need help to give them the ability to walk independently in our cities without the fear of getting lost“ (LAPIERRE 1998).

In diesem Kapitel wird ein neuartiges digitales Medium zur taktilen Darstellung räumlicher Strukturen vorgestellt: virtuelle taktile Karten. Zunächst wird der Begriff der virtuellen taktilen Karten definiert. Dann wird beschrieben, wie der Computer die Rolle eines geeigneten Informationsmediums einnehmen kann und der Haupteinsatzzweck von virtuellen taktilen Karten umrissen: das Erlernen eines Stadtgebietes durch Blinde. Danach werden virtuelle taktile Karten von GIS-Systemen, Modellen und Spielen abgegrenzt.

Es folgt eine Untersuchung zu computerbasierten interaktiven Systemen zum räumlichen Lernen. Begonnen wird mit einer Beschreibung eines Virtual-Reality-Systems zum Erkunden einer Stadt. Es werden computerbasierte Orientierungshilfen für Blinde vorgestellt und mit klassischen Medien wie taktilen Karten und den in dieser Arbeit entwickelten virtuellen taktilen Karten verglichen.

Anschließend werden die Informationen untersucht, die Blinde für die selbstständige Navigation benötigen und wie sie diese aus virtuellen taktilen Karten erlangen können. Zum Abschluss werden praktische Aspekte virtueller taktiler Karten beschrieben.

### 3.1 Definitionen

Karten stellen das Leitmedium flächiger räumlicher Information dar. Ertastbare Karten für Blinde werden taktile Karten genannt. Im folgenden wird ein neuartiges computerbasiertes interaktives Medium zur ertastbaren Darstellung räumlicher Daten eingeführt: virtuelle taktile Karten.

**Definition 3.1:** Verebnete räumliche Daten sind räumliche Daten, die für die Darstellung auf die Fläche reduziert wurden. Die dritte Dimension dient dabei der unterscheidbaren Darstellung von Informationen unterschiedlicher Ebenen oder Wichtigkeit.

**Definition 3.2:** Eine virtuelle taktile Karte (VTK) ist ein interaktives computerbasiertes dreidimensionales Medium zur haptischen Darstellung verebneteter räumlicher Daten.

Das Abbilden der räumlichen Daten auf die Fläche und der anschließende Rückgriff auf den Raum zur Darstellung findet sich auch bei taktilen Karten. Eine virtuelle taktile Karte dient einem ähnlichen Zweck wie eine taktile Karte oder ein taktiler Grundrissplan. Blinde können mit einer virtuellen taktilen Karte Informationen über ein Gebiet oder ein Gebäude erlernen, indem sie die VTK mit den Händen erkunden.

Eine Exploration kann geführt auf einem bestimmten Weg bzw. zwischen bestimmten Objekten oder frei erfolgen. Eine geführte Exploration ist zielgerichteter, neben dem Weg selbst lernt man wichtige Objekte kennen, die er verbindet. Bei der freien Exploration lernt man unter Umständen einen größeren Teil des Raumes kennen. Beiden Arten ist gemein, dass man beim Explorieren vom Computer ein Feedback erhält.

### 3.2 Virtuelle taktile Karten als Medien

Virtuelle taktile Karten sind Medien, weil auch gedruckte und taktile Karten Medien sind und sie ähnlich wie die beiden erstgenannten dazu dienen, räumliche Daten zu vermitteln. (Wenn in der Literatur die Darstellung von Grafiken für Blinde untersucht wird, wird häufig von nicht-visuellen, akustischen und haptischen Medien gesprochen, s. z.B. RAMLOLL U.A. 2000. Damit sind sowohl klassische als auch computerbasierte Ansätze gemeint.)

Es wurde festgestellt, dass sich Karten semiotisch als Ikonen bestimmen lassen (s. Abschnitt 2.4.2), dass sie also immer Ähnlichkeit zu dem abgebildeten Gelände aufweisen. Virtuelle taktile Karten sind weniger ikonisch als gedruckte Karten. Sie sind es jedoch immer noch, wenn man beachtet, dass virtuelle taktile Karten das Erkunden der gesamten abgebildeten Daten erlauben. Virtuelle taktile Karten sind weiterhin indexikalisch aus denselben Gründen wie gedruckte Karten, weil diese Karten also nur nützlich sind, wenn sie sich auf ein vorhandenes Gebiet beziehen, dessen Lage dem Benutzer bekannt ist.

#### 3.2.1 Computer als Medium

Virtuelle taktile Karten werden durch interaktive Computersysteme umgesetzt. Computer selbst sind Medien, „intermediate technological agencies that permit communication and as such are used for transmission of information, conversations, requests, entertainment, education, expression of emotical experiences, and so on“<sup>1</sup> (ANDERSEN



U.A. 1993, 1). Diese Sicht auf Computer ist relativ neu. Sie ergänzt ihre Betrachtung als Werkzeug und die ursprüngliche als Automat (COY 1995, s.a. OREN 1990 und SCHELHOWE 1997).

Computersysteme wurden ursprünglich mit der Metapher des Automaten beschrieben: Die in der Anfangszeit der Computerentwicklung vorherrschenden Stapelsysteme werden mit Daten bestückt und verarbeiten diese ohne menschliche Einwirkung zu neuen Daten (NAKE 1994). Die später aufkommenden persönlichen und interaktiven Computersysteme wurden als Werkzeuge beschrieben: Sie dienen ebenfalls der Verarbeitung von Daten, aber in Einzelschritten, die vom Benutzer gesteuert werden. (Mit der Werkzeugsicht ist auch die Beschreibung der Veränderungen verbunden, welche die Einführung von Computern in der Arbeitswelt bewirkt hat.) Die Werkzeugsicht wurde zur Betrachtung des Computers als Werkbank oder Werkstatt erweitert, weil sich mit ihm nacheinander oder gleichzeitig dieselben oder unterschiedliche Daten verändern lassen (ebd.).

Die Metapher der Werkbank wies den Weg zur Metapher des Mediums, weil es sich bei den vielen verarbeitbaren Daten zunehmend um multimediale Dokumente handelt. Klassische Medieninhalte wie Texte, Bilder, Klänge und Filme können mit Computerhilfe erzeugt und betrachtet werden. Mit der Einführung grafischer Benutzungsoberflächen, der Möglichkeit der Darstellung simulierter Wirklichkeit als sogenannte fotorealistische Computergrafik und Virtual Reality und der Verbreitung von Computernetzwerken, inklusive der vermehrten Computernutzung außerhalb von Arbeitskontexten, setzt sich die Medienmetapher immer mehr durch (ebd.). (NAKE betont, dass Werkzeug- und Medienperspektive sich ergänzen, je nach dem, ob medialer Inhalt erstellt oder konsumiert wird und bevorzugt daher den Begriff des „instrumentellen Mediums“, s. NAKE 1994.) VTK-Systeme lassen sich in dieser Dreiteilung am ehesten als Medien klassifizieren: Sie können räumliche Daten speichern und darstellen und in gewisser Weise Karten simulieren.

V. OVERVELD bezieht sich implizit auf die Medienperspektive, wenn er Computer als Kommunikationsmittel beschreibt: „the semantics of a message, communicated by computers, is not very different from a similar message communicated without computer assistance“. Er zeigt sich daher erstaunt über das mangelnde Interesse der Informatik an der Semantik von (bildhaften) Botschaften, wie sie die Semiotik untersucht (V. OVERVELD 1998).

### 3.2.2 Verwandte Medien

Virtuelle taktile Karten basieren auf digital gespeicherten Kartendaten. Spezielle Datenbanken für solche Daten heißen Geographische Informationssysteme (GIS, s. LAURINI U. THOMPSON 1992). Damit wird eine Klasse von Werkzeugen bezeichnet, mit denen geographische Daten aufgenommen, gespeichert, verwaltet, geändert, analysiert, modelliert und dargestellt werden können (MEDYCKYJ-SCOTT U. HEARNshaw 1993, xvii).

Computer werden schon seit Anfang der siebziger Jahre eingesetzt, um taktile Karten zu erzeugen; einen Durchbruch gab es jedoch erst mit dem Aufkommen der Geographischen Informationssysteme (JANSSON 2000B). Daten aus GIS werden entweder

---

1. Die Vorstellung von der Übertragung von *Informationen* durch Medien ist zwar alt, aber nicht haltbar (SCHELHOWE 1997, 69ff). Die entsprechenden technischen Geräte können tatsächlich nur Signale transportieren, die als Zeichen für die beteiligten Menschen Bedeutung haben, wie ANDERSON selbst schreibt (ANDERSEN U.A. 1993, 1).

als Vorlage für die manuelle Erstellung taktiler Karten benutzt, oder diese Karten werden direkt durch ein entsprechendes Ausgabegerät mit Hilfe des Computers erzeugt. Weil blinde Fußgänger, wie schon erwähnt, einen erhöhten Informationsbedarf im Vergleich zu sehenden Fußgängern haben, müssen für die Erstellung von taktilen Karten Zeichen zu visuellen Vorlagen hinzugefügt werden. Die entsprechenden Daten werden oft mühsam durch Begehungen ermittelt (ebd.).

Virtuelle taktile Karten benutzen Daten eines bestimmten Gebietes mit einer begrenzten Anzahl von Attributen, im Unterschied zu Daten in Geographischen Informationssystemen, die generell sowohl detaillierter als auch umfangreicher sind. Im Medium VTK werden diese Daten den Fähigkeiten und Bedürfnissen der Benutzer entsprechend aufbereitet und dargestellt. Als computerbasierte Medien erlauben VTK-Systeme die Interaktion mit Daten.

Dreidimensionale Modelle stellen räumliche Medien dar, die ebenfalls virtuellen taktilen Karten ähnlich sind. Diese Modelle werden häufig zur Darstellung von räumlichen Zusammenhängen gewählt, bei denen die dritte Dimension eine größere Rolle spielt als bei Gebietsausschnitten einer Stadt. Dies ist zum Beispiel bei der Darstellung von Häusern der Fall. Zur Darstellung von Erdausschnitten sind dreidimensionale Darstellungen nur sinnvoll, wenn Höhen explizit dargestellt werden sollen, zum Beispiel bei Gebirgen. Dreidimensionale Modelle sind aufwendiger herzustellen, zu transportieren und zu lagern als Karten.

Modelle haben zur Darstellung geschlossener Gebilde wie zum Beispiel Häusern den Nachteil, dass sie zwar eine Rundumsicht erlauben, aber nur wenig Einblick in die innere Aufteilung. Daher werden in der Architektur Modelle zum Aufklappen oder mit Einschnitten gefertigt. Für die genaue Betrachtung der Innenräume, sowohl zum Planen als auch zum Bauen selbst im Fall von Häusern, werden Grund- und Aufrisse vorgezogen.

Blinden bieten dreidimensionale Modelle ähnliche Vorteile wie Sehenden, dass nämlich räumliche Daten integriert dargestellt werden, ohne eine ganze Dimension einfach wegzulassen, wie Karten es tun. Modelle bieten Blinden die einzige Möglichkeit, nicht unmittelbar zugängliche (zum Beispiel zu große, gefährliche, entfernte oder in der Realität nicht vorhandene) Objekte zu erkunden. Modelle weisen aber auch für Blinde spezielle Nachteile auf: Weil der Tastsinn keinen Gesamteindruck vermittelt, können komplexere Modelle auch verwirren. Sie müssen daher entweder vereinfacht oder durch weitere Darstellungen, zum Beispiel taktile Pläne, ergänzt werden. Ein System zur Erkundung von Gebäudemodellen als Grund- und Aufrisse für Blinde wird in Abschnitt 5.6.2 vorgestellt.

Virtuelle taktile Karten sind Spielen ähnlich. Es ist ausgesprochen erwünscht, dass die Benutzung eines VTK-Systems Spaß macht. Dennoch stellt ein solches System kein Spiel im engeren Sinn dar (genauso wenig wie ein Arbeits- oder ein Unterhaltungsmittel), sondern ein Informationsmedium. Bei der Benutzung von virtuellen taktilen Karten gibt es nämlich notwendigerweise weniger Freiheitsgrade als bei echten Spielen.

Dies liegt einerseits daran, dass die benutzten digitalen Kartendaten durch Vermessung der ‚wirklichen Welt‘ erzeugt wurden und sie in virtuellen taktilen Karten zur Orientierung in der Welt dienen. Andererseits liegt es auch an den eingesetzten Interaktionstechniken: Virtuelle taktile Karten stellen räumliche Daten auf eine bestimmte Art und Weise dar, die aus der Erlangung und Verwendung räumlicher Information durch Menschen abgeleitet ist, wie sie unter anderem in der Psychologie erforscht wird.

### 3.3 Verwandte Arbeiten

Neben den schon genannten Vorbildern und Inspirationen aus Bereichen wie der Kognitionspsychologie oder dem Mobilitätstraining existieren einige computerbasierte Systeme, sowohl als Forschungsprototypen als auch als Produkte, auf die bei der Entwicklung virtueller Karten zurückgegriffen werden konnte. Nach einem Vergleich von flächigen und Virtual-Reality-Darstellungen werden Orientierungshilfen vorgestellt.

#### 3.3.1 Karten und Virtual Reality-Umgebungen

Die Architecture Machine Group am MIT hat Ende der siebziger und Anfang der achtziger Jahre eine geographische Darstellung in der Form eines interaktiven Films entwickelt, die „Movie-Map“ genannt wurde (LIPPMANN 1980). Ein Benutzer des Movie-Map-Systems kann durch eine Darstellung des Ortes Aspen „hindurchfahren“, indem er mit Hilfe eines Steuergerätes entweder mit Analogtechnik aufgenommene Filmsequenzen oder computergenerierte Darstellungen abrufen (ebd.).

Neben Ansichten aus dem Blickwinkel eines Fahrers erlauben computergenerierte Bilder eine Übersicht von (schräg) oben aus einer Hubschrauberperspektive. Sie zeigen außerdem Orte, an denen nicht fotografiert werden konnte. Schließlich zeigen einige Computergrafiken schematisierte Überblicksdarstellungen (ebd.). Die computergenerierten Bilder sind also in ihrer Funktion klassischen Karten ähnlicher als die Durchfahrtsansichten.

Auch ihre Entwickler sehen die Filmkarte nicht nur als Unterhaltungsmedium, sondern als Karte: „At its simplest level, it may be regarded as a dynamic replacement for a geographic paper map: it can familiarize the user, or map reader, with a spatial environment“. Ihnen ist auch bewusst, dass der Unterschied neben dem Medium als solchem vor allem in der Blickrichtung liegt: „This familiarization, however, is accomplished by quite different means: the ‚map reader‘ explores space by participating in a simulated drive through it, seeing filmed sequences that replicate the actual views he would have were he in the space, driving“ (ebd.).

Der Benutzer kann selbst entscheiden, welchen Pfad er einschlägt und kann dadurch frei explorieren. Zusätzlich zur visuellen Darstellung erhält der Benutzer Ausgaben mit synthetischer Sprache. Dabei handelt es sich um den Namen der aktuellen Straße, Kompassrichtungen, Bestätigungen für Abbiegungen und Kommandos, Angaben zu Landmarken und Entfernungen zu bekannten Punkten. Die Filmkarte hat sich als guter Ersatz für eine topographische Karte erwiesen: Benutzer des Systems haben die Informationen, die sie bei der Benutzung erhalten haben, beim späteren Begehen als hilfreich und akkurat empfunden (ebd.).

Die Aspen Movie-Map stellt einen Vorläufer von Virtual-Reality-Systemen dar. Bei solchen Systemen wird die gesamte Ansicht eines dreidimensionalen Raumes durch einen Computer erzeugt (s. EARNSHAW U.A. 1993 für eine Einführung). Durch Computersysteme aus dem Bereich der Virtuellen Realität können Gebietsdarstellungen auf andere Art als durch Karten erkundet werden: In dem sich der Benutzer in ein dreidimensionales Modell des Gebietes begibt und es, simuliert, auf Augenhöhe erkundet. Der Benutzer sieht dann also jeweils nur einen kleinen Ausschnitt des Modells in seinem Gesichtskreis, weiter davon entfernt liegende Objekte erscheinen, perspektivisch verkürzt, entsprechend kleiner. Das Erkunden eines Gebietes mit Mitteln der Virtuellen Realität hat gegenüber dem mit Karten den Vorteil, dass sich eine zur eigentlichen Begehung analoge Darstellung ergibt. Karten haben hingegen den Vorteil, dass Ver-

läufe von und Verbindungen zwischen Straßen und die Position anderer Objekte leichter wahrgenommen werden können, weil Karten eine überblicksartige Darstellung bieten.

### 3.3.2 Orientierungshilfen

„MoBIC“ (Mobility of Blind and Elderly People Interacting with Computers) ist der Name eines inzwischen abgeschlossenen Projektes, in dessen Rahmen eine elektronische Reisehilfe („MoTA“, für „MoBIC Travel Aid“) für blinde und ältere Reisende entwickelt wurde (STROTHOTTE U.A. 1996, 139). Die Reisehilfe ergänzt bestehende Mobilitätshilfen wie den schon genannten weißen Stock. Sie besteht aus dem Reisevorbereitungssystem MoPS („MoBIC Pre-Journey System“) und der Reisehilfe MoODS („MoBIC Outdoor System“) (ebd.).

Das MoPS erlaubt die Planung einer Reise, indem es Informationen über ein Reisegebiet bereitstellt. Dazu gehören Wege, Fahrpläne und Öffnungszeiten (ebd., 140). Das MoPS verwaltet dazu digitale Karten, die um spezielle Angaben wie Gehwegbeschaffenheit und Zugangsmöglichkeiten für Rollstühle erweitert sind. Benutzer können sich in diesen Karten (virtuell) bewegen und Angaben über ihre aktuelle Position abrufen, unter anderem den Namen der Straße, auf der sie sich befinden (ebd.).

Das MoPS basiert technisch auf einem Standard-PC. Digitale Karten können entweder mit den Cursortasten oder über ein Tasttablett erkundet werden. Auf dem Tasttablett befindet sich entweder eine taktile Auflage oder eine taktile Karte, falls eine solche für das gewünschte Gebiet vorliegt. Der Computer gibt Aspekte der Karte über synthetische Sprache oder eine Braille-Anzeige aus, nachdem der Benutzer eine bestimmte Taste auf der Tastatur oder eine Stelle auf dem Tasttablett gedrückt hat (ebd.). (Für einen früheren Ansatz zur Ausgabe akustischer Informationen zu einer taktilen Grafik auf einem Tasttablett s. PARKES 1988.)

Mittels der Cursortasten kann sich der Benutzer auf drei verschiedene Arten in der digitalen Karte bewegen: Die erste Möglichkeit stellt die absolute Bewegung dar. Das Drücken der Cursortaste nach oben führt also immer zu einer Bewegung in nördlicher Richtung. Die zweite Möglichkeit besteht in der relativen Bewegung. Das Drücken der Cursortaste nach oben führt dabei zu einem Schritt vorwärts in der aktuellen Richtung. Diese Richtung kann durch Drücken anderer Cursortasten geändert werden. Nachdem eine Strecke ausgewählt wurde, kann schließlich die Bewegung auch bezüglich der Strecke erfolgen. Ähnlich wie bei der zweiten Möglichkeit erfolgt die Bewegung dabei relativ, also schrittweise. Für alle drei Möglichkeiten kann der Benutzer wählen, wie groß ein Schritt sein soll (ebd.).

Bei der Entwicklung und der Evaluation der MoBIC MoTA hat sich herausgestellt, dass die Benutzung eines Reisevorbereitungssystems wie dem MoPS auch ohne ein Reisedurchführungssystem wie das MoODS sinnvoll sein kann: „One participant commented that by exploring a route two or three times using MoPS, she was sure she would find her route easily without the MoODS system“ (STROTHOTTE U.A. 1996, 144).

Mit Atlas Speaks und Atlas Strider hat LAPIERRE in Zusammenarbeit mit den gemeinnützigen Firmen Arkenstone und Visuaide ein persönliches Orientierungssystem entwickelt, welches mit MoBIC vergleichbar ist (LAPIERRE 1998). Atlas Speaks stellt dabei das Reisevorbereitungssystem dar, ähnlich dem MoBIC MoPS, mit dem eine Gegend vor dem Begehen erkundet werden kann. Atlas Speaks wurde von Arkenstone auf den Markt gebracht (ebd., 9ff). Atlas Strider wiederum stellt das eigentliche Führungssystem dar. Es ist mit GPS ausgestattet und bietet Blinden Infor-

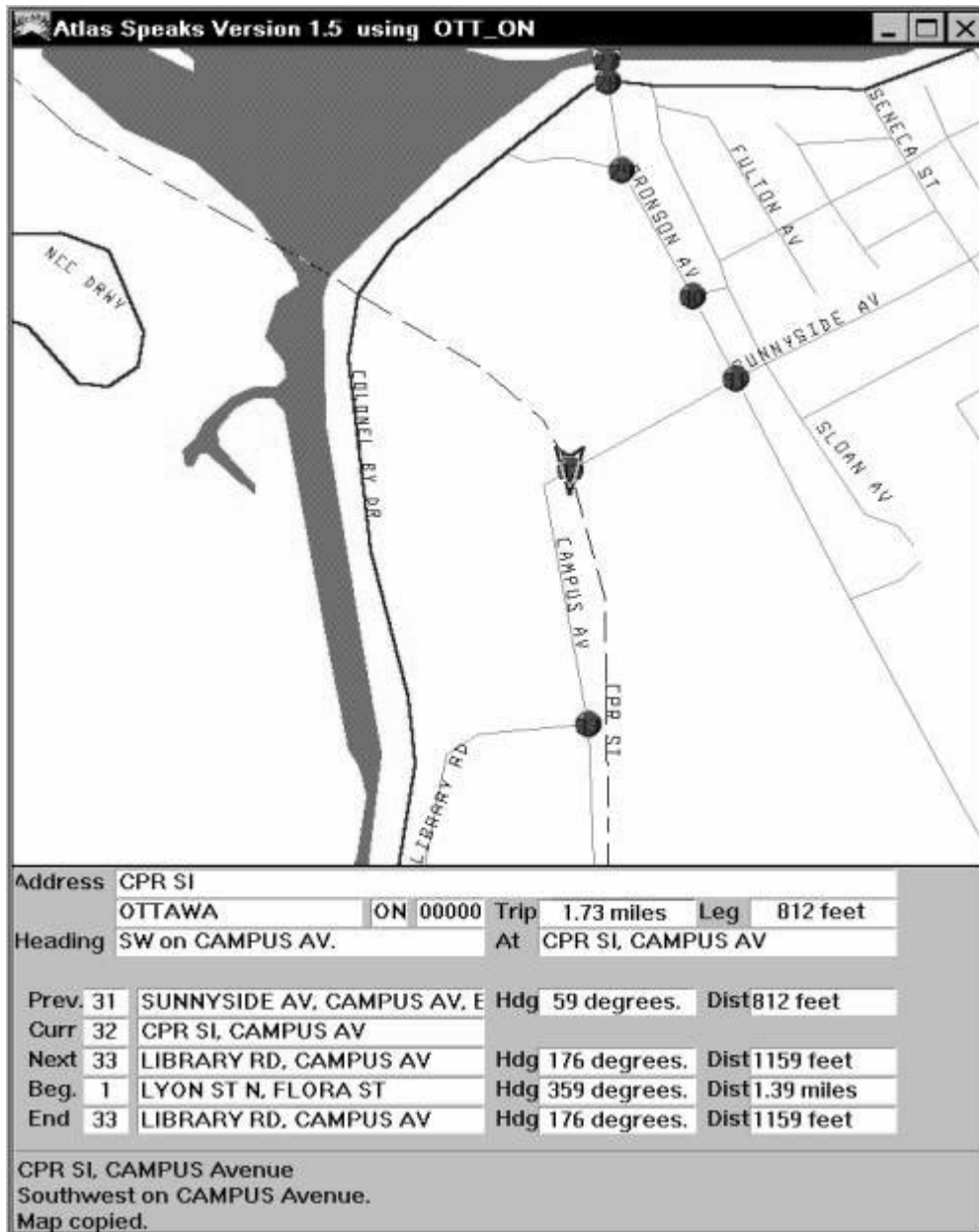


Abbildung 5. Karte in Atlas Speaks mit ausgewählter Strecke (LAPIERRE 1998, 16)

mationen während der Begehung eines Gebietes. Für dieses System wurde den Entwicklern ein Patent verliehen (ebd., 25ff).

Atlas Speaks stellt die aktuelle Karte grafisch dar (s. Abbildung 5), damit das System von Sehbehinderten mittels Vergrößerungstechnik (die auch als Software zur Benutzung von GUIs erhältlich ist) benutzt werden kann. Für Blinde gibt das System Daten über Sprache aus (ebd., 9). Benutzer bewegen sich auf einer Karte mittels eines Positionszeigers (Cursors), der in gedachter Gehrichtung zeigt. Dieser kann über die Cursortasten bewegt werden. Die Cursortaste nach links, oben und rechts bewegen den Kartencursor einen Straßenblock nach links, vorne bzw. rechts bezüglich der aktuellen Gehrichtung. Die Cursortaste nach unten nimmt die letzte ausgeführte Bewegung zurück.

Die aktuelle Cursorposition kann auch symbolisch gesetzt werden. Der Benutzer kann dazu entweder eine Adresse, den Zielpunkt eines vorher bestimmten Weges oder benannte Orte (zu denen auch neue hinzugefügt werden können) auswählen (ebd., 12f). Atlas Speaks kann den Weg zwischen dem aktuellen und einem wählbaren Zielpunkt errechnen. Dabei wird der sicherste Weg gewählt (falls es überhaupt einen entsprechenden Weg gibt). Wenn ein Weg errechnet wurde, wird dem Benutzer nach jedem Cursorschritt mitgeteilt, in welche Richtung er den Cursor als nächstes bewegen muss, um auf dem Weg zu bleiben. Ein errechneter Weg kann auch vom Benutzer angepasst werden (ebd., 13ff). Über die Tastatur kann auch die Vergrößerung der Karte geändert werden (ebd., 9). Über Buchstabentasten kann der Benutzer Angaben über die Kartenobjekte in der Nähe der aktuellen Cursorposition anfordern, die dann textlich und über Sprache ausgegeben werden (ebd., 11).

### 3.4 Gestaltung virtueller taktiler Karten

#### 3.4.1 Darstellung in virtuellen taktilen Karten

Als die wichtigsten Aspekte vor der Erstellung einer Karte wurden Zweck, Perspektive, Maßstab und Symbolisierung identifiziert (s. Seite 22). Es soll nun beschrieben werden, wie diese Aspekte in virtuellen taktilen Karten umgesetzt werden. Der Zweck der Benutzung eines VTK-Systems ist die Vorbereitung auf eine Reise durch ein Gebiet, genauer die Fortbewegung zu Fuß durch einen Teil einer Stadt. Grundsätzlich können virtuelle taktile Karten auch zur Darstellung anderer räumlicher Gebilde dienen.

Umgebungswissen entsteht durch Integration von Einzelansichten zu Strecken und von Strecken und Höhen- bzw. Kartenansichten zu flächigen Vorstellungen (s. Abschnitt 2.3.1). Blinden fällt es dabei schwerer als Sehenden, Informationen aus Karten zu erlangen und zu einer durchgehenden Vorstellung zu verbinden, weil der Tastsinn keinen Überblick erlaubt. Blinde erlangen daher zusammenhängendes Wissen über ein Gebiet auch mittels einer Karte letztendlich in Einzelstücken. Dies entspricht dem Erlernen eines Gebietes beim Begehen des Gebietes.

Virtuelle taktile Karten entsprechen Mobilitäts- anstatt Übersichskarten. Daher haben sie den Charakter von Vektorkarten, was den Vorstellungen entspricht, welche auch Sehende vornehmlich aus Karten erlangen (s. Seite 19). In virtuellen taktilen Karten wird also die Horizontperspektive eingenommen (s. Seite 16). Straßen und ihre Verbindung zu Strecken stehen im Vordergrund, weniger die Gesamtkarte.

Durch die Horizontperspektive ähneln VTKs Plänen. Dies gilt auch für die räumliche Anordnung der Daten: Die Daten werden grundsätzlich flächig dargestellt, die dritte Dimension dient nur der Hervorhebung. Wie bei gedruckten oder taktilen Plänen auch ist nicht die ganze Ebene gefüllt, sondern es ergeben sich Freiflächen zwischen zum Beispiel Straßen.

Wie bereits beschrieben, stellen Strecken in manchen Theorien die Grundelemente der Vorstellung eines Gebietes dar, in anderen Theorien höhere Elemente, die auf Landmarken als Grundelementen basieren (s. Abschnitt 2.3.1). Damit sie für die Orientierung sinnvoll sind, müssen Landmarken beim Gehen bereits aus einiger Entfernung erkannt werden. Dazu sind Blinde bei akustischen oder olfaktorischen Landmarken durchaus in der Lage, häufig bemerken sie jedoch Landmarken erst, wenn sie sich in ihrer Nähe befinden. Strecken spielen daher in dem vorliegenden Zusammenhang eine größere Rolle als Landmarken.

Eine Strecke ist Teil eines größeren Gebietes und kann sinnvoll nur im Zusammenhang mit diesem betrachtet werden. Dies gilt zunächst für die Auswahl der Strecke als Auswahl von im Gebiet vorhandenen Objekten. Bei diesen Objekten handelt es sich entweder um die Streckenelemente selbst, also um Straßen, oder um Anfangs- und Endpunkt der Strecke. Der Streckenverlauf kann aus Anfangs- und Endpunkt unter Beachtung gewisser Auswahlkriterien für Streckensegmente wie Kürze und Sicherheit automatisch bzw. halbautomatisch nach Interaktion mit dem Benutzer erzeugt werden.

Weiterhin ist es sinnvoll, nicht nur die Strecke selbst, sondern auch das umliegende Gebiet zu erkunden, um für ein freiwilliges oder erzwungenes Abweichen von der Strecke vorbereitet zu sein. Beim freiwilligen Abweichen kann es sich um einen Weg zu einem Zwischenziel handeln, der beim Vorbereiten der Strecke nicht eingeplant war. Erzwungenes Abweichen kann nötig werden, wenn ein Teil der Strecke kurzfristig gesperrt ist.

Um der Wichtigkeit des Erlernens einer vornehmlich interessierenden Strecke einerseits und der Integration von Strecken andererseits Rechnung zu tragen, können in virtuellen taktilen Karten sowohl einzelne Strecken als auch die Gesamtkarte mit oder ohne gewählte Strecke erkundet werden. Virtuelle taktile Karten stellen zunächst Möglichkeiten zur Exploration der Gesamtkarte bereit.

Um räumliche Daten über einen nichtvisuellen Sinn zu vermitteln, müssen zuerst die Elemente ausgewählt werden, auf die es vor allem ankommt. Wie bereits beschrieben, ist bei der Übertragung von einer visuellen in eine taktile Darstellung Vereinfachung einerseits und Betonung andererseits nötig (s. Abschnitt 2.2). Daher sind Daten in virtuellen taktilen Karten generell in einem großen Maßstab dargestellt, ähnlich wie in taktilen Karten. Für die Arten der zu übertragenden Zeichen müssen dann Modalitäten ausgewählt werden, die sich zur Übertragung eignen, zum Beispiel der Tastsinn für räumliche Zeichen. Schließlich müssen die jeweiligen Zeichen entsprechend aufbereitet und dargestellt werden (WARREN U. STRELOW 1985, 2).

Symbolisierung erfolgt in einfachen virtuellen taktilen Karten nur indirekt: Räumliche Gegebenheiten werden in virtuellen taktilen Karten durch ihren jeweiligen Ort dargestellt. Symbolische und Detailangaben können auf diese Art nur schwer vermittelt werden. Interaktionshinweise müssen dynamisch erzeugt werden und sind nur für kurze Zeit gültig. Zeichen der drei zuletztgenannten Arten werden daher akustisch vermittelt. Für Namen bietet sich Sprachausgabe an. Andere Daten, vor allem solche, die in ähnlicher Form während der Interaktion wiederholt dargestellt werden, z.B. Entfernungen, werden klanglich ausgegeben. Neben Angaben zu Strecken und die sich durch die Lage mehrerer Strecken zueinander ergebende Phänomene wie Kreuzungen und Abbiegungen, vermitteln virtuelle taktile Karten auch Angaben zu punktförmigen und flächigen Elementen. Dazu gehören Gebäude wie Sehenswürdigkeiten und Ämter sowie Flächen wie Plätze.

Die meisten der von GOLLEDGE genannten Hindernisse (s. Seite 21) lassen sich in eine digitale Karte eintragen und über Sprache ausgeben. Daten über bewegliche Hindernisse (z.B. Fahrräder) lassen sich für ein Reisevorbereitungssystem nur schwer erfassen, über eine Datenverbindung jedoch möglicherweise solche über geplante Hindernisse wie Baustellen.

### 3.4.2 Praktische Aspekte

Die genannten Anforderungen gedruckte Karten wie Vorlagentreue, Genauigkeit, Vollständigkeit, Zweckmäßigkeit, Klarheit und Verständlichkeit, Übersichtlichkeit und leichte Lesbarkeit (s. Seite 23) können zur Gestaltung virtueller taktiler Karten herangezogen werden. Einige der Anforderungen müssen jedoch nicht beachtet werden: Da virtuelle taktile Karten Daten generell großmaßstäblich darstellen, spielt die Erdkrümmung des dargestellten Gebietes als prinzipielles Hindernis für die *Vorlagentreue* kaum eine Rolle; es muß also nicht zwischen Flächen- und Winkeltreue entschieden werden. (Für die Entscheidung zwischen Längen- und Winkeltreue von Strecken bei der Annäherung durch Bausteine fester Größe s. Abschnitt 6.2.1.3.)

Die *Genauigkeit* der Darstellung ergibt sich zunächst aus der Genauigkeit der verwendeten Kartendaten. Als Daten werden allgemein verfügbare digitale Karten benutzt. Diese werden häufig in einem Autonavigationssystemen eingesetzt und können daher käuflich erworben werden. Eine weitere Rolle spielt die Genauigkeit, die mit der verwendeten Darstellungsart erzielt werden kann. Die *Vollständigkeit* ist ebenfalls von den benutzten Daten abhängig. Möglicherweise ist eine Ergänzung der vorhandenen Angaben mit Details wie der Lage von Briefkästen usw. sinnvoll. Grundsätzlich sollen aber auch nichtüberarbeitete Kartendaten verwendet werden können, welche die wichtigsten Angaben wie die Lage von Straßen und ihre Namen enthalten.

Die Sicherstellung der *Zweckmäßigkeit* war eines der Hauptanliegen bei der Entwicklung virtueller taktiler Karten. Sie floss durch die Untersuchung der Zielgruppe, der von ihr für einen bestimmten Zweck benötigten Informationen und die angemessene Darstellung in die Gestaltung ein und wurde durch eine formale Evaluation überprüft (s. Kapitel 7).

Die *Klarheit* ergibt sich unter anderem durch die Beschränkung auf die in der digitalen Vorlage vorhandene Kartendaten ohne zweideutige Darstellung. Die *Verständlichkeit* stellt eine Anforderung dar, die beim Entwurf eines neuen Mediums wie in dem vorliegenden Fall unbedingt beachtet werden muss. Sie wurde bei der Entwicklung durch Einbeziehung von blinden Benutzern und bei der Implementierung durch leicht verständliche sprachliche Darstellung berücksichtigt. Die *Übersichtlichkeit* kann durch die nichtvisuelle Darstellung nur bedingt gewährleistet werden. Da der Tastsinn eine Darstellung nicht in kurzer Zeit vollständig erfassen kann, sollte am Anfang des Ertastens einer taktilen Darstellung eine Gesamtabtastung stehen (JAMES 1982, 356f). Bei der freien Exploration erlauben virtuelle taktile Karten entsprechend das Abtasten der gesamten Fläche.

Virtuelle taktile Karten können Benutzer durch eine Auswahlmöglichkeit von wichtigen Elementen auf der Karte und Vermittlung von deren Ort auch beim Erlernen der ganzen Karte unterstützen, ohne eine vollständige Abtastung nötig zu machen. Die wichtigen Elemente können auch vom Kartenantor ausgewählt und in vielen Fällen sogar vom System vorgeschlagen werden. Dies gilt für Landmarken wie den Bahnhof oder Hauptkreuzungen. Die *leichte Lesbarkeit* wird durch die angemessene Größe der Kartenelemente und sprachliche anstatt Brailleausgabe gewährleistet.

Die Richtgröße für taktile Karten beträgt zwei Handbreiten (EDMAN 1992, 105), also etwa 40 cm. Sie können dadurch leichter transportiert, vor allem aber leichter vollständig abgetastet werden. Der nutzbare Arbeitsbereich virtueller taktiler Karten hängt unter anderem von dem verwendeten Eingabegerät ab. Eine Fläche mit einer Breite von mehr als 1,5 m und einer Tiefe von mehr als 1 m scheint jedoch nicht sinnvoll, um ein ermüdungsfreies Arbeiten zu gewährleisten. Es sind portable VTKs denk-



bar, derzeit vorhandene und in den nächsten Kapiteln der Arbeit beschriebene Eingabegeräte eignen sich dazu jedoch nur bedingt.

Bis auf den erstmaligen Aufbau des Systems sollen virtuelle taktile Karten grundsätzlich von Blinden alleine bedient werden können. Dies gilt vor allem für die eigentliche Interaktion mit der jeweiligen Karte.

### 3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden virtuelle taktile Karten als interaktives computerbasiertes dreidimensionales Medium zur haptischen Darstellung verebneter räumlicher Daten erstmalig eingeführt. Wie deutlich wurde, stellen virtuelle taktile Karten ein neues Medium dar, weil sie einerseits das Medium taktile Karte abbilden und andererseits in medienhaften Computersystemen umgesetzt sind.

Virtuelle taktile Karten wurden von GIS-Systemen, Modellen und Spielen abgegrenzt. Im Gegensatz zu GIS-Systemen enthalten VTK-Systeme nur Angaben über kleine Gebiete mit vergleichsweise wenigen Details, erlauben ihren Benutzern aber das aktive Erkunden der Daten. VTK-Systeme enthalten Elemente von Spielen und Modellen, stellen aber im Gegensatz zu ersteren Informationsmedien dar und bieten mehr Unterstützung beim Lernen als letztere.

Es wurde untersucht, wie Computer Blinden und Sehenden bei der Erlangung räumlicher Informationen helfen können. Dazu wurde zunächst ein inzwischen historisches Virtual-Reality-System zum Erkunden einer Stadt beschrieben, das MIT Movie-Map-System, welches von seinen Machern ausdrücklich als Ersatz für Karten bezüglich der Darstellung räumlicher Strukturen bezeichnet wurde. Es wurde kurz auf die Darstellung räumlicher Strukturen durch sogenannte Virtual-Reality-Systeme eingegangen.

Anschließend wurden computerbasierte Orientierungshilfen für Blinde beschrieben. Diese erlauben die Erkundung einer digitalen Karte mit den Cursortasten oder einem Touchpad und benutzen akustische Ausgaben. Diese Orientierungshilfen wurden mit klassischen Medien wie taktilen Karten und den in dieser Arbeit entwickelten virtuellen taktilen Karten verglichen. Dabei wurde untersucht, aus welcher Perspektive heraus sie ein Gebiet jeweils vermitteln und welche Vermittlungseinheit sie dabei benutzen. Wie deutlich wurde, besitzen die jeweils verwendeten Ein- und Ausgabemethoden einen grossen Einfluss auf die Art der zu erlangenden Information. Es hat sich auch gezeigt, dass nur virtuelle taktile Karten die Konstruktion zur Erkundung einsetzen.

Danach wurden die Informationen beschrieben, die Blinde für das selbstständige Begehen eines ihnen zunächst unbekanntes Stadtgebietes benötigen und wie sie diese durch virtuelle taktile Karten erhalten können. Es wurde beschrieben, wie virtuelle taktile Karten Anforderungen erfüllen, die von Kartographen an Karten gestellt werden.

Schließlich wurden verschiedene praktische Aspekte virtueller taktiler Karten beleuchtet, wie ihre Größe und ihre Benutzung. Es wurde untersucht, welche praktischen Anforderungen an gedruckte Karten virtuelle taktile Karten erfüllen. Im Gegensatz zu taktilen Karten unterstützten virtuelle taktile Karten ihren Benutzer bei der Erkundung der Kartenteile, die ihn interessieren, der Benutzer muss keine zusätzlichen Techniken der Erkundung erlernen.



# Konstruktive räumliche Exploration

Sehende erlangen räumliche Informationen häufig durch direkte Erfahrung. Wenn dies nicht möglich ist, lassen sie sich mündliche Beschreibungen geben oder studieren Pläne. Dadurch erhalten sie Wissen über die Lage einzelner Straßen, Plätze und Räume usw., aber nicht notwendigerweise über die Verhältnisse zwischen Objekten. Die dafür nötigen Angaben sind zwar in einer Karte vorhanden, können aber durch flüchtiges Betrachten nicht erlangt werden. Nötig sind daher spezielle Techniken der Informationsgewinnung aus Karten auf Seiten des Kartenlesers und der Deutlichmachung wichtiger Kartenelemente auf Seiten des Kartenerstellers. Helfen kann aber auch die manipulation physischer Objekte: „Looking or listening can be a rich experience, if what you are looking at or listening to is beautiful, interesting, or important to you. But manipulating material objects, like pouring sand or stacking blocks, provides information on how the parts work in relation to one another, information about process and the sequencing of successive stages of the activity“ (WEIR 1987, 32).

In diesem Kapitel wird das aktive Lernen räumlicher Information durch *konstruktive räumliche Exploration* eingeführt. Zunächst wird der Begriff der konstruktiven räumlichen Exploration definiert. Dann werden Konzepte aus der Gedächtnispsychologie, Pädagogik und Didaktik untersucht, auf denen die konstruktive Exploration basiert. Ferner werden Erkenntnisse der Umgebungspsychologie über das aktive räumliche Lernen betrachtet. Es wird beschrieben, wie entsprechende Konzepte der Wissensvermittlung bereits heute mit Hilfe des Computers umgesetzt werden. Es werden vorhandene Ansätze des räumlichen Lernens durch Blinde mittels Konstruktion beschrieben. Aus den Eigenschaften der konstruktiven räumlichen Exploration und den genannten Untersuchungen werden schließlich Anforderungen an ein System zur Exploration entwickelt.

## 4.1 Definitionen

Menschen nehmen die meisten räumlichen Informationen unbewusst auf, wenn sie sich in einer Umgebung bewegen. Das bewusste Aneignen räumlicher Informationen durch Bewegung im Raum oder Umgang mit einer Darstellung des Raumes wird Exploration genannt. Die hier vorgestellte konstruktive Exploration räumlicher Daten bedeutet den aktiven Umgang mit einer Repräsentation des Raumes durch Zusammenbauen dieser Repräsentation durch Bausteine, wobei ein interaktives Computersystem das Zusammenfügen anleitet. Diese Methode des Erlernens räumlicher Informationen kann mit den in dieser Arbeit neuentwickelten virtuellen taktilen Karten kombiniert werden, um die freie Erkundbarkeit der virtuellen taktilen Karte mit der angeleiteten Aneignung durch die konstruktive Exploration der Kartendaten zu verbinden.

Die genannten Begriffe werden wie folgt definiert:

**Definition 4.1:** *Räumliche Exploration* bedeutet das Erkunden räumlicher Darstellungen mit dem Ziel des Erlernens räumlicher Informationen, entweder in einer räumlichen Umgebung selbst oder mittels eines Mediums räumlicher Information.

**Definition 4.2:** Die *konstruktive räumliche Exploration* ist eine Technik zur Erlangung räumlicher Informationen durch angeleitetes stückweises Zusammenetzen einer physischen Repräsentation der Informationen mit Hilfe eines interaktiven Computersystems.

**Definition 4.3:** Die *konstruktive (räumliche) Exploration virtueller taktiler Karten* bedeutet die konstruktive räumliche Exploration von Planinformationen auf einer virtuellen taktilen Karte, welche die freie Exploration erlaubt.

Ausschnitte der Daten, die der Information zugrundeliegen, werden bei der konstruktiven räumlichen Exploration auf Bausteine abgebildet, aus denen die Darstellung zusammengesetzt werden kann. Die Bausteine können physisch vorliegen oder durch ein dreidimensionales Ein-/Ausgabegerät simuliert werden.

Blinden Menschen stehen Hilfsmittel für die Exploration zur Verfügung. Dazu zählen die beschriebenen taktilen Karten. Allerdings sind zum Beispiel tastbare Stadtpläne schwer erhältlich. Zusätzlich sind Blinde aber noch mehr als Sehende auf die Exploration angewiesen, weil ihnen beispielsweise das Lesen von Straßenschildern und das Erkennen von Landmarken aus der Entfernung verwehrt ist. Schließlich ist es auch für einen geübten Benutzer taktiler Karten schwer, aus ihnen räumliche Vorstellungen zu entwickeln.

Das Attribut ‚konstruktiv‘ lässt den Konstruktivismus anklingen. Der Konstruktivismus ist eine Erkenntnistheorie, nach der Lebewesen die Welt nicht einfach in Form von Abbildern wahrnehmen, sondern sich Vorstellungen von der Welt selbst erarbeiten. Der Konstruktivismus wurde unter anderem von den Kybernetikern v. FOERSTER und v. GLASERSFELD, den Biologen MATURANA und VARELA und dem Psychologen WATZLAWICK entwickelt (s. MATURANA u. VARELA 1987, WATZLAWICK 1994).

## 4.2 Gedächtnispsychologie

Die Gedächtnispsychologie beschäftigt sich mit dem Behalten von implizit oder explizit erworbenem Wissen. Es gibt eine Reihe von Untersuchungen dieser Disziplin, die zeigen, dass sich Menschen an selbst ausgeführte Handlungen wesentlich besser erinnern als an solche, die ihnen nur beschrieben wurden (ENKELKAMP 1997). ENGELKAMP nennt dies den „Tu-Effekt“ (ebd., 11f).

In der gedächtnispsychologischen Forschung dienen häufig Wortlisten als prototypische zu erlernende Informationen. Das Erinnern von Handlungen wurde zunächst durch Experimente der folgenden Art untersucht: Es wurden Listen mit verbalen Beschreibungen einfacher Handlungen erstellt. Dabei handelte es sich entweder um körper- („mit dem Kopf nicken“) oder objektbezogene („die Pfeife rauchen“) Handlungen. Versuchspersonen haben die Handlungsbeschreibungen entweder nur gehört oder zusätzlich die jeweilige Handlung ausgeführt (teilweise sich die Ausführung der Handlung auch nur vorgestellt). Nach Abarbeitung der Liste sollten die Versuchspersonen sie verbal frei reproduzieren oder wiedererkennen. Der Tu-Effekt konnte zuverlässig nachgewiesen werden, auch bei nur vorgestellten Handlungen. Strittig ist jedoch die Frage, wie dieser Effekt und Unterschiede zum Beispiel nach Hören der jeweiligen Beschreibungen, erklärt werden kann (ebd., 29f).

Ausgeführte Handlungen werden nach ENGELKAMP in drei aufeinanderfolgenden Phasen kodiert: in einer sensorischen, einer konzeptuellen und einer motorischen Phase. In der sensorischen Phase werden erlebte Reize mit vorhandenen Repräsentationen abgeglichen. Verbale Reize aktivieren sogenannte Wortmarken, Bildreize entsprechend Bildmarken. Diese Marken besitzen selbst keine semantische Bedeutung. In der konzeptuellen Phase werden den Marken Bedeutungen zugewiesen. In der motorischen Phase schließlich werden Bewegungen geplant und aktiviert, die der vorher bestimmten Bedeutung entsprechen (ebd., 40).

Wenn man die Ursache für den Tu-Effekt klären möchte, stellt sich zunächst die Frage, ob er auf das Vorhandensein physikalischer Objekte zurückzuführen ist. Es hat sich herausgestellt, dass das Vorhandensein von Objekten zwar die Erinnerung verbessert, jedoch unabhängig vom Tu-Effekt: Die Erinnerungsfähigkeit vorgestellter Handlungen ist also immer noch besser als das reine Sehen physischer Objekte (ebd., 76ff). Allerdings gilt dies nur für Listen einer gewissen Länge (ebd., 80ff). Der Tu-Effekt tritt weiterhin auch dann auf, wenn Versuchspersonen Handlungen zwar ausführen, ihre Handlungsausführungen jedoch selbst nicht sehen können (ebd., 86).

Wie weiterhin nachgewiesen werden konnte, basiert der Tu-Effekt sowohl auf der Planung als auch auf der Ausführung von Handlungen. Schon die Handlungsplanung an sich führt also zu einer besseren Erinnerungsleistung, die jedoch nach dem Tun noch höher ist. Interessanterweise fällt der Tu-Effekt geringer aus, wenn parallel zum Tun geplant wurde, wenn die Versuchspersonen also instruiert wurden, sich die Handlung für eine spätere erneute Ausführung zu merken. Dies erklärt ENGELKAMP damit, dass das Tun selbst bereits eine Planungskomponente enthält, die mit der zusätzlichen Planung interferiert (ebd., 94ff).

Da der Tu-Effekt nicht von der Objekt- oder Handlungswahrnehmung abhängt und sich auch nicht auf reine Planung reduzieren lässt, kann er nur durch Prozesse erklärt werden, die während der Handlung ablaufen. Dabei handelt es sich einerseits um Planungs-, andererseits um Ausführungsprozesse (ebd., 108f). ENGELKAMP geht daher davon aus, dass bei Handlungen verschiedene Systeme involviert sind, die unabhängig voneinander arbeiten: „Es sieht so aus, als arbeite das System, das enkodiert, daß es ein bestimmtes Handlungsobjekt gibt, unabhängig von dem System, das auf der Basis der visuellen Wahrnehmung enkodiert, daß eine bestimmte Handlung ausgeführt wird, und dieses System arbeitet wieder unabhängig von dem System, das unsere eigenen Bewegungen bei der Ausführung einer Handlung enkodiert“ (ebd., 143). Je nach Handlung entsteht entweder eine Erinnerung an das Objekt der Handlung oder an die Handlung selbst, auch wenn diese von einer anderen Person ausgeführt wurde.

### 4.3 Pädagogik

Die praktische und sinnliche Wissensvermittlung stellt ein altes pädagogisches Konzept dar: Bereits der tschechische Pädagoge und Theologe COMENIUS (1592-1670) schreibt in seiner 1632 erschienenen „Großen Didaktik“: „Alles soll wo immer möglich den Sinnen vorgeführt werden, was sichtbar dem Gesicht, was hörbar dem Gehör, was riechbar dem Geruch, was schmeckbar dem Geschmack, was fühlbar dem Tastsinn. Und wenn etwas durch verschiedene Sinne aufgenommen werden kann, soll es den verschiedenen zugleich vorgesetzt werden. [...] Wenn die Dinge selbst nicht zur Hand sind, so kann man Stellvertreter verwenden: Modelle oder Bilder, die zu Unterrichtszwecken angefertigt worden sind“ (COMENIUS 1992). Dieser Ansatz wurde in Arbeiten späterer Pädagogen weiterentwickelt. Als Beispiel soll zunächst die Pädagogik von DEWEY beschrieben werden.

#### 4.3.1 Erfahrungsorientiertes Lernen bei DEWEY

Der US-Amerikaner JOHN DEWEY (1859-1952) war Philosoph und Pädagoge. Sein philosophisches Interesse lag in der Erkenntnistheorie. Seine Überlegungen zur Erziehung waren von demokratischen Ideen und Erkenntnissen aus der Kinderpsychologie geprägt. Das Konzept des „Learning-by-Doing“ wird DEWEY zugeschrieben, obwohl er den Ausdruck selbst wohl nie benutzt hat.

Nach DEWEY enthält jede Erfahrung für den, der sie macht, gleichzeitig ein aktives und ein passives Element: Zur Erfahrung gehört zunächst das Handeln eines Individuums, aber auch die Veränderungen, die es durch Wahrnehmung der Ergebnisse des Handelns erfährt (DEWEY 1916, 139).

Aktivität alleine bedeutet noch keine Erfahrung, letztere kommt nur zustande, wenn die Konsequenzen einer Aktivität mit der Aktivität selbst in Verbindung gebracht werden. Ein Beispiel dafür ist ein Kind, welches sich den Finger an einer Flamme verbrennt: Die Aktivität liegt in dem Berühren der Flamme, die Konsequenz im schmerzenden Finger. Eine Erfahrung wird daraus erst, wenn danach das Strecken eines Fingers in eine Flamme gleichbedeutend mit Schmerzen wird. „To ‚learn from experience‘ is to make a backward and forward connection between what we do to things and what we enjoy or suffer from things in consequence. Under such conditions, doing becomes a trying; an experiment with the world to find out what it is like; the undergoing becomes instruction — discovery of the connection of things“ (DEWEY 1916, 139f).

DEWEY wendet sich dagegen, dass Sinne und Extremitäten nur Kanäle für das Gehirn sind, damit dieses Wissen erlangen kann. Sie sind vielmehr wichtig im Lernprozess, weil sie auf ein Ziel hin gebraucht werden. Im Hinblick auf dieses Ziel bekommen körperlich erfahrene Dinge einen Sinn (DEWEY 1916, 142). Wenn nur ‚mit dem Kopf‘ und ohne die Sinne gelernt wird, besteht die Gefahr, dass einzelne Fakten, aber nicht die Verbindungen zwischen ihnen gelernt werden. Weiterhin werden dann fälschlich Worte mit ihren Inhalten gleichgesetzt (DEWEY 1916, 143f).

DEWEY betont, dass Lernen vor allem außerhalb der Schule stattfindet: „Without something of the kind, it is not possible to secure the normal estate of effective learning; namely, that knowledge-getting be an outgrowth of activities having their own end, instead of a school task. More specifically, play and work correspond, point for point, with the traits of the initial stage of knowing, which consists [...] in learning how to do things and in acquaintance with things and processes gained in the doing“ (DEWEY 1916, 195).

Die Forderung nach erfahrungsbasiertem Lernen bedeutet nicht, dass Wissen nur unmittelbar erlangt werden soll: „While direct impression has the advantage of being first hand, it also has the disadvantage of being limited in range. Direct acquaintance with the natural surroundings of the home environment so as to give reality to the ideas about portions of the earth beyond the reach of the senses, and as a means of arousing intellectual curiosity, is one thing. As an end-all and be-all of geographical knowledge it is fatally restricted“ (DEWEY 1916, 270). Wie COMENIUS spricht sich also auch DEWEY für das Lernen an Bildern und Modellen aus.

#### 4.3.2 PIAGET und seine Stadien

Der Schweizer Psychologie PIAGET hat die Entwicklung des menschlichen Individuums an Kindern (auch seinen eigenen) erforscht. Seine Theorie kann auch als Lerntheorie betrachtet werden, weil sie sich mit der geistigen Entwicklung des Wissens befasst (LEFRANCOIS 1994, 138f). Bekannt ist vor allem PIAGETS Stadien.

PIAGET unterscheidet vier Hauptstadien der kindlichen Intelligenzentwicklung: das sensumotorische Stadium, das präoperationale Stadium, das Stadium der konkreten und schließlich das der formalen Operationen. Das präoperationale Stadium besteht wiederum aus zwei Phasen, einer präkonzeptuellen und einer intuitiven Phase (s. Tabelle 3).

In der sensumotorischen Phase kann das Kind weder auf Sprache noch auf eine andere Form der internen Repräsentation zurückgreifen. Objekte existieren für es also nur, wenn sie direkt seiner Wahrnehmung zugänglich sind. Umgekehrt lernt das Kind durch direkten und expliziten Kontakt mit der Umwelt. Es reagiert hauptsächlich mit Aktivität, weil es noch nicht durch Sprache (symbolisch) agieren kann. Die Fähigkeit zur sprachlichen Kommunikation entwickelt sich im Laufe der ersten Phase, außerdem die Fähigkeit, Gegenstände als eigenständig zu erfahren. Hinzu kommt die Fähigkeit zur Koordination mehrerer Aktivitäten und das Erkennen von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen.

In der präkonzeptuellen Phase des zweiten Stadiums können Kinder Objekte zwar klassifizieren, aber ähnliche Objekte nicht unterscheiden. Außerdem können sie nicht logisch (induktiv oder deduktiv) schließen. In der Phase des intuitiven Denkens kann das Kind teilweise logisch schließen, orientiert sich aber vor allem an seiner Wahrnehmung. Außerdem kann es weder Unterklassen von Gegenständen bilden noch sich in die Position anderer versetzen. (Im wörtlichen Sinn: Es kann sich nicht vorstellen, was es vom Standort einer anderen Person aus sehen würde.)

Stadiumsnummer	Stadiumsname	Zeitraum
1	sensumotorisch	0 bis 2 Jahre
2	präoperational (vorbegriffliches Denken)	2 bis 7 Jahre
2.1	präkonzeptuell (anschauliches Denken)	2 bis 4 Jahre
2.2	intuitiv	4 bis 7 Jahre
3	konkrete Operationen	7 bis 11 oder 12 Jahre
4	formale Operationen	11 oder 12 bis 14 oder 15 Jahre

Tabelle 3. Stadien der Kinderentwicklung nach PIAGET (s. LEFRANCOIS 1994, 130)

Im Stadium der konkreten Operationen kann ein Kind mit Klassen, Serien (Gegenstandsaufreihungen mit bestimmten Reihungskriterien, zum Beispiel Größe) und Zahlen umgehen. Außerdem weiß es, dass sich die Menge von Objekten nicht verän-

dert, wenn nur ihre Form oder räumliche Anordnung verändert wird. (Dieses Wissen bezeichnet PIAGET mit ‚Invarianz‘.) Im Stadium der formalen Operationen kann ein Kind im Hypothetischen operieren, also vom Konkreten zum Möglichen und wieder zurück gelangen (LEFRANCOIS 1994, 130ff).

Die Forschung nach PIAGET hat gezeigt, dass sich Stadien nicht so eindeutig abgrenzen lassen, wie PIAGET es getan hat. Unter anderem werden die von PIAGET identifizierten formalen Operationen durchschnittlich erst später erreicht (LEFRANCOIS 1994, 139f). Weiterhin lernen nicht nur Kleinkinder sensumotorisch, Erwachsene sind dazu sogar noch besser in der Lage: „The sensori-motor learning of adolescents and adults is vastly superior to that of infants. Not only are the brain and nervous systems of the adult more highly developed than those of infants, adults use higher-order modes to facilitate lower-order learning“ (BIGGS 1992, 42f).

PIAGET und INHELDER haben die Entwicklung der räumlichen Vorstellung bei Kindern eingehender untersucht. Dazu haben sie Kinder unter anderem den Plan eines Dorfes konstruieren lassen. Die Konstruktion erfolgte auf zwei Arten: Durch Platzierung eines Gegenstandes in einem Dorfmodell und durch Nachbau des Dorfes selbst durch Zeichnen oder durch Anordnen von physischen Objekten (PIAGET U. INHELDER 1975, 487).

Für die Herausbildung von topographischen Vorstellungen nennen die Autoren folgende Voraussetzungen: „1. Die Wahl eines Blickwinkels und gewisser zeichnerischer Konventionen, mittels derer dieser Blickwinkel zum Ausdruck gebracht wird (auf einer Landkarte z.B. ist Süden unten auf dem Blatt, Westen links, Osten rechts usw.; der Plan eines Dorfes oder eines kleinen Geländes kann die Gebäude usw. senkrecht von oben darstellen, so dass die Dächer zu sehen sind, oder schräg von oben usw.). Jede topographische Darstellung setzt also zuerst das Eingreifen eines projektiven Elementes voraus. 2. Ein Koordinatensystem – seine Rolle ist offensichtlich – und die dadurch implizierten Begriffe Gerade, Parallelen und Winkel. 3. Eine Verkleinerung auf einen gewissen Maßstab und folglich die Begriffe Ähnlichkeit und Proportionen“ (PIAGET U. INHELDER 1975, 487).

PIAGET und INHELDER schreiben über die geometrische Anschauung: „Die landläufige Meinung neigt dazu, in dieser Anschauung im wesentlichen ein Ablesen zu sehen: zuerst ein Ablesen der äußeren Welt mittels der Anschauung, dann ein Ablesen dessen, was die Wahrnehmung geliefert hat oder noch liefern könnte, mittels des Bildes“ (PIAGET U. INHELDER 1975, 518). Sie wenden sich jedoch gegen diese Meinung: „Die Anschauung des Raumes ist kein Ablesen der Eigenschaften der Gegenstände, sondern vielmehr von Anfang an ein auf die Gegenstände ausgeübtes Handeln. Und weil dieses Handeln die physikalische Wirklichkeit bereichert, anstatt ihr einfach fertig geformte Strukturen zu entnehmen, kann es nach und nach über sie hinausgelangen, bis es schließlich formalisierbare operatorische Schemata bildet, die aus sich selbst heraus deduktiv funktionieren. Die Geschichte der geometrischen Anschauung ist also, vom elementaren sensumotorischen Handeln bis hin zur formalen Operation, die Geschichte einer Aktivität im eigentlichen Sinne“ (PIAGET U. INHELDER 1975, 520).

Formale Operationen stellen abstrahiertes Handeln dar: „[...] auf der Stufe der beginnenden Vorstellung, entwickelt das Handeln seine formende Rolle: Das Bild ist immer nur die innere und symbolische Imitation zuerst vorher durchgeführter, dann lediglich durchführbarer Handlungen“ (PIAGET U. INHELDER 1975, 521).

Räumliches Wissen beschränkt sich nicht auf statische Objekte: „Nun begreift man, inwiefern die räumliche Vorstellung eine verinnerlichte Handlung ist und nicht einfach die bildliche Vorstellung irgendeiner äußeren Tatsache, etwa des Ergebnisses einer Handlung. Tatsächlich kann die räumliche Vorstellung dieses Ergebnis nur vor-



aussehen und sogar auch nur das Ergebnis einer vorherigen Handlung rekonstruieren, indem sie selbst aktiv wird, d.h. indem sie mit den symbolisierten Gegenständen operiert, wie das Handeln mit den realen Gegenständen operiert, anstatt sie lediglich zu evozieren“ (PIAGET U. INHELDER 1975, 527).

Das Agieren im Raum stellt daher eine notwendige Voraussetzung für räumliches Wissen dar: „In a spatial context, Piaget argues that the representation of space arises from the *coordination* and *internalization* of actions. In this view, representations of space result from manipulating and acting in an external environment rather than from a perceptual copy of it. Thus, interaction in space, not perception of space, is fundamental building block for the acquisition of spatial knowledge“ (GOLLEDGE U. STIMSON 1997, 161).

### 4.3.3 Didaktik

Unter der Überschrift „Encourage active, constructive exploration“ schreibt MOATS in einem Artikel zum Lesenlernen durch Kinder: „The brain responds to novelty and sensory involvement; that’s why we learn better by doing than by listening“ (MOATS 1998). Der Begriff der konstruktiven Exploration wird in der amerikanischen Didaktik also bereits für das handlungsorientierte Lernen im Gegensatz zu ziellosem Spiel auf der einen und wissenschaftlicher Untersuchung auf der anderen Seite benutzt. Allerdings wird in der genannten Quelle von einem intuitiven Verständnis des Begriffes ausgegangen; er wird nicht definiert.

Auch in der deutschen Didaktik haben sich die Gedanken von DEWEY niedergeschlagen: „Für jede Form des Unterrichts gilt, dass aktives Lernen eher zu einer höheren Erinnerungsleistung über einen längeren Zeitraum führt als passives Lernen. Eine erhöhte Aktivität des Schülers beim Lernprozess führt dazu, dass mehr assoziative Verbindungen zum Lehrstoff hergestellt werden, und dadurch die Kodierung für die Gedächtnisleistung erleichtert wird“ (GAGE U. BERLINER 1996, 299). Echtes Lernen umfasst also Verinnerlichung, wie schon die Herkunft der entsprechenden Begriffe verdeutlicht: „Durch den Umgang mit der Sache, also durch Handeln, soll das selbständige Denken ‚entzündet‘ und der An-eignungsprozess und das Be-greifen vollzogen werden“ (DIETRICH 1991, 38).

Handlungsorientiertes Lernen stärkt weiterhin die Motivation und das Selbstbewusstsein: „One of the reasons why active participation, learning by doing, is so compelling is the conviction arising out of one’s own experience of the power of direct personal engagement – the feeling that you really get to ‚own‘ a piece of knowledge when you have used it“ (WEIR 1987, 32). Lernen durch Handeln lässt sich jedoch nicht auf einen pädagogischen Kniff zur Motivationsförderung reduzieren, sondern ist die dem menschlichen Erkennen angemessene Art des Lernens: „Die Begründung für das handlungsorientierte Lernen und Lehren – und zwar sowohl bei reformpädagogisch verwurzelten und heutigen Pädagogen – beruht auf der anthropologischen Voraussetzung, dass der Mensch in seinem Kern das handelnde Wesen ist und dass das Denken aus dem Handeln aufsteigt und mit ihm verbunden ist“ (DIETRICH 1991, 37).

In Anbetracht der genannten Vorteile stellt sich die Frage, warum handlungsorientiertes Lernen in der Schule nicht in größerem Umfang praktiziert wird. Lehrer sind durchaus der Meinung, dass handlungsorientierter Unterricht zu besserem Behalten und mehr Motivation führt. Gegengründe für handlungsorientierten Unterricht sind vor allem praktischer Art: Es fehlt didaktisches Material, und es kommt zu Disziplinproblemen (NENTWIG 1977, nach KUBLI 1983, 53).

GUDJONS untersucht Handlungsorientierung in der Schule. Er stützt sich dabei auf den Begriff der psychischen Tätigkeit von GALPERIN (s. GALPERIN 1980): „Der Zusammenhang des Menschen mit der Welt, in der er lebt, wird hergestellt durch die aufgrund seiner ‚Tätigkeit‘ zustandegekommene Eigenart der Beziehung zwischen äußeren Gegenständen und inneren Erkenntnissen, Handlungsstrukturen, Fähigkeiten usw.“ (GUDJONS 1992, 37).

Für GALPERIN ist „Tätigkeit“ nicht ein Unter-, sondern der Oberbegriff menschlichen Wirkens: „Mit Tätigkeit sind nicht die zahlreichen Aktivitäten im Rahmen irgendeines praktischen Tuns gemeint, sondern umgekehrt: Tätigkeit ist der *Gesamtzusammenhang*, in dem sich der Mensch die reale Welt zu eigen macht, der Gesamtprozess, in welchem er die *objektive Welt* (zum Beispiel Gebrauchsgegenstände, Technik, Wissenschaft, Kultur) in *subjektive Formen* umwandelt (in Vorstellungen, Bewusstsein, Sprache)“. Dieses Umwandeln nennt GUDJONS in Anlehnung an GALPERIN Aneignung (GUDJONS 1992, 38).

Wichtig ist nicht nur das Lernen durch Handeln, sondern umgekehrt auch aus dem Erlernten hervorgehende Handlungsmöglichkeiten: „Nur indem man sie [Vorstellungen und Begriffe, J.S.] nachschafft, nachkonstruiert, so dass sie in ihrem inneren Aufbau verständlich werden, gelangen wir zu einem Wissen, das nicht nur aus Versatzstücken besteht, sondern ein Handlungsrepertoire bedeutet, das den Menschen befähigt, aktiv in die Welt einzugreifen, sie zu verändern“ (GUDJONS 1992, 44).

GUDJONS sieht jedoch auch kritische Aspekte des Aneignungskonzeptes von GALPERIN:

1. Das Konzept betont die Anpassung an durch Gegenstände vorgegebene „Sachrationalitäten“.
2. Jeweils nur eine Dimension eines Gegenstandes steht im Vordergrund, nicht der kreative Umgang mit ihm. „Galperin sieht – etwa im Gegensatz zu Piaget – in der spontanen Aktivität des handelnden Subjekts die Hauptfehlerquelle bei der Aneignung von Operationen“.
3. Manuelle, sprachliche und formal-logische Fähigkeiten können nicht alle im gleichen Maß durch gegenständliches Handeln erlernt werden.
4. Die Anwendung der Handlungs- als Lerntheorie birgt (wie jede vergleichbare Theorie) „die Gefahr einer zu starken Formalisierung pädagogischer Konzepte in sich“ (GUDJONS 1992, 42).

### 4.3.4 Konstruktives Lernen bei Erwachsenen

Es deckt sich mit PIAGETS Stadientheorie, dass Erwachsene beim Lernen weniger auf die Manipulation externer Objekte zurückgreifen als Kinder. Erwachsene stellen sich Handlungen beim Lernen häufig nur vor. Hinzu kommt, dass sich Erwachsene seltener in der Rolle von Lernern sehen als von Problemlösern, die zum Lösen der Probleme Vorbereitungen treffen müssen, zu denen auch die Informationsbeschaffung gehören kann.

Problemlösen beinhaltet jedoch häufig Lernen: „Everyone would agree that getting to know one’s way around a city is ‚learning‘. Similarly, we see solving a problem often as getting to know one’s way around a ‚micro-world‘ in which the problem exists. Think, for example, of what it is like to work on a chess problem (or on a geometry puzzle, or trying to fix something). Here the microworld consists of the network of situations on the chessboards that arise when one moves the pieces. Solving the chess problem consists largely of getting to know the relations between the pieces, and how

the moves affect things. One naturally uses words like ‚explore‘ in this context“ (MINSKY U. PAPERT 1972, 47).

Beim Problemlösen setzen auch Erwachsene externe Objekte ein. Oft ist ihnen die Rolle dieser Objekte beim Lösungsprozess gar nicht bewusst, weil die Objekte nicht nur als Symbole fungieren, sondern zum Erreichen des Ziels selbst. Das ist zum Beispiel bei so einfachen Aufgaben wie dem Kaffeekochen mittels einer Kaffeemaschine der Fall: Die Maschine wird einerseits benutzt zur Zubereitung des Kaffees selbst. Sie muss zunächst mit Wasser, einem Filter und Kaffeepulver bestückt werden. Dabei dient die Kaffeemaschine andererseits als Gedächtnisstütze für das weitere Vorgehen: Auch wenn man zwischendurch eine andere Aufgabe erledigt, kann man danach mit dem Füllen der Maschine fortfahren, ohne das Gedächtnis zu bemühen: Ein Blick auf die Maschine reicht um festzustellen, was noch fehlt.

Das beschriebene Beispiel stammt von LARKIN (LARKIN 1989). Das Umformen und Lösen mathematischer Gleichungen kann als Problemlösen unter Zuhilfenahme symbolischer Darstellungen angesehen werden, die einen physischen Träger benutzen. Das Lösen mathematischer Gleichungen wird eher als Problemlösen angesehen als praktische Arbeiten. Das liegt unter anderem daran, dass das Kaffeekochen sehr leicht von der Hand geht (selbst wenn man es kurz nach dem Aufstehen tut, wo man noch nicht auf der Höhe seiner Leistungsfähigkeit ist) (LARKIN 1989).

Die Leichtigkeit von Aufgaben der beschriebenen Art umfasst nach LARKIN die folgenden Aspekte:

1. Sie erfordern wenig kognitiven Aufwand
2. Es werden nur wenig Fehler gemacht
3. Die Erledigung der Aufgabe verschlechtert sich nicht durch Unterbrechungen
4. Die Teilaufgaben können in verschiedenen Reihenfolgen gelöst werden
5. Der Problemlöseprozess kann leicht abgeändert werden
6. Vor der leichten Ausführung hat ein Lernprozess stattgefunden (ebd.)

Weitere Beispiele sind Alltagsvorgänge wie das Anziehen von Kleidung, der Weg zur Arbeit und das Einkaufen. Die Leichtigkeit der Erledigung erklärt sich nach LARKIN gerade nicht allein durch das Lernen, sie erklärt sich vor allem aus der Verwendung externer Objekte als Gedächtnisstütze. Erlernt werden nicht komplette Abläufe als solche, sondern Regeln, die jeweils auf eine bestimmte Konfiguration externer Objekte angewendet werden können und zu einer neuen Konfiguration führen. Die externe Darstellung des aktuellen Zustandes stellt daher den wichtigsten Aspekt der beschriebenen Prozesse dar. Vorkommende Fehler erklären sich dadurch, dass nicht alle Zustände sichtbar oder dass die Umformungsregeln nicht oder nur unvollständig bekannt sind (ebd.).

#### 4.4 Umgebungskognition und aktives räumliches Lernen

In Kapitel 2 wurde das Erlernen räumlicher Zusammenhänge untersucht. Im folgenden Abschnitt wird nun die Verbindung zwischen Kapitel 2 und dem vorliegenden Kapitel hergestellt, um den theoretischen Hintergrund für die in dieser Arbeit entwickelten Methoden und Werkzeuge zu liefern. Dieser Hintergrund lässt sich wie folgt zusammenfassen: Räumliches Lernen wird durch konkretes Handeln der beteiligten Person unterstützt.

Zu dieser These finden sich Hinweise aus der Umgebungskognition: Wenn Personen denselben Weg auf verschiedene Arten zurücklegen, erlangen sie unterschiedliches Wissen über den Weg. Je selbstständiger sie einen Weg erfahren, desto hochwertiger ist die dabei erreichte Wahrnehmung. Beim Gehen, Rad fahren oder Auto fahren lernt man also mehr über eine Gegend als zum Beispiel beim Bus fahren (STEA 1973, 115f). Autofahrer können sich an mehr Einzelheiten einer Strecke erinnern als Beifahrer. Das gilt sowohl für Personen, die eine Stadt erst kennenlernen als auch für langjährige Berufspendler, Pendler können sich allerdings an mehr Landmarken entlang von Wegen erinnern als Neuangekommene (GOLLEDGE U. STIMSON 1997, 251ff).

Aktives räumliches Lernen kann nicht nur die Leistung bei der Bewältigung einer vorliegenden räumlichen Aufgabe verbessern, sondern auch die zukünftige Leistung. Räumliches Problemlösen bedeutet nämlich Lernen auf zwei Ebenen: Man erlernt einerseits ein bestimmtes Territorium und verbessert andererseits seine Strategien zum Lösen weiterer Probleme ähnlicher Art (DOWNS U. STEA 1977, 72f).

### 4.4.1 Kognitives Kartieren als Konstruktion

Menschen erlangen räumliche Vorstellungen durch aktives Verinnerlichen der erkannten Information: „Cognitive mapping is not simply a passive process, the operation of which is dictated by the physical pattern of imageability of the spatial environment. Nor is it a process that simply selects information from what is available in the spatial environment. It is an *active* and *constructive* process, often going beyond the information given“ (DOWNS U. STEA 1977, 82).

Die Aktivität beschränkt sich nicht auf die Wahrnehmung, sondern gilt auch für das Abrufen von Information: „Cognitive mapping is a process of both analysis and synthesis. We must be prepared to change the mode of expressing the information as the situation requires. If our attempt to give a stranger verbal directions does not work, we may have to draw a sketch map for him“ (DOWNS U. STEA 1977, 82).

Also spielt auch die Rekonstruktion eine Rolle: „[...] cognitive mapping is a reconstructive organizing process.“ Kognitive Repräsentationen räumlicher Daten sind nicht statisch, sondern werden erst bei Bedarf erzeugt und rekonstruiert. Es können viele Darstellungen desselben Gebietes erzeugt werden, in unterschiedlichen Modalitäten (zum Beispiel bildlich oder als textuelle Beschreibung) (DOWNS U. STEA 1977, 88).

Das Erstellen eines räumlichen Mediums selbst kann wichtiger sein als das Medium als Speicher: „The maps made by members of less alienated societies are different from ours. Often the process is more important than the product“ (WOOD 1993, 40). „During field work in 1989, one Inuk elder told me that he had drawn detailed maps of Hiquiligjuaq from memory, but he smiled and said that long ago he had thrown them away. It was the act of making them that was important, the recapitulation of environmental features, not the material objects themselves“ (RUNDSTROM 1990 in WOOD 1993, 40).

Weil sich Kinder nicht beliebig in unbekanntem Umgebungen bewegen können, müssen sie Orientierung und Navigation vermittelt lernen. Sie tun dies durch das Modellieren einer Umgebung mit Spielzeug. „These toys permit the child to learn to understand, to comprehend, and to cognitively map the properties of this environment ‚in the large.‘ Later in life, of course, many of these same mapping activities (manipulation, modelling, etc.) occur as purely *cognitive* activities“ (DOWNS U. STEA 1977, 77).

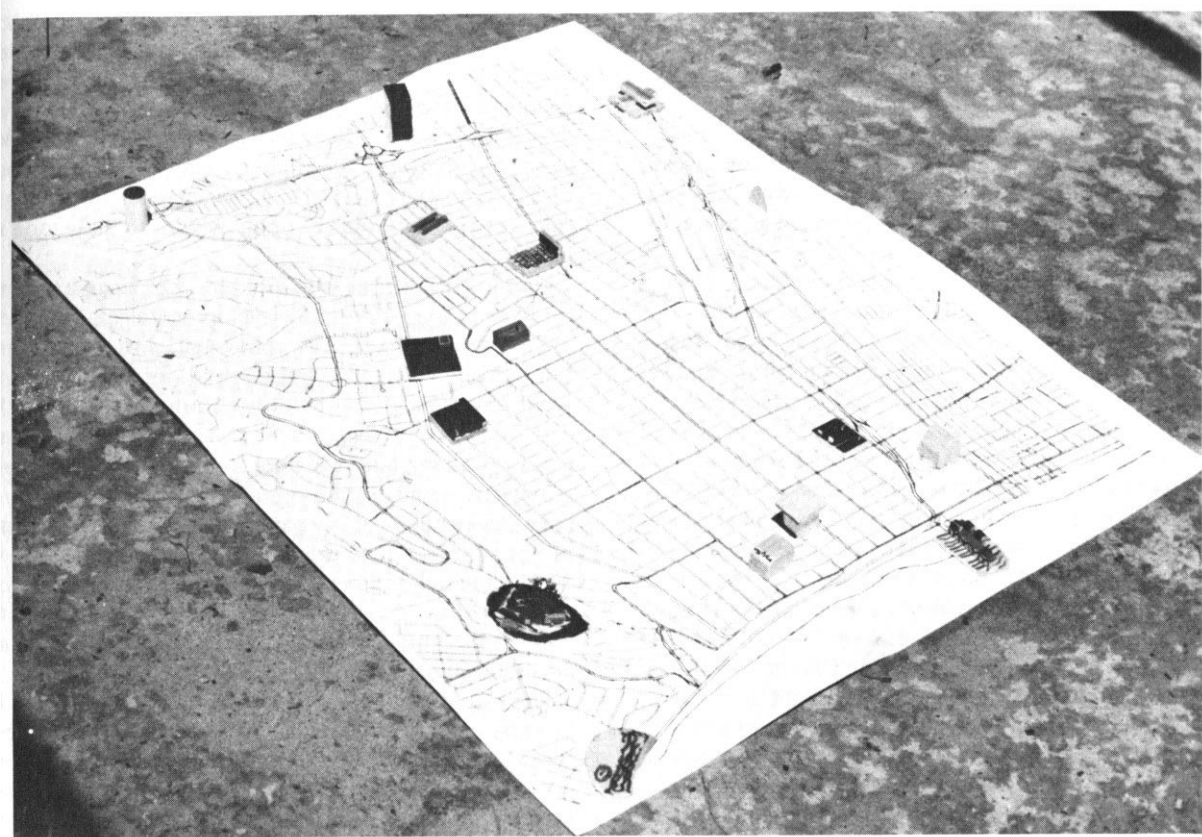


Abbildung 6. Konstruktion mit Objekten einer Stadt auf einer Umrißkarte, ausgeführt durch einen sehenden Erwachsenen (STEA 1973, 115)

#### 4.4.2 Bauen zur Überprüfung des räumlichen Vorstellungsvermögens

Kognitionspsychologen lassen Versuchspersonen häufig Karten zeichnen, um ihre räumliche Vorstellung zu überprüfen. Diese Technik hat den Vorteil, dass sie leicht durchgeführt werden kann. Sie hat jedoch die folgenden Nachteile:

1. Die gezeichneten Karten enthalten weniger Elemente als die verbale Aufzählung von bekannten Orten.
2. Die Fähigkeit zum Kartenzeichnen ist abhängig von der Vorerfahrung mit Karten und der allgemeinen Fähigkeit zum Zeichnen (DOWNS U. STEA 1977, 222).
3. Manche Versuchspersonen empfinden es als bedrohlich, auf einem leeren Stück Papier zu zeichnen (ebd.).
4. Das Zeichnen wirkt sich wieder auf die räumliche Vorstellung aus: beim Zeichnen kann durch räumliches Schließen Wissen abgeleitet werden, welches die Versuchsperson vor dem Zeichnen nicht hatte (BYRNE 1979, 147f).
5. Fehler beim Zeichnen können sich aufaddieren, Karten können unterschiedlich ausfallen, wenn sie von unterschiedlichen Anfangspunkten aus gezeichnet wurden (ebd.).

Eine Alternative zur Überprüfung der kognitiven Fähigkeiten von Versuchspersonen stellt daher die Methode dar, Karten aus physischen, dreidimensionalen Objekten bauen zu lassen (s. Abbildung 6), was sich sowohl für Kinder als auch Erwachsene als sinnvoll herausgestellt hat. Um zu zeigen, wie gut sie eine Karte gelernt haben, sollen beispielsweise Kinder sie auf einer Metallplatte mit Magnetstücken nachbauen, wobei

die Stücke Straßen, Orte und den Fluss darstellen (UNGAR U.A. 1998). Oder Kinder erstellen physische Modelle durch Modellhäuser und Straßenstreifen aus Pappe (BLADES 1997).

GOLLEDGE hat Methoden zusammengetragen, mit denen Psychologen räumliches Wissen überprüfen. Eine Zusammenfassung zeigt Tabelle 4. Sowohl im Sortieren und Gruppieren von Elementen von simulierten Umgebungen als auch im Herstellen und Arrangieren von Modellobjekten und Spielzeug lassen sich Elemente der Externalisierung räumlichen Wissens mit physischen Objekten finden. Im Vergleich zur Verschriftlichung ist der Grad der Symbolisierung dabei relativ klein, es handelt sich bei den externen Darstellungen eher um Modelle als um Karten oder Beschreibungen.

Methoden	Vorgehensweise	Externe Darstellungen
Beobachtung in natürlichen oder Laborsituationen	Beobachtung oder Aufzeichnung von Bewegungen (zum Beispiel Krabbelbewegungen, Suchverhalten, explizites räumliches Verhalten, Begehen eines Weges) durch Versuchsleiter	Berichte Karten Tabellen
	Beobachtung von Verhalten in unstrukturierten „klinischen“ Situationen durch Versuchsleiter	Diagramme Profile
	Versuchspersonen sortieren oder gruppieren Elemente von echten oder simulierten Umgebungen	Listen Tabellen Zusammengesetzte Karten
	Versuchspersonen nehmen in simulierten und/oder echten Umgebungen Rollen an oder führen Handlungen aus	Fotografien Tabellen
	Versuchspersonen arrangieren Spielzeug oder Objekte, die Umgebungselemente oder Modellumgebungen darstellen, Versuchsleiter beobachtet die Reihenfolge der Positionierungen oder von Handlungen	Analoge Modelle
Analyse externer Darstellungen	Versuchspersonen beschreiben eine Umgebung schriftlich	Schriftliche Berichte Kontaktanalysen Elementanalysen
	Versuchspersonen beschreiben eine Umgebung mündlich	Mündliche Berichte Transkriptionen Interviewprotokolle
	Versuchspersonen erstellen Zeichnungen oder Karten	Zeichnungen Karten Quantitative und strukturelle Analysen
	Versuchspersonen arrangieren Spielzeug oder stellen Modelle her, die Umgebungen darstellen	Modelle Spielzeugarrangements
	Versuchspersonen gegen symbolisch die Existenz, den Ort, die Nähe oder anderen räumliche Relationen von Umgebungselementen an	Karten mit Overlays Notationssysteme
	Versuchspersonen identifizieren Fotografien, Modelle usw.	Mündliche Protokolle

Tabelle 4. Methoden zur Abfrage räumlichen Wissens (nach GOLLEDGE 1976, 303ff)

#### 4.4.3 Konstruktives Lernen mit Hilfe des Computers

Aus der Didaktik ist schon lange bekannt, dass sich komplexe räumliche Zusammenhänge auf der Basis von physikalischen oder biologischen Strukturen angemessen durch Konstruieren von physischen Modellen vermitteln lassen, zum Beispiel von Molekülmodellen. Durch Modellierung von Objekten im Computer gibt es aber inzwi-

schen völlig neue Möglichkeiten. Wie es NEGROPONTE unter der Unterschrift „Learning by Doing: Don't Dissect the Frog, Built it“ formuliert: „... a major measure of learning results from exploration, from re-inventing the wheel and finding out for yourself. Until the computer, the tools and toys for these experiences were limited, special-purpose apparatuses, frequently administered with extreme control and regimentation“ (NEGROPONTE 1994).

Der Mathematiker PAPERT ist ein Schüler von PIAGET und hat eine Mathematikdidaktik entwickelt, die auf dem simulierten oder physischen Experimentieren mit geometrischen Modellen beruht. Die Programmiersprache Logo mit ihrer Schwerpunkt einfachen grafischen Ausgabe und der Schildkrötenroboter als physisches Ausgabegerät (s. PAPERT 1980) sind wohl die bekanntesten Entwicklungen von PAPERT. Er hat in Schulen erforscht, wie Schüler mit Logo geometrische Konzepte erlernen können. Zusammen mit der Psychologin TURKLE hat er auch untersucht, welche generellen Herangehensweisen an das Programmieren sich unterscheiden lassen.

TURKLE U. PAPERT berichten über zwei verschiedene Arten der Abstraktion von Wissen und Denken am Beispiel von Erfahrungen von Informatikstudenten und von Schülern beim Programmieren. Sie unterscheiden die „harte“ und die „weiche“ Herangehensweise. Die harte Herangehensweise ist abstrakt, hierarchisch, männlich. Sie führt zu strukturierten Programmieransätzen wie dem Verwenden gekapselter Module und dem Top-Down-Ansatz. Die weiche Herangehensweise ist konkret, nahe am Objekt, weiblich. Sie führt zu Programmieransätzen, wo das schrittweise Aufbauen von Programmen und das Testen von Teilprogrammen im Vordergrund steht, und zum Bottom-Up-Ansatz. Der erste Arbeit entspricht dem idealisierten Vorgehen eines Mathematikers, der zweite Ansatz dem einer Bildhauerin (TURKLE U. PAPERT 1991).

Nach der Stadienlehre PIAGETS (s. Abschnitt 4.3.2) entspricht der weiche Ansatz einem früheren Stadium als der harte Ansatz, einem präformalen im Gegensatz zum formalen Stadium. Nach TURKLE U. PAPERT handelt es sich bei dem formalen Denken nicht um einen Prozess, sondern um einen Stil, der nicht für sich in Anspruch nehmen kann, der höchstentwickelte, also wertvollste zu sein (ebd.).

Computer bieten einen anschaulichen Zugang zu abstrakten Prozessen, vermitteln also zwischen der harten und der weichen Welt. Sie tun dies unter anderem durch Visualisierungen (von der Darstellung der Datenmanipulation bis zu komplexen Simulationen). Sie erlauben Interaktion, nicht nur Programmierern, sondern auch Endbenutzern, zum Beispiel durch grafische Benutzungsoberflächen. Auch zum Lernen können Computer auf diese Weise eingesetzt werden, zum Beispiel durch die von PAPERT entwickelte Programmiersprache Logo und ihr Zeichenobjekt, die Schildkröte, zum Erlernen praktischer Aspekte der Geometrie (s. PAPERT 1980).

Die Schildkröte wird durch relative Adressierung gesteuert. Im Gegensatz zur kartesischen Programmierung in der traditionellen Computergrafik gibt es also eine aktuelle Position auf der Zeichenfläche. Die Schildkröte wird durch interaktive Kommandos von dort aus jeweils zur nächsten Position gesteuert und erlaubt dadurch einen Lernstil, der sich in grafische Objekte quasi hineinversetzt (ebd.). Im Zusammenhang mit räumlichen Vorstellungen wurde diese Herangehensweise im vorletzten Kapitel egozentrisch genannt. Sie entspricht also der Strecken- im Gegensatz zur Übersichtsperspektive.

## 4.5 Konstruktive Exploration durch Blinde

Um die Struktur eines Raumes zu erlernen, muss man ihn zunächst wahrnehmen. Körperliches räumliches Erkunden kann entweder im Nah- oder im Fernraum geschehen. Der Nahraum kann erkundet werden, ohne den Körper an einen anderen Ort zu bewegen. Er ist also der Raum, der hauptsächlich mit den Armen erfasst wird. Der Fernraum kann entsprechend nur durch Fortbewegung erkundet werden. Der Nahraum kann damit auch als haptischer, der Fernraum als Fortbewegungsraum bezeichnet werden. Die Unterscheidung ist besonders wichtig für die Betrachtung räumlicher Fähigkeiten blinder Personen. Im Nahraum können nämlich Objektpositionen relativ zur Position des eigenen Körpers gemessen werden, im Fernraum nicht (UNGAR 2000).

Geburts- und Frühblinde neigen dazu, Positionen im Nahraum relativ zu ihrem Körper zu messen. Wenn die Positionen bezüglich eines externen Bezugsrahmens gespeichert wären, müssten Blinde sich jedes Mal dieses Bezugsrahmens vergewissern, bevor sie ein Objekt greifen könnten. Es ist daher einfacher, bezüglich des Körpers zu referenzieren (UNGAR 2000). Man spricht daher auch von der egozentrischen räumlichen Vorstellung von Blinden.

### 4.5.1 Erstellen und Erkennen von Zeichnungen durch Blinde

Die Psychologie bestätigt die Intuition, wenn sie feststellt: „Die Wiedererkennungsleistung ist normalerweise höher als die Reproduktionsleistung“ (ANDERSON 1995, 224). Dies lässt sich dadurch erklären, dass beim Wiedererkennen vorhandene Informationen nur abgerufen und nicht in einer neuen Form externalisiert werden müssen, wie es bei der Reproduktion der Fall ist.

Aus Untersuchungen zu Zeichnungen von blinden Kindern nach taktiler Exploration ergibt sich, dass die Kinder Objekte anhand von Bewegungen erkennen, die sie beim Tasten ausführen (MILLAR 1994, 218). Diese Schlussfolgerung kann auch aus der zunächst überraschenden Beobachtung gezogen werden, dass blinde Kinder besser Umrisszeichnungen von menschlichen Figuren anfertigen als sie erkennen können (MILLAR 1991), in diesem Fall also die Reproduktionsleistung höher als die Wiedererkennungsleistung ist. Dieses Phänomen erklärt MILLAR weiterhin damit, dass Blinde auf Vorwissen angewiesen sind, wenn sie Objekte durch Tasten erkennen sollen. Wenn sie zum Beispiel Namen von möglichen vorliegenden Objekten wissen, wird ihre Treffsicherheit höher (MILLAR 1994, 218).

Das Erkennen geschieht vor allem anhand von Wissen über die Produktion der taktilen Darstellungen. Dabei geht sowohl die erzeugte Bewegung selbst als auch der Vergleich der vorgestellten Bewegung mit dem Endprodukt in die Produktion ein. Das Ertasten dient also der Bestätigung der Vorstellung, wobei Objektformen als Bewegungen abgespeichert sind. Daher ist die Produktion leichter: Bei ihr ist das jeweilige Objekt schon bekannt. Nicht nur die Bewegung selbst spielt eine Rolle, sondern auch kognitive Vorgänge, innerhalb derer sie ausgeführt wird (MILLAR 1994, 218f). Sehenden Kindern steht Bewegungsinformation ebenfalls als Eingabe für die Erkennung zur Verfügung. Vor allem aber können sie den Sehsinn einsetzen und so aus mehreren Quellen zugleich lernen. Für Blinde ist das Erlernen taktiler Formen daher anstrengender (MILLAR 1994, 219).

DOWNES und STEA beschreiben anekdotisch, welche hohen Leistungen beim motorischen Lernen in Einzelfällen auftreten können: „[...] in one case study a *blind* graduate student drew a more accurate outline map of the U.S.A. than several *sighted* geogra-



phy graduate students! This is no reflection on the sighted student's competence; rather, it emphasizes the constraints of the map-sketching task. The blind student acquired and learned (*encoded*) the cognitive representation through muscle feedback from touching a Braille outline map of the U.S.A. The sketching (*decoding*) employs a similar pattern of motor behavior, involving touch and muscle feedback. The sighted students acquired a representation using an entirely different mode, visual inspection, and verbal coding, and lacked the direct *interactive* experience of the blind student“ (DOWNS U. STEA 1977, 101).

Räumliche Bilder können erlernt werden, sie entstehen also nicht allein durch den Sehsinn. Sie können beispielsweise durch das Abtasten von selbsterstellten taktilen Zeichnungen entstehen, werden sogar durch das reine Vorstellen von Bewegungen gefestigt (MILLAR 1994, 228f). Sehende Kinder können aus modellhaftem Spielzeug, das einen Bauernhof oder Straßen darstellt, leicht räumliche Eigenschaften der Vorlagen dieser Spielzeuge in der wirklichen Welt erlernen. Für blinde Kinder ist diese Art des Lernens prinzipiell auch möglich, es fällt ihnen jedoch wesentlich schwerer. Zwar können blinde Kinder Formen durch Ertasten lernen, sie kennen diese Formen dann jedoch nur in der Größe, die ihnen vorgelegen hat. Die Bewegungen, die nötig sind, um zum Beispiel einen Spielzeugstuhl zu erkennen, unterscheiden sich offensichtlich stark von denen, die nötig sind, einen echten Stuhl zu ertasten (MILLAR 1994, 244).

Dass das beschriebene Lernen blinden Kindern schwerer fällt, bedeutet jedoch nicht, dass modellhaftes Spielzeug ihnen kein Wissen über die wirkliche Welt vermitteln kann. Vielmehr ist wichtig, dass sie zusätzliche Informationen erhalten, die das jeweilige Modell und sein Vorbild verbinden. Das kann beispielsweise durch Demonstration der Ähnlichkeit der Funktion der Objekte geschehen, wenn zum Beispiel gezeigt wird, dass eine Puppe auf einem Spielzeugstuhl sitzen kann, ähnlich wie das Kind selbst auf einem Stuhl sitzen kann. Es ist wichtig, das Kind auf die Ähnlichkeit von Explorationsbewegungen auf kleinem und auf großen Maßstab hinzuweisen (MILLAR 1994, 245).

Bei geburtsblinden Kindern verschiedener Altersstufen besteht ein großer Unterschied in den räumlichen Fähigkeiten, der in diesem Umfang bei sehenden Kindern nicht auftritt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Geburtsblinde mehr Erfahrung brauchen, um gewisse räumliche Phänomene zu erlernen, die durch den Sehsinn unmittelbar vorliegen. Auch hier spielt also das Vorwissen eine Rolle (MILLAR 1994, 247).

Zwar fällt Sehenden also das Erlernen räumlicher Zusammenhänge leichter, aber selbst sehende Erwachsene haben oft Schwierigkeiten mit dem Lesen einer Karte. Daher liegt es nahe zu vermuten, dass auch sie Bedarf an besserer Unterstützung bei der Nutzung räumlicher Medien haben. Ob und wie dies sinnvoll geschehen kann, ist jedoch noch unerforscht (MILLAR 1994, 248).

#### 4.5.2 Bauen zum räumlichen Lernen

CRATTY hat Drahtgittermodelle benutzt, um blinde Kinder im Alter von sieben bis vierzehn Jahren im räumlichen Schließen zu trainieren. Die Kinder sollten dabei zwei benachbarte Seiten eines Dreieckes abgehen und daraus schließen, wo sich die dritte Seite befindet, ohne diese vorher begangen zu haben. Die Kinder konnten die Winkel, die sie einschlagen mussten, an einem Drahtmodell des Dreiecks erlernen. Auf diese Weise haben sie also nach vorheriger Unterweisung Informationen aus einem Modell auf die Größenverhältnisse in der realen Welt übertragen (CRATTY 1967, nach MILLAR 1994, 245f).

YNGSTRÖM beschreibt, wie Kindern taktile Karten nahegebracht werden: Zunächst bauen sie eine kleine Modell-Landschaft aus Knetgummi, physischen Objekten, Wasser in einem kleinen Behälter, usw. Dann wird die Landschaft in eine Schachtel gelegt, die an einer Seite offen ist. Auf die Schachtel wird ein taktiles Zeichenbrett befestigt. Kinder tasten nun mit der einen Hand ihre Landschaft ab und erstellen eine Umrisszeichnung davon mit der anderen Hand auf dem Zeichenbrett. In einer weiteren Übung erstellen sie eine verkleinerte Grundrissabbildung einer größeren Landschaft als im ersten Versuch, müssen also einen Maßstab beachten (YNGSTRÖM 1991, 226ff).

JACOBSEN hat untersucht, wie Blinde, Sehbehinderte und Sehende eine komplexe Route erlernen können. Dazu wurden die Versuchspersonen zunächst entlang der Route geführt, anschließend haben sie auf Punkte entlang der Route gezeigt, eine verbale Beschreibung der Route erstellt, Entfernungen auf der Route abgeschätzt und schließlich ein Modell der Route aus Magnetstücken auf einer magnetischen Wandtafel erstellt. Die Versuchspersonen gaben an, dass das Erstellen der Route aus Magnetstücken ihr Wissen über die Route verstärkt hat: „They suggested that tasks such as pointing and the model building forced them to explore and reconstruct their spatial knowledge, to actively learn and think about the route, and how it all went together“ (JACOBSON U.A. 1998).

### 4.5.3 Konstruktion von Funktionsgraphen

Als Vorstudie zur Entwicklung eines Systems für Blinde zur Erkundung von Funktionsgraphen haben Ramloll u.a. blinde Schüler gebeten, Funktionsgraphen mit physischen Objekten zu konstruieren (RAMLOLL U.A. 2000, 18f), s. Abbildung 7. Dazu wurde ein Brett aus weichem Holz benutzt, auf dem sich ein taktiles Gitter befand. Die Graphen selbst wurden mit Pins und Gummibändern zwischen ihnen konstruiert. Den Schülern schien das Arbeiten mit diesen Graphen als nützlich zum Wahrnehmen und Verstehen von Funktionen (ebd.).

Allerdings haben sich auch eine Reihe von Problemen ergeben: Es bestand die Möglichkeit, dass sich die Schüler mit den Pins verletzten. Die Gummiverbindungen können einen gekrümmten Graphen nur grob annähern (in Abhängigkeit von der Anzahl der Pins). Schließlich erwies sich das Anbringen der Gummis als schwierig, weil die Schüler zunächst keinen Überblick über den Graphen besaßen. Insgesamt war das Konstruieren nur bei Anwesenheit eines Sehenden möglich (ebd.).

## 4.6 Anforderungen an Systeme zur konstruktiven Exploration

Aus den entwickelten Eigenschaften der konstruktiven Exploration und den oben beschriebenen Forschungsergebnissen werden nun Anforderungen an Systeme zur konstruktiven räumlichen Exploration abgeleitet. Die Anforderungen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit für den später folgenden Systementwurf entwickelt. Bei den Anforderungen handelt es sich um solche an die Struktur der zugrundeliegenden Daten, an die Bausteine und die Interaktion mit ihnen und sich aus dem Nichtvorhandensein des Sehsinns ergebende Anforderungen.

Bezüglich der zu erlangenden Informationen und den ihnen entsprechenden Daten ergibt sich die Anforderung, dass sich die Daten überhaupt zur Konstruktion eignen müssen:



Abbildung 7. Konstruktion eines Liniengraphen mit Nadeln und Gummis, Gesamtansicht und Ausschnitt (s. RAMLOLL U.A. 2000)

1. *Aufteilbarkeit der Daten:*

Die Daten müssen prinzipiell in eine leicht verständliche Aufteilung zerlegbar sein. Beispiele für aufteilbare räumliche Daten sind Daten mit Straßen als Teilen.

2. *Aufgeteiltheit der Daten:*

Die zu erkundenden Daten müssen in aufgeteilter Form vorliegen oder leicht in eine solche Form überführt werden können.

3. *Auswählbarkeit von Untermengen:*

Es ist wünschenswert, dass sich Untermengen der Daten auswählen und zum Konstruieren aufteilen lassen. Beispiel für Untermengen sind Straßen, die aus Straßenabschnitten zusammengesetzt werden können.

4. *Flächigkeit der Daten:*

Die Daten müssen zur leichten haptischen Darstellung flächig vorliegen (wie der Grundriss eines Hauses) oder in eine flächige Form überführbar sein (wie ein Ausschnitt der Erdoberfläche).

Weiterhin gibt es Anforderungen an Bausteine und das System zur Anleitung des Bauens:

5. *Zusammenfügbarkeit:*

Teile müssen sich aneinanderfügen lassen.

6. *Angemessene Darstellbarkeit:*

Die Bausteine müssen flexibel genug sein, um verschiedene Objekte damit konstruieren zu können. Sie müssen die Konstruktion von Objekten verschiedener Lagen und Größen erlauben. (Sie dürfen also beispielsweise nicht auf Drehlagen beschränkt sein, die Vielfache von  $90^\circ$  sind, wie es bei Legosteinen der Fall ist.)

7. *Vermittlung der Position:*

Die korrekte Position und Lage der Bausteine müssen von dem System zur konstruktiven Exploration vermittelt werden können.

8. *Schrittweise Konstruierbarkeit:*

Es darf nicht die Kenntnis der Gesamtkonstruktion (eines Überblickes) vorausgesetzt werden, weil die ja gerade vermittelt werden soll.

9. *Ertastbarkeit der Gesamtkonstruktion:*

Die Gesamtkonstruktion muss nach der Erstellung ertastet werden können, um als Ganzes erlernbar zu sein.

Schließlich gibt es Anforderungen, die sich aus den Eigenschaften der nichtvisuellen Darstellung und Bedienung ergeben:

10. *Gefahrlosigkeit:*

Benutzer dürfen durch die Bausteine und die Arbeitsfläche nicht verletzt werden. Dadurch scheidet beispielsweise Nadeln als Bausteine aus.

11. *Haptische Darstellbarkeit:*

Es müssen sich haptische Darstellungen der Teile finden lassen, die nicht nur der Konstruktion dienen, sondern auch von blinden Benutzern gehandhabt werden können.

12. *Haptische Unterscheidbarkeit:*

Unterschiedliche Bausteine müssen taktil unterscheidbar sein, damit ein blinder Benutzer eine Auswahl zwischen ihnen treffen kann.

13. *Nichtvisuelle Steuerbarkeit:*

Die Interaktion mit dem System muss nichtvisuell steuerbar sein, damit ein blinder Benutzer bei der Konstruktion nicht auf einen Sehenden angewiesen ist.

14. *Beständigkeit:*

Bereits verbaute Teile dürfen beim Anfügen weiterer Teile oder beim Ertasten der Gesamtkonstruktion nicht unabsichtlich verschoben werden können.

## 4.7 Zusammenfassung

Am Anfang dieses Kapitels wurde zunächst der für die vorliegende Arbeit zentrale Begriff der konstruktiven räumlichen Exploration definiert als eine Technik zur Erlangung räumlicher Informationen durch angeleitetes stückweises Zusammensetzen einer physischen Repräsentation der entsprechenden Daten mit Hilfe eines interaktiven Computersystems. Die konstruktive Exploration gründet auf Erkenntnissen der Gedächtnis- und Lernpsychologie, Pädagogik und Didaktik, unter anderem von DEWEY und PIAGET.

Es wurde deutlich, dass Tun zu hohen Behaltensleistungen führt und dass das Konzept des handlungsorientierten Lernens mit physischen Gegenständen eine lange Tradition hat. Es wurde beschrieben, dass nicht nur Kinder, sondern auch Erwachsene vom Lernen mit Gegenständen profitieren können. Handlungsorientiertes Lernen hat sich jedoch nicht generell durchgesetzt, unter anderem, weil es (in Schulen) einen hohen Betreuungsaufwand erfordert und sich für eine größere Gruppe von Lernenden nur schwer praktisch lösbare Aufgaben finden lassen, die jeden einzelnen Lernenden interessieren.

Anschließend wurden Untersuchungen zitiert, nach denen räumliches Lernen mental immer eine konstruktive Komponente besitzt und einen umso größeren Effekt hat, je aktiver die betreffende Person mit der Umgebung interagiert. Kinder tun dies häufig modellhaft mit Spielzeug oder in Spielsituationen im Gelände. Es wurde eine Untersuchung vorgestellt, bei der ein Orientierungsspiel eingesetzt wurde. Die Untersuchung hat ergeben, dass sich Schüler danach sicherer in dem entsprechenden Gelände fühlten als nach dem Studium von Karten. Ferner wurde beschrieben, dass

das Erstellen von Modellkarten aus dreidimensionalen Objekten eine überlegene Technik zur Überprüfung der räumlichen Vorstellung einer Versuchsperson darstellt.

Schließlich wurden bereits existierende Ansätze zur konstruktiven Exploration mittels des Computers beschrieben. Dafür wurde zunächst herausgestellt, dass der Computer einen flexiblen Experimentierplatz für Sehende darstellen kann, unter anderem für das auf räumlichem Wissen basierende Lernen. Es existiert bereits eine sich auf PIAGET berufende Tradition der konstruktiven Wissensvermittlung mit Hilfe des Computers, die mit dem Namen PAPERT und seiner Programmiersprache Logo verbunden ist, wie kurz geschildert wurde. Es wurde deutlich, dass der Computer durch Logo gerade eine horizontale Perspektive auf grafische Daten erlaubt, wie virtuelle taktile Karten auch.

Es wurden Untersuchungen zitiert, anhand derer Blinde räumliche Informationen aus taktilen Darstellungen durch die Bewegungen erlernen, die sie beim Ertasten ausführen. Sie können die Informationen auch auf andere Größenverhältnisse übertragen, wenn sie zusätzliche Hinweise erhalten und auf Entsprechungen von Bewegungen im großen und im kleinen Maßstab hingewiesen werden. Es hat sich weiterhin gezeigt, dass Blinde räumliches Grundwissen aus Modellen erlernen bzw. auf anderem Wege erlangtes Wissen mit ihrer Hilfe verbessern und festigen können. Das angeleitete Konstruieren eines Weges, wofür in dieser Arbeit ein interaktives System entwickelt wird, erscheint also als vielversprechender Ansatz zum räumlichen Lernen. Es wurde am Beispiel von Funktionsgraphen beschrieben, wie Blinde auch grafische Darstellungen abstrakter Zusammenhänge mit physischen Modellen erlernen können. Schließlich wurden Anforderungen für die Umsetzung eines Systems zur konstruktiven räumlichen Exploration formuliert, welche die Art der zu vermittelnden Daten, die Eigenschaften von Bausteinen und des mit ihnen verbundenen interaktiven Systems und die speziellen Anforderungen an die nichtvisuelle Darstellung und Systemsteuerung betreffen.



# Methoden und Werkzeuge zur konstruktiven Exploration

In diesem Abschnitt werden Methoden und Werkzeuge für die Interaktion mit virtuellen taktilen Karten und die konstruktive Exploration beschrieben. Um ein entsprechendes System zu entwickeln, müssen Interaktionstechniken gefunden werden, welche die Konstruktion räumlicher Darstellungen erlauben und die im letzten Kapitel formulierten Anforderungen erfüllen. Diese Konstruktion wird nicht nur im Rechner simuliert und auf dem Bildschirm dargestellt, sondern ist von Benutzern mit den Händen auszuführen und zu überprüfen. Daher müssen entweder physische Objekte eingesetzt oder solche simuliert werden.

Im ersten Fall werden speziell gestaltete Bausteine benutzt, deren Position und Lage von einem Computer mittels Bildverarbeitung erkannt werden kann. Unter Anleitung des Computers platziert der Benutzer Objekte und fügt sie zusammen. Angaben zu Elementen der Karte und für das Konstruieren gibt der Computer als Sprache und Klänge aus.

Die zweite Möglichkeit der Umsetzung virtueller taktiler Karten stellt die Simulation physischer Objekte dar. Dazu wird ein spezielles Ein-/Ausgabegerät benutzt, ein sogenanntes Krafrückkopplungsgerät. Ein Benutzer verbindet eine Hand mit einem beweglichen Arm dieses Gerätes. Das Gerät übt Kräfte gegen die Bewegung des Benutzers aus. Diese Gegenkräfte sind in Abhängigkeit eines dreidimensionalen Modelles<sup>1</sup> eines Objektes, welches in den Computer geladen wurde. Die Gegenkräfte werden so erzeugt, dass der Benutzer den Eindruck gewinnt, das dreidimensionale Modell selbst abzutasten.

In diesem Kapitel werden die nötigen Ein- und Ausgabetechniken entwickelt. Zunächst werden jeweils Grundlagen und verwandte Arbeiten betrachtet. Es werden grafische und räumliche Eingabegeräte untersucht. Danach werden Geräte zur taktilen und haptischen Darstellung und vom Computer erzeugte akustische

---

1. ‚Modell‘ im Sinne der Computergrafik, also als geometrische Beschreibung eines dreidimensionalen Objektes.

Ausgaben beschrieben. Es werden Methoden erläutert, mit denen Blinde durch akustisch-haptische Systeme grafische Daten erkunden können.

Es wird beschrieben, wie die hier entwickelten Techniken die ersten der im letzten Kapitel formulierten Anforderungen an Systeme zur konstruktiven Exploration umsetzen. Es werden dann die beiden neuartigen Ansätze für Interaktionstechniken vorgestellt, solche auf Basis von physischen Objekten, deren Lage und Position vom Computer verfolgt werden, und solche auf der Basis von Kraftrückkopplungsgeräten. Es werden die Bildverarbeitungstechniken und die zur haptischen Darstellung und Konstruktion erläutert. Beide Ansätze werden durch akustische Ausgabe ergänzt, sowohl in Form von synthetischer Sprache als auch in Form von Klängen. Es wird jeweils die Umsetzung der restlichen Anforderungen durch die beiden Interaktionstechniken beschrieben. Schließlich werden bestehende und die in dieser Arbeit neuentwickelten Medien zur Vermittlung räumlicher Informationen an Blinde verglichen.

## 5.1 Räumliche Eingabegeräte

Ein System zur interaktiven Darstellung räumlicher Strukturen kann angemessen nur durch räumliche Eingabegeräte bedient werden. Dies gilt erst recht für virtuelle taktile Karten, bei denen räumliche Zusammenhänge durch physische oder virtuelle räumliche Objekte vermittelt werden. Als Einführung werden zunächst grafische Eingabegeräte beschrieben, wie sie zur Steuerung von GUIs eingesetzt werden. Dann werden Positionsgeber beschrieben, die die räumliche und großflächige Eingabe von Positionen erlauben.

### 5.1.1 Grafische Eingabegeräte

Grafische Eingabegeräte für die Benutzung von grafischen Benutzungsoberflächen von Computern (GUIs) sind in Form der Maus weitverbreitet. Historisch gesehen stellt die Maus ein Zusatzgerät dar; lange Zeit war die Tastatur das einzige Eingabegerät. Mit den Cursortasten einer Tastatur können Positionen auch grafisch eingegeben werden, also ohne Eingabe von Koordinatenwerten. Cursortasten erlauben jedoch nur eine diskrete Positionseingabe (FOLEY U.A. 1990, 351), jeder Druck auf eine Cursortaste bewegt einen Cursor um einen festgelegten Schritt weiter. Andere grafische Eingabegeräte arbeiten kontinuierlich.

Tabelle 5 zeigt eine Übersicht von grafischen Eingabegeräten.

	kontinuierlich		diskret	
	absolut	relativ	absolut	relativ
direkt	Touchscreen	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>
indirekt	Tasttablett	Maus	<del>          </del>	Cursortasten

Tabelle 5. Klassifikation von Eingabegeräten  
(zusammengestellt aus FOLEY U.A. 1990, 350f)

Die Maus ist ein relatives und indirektes Eingabegerät. Sie ist indirekt, weil nur die *Änderung* der Mausposition bestimmt werden kann, nicht ihre absolute Position: Gelangt man mit der Maus an den Rand der Mausunterlage, möchte aber den Mauszeiger noch weiter in die entsprechende Richtung bewegen, kann man die Maus ein-



fach von der Unterlage abheben, ohne Kontakt zur Unterlage in die entgegengesetzte Richtung bewegen, sie wieder auf die Unterlage setzen und in der gewünschten Richtung fortfahren. Bewegungen ohne Kontakt zur Fläche werden nicht registriert. Dies gilt nicht für ein absolutes Eingabegerät wie das Tasttablett (GREENSTEIN 1997, 1323ff).

Indirekte Eingabegeräte liegen vor oder neben dem Computer, dienen aber der Festlegung einer Position auf dem Bildschirm. Sie werden gewöhnlich sogar in einer anderen Lage bedient als sich die Anzeige befindet, auf die sie sich beziehen: Sie liegen waagrecht, die Bildschirmanzeige ist senkrecht. Bei einem Tasttablett gibt es keine taktile Bestätigung der Aktionsauslösung an einem bestimmten Ort, wie es das Drücken eines Mausknopfs bietet. Daher sollte jede Eingabe mit einem solchen Tablett akustisch und/oder visuell bestätigt werden (ebd.).

Die Umsetzung der Bewegung eines indirekten Eingabegerätes auf die entsprechende Position auf der Anzeige muss erlernt werden, wobei der grafische Zeiger hilft. Dies kann man an Benutzern beobachten, die zum ersten Mal mit einem solchen Eingabegerät in Kontakt kommen.<sup>1</sup>

### 5.1.2 Räumliche Sensoren

Mit Augmented Reality werden Ansätze bezeichnet, die physische Welt und Computersysteme miteinander zu verbinden. Im Gegensatz zur Virtual Reality wird die physische Welt nicht auf einer Computeranzeige simuliert, sondern durch digitale Technik erweitert. Diese Erweiterung kann einerseits die physische Welt überlagern, indem Angaben gemeinsam mit Objekten der Welt (durch eine Brille oder einen Kopfhörer) wahrgenommen oder auf Objekte der Welt (durch Videoprojektoren) projiziert werden. Andererseits kann Informationstechnik in Objekte der physischen Welt in Form von Sensoren oder Ausgabegeräten eingebettet werden (BEDERSON U. DRUIN 1995, 38).

Als Prototypen von Augmented-Reality-Systemen der ersten Art können Arbeiten von STEVE FEINER und seinen Studenten an der Columbia University gelten (FEINER U.A. 1993). Ubiquitous Computing, übersetzt also „allgegenwärtiger Computereinsatz“, von MARK WEISER am Xerox PARC stellt eine Form der Augmented Reality der zweiten Art dar (WEISER 1993).

Augmented-Reality-Systeme gibt es seit den sechziger Jahren. Erste Forschungsprototypen verwendeten Displays, die am Kopf getragen wurden (Head-Mounted Displays).<sup>2</sup> KRUEGER arbeitet seit Ende der sechziger Jahre an Kunstinstallationen, mit denen Besucher interagieren können. Dabei werden die Besucher über Videokameras aufgenommen und ihre grafischen Abbilder in die Installation zurückprojiziert, angereichert durch computergrafische Räume oder Lebewesen. Eine Installation namens ‚Videodesk‘ hat die Form eines Schreibtisches (KRUEGER 1991).

Zur Umsetzung von Augmented Reality werden immer Positionsgeber benötigt, welche die Position (und Richtung) einer ganzen Person, ihres Kopfes (und Blickwinkels) oder ihrer Gliedmaßen erfassen. BEDERSON und DRUIN haben eine Übersicht sol-

---

1. (Ein direktes und absolutes Eingabegerät war der sogenannte Lichtgriffel, der direkt auf dem Bildschirm geführt werden konnte, s. GREENSTEIN 1997, 1322f. Er war preiswert herzustellen und wurde zum Beispiel von Grafikkarten für die ersten IBM PCs unterstützt, führt aber bei längerer Benutzung zur Ermüdung des Armes. Dies gilt auch für tastsensitive Anzeigeflächen für Bildschirme, die nur für kurze grafische Interaktionen, zum Beispiel für Kiosksysteme, geeignet sind.)

2. Für die erste Arbeit auf diesem Gebiet s. SUTHERLAND 1968.

Technik	Ort	Reichweite	Genauigkeit	Kommentar
Global Positioning System (GPS)	draußen	keine Beschränkung	zehntel Meter	freie Sicht notwendig, nur Position
Funk	drinnen und draußen	mehrere 30 m	mehrere Millimeter	nur Position
elektromagnetisch	drinnen und draußen	<1,5 m	zehntel Millimeter	elektromagnetische Interferenz
Ultraschall	drinnen und draußen	< 1,5 m, 100°	zehntel Millimeter	freie Sicht notwendig
Bildverarbeitung	drinnen und draußen	~ 90°	3 cm	abhängig von der Implementierung
Gyroskop	drinnen und draußen	360°	einige Grad	nur Drehwinkel
Infrarot	drinnen	< 6 m	mehrere 30 cm	freie Sicht notwendig, nur Position, preiswert
Schalter	drinnen und draußen	keine Beschränkung	genau	ein Schalter pro Position, preiswert
Datenhandschuh	drinnen und draußen	Reichweite von Hand oder Arm		nur Hand- oder Armhaltung

*Tabelle 6.* Räumliche Sensoren (basierend auf BEDERSON U. DRUIN 1995, 57)

cher Sensoren zusammengestellt (BEDERSON U. DRUIN 1995, 54ff). Tabelle 6 basiert auf ihrer Zusammenstellung.

Das Global Positioning System (GPS) basiert auf der Ortung spezieller Satelliten durch einen Empfänger auf der Erde und wurde vom amerikanischen Militär entwickelt, damit Soldaten überall auf der Welt ihre Position zuverlässig bestimmen können. Für Augmented-Reality-Systeme ist GPS gewöhnlich nicht genau genug, und die nötige freie Sicht auf die Satelliten kann häufig nicht gewährleistet werden. Funksysteme mit erdbasierten Sendern weisen diese Nachteile nicht auf, die maximale Reichweite ist jedoch geringer.

Augmented-Reality-Systeme in der Forschung benutzen häufig Positionsgeber, die auf Ultraschall oder Elektromagnetismus beruhen. Die bekanntesten dieser Sensoren sind die Tracker der Firma Polhemus. Sie sind in der Lage, neben der Position auch die Richtung zu bestimmen. Gyroskope können nur die Richtung, nicht jedoch die Position bestimmen, was für gewisse Anwendungen ausreicht.

Bereits die Systeme von KRUEGER benutzten Bildverarbeitung, wenn auch mit spezieller Verarbeitungshardware. Heutige Systeme benötigen nur eine oder mehrere Kameras und Digitalisierungshardware im Rechner selbst. Die Leistung von Bildverarbeitungssystemen wird stark durch die eingesetzte Software bestimmt. Mittels beispielsweise in einem Raum angebrachten Infrarotsensoren können kleine Infrarotsender identifiziert werden, die sich jeweils in der Nähe eines Sensors befinden. Damit kann lediglich festgestellt werden, in welchem Gebiet sich ein Sender befindet, wenn dort ein Sensor vorhanden ist. Schalter sind schließlich nur in der Lage, zu bestimmen, ob sich ein Benutzer an einem bestimmten Ort befindet (ebd.).

## 5.2 Kraftrückkopplungsgeräte zur Ein- und Ausgabe

Bei den heutigen Computersystemen dominiert die visuelle Ausgabemodalität. Sie wird in geringerem Umfang ergänzt durch die akustische Ausgabe. Die Hände werden zur symbolischen (Tastatur) und grafischen (Maus) Eingabe eingesetzt, wobei es Bestrebungen gibt, Text nicht mehr durch die Hände sondern durch die Stimme eingeben zu lassen, wofür, so die Hoffnung, der Benutzer weniger trainieren muss.

Grafische Daten stellen ideale Kandidaten für die Wahrnehmung mit den Händen dar, sowohl für Blinde als auch für Sehende. Dazu wurden die sogenannten Kraftrückkopplungsgeräte entwickelt (zunächst zur Unterstützung der grafischen Ausgabe für Sehende). Entsprechend den Druck- und Bewegungssinnen des Menschen unterscheidet man vor allem taktile und Kraftrückkopplung. Kraftrückkopplung kann die Bewegung eines Menschen (zum Beispiel seiner Hand) einschränken, taktile Rückkopplung nicht. Taktile Ausgabegeräte können also nur Oberflächen darstellen, zur Darstellung von dreidimensionalen Körpern werden Kraftrückkopplungsgeräte benötigt.

### 5.2.1 Entwicklung von Kraftrückkopplungsgeräten aus der Robotertechnik

Obwohl sich Kraftrückkopplungsgeräte erst seit kurzer Zeit verbreiten (vor allem in Form von Eingabegeräten für Spiele), können sie auf eine lange Geschichte zurückblicken, die vor die Entwicklung des Konzeptes der Virtuellen Realität reichen (Tabelle 7). Die Motivation für die Entwicklung der ersten Geräte lag im Wunsch nach Verbesserung der Steuerungsmöglichkeit von Telerobotern. Dabei handelt es sich um Roboter, die aus der Ferne über ein ‚Master‘ genanntes Eingabegerät gesteuert werden, wobei der Master gewöhnlich eine dem ‚Slave‘ genannten Aktor analoge Form hat. („Master“ findet sich daher in den Namen einiger der genannten Geräte.) Teleroboter werden in gefährlichen Umgebungen wie solchen mit atomarer Strahlung oder im Weltall eingesetzt (BURDEA 1996, 4f).

Entwicklungszeitraum	Name	Entwickler	Literatur
1952-1954	Argonne Arm	Goertz	GOERTZ U. THOMPSON 1954
1962-1974	Handiman-Exoskelett	General Electric Co.	MOSHER 1964
1979-1993	Salisbury-JPL Master	NASA-JPL	HANNAFORD 1989
1981-1985	Dextrous Master		ZARUDINSKY 1981
1967-1991	GROPE-UNC	Brooks	KILPATRICK 1976
1987-1992	SAPPHIRE Arm	EXOS Co.	MARCUS U. CHURCHILL 1989
1988-1993	Sandpaper	MIT Media Lab	MINSKY U.A. 1990
1991-1995	Phantom	MIT AI Lab	MASSIE U. SALISBURY 1994
1993-1997	Impulse Engine	Immersion Corp.	JACKSON U. ROSENBERG 1995

Tabelle 7. Entwicklung von Kraftrückkopplungsgeräten, nach BURDEA 1996

Die ersten Teleroboter besaßen eine rein mechanische Verbindung zwischen Master und Slave. Dadurch konnte bei der Steuerung auf der Seite des Masters vom Operator gefühlt werden, ob der Slave auf einen Widerstand gestoßen war o.ä., es gab also kinästhetisches Feedback. Eine elektrische oder elektronische Verbindung zwischen Master und Slave erlaubt eine größere Entfernung zwischen den beiden Geräten und den Einsatz größerer Kraft durch den Slave, allerdings verschwindet dadurch das kinästhetische Feedback. Dies wird durch die Erweiterung des Masters zu einem Kraftrückkopplungsgerät mit Sensoren auf Slave-seite und einem Übertragungskanal zwischen Slave und Master wieder eingeführt.

Die in der Tabelle genannten Entwicklungen bis einschließlich des Dextrous Masters von ZARUDINSKY dienten der Steuerung von Slaves durch einen Master, waren also Teleroboter. In dem Projekt GROPE II von 1976 wurde der Master eines Argonne Arms (s. Tabelle) benutzt, der Slave hingegen durch einen Computer simuliert. Dadurch entstand eine Virtual Reality-Umgebung, in diesem Fall zur Interaktion mit virtuellen Bausteinen (BURDEA 1996, 5f). Dieses System war ein Schritt in der langen Entwicklung eines Werkzeuges zum simulierten Zusammenbauen von Molekülen durch BROOKS und Kollegen an der University of North Carolina at Chapel Hill (UNC). Am Anfang der Entwicklung von Krafrückkopplungsgeräten stand also das Konstruieren von Objekten.

Anfang der neunziger Jahre kamen die ersten Krafrückkopplungsgeräte auf den Markt. Die Impulse Engine von Immersion und der Phantom, der von Sensable entwickelt wurde, stellen leistungsfähige, im Vergleich zu früheren Systemen relativ preiswerte Geräte dar. Diese beiden Systeme werden in späteren Abschnitten näher beschrieben.

### 5.2.2 Taktile Ausgabegeräte

Taktile Ausgabegeräte dienen der Darstellung von Daten auf einer Kontaktfläche bzw. über die Beschaffenheit der Fläche selbst (ob sie zum Beispiel glatt oder rau ist). Diese Geräte erlauben die Erkundung oder Feinmanipulation virtueller Objekte (BURDEA 1996, 133). Pneumatische taktile Ausgabegeräte benutzen komprimierte Luft, um gegen die Haut des Benutzers zu drücken, meist an der Hand. Diese Geräte sind einfach, sauber und relativ preiswert, teilweise jedoch schwer und detailarm (BURDEA 1996, 141f). Vibrotaktile Ausgabegeräte wirken entweder groß- oder kleinflächig. Erstere Art kann durch einzelne Lautsprecher oder Spulen, letztere durch den Einsatz vieler, flächig angeordneter kleiner beweglicher Stifte umgesetzt werden (BURDEA 1996, 143f).

Elektrotaktile Geräte benutzen sehr kleine Ströme, die über spezielle Elektroden die Haut anregen (BURDEA 1996, 155f). Diese Geräte wurden als Wahrnehmungshilfen für Blinde und Gehörlose entwickelt (s. KAZMAREK U.A. 1994). Elektrotaktile Geräte besitzen keine beweglichen Teile. Als weitere Vorteile im Vergleich zu vibrotaktilem Geräten sind sie leichter und brauchen weniger Strom. Allerdings können die von elektrotaktilem Geräten benutzten Ströme Benutzer stören oder sogar gefährden. Weiterhin unterliegen sie dem wechselnden elektrischen Hautwiderstand (BURDEA 1996, 156).

Taktile Ausgabegeräte werden von Blinden zur Interaktion mit Computern verwendet. Über sogenannte Braillezeilen können Blinde Texte im Braillecode lesen, die in einem Computer gespeichert sind. Diese Zeilen besitzen meist Stifte, für die jeweils zwei Höhenstufen gewählt werden können. Die Geräte liegen gewöhnlich unter der Tastatur. Sie besitzen Tasten oder Schieber zur Auswahl der auszugebenden Bildschirmzeile und zum Setzen der Cursorposition (WEBER 2000, 95ff).

Geräte für Punktschriftsymbole in Braille können auch für die Ausgabe von Grafiken benutzt werden. Allerdings erlauben diese Geräte häufig nur die Darstellung einer Zeile, die drei bis vier Punkte hoch ist. Zur Darstellung einer größeren Grafik muss jeweils ein der Geräteauflösung entsprechender Bereich ausgewählt werden. Dieser Grafikausschnitt kann verschoben werden, so dass nach und nach die ganze Grafik erkundbar ist. Geräte zur ausschnittweisen Darstellung mit Verschiebung werden virtuelle taktile Ausgabegeräte, Geräte zur Volldarstellung entsprechend reale taktile Ausgabegeräte genannt (FRICKE 1995).

Mit dem Optacon liegt bereits seit Anfang der siebziger Jahre ein Gerät mit virtueller taktiler Anzeige vor (CRAIG U. SHERRICK 1982). An die Ausgabeeinheit für einen Finger ist eine Kamera angeschlossen, die gedruckte Zeichen aufnimmt und auf einem Stiftdisplay vibrotaktil darstellt, es ist also kein zusätzlicher Computer zur Steuerung nötig. Die passive Wahrnehmung der Stifte durch einen statischen Finger führt bei vielen Benutzern zur Ermüdung nach einigen Stunden der Benutzung. Die Ansteuerung der Stifte basiert auf piezokeramischer Technik (WEBER 1995). Virtuelle taktile Displays für den Anschluss an Computer besitzen die Form einer Maus mit einem Stiftdisplay auf der Oberseite oder einer Zeile von Stiftdisplay, welche an einer Stange befestigt ist, so dass der Schlitten vertikal bewegt werden kann (ebd.).

Geräte zur Darstellung größerer Grafiken für Blinde mit Hilfe des Computers gibt es auch schon seit einiger Zeit. In Stuttgart wurde schon seit 1977 daran geforscht (SCHWEIKHARDT 1985). Mitte der achtziger Jahre wurde ein System entwickelt, mit dem Blinde Grafikzeichen des Bildschirmtextsystems erkunden konnten, die nach dem CEPT-Standard kodiert sind. Dazu wurde eine Platte mit 109 mal 59 vom Rechner einzeln ansteuerbaren Stiften mit zwei Höhenstufen benutzt. Es ergab sich also eine binäre Anzeige, ähnlich wie bei Braillezeilen (ebd.).

Für das binäre Ausgabegerät wurden Techniken entwickelt, um Farben zu vermitteln: Zunächst wurden Farbnamen über eine zusätzliche Braillezeile ausgegeben. Weiterhin wurden Pixel der Grafikvorlage, die dieselbe Farbe hatten, jeweils getrennt als Schichten dargestellt. Farbschichten konnten dabei auch verändert dargestellt werden, zum Beispiel vergrößert, verkleinert, als Umriss oder blinkend. Ein Benutzer konnte sogar entlang eines Umrisses geführt werden, indem die Umrisspunkte nacheinander angehoben und wieder gesenkt wurden (ebd.).

Dieses und vergleichbare Geräte sind nicht über das Prototypstadium hinausgekommen, weil dabei kleinste mechanische Bauteile auf engstem Raum angeordnet werden müssen, die zudem leicht verschmutzen können. Schließlich muss die taktile Wahrnehmung blinder Benutzender fein genug sein, damit sie die Darstellungen auf den taktilen Displays ertasten können, wozu Altersblinde selten in der Lage sind.

Ein Beispiel für ein neueres reales taktiles Display ist das von KAWAI und TOMITA (KAWAI U. TOMITA 1996). Das Gerät besitzt die relativ geringe Anzahl von 16 mal 16 Stiften auf einer Fläche von 175 mm mal 175 mm. Die Stifte haben einen Durchmesser von 5 mm, die Entfernung zwischen den Stiften beträgt 10 mm. Das Gerät besitzt den Vorteil, dass die Stifte mehr als die üblichen zwei Höhenstufen einnehmen können: die Stufe kann jeweils zwischen 0 mm und 6 mm gewählt werden. Dadurch sind eingeschränkt auch dreidimensionale Darstellungen möglich (ebd.).

### 5.2.3 Eigenschaften aktueller Kraftrückkopplungsgeräte

Kraftrückkopplungsgeräte wirken wider die Bewegung des Benutzers, müssen jedoch eine freie und möglichst großräumige Bewegung des Benutzers erlauben, wenn kein virtuelles Objekt berührt wird. Kraftrückkopplungsgeräte sind gewöhnlich aufwendiger, schwerer und größer als taktile Ausgabegeräte. Taktile Ausgabe- und Kraftrückkopplungsgeräte können jedoch auch kombiniert werden (BURDEA 1996, 133).

Die Bewegungsmöglichkeit wird zunächst durch die Anzahl der Freiheitsgrade des Systems bestimmt. Zweidimensionale Geräte besitzen zwei, dreidimensionale entsprechend drei Freiheitsgrade. Wenn Kontakt mit einem virtuellen Objekt vorliegt, müssen sie eine starke Kraft ausüben, um die Berührung realistisch erscheinen zu lassen (ohne den Benutzer durch die ausgeübte Kraft zu gefährden). Die Darstellungsqualität ist unter anderem abhängig von der Auflösung der verwendeten Sensoren



Abbildung 8. Phantom 1.5 von Sensable Inc.

und der Frequenz, mit der der aktuelle Zustand des Gerätes gemessen und der neue eingestellt wird. Für eine realistische Darstellung wird eine Frequenz von 600-1000 Hz benötigt, was eine entsprechend hohe Rechenleistung erfordert.

Kleine Krafrückkopplungsgeräte mit großer Auflösung existieren in Form von zweidimensionalen Geräten oder Roboterarmen. Daneben gibt es noch Krafrückkopplungsgeräte in Form von Joysticks, schnurbasierte Systeme, große Geräte, die am Boden oder an der Decke montiert sind und Exoskelette (für die Hand, den Arm oder den ganzen Körper). Joysticks übertragen die Kraft auf die ganze Hand, die einen Griff umfasst und unterliegen immer statischer Reibung. Sie sind daher eher für die Rückkopplung eines echten oder virtuellen Roboters oder Fahrzeuges geeignet, die traditionell über Griffe gesteuert werden.

Schnurbasierte Systeme benutzen Schnüre oder Kabel für die Krafrückkopplung. Sie brauchen einen großen Arbeitsbereich, und ihre Schnüre können die Bewegungsfreiheit des Benutzers einschränken. Am Boden oder der Decke montierte Geräte sind größer, komplexer und teurer als auf dem Schreibtisch montierte (BURDEA 1996, 95). Exoskelette bzw. -teilskelette erlauben eine größere allgemeine Beweglichkeit des Benutzers, bewirken jedoch Ermüdung durch ihr Gewicht (ebd., 113). Handschuhe benötigen zusätzliche Positionssensoren zur Bestimmung der Handhaltung.

Krafrückkopplungsgeräte in Form von Roboterarmen bestehen aus einer drehbaren Basis, auf der ein Arm mit mehreren Gelenken befestigt ist. Sie besitzen gewöhnlich drei Freiheitsgrade.<sup>1</sup> Ein bekanntes Beispiel ist der in Abbildung 8 dargestellte

1. Es gibt allerdings eine Version des Phantom mit sechs Freiheitsgraden, bei der die drei zusätzlichen Freiheitsgrade für die räumliche und Drehlage eines Stiftes am Ende des Armes genutzt werden.



Abbildung 9. Laparoscopic Impulse Engine von Immersion

Phantom von Sensable, der ursprünglich am MIT von MASSIE und SALISBURY entwickelt worden war (MASSIE U. SALISBURY 1994).

Der Arbeitsbereich des Phantom Modell 1.5 beträgt  $19,5 \text{ cm} \times 27 \text{ cm} \times 37,5 \text{ cm}$ , seine Sensoren besitzen eine Auflösung von  $0,03 \text{ mm}$ . In der Abbildung ist am Ende des Phantomarmes ein Körbchen für die Aufnahme des Fingers erkennbar. Anstatt mit diesem Körbchen ausgestattet ist der Phantom auch mit einem Stift am Ende des Armes erhältlich, der zusätzlich einen Knopf zum Auslösen von Aktionen besitzt, einem Mausknopf vergleichbar.

Geometrische Modelle für die computergrafische Darstellung können nicht einfach für die virtuelle taktile Darstellung mit dem Phantom benutzt werden, selbst wenn sie vereinfacht wurden. Zunächst besitzt der Phantom keine Sensoren, um die Lage der Hand selbst zu messen. Daher ist es mit ihm möglich, die Hand in eine Position zu bringen, in der sie sich innerhalb eines virtuellen Objektes befindet (KÖNIG 1999, 24).

COLWELL, PETRIE und Kollegen haben die Wahrnehmung virtueller taktiler Objekte im Vergleich zur Geometrie der Objekte untersucht (COLWELL U.A. 1998). Es wurde auch überprüft, ob sich die Wahrnehmung von Sehenden und Blinden unterscheidet. Als Versuchsteilnehmer wurden neun Blinde und dreizehn Sehende eingesetzt. Sechs der Sehenden waren weiblich, die restlichen Versuchspersonen männlich. Für die Versuche wurde das Kraftrückkopplungsgerät Impulse Engine 3000 (s. Abbildung 9) von Immersion eingesetzt, mit dem Objekte nicht nur von außen, sondern auch auf einfache Art von innen ertastet werden können. (Objekte können auch mit dem Phantom von innen ertastet werden, wenn der Innenraum in den entsprechenden geometrischen Modellen modelliert wurde.)

Zunächst haben COLWELL U.A. untersucht, wie gut Sehende und Blinde simulierte Oberflächentexturen erkennen können. Dazu wurden Texturen unterschiedlicher Wellenlänge und fester Amplitude eingesetzt. Die Teilnehmer sollten die Texturen nach Rauheit sortieren. Es hat sich herausgestellt, dass Blinden dies besser gelang als Sehenden. Allerdings haben einige Blinde Texturen kleinerer Wellenlänge als rauher empfunden als solche größerer Wellenlänge. Diese Fehleinschätzung trat bei den sehenden Versuchspersonen nicht auf, allerdings gelang es nur fünf der dreizehn, überhaupt eine Änderung festzustellen.

In der zweiten Studie hatten die Versuchspersonen die Aufgabe, Darstellungen verschiedener einfacher geometrischer Objekte mit der Impulse Engine zu ertasten. Danach sollten sie die erfüllten Objekte aus einer Reihe von Vergleichsobjekten auswählen, die Sehenden durch Zeichnungen und Blinden durch taktile (zweidimensionale) Darstellungen präsentiert wurden. Die Vergleichsobjekte haben sich in Größe, Rotations- und Scherwinkel unterschieden.

Die Versuche haben ergeben, dass sowohl Blinde als auch Sehende die virtuellen taktilen Objekte in der jeweils anderen Darstellung nur bedingt richtig erkennen konnten. Sehenden fiel die Erkennung des richtigen Objektes bezüglich der Scherung leichter als Blinden. Es fiel jedoch beiden Gruppen schwer, das Objekt richtiger Größe zu identifizieren. Es trat das Phänomen auf, dass die Innengröße von ertasteten Objekten über-, die entsprechende Außengröße hingegen unterschätzt wurde.<sup>1</sup> Dies galt vor allem bei Objekten mit weniger als 1,5 cm Kantenlänge. Ebenso wurden Rotations- und Scherwinkel von Objekten falsch beurteilt.

Bei der Durchführung der beschriebenen Versuche ergab sich weiterhin, dass Teilnehmer von taktilen Objekten abrutschten und dadurch die Orientierung verloren, das heißt, erst nach einer Weile ohne Objektkontakt wieder auf ein Objekt trafen. Dieses Phänomen wird als ‚Verlorengehen im haptischen Raum‘ bezeichnet. Die meisten Versuchsteilnehmer lernten jedoch nach kurzer Zeit, immer mit einem Objekt Kontakt zu halten.

In der genannten Versuchsreihe wurde schließlich untersucht, wie gut Sehende oder Blinde komplexere Objekte erkennen können, indem sie diese mit der Impulse Engine ertasten. Dazu wurden relativ einfache Objekte benutzt, die aus Grundkörpern (vor allem Quadern) zusammengesetzt waren. Im Gegensatz zu den ersten Versuchen wurden die komplexeren Objekte weder von Sehenden noch von Blinden erkannt, selbst dann nicht, als die zu erkennenden Objekte vorgegeben wurden. Die Teilnehmer selbst erklärten dies dadurch, dass sie zwar die Einzelteile der Objekte erkennen, diese aber nicht zu einem Gesamtobjekt verbinden konnten. Weiterhin trat das Problem auf, dass das virtuelle Instrument zwischen die Grundkörper der Objekte gelangen und dort stecken bleiben konnte.

Die Autoren ziehen folgende Schlüsse aus ihren Versuchen: Texturen zur Unterscheidung von Objekten sollten in virtuellen taktilen Welten vorsichtig eingesetzt werden, weil Benutzer unterschiedliche Texturen nur schwer auseinander halten können. Größere virtuelle Objekte können leichter erkannt werden als kleine. Benutzer nehmen die Größe eines Objektes unterschiedlich wahr, je nachdem, ob sie es von innen oder von außen ertasten. Wenn es also notwendig ist, dass Benutzer die Größe genau beurteilen sollen, darf die Skalierung der Objekte nicht linear sein. (Die Autoren geben jedoch keine Hinweise darauf, wie die Skalierung beschaffen sein muss.)

Die Autoren schließen daraus, dass komplexe Objekte rein haptisch nicht vermittelt werden können, das Hinzufügen anderer Medien daher notwendig ist. Die meisten Benutzer kommen relativ schnell mit einem Krafrückkopplungsgerät zur Erkundung virtueller Welten zurecht, Hinweise zu Explorationsstrategien können jedoch hilfreich sein.

---

1. Die Autoren nennen dieses Phänomen „Tardis-Effekt“. ‚Tardis‘ ist der Name einer Zeitmaschine in der britischen Science-Fiction-Serie *Dr. Who*, wobei diese Maschine von außen die Gestalt einer Telefonzelle hat, von innen jedoch aus mehreren Räumen besteht.



## 5.3 Akustische Ausgabe

Räumliche Daten können angemessen nur durch räumliche Medien dargestellt werden, weil nur so die räumlichen Relationen erhalten bleiben und dadurch nicht sequenzialisiert werden müssen. Neben dem haptischen können räumliche Angaben auch akustisch aufgenommen werden. Zusätzlich zur taktilen Darstellung werden Daten in virtuellen taktilen Karten daher akustisch ausgegeben.<sup>1</sup>

### 5.3.1 Eigenschaften computergesteuerter akustischer Ausgaben

Akustische Ausgaben für den Computer lassen sich in Klang- und Sprachausgaben unterteilen. Beide Ausgabearten besitzen spezifische Vor- und Nachteile. Bezüglich der Darstellung können Klänge mit Bildern, Sprachausgaben mit Texten verglichen werden, denn Sprachausgaben sind seriell, Klänge hingegen können auch erkannt werden, wenn sie gemeinsam erklingen. Sprachausgaben können nur verstanden werden, wenn die jeweilige Sprache beherrscht wird, Klänge sind prinzipiell universell. Sprachausgaben sind im Vergleich zur vermittelten Datenmenge relativ lang, Klänge (bei entsprechend vereinbartem Code) kurz. Mit Klängen können absolute Werte nur schlecht dargestellt werden; wenn ein Aspekt eines Klanges verändert wird, ändern sich andere ebenfalls (BREWSTER 1994, 39). (Solche Klangaspekte werden weiter unten besprochen.)

Klang kann synthetisch erzeugt oder aus bestehenden Aufnahmen abgespielt werden (s. OBERQUELLE 1994, 114). Synthetischer Klang muss vor dem Abspielen berechnet werden, kann jedoch flexibel zur Laufzeit eines Programmes variiert werden. Aufgenommener Klang hört sich natürlicher an. Um die Vorteile dieser beiden Arten zu verbinden, kann aufgenommener Klang auch als Basis der Klangerzeugung dienen und jeweils parametrisiert abgespielt werden. So werden beispielsweise musikalische Klänge durch Synthesizer mit Wellentabellen erzeugt (‘wavetable synthesis‘). Selbst natürlich klingende Sprachausgabe kann auf diese Weise erzeugt werden, wenn auch mit weniger Flexibilität als vollsynthetische Sprachausgabe.

Geräte zur Klangerzeugung können in interne und externe Geräte unterschieden werden. Aufwendige Berechnungen wurden lange Zeit in externe Geräte (bzw. Hardwareerweiterungen in Form von Steckkarten) ausgelagert und werden dies teilweise heute noch, zum Beispiel für die Erzeugung von professionellem Raumklang. Ehemals relativ (zur Prozessorleistung) aufwendige Berechnungen für einfachen (das heißt, zur Unterstützung der grafischen Ausgabe von Spielen geeigneten) Raumklang und zur Sprachausgabe werden jedoch zunehmend von Standardhardware zur allgemeinen Klangerzeugung übernommen, bei PCs in Form der sogenannten Soundkarten, die in fast allen Standard-PCs eingebaut sind.

### 5.3.2 Akustische Ausgaben in Benutzungsoberflächen

Klangausgaben in grafischen Benutzungsoberflächen sind inzwischen verbreitet. In den meisten Fällen stellen sie jedoch nur Ergänzungen zu grafischen Ausgaben oder Spezialeffekte ohne nennenswerten Hinweischarakter dar. Dies lässt sich u.a. durch spezifische Nachteile von Klängen erklären: Sie sind öffentlich (die Benutzung von Kopfhörern zwingt Benutzer, sich an den Rechner ‚anzuschließen‘ und führt zum Abschluss von Umgebungsgeräuschen) und vergänglich (BREWSTER 1994, 45).

1. Die akustische Wahrnehmung wurde bereits im gleichnamigen Abschnitt 2.2.1 behandelt.

GAVER hat schon 1989 eine Erweiterung des Dateiverwaltungsprogrammes ‚Finder‘ des Apple Macintosh zum ‚SonicFinder‘ vorgestellt, der auf ‚Auditory Icons‘<sup>1</sup> beruht (GAVER 1989, 67). Bei den Auditory Icons handelt es sich um Allerweltsgeräusche, die Ereignissen im Computer zugeordnet sind. Dadurch sollen diese leicht von Benutzern erkannt werden können (ebd.). Es werden jedoch nicht nur computergenerierte Ereignisse, sondern auch beispielsweise Benutzeraktionen wie das Ziehen eines grafischen Objektes mit der Maus und die Größe einer Datei durch Auditory Icons dargestellt (ebd., 78).

GAVER beschreibt, dass seine Oberfläche von Benutzern angenommen wurde. Er gibt jedoch auch Nachteile an. Dazu gehört die Schwierigkeit bei der Auswahl eines Klanges für einen Vorgang, den es in der wirklichen Welt (außerhalb der des Computers) nicht gibt (zum Beispiel einen Diskettenfehler), der in der wirklichen Welt keinen Klang produziert oder dessen Klang keine Information beinhaltet (ebd., 89). Als Lösung schlägt er den Einsatz von Klangeffekten (wie in Filmen) und von Metaphern zwischen Ereignissen in der echten und solchen in der Modellwelt vor (ebd., 91).

BLATTNER U.A. nennen die von ihnen benutzten akustischen (nichtsprachlichen) Mitteilungen über ein Objekt oder Ereignis in einem Computer ‚Earcons‘ (BLATTNER U.A. 1989, 13). Sie unterscheiden darstellende, abstrakte und halbabstrakte Earcons (BLATTNER U.A. 1989, 16). Darstellende Earcons sind von bekannten Objekten abgeleitet (ebd., 16), sie entsprechen also den beschriebenen Auditory Icons von GAVER. Abstrakte Earcons sind Earcons, die ein Objekt oder eine Operation darstellen, die nur schwer durch eine Abbildung dargestellt werden können (ebd., 17f). Halbabstrakte Earcons schließlich besitzen Elemente von darstellenden und abstrakten Earcons oder sind darstellende Earcons, die zur Abstraktion hin vereinfacht sind (ebd., 18). BLATTNER U.A. geben an, wie durch die Variation von den aus der Musiktheorie bekannten Parametern Rhythmus, Tonhöhe, Klangfarbe, Register und Dynamik Familien von Earcons auch von Nichtmusikern erzeugt werden können (BLATTNER U.A. 1989, 23).

SIKORA U.A. haben Auditory Icons und andere Earcons bezüglich ihrer Abbildung auf bestimmte Funktionen und ihre Akzeptanz durch Benutzer untersucht (SIKORA U.A. 1995, 220). Versuchspersonen wurden Klänge zu Funktionen in einem GUI vorgestellt, wobei das GUI für sie sichtbar war. Dabei wurden sowohl naturalistische als auch musikalische Klänge benutzt. Es hat sich herausgestellt, dass Benutzer die naturalistischen Klänge als angenehmer empfanden, die musikalischen Klänge aber besser mit Funktionen in Verbindung bringen konnten (SIKORA U.A. 1995). SIKORA U.A. kommen zu dem Ergebnis, dass Auditory Icons als Rückmeldung für eine Benutzungsoberfläche weniger, abstrakte musikalische Klänge hingegen eher geeignet sind (ebd., 221).

Neben der Kodierung der Position einer Tonquelle, die außer den weiter oben beschriebenen natürlichen Phänomenen symbolisch auch über die Tonhöhe umgesetzt werden kann, lässt sich die relative Entfernung von Benutzern zu einer Tonquelle auf natürliche Weise durch die Tonintensität darstellen (BEGAULT 1994, 85ff): PITTA-RELLO u. CELANTO beschreiben ein System zur Exploration einer dreidimensionalen Darstellung mit einem vordefinierten Weg (als virtuelles Museum), bei dem der Benutzer akustisch über seine Position entlang des Weges informiert wird. Dies geschieht durch zwei Töne. Die Lautstärke des ersten ist proportional zur Entfernung

---

1. Dieser Name soll nicht nur an Icons von grafischen Benutzungsoberflächen, sondern auch an den in dieser Arbeit bereits beschriebenen Peirceschen Zeichenbegriff erinnern (GAVER 1989, 87).

vom Anfang des Weges, die Lautstärke des zweiten proportional zur Entfernung zum Ende (PITTARALLO U. CELANTO 2000).

PITT U. EDWARDS beschreiben Versuche zur Mausbenutzung in einer akustischen Benutzungsoberfläche ohne visuelle Ausgabe (PITT U. EDWARDS 1995). Sie haben die benötigte Zeit zur Auswahl von Objekten gemessen, die entweder eindimensional (als Liste) oder zweidimensional (in einem Kreis) angeordnet waren. Angaben zu den dem Mauszeiger nächsten Objekte (ihre Namen) wurden entweder über Sprache oder sich wiederholende Klänge von Musikinstrumenten dargestellt.

Im eindimensionalen Fall wurde nur der Klang des Objektes unter dem Cursor, in einem anderen Versuch die Klänge von allen Objekten ausgegeben. Wenn alle Klänge ausgegeben wurden, dann wurde der Klang des Objektes unter dem Cursor am lautesten und auf beiden Kopfhörern ausgegeben, die anderen Klänge entsprechend leiser und nur auf einem Lautsprecher, je nachdem, ob sie sich links oder rechts von dem aktuellen Objekt befunden haben (ebd.).

Diese Versuche haben ergeben, dass die eindimensional angeordneten Objekte am schnellsten gefunden werden konnten, und zwar wesentlich schneller als die zweidimensional angeordneten. In Abhängigkeit von der akustischen Ausgabe entweder durch Sprache oder durch Klang gab es nur geringe, wenn auch deutliche Zeitunterschiede: In den meisten Fällen waren die Versuchspersonen bei der Ausgabe von gesprochenen Namen schneller, bis auf den Fall der parallelen eindimensionalen Suche, wo sie bei der Klangausgabe schneller waren (ebd.). Bezüglich der Klangausgabe erklären die Autoren das Ergebnis damit, dass im zweidimensionalen Fall die Klangausgabe wichtiger wird, weil sie beide Dimensionen abdecken muss, die nötigen Angaben aber (zumindest mit der gewählten Kodierung) nicht vermitteln können (ebd.).

BREWSTER hat ebenfalls den Einsatz von Klängen in Benutzungsoberflächen untersucht. Er kommt zu dem Schluss, dass musikalische Klänge besser zur Unterscheidung einer gewissen Anzahl akustischer Elemente („Earcons“) geeignet sind als Sinustöne. Diese Klänge können auf der Basis von Klangfarbe leicht auseinander gehalten werden, weniger gut auf der Basis von Tonhöhe. Rhythmus ist ebenfalls geeignet, wenn sich die jeweiligen Rhythmen hinreichend unterscheiden. Bei Einsatz von Lautstärke ergibt sich die Schwierigkeit, dass sie von den Systemeinstellungen abhängt (BREWSTER 1994, 120ff).

### 5.4 Interaktionstechniken für die konstruktive Exploration

Blinde sollen Systeme zur konstruktiven Exploration selbstständig bedienen können. Die Forderung nach selbstständiger Benutzung bedeutet unter anderem, dass ein entsprechendes System nicht von einem Sehenden gesteuert werden muss (im Gegensatz zu Systemen zur Erzeugung von taktilen Karten aus digitalen Karten, die nur von Sehenden bedient werden können, s. z.B. MICHEL 2000). Weiterhin gehört dazu, dass beim Erkunden so wenig wie möglich auf traditionelle Eingabegeräte wie Tastatur oder Maus zurückgegriffen werden muss, weil der Wechsel zwischen Eingabegeräten für Blinde noch aufwendiger ist als für Sehende, die das neue Eingabegerät zunächst orten müssen.

Zur freien Exploration einer virtuellen taktilen Karte erlaubt ein entsprechendes System dem Benutzer zunächst, die Gesamtkarte taktil zu erkunden. Dabei operieren die Hände auf einer Arbeitsfläche, und der Benutzer erhält Rückmeldungen über berührte Objekte. Daten werden in virtuellen taktilen Karten mit konstruktiver Explo-

ration akustisch ausgegeben. Bei den Daten handelt es sich einerseits um statische und andererseits um veränderliche. Statische Angaben wie Namen von Straßen werden über Sprache, dynamische Angaben wie Entfernungen zu einem Cursor (der Zeigefingerspitze) über Klänge ausgegeben.

Die Kodierung veränderlicher Daten über Klänge muss zwar von Benutzern des Systems erlernt werden, weil sie weniger ‚natürlich‘ ist als die Sprachausgabe. Andererseits sind geeignete Klänge viel kürzer als Worte, und die Änderung eines Wertes lässt sich leichter aus Änderungen eines Klangaspektes wie der Tonhöhe oder der Pulsfrequenz eines sich wiederholenden Klanges erkennen als durch gesprochene Angaben von Veränderungen.

Klänge sind nur bedingt dazu geeignet, absolute Werte zu vermitteln, auch wenn sie durch eine eindeutige Abbildung von Wert auf Klangaspekt erzeugt wurden. Bei virtuellen taktilen Karten mit physischen Objekten handelt es sich bei den zu vermittelnden absoluten Werten hauptsächlich um Entfernungen und Positionen. Entfernungen und Positionen in einer Dimension können noch relativ leicht akustisch dargestellt werden, wenn sie sich als zu überbrückende Entfernungen aus der Interaktion ergeben und der Benutzer die Änderung der Klänge mit seinen Bewegungen verbinden kann. Er weiß dann, ob er sich einem Ziel nähert oder sich von ihm entfernt. Das Wissen der absoluten Entfernung ist dann nicht nötig.

Bei der Interaktion mit virtuellen Karten ist das Erreichen eines bestimmten Punktes sekundär. Die Positionen der Kartenelemente stehen fest. Die Cursorposition muss daher nicht absolut, sondern kann relativ vermittelt werden. Elemente können durch Exploration gefunden werden. Wenn bestimmte Elemente ausgewählt werden sollen, werden sie durch physische oder virtuelle Objekte markiert: Im Fall der physischen Objekte einfach dadurch, dass diese zur Erkundung benutzt und auf das zu markierende Kartenelement gestellt werden. Im Falle virtueller Objekte auf analoge Weise oder durch das Platzieren eines virtuellen Objektes an der aktuellen Cursorposition.

Im Rahmen der Konstruktion müssen die Entfernung zu einer Strecke und entlang der Strecke zum Ziel nicht vermittelt werden, wenn die Strecke selbst konstruiert wird. Die bisher gelegte Strecke kann als Referenz dienen. Die Entfernung entlang der Strecke ergibt sich aus der Zahl der bisher gelegten Bausteine. Der Anlegepunkt für den nächsten Baustein ergibt sich aus dem Endpunkt des vorherigen. Es muss dann nur noch die richtige Lage des neuen Bausteins vermittelt werden.

Um den Benutzer bei der konstruktiven Exploration anleiten zu können, muss ein Computersystem ihm mitteilen, an welche Position er Bausteine legen soll. Diese Position wird dem Benutzer handlungsorientiert nicht symbolisch (z.B. durch Sprachausgabe von Koordinaten) sondern in der Interaktion haptisch dargestellt. Um dem Benutzer den Verlauf einer Strecke vom Start zum Ziel zu vermitteln, wurde in dieser Arbeit der Ansatz gewählt, die Steine nacheinander vom Ziel beginnend legen zu lassen. Die Position eines Bausteines wird durch einen Anlegepunkt und die richtige Drehlage um diesen Punkt eindeutig definiert.

Der erste Anlegepunkt ergibt sich aus der Position des Startpunktes, den der Benutzer selbst gewählt hat. Die folgenden Anlegepunkte ergeben sich jeweils aus dem Endpunkt des letzten gelegten Steines. Die Anlegepunkte sind also immer eindeutig festgelegt und können vom Benutzer durch Tasten gefunden werden. Es muss also nur noch die korrekte Drehlage vermittelt werden.

Die Positionierung eines Bausteines beginnt mit dem Anlegen an dem entsprechenden Punkt. Der Benutzer kann den Stein dann um diesen Punkt drehen und enthält vom Computersystem eine Rückmeldung darüber, ob der Stein richtig liegt. Entspre-

chend dem eingesetztem Ausgabegerät erfolgt diese Rückmeldung akustisch oder haptisch.

Tabelle 8 zeigt die Eignung digitaler Kartendaten auf Straßenbasis für die Konstruktion.

Nr.	Anforderung	Umsetzung
1	<i>Aufteilbarkeit der Daten</i>	Karten können in Straßen zerlegt werden.
2	<i>Aufgeteiltheit der Daten</i>	Karten im Vektorformat liegen bereits aufgeteilt vor. Eventuell muss die Topologie berechnet werden.
3	<i>Auswählbarkeit von Untermengen</i>	Miteinander verbundene Straßensegmente auch unterschiedlicher Straßen können Untermengen bilden.
4	<i>Flächigkeit der Daten</i>	Daten liegen flächig vor oder können auf die Fläche projiziert werden.

Tabelle 8. Umsetzung der Anforderungen an räumliche Daten zur konstruktiven Exploration durch Kartendaten

## 5.5 Konstruktive Exploration mit physischen Objekten

### 5.5.1 Verwandte Arbeiten

HOLMES U.A. haben im Rahmen des MoBIC-Projektes untersucht, inwieweit taktile Karten durch einen Computer mit einem Tasttablett ergänzt oder ersetzt werden können (HOLMES U.A. 1995). Um die Benutzung von Explorationskarten<sup>1</sup> mit Hilfe eines Computers zu vereinfachen, können sie über ein Tasttablett bedient werden. Eine einfache taktile Karte aus Schwellpapier wird dabei auf das Tasttablett gelegt. Straßennamen können durch das Drücken von Straßenlinien durch die Karte hindurch abgefragt werden, Hinweise zur Fortsetzung einer Route durch Drücken eines speziellen Informationspunktes auf der Karte und Zusatzinformationen unter Benutzung der Computertastatur (ebd., 84f).

Eine taktile Karte war für den Versuch so skaliert, dass die gewünschte Route möglichst groß ist, was einen Maßstab von 1:1230 bzw. 1:1700 ergab. Die Karte enthielt das jeweilige Straßennetzwerk und Elemente entlang der Route. Informationspunkte wurden als gefüllte Punkte von 2 mm Durchmesser, Straßen als kontinuierliche Doppellinien der Stärke 0,3 mm dargestellt, wobei der Linienabstand proportional zu Wichtigkeit der jeweiligen Straße gewählt wurde (ebd., 85f). Das Tasttablett hatte eine Oberfläche von DIN A3 und 64 × 64 Eingabefelder, was einer Auflösung von etwa einer Fingerspitze entspricht (ebd.).

Als Alternative zu den aufwendig zu erzeugenden taktilen Karten wurde auch mit einem taktilen Gitter auf dem Tasttablett experimentiert, welches nur eine Orientierung über die Position der Hand auf dem Tasttablett und damit auf der nur gedacht vorhandenen Karte lieferte. Dieses Gitter bestand aus einer Schwellpapierauflage mit 8 mal 8 Zellen. Wenn durch das Gitter eine Position gedrückt wurde, die sich auf der Route befand, wurde sprachlich das Wort ‚Route‘ ausgegeben. Ein Weg konnte durch Suchen des nächsten Routenschrittes verfolgt werden. Das benutzte System gab auch Hinweise über die einzuschlagende Richtung und die Umgebung zur Fortsetzung der Route aus (ebd., 85f). Durch Drücken von festgelegten Tasten auf der PC-Tastatur

1. Karte mit einer Strecke und seiner Umgebung

konnte der Name der aktuellen Straße und die Fortsetzung der Route abgefragt, die letzte Ausgabe wiederholt oder die aktuelle Ausgabe abgebrochen werden. Es wurde auch mit einer Variante des Systems experimentiert, bei der das Tasttablett vollständig leer war, die Hand sich also nur durch Ertasten des Rahmens und durch Kinästhetik (Rückmeldung durch Nerven in Muskeln und Gelenken) orientieren kann.

Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass das Wiederfinden einer Position auf einem leerem Tasttablett, über das eine digitale Explorationskarte bedient werden konnte, für die Versuchspersonen sehr schwierig war. Beim Einsatz von Explorationskarten mit taktilem Raster bzw. taktile Karte als Auflage für das Tasttablett konnten jedoch Versuchspersonen einen Weg erfolgreich erkunden. Dies wurde durch Tests des Verständnisses und der mentalen Repräsentation der Route und der Fähigkeit zu ihrem tatsächlichen Ablaufen gemessen (ebd., 86).

Beim Lernen mit der taktilen Karte verstrich deutlich weniger Zeit, bis sich die Versuchspersonen sicher genug fühlten, die Route abzugehen. Außerdem erreichten sie eine bessere mentale Präsentation der Route und kannten nicht nur eine Folge von Abschnitten wie beim Einsatz des Gitters (ebd., 86f). Dennoch war überraschend, dass die Route ohne eine physische Darstellung der Karte erlernt werden konnte, die indirekte Darstellung einer digitalen Karte in einer audio-taktilen Interaktion von Benutzer und System also ausgereicht hat.

Wenn Mustererkennung ein integraler Bestandteil künftiger interaktiver Systeme ist (in RAUTERBERG U. STEIGER 1996 wird sie in diesem Zusammenhang als „Key Technology“ bezeichnet), dann sollte diese Technik auch für Sehbehinderte nutzbar werden, um dadurch leichter mit einem Computer zu interagieren. Mustererkennung wird unter anderem in der Bildverarbeitung eingesetzt. Benutzer können mit einem Computer über Bildverarbeitung interagieren, indem der Computer darüber hinaus Benutzeräußerungen wie Sprache oder Gesten erkennt. Optische Gestenerkennungssysteme entwachsen langsam dem Experimentierstadium, obwohl sich bisher keine Erkennungsmethode durchgesetzt hat. Es existieren viele Ansätze zur optischen Erkennung von Handgesten (s. PAVLOVIC U.A. 1997, 679).

ISHII u. ULMER haben mit dem ‚Tangible Geospace‘ eine Landkarte (des Campus‘ ihrer Universität) für Sehende geschaffen, die mit beiden Händen manipuliert werden kann. Die Karte wird auf einem Tisch dargestellt. Zur Manipulation dienen physische Modelle von Gebäuden des Geländes; beim Abstellen auf der Karte wird diese so verschoben, dass die Gebäudeposition unter dem Modell erscheint. Wenn ein zweites Modell zusätzlich auf die Karte gestellt wird, wird sie entsprechend angepasst. Um zu verhindern, dass Manipulatoren so bewegt werden, dass keine sinnvolle Karte dargestellt werden kann (wenn zum Beispiel zwei Manipulatoren gedreht werden), sind die Manipulatoren physisch miteinander verbunden (ISHII U. ULLMER 1997). Der Tangible Geospace erlaubt also Sehenden die Manipulation einer Kartendarstellung, es gibt jedoch keine Unterstützung zum Erlernen von räumlichen Zusammenhängen.

Die Arbeit von ISHII U. ULMER geht auf ein System zur Manipulation von Objekten einer grafischen Benutzungsoberfläche durch Würfel als abstrahierte ‚Griffe‘ zurück, als deren Vorteil unter anderem die taktile Rückmeldung genannt wird, die sie bieten. Anstatt über ein einzelnes Zeigeelement, zum Beispiel eine Maus, kann das Programm über mehrere Objekte bedient werden. In einem Zeichenprogramm kann zum Beispiel ein Rechteck mit zwei Händen aufgezogen werden, s. Abbildung 10 (FITZMAURICE U.A. 1995).

Mit dem System ‚KnowWhere‘ stellen KRUEGER U. GILDEN eine Anwendung des ‚Videodesk‘ von Krueger vor, die geographische Daten für Blinde verfügbar macht (KRUEGER U. GILDEN 1997). Die akustische Ausgabe dient dem Ersatz des Tastsinnes,

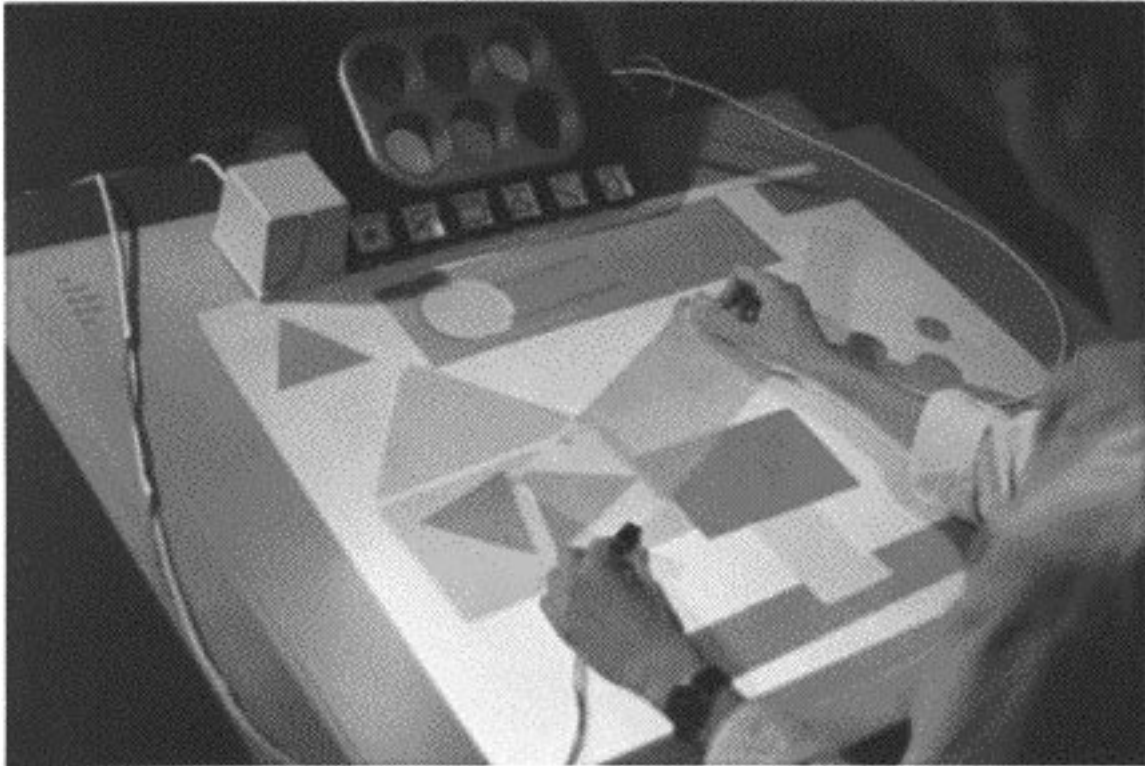


Abbildung 10. GraspDraw (FITZMAURICE U.A. 1995)

geographische Daten werden nur indirekt dadurch ‚hörbar‘ gemacht, dass ein Geräusch ertönt, wenn eine Hand ihr imaginäres Abbild berührt.

Der VideoDesk besteht aus einer Tischfläche, über der eine Videokamera montiert ist. Da Tisch und Kamera fest zueinander stehen, handelt es sich um ein absolutes Eingabegerät. Die Kamera nimmt bei KnowWhere die Bewegungen der Zeigefinger von Benutzern auf. Die Finger agieren auf einer virtuellen, also nicht optisch dargestellten Karte. Ihre Bewegungen führen zu akustischen Ausgaben in Abhängigkeit von der Art des geographischen Elementes, welches sie überdeckt haben. Diese Ausgaben sind entweder sprachlich in Form von Elementnamen oder als Töne (welche sich aber immer nur auf ein Element beziehen). Die virtuelle Karte kann so vergrößert werden, dass ein Gebiet von größerem Interesse den ganzen Tisch einnimmt.

In einem Test mit blinden Versuchspersonen wurden großflächige geographische Daten dargestellt. Wenn beispielsweise ein einziger Bundesstaat der USA erkundet wird, führt die Berührung des VideoDesk innerhalb der Grenzen des Staates zu einem kurzen bestätigenden Klick, die Berührung der Grenze zu einem metallischen Geräusch und die Berührung außerhalb der Grenze zu keiner Ausgabe eines Geräusches. Das System wurde mit fünf geburtsblinden Personen mittleren Alters getestet. Vier haben das System gerne benutzt. Sie konnten absolute Positionen leicht finden und danach Papp-Puzzlestücke der gelernten geographischen Formen erkennen. Zwei konnten außerdem „annehbare“ Zeichnungen der Formen anfertigen.

### 5.5.2 Objekterkennung und Verfolgung mittels Bildverarbeitung

Um den Benutzer bei der Konstruktion mit physischen Objekten anleiten zu können, muss der Computer die Position der Objekte erkennen können. Dazu wird in dieser Arbeit Bildverarbeitung eingesetzt. Im Vergleich zu anderen Techniken der Umset-

zung von Positionsgebern (s. Abschnitt 5.1.2) haben Bildverarbeitungstechniken den Vorteil, dass es sich bei dem Sensor um ein weit verbreitetes Eingabegerät in Form einer Kamera handelt und die zu verfolgenden Objekte relativ einfach gestaltet sein können, weil es nur auf ihr Aussehen ankommt, sie also kein Signal aussenden bzw. ein Magnetfeld o.ä. verändern müssen. Außerdem ist die Erkennung hinreichend genau.

Es ist kein System zur Verfolgung mehrerer Objekte erhältlich, welches in den in dieser Arbeit entwickelten Systeme hätte eingesetzt werden können. XVision beispielsweise ist zwar eine Bibliothek zur Bilderkennung, die im Quellcode erhältlich ist und mit der Objekte sowohl nach Bildübergängen als auch nach Farben erkannt werden können (s. HAGER U. TOYAMA 1998). Sie ist allerdings auf die interaktive Auswahl von zu erkennenden Objekten ausgelegt, ist stark auf die zur Entwicklung benutzte Hard- und Software zugeschnitten (SGI mit IRIX und X11) und wurde seit einiger Zeit nicht mehr an neuere Entwicklungsumgebungen angepasst. Da sich die Portierung und Erweiterung der bereits existierenden Systeme als zu aufwendig herausgestellt hat, wurde ein System zur Verfolgung selbstgestalteter farbiger Objekte vom Autor entwickelt.

#### 5.5.2.1 Segmentierung

Es werden nun einige Grundlagen der Farbbildverarbeitung erläutert, auf deren Basis ein System zur Verfolgung mehrerer farbiger Objekte entwickelt wurde, dass auch Objekte gleicher Farbe getrennt verfolgen kann. Am Anfang der Objekterkennung in digitalen Bildern mittels Bildverarbeitung steht die Segmentierung (SONKA U.A. 1999, 123ff). Ziel der Segmentierung ist die Unterscheidung zwischen Objekt und Hintergrund und von Objekten untereinander. Als Vorstufe zur Segmentierung können Grundelemente wie Kanten, also Objektübergänge, in dem Bild bestimmt werden. Es können aber auch bereits im ersten Schritt der Segmentierung geometrische Objekte wie Linien oder Kreise erkannt werden. Dabei werden also geometrische Informationen ausgenutzt. Objekte können auch nach Farben segmentiert werden. Diese Farbsegmentierung bietet sich dann an, wenn Objekte bekannter Farbe vor einem unbekanntem Hintergrund oder zwischen anderen Objekten heraus sicher erkannt werden sollen (ebd.).

In der klassischen Bildverarbeitung werden nur Grauwertbilder betrachtet. Dies erklärt sich zunächst daraus, dass Graubild-Kameras vor Farbkameras auf den Markt kamen und die entsprechenden Bilder daher als einzige verfügbar waren (RUSS 1994, 350f). Dies gilt auch heute noch für einige bildgebenden Verfahren in der Medizin, zum Beispiel die Röntgentechnik. Bei der Graubildverarbeitung fallen weniger Daten an, sie ist daher effizienter. Weiterhin interessieren häufig nur Übergänge zwischen unterschiedlichen Bildflächen, die sich auch in Grauwerten niederschlagen. Schließlich lassen sich viele Verfahren zur Grauwertbildverarbeitung auch für die Farbbildverarbeitung einsetzen, wenn man sie beispielsweise auf jeden Farbkanal eines Bildes anwendet. (Farbbilder stellen dann Mehrbereichsbilder dar, ebd.).

Farben werden im Computer als Punkte in sogenannten Farbräumen angegeben. Bei einem Farbmodell handelt es sich um ein dreidimensionales Farbkoordinatensystem und der Festlegung einer sichtbaren Untermenge von Farben des Koordinatensystems, welche die möglichen Farben ergibt (FOLEY U.A. 1990, 584). Beim RGB-Farbraum handelt es sich um einen Einheitswürfel des dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystems (ebd.).

Die Segmentierung auf Basis des RGB-Farbraums ist in der Bildverarbeitung weit verbreitet, weil er auch von Farbbildschirmen benutzt wird. Sein Name rührt daher,



dass jeder Farbpunkt eine rote, grüne und blaue Komponente besitzt. In Framegrabbern zur Umwandlung von Videosignalen in digitale Bilder wird der RGB-Farbraum häufig direkt unterstützt. Da Bilder in ihm leicht verarbeitet und angezeigt werden können, wird er häufig auch zur Farbsegmentierung benutzt.

Da Digitalisierungen von Kamerabildern häufig RGB-Bilder liefern, gibt es Versuche, aus RGB-Werten durch lineare Umformungen Farben eines anderen Farbraumes zu bestimmen, in welchem sich beispielsweise Helligkeitsänderungen nicht auf alle drei Komponenten niederschlagen, wie es bei RGB-Werten der Fall ist, weil dadurch das entsprechende System stark anfällig für Lichtschwankungen ist. Wenn die Helligkeit sich nur in einer Dimension äußert, kann diese bei der Segmentierung häufig ignoriert werden, wodurch sich ein zweidimensionaler Farbraum ergibt.

SCHRÖTER benutzt zur Segmentierung beispielsweise die folgenden beiden Farbkomponenten:

$$I_1 = R - B \quad (\text{GL 2})$$

$$I_2 = \frac{2G - R - B}{2} \quad (\text{GL 3})$$

Sie enthalten keine Helligkeitsinformationen, sind gegenüber Helligkeitsveränderungen also unempfindlich und sind leicht aus den RGB-Werten, die der Framegrabber liefert, zu berechnen (SCHRÖTER 1997). Allerdings stellt keine der beiden Dimensionen einen echten Farbwert dar, so dass aus den Farben der Objekte ihre Darstellung in diesem Modell nur experimentell bestimmt werden kann. Zum anderen kann ein bestimmter Bereich von Farben, innerhalb dessen die Farbwerte eines Objektes liegen, nicht scharf getrennt werden, weil weder Sättigung noch Helligkeit getrennt festgelegt werden können.

Ein bekanntes Farbmodell, bei dem Intensität und Helligkeit getrennt vorliegen, ist das HSI-Modell (RUSS 1994, 41ff). Neben der Sättigung (S) und der Intensität (I) liegt der Farbton (H, von englisch Hue) als Koordinate vor. Dieses Farbmodell ist eher benutzer- als computerorientiert, weil damit das Mischen von Farben durch einen Maler modelliert werden kann, der seine Farben aus Grundtönen und Weiß zusammenstellt. Im Gegensatz zum RGB-Würfel hat der HSI-Raum die Form eines Kegels, bei dem die Höhe die Intensität, die Entfernung senkrecht zur Mittelachse die Sättigung und die Richtung auf einer zur Grundfläche parallelen Kreisfläche den Farbton darstellt. (Bei Sättigung mit Wert Null ist der Farbton daher nicht definiert.) Das HSI-Modell ist weniger computerorientiert in dem Sinne, dass Farben aufwendig in dieses Modell zum Beispiel aus dem RGB-Modell umgerechnet werden muss (ebd.).

Die bisher besprochene Farbsegmentierung basiert darauf, dass aus dem benutzten Farbraum (RGB oder HSI) jeweils ein Quader für jedes zu erkennende Objekt gewählt wird. Ein Bildpunkt wird als einem Objekt zugehörig betrachtet, wenn sein Farbwert in dem Quader des Objektes liegt. Diese Segmentierungsmethode ist einfach zu realisieren, hat jedoch zwei Nachteile: Die Bestimmung eines Farbunterraumes muss manuell geschehen und ist nach jeder Änderung der Lichtverhältnisse anzupassen. Bereiche in einem dreidimensionalen Farbraum können allerdings nur bedingt interaktiv ausgewählt werden, für den HSI-Farbraum kann sich die Auswahl andererseits gewöhnlich auf die HS-Fläche beschränken (RUSS 1994, 351ff). Weiterhin stellen quaderförmige Unterräume kein günstiges Modell der Farbwerte eines Objektes dar.

Anstatt die für die Segmentierung eines Objektes benutzte Farbe durch einen Unterraum eines Farbraumes anzugeben, können auch einige prototypischen Farb-

werte (aus einem Bild) ausgewählt werden, aus denen der Computer dann ähnliche Farbwerte eines Objektes aus Bildern ermittelt. Die Klassifikation von Daten als Einteilung des Datenraumes in Unterräume von Daten einer Klasse auf der Basis von prototypisch eingeteilten Datensamples heißt überwachtes Lernen (MITCHELL 1997).

Je nach Lernverfahren können Farbbereiche entstehen, die keinen Quader darstellen. Anstatt durch jeweils ein Intervall in den drei Dimensionen können Farbwerte auch durch andere Mengen zu einem Objekt zugeordnet werden. Eine häufig praktikablere Möglichkeit bilden sogenannte Fuzzy-Mengen, bei denen sich Intervallgrenzen auch überlappen können (s. BENSaid U.A. 1996 für Anwendungen der Fuzzy-Logik für die Segmentierung).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Möglichkeiten ausgelotet, Regeln für die Erkennung eines Objektes teilautomatisch zu bestimmen (KLOSE U. SCHNEIDER 2001). Es wurde untersucht, wie durch teilüberwachtes Lernen Fuzzy-Regeln erzeugt werden können, um Bilder zu segmentieren. Dazu wurden handsegmentierte Farbwerte aus Beispielbildern benutzt.

Neuartig an dem entwickelten Ansatz ist die Verwendung der Minimal Description Length (MDL) zur Klassifikation von Farbwerten. Die MDL stellt eine Metrik zum Vergleich verschiedener Klassifikationen derselben Daten dar (RISSANEN 1983). Aus MDL-Vergleichswerten können jedoch keine Parameter für die Optimierung der Klassifikation abgeleitet werden. Daher wird bei dem hier vorgestellten Ansatz auf eine evolutionäre Optimierungsstrategie (CARSE U.A. 1996) zurückgegriffen. Nach Training mit handsegmentierten Bildern, die gleichzeitig Steine, Hände, die Unterlage und Störungen in Form von Schatten usw. enthalten haben, war das Verfahren in der Lage, 7 von 8 Steinen eines Testbildes zu erkennen (KLOSE U. SCHNEIDER 2001). Die entwickelten Methoden sind also vielversprechend, allerdings noch nicht für die Echtzeiterkennung einsetzbar.

### 5.5.2.2 Merkmalsberechnung

Nach der Segmentierung müssen die Merkmale der erkannten Objekte bestimmt werden. Trägheitsmomente werden in der Bildverarbeitung klassischerweise zur Formanalyse benutzt. Sie können jedoch auch bei zur Bestimmung von Position und Drehlage von Objekten benutzt werden. Eine Übersicht findet sich bei PRATT (PRATT 1991, 636ff), für eine kurze Einführung s. Anhang B.

BRÖCKL-FOX stellt einen Ansatz vor, bei dem Gesten nach Momenten klassifiziert werden. Bei dem Gestenerkennungssystem von BRÖCKL-FOX wird zunächst ein Schwellwert aus dem Farbhistogramm eines Bildes abgeleitet, mit dessen Hilfe wiederum eine Kontur errechnet wird (BRÖCKL-FOX 1995, 26f). Diese wird in Momente überführt, indem die Kontur als massebehafteter Draht betrachtet wird, es werden also nur die Konturpunkte, nicht alle Handpunkte zur Berechnung herangezogen. Aus den Momenten werden der Ort der Hand im Dreidimensionalen bestimmt (ebd., 30). Die Drehlage der Hand (ebd., 38ff) und die Klasse der Handhaltung werden anschließend aus Signaturen berechnet, bei denen es sich um Abbildungen der Handkonturen in einen eindimensionalen Raum handelt. Dazu werden Abstände von Konturpunkten zum errechneten Handmittelpunkt in regelmäßigen Winkelabständen bestimmt (ebd., 52ff).

Dieser Ansatz erlaubt das Erkennen mehrerer Gesten. Die darauf basierenden Algorithmen sind so effizient, dass sie selbst auf einem weniger leistungsfähigen Computer mit Intel 80486-Prozessor das für die Interaktion hinreichend schnelle Erken-

nen von 76,9 ms bei sechs verschiedenen Gesten erlauben, also etwa 13 Gesten pro Sekunde (ebd., 7), bei einer Erkennungsrate von 97,4% (ebd., 63).

### 5.5.2.3 Eigener Ansatz zur Objekterkennung

Die genannten Methoden der Objekterkennung in Farbbildern sind prinzipiell dazu geeignet, verschiedenfarbige Objekte zu erkennen, wie sie in dem hier beschriebenen System in Form von Bausteinen eingesetzt werden. Das bisher beschriebene System ist jedoch nur dafür ausgelegt, ein einziges Objekt zu erkennen. Es ist daher noch zu klären, wie mehrere Objekte gleichzeitig erkannt werden können.

Wenn die zu erkennenden Objekte unterschiedliche Farben tragen, können ihre jeweiligen Positionen und Lagen in einem Durchlauf durch das Bild über Momente erkannt werden. Dazu werden die Zwischenwerte für die Momentberechnung aus für jedes mögliche Objekt getrennt verwaltet. Bei jedem Punkt wird entschieden, zu welchem Objekt er gehört. Die entsprechenden Summen für die Berechnung des Objektes werden dann erhöht.

Praktisch können unter Normallicht nicht mehr als fünf bis sechs Farbtöne mit einem Bildverarbeitungssystem getrennt wahrgenommen werden, weil auch eine homogene Farbfläche durch Rauschen, Schatten und nichthomogene Beleuchtung nach Aufnahme und Digitalisierung nichthomogene Werte erzeugt. Um die Steine vom Untergrund und von der Hand zu trennen, sind entsprechend weniger Bereiche möglich.

Da für das Bauen eines Weges mehr als sechs Klötzchen benötigt werden, können diesen Klötzchen nicht unterschiedliche Farben zugewiesen werden. Für die Erkennung von Position und Lage gleichfarbiger Objekte ist daher eine Erweiterung des beschriebenen Algorithmus nötig. Sie besteht darin, jeweils benachbarte Punkte zu betrachten, um die Fläche für die Momentberechnung zu erhalten. Pixel desselben Farbbereiches, die nicht zusammenhängen, werden dann unterschiedlichen Objekten zugeordnet.

Das Betrachten aller Punkte eines Objektes auf Basis von Nachbarschaftsbeziehungen wird *Connected component labelling* genannt (PITAS 1993, 277ff). Ein geeigneter lokaler Algorithmus stellt die anschaulich ‚Grasbrand‘ genannte Methode dar. Dabei wird das Bild durchlaufen wie bei dem vorherigen Algorithmus. Wenn dabei jedoch ein Pixel gefunden wurde, dessen Farbe in den Farbbereich eines Objektes fällt, werden ab dieser Position alle räumlich benachbarten Pixel verfolgt, die in denselben Farbbereich fallen und damit zum selben Objekt gehören (ebd.).

### 5.5.3 Interaktion durch physische Objekte

Der Einsatz physischer Objekte erlaubt die konkrete Handhabung von Kartenelementen. Der Benutzer kann daher langvertraute Techniken der Manipulation einsetzen, kann also Objekte mit beiden Händen greifen und ihre Form ertasten. Er kann sowohl den aktuellen Baustein als auch seine Anlegefläche berühren, was mit dem weiter unten vorgestellten Krafrückkopplungsgerät nicht möglich ist.

Zur Erkundung einer Karte wird zunächst die Karte in das System geladen. Sie wird an die Größe des von der Bildverarbeitung erkannten Arbeitsbereiches und die Größe des grafischen Ausgabefensters angepasst. Der Arbeitsbereich ist abhängig von der Befestigung und Einstellung der Kamera und wird dem Benutzer durch eine Unterlage vermittelt. Bei der Skalierung bleiben die Seitenverhältnisse der Karte erhalten, um

den Benutzer nicht durch eine Verzerrung der Karte zu verwirren. Dadurch füllt eine Karte nicht den ganzen Arbeitsbereich aus.

Bei der freien Erkundung der Karte können Steine zur Markierung eingesetzt werden. Wenn ein Baustein auf die Unterlage gelegt wird, erfolgt eine Ausgabe von Angaben zu dem Kartenobjekt, welches sich an der entsprechenden Stelle befindet. Auf diese Weise können Start und Ziel einer Strecke bestimmt werden. Daraus wird vom System eine Strecke berechnet. Zum Legen einer Strecke hat der Benutzer mehrere Streckensteine einer bestimmten Länge zur Auswahl. Die Strecke wird vom System so angepasst, dass sie mit den vorhandenen Steinen nachgelegt werden kann, sie wird also generalisiert.

Das System teilt ihm über synthetische Sprache mit, welcher Stein als erstes benutzt werden soll. Der Benutzer steckt diesen Stein auf den Anfangsstein und dreht ihn dann solange um den Stift des Anfangssteins, bis der Stein in der richtigen Position liegt. Die Abweichung von und das Erreichen der richtigen Position teilt das System dem Benutzer akustisch mit. Wenn der Stein noch nicht richtig liegt, ergibt sich ein Klang, welcher von der Entfernung zur richtigen Drehlage abhängt. Wenn der Benutzer den Stein dreht, hört er die Änderung des Klanges und erkennt daraus Drehrichtung und -winkel.

Bausteine zur konstruktiven Exploration müssen speziellen Anforderungen genügen: Sie müssen sowohl vom Benutzer haptisch unterschieden als auch von der Bildverarbeitungskomponente sicher erkannt werden können. Sie müssen von Blinden gefahrlos gehandhabt werden können. Sie müssen aneinander einrasten, um eine Strecke schrittweise legen zu können. Schließlich müssen sie auf der Unterlage haften, damit sie nicht unabsichtlich verschoben werden können, müssen andererseits aber leicht in die richtige Position drehbar sein.

Tabelle 9 zeigt die Umsetzung der Anforderungen zur konstruktiven Exploration durch ein System, welches physische Bausteine verwendet. Es zeigen sich Einschränkungen bezüglich der angemessenen Darstellbarkeit, weil nur eine bestimmte Anzahl von Bausteingrößen verfügbar sein kann.

## 5.6 Konstruktive räumliche Exploration mit simulierten Objekten

### 5.6.1 Verwandte Arbeiten

Eine frühe Anwendung von mittels Computern gesteuerten Krafrückkopplungsgeräten war das Zusammenbauen von Molekülen (und das Zusammenbauen mit Klötzchen als Vorstufe), s. Seite 74. Dabei stand allerdings nicht das Lernen bekannter räumlicher Zusammenhänge im Vordergrund, die ja quasi nur Darstellung für die chemischen Zusammenhänge sind, sondern das Entwickeln neuer Moleküle. Auf dem Weg zu entsprechenden Systemen wurden zunächst Programme entwickelt, mit denen virtuelle Bausteine zusammengesetzt werden konnten.

Mit dem Krafrückkopplungsgerät Phantom wurde schon früh nicht nur das Ertasten von 3D-Objekten, sondern auch das interaktive Gestalten getestet (MASSIE 1998, 63). In diesen ersten wie auch in den meisten späteren Modellierungssystemen für den Phantom wird das Bearbeiten von Modelliermasse simuliert. Diese Metapher lässt sich leicht mit einem einzigen Phantom-Gerät mit seinem punktförmigen Cursor umsetzen: Das Modell wird durch Ausübung von Druck oberhalb eines gewissen

Nr.	Anforderung	Umsetzung
5	<i>Zusammenfügbarkeit</i>	Bausteine lassen sich durch Formschluss aneinanderfügen.
6	<i>Angemessene Darstellbarkeit</i>	Bausteine verschiedener, festgelegter Größen können eingesetzt werden.
7	<i>Vermittlung der Position</i>	Die Position wird nach Einrasten am Vorgänger durch akustische Darstellung der Drehlage vermittelt.
8	<i>Schrittweise Konstruierbarkeit</i>	Es wird jeweils nur die richtige Lage des aktuellen Steines vermittelt.
9	<i>Ertastbarkeit der Gesamtkonstruktion</i>	Nach der Konstruktion ergibt sich eine Bausteinkette, die ertastet werden kann.
10	<i>Gefahrlosigkeit</i>	Die Steine haben abgerundete Kanten, der Verbindungsstift ist stumpf.
11	<i>Haptische Darstellbarkeit</i>	Die vermittelten Streckensegmente werden durch längliche Bausteine dargestellt, die sich angenehm anfühlen.
12	<i>Haptische Unterscheidbarkeit</i>	Der Start- (mit Stift), der End- (ohne Stift) und die Streckensteine unterschiedlicher Größe lassen sich jeweils haptisch erkennen.
13	<i>Nichtvisuelle Steuerbarkeit</i>	Die Interaktion zur Konstruktion kann nichtvisuell erfolgen, einschließlich der Auswahl einer Strecke und der Weiterschaltung zum nächsten Stein durch Betätigung eines externen Schalters.
14	<i>Beständigkeit</i>	Die Bausteine haften mit Magneten auf der metallischen Arbeitsfläche.

Tabelle 9. Umsetzung der Anforderungen zur konstruktiven Exploration durch das System mit Bausteinen

Schwellwertes deformiert. Dadurch können zum Beispiel Rillen in ein Modell eingefügt werden (ebd.).<sup>1</sup>

Die Beschränkung auf einen einzigen Manipulationspunkt für einen Finger lässt die Simulation von Modelliermasse nur in geringem Maße realistisch erscheinen, weil zum Beispiel der Vergleich von Eindrücken auf verschiedenen Handstellen nicht möglich ist. Durch Einsatz mehrerer Phantom-Geräte können mehrere Finger mit dem Objekt interagieren, dies lässt sich jedoch aus mechanischen Gründen höchstens auf vier Geräte steigern (ebd., 64f), weil sich die Phantomarme sonst gegenseitig stören. Es lassen sich zudem nur wenige Anwendungen finden, bei denen der Einsatz von mehr als einem Phantom finanziell gerechtfertigt erscheint.

Zur Unterstützung eines Designers beim Erstellen oder Überarbeiten eines 3D-Modelles bietet der Einsatz eines Phantom jedoch die Vorteile, dass gewisse physikalische Eigenschaften des Modelles wie Ausdehnung und Oberflächenbeschaffenheit dem Designer besser vermittelt werden. Das Arbeiten im (häufig zweidimensional dargestellten) Raum kann außerdem durch das haptische Positionieren und das Auflösen von visuellen Mehrdeutigkeiten erleichtert werden (ebd., 65). Umgekehrt gilt jedoch auch, dass die visuelle Überprüfbarkeit in Form eines visuellen 3D-Modells auf dem Bildschirm sinnvolles Arbeiten mit dem Phantom erst möglich macht und haptische Mehrdeutigkeiten auflöst.<sup>2</sup>

1. Die Autoren beschreiben nicht, wie diese Deformation von Objekten technisch umgesetzt wird. Das für den Phantom erhältliche SDK sieht derartige Operationen zur Verformung eines Objektes jedenfalls nicht vor (SENSABLE 1999).

2. Beim Verzicht auf die visuelle Darstellung sind also spezielle Techniken nötig, welche die Auflösung dieser Mehrdeutigkeiten auf andere Art erlauben. Solche Techniken werden noch vorgestellt.



Abbildung 11. Das Krafrückkopplungsgerät Excalibur

ADAMS, KLOWDEN und HANNAFORD haben ein System entwickelt und evaluiert, mit dem mittels eines 3D-Krafrückkopplungsgerätes das Zusammenbauen von Lego-Modellen simuliert werden kann, inklusive grafischer Anzeige (ADAMS u.A. O.J.; für einen ähnlichen Ansatz s. YOUNG u.A. 1998). Bei dem Krafrückkopplungsgerät handelt es sich um eine Eigenentwicklung namens Excalibur (s. Abbildung 11). Dieses Gerät präsentiert sich dem Benutzer als ein Griff, der von drei Motoren in der Ebene und zusätzlich in der Höhe bewegt wird. Der Arbeitsraum beträgt 30 cm mal 30 cm mal 20 cm (ebd.).

Der Benutzer hält mit der einen Hand den Griff von Excalibur und mit der anderen eine kabellose Maus, von der nur die beiden Knöpfe benutzt werden. Damit wird das Aufnehmen und Gruppieren von Bausteinen des virtuellen Legosystems gesteuert. Ein Baustein kann durch Drücken einer der Knöpfe aufgenommen werden, nachdem der mittels Excalibur gesteuerte Cursor in ihn hineinbewegt wurde. Der Baustein wird dann mit dem Cursor mitbewegt. Bausteine können nicht gedreht werden, so dass sie immer senkrecht zueinander stehen, was dem Zusammensetzen von echten Legosteinen entspricht. Es gibt weiterhin Tastaturkommandos, mit denen die Ansicht des virtuellen Modelles verändert werden kann (ebd.).

Das virtuelle Baukastensystem wurde daraufhin untersucht, ob das Training sich positiv auf entsprechende Handlungen in der wirklichen Welt auswirkt. Dazu wurden die Versuchspersonen in drei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe hat mit Krafrückkopplung, die zweite ohne Krafrückkopplung trainiert, die dritte Gruppe hat gar kein virtuelles Training erhalten. Jede Gruppe musste fünfmal hintereinander ein Legomodell zusammenbauen. Vor dem Bauen haben alle Versuchspersonen ein Video über den Zusammenbau gesehen, während des Bauens lag ihnen ein fertiges Modell als Vorlage vor. Beim virtuellen Training wurde das Modell simuliert, welches später zusammengebaut wurde. Beim Zusammenbauen des echten Modells wurde die Zeit gemessen (ebd.).

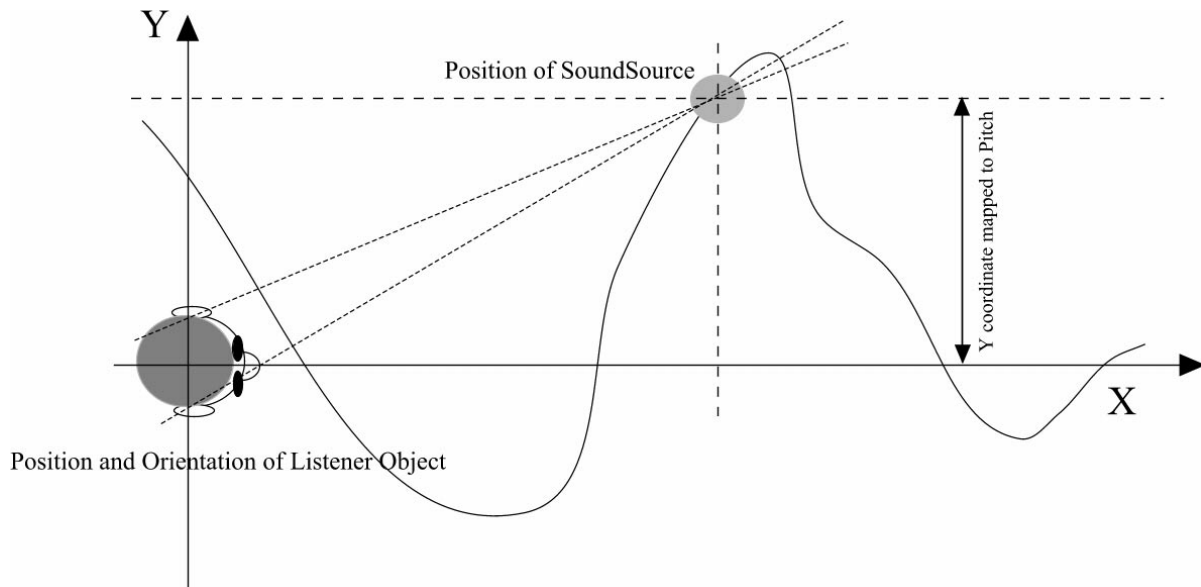


Abbildung 12. Akustische Darstellung eines Funktionsgraphen mittels Raumklang (RAMLOLL U.A. 2000)

Die Untersuchungen haben ergeben, dass durch vorheriges Training die Zusammenbauzeiten wesentlich verkürzt werden. Es konnte jedoch nicht gezeigt werden, dass haptisch unterstütztes Training besser ist als das Training ohne Krafrückkopplung. Die Autoren vermuten als Ursache die nur eingeschränkte Möglichkeit der Simulation feiner Bewegungen, Kräfte und Texturen mit ihrem Krafrückkopplungsgerät. Sie nehmen an, dass vor allem Bausteineigenschaften wie Form, Größe und aktuelle Orientierung mit dem System vermittelt werden können (ebd.).

RAMLOLL ET AL. haben ein System entwickelt, mit dem blinde Schüler Funktionsgraphen mit Hilfe des Phantom und einem Gerät zur Erzeugung von Raumklang explorieren können (RAMLOLL U.A. 2000). Eine Klangquelle wird auf dem Graphen positioniert und kann an diesem entlangbewegt werden. Die Y-Koordinate wird auf die Tonhöhe abgebildet. Der Klang dieser Quelle wird dabei so positioniert, als ob sich der Kopf des Hörers am Koordinatenursprung befände und entlang der X-Achse in positiver Richtung blickt. Einerseits erscheint ein Punkt also akustisch durch die naturalistische Positionsabbildung auf Raumklang. Andererseits kann durch die sich ändernde Intensität die Entfernung des Punktes zum Ursprung geschätzt werden.

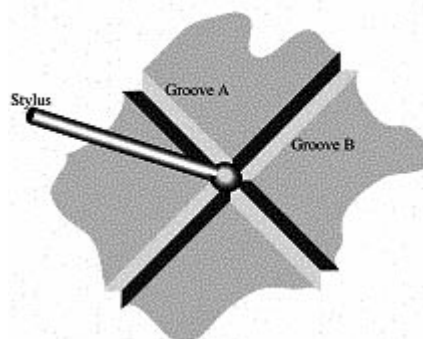


Abbildung 13. Vertiefte Darstellung von sich kreuzenden Graphen mit Verwechslungsgefahr (RAMLOLL U.A. 2000)

Als wichtigen Vorteil ihrer Methode geben die Autoren an, dass der Schnitt der Kurve mit der X-Achse mit ihr deutlich dargestellt wird, weil er mit einem Wechsel des Klages von links nach rechts oder umgekehrt verbunden ist, s. Abbildung 12. Die Koordinaten des aktuellen Punktes werden auf Anfrage des Benutzers auch sprachlich ausgegeben. Schließlich kann ein akustischer Überblick über die ganze Kurve in Form von Tonhöhen von aufeinanderfolgenden Ordinaten angefordert werden (RAMLOLL U.A. 2000, 21).

Funktionsgraphen werden mit dem System mit Hilfe des Phantom als Eingravierungen auf einer Platte simuliert, s. Abbildung 13. Es können mehrere Graphen gleichzeitig dargestellt werden. Diese wurden jedoch von Versuchspersonen leicht verwechselt. Dies galt besonders an Schnittstellen von Graphen. Benutzer haben verschiedene Strategien zur Ertastung einer Graphendarstellung benutzt. Sie haben zum Beispiel zunächst die Ausdehnung der Gesamtdarstellung erkundet bzw. die ganze Fläche in kurzer Zeit abgetastet, um einen Gesamtüberblick zu erhalten. Es ist geplant, den Benutzer mit Hilfe des Phantom über die Darstellung zu führen, um ihm den Überblick zu erleichtern (ebd., 22f).

### 5.6.2 *Haptische Exploration räumlicher Daten*

KÖNIG hat Methoden und Werkzeuge zur Erkundung von Gebäuden mit Hilfe eines dreidimensionalen Kraftrückkopplungsgerätes entwickelt und für den Phantom prototypisch implementiert (KÖNIG 1999). Das implementierte System heißt ‚Haptic Explorer‘.<sup>1</sup>

Wegen der schon beschriebenen Schwierigkeiten bei der Ertastung komplexer dreidimensionaler Objekte (s. Seite 77) und in Anlehnung an der Zielgruppe bekannte Medien wie taktile Karten hat sich König für die Darstellung der Gebäude und ihren Objekten als Grund- bzw. Aufriss entschieden (KÖNIG 1999, 53f). Es wird also eine zweieinhalbdimensionale Darstellung benutzt; unterschiedliche Höhen auf der Grundfläche entsprechen nicht unterschiedlichen Höhen im Original, sondern dienen nur der Unterscheidbarkeit von Objektteilen.

Innenflächen, Wandoberflächen und die Fläche um das Gebäude werden in jeweils einer anderen Höhenstufe dargestellt. Die Flächen können dadurch leichter unterschieden und gefunden werden, wenn ihre Art bekannt ist. In der genannten Reihenfolge werden die Flächen immer höher dargestellt, damit der Benutzer beim möglichen Abrutschen von einer Kante in das Gebäude hineingezogen wird (ebd., 54ff).

Um die Orientierung im Gebäude zu erleichtern, wird ein an den Gebäudegrundriss angepasstes Rechtecksraster benutzt (ebd., 59), s. Abbildung 14. Den Rechtecken werden Himmelsrichtungen zugeordnet, mit dem Gebäudemittelpunkt bzw. der aktuellen Cursorposition als Referenz (ebd., 73). Die Richtungsangaben werden über Sprache ausgegeben, ebenso Angaben zu dem Objekt an der Cursorposition bzw. in ihrer Nähe (ebd., 74).

Objekte mit vornehmlich vertikaler Ausdehnung werden als Relief dargestellt. Zum Rand hin wird das Relief höher, ähnlich zu den schon beschriebenen Flächen, wodurch beispielsweise eine Säule als Abdruck erscheint (s. Abbildung 15). Die Seitenflächen des Gebäudes werden im Aufriss dargestellt, um dem Benutzer die Dimension zu vermitteln, die bei der Grundrissdarstellung verlorengeht (ebd., 57f).

---

1. Die Ergebnisse wurden auf einem Workshop (KÖNIG, SCHNEIDER, STROTHOTTE 2001) und einer internationalen Tagung (KÖNIG, SCHNEIDER, STROTHOTTE 2000) vorgestellt.



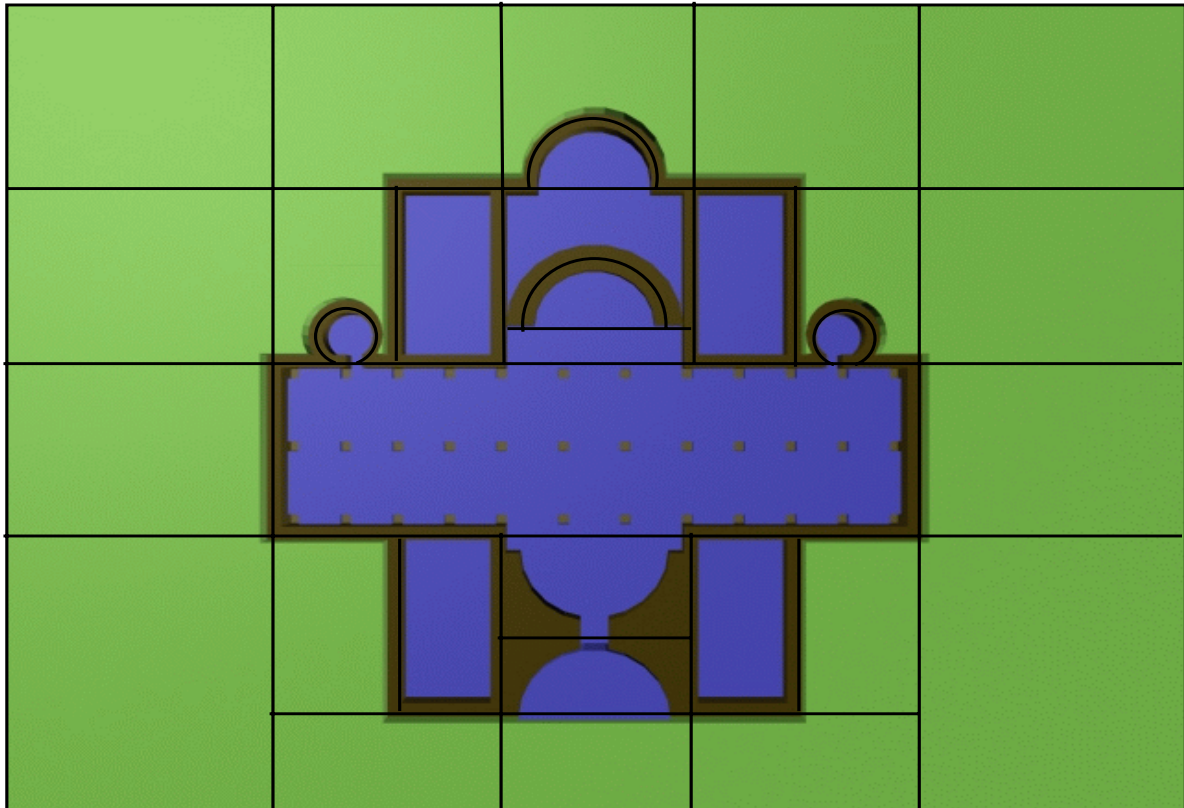


Abbildung 14. Gebäudegrundriss mit Rechtecksraster (KÖNIG 1999, 60)

Der Cursor wird über sogenannte Magnetkräfte zu den Objekten hingezogen. Umgekehrt wird er über sogenannte Kontaktkräfte daran gehindert, den Kontakt mit einem Objekt unbeabsichtigt zu verlieren. Beide Kräfte wirken nur in einem bestimmten Bereich um das Objekt, können also durch Herausbewegen aus dem Bereich durch Einsatz einer höheren Kraft überwunden werden. Diese Technik dient der Vermeidung des Problems des Verlorengehens im haptischen Raum (s. Seite 78) (ebd., 62ff), s. Abbildung 16.

Ein Benutzer kann zwischen Szenen wechseln, indem er in eine kugelförmige Übergangsmarkierung eintritt (die selbst nicht fühlbar ist). Würfelförmige haptische Wegmarkierungen dienen der halbautomatischen Führung des Benutzers auf einem Weg durch eine Szene. Wenn sich der Cursor innerhalb einer bestimmten Entfernung zu einer solchen Wegmarkierung befindet, wird er zur nächsten gezogen (ebd., 60f).

Neben der haptischen Darstellung mit dem Phantom wird das Gebäude auch visuell dargestellt. Dadurch kann ein Sehender gemeinsam mit einem Blinden das Gebäude erkunden. Die geometrische Beschreibung des Gebäudes und ihre Verwaltung wurde von den entsprechenden Formaten und Methoden für die visuelle Darstellung dreidimensionaler geometrischer Modelle übernommen: Das Gebäude wird aus einer indizierten Dreiecksdarstellung im VRML-Format (mittels eines selbstentwickelten Parsers) eingelesen und in einem Szenengraphen organisiert. Die haptische Darstellung des Szenengraphen wird mit Hilfe der Programmierbibliothek für den Phantom, dem Ghost SDK, in dem für die Erkundung entwickelten Programm umgesetzt (ebd., 81ff).

Das System bietet sprachliche Hinweise zur Orientierung und Navigation, Objektbeschreibungen und Systemmeldungen. Diese werden synthetisch mit unterschiedlichen Stimmen ausgegeben (ebd., 71). Orientierungs- und Navigationsmeldungen



Abbildung 15. Darstellung eines vertikalen Objekts (hier: eine Säule) im Aufriss (KÖNIG 1999, 57)

werden ausgegeben, wenn der Phantom für eine gewisse Zeit nicht bewegt wurde. Die Objektbeschreibung wird beim Kontakt mit einem Objekt ausgegeben. Orientierungs- und Navigationsmeldungen besitzen eine niedrige Priorität, ihre Ausgabe wird daher abgebrochen, wenn die Ausgabe von Beschreibungs- oder Systemmeldungen ausgelöst wurde (9off).

### 5.6.3 Konstruktive räumliche Exploration mit einem Krafrückkopplungsgerät

Räumliche Daten als Positionen und Ausdehnungen von Objekten und damit auch topologische Daten wie Nachbarschaftsbeziehungen werden durch ein Krafrückkopplungsgerät wie dem Phantom auch räumlich dargestellt. Dies erfolgt durch das haptische Rendering, welches Ähnlichkeiten mit dem klassischen visuellen Rendering der Computergrafik aufweist.

Diese Ähnlichkeiten ergeben sich daraus, dass in beiden Fällen Oberflächen von als dreidimensionale geometrische Modelle vorliegenden Objekten dargestellt werden. Allerdings ergeben sich auch einige Unterschiede, von denen einige schon genannt wurden. Ein wesentlicher Unterschied liegt darin, dass mit einem dreidimensionalen

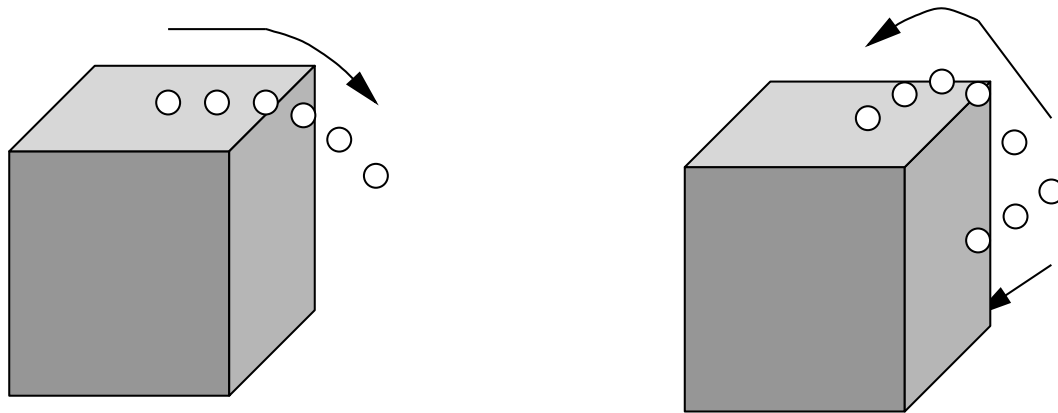


Abbildung 16. Verlorengehen im haptischen Raum am Beispiel des Abrutschens von einem Würfel ohne Nachbarobjekte (links), Rückführung durch Kontaktkräfte (rechts) (KÖNIG 1999, 29)

Kraftrückkopplungsgerät Objekte tatsächlich räumlich dargestellt werden können. Im Gegensatz zur gängigen Darstellung durch Verfahren der Computergrafik ist es nicht notwendig, eine zweidimensionale Darstellung des Modells von einem bestimmten Blickwinkel aus zu erzeugen.

Diese vollständig dreidimensionale Darstellung stellt einen großen Vorteil dar, weil der Benutzer das Modell mit dem dreidimensionalen Kraftrückkopplungsgerät von allen Seiten ertasten kann. Dieser Vorteil relativiert sich jedoch dadurch, dass mit einem Gerät wie dem Phantom zu einem bestimmten Zeitpunkt nur ein Punkt des Modelles dargestellt wird. Dies stellt noch eine Verschärfung dar bezüglich der generellen Einschränkung des Tastsinns auf die Detailwahrnehmung nur der Objekte oder Objektteile, die mit den Händen ergriffen werden können.

Mit den Händen können Objekte immerhin umfasst und mit der ganzen Handinnenfläche und den Fingern ertastet werden. Der Phantom liefert zunächst keinen Eindruck von mehreren Seiten eines Objektes, dieser ergibt sich nur durch Nachfahren von Flächen und Konturen und gedankliches Zusammenfügen. Zusätzlich kann mit dem Phantom die Oberflächenbeschaffenheit eines Objektes nur schlecht gezielt vermittelt werden (s. Seite 77).

Ein Gerät wie der Phantom bietet grundsätzlich den Vorteil, dass mit ihm prinzipiell beliebige digitale dreidimensionale Modelle erkundet werden können. Es hat jedoch noch weitere Vorteile gegenüber taktilen und modellhaften Darstellungen. Durch seine Programmierbarkeit kann ein solches Gerät angepasste und um Erkundungshilfen erweiterte Darstellungen liefern. Die Führung durch eine Karte als Ziehen von einem markanten Punkt zum anderen durch den Phantom mittels Ausübung von Zusatzkräften wurde bereits beschrieben (s. Abschnitt 5.6.2).

Auch nach Erkundung und Konstruktion kann die Ertastung des Modells unterstützt werden. Wenn ein Teilbereich einer Karte wie beispielsweise eine Strecke konstruiert wurde, kann der Benutzer den Lerneffekt durch das Konstruieren vergrößern, indem er den Bereich wiederholt ertastet. Erkundungshilfen wie simulierte Magnetkräfte können den Benutzer unterstützen, indem sie es ihm erleichtern, den Kontakt zu dem interessierenden Kartenteil zu behalten und Objekte abzutasten.

Gewisse Daten können auch bei Benutzung eines Gerätes wie das Phantom nur akustisch ausgegeben werden. Dazu gehören Objektangaben wie Namen und Art des Objektes (zum Beispiel ‚öffentliches Gebäude‘ für ein Haus). Solche Daten werden auf

taktilen Karten teilweise in Braille und teilweise durch taktile Hervorhebungen dargestellt. Braille kann mit dem Phantom nicht dargestellt werden, weil Braille flächig mit den Fingerkuppen gelesen wird und der Phantom dazu an mehr als einem Ort haptisch rendern müsste. Vor allem aber spricht gegen Braille, dass nicht alle Mitglieder der Zielgruppe von virtuellen taktilen Karten Braille lesen können. Oberflächen können mit dem Phantom ebenfalls nur schwer haptisch hervorgehoben werden, wie bereits besprochen. Es bietet sich auch hier die sprachliche Ausgabe an.

Ebenso wie bei den physischen Objekten können beliebige digitale Karten mit simulierten Objekten konstruiert werden. Diese werden zunächst in dreidimensionale Darstellungen überführt. Nachdem eine dreidimensionale Karte geladen wurde, kann sie erkundet werden. Dies geschieht ähnlich der Erkundung eines Gebäudegrundrisses mit dem dafür entwickelten System (s. Abschnitt 5.6.2). Die Karte erscheint als taktile Darstellung mit verschiedenen Höhenstufen auf dem Boden des Interaktionsraums. In einer Karte spielen vor allem Straßen und markante Punkte die Hauptrolle.

In taktilen Karten werden Straßen und andere Elemente erhoben dargestellt. Eine solche Darstellung ist auch für die Umsetzung digitaler Kartendaten in eine dreidimensionale Darstellung denkbar. Diese Lösung würde jedoch den Nachteil aufweisen, dass ein Benutzer mit dem Phantom leicht von einer Straße abrutschen könnte, Tracing (s. Seite 33) wäre also nicht möglich.

Es ist daher eine Darstellung vorzuziehen, bei der Straßen als Vertiefungen erscheinen. Die virtuelle taktile Darstellung einer Karte entspricht dann einer Platte, in die die Karten eingraviert sind. Die Überlegenheit von mit dem Phantom vertieft im Gegensatz zu erhabenen dargestellten Linien (Funktionsgraphen) wurde experimentell bestätigt (YU U.A. 2000).

Wenn Straßen als Vertiefungen dargestellt werden, kann das Straßennetz leicht gefunden werden. Dazu muss der Cursor nur auf den Boden des Arbeitsbereichs des Phantom geführt und über diesen Boden bewegt werden, bis der Cursor in einer Straßenrinne einrastet. Wenn eine Straße auf diese Weise gefunden wurde, kann der Benutzer sich von dort aus entlang der Straße und an Kreuzungen zu den nächsten bewegen.

Sobald der Benutzer eine Straße berührt, kann er sprachliche Angaben über die Straße erhalten. Dabei kann es sich zunächst um den Straßennamen, aber auch um Angaben über die Art der Straße, Objekte auf ihr usw. handeln. Indirekt erhält der Benutzer Angaben über benachbarte Straßen und damit generell über Straßenrelationen, wenn er von einer Straße in eine andere verzweigt.

Mit dem Phantom-basierten System ist es leicht möglich, dem Benutzer eine ‚Stadtführung‘ zu geben. Dabei kann das System den Benutzer durch Kraftausübung von einem wichtigen Ort der Stadt zu einem anderen führen. Bei den Orten kann es sich um klassische Sehenswürdigkeiten handeln, aber auch um Orte mit Funktionscharakter wie einen Bahnhof. Für die Führung ist es sinnvoll, den Benutzer nicht über die jeweils kürzeste Verbindungsstrecke von einem Ort zum anderen zu führen, sondern entlang von Straßen, weil der Benutzer dadurch Informationen über den Verlauf von Straßen in der Nähe von Orten erhält.

Eine Strecke kann auch mit dem Phantom durch einen Anfangs- und einen Endpunkt und die automatische Bestimmung der kürzesten und sichersten Verbindung durch das Erkundungsprogramm bestimmt werden. Der Start- oder Endpunkt kann leicht ausgewählt werden, wenn sich der Cursor bereits an dem gewünschten Ort befindet. Ein Druck der Taste an dem optional erhältlichen Bedienstift am Ende des Phantomarms, eine spezielle Geste mit dem Phantomarm, zum Beispiel eine Klopfgeste oder der Druck eines zusätzlichen Schalters kann dann zur Auswahl führen. Danach kann die Strecke konstruiert werden.

Im Gegensatz zu den echten Bausteinen können die mit dem Phantom simulierten Objekte beliebige Formen und Größen annehmen. Es ist möglich, jeden relevanten Teil einer Konstruktion in jeweils einem einzigen Schritt zu bauen, zum Beispiel jeweils gerade Streckenstücke. Dadurch kann die Entfernung zwischen zwei Entscheidungspunkten einfach vermittelt werden.

Allerdings kann mit einem einzigen Krafrückkopplungsgerät das Zusammenbauen von Objekten aus Bausteinen nur bedingt simuliert werden: Mit dem punktförmigen Interaktionscursor kann ein virtueller Baustein nicht ergriffen werden, wie dies in der wirklichen Welt mit zwei Fingern möglich ist. In der einfachen Version mit drei Freiheitsgraden ist es außerdem nicht möglich, einen Baustein zu drehen. Wie in Punkt 6 der Anforderungen an Systeme zur konstruktiven Exploration in Abschnitt 4.6 beschrieben, muss ein Baustein für die konstruktive Exploration auch diagonal platziert werden können, also nicht nur parallel zu einer Koordinatenachse.

Wenn ein Baustein frei durch den Phantom-Cursor bewegt werden soll, was nicht durch Ergreifen möglich ist, muss die Befestigung des Bausteins am Cursor auf andere Weise erfolgen, wie oben für die Festlegung eines Streckenanfangs- oder Endpunktes beschrieben. Eine Möglichkeit des simulierten Verschiebens und Positionierens eines Bausteins besteht darin, den Baustein auf eine Fläche zu legen und ihn über die Fläche zu schieben und zu drehen. Der Baustein kann entweder von der Seite geschoben werden, wobei sich damit realistischerweise seine Drehlage ändern könnte, oder durch erhöhten Druck von oben.

Das freie Bewegen hat den Vorteil eines erhöhten Realismus, weil es eher dem echten Konstruieren mit Bausteinen entspricht. Da das Einrasten eines Bausteines an einem anderen mit dem Phantom nur schwer dargestellt werden kann, weil der Anlegepunkt nicht gleichzeitig mit dem neuen Baustein erfüllt werden kann, ist zumindest der Einsatz einer Assistenzfunktion zum Platzieren nötig.

Ein Baustein kann dadurch an einem Anlegepunkt einrasten, sobald er sich in der Nähe des Anlegepunktes befindet. Einfacher ist die Möglichkeit, den neu zu legenden Baustein mit einem Ende bereits am Anlegepunkt zu befestigen und dem Benutzer dann nur noch die Möglichkeit zu geben, ihn um die Achse durch den Anlegepunkt in die richtige Position zu drehen. Dies entspricht der Konstruktion von Routen mit dem kamerabasierten System, wie bereits beschrieben. Die Drehung kann dann wie bei diesem ermöglicht werden, also bezüglich einer Achse auf dem vorherigen Stein.

Die Umsetzung der Anforderungen an ein System zur konstruktiven räumlichen Exploration durch ein System zur Interaktion mit dem Phantom sind in Tabelle 10 aufgeführt. Im Vergleich zum Ansatz unter Verwendung echter Bausteine zeigen sich die Vorteile der Darstellung beliebiger Bausteine im Rahmen der schon beschriebenen Einschränkungen der Simulation. Wie eben besprochen können Bausteine in dem entworfenen System während des Platzierens nicht ertastet werden, weil dann der Phantomcursor am freien Ende des jeweiligen Steines fixiert ist, um den Stein zu drehen. Dies dürfte jedoch praktisch keine Einschränkung darstellen.

## 5.7 Vergleich räumlicher Medien für Blinde

Virtuelle taktile Karten zur konstruktiven Exploration wurden für diese Arbeit auf zwei verschiedene Arten entworfen, implementiert und getestet: mit physischen Objekten einerseits und mit haptisch simulierten Objekten andererseits. Bei den physischen Objekten handelt es sich um Bausteine, wie sie in Konstruktionsbaukästen verwendet werden. Sie liegen nur in geringer Vielfalt vor und können aneinanderge-

Nr.	Anforderung	Umsetzung
5	<i>Zusammenfügbarkeit</i>	Aufeinanderfolgende Bausteine werden im haptischen Szenengraphen zusammengehalten.
6	<i>Angemessene Darstellbarkeit</i>	Die simulierten Steine können an die Größen von Kartenelementen angepasst werden.
7	<i>Vermittlung der Position</i>	Ein neuer Stein wird automatisch am Ende des Vorgängers platziert, die richtige Drehlage wird durch simuliertes Einrasten vermittelt.
8	<i>Schrittweise Konstruierbarkeit</i>	Die Bausteine werden einer nach dem anderen gelegt.
9	<i>Ertastbarkeit der Gesamtkonstruktion</i>	Alle gelegten Steine eines Objektes bleiben im haptischen Raum erhalten.
10	<i>Gefahrlosigkeit</i>	Das Auftreten großer Kräfte wird im Programm verhindert.
11	<i>Haptische Darstellbarkeit</i>	Die Handhabung der Bauteile wird durch Führungstechniken erleichtert.
12	<i>Haptische Unterscheidbarkeit</i>	Bausteine können im haptischen Raum vor der jeweiligen Platzierung und nach der Gesamtkonstruktion ertastet werden.
13	<i>Nichtvisuelle Steuerbarkeit</i>	Die Interaktion zur Konstruktion kann nichtvisuell erfolgen, einschließlich der Weiterschaltung zum nächsten Stein durch Betätigung eines externen Schalters.
14	<i>Beständigkeit</i>	Bausteine lassen sich durch das Programm nur während der jeweiligen Platzierung bewegen.

*Tabelle 10.* Umsetzung der Anforderungen zur konstruktiven Exploration durch das System mit simulierten Bausteinen

steckt werden, sind aber spezieller als Baukastensteine an den Zweck des Bauens geographischer Objekte angepasst. Dem Benutzer wird vom Computer mitgeteilt, welchen Baustein er wo und wie anfügen muss. Der Computer benötigt eine Vorrichtung, mit der er die Position und Lage dieser Objekte erkennen kann, um dem Benutzer die nötigen Hinweise geben zu können.

Ein Krafrückkopplungsgerät wie der Phantom kann prinzipiell beliebige dreidimensionale Objektszenen einer gewissen Größe darstellen und dient dabei gleichzeitig als Ein- und Ausgabegerät, weil er sowohl die Cursorposition abfragen als auch Ausgaben in Form von Kräften zur Simulation von Objekten erzeugen kann. Allerdings sind die Interaktionsmöglichkeiten mit den Objekten durch den Aufbau des Gerätes und bestimmte Handhabungseffekte beschränkt. Daher sind auch für den Phantom die Entwicklung neuartiger Interaktionstechniken nötig, um die Unterschiede bezüglich der naturalistischen haptischen Interaktion auszugleichen und das Aufkommen unerwünschter Effekte zu verhindern. Tabelle 11 vergleicht die Eigenschaften der beiden Ansätze.

Systeme zur konstruktiven Exploration in den beiden Ausprägungen mit physischen und simulierten Objekten werden nun mit den besprochenen räumlichen Medien bezüglich ihrer jeweiligen Hauptfunktion verglichen. Dabei werden auch gesprochene Weganweisungen berücksichtigt, die als Orientierungshilfen immer noch eine große Rolle spielen. Weiterhin wird auch die Movie-Map (s. Abschnitt 3.3.1) zum Vergleich aufgeführt, die nur von Sehenden benutzbar ist (s. Tabelle 12).

Die Medien werden zunächst unterschieden nach dem Blickwinkel, den sie auf ein Gebiet liefern (s. Seite 16), ob es sich dabei um die Routen-, die Horizont- oder die Überblicksperspektive handelt. Als nächstes wird nach der Art des vermittelten Objektes unterschieden. Ein Medium stellt entweder Straßen in einem Gebiet oder eine bestimmte Strecke dar. Manche Medien erlauben die Exploration des ganzen Gebietes und zeigen damit neben dem eigentlichen Objekt auch wahlweise eine Über-

physische Objekte	simulierte Objekte
echter taktiler Eindruck	Probleme von simulierten taktilen Objekten wie Verlust der Orientierung zwischen Objekten, falscher Größeneindruck, etc.
Konstruieren und Tasten mit beiden Händen und allen Fingern	nur ein oder wenige Finger beim Konstruieren einsetzbar bzw. geringe Genauigkeit
nur Bausteine in bestimmten Formen und Größen benutzbar	quasi beliebige Bausteine benutzbar
Bausteine und Konstruktionen in der Größe nicht veränderbar	Bausteine und Konstruktionen skalierbar
Weiterführung einer Konstruktion an einem anderen Ort schwierig	Teilkonstruktionen speicher- und ladbar, mit entsprechendem Krafrückkopplungsgerät System dadurch möglicherweise transportabel
nur einfache physikalische (mechanische und magnetische) Effekte einsetzbar	physikalische Größen wie Kraft und Magnetismus erzeug- und simulierbar, diese und weitere, auch nicht-naturalistische Effekte zur zusätzlichen Hilfe einsetzbar
konstruierte Teile leicht unterscheidbar (vom Untergrund etc.)	konstruierte Teile schwerer auffind- und unterscheidbar

Tabelle 11. Unterschiede zwischen Systemen zur konstruktiven Exploration mit physischen und simulierten Objekten

sicht. Weiterhin werden die Medien nach der gewählten Vermittlungseinheit unterschieden. Die räumlichen Daten werden entweder statisch in Form von Schritten bzw. Straßensegmenten oder dynamisch in einer Fahrtansicht dargestellt. Die letzte Spalte zeigt, ob mit dem entsprechenden Medium eine Konstruktion der vorliegenden Daten möglich ist.

Medium	Perspektive	vermitteltes Objekt	Vermittlungseinheit	Konstruktion möglich
gesprochene Weganweisungen	Horizontpersp.	Strecke	Segment	nein
taktile Karte	Überblickspersp.	zusammenhängende Straßen	Segment	nein
Movie-Map	Routenpersp.	zusammenhängende Straßen	fließend	nein
MoPS	Horizontpersp.	Grobübersicht; Strecke	Schritt	nein
Atlas Speaks	Horizontpersp.	Grobübersicht; Strecke	Segment	nein
konstruktive Exploration (Kamera)	Überblickspersp.	Grobübersicht; Strecke	Schritt	ja
konstruktive Exploration (Krafrückkopplung)	Überblickspersp.	Grobübersicht; Strecke	Segment	ja

Tabelle 12. Gegenüberstellung räumlicher Medien für Blinde

Obwohl die Routenperspektive diejenige ist, aus der Menschen ihre Umwelt erfahren, wird sie nur in einem der untersuchten Medien eingesetzt, der Movie Map. Dies erklärt sich aus der Überlegenheit anderer Perspektiven für die Vermittlung von geographischen Zusammenhängen, wie bereits besprochen. Nur die taktilen Karten und die Movie Map vermitteln Wege in Form von zusammenhängenden Straßen. Bei ihnen können die Straßen beliebig verfolgt werden. (Taktile Karten beinhalten prinzipiell auch die Flächen zwischen den Straßen, diese sind aber häufig leer dargestellt.)

Die anderen Medien liefern hauptsächlich Angaben über eine Strecke, auch wenn sich aus nacheinander vermittelten Strecken ein über eine Strecke hinausgehender Eindruck einstellt und einige Medien zusätzlich eine Explorationsfunktion für die ganze Karte bieten. Die segmentweise Darstellung entspricht eher der Reduktion der Darstellung auf das Wesentliche, die schrittweise Darstellung liefert eher Informationen über tatsächliche Entfernungen, wenn der Maßstab der Darstellung bekannt ist. Wie man der Tabelle entnehmen kann, ist nur mit den in dieser Arbeit eingeführten Systemen Konstruktion möglich.

## 5.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde zunächst die Interaktion mit einem System zur konstruktiven Exploration geschildert. Es wurden Ein- und Ausgabegeräte und -methoden beschrieben, die zur Umsetzung eines solchen Systems benutzt werden können. Dabei handelte es sich um grafische Eingabegeräte, räumliche Sensoren, Krafrückkopplungsgeräte und akustische Ausgabemethoden. Es hat sich herausgestellt, dass die Konstruktion eine frühe Anwendung von Krafrückkopplungsgeräten war.

Es wurden Methoden und Werkzeuge für die Umsetzung der konstruktiven Exploration mit echten bzw. simulierten physischen Objekten erläutert. Dabei wurden jeweils verwandte Ansätze für Sehende und Blinde aufgeführt. Es wurde ein System beschrieben, mit dem Blinde durch akustisch-haptische Darstellung grafische Daten erkunden können. Bei den Daten handelt es sich um Funktionsgraphen, die einzeln zwar leicht, zu mehreren in einer Darstellung jedoch nur schwer mit dem System erkundbar sind. Es wurde näher auf die verwendeten Interaktionstechniken eingegangen, weil einige von ihnen auch in virtuellen taktilen Karten einsetzbar sind.

Zu beiden Ansätzen wurde die Umsetzung der im letzten Kapitel formulierten Anforderungen an die dargestellten Daten durch die Systeme gezeigt. Die beiden Ansätze zur Umsetzung der konstruktiven Exploration wurden anschließend verglichen. Es zeigt sich, dass die Konstruktion mit physischen Objekten natürlicher, mit dem Krafrückkopplungsgerät jedoch flexibler ist.

Weiterhin wurden die Techniken zur Umsetzung der beiden Ansätze beschrieben. Es wurden Methoden der akustischen Ausgabe in Benutzungsoberflächen allgemein und ihre Anwendung für die hier entwickelten Systeme erläutert. Für das kamerabasierte System wurden die Bildverarbeitungstechniken mit Farbsegmentierung und Momentenberechnung zur Positions- und Lagebestimmung der physischen Objekte beschrieben. Für das System mit Krafrückkopplungsgerät wurde die simulierte Konstruktion mit physischen Objekten und die Umwandlung von Kartendaten in dreidimensionale Objekte erläutert, nachdem Einschränkungen der Darstellung durch ein Gerät wie den Phantom und Methoden zu ihrer Behebung geschildert wurden.

Schließlich wurden räumliche Medien anhand der Gebietsvorstellungen verglichen, die ihnen zugrunde liegen. Bei den Medien handelte es sich um klassische und neuentwickelte Medien für Blinde, einschließlich den Systemen zur konstruktiven Exploration mit den beiden verschiedenen Ein-/Ausgabetechniken. Zusätzlich wurde die Movie-Map als Vertreter der Virtual Reality-Systeme für Sehende hinzugenommen. Der Vergleich hat gezeigt, dass vornehmlich die Überblicks- oder die Horizontperspektive umgesetzt wird. Nur die in dieser Arbeit entwickelten Systeme erlauben die Konstruktion räumlicher Elemente.



# Systeme zur konstruktiven Exploration

In diesem Kapitel werden die Modellierung, der Entwurf und die Implementierung von Systemen zur konstruktiven Exploration beschrieben. Zunächst wird eine Modellierung vorgestellt, die von der Technik zur Konstruktion abstrahiert. Anschließend werden der Entwurf der Systeme mit physischen Bausteinen und mit Kraftrückkopplung getrennt vorgestellt. Dabei werden die benutzten Ein- und Ausgabetechniken und die Architektur der Systeme erläutert. Es wird beschrieben, welche Kartendaten verarbeitet werden und welche Form die auf den Karten implementierten Algorithmen besitzen. Anschließend werden für die beiden Ein-/Ausgabetechniken die Implementierung von jeweils zwei Systemen vorgestellt, eines zur Exploration und eines zur Konstruktion.

Es werden die Bildverarbeitungskomponente, das Design und die Herstellung der Bausteine und die akustische Ausgabe des kamerabasierten Systems erläutert. Anschließend werden die Umwandlung der Karten in eine dreidimensionale Darstellung und die Konstruktion mit dem Kraftrückkopplungsgerät Phantom beschrieben. Eine tabellarische Übersicht über die Implementierungen findet sich in Anhang B.

Inhalt und Zielgruppe wurden in den Kapiteln 2 und 3 ausführlich besprochen. Fallstudien zu den Systemen werden zusammen mit Evaluationen im nächsten Kapitel beschrieben.

## 6.1 Modellierung

Die entwickelten Systeme sind für die Benutzung durch einen einzigen Blinden ausgelegt, optional unter Kooperation mit einem Sehenden, was den Einsatz auch von visueller Darstellung bedeutet. Die Systeme können ohne taktile Medien eingesetzt werden. Einer ihrer Vorteile liegt gerade darin, dass für ihre Benutzung keine taktile Karte erstellt werden muss. Die Systeme werden stationär benutzt.

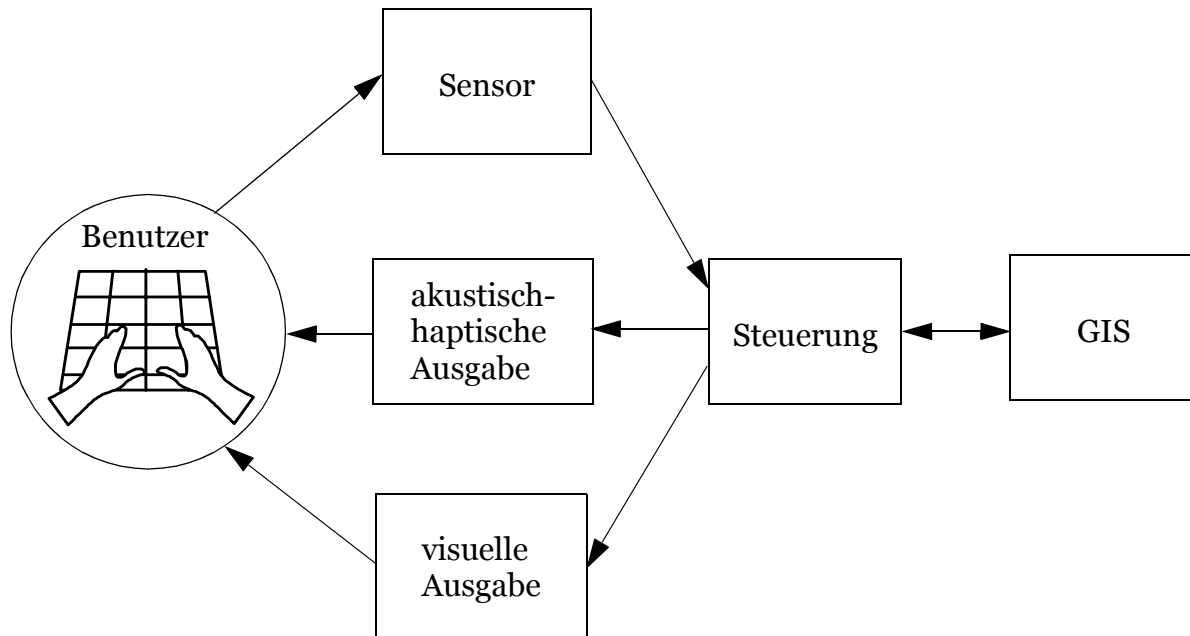


Abbildung 17. Modell eines Systems zur konstruktiven Exploration

Die Benutzung eines Systems zur konstruktiven Exploration erfolgt mittels der Hände auf einer Arbeitsfläche, welche eine Karte symbolisiert. Von einem solchen System müssen Bewegungen erfasst, auf Kartenelemente abgebildet und Ausgaben zu den Elementen erzeugt werden. In Abbildung 17 ist die Modellierung eines Systems zur konstruktiven Exploration dargestellt. Ein solches System besitzt einen Sensor zur Eingabe von Positionen, Ausgabekomponenten zur akustischen, visuellen und optional haptischen Ausgabe, ein GIS zur Speicherung und Verwaltung von Kartendaten und eine Steuerungskomponente. Die grafische Ausgabe stellt die Karte und den Zustand der Eingabe dar, damit Sehende das System gemeinsam mit Blinden bedienen können.

Das System enthält eine Standard-GUI-Anwendung, bei der jedoch zu Maus und Tastatur ein weiteres Eingabegerät und zur grafischen die akustische Ausgabe hinzukommen. Da die haptische Interaktion natürlich erfolgen soll und weil Systemzustände Blinden nur schwer mitgeteilt werden können, müssen in der Steuerungskomponente Eingaben schnell verarbeitet und Ausgaben schnell erzeugt werden. Es ist Echtzeitinteraktion erforderlich, also eine Rückmeldung innerhalb von 100 ms (GLASER 1994, 36).

Die Bewegungen von Händen und Bausteinen werden durch einen Sensor aufgenommen. Sie werden von der Steuerungskomponente des jeweiligen Systems mittels der GIS-Komponente auf eine dort gespeicherte digitale Karte abgebildet. Danach werden durch das GIS aktuelle Kartenelemente ermittelt, die durch die Bewegungen ausgewählt wurden. Zu den Kartenelementen werden aus dem GIS Angaben bestimmt, die akustisch, visuell und optional haptisch ausgegeben werden. Im GIS werden auch Berechnungen ausgeführt wie das Ermitteln eines Weges zwischen zwei Punkten.

## 6.2 Entwurf

### 6.2.1 System mit physischen Bausteinen

Das System zur Bedienung mit physischen Bausteinen besteht aus einem GIS-Modul zur Kartenverwaltung und -verarbeitung (s. Abbildung 18). Weiterhin besteht es aus einer Bildverarbeitungskomponente und einer Ausgabekomponente, welche die aktuellen Elemente sowohl in Standard-GUI-Fenstern als auch akustisch über Sprache und Klänge ausgibt. Zwischen den Koordinatensystemen der Bildverarbeitung, des GIS und des GUI wird in einem eigenen Modul umgerechnet. Schließlich gibt es ein Modul zur Steuerung der Bildverarbeitungs- und der Ausgabekomponente und zur Koordination dieser Komponenten.

Zur Erkennung eines Objektes werden nacheinander folgende Schritte durchgeführt: Zunächst wird vom Framegrabber das aktuelle Kamerabild digitalisiert. Das Bild liegt nach der Digitalisierung als Standard-RGB-Bitmap in einem Speicherbereich vor, auf den von einem Programm aus zugegriffen werden kann. Danach werden in dieser Bitmap Objekte anhand ihrer Farbe segmentiert. Dabei werden jeweils nur benachbarte Pixel mit derselben Farbe betrachtet, um auch die gleichfarbigen Streckensteine getrennt segmentieren zu können.

Aus den segmentierten Objekten werden ihre Position und (für die länglichen Steine) ihre Drehlage aus Momenten errechnet. Wenn sich die Position eines Objektes um mehr als einen gewissen Schwellwert bezüglich der letzten Position des Objektes geändert hat, wird die neue Position an die Systemkomponente weitergegeben, welche die eigentliche Interaktion auf Basis der Kartendaten mit Hilfe von Sprache und Klängen umsetzt.

Auf der Interaktionsebene werden die Positionen erkannter Objekte auf die digitale Karte projiziert und in der Karte Objekte gesucht, die sich an der entsprechenden Position befinden. Wenn sich entweder vorher keine Kartenobjekte an der projizierten Steinposition befanden und an der neuen Steinposition auch nicht oder sich dieselben Kartenelemente an der neuen wie an der alten Steinposition befinden, wird die neue Steinposition auf der Interaktionsebene nicht weiter beachtet. Wenn sowohl Strecken-anfangs- und -endstein sichtbar sind und Kartenelemente auswählen und einer der beiden ein Kartenelement auswählt, welches er vorher noch nicht ausgewählt hat (weil er neu auf die Karte gelegt oder bewegt wurde), wird die Verbindungsstrecke ermittelt (s. nächster Abschnitt).

Alle für die Interaktion wichtigen Bewegungen von Steinen und die ausgewählte Strecke werden auf der grafischen Darstellung der Karte angezeigt (s. Abbildung 27). Daher ist es notwendig, dass die Interaktionsebene nicht nur von neuen Positionen von Steinen und Strecken informiert wird, sondern auch, wenn Steine entfernt werden. Dadurch kann die Interaktionsebene in einem solchen Fall auch die grafische Anzeige von Steinen und Strecken entfernen.

Es werden verschiedene Koordinatensysteme benutzt, je eines für die Karte, die Positionen der mittels Bildverarbeitung erkannten Objekte und die Bildschirmanzeige. Zwischen diesen Koordinatensystemen wird mit Transformationen umgerechnet, wie sie aus der zweidimensionalen Computergrafik bekannt sind (FOLEY U.A. 1990, 201). Bei der Transformation von Kartenkoordinaten wird das Seitenverhältnis der Karte beachtet. Die Koordinatensysteme von Karte und Bildverarbeitung werden direkt ineinander umgerechnet, ebenso wie die von Benutzungsoberfläche und Bildverarbeitung. Die Koordinatensysteme von Benutzungsoberfläche und Karte werden über das der Bildverarbeitung ineinander umgerechnet, damit sowohl die

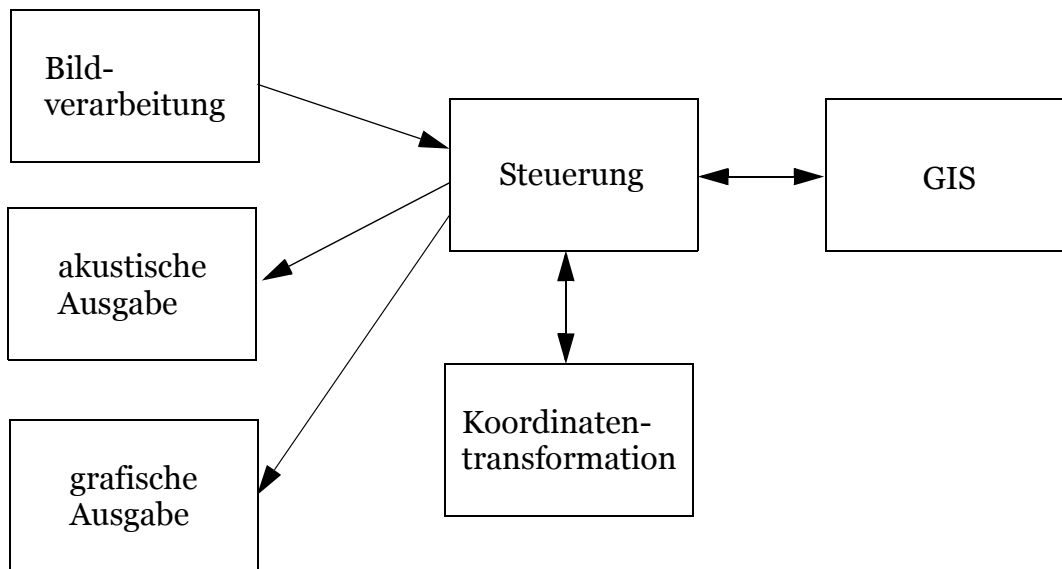


Abbildung 18. Architektur eines Systems zur Konstruktion mit physischen Bausteinen

Positionen der erkannten Steine als auch der ausgewählten Kartenelemente gleichzeitig grafisch dargestellt werden können.

#### 6.2.1.1 Akustische Ausgabe

Klänge werden in virtuellen taktilen Karten zur Darstellung von Variablen wie Entfernungen und Winkeln eingesetzt. Als Anforderungen an die Erzeugung dieser akustischen Darstellungen wurden die folgenden ermittelt:

1. Die akustische Darstellung von Werten soll effektiv sein.
2. Die Klänge sollen vertraut und angenehm sein.
3. Die Klangausgabe soll nur wenig Rechenzeit beanspruchen (weil die Eingabeverarbeitung und die Algorithmen auf den Karten bereits rechenzeitaufwendig sind).
4. Die Klangausgabe soll auf handelsüblichen PCs möglich sein, also nur eine übliche Soundkarte voraussetzen.

Anforderung 2 hat dazu geführt, dass MIDI-Klänge anstatt solcher auf der Basis einfacher Klangwellen eingesetzt wurden. Damit ist auch Anforderung 3 erfüllt, weil MIDI-Klänge auf der Klanghardware der Soundkarte erzeugt werden können, ohne den Prozessor zu belasten. Wegen Anforderung 3 wurde auch kein Raumklang eingesetzt, weil zu dessen Erzeugung ohne erhebliche Prozessorlast nur spezielle Hardware benutzt werden kann, was wiederum Anforderung 4 widersprochen hätte.

Vertraute Abbildungen von Variablen auf Klänge sind zum Beispiel die Abbildung von Entfernungen auf die Lautstärke. Der Zusammenhang von Amplitude, die von einem Programm gesteuert werden kann, und Lautstärke ist jedoch nichtlinear (s. Abschnitt 2.2.1). Die Ausgabe ist weiterhin von der Wiedergabehardware abhängig (von der Art der eingesetzten Lautsprecher oder Kopfhörer), so dass diese Abbildung schnell verworfen wurde.

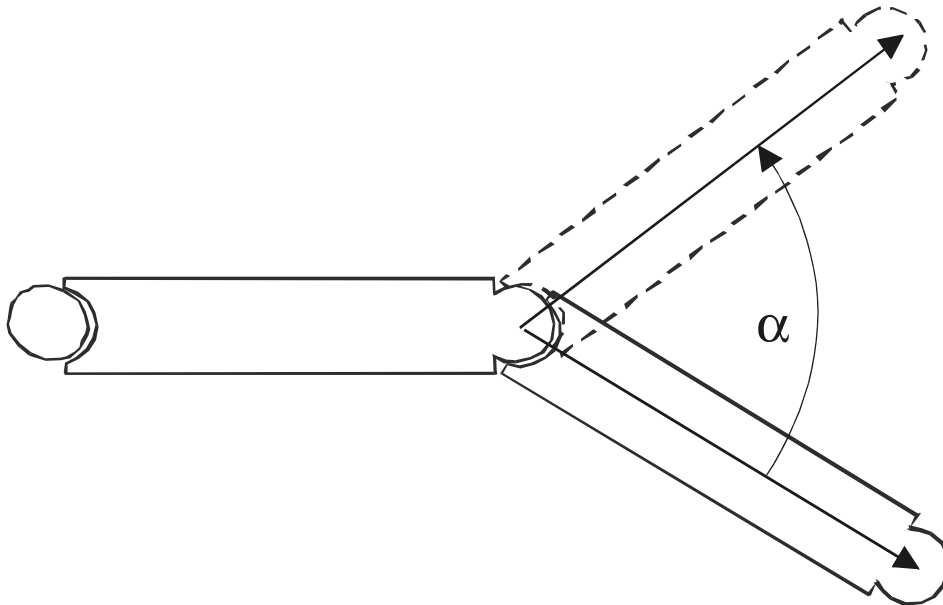


Abbildung 19. Winkel zwischen zwei Streckensteinen zur akustischen Darstellung

Zur akustischen Darstellung wurden Drehwinkel anstatt Positionen von Objekten ausgewählt, weil Drehwinkel eindimensional sind und sich daher eher als zweidimensionale Positionen zur effektiven Darstellung eignen (s. Anforderung 1). Zur Erfüllung von Anforderung 2 musste eine mehr oder weniger vertraute Abbildung von einem relativen Drehwinkel auf eine Klangdimension gefunden werden.

Eine kontinuierliche Variable kann auf den Rhythmus eines Tones abgebildet werden. Auch dazu finden sich (relativ) vertraute Vorlagen: Beim Geiger-Müller-Zähler, der vor allem zur Dosismessung radioaktiver Strahlung eingesetzt wird, führt eine analoge Schaltung zu einem gepulsten Klang. Die Pulsfrequenz ist proportional zur Frequenz der gemessenen Teilchen.<sup>1</sup> Weil die akustische Darstellung durch Variation von Klanghöhe und Lautstärke ungünstig ist (s. Abschnitt 5.3), wird für den hier beschriebenen Ansatz der Rhythmus gewählt. Eine Entfernung wird also durch einen gepulsten MIDI-Klang dargestellt. Bei der Entfernung handelt es sich genauer um den Unterschied des aktuellen Winkels eines Steines zum korrekten Winkel (s. Abbildung 19), wie bereits beschrieben. Wenn ein Stein korrekt liegt, verstummt der MIDI-Klang.

Die Wichtigkeit und Art der mittels Sprache ausgegebenen Aspekte kann durch verschiedene Sprecher ausgedrückt werden. Räumliche Daten können durch die Positionierung von Sprache mittels Raumklang räumlich gesprochen werden. Für die Ausgabe von Mitteilungen in virtuellen taktilen Karten wie Straßennamen und Systemnachrichten reicht die nichträumliche Ausgabe aus.

Es kann sinnvoll sein, Sprachausgaben nach Wichtigkeit zu klassifizieren und dafür zu sorgen, dass eine wichtigere Mitteilung eine unwichtigere verdrängt. In Atlas Speaks (s. Seite 42) wird eine Warteschlange für gesprochene Informationen verwaltet. Durch diese Technik kann der Benutzer die aktuell ausgesprochene Mitteilung überspringen, ohne dass die Warteschlange gelöscht wird. Bei ihr handelt es sich um

1. Ein rhythmisches Tonsignal wird auch für die akustische Ausgabe von Einparkhilfen von PKWs eingesetzt: Unterhalb einer gewissen Entfernung zu einem Hindernis setzt ein einfacher Wellenklang ein, dessen Rhythmus umgekehrt proportional zur Entfernung ist. Wenn das Fahrzeug sehr nahe am Hindernis ist, erklingt der Ton durchgängig.

eine Prioritätswarteschlange mit zwei möglichen Prioritäten. Nachrichten hoher Priorität gelangen dadurch an den Kopf der Schlange und werden gesprochen, sobald die Ausgabe der aktuellen Mitteilung beendet wurde (LAPIERRE 1998, 18ff). Bei virtuellen taktilen Karten werden alle Sprachausgaben als gleichwichtig angesehen, die aktuelle Ausgabe bricht daher eine möglicherweise gerade gesprochene ab.

#### 6.2.1.2 Objekterkennung

Es müssen vier verschiedene Objekte erkannt werden: die Fingermarkierung, der Streckenanfangs-, der Streckenendstein und die Streckensteine. Die ersten drei Objekte besitzen jeweils unterschiedliche Farben, da sie unterschiedlichen Funktionen dienen und für den Benutzer unterschiedlich geformt sind. (Der Streckenanfangs- und der Streckenendstein unterscheiden sich taktil durch den Stift, welcher nur beim Streckenanfangsstein vorhanden ist, damit ein Streckenstein auf ihn gesteckt werden kann.)

Die Bildverarbeitungsschleife wird zyklisch durchlaufen, wird aber nicht nach Ablauf eines bestimmten Zeitabschnittes angestoßen, sondern immer dann, wenn die vorherige Berechnung zu Ende ist. (Die Anzahl verarbeiteter Bilder pro Zeiteinheit ist also nicht konstant.) Die Berechnungsdauer richtet sich nämlich danach, ob überhaupt Objekte zur Erkennung vorliegen und ob erkannte Objekte schon einmal erkannt wurden bzw. immer noch am alten Ort liegen.

Da die Streckensteine alle dieselbe Form und Funktion besitzen, wird zwischen ihnen bezüglich der Bildverarbeitung nur nach ihrer jeweiligen Position unterschieden. Farben, die sich auch auf der Hand finden lassen (wobei es sich tatsächlich um je nach Lage auf der Hand verschiedene Farbtöne handelt, nicht nur verschiedene RGB-Werte), stehen für die Markierung anderer Objekte nicht zur Verfügung, um Wechselungen zwischen Interaktionsobjekten und einer Hand zu vermeiden.

Die Steine überlappen sich, wenn sie platziert werden: Der erste Streckenstein sitzt auf der Achse des runden Anfangssteines, welche sich in der Mitte der Deckelfläche des Anfangssteines befindet. Da die Deckelfläche des Anfangssteines bis auf den herausragenden Stift nach oben plan abschließt und gleichzeitig die Farbe zum Verfolgen des Steines mittels Bildverarbeitung trägt, wird sie also nach Platzierung des ersten Streckensteines zumindest teilweise überdeckt. Ein teilüberdeckter Anfangsstein kann zwar als solcher von der Bildverarbeitungs-komponente erkannt werden, seine Lage lässt sich aber nicht mehr rekonstruieren. Daher musste die Software für die Interaktion so angepasst werden, dass der teilüberdeckte Anfangsstein ignoriert bzw. angenommen wird, dass er sich noch an dem Platz befindet, an dem er zum letzten Mal vollständig erkannt wurde.

Die Position wird nur aus vollständig sichtbaren Steinen berechnet, weil eine Überdeckung die Bestimmung der Position aus Momenten verhindert. Als Kriterium, wann ein Stein vollständig sichtbar ist, kann die Anzahl der miteinander verbundenen Punkte der Farbe des Steines genommen werden. Diese Anzahl ist prinzipiell bekannt, weil sie sich aus der Fläche der farbigen Markierung eines Steines ergibt. Leider sind durch Rauschen und durch optisches Verschwimmen des Steines mit seiner Umgebung nicht alle Steinpunkte erkennbar. Es kann also nur überprüft werden, ob die Zahl der Punkte sich in einem gewissen Intervall befindet.

Wenn ein Stein langsam von einem anderen oder der Hand überdeckt wird, reduziert sich die Anzahl der erkannten Punkte in kleinen Schritten. Dadurch kann das System nicht mehr feststellen, wann der Stein zum letzten Mal vollständig sichtbar war (die Zahl der erkannten Punkte auch eines ruhenden Steines schwankt durch

Rauschen) und berechnet damit möglicherweise die Position eines Steines falsch, bevor die Anzahl der erkannten Punkte nicht mehr in dem genannten Intervall liegt.

Die Streckensteine werden von Benutzern bei der Konstruktion erst dann gelegt, nachdem die Strecke mit den Anfangs- und Endsteinen ausgewählt wurde. Anfangs- und Endstein können also beim Auftauchen des ersten Streckensteines als statisch angesehen werden. Es wurde daher zunächst ein Ansatz implementiert, der gemeldete Lageveränderungen von Streckenanfangs- und -endstein nicht an die Interaktionskomponente weiterleitet, wenn sich auch Streckensteine auf der Arbeitsfläche befinden. Streckenanfangs- und -endstein werden erst wieder beachtet, wenn der letzte Streckenstein entfernt wurde.

In Versuchen mit Benutzern hat sich jedoch herausgestellt, dass die Positionen von Anfangs- und Endstein nicht sofort wieder überprüft und die Strecke möglicherweise Neuberechnet werden dürfen, wenn kein Streckenstein mehr erkannt wurde. Ein Streckenstein kann nämlich auch dann nicht erkannt werden, wenn er schräg gehalten wird und sich das von seiner farbigen Deckelfläche reflektierte Licht ändert.

Wenn der erste Streckenstein beim Aufsetzen auf den Anfangsstein schräg gehalten wird, wird er nicht mehr erkannt, und das Bildverarbeitungssystem versucht, die Position von Streckenanfangs- und Endstein neu zu bestimmen. Da der Streckenanfangsstein teilweise überdeckt ist, wird seine Position entweder falsch berechnet oder gar nicht gefunden, so dass entweder eine falsche oder gar keine Strecke bestimmt wird. Dadurch kann das System dem Benutzer nicht mehr korrekt mitteilen, wo er den ersten Streckenstein anlegen soll.

Um dieses Problem zu lösen, musste von der Anforderung abgerückt werden, die Interaktion beim Legen der Steine komplett über die Steine selbst vorzunehmen. Es wurde daher eine Bestätigungsfunktion eingebaut, mit welcher der Benutzer dem System mitteilen kann, dass er von dem Modus der Streckenauswahl in den des Legens von Steinen übergehen möchte bzw. dass er einen Stein gelegt hat und nun mit dem Legen des nächsten beginnen möchte.

Diese Bestätigung kann prinzipiell durch einen beliebigen Schalter ausgelöst werden, beispielsweise durch den Druck einer Maustaste, einer Tastaturtaste oder durch einen Zusatzschalter. Hier wird die Bestätigung durch die Leertaste ausgelöst, die vom Benutzer leicht bedient werden kann, wenn die Tastatur neben die Arbeitsfläche gelegt wird.

### 6.2.1.3 Anpassung der Strecken an die Steine

Die Verbindungsstrecke zwischen Streckenanfangs- und Endstein muss an die Längen der verwendeten Steine angepasst werden, damit eine Konstruktion möglich ist. Nach der Errechnung des Verbindungspfades auf dem Graphen wird dieser vereinfacht, indem Segmente, die (innerhalb eines Toleranzwertes) gerade ineinander übergehen, zu einem Segment zusammengefasst werden.

Die vereinfachte Strecke wird so angepasst, dass sie mit Streckensteinen nachgelegt werden kann. Anfangs- und Endpunkt der Strecke bleiben dabei erhalten, weil sie vom Benutzer durch Legen des Streckenanfangs- und Endsteins gewählt wurden. Weiterhin wird die Länge eines geraden Wegsegmentes so gewählt, dass sie durch aufeinandergesteckte Streckensteine gefüllt werden kann. Im folgenden wird davon ausgegangen, dass Steine, die zum selben Segment gehören, auch im Ergebnis gerade aufeinander folgen. (Leichte Krümmungen eines Weges können zwar beim Begehen nur schwer, in seiner Darstellung durch Steine jedoch leichter festgestellt werden.) Der erste Streckenstein wird je nach Konstruktion der Steine auf den Routenanfangs-

stein gesteckt (steht also ein gewisses Stück über bezüglich des Routenanfangssteins, wodurch der Anfang der angepassten Strecke vor dem ursprünglichen Streckenanfang liegt), der letzte Streckenstein hört vor dem letzten Streckenendstein auf (ohne auf diesem zu liegen).

Jedes Streckensegment wird durch mindestens einen Stein abgedeckt, weil nach der Vereinfachung der Strecke nur noch solche Segmente übrig sind, die als wichtig erachtet werden. Aus Benutzersicht darf kein Segment weggelassen werden, wenn es durch einen ‚Abbiegewinkel‘ einer bestimmten Größe mit dem vorherigen Segment verbunden ist. Abgesehen von diesem Erhalten auch kleiner Segmente gibt der Algorithmus der Beibehaltung von Winkeln Vorrang vor der von Längen. Dies ergibt sich aus der generellen Maßstäblichkeit von Entfernungen und der (vergleichsweisen) Konstanz von Winkeln.

Gegeben ist also ein Linienzug. Gesucht ist ein neuer Linienzug mit demselben Anfangs- und Endpunkt wie der Anfangslinienzug und mit derselben Anzahl von Segmenten. Die Länge eines Segmentes des neuen Linienzuges entspricht der Summe von Vielfachen von Längen der eingesetzten Steine von Verbindungsanfangs zum -ende. Es wird also nur die Länge vom Lochmittelpunkt zum Stiftmittelpunkt betrachtet. Eine Ausnahme ist das letzte Segment: Dessen Länge schließt auch die Entfernung von Stiftmittelpunkt zum Steinende mit ein, weil der letzte Streckenstein vor dem Streckenendstein zu liegen kommt. Ein Segment ist mindestens so lang wie die Verbindungslänge des kürzesten Steines, zuzüglich der Entfernung von Stiftmittelpunkt zum Steinende für das letzte Segment.

Für den neuen Linienzug soll weiterhin gelten, dass die Länge eines Segmentes von der Länge des entsprechenden Ausgangssegments möglichst wenig abweichen soll (die Abweichung wird hier als ‚Längenfehler‘ bezeichnet). Entsprechend soll ein Winkel zwischen zwei Segmenten des neuen Linienzuges möglichst wenig vom entsprechenden Winkel des Ausgangslinienzuges abweichen (die Abweichung wird entsprechend als ‚Winkelfehler‘ bezeichnet).

Gegeben ist also eine Ausgangsstrecke nach Vereinfachung mit  $n+1$  Streckenpunkten mit den Punkten  $J_0 \dots J_n$ , Winkel zwischen den Segmenten  $j_0 \dots j_{n-1}$ , Verbindungsstücken  $L_1 \dots L_n$  und Längen der Verbindungsstücke  $l_1 \dots l_n$  (s. Abbildung 20). Gesucht ist eine entsprechende Zielstrecke mit  $n+1$  Streckenpunkten  $K_0 \dots K_n$ , Winkeln  $k_0 \dots k_{n-1}$  und Verbindungsstücken  $M_1 \dots M_n$ . Die  $r$  möglichen Steinlängen werden mit  $s_1 \dots s_r$  bezeichnet, die Länge der Verbindungsstücke  $M_1 \dots M_n$  mit  $m_1 \dots m_n$ , wobei sich die Längen der Verbindungsstücke als Vielfache der Steinlängen ergeben, also gilt

$$m_i = \sum_{j=1}^r a_{ij}s_j \text{ für } a_{ij} \in \{1, \dots\} \text{ und } m_i > 0. \quad (\text{GL 4})$$

Start- und Endpunkt sind (o.B.d.A.) konstant, es gilt also  $J_0 = K_0$  und  $J_n = K_n$ . Die Winkel der neuen Strecke sollen so wenig wie möglich von den entsprechenden Winkeln der alten Strecke abweichen. Weiterhin sollen auch die Längen der neuen Liniensegmente, die ja gerade verändert werden, so wenig wie möglich von den Längen der ursprünglichen Liniensegmente abweichen. Die Summe der Winkelfehler sollen minimal werden, also



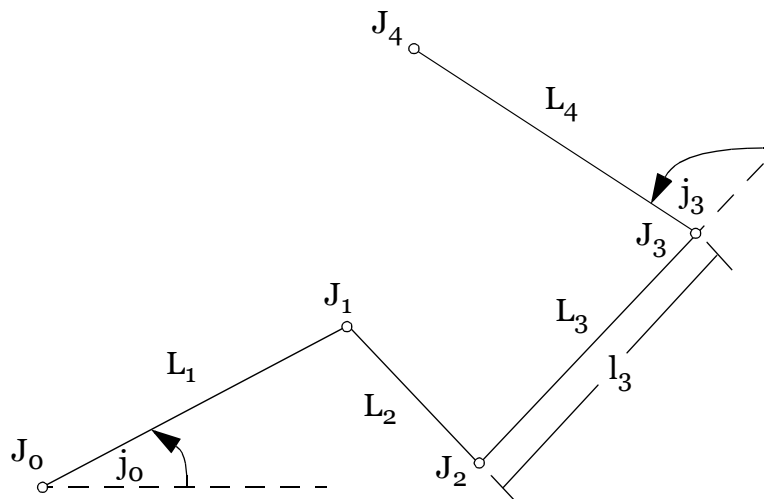


Abbildung 20. Bezeichnungen der Elemente der Ausgangsstrecke  
(in Anlehnung an O'ROURKE 1997, 293)

$$\sum_{i=0}^{n-1} |j_i - k_i| \rightarrow \min., \quad (\text{GL 5})$$

ebenso die Summe der Längenfehler:

$$\sum_{i=1}^n |l_i - m_i| \rightarrow \min. \quad (\text{GL 6})$$

Die gleichzeitige Optimierung von Längen und Winkeln ist aufwendig, weil der Zusammenhang zwischen diesen Größen nichtlinear ist. Die Berechnung von Längen und Winkeln erfolgt hier daher getrennt. Die Längen sind stärker beschränkt, für die Winkel liegt die einzige Einschränkung in möglichst geringen Fehlern. Es liegt daher nahe, zunächst die Längen zu berechnen, unter Beibehaltung des Startpunktes und der Verbindungen zwischen Segmenten. Wenn die Längen unter Fehlerminimierung berechnet wurden, verschieben sich die Verbindungspunkte (einschließlich des Endpunktes). Die Winkel können anschließend unter Beibehaltung der errechneten Längen bestimmt werden, indem der verschobene Endpunkt zum Zielpunkt ‚umgebogen‘ wird, unter gleichmäßiger Änderung der Winkel.

Die Berechnung von Winkeln auf diese Art kann als Berechnung des Endpunktes einer ‚offenen Kette‘ aufgefasst werden. Diese Art von Berechnung wird in der Computergrafik für die Animation unter anderem von menschlichen Bewegungen benötigt (WATT U. WATT 1996, 370f). Dabei wird für die gegebene Position zum Beispiel der Hand die entsprechende Armstellung berechnet. Die dafür nötigen Verfahren sind unter dem Namen Inverse Kinematik bekannt. Die entsprechenden Verfahren entstammen der Robotik. Bei der Kinematik handelt es sich allgemein um das Studium von Bewegungen von Objekten ohne Betrachtung von Kräften (ebd.). Das Objekt wird dabei als Zustandsvektor  $\theta$  modelliert:

$$\theta = (\theta_0, \dots, \theta_{n+1}) \quad (\text{GL 7})$$

In der Ebene stellt dieser Vektor bei festen Längen die Winkel des Manipulators dar. Bei der Vorwärtskinematik wird aus Gelenkstellungen  $\theta$  der Endpunkt  $X$  einer offenen Kette berechnet:

$$X = f(\theta) \quad (\text{GL 8})$$

$X$  kann dabei leicht und eindeutig bestimmt werden. Bei der Inversen Kinematik wird entsprechend für einen gegebenen Endpunkt  $X$  die Stellung der Kettenglieder  $\theta$  ermittelt:

$$\theta = f^{-1}(X) \quad (\text{GL 9})$$

In beiden Fällen steigt der Berechnungsaufwand mit der Anzahl der Gelenke  $n$ . Für die Inverse Kinematik ist das Problem für  $n > 0$  unterdefiniert, das System wird redundant. Ein ganzer Unterraum  $\{\theta_x\}$  mit

$$\theta(\theta_0, \dots, \theta_{n+1}) \in \theta_x \text{ für } f(\theta) = X \quad (\text{GL 10})$$

lässt sich auf  $X$  abbilden (ebd., 371). Intuitiv bedeutet dies für das Problem der Anpassung der Streckensegmente an die Steinlängen, dass sich für einen gegebenen Anfangs- und Endpunkt viele Stellungen der Steine finden lassen, falls Anfangs- und Endpunkt nicht durch eine gerade Linie verbunden werden können. Der Lösungsraum wird dadurch beschränkt, dass sich Steine nicht beliebig überlappen können. So kann der Winkel zwischen zwei Steinen je nach Design beispielsweise nur bis zu  $135^\circ$  betragen.

Weitere Einschränkungen kommen dadurch zustande, dass der mit den Steinen gelegte Pfad von dem Ausgangspfad möglichst wenig abweichen soll. Dies entspricht einer gängigen Forderung bei der Bewegung eines Manipulators bei der Robotersteuerung: Wenn der Manipulatorendpunkt an eine bestimmte Position bewegt wird, soll die nötige Bewegung des Gesamtarmes minimal sein. Gleichung 9 kann generell nur für eine kleine Anzahl von Kettengliedern analytisch gelöst werden, weil  $f$  für  $\theta$  höherer Dimension nichtlinear ist. Die gesuchte Lösung kann jedoch iterativ unter Zuhilfenahme der Jacobi-Matrix bestimmt werden (ebd., 375).

Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz von Optimierungsverfahren. Für diese gilt jedoch auch, dass sie starken Einschränkungen bezüglich der Rechenzeit unterliegen, damit die Interaktion in Echtzeit erfolgen kann. Ein derartiges Verfahren ist der zyklische Koordinationabstieg (Cyclic Coordinate Descent, CCD), welches für die Errechnung einer ersten Näherung eines Problems der Inversen Kinematik konzipiert wurde (WANG U. CHEN 1991). Es besitzt jedoch für die Streckenanpassung den Nachteil, dass Winkel am Ende der Kette stärker verändert werden als solche am Anfang. (Für die Steuerung eines Roboterarmes ist dies häufig sogar gewünscht.)

Hier soll nun ein einfacher Algorithmus für die Errechnung einer Folge von Steinen aus einer Strecke vorgestellt werden. Als Eingabe erhält der Algorithmus die vereinfachte Strecke als Folge von Liniensegmenten  $L_i$  und eine oder mehrere Steinlängen  $s_1 \dots s_r$  (absteigend sortiert). Als Ausgabe liefert der Algorithmus Anlegepunkte und Winkel von Steinen, wobei der Winkel für aufeinanderfolgende Steine mit gleichem Winkel nur einmal abgespeichert wird. Zur Ausgabe gehört auch der Anfangspunkt der neuen Strecke, weil er sich vom Anfangspunkt der Eingabestrecke unterscheidet,

weil der erste Streckenstein auf dem Anfangsstein liegt und der letzte Streckenstein außerhalb des Endsteins.

Der Algorithmus iteriert über alle Liniensegmente der vereinfachten Strecke. Bei jeder Iteration berechnet er die beste Approximation der Länge eines Liniensegmentes durch eine Folge von Steinen gleicher Richtung. Der Fehler der Länge dieser Steinfolge bezüglich der ursprünglichen Länge des aktuellen Liniensegmentes beträgt dabei offensichtlich höchstens die Hälfte der Länge eines Streckensteines. Nachdem der Algorithmus die Länge eines Liniensegmentes durch Streckensteine angenähert hat, ersetzt er es durch eines mit der angenäherten Länge, wobei der Anfangspunkt und die Richtung beibehalten werden. Danach rotiert er die Steine so, dass die Strecke wieder verbunden ist.

Je kleiner die Streckensteine sind, desto genauer können sie offensichtlich die ursprüngliche Strecke annähern. Allerdings müssen von kleineren Streckensteinen auch mehr gelegt werden. Sinnvoll erscheint der Einsatz von Streckensteinen verschiedener Längen, was den Algorithmus kaum verkompliziert. Die Steine, die für das System verwendet werden, besitzen jedoch alle dieselbe Länge, was ihre Herstellung vereinfacht hat.

### 6.2.2 System mit Krafrückkopplung

Das System mit Krafrückkopplung besitzt eine GUI-Oberfläche zur Darstellung der Karte und der aktuellen Cursorposition (s. Abbildung 21). Die Karte wird wieder in einer GIS-Komponente verwaltet. Über eine Sprachkomponente können Informationen zu Objekten ausgegeben werden. Im Gegensatz zu dem System mit Bildverarbeitung müssen keine akustischen Ausgaben zu Objektpositionen produziert werden.

Der Phantom stellt selbst einen Sensor und einen Aktor bereit: Der Sensor misst die aktuelle Armstellung, und der Aktor erzeugt Kräfte, um haptische Objekte zu simulieren. Die Steuerung bestimmt das aktuelle Kartenobjekt, die Kraftverwaltungs-komponente berechnet die nötigen Kräfte zur Simulation eines Objektes an einer bestimmten Stelle. Bei der Kartenexploration werden nur statische Objekte haptisch dargestellt, die Berechnung kann sich daher an Standardverfahren zum haptischen Rendering orientieren. Die haptische Darstellung der beweglichen Bausteine ist aufwendiger, weil sie in Abhängigkeit der aktuellen Steinposition geschieht und auch die Bewegung der Bausteine haptisch dargestellt werden muss.

Beim Einlesen in den haptischen Szenengraphen werden die Kartenkoordinaten automatisch transformiert, so dass sie den Arbeitsbereich des Phantom ausfüllen. Für die grafische Darstellung werden die Objekte im Szenengraphen des Phantom wiederum an das GUI-Fenster angepasst.

Neben der Exploration einer Karte wird auch die Konstruktion mit dem Krafrückkopplungsgerät unterstützt. Anders als bei den physischen Objekten wird das Einrasten bei Einsatz des Phantom vollständig durch den Computer gesteuert, ohne dass Formschluss nötig wäre. Die simulierten Objekte dürfen sich durchaus an den Stellen durchdringen, an denen sie aneinander gelegt werden, ein anderes Verhalten müsste im Programm erzeugt werden, wenn dies erwünscht wäre.

Um einen Stein zu platzieren, wird zunächst ein neuer Stein im Programm angefordert. Der neue Stein wird vom Programm dann automatisch am Streckenanfang oder am Ende des vorherigen Steines platziert. Der Phantomcursor und damit der Arm selbst wird an die andere Seite des neuen Steines gezogen. Wenn sich der Cursor am äußeren Ende des Steines befindet, kann der Stein um eine Achse am anderen Ende in der Ebene gedreht werden.

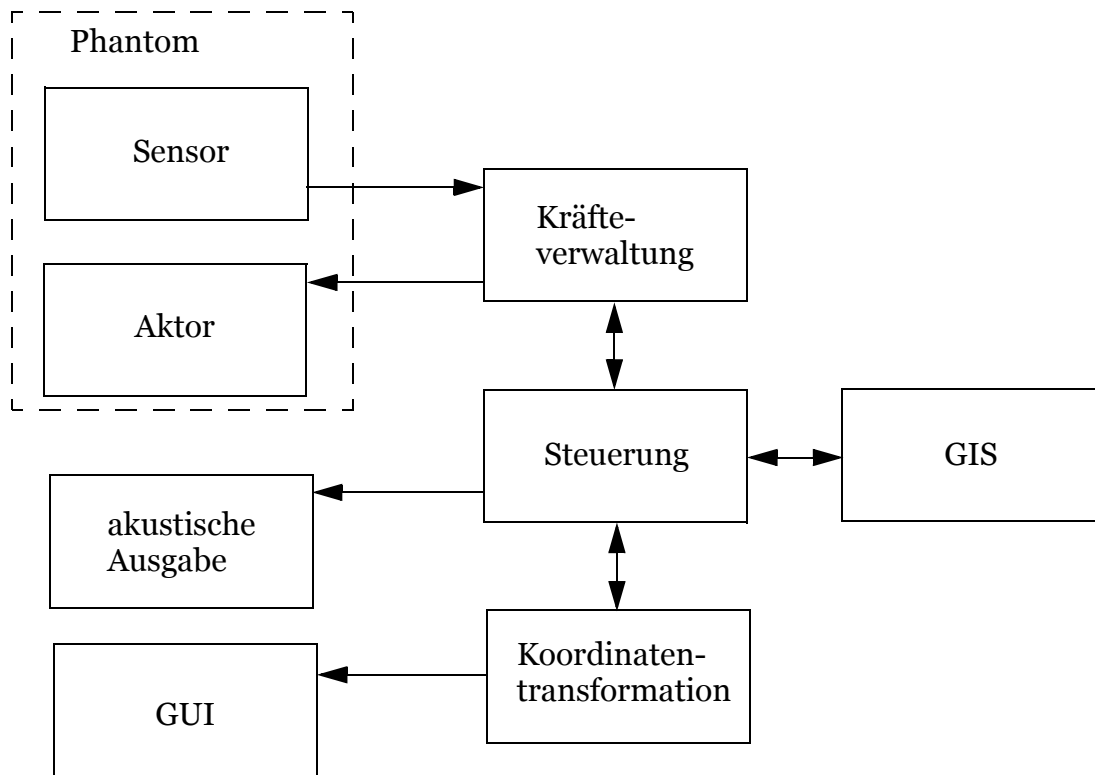


Abbildung 21. Architektur eines Systems mit Krafterückkopplung

Beim Drehen ist eine geringe Gegenkraft spürbar, der Haftreibung simuliert, zu einem realistischeren Eindruck des Manipulierens eines physischen Objektes führt und das gesteuerte Platzieren des Bausteines unterstützt. Wenn der Stein auf diese Weise in die korrekte Drehlage gebracht wurde, ergibt sich der Eindruck des Einrastens. Dieser Eindruck wird erzeugt, indem beim Eintreten in den Bereich der korrekten Position die Gegenkraft zunächst abgeschaltet und beim Weiterdrehen das Austreten durch eine größere Gegenkraft erschwert wird. Wenn ein Stein korrekt liegt, kann durch ein erneutes Kommando der nächste noch zu legenden Stein angefordert werden.

## 6.3 Implementierungen

In diesem Abschnitt werden die Implementierungen der Systeme zur konstruktiven Exploration sowohl mit Bildverarbeitung als auch mit Krafterückkopplung beschrieben. Zunächst wird die Implementierung der GIS-Komponente geschildert, die beiden Ansätzen gemein ist.

### 6.3.1 Digitale Kartendaten und ihre Verarbeitung

Handelsübliche digitale Karten dienen als Basis für virtuelle taktile Karten. Bei den hier eingesetzten Kartendaten handelt es sich um solche der Firmen Cardy und TeleAtlas. Diese Daten wurden in einem Vorverarbeitungsschritt von einem Filterprogramm auf Fehler untersucht (s. MICHEL 2000), und vorhandene Fehler wurden

soweit wie möglich automatisch entfernt. Die Daten wurden dann in einem gemeinsamen ASCII-Format namens ‚GEO‘ (s. MOBIC 1995) abgespeichert, welches von den hier beschriebenen Programmen eingelesen werden kann.

Die digitalen Kartendaten sind in den GEO-Dateien in relationaler Form gespeichert (ebd.). Das Wegenetz selbst liegt als gerichteter planar-eingebetteter Liniengraph (s. MEHLHORN U. NÄHER 1999) vor mit Punkten an den Knoten, ergänzt um Punkte, die keine Graphknoten sind (die beispielsweise Gebäude darstellen) und Metainformationen (beispielsweise Namen und Arten von Straßen und anderen Segmenten, zum Beispiel Flussabschnitten).

Die Daten werden hierarchisch gespeichert: Straßen verweisen auf Segmente und diese wiederum auf ihren Anfangs- und Endknoten. Nur in den Knoten befinden sich Koordinaten. Diese Koordinaten liegen als Längen- und Breitengrad vor. Die Knoten verweisen auch wieder auf die Segmente, die in ihnen aufeinandertreffen, wobei diese Verweise gegen den Uhrzeigersinn sortiert sind, was gewisse Algorithmen erleichtert, beispielsweise zur Erzeugung von Segmentflächen (s. Abschnitt 6.3.3.1). Zu den einzelnen Datenelementen können Attribute wie Namen, Arten von Gebäuden und Straßen, Gleise, Oberflächenbeschaffenheit von Wegen, Gefahrenpunkte, Kreuzungen, Ampeln usw. gespeichert werden (MOBIC 1995). (Die entsprechenden Angaben sind jedoch nicht in allen Kartendateien vorhanden.)

In den hier entwickelten Programmen werden die Karten in Objekten verwaltet. Die relationale Struktur der digitalen Kartendaten wird beim Einlesen in eine Objektstruktur umgewandelt. Die Objekte gehören Klassen an, die in einer Vererbungsstruktur stehen (s. Abbildung 22). *GeoObject* stellt die Oberklasse der eigentlichen Kartenklassen dar. Die Unterklasse *Location* ist wiederum Oberklasse für die beiden

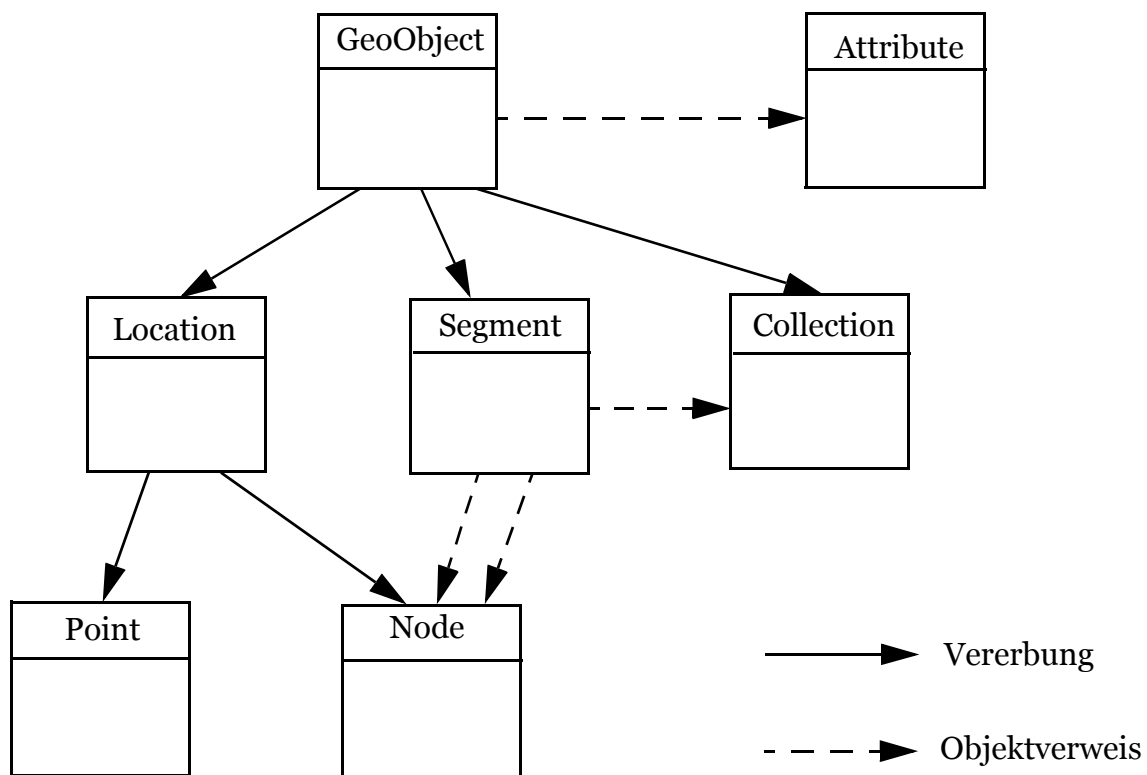


Abbildung 22. Vererbungsstruktur von Klassen zur Abbildung der GEO-Dateien (nur Vorwärtsbezüge zwischen Objekten).

Klassen *Point* und *Node* und speichert Koordinaten. Objekte der Klasse *Point* stellen einzelne örtliche Objekte dar, z.B. Häuser (die also ausdehnungslos modelliert werden). Objekte der Klasse *Node* speichern die Koordinaten von Segmenten. Gewöhnlich gibt es zwei Knoten pro Segment, Segmente mit einem Knoten befinden sich am Rand oder modellieren eine Sackgasse o.ä. Segmente werden in *Collection*-Objekten zur Straßen, Flussläufen usw. zusammengefasst. Objekte der Klasse *Attribute* speichern Namen und Typen von Objekten.

Die Strecke zwischen zwei Kartenknoten wird mit dem „Single-Source Shortest Path“-Algorithmus von DIJKSTRA bestimmt (DIJKSTRA 1959). Dieser Algorithmus wurde so verändert, dass er auf Basis der Wegattribute eines Segments berücksichtigt, dass bestimmte Graphkanten nicht begangen werden dürfen bzw. sollen, weil es sich dabei um ein Fluss-Segment oder eine Bundesstraße etc. handelt.

### 6.3.2 Kamerabasierter Ansatz

#### 6.3.2.1 Entwurf der Steine

Zur Umsetzung der ersten Variante des Systems zur konstruktiven Exploration mussten Steine entworfen und gefertigt werden. Dabei handelt es sich neben einem Ring zur Markierung des Zeigefingers um spielsteinähnliche Objekte. Zwei Objekte unterschiedlicher Form (und Farbe) dienen zur Auswahl von Streckenanfang und -ende. Eine Anzahl länglicher Steine dienen der Konstruktion der Strecke. Diese Objekte müssen sowohl von den Benutzenden als auch von der Bildverarbeitungskomponente des Systems unterschieden werden können. Die Streckensteine müssen untereinander nicht unterschieden werden können, da sie alle dieselbe Funktion erfüllen. (Sie werden von der Bildverarbeitungskomponente nach ihrem Ort erkannt.)

Aufgrund der Eigenschaften des Bildverarbeitungssystems müssen die farbig markierten Oberflächen der Steine für die Kamera vollständig unverdeckt erscheinen. Die Steine müssen also so hoch sein, dass sie mit an den Seiten gegriffen werden können, ohne dass die Oberseite verdeckt wird. Die Steine müssen weiterhin von der Bildverarbeitungskomponente sicher erkannt werden können. Sie müssen daher eine gewisse Fläche besitzen, weil Randpunkte nicht immer sicher klassifiziert werden können, da sie in der digitalisierten Aufnahme mit Punkten der Hand oder der Unterlage verschwimmen. Dies fällt wegen der geringen Anzahl von Randpunkten im Vergleich zur Anzahl der Punkte der Deckelfläche bei der Berechnung der Position und Lage eines Objektes durch Momente weniger stark ins Gewicht. (Momente können auch aus Objektkonturen berechnet werden, wie das Gestenerkennungssystem von BRÖCKL-FOX zeigt, welches auf Seite 88 beschrieben wurde. Dazu muss die Kontur jedoch geglättet werden.)

Die ersten Streckensteine waren aus Holz handgefertigt.<sup>1</sup> Sie bestanden aus zwei kurzen Holzleisten, die durch Holzstäbe übereinander angebracht waren (s. Abbildung 23a). Dadurch konnte die untere Holzleiste gegriffen werden, ohne dass die obere, farbig markierte verdeckt wurde. An den beiden Enden der unteren Leiste waren zwei Magnete angebracht. Diese sorgten sowohl für Haftung auf einer metallenen Unterlage als auch zwischen zwei hintereinander platzierten Streckensteinen. Allerdings entstand dadurch keine Achse, bezüglich der ein neugelegter Stein gedreht

---

1. Für die Herstellung danke ich meinem ehemaligen Kollegen Stefan Hiller.

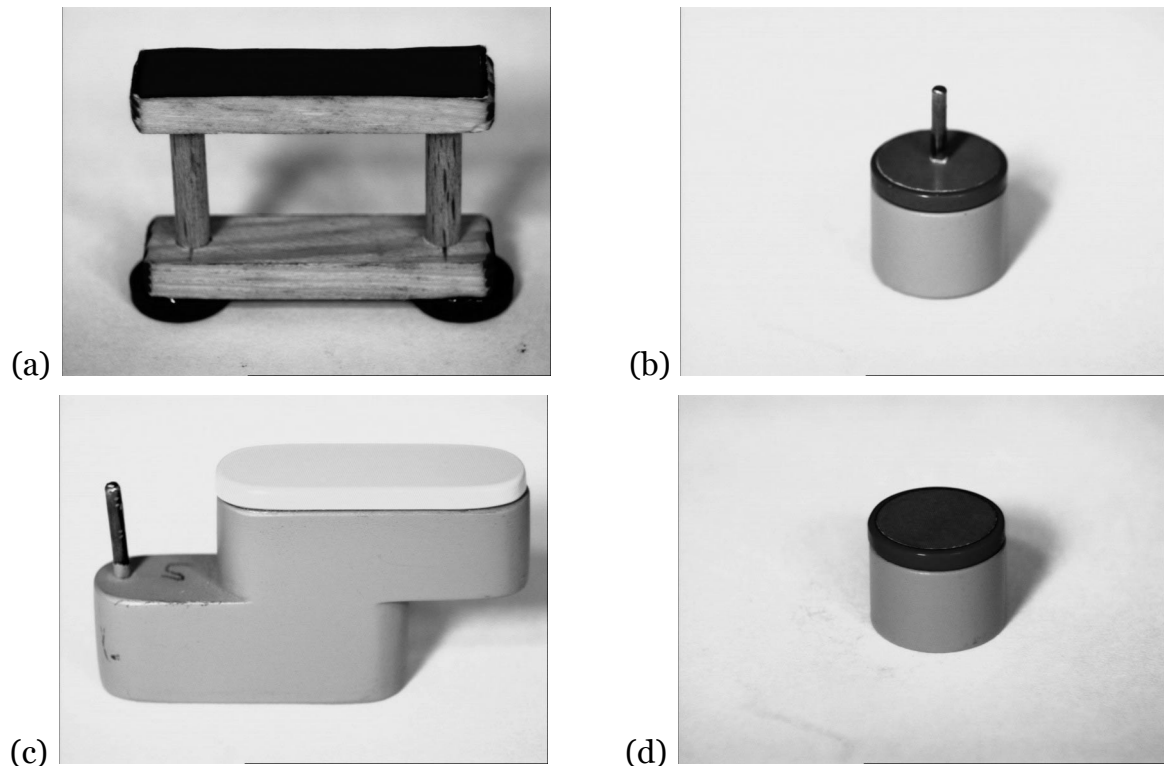


Abbildung 23. Erster Streckenstein in Holz (a), Startstein (b), Endstein (c) und Streckenstein aus PU-Schaum (d)

werden konnte. Außerdem waren die Magnete zu schwach, um das unbeabsichtigte Verschieben eines Steines zu verhindern.

Nach den Erfahrungen mit den Streckensteinen aus Holz wurden neue aus Kunststoff entworfen und als Einzelstücke gefertigt. Diese Kunststoffsteine wurden zusammen mit einem Studenten des Industriedesigns, Hagen Aedtner, konzipiert und gebaut. Die neuen Streckensteine besitzen jeweils einen Stift als Achse auf der einen und eine entsprechende Bohrung auf der anderen Seite, wodurch sie so ineinandergesteckt werden können, dass der Stift des einen die Achse für den anderen bildet (s. Abbildung 23c). Der Streckenanfangsstein ist rund und besitzt einen Stift für die Aufnahme des ersten Streckensteines, der Streckenendstein ist ähnlich geformt, besitzt aber keinen Stift (s. Abbildung 23b und d). Die Deckel mit der farbigen Fläche für die Bildverarbeitung wurden getrennt vom Rest der Steine hergestellt, um sie besser einfärben zu können.

Die Steine wurden aus hartem Polyurethanschaum (PU-Schaum) hergestellt, der für den Prototypenbau eingesetzt wird. Die Teile für die Steine wurden aus dem Schaum herausgesägt, -gefräst und -gefeilt, lackiert und anschließend zusammengesetzt. Die Gesamtlänge eines Streckensteines beträgt 55 mm, die Höhe 32 mm. Die Streckenanfangs- und Endsteine besitzen eine Höhe von 15 mm bis zur Deckelfläche, einschließlich des Stiftes ist der Streckenanfangsstein 27 mm hoch. Es wurden Magnete aus einer Neodym-Eisen-Bor (NdFeB)-Legierung eingesetzt, welche die derzeit stärksten Dauermagnete darstellen. Sie werden unter anderem im Lautsprecherbau benutzt. Von diesen Magneten wurde jeweils einer an der Unterseite eines jeden Steines versenkt angebracht. Die Magnete bewirken eine starke Haftung der Steine auf einer Metallplatte.

### 6.3.2.2 System zur Exploration virtueller taktiler Karten

Es wird nun die Implementierung eines Systems vorgestellt, mit dem virtuelle taktile Karten nur exploriert, nicht konstruiert werden können. Dieses System dient als Basis und Studie für die Implementierung eines Systems zur konstruktiven Exploration, das weiter unten vorgestellt wird. Das System zur Exploration basiert auf einer Objekterkennung, die in der Lage ist, beliebige farbige oder farbig markierte Objekte zu erkennen.

Da das System Objekte nach Farben segmentiert, müssen Benutzer einen farbigen Fingerring anlegen, damit die Position beispielsweise des Zeigefingers vom System erkannt werden kann. Dieser Nachteil ist für einen Forschungsprototypen leicht tragbar, zumal er außer den genannten Vorteilen mit der besseren Erkennung des Fingers einhergeht. Mit dem System kann eine Karte folgendermaßen erkundet werden: Der Benutzer bewegt den farbig markierten Zeigefinger über die Karte. Wenn der Zeigefinger ein Objekt auf der virtuellen Karte berührt, wird der Name des Objektes ausgegeben.

Das System wurde in VisualWorks Smalltalk implementiert, welches sich sehr für die Entwicklung von Prototypen eignet, u.a. aufgrund der ausgefeilten Klassenbibliothek. Es wurde ein Ansatz gewählt, das Bildverarbeitungssystem analog zu den allgemeinen Betriebssystem-Events (zum Beispiel Mausbewegungen) in Smalltalk eingebunden wird. Die Bildverarbeitungskomponente teilt dabei der Smalltalk-Seite das Ende eines Erkennungsschrittes über eine Semaphore mit, auf deren Freigabe ein Smalltalk-Prozess wartet. Auf diese Weise blockiert das Smalltalk-System nicht während eines Bildverarbeitungsschrittes, sondern wartet passiv auf die Freigabe der Semaphore. Der von der Semaphore blockierte Smalltalk-Thread selbst (bei dem es sich nicht um einen Betriebssystemthread handelt) verbraucht im blockierten Zustand keine Prozessorzeit.

Die Routinen zur Digitalisierung eines Bildes und zur Erkennung von Objekten auf ihm laufen in einem gemeinsamen Betriebssystemthread, weil dadurch auf einem Multiprozessorsystem GUI und Verarbeitung auf jeweils einem eigenen Prozessor ausgeführt werden, was den Systemdurchsatz erhöht. Außerdem muss von Smalltalk aus der Erkennungs-Thread nur gestartet und beendet werden, der Overhead des Aufrufs einer C-Funktion von Smalltalk aus tritt daher nicht bei jedem Verarbeitungsschritt auf.

Die Interaktionssteuerung und die Verwaltung der digitalen Kartendaten sind in VisualWorks Smalltalk implementiert. Die Teilprogramme zur Bilderkennung, Sprach- und Klangausgabe wurden aus Gründen der Performanz und der Interoperabilität mit dem Betriebssystem in C implementiert. Die geladene Karte und das aktuelle Videobild werden in jeweils einem Smalltalk-Fenster dargestellt (s. Abbildung 24).

Die Infrastruktur zur Verwaltung mehrerer Eingabeelemente und zur akustischen und grafischen Ausgabe soll im folgenden kurz beschrieben werden (s. Abbildung 25). Auch wenn im weiter unten beschriebenen System zur konstruktiven Exploration aufgrund der verwendeten Programmiersprache und Klassenbibliothek (C++ und MFC) eine etwas andere Struktur verwendet wird, entspricht sie prinzipiell der hier vorgestellten. Der Ansatz stellt eine Erweiterung des Model-View-Controller (MVC)-Ansatzes dar. Dabei wird ein *Model* genanntes Datenobjekt durch ein *View* genanntes Ansichtsobjekt dargestellt und durch ein *Controller* genanntes Objekt gesteuert (GAMMA u.a. 1995). Der gepunktet gezeichnete Kasten enthält Model (*MapPad*), View (*MapPadView*) und Controller (*PositionerController*). Die mit durchgezogener Linie



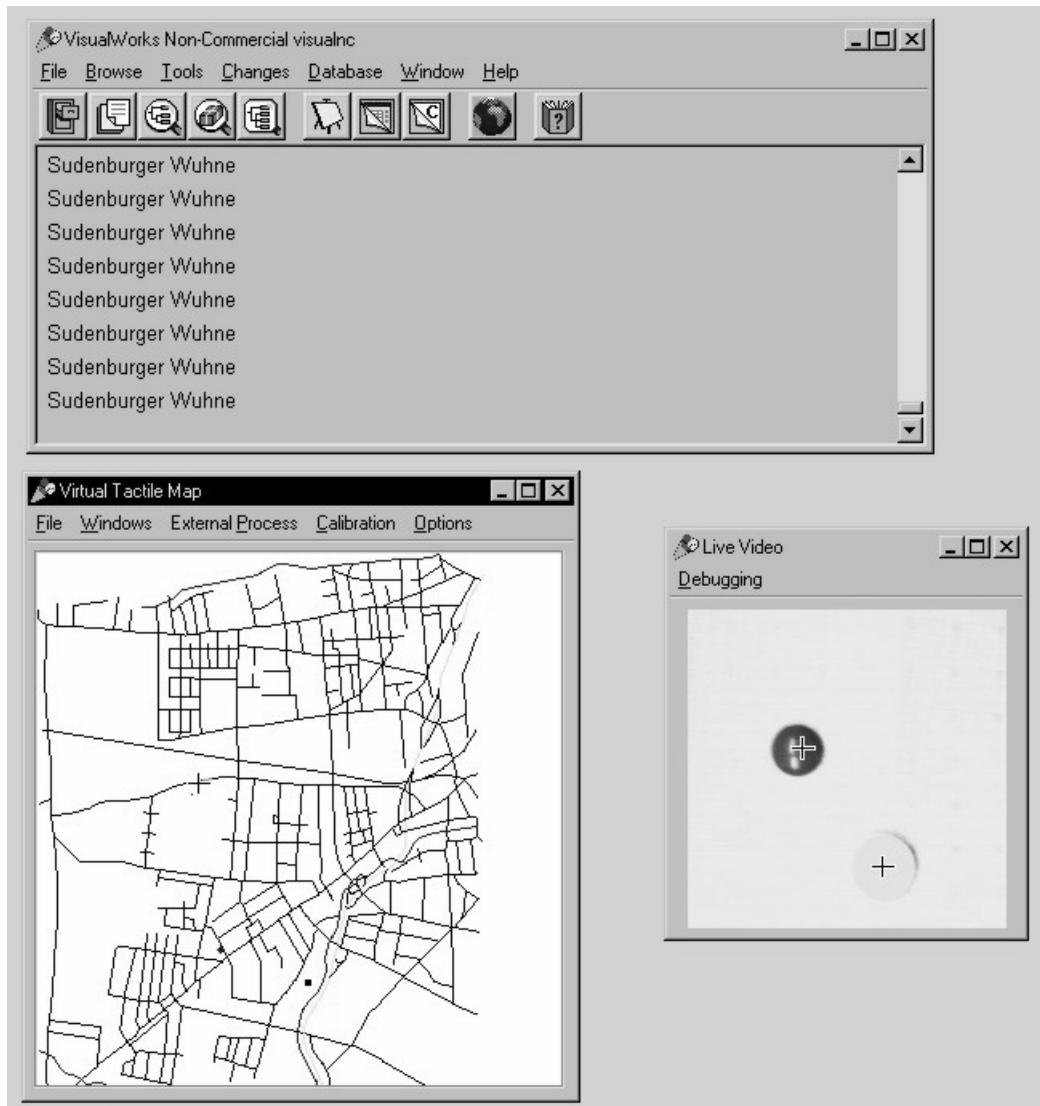


Abbildung 24. In Smalltalk und C implementiertes System zur Kartenexploration

gezeichneten Pfeile stellen Objektereferenzen vom referenzierenden zum referenzierten Objekt dar, die mit gestrichelter Linie gezeichneten Pfeile Abhängigkeitsverbindungen.

Positioner stellen eine Abstraktion eines Eingabeelementes dar, welches entweder über die Maus (über den *PositionerController*) oder eine der Marken gesteuert wird. Die Bildverarbeitungskomponente steuert die Marken. Neben der *MapPadView* als grafischem Ausgabeelement stellt *MapSoundScape* eine akustische Ausgabe bereit. *Positioner* werden über *PositionerImages* auf der View ausgegeben. Diese *PositionerImages* enthalten Daten zur Ausgabe eines *Positioners*.

Für die Sprachausgabe wurde Software benutzt, die Sprache aus Text erzeugen und dann über die im PC vorhandene Soundkarte ausgeben kann. Sprachsynthesysteme auf Softwarebasis entsprechen dem Stand der Technik. Externe Geräte sind teuer und belegen eine Ausgabeschnittstelle des Computers. Mit der Microsoft Speech API (MS SAPI) liegt eine Standardschnittstelle für die Ansteuerung von Sprachsynthesizern vor (für die hier besprochenen Systeme wurde die MS SAPI 4.0 eingesetzt, s. MICROSOFT 1998). Bei SAPI handelt es sich nur um eine API zur Sprachein- und -aus-

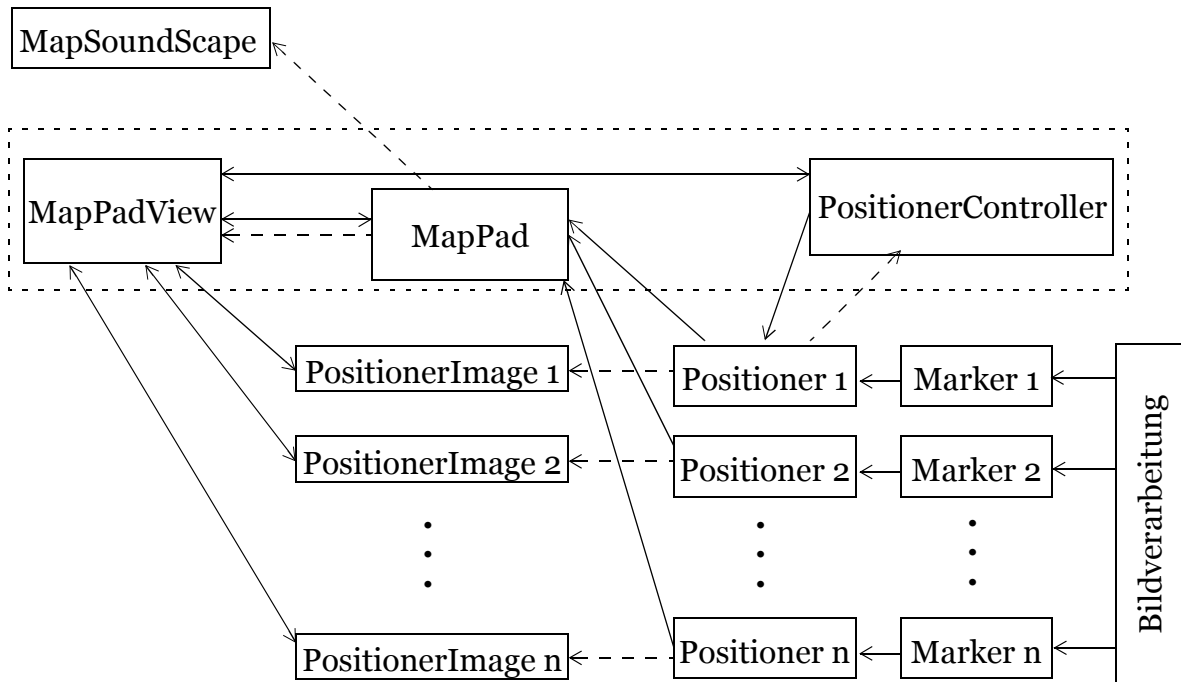


Abbildung 25. Objekte zur Ein- und Ausgabe

gabe, Microsoft liefert aber auch Sprachsynthesizer für Englisch und Spanisch mit verschiedenen Sprachcharakteristika (Sprechern) mit.

### 6.3.2.3 System zur konstruktiven Exploration mit physischen Objekten

Das System zur konstruktiven Exploration ist vollständig in C++ entwickelt, weil damit ein höherer Durchsatz bei der Erkennung mehrerer Objekte, wie sie zur Konstruktion nötig sind, erzielt werden kann. Die Benutzungsoberfläche ist mit der entsprechenden Klassenbibliothek von Microsoft für C++, MFC implementiert (s. Abbildung 26 und Abbildung 27). Das Bildverarbeitungssystem läuft in einem eigenen Thread, weil damit auf einem Multiprozessorsystem sowohl die Erkennung als auch die Anzeige von Steinen und der Strecke auf der Karte auf jeweils unterschiedlichen Prozessoren ausgeführt werden, was den Durchsatz des Systems erhöht. Die Bilddigitalisierung läuft von den genannten beiden Threads wiederum unabhängig. Der verwendete Framegrabber erlaubt es nämlich einem Programm, die Digitalisierung anzustoßen, ohne auf das Ende warten zu müssen. Der Framegrabber teilt dem Programm den Abschluss der Digitalisierung über das Setzen eines vereinbarten Ereignisobjekts von Windows NT mit.

Das Programm benutzt Double buffering, lässt den Framegrabber also abwechselnd in zwei verschiedene Speicherbereiche digitalisieren. Der Erkennungsthread läuft in einer Schleife, die auf das Setzen von Betriebssystemereignissen wartet. Dies ist nötig, damit der Thread unter Windows NT von außen gestoppt werden kann. Außerdem kann der Thread damit auf das Ereignis reagieren, mit dem der Framegrabber anzeigt, dass er ein Bild digitalisiert hat. Wenn das Ereignis gesetzt ist, weist die Bildverarbeitungskomponente dem Grabber einen anderen Speicherbereich zum Digitalisieren als den aktuellen zu. Dann stößt sie die Digitalisierung in diesen Speicherbereich an und verarbeitet das aktuelle Bild.



Abbildung 26. Streckensteine (teilweise gebaute Strecke, letzter Stein mit aus der Steinposition errechneter Linie), Streckenendstein und Hand

Wenn die Bildverarbeitungs-komponente feststellt, dass sich ein Objekt bewegt hat, teilt sie dies der Interaktionskomponente mit. Diese läuft ebenfalls in einer Schleife, bei der es sich um die Nachrichtenverarbeitungsschleife von interaktiven Windows-Programmen handelt. Um der Interaktionskomponente eine Änderung mitzuteilen, sendet ihr die Verarbeitungskomponente eine von mehreren dafür definierten Fensternachrichten. Bei diesen Nachrichten handelt es sich also nicht um Systemfensternachrichten, ihre Syntax und Semantik wurden für das Programm festgelegt. Sie zeigen der Interaktionskomponente das Auftauchen, sich Bewegen und Entfernen eines Steines an.

Die Kommunikation über Fensternachrichten wurde gewählt, damit die Nachrichten im Thread der Interaktionskomponente verarbeitet werden. Dies ist nötig, damit nicht threadsichere Funktionen nach der Erkennung aufgerufen werden können. Bei diesen Funktionen handelt es sich hauptsächlich um solche zur Sprachausgabe mittels MS SAPI zur Sprachausgabe. Die Interaktionskomponente startet den Thread durch Aufruf von Systemfunktionen, sie beendet ihn jedoch ebenfalls durch ‚Überspringen‘ der Threadgrenze über das Setzen eines Betriebssystemevents, wie schon erläutert wurde.

Mit dem zunächst verwendeten zweidimensionalen Farbsystem (s. Abschnitt 5.5.2.1) konnten nicht alle Farben der eingesetzten Bausteine und weiterer sichtbarer Objekte unterschieden werden. Beispielsweise konnten die gelben Streckensteine und die Hand nicht sauber voneinander differenziert werden. Daher wurde das HSI-Farbmodell (s. Abschnitt 5.5.2.1) gewählt. Dabei werden alle drei Dimensionen in Betracht

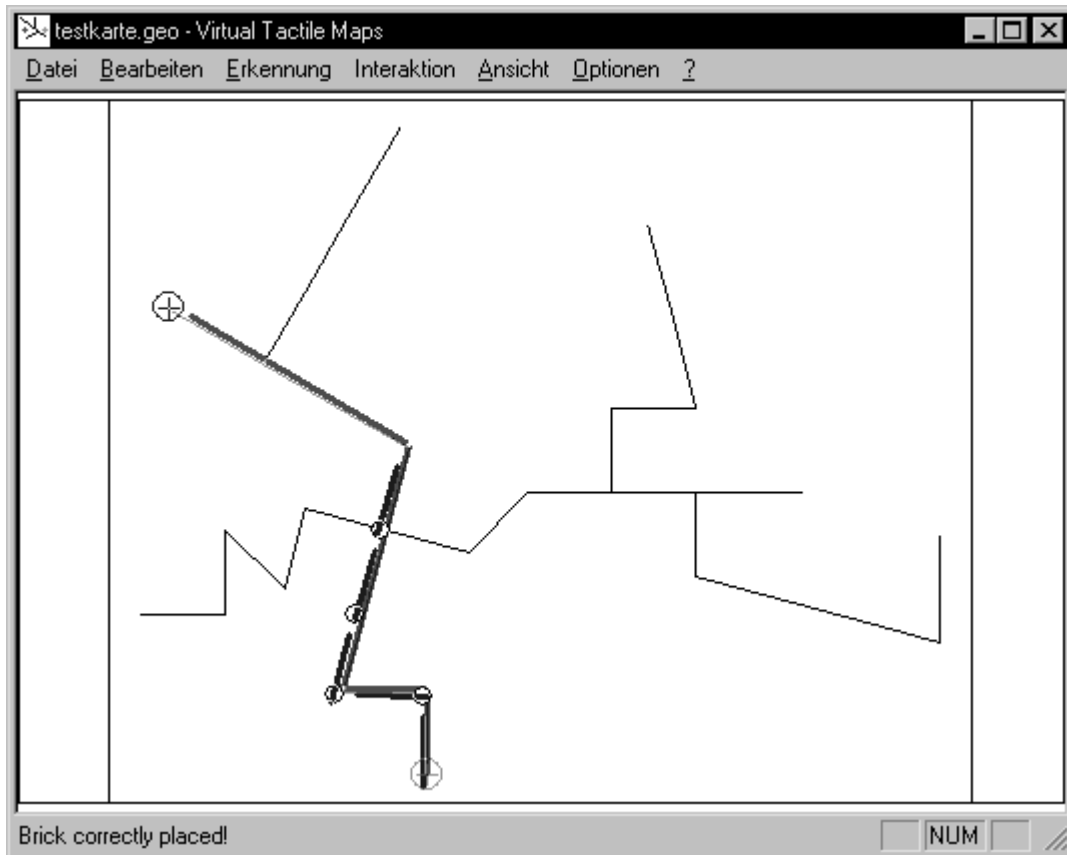


Abbildung 27. Karte mit ausgewählter und teilweise konstruierter Strecke, entsprechend Abbildung 26

gezogen, die Intensität wird aber nur darauf überprüft, dass sie einen gewissen Wert überschreitet.

### 6.3.3 Virtuelle taktile Realität

Es wird nun die Umsetzung des Konzeptes der konstruktiven Exploration von Karten mit dem Krafrückkopplungsgerät Phantom von Sensable beschrieben. Der Phantom stellt bereits sowohl ein Ein- als auch ein Ausgabegerät dar, so dass die Konstruktion ohne akustische Ausgaben erfolgen kann. Für die Exploration von Karten mit dem Phantom ist es zunächst notwendig, die Karten in eine Form zu bringen, in der sie mit dem Gerät ertastet werden können. Weiterhin muss eine Möglichkeit gefunden werden, Kartenteile zu konstruieren. Die entsprechenden Implementierungen werden nun vorgestellt.

#### 6.3.3.1 Speicherung der digitalen Karten als Relief

Zur ersten Überprüfbarkeit der Möglichkeit zur Ertastung virtueller taktiler Karten mittels des Phantom wurde ein Werkzeug entwickelt, um eine digitale Karte in ein 3D-Explorationsprogramm für den Phantom zu laden. Bei diesem Programm handelt es sich um dasjenige, welches für die taktile Exploration von Gebäuden entwickelt worden war (s. Abschnitt 5.6.2). Um eine Karte mit diesem Programm erkunden zu können, muss sie in eine dreidimensionale Form überführt werden. Bei der hier vorgestellten Implementierung wird anders als im Entwurf beschrieben also keine spezielle

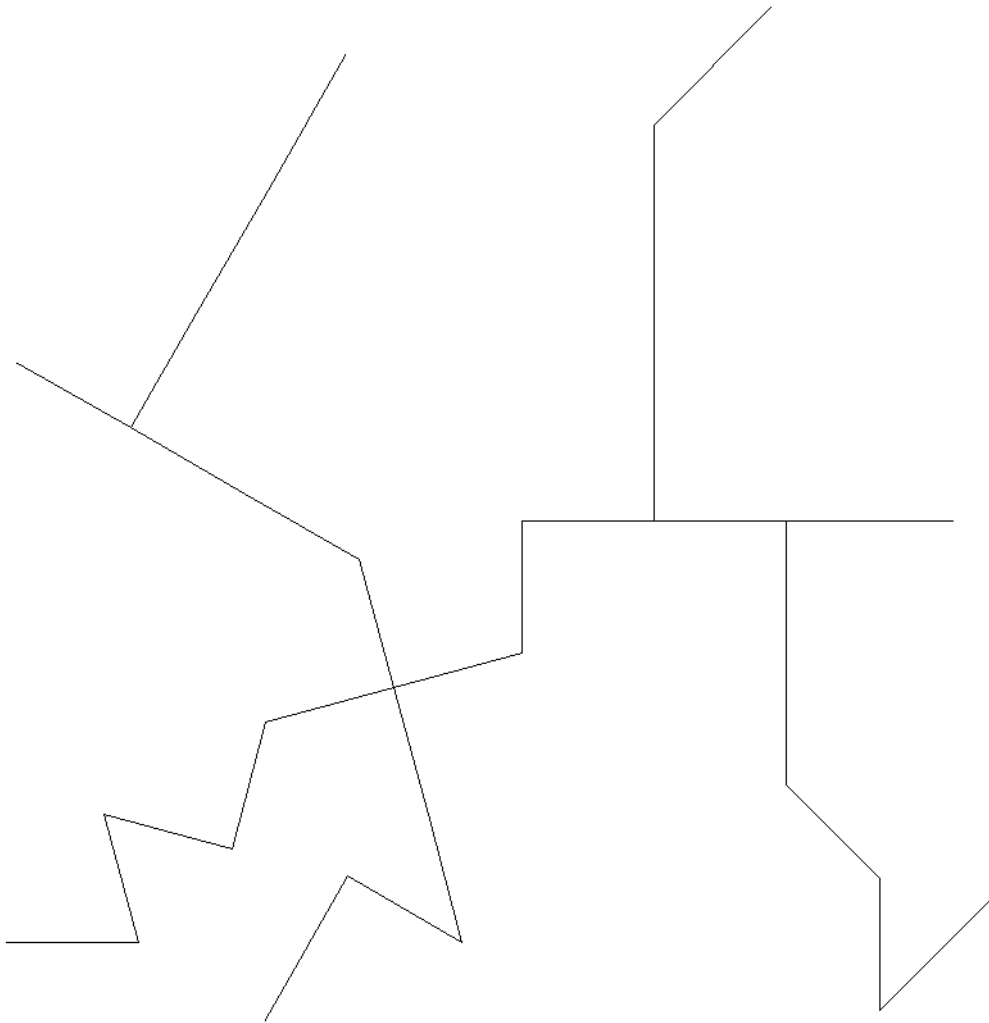


Abbildung 28. Ausgangskarte im GEO-Format mit Mittellinien

GIS-Komponente benutzt, sondern eine Komponente zur Verwaltung dreidimensionaler Objekte in einem Szenengraphen. Dadurch können mit dem System beliebige dreidimensionale Objekte erkundet werden.

Das Explorationsprogramm erwartet 3D-Modelle im VRML-Format. Die Modelle müssen zusätzlich in triangulierter Form vorliegen. Bei Triangulierungen handelt es sich um Darstellungen von Flächen oder Körperoberflächen durch Dreiecke. Für die hierbeschriebene Anwendung wird eine Karte in dreidimensionaler Form als flacher Quader dargestellt, bei dem Straßensegmente durch Einkerbungen in der Quaderoberfläche vorliegen. Für die Einkerbungen werden zusätzliche Flächen für die Quaderoberfläche erzeugt. Zunächst werden die eindimensionalen Straßenzüge in zweidimensionale Flächenzüge verwandelt. Anschließend werden in der dritten Dimension Flächen dergestalt eingefügt, dass sich an Stelle der Flächenzüge Vertiefungen ergeben.

Das für die Erzeugung einer dreidimensionalen Karte entwickelte Werkzeug verarbeitet digitale Karten im GEO-Format, wie das Programm zur konstruktiven Exploration mittels physischer Objekte auch (s. Seite 114). Die entsprechenden Karten enthalten also Straßen als Mittellinien (s. Abbildung 28). Bei der Erzeugung von Flä-

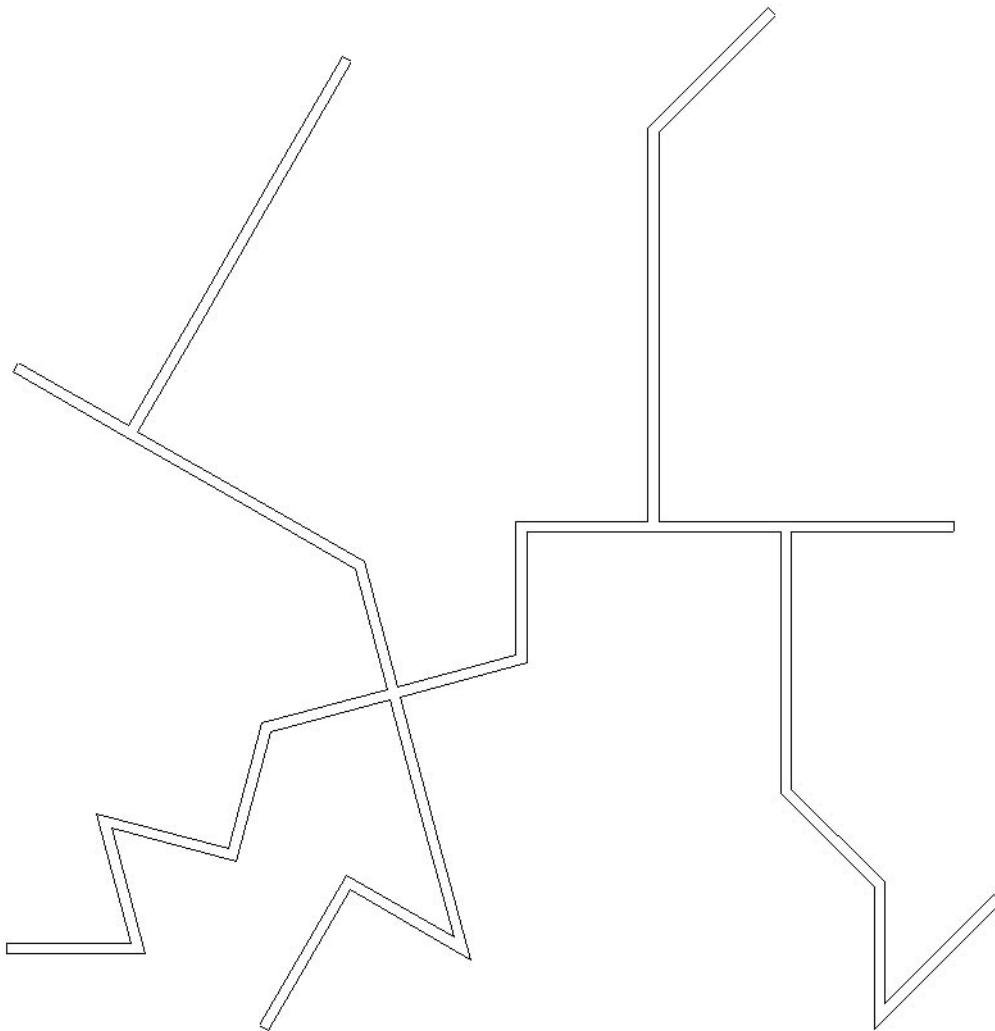


Abbildung 29. Straßenblockdarstellung der Karte aus Abbildung 28

chenzügen aus den Straßensegmenten ist zu beachten, dass die neu erzeugten Linien weiterhin verbunden sein müssen. Jedes Segment wird durch zwei neue Segmente jeweils links und rechts (vom Segmentstartpunkt aus) ersetzt. Es werden also jeweils zwei neue Start- und Endpunkte generiert. Die neuen Segmente müssen zu der Erzeugung der Flächenzüge mit den benachbarten Segmenten verbunden bleiben. Nach der Erzeugung der neuen Seitenlinien können sich entsprechende Linien schneiden oder nicht mehr zusammenhängen. Die Seitenlinien müssen also im Einzelfall jeweils verlängert oder verkürzt werden, um eine zusammenhängende Darstellung zu ergeben. Zusammenhängende Seitenlinien ergeben auf diese Weise Flächen (s. Abbildung 29). Diese Darstellung wird als Blockdarstellung bezeichnet (MICHEL 2000).

Die Blockdarstellung einer Karte wird durch Ausnutzung der sortierten Speicherung von Segmentverweisen in den Knoten erzeugt. Zunächst werden für jedes Segment seine beiden Seitenlinien berechnet. Dann werden jeweils zwei benachbarte Seitenlinien verbunden. Die Nachbarschaftsbeziehung ergibt sich dabei aus der Nachbarschaftsbeziehung der entsprechenden Segmente im gemeinsamen Knoten und der Richtung der Segmente.

An Knoten mit jeweils nur einem Segment (also erster Ordnung) finden sich für die beiden aus dem Segment erzeugten Seitenlinien keine in einem Anschluss-Segment, so dass sich entsprechende Seitenlinien schneiden könnten. Es findet sich also keine Fortsetzung zu einem Block. Daher wird an Knoten erster Ordnung eine zusätzliche Abschlusslinie eingefügt, mit der sich die entsprechenden Seitenlinien senkrecht schneiden.

Im GEO-Format werden gekrümmte Straßen durch Liniensegmente angenähert, es liegen also nur gerade Objekte in Karten dieses Formats vor. Die Karte in Blockdarstellung kann daher leicht in eine dreidimensionale Form überführt werden. Die Grundfläche des Quaders ergibt sich aus dem Rechteck, welches die Karte umschließt. Aus diesem wird eine Grund- und eine Deckelfläche berechnet. Diese Flächen werden durch vier weitere Rechtecke zu einem Quader verbunden. Weiterhin wird eine Straßenhöhe festgelegt, die unterhalb der Deckelfläche liegt. Die Straßenflächen werden auf die Straßenhöhe abgesenkt. Für jedes Liniensegment der Blockdarstellung wird eine Fläche senkrecht zur Deckelfläche erzeugt, welches die Deckelfläche mit den abgesenkten Straßenflächen verbinden.

Die so entstandenen Flächen müssen anschließend trianguliert werden. Für die Straßenflächen lässt sich dies relativ einfach durchführen, die Triangulierung der Deckelfläche ist jedoch aufwendiger, weil die abgesenkten Straßen Löcher in der Deckelfläche hinterlassen. Die zweidimensionale Dreiecksstruktur der Deckelfläche des dreidimensionalen Modells wird mit einer Programmbibliothek zur 2D-Delaunay-Triangulierung erzeugt (SHEWCHUK 1996). Die Dreiecke, die den Bodenflächen der Straßen entsprechen und die restlichen Dreiecke der Deckelfläche werden nacheinander in eigenen Durchläufen erzeugt. Diese Dreiecke werden mit aus jeweils zwei Dreiecken bestehenden Rechtecken für die Seiten- und die Bodenfläche zu einem geschlossenen 3D-Objekt zusammengefügt. Es ergibt sich dann eine Darstellung wie in Abbildung 30 gezeigt.

### 6.3.3.2 Interaktion durch den Phantom

Die Programmierung von Anwendungen mit dem Phantom wird durch das GHOST SDK von Sensable ermöglicht (SENSABLE 1999). Dieses SDK erlaubt die Erstellung und Verwaltung spezieller Szenengraphen als Hierarchien von zu ertastenden Objekten und haptischen Effekten. (Bei der in der Computergrafik „Szenengraph“ genannten Datenstruktur handelt es sich um einen gerichteten azyklischen Graphen von darstellbaren und Hilfsobjekten wie zum Beispiel Lichtquellen und Umrechnungsknoten zwischen verschiedenen Koordinatensystemen, s. ANGEL 2000, 355f.)

Die visuelle Darstellung der grafischen Objekte im Szenengraphen wird vom GHOST SDK nicht unterstützt, jedoch durch eine beige packte Zusatzbibliothek. Damit kann der mit dem GHOST SDK definierte Szenengraph mit nur wenig Aufwand grafisch dargestellt werden, auch die Interaktion vom Cursor mit der Szene kann in der Darstellung verfolgt werden (s. Abbildung 30).

Ertastbare Objekte befinden sich an den Endknoten (Blättern) des Szenengraphen. Die Endknoten können durch abstrakte Knoten weiter oben in der Hierarchie zu Objekten höherer Ordnung zusammengefügt werden. Bei den statischen Objekten handelt es sich um euklidische Körper und solche, deren Oberflächen durch Dreiecksnetze approximiert sind. (Der Phantom selbst erscheint auch als Knoten im Szenengraph.)

Es mussten zunächst mit dem Gerät ertastbare Bausteine erzeugt werden. Diese sind durch eine Dreiecksfläche definiert, wie in der Computergrafik üblich. Sol-

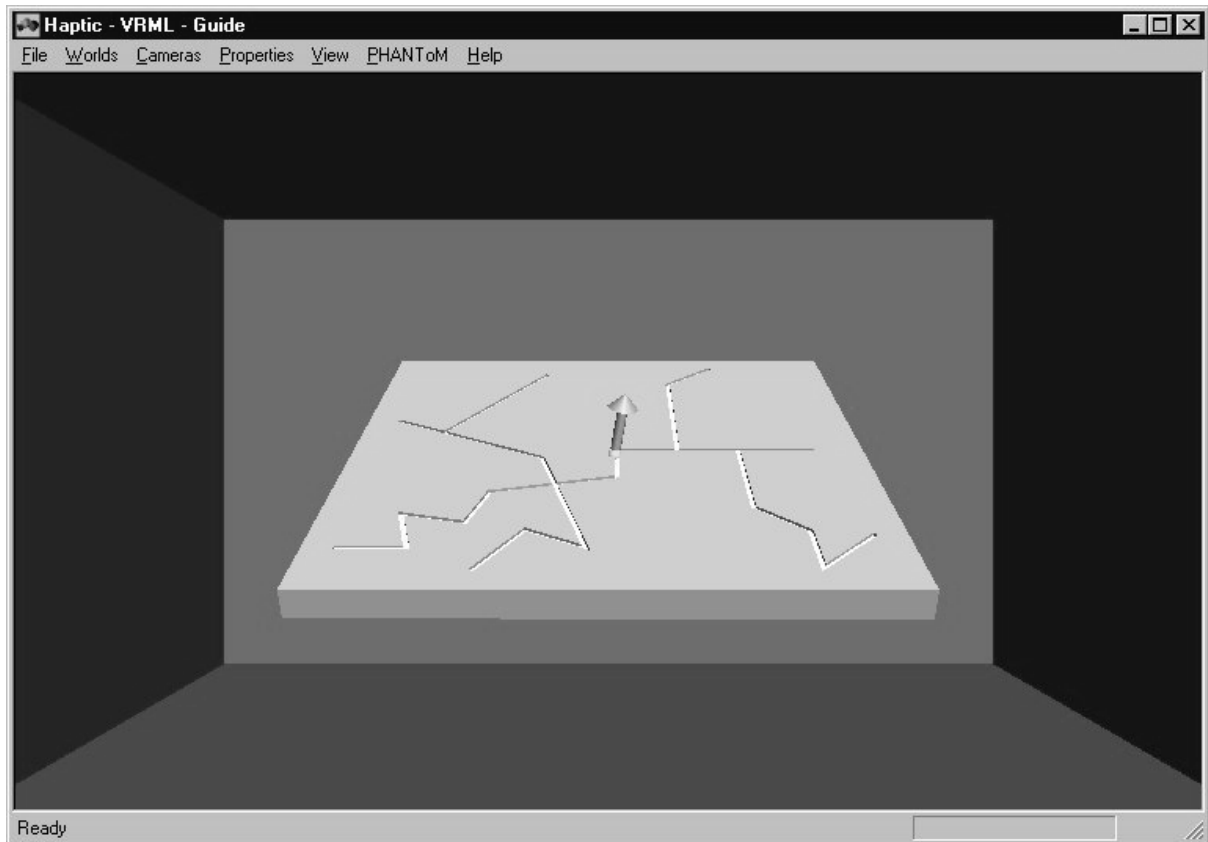


Abbildung 30. Taktile Karte im Erkundungsprogramm für den Phantom  
(zur besseren Ansicht gekippt)

che Objekte können mit einem Modellierungsprogramm erstellt werden. Zum Testen wurden einfache längliche Quader definiert.

Mit dem GHOST SDK können auch Szenen mit dynamischen Objekten erzeugt und verwaltet werden. Bei dynamischen Objekten handelt es sich um solche, die interaktiv mit dem Phantom selbst den klassischen Operationen auf dreidimensionalen Objekten unterworfen werden können, also Translation, Rotation und Skalierung. Die entsprechenden Operator-knoten werden Manipulatoren genannt. Wenn eine dieser Operationen mit dem Phantom auf ein Objekt ausgeübt wird, spürt der Benutzer eine Kraft, die der Operation entgegenwirkt. Der Benutzer erhält also den Eindruck, als würde sich das Objekt aufgrund von Reibung, Trägheit oder Viskosität der Operation widersetzen, wie es auch natürliche Objekte tun.

Wenn der Rotationsmanipulator aktiviert ist, kann der Phantom nur noch in einer Kugel um das Objekt bewegt werden. Wenn das Objekt, wie im Fall eines Streckenstückes, mit einem Ende an der Grundfläche befestigt ist, kann der Phantom entsprechend nur noch in einer Halbkugel bewegt werden. Es muss eine Kraft aufgewendet werden, bis sich das Objekt bewegt. Dadurch entsteht der Widerstandseffekt. Bei der Kraft handelt es sich um die einer simulierten rotierenden Masse mit Rotationsdämpfung (s. SENSABLE 1999).

Der Einsatz eines Rotationsmanipulators führt zu keiner realistischen Simulation des Bewegens eines Bausteines mit Einrasten, weil keine Gravitation erzeugt wird. Weiterhin dürfte der zusätzliche Freiheitsgrad in der Höhe ohne visuelles Feedback eher verwirren. Es müssen also weitere Effekte eingesetzt werden, welche die Bewegung auf eine Kreisbahn in der Fläche beschränken. Da also zusammen mit dem Einrasteffekt mehrere Krafteffekte programmiert werden müssten, wurde für die



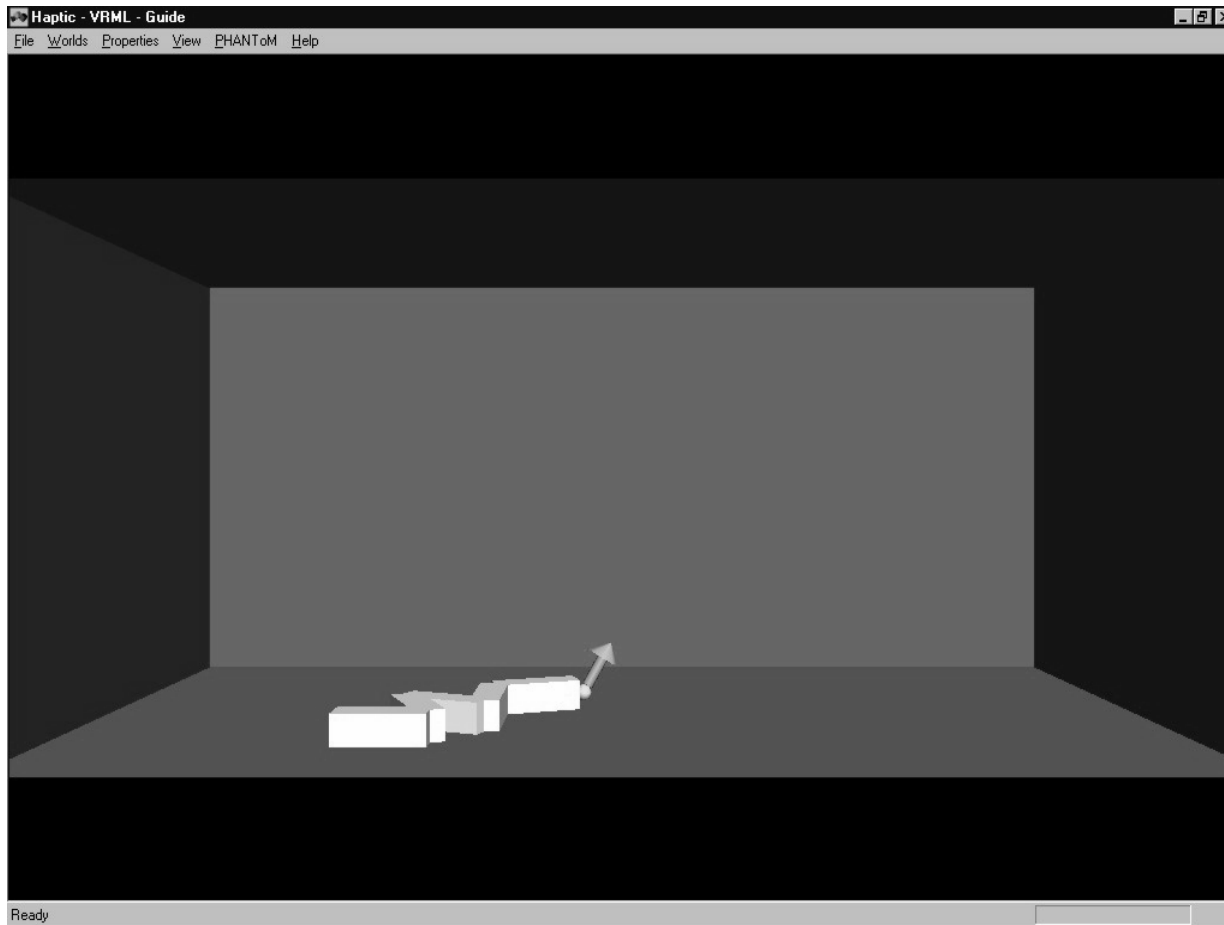


Abbildung 31. Teilkonstruktion eines Weges mit dem Phantom

Implementierung des Konstruierens einer Strecke mit dem Phantom die Vorgehensweise gewählt, das Rotieren in der Ebene und das Einrasten durch eine eigene Effektklasse zu programmieren und auf den Einsatz eines Rotationsmanipulators zu verzichten.

Das Ziehen des Phantomcursors zur Außenseite des aktuellen Steines einerseits und die Kräfte vor und beim Bewegen des Steines und beim Einrasten andererseits werden durch zwei neuentwickelte Effektklassen bewirkt. Im ersten Fall wird aus dem Zielpunkt am freien Steinende und der aktuellen Cursorposition eine Kraft in Richtung des Zielpunktes errechnet.

Die Ermittlung der Zusatzkraft für das Drehen und Einrasten ist aufwendiger. Zur Berechnung der Gegenkraft beim Drehen werden drei Fälle unterschieden. Für die Berechnung der Federkraft nach geringer Bewegung des Phantom wird nur eine Gegenkraft erzeugt, ohne den Rotationswinkel des Steines zu verändern. Bei größerer Bewegung wird eine Gegenkraft entlang der Kreisbahn in der Ebene erzeugt und der Rotationswinkel des Steines geändert, der Stein also bewegt. Wenn sich der Phantomcursor zusammen mit dem Stein schließlich in dem Bereich befindet, welcher der richtigen Lage des Steines entspricht, wird nur der Rotationswinkel geändert, ohne eine Gegenkraft zu erzeugen.

Im haptischen Szenengraphen befinden sich die in der Szene vorhandenen Bausteine und der Phantom selbst. Dem Phantom wird der Kräfteffekt zugeordnet (der Effekt befindet sich aber eigentlich außerhalb des Szenengraphen). Die Szene mit Grundfläche, Arbeitsraum und Steinen einschließlich des Phantomcursors werden

zusätzlich zu der haptischen Darstellung in einem grafischen Fenster durch OpenGL angezeigt (s. Abbildung 31).

## 6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Modellierung, der Entwurf und die Implementierung virtueller taktiler Karten in zwei verschiedenen Ausprägungen beschrieben. Zunächst wurde die gemeinsame Modellierung erläutert. Anschließend wurden die beiden Entwürfe der Gesamtsysteme an Diagrammen vorgestellt. Für das System mit physischen Bausteinen wurden die Entwürfe der Komponenten zur akustischen Ausgabe, zur Objekterkennung und zur Anpassung von Streckenverläufen an verschiedene Steingrößen beschrieben. Für das System mit Krafrückkopplungsgerät wurde der Entwurf der Komponente zur haptischen Vermittlung einer Gesamtkarte und der korrekten Position eines Bausteines erläutert.

Es wurde die Implementierung der Systeme zur Interaktion mit physischen Objekten vorgestellt. Es wurde das in Smalltalk und C entwickelte System zur Kartenexploration beschrieben. An diesem System wurde die Kommunikation zwischen verschiedenen Systemkomponenten erläutert, welche die Interaktion mit mehreren farbigen Objekten erlauben. Anschließend wurde ein in C++ implementiertes System zur konstruktiven Exploration mit neuen Techniken der Objektverfolgung und Interaktion mit den Objekten beschrieben. Dazu wurden Mehrdeutigkeiten von Konstruktionszuständen aus Sicht des Bildverarbeitungssystems und selbstentwickelte Methoden zur Auflösung dieser Mehrdeutigkeiten erläutert. Es wurden die Kriterien für die benutzten Steine genannt. Es wurden das Design und die Umsetzung der Steine geschildert.

Anschließend wurde die Implementierung des Systems zur konstruktiven Exploration mit simulierten Objekten für das Krafrückkopplungsgerät Phantom beschrieben. Es wurde die Umwandlung der zweidimensionalen Liniendarstellungen der Kartendaten in eine geeignete dreidimensionale Darstellung erläutert. Dazu wurde zunächst vorgestellt, wie aus den Straßenlinien eine Straßenblockdarstellung in 2D erzeugt werden kann. Anschließend wurde die Umwandlung dieser Straßenblockdarstellung in ein dreidimensionales Objekt als Quader mit Aussparungen für die Straßen beschrieben.

Es wurde erläutert, wie die Konstruktion mit dem Phantom umgesetzt wurde. Dazu wurde die Implementierung der Interaktion zum Anfordern eines Steines, der Führung des Phantomcursors zum freien Steinende und der Krafterzeugung beim Drehen und Einrasten eines Steines erläutert. Es wurde beschrieben, wie durch Kombination von Bewegung und Krafterzeugung ein realistischer Eindruck des Drehens eines Steines um eine Achse mit Einrasten erzeugt werden kann.

In diesem Kapitel werden Fallstudien zu den beiden umgesetzten Ansätzen zur konstruktiven Exploration und ihre Evaluation beschrieben. Es wird der Aufbau, die Durchführung und die Auswertung einer umfangreichen formalen Evaluation des Systems mit physischen Bausteinen mit 16 Versuchspersonen geschildert. Anschließend werden die Ergebnisse erläutert und Schlussfolgerungen aus ihnen gezogen für die Weiterentwicklung des Ansatzes. Der Ansatz mit den mit Hilfe des Phantom simulierten Objekten wurde mit zwei Versuchspersonen getestet. Während dieses Tests wurde die Konstruktion einer Strecke und die Exploration der Gesamtkarte mit dem Phantom überprüft. Der Versuch und die Schlussfolgerungen daraus werden erläutert.

## 7.1 Kamerabasierter Ansatz

Die letzte Version des kamerabasierten Systems wurde formal in einer summativen Evaluation mit sechzehn Versuchspersonen getestet. Ziel des Versuches war der Nachweis der Überlegenheit des Ansatzes der konstruktiven Exploration im Vergleich zu einem Ansatz ohne Computereinsatz. In dem Test wurde untersucht, ob das Legen von Streckensteinen mit Computerhilfe bezüglich der Legegeschwindigkeit einerseits und dem Behalten des Streckenverlaufes und von zusätzlichen Objekten entlang der Strecke andererseits besser gelingt als mit einem herkömmlichen Ansatz. Diese formale Evaluation und die sich aus ihr ergebenden Schlussfolgerungen werden nun beschrieben.

### 7.1.1 Versuchsaufbau<sup>1</sup>

Die formale Evaluation basiert auf einem Vergleich des kamerabasierten Systems mit einem Medium, welches auf einem herkömmlichen Ansatz der Darstellung räumlicher Strukturen beruht. Dazu wurde die sprachliche Kodierung von Objektinformationen gewählt. In beiden Fällen erfolgte die Darstellung nichtvisuell. Zur eindeutigen Vermittlung von Lagen und Positionen von Objekten im Raum wurde auf die geometrische Darstellung zurückgegriffen. Es wurde ein zweidimensionales kartesisches Koordinatensystem gewählt, welches sich zum Beispiel auch zur Angabe von Straßen auf Stadtplänen findet. In diesem Versuch wurden beide Koordinaten in Zahlen ausgedrückt.

Bei Koordinatensystemen für Sehende stehen die Zahlen gewöhnlich an den Achsen der Darstellung. Unter Zuhilfenahme der Finger und mit einiger Übung auch ohne können Punkte auf der Fläche durch Schneiden zweier gedachter achsenparalleler Linien von den beiden Koordinatenmarkierungen aus ermittelt werden. Die Hauptfläche bleibt dabei der Darstellung der eigentlichen Graphen vorbehalten. Blinde Kinder lernen ein taktiles Koordinatensystem in der Schule kennen, zum Beispiel zur Darstellung von Funktionsgraphen (RAMLOLL U.A. 2000, 18). Ein Koordinatensystem für Blinde lässt sich leicht taktil durch erhabene Linien auf Schwellpapier darstellen.

Um das Bestimmen eines Punktes zu erleichtern, wurde für den vorliegenden Versuch die ganze Fläche mit einem rechteckigen Liniengitter überzogen. Dadurch kann nacheinander zuerst die eine Koordinate auf ihrer Achse gefunden und von ihrer Markierung aus die andere Koordinate rechtwinklig zur ersten Richtung abgezählt werden. Das Koordinatensystem wurde so gewählt, dass es einerseits dicht genug ist, um die nötige Genauigkeit bei der Festlegung eines Punktes zu erreichen, andererseits weit genug, so dass die Linien leicht unterschieden werden können und das Zählen nicht behindert wird. Ein Abstand von 1,0 cm zwischen den Linien hat sich dafür als geeignet erwiesen.

Wenn die Techniken der Darstellung räumlicher Strukturen bei dem System mit physischen Objekten sinnvoll gewählt wurden, müsste das System Benutzern erlauben, Wege zu konstruieren, bei denen sie sich auf das Bauen selbst konzentrieren können, ohne durch die Interaktion mit dem System abgelenkt zu sein. Dadurch müsste das Bauen schnell von der Hand gehen und zu einem guten Eindruck der Strecke führen. Bei der entsprechenden Konstruktion ohne Computerhilfe hingegen müsste der Ausführende mehr kognitiven Aufwand für die Umsetzung der sprachlichen Anweisungen auf dem ungewohnten Koordinatenfeld benötigen und entsprechend mehr Zeit zum Bauen. Außerdem müsste er eine schlechtere Vorstellung der Route erhalten.

Der Maßstab der geringeren Lesezeit kann leicht durch Messen überprüft werden. Die jeweilige Routenvorstellung ist schwieriger zu quantifizieren. Im vorliegenden Versuch wurde dies dadurch erreicht, dass nicht die Vorstellung der Route selbst, sondern die der Lage von Zusatzelementen überprüft wurde, wie sie sich auf Karten entlang von Straßen finden. Wenn der gewählte Vermittlungsansatz angemessen ist, müssten sich Versuchspersonen weiterhin Zusatzelemente an größeren Routen mit mehr Abzweigungen und mehr Zusatzelementen relativ schlechter merken können als Zusatzelemente an entsprechend leichteren Routen. Neben dem Effekt des Hilfsmittels wurde also auch noch der Effekt der relativen Schwierigkeit einer Route überprüft. Schließlich wurde auch noch davon ausgegangen, dass sich ein Lerneffekt

---

1. Die Studie wurde in Zusammenarbeit mit dem Psychologen Dr. A. Harder inhaltlich und technisch geplant, durchgeführt und ausgewertet.

einstellt, also Versuchspersonen beim zweiten Legen einer Strecke besser abschneiden als beim ersten Mal.

Es ergeben sich also drei unabhängige Variablen: die Art des Hilfsmittels, die Schwierigkeit der Route und die Reihenfolge der Bearbeitung. Ihr Einfluss auf die abhängigen Variablen der Bearbeitungszeit und der Menge der gemerkten Zusatzinformationen wurde in diesem Versuch bestimmt. Jede Kombination der unabhängigen Variablen wurde zweimal getestet. Aus zwei Hilfsmitteln, zwei Routen, zwei Reihenfolgen und zwei Durchläufen pro Kombination ergaben sich also 16 Versuche mit jeweils einer Versuchsperson. Die Zuweisung der möglichen Versuche an die Versuchsperson und damit die Reihenfolge wurde vor dem ersten Versuch per Zufall festgelegt.

Obwohl der Versuchsplan Messwiederholungen enthält, stellt er sicher, dass jede Versuchsperson nur eine Kombination der Faktoren Hilfsmittel, Route und Abfolge bearbeitet. Alle drei Faktoren stellen also solche mit unabhängigen Stichproben dar. Daher wird der Versuch mit zwei dreifaktoriellen Varianzanalysen ausgewertet, jeweils eine für jede der beiden abhängigen Variablen Bearbeitungszeit und gemerkte Zusatzinformationen. Das Signifikanzniveau wird auf 0,05 pro Analyse festgelegt. Die Hypothesen lauten:

*Hypothese 1 (Hilfsmittel):*

Mit dem System zur konstruktiven Exploration erzielen die Versuchspersonen bessere Leistungen bezüglich Zeit und Vorstellung als durch die Angabe von Koordinaten.

*Hypothese 2 (Routen):*

Bei der leichten Route werden bessere Resultate als bei der schwierigen erzielt.

*Hypothese 3 (Abfolge):*

Die zweite Route wird von den Versuchspersonen im Vergleich zur ersten schneller bearbeitet.

*Hypothese 4 (Interaktion):*

Die genannten Variablen Hilfsmittel, Routen und Abfolge interagieren miteinander. Die Kombination aus der jeweils angenommenen günstigsten Variante (Computersystem, leichte Route und erster Versuch) führt viel besseren Werten als sich durch die Summe der einzelnen Verbesserungen erklärt.

Da die Versuchspersonen jedoch wenig Erfahrung mit taktilen Darstellungen räumlicher Inhalte besitzen, sollten geringe Erleichterungen am Anfang große Effekte erzielen. Darauf bezieht sich Hypothese 4.

Aus praktischen Gründen wurde dieser Versuch mit 16 sehenden Versuchspersonen durchgeführt, die während des ganzen Versuches Augenbinden trugen. Sehenden sind die beiden beschriebenen Arten der Darstellung unbekannt, so dass ein gemessener Effekt sich auch auf Blinde übertragen lässt.

Versuchspersonen haben die Hauptrouuten mit 10 Legesteinen auf dem Arbeitsfeld eines metallenen Labortisches nachgelegt. Das Arbeitsfeld wurde durch ein auf den Tisch geklebttes Stück Schwellpapier in DIN-A3-Größe, der Anfang jeder Route durch den bereits beschriebenen runden Routenanfangsstein gekennzeichnet. Für die sprachliche Koordinatenvermittlung erhielt das Arbeitsfeld ein taktils Koordinatengitter mit einem Gitterlinienabstand von 1,0 cm. Es wurden die bereits beschriebenen Routensteine zum Nachlegen der Route eingesetzt.

### 7.1.2 Hilfsmittel

Die leichte und die schwierige Route wurden vor Beginn der Evaluation festgelegt und sind für alle Versuchspersonen gleich. Die Routen lassen sich durch die Anzahl der verwendeten Steine und die Winkel zwischen zwei Steinen beschreiben. Steine können entweder gerade ineinander übergehen oder einen echten Winkel miteinander bilden. Der Winkel des ersten Falles wird hier mit  $0^\circ$  bezeichnet. Andere Winkel können einen Wert von  $-135^\circ$  bis  $135^\circ$  je nach Drehung gegen oder mit dem Uhrzeigersinn einnehmen. Je nach Betrag des Winkels handelt es sich um einen spitzen, stumpfen oder rechten Winkel.

Die leichte Route enthält acht Steine und drei Winkel, jeweils einen spitzen, stumpfen und rechten. Die schwere Route enthält zehn Steine und sechs Winkel, jeweils zwei spitze, stumpfe und rechte. Insgesamt kommt jede Winkelart also dreimal in den Haupttrouten vor. Die drei spitzen Winkel besitzen einen Betrag von  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  oder  $75^\circ$ , die drei stumpfen einen von  $105^\circ$ ,  $120^\circ$  oder  $135^\circ$ . Der erste Stein der leichten Route liegt senkrecht vor der Versuchsperson, der erste der schwierigen waagrecht. Mit Hilfe eines weiter unten beschriebenen Programmes wurde vor Beginn der Versuche eine Karte erzeugt, welche den vorangehenden Regeln genügt. Es wurde auch eine Testroute erstellt, die aus zwei Legesteinen besteht.

Zur Überprüfung der gemerkten Zusatzinformationen wurde eine taktile Karte erstellt, welche die beiden Routen enthält, die mit den Steinen gelegt wurden. Die Karte enthält auch drei Straßen, die von den beiden genannten Strecken abgehen und hier Nebenrouten genannt werden. Diese Nebenrouten wurden nicht mit den Steinen gelegt. Auf der Karte finden sich schließlich zusätzliche Symbole. Diese Symbole stellen Taxistände, Telefonzellen und Ampeln an Kreuzungen dar. Die Karte zeigt die Straßen in einem Maßstab von 1:2 relativ zu den Steinen.

Die leichte Route besitzt eine, die schwierige zwei Nebenrouten. Die Nebenrouten gehen rechtwinklig von der jeweiligen Hauptroute zwischen zwei Steinen der Hauptroute ab, die gerade ineinander übergehen. Das andere Ende einer Nebenroute ist jeweils frei. Zwischen zwei Steinen geht höchstens eine Nebenroute ab. Unter Beachtung der anderen Vorschriften wurden die Abzweigungspositionen zufällig gewählt. In der genannten Reihenfolge entsprechen die Längen der Nebenrouten 3, 4 und 5 Steinen. Die kürzeste Nebenroute besitzt keinen echten Winkel, ihre Steine gehen also alle gerade ineinander über. Die mittlere Nebenroute besitzt einen stumpfen, die längste einen stumpfen und einen spitzen Winkel.

Die beiden Haupttrouten kreuzen sich rechtwinklig in der Mitte der jeweiligen Route. Die beiden mittleren Steine einer Route gehen daher gerade ineinander über. Auf der Kreuzung zwischen den beiden Routen befindet sich ein Symbol für Ampelregelung. Die weiteren Symbole befinden sich an den Nebenkreuzungen der Haupttrouten. In der leichten Route befindet sich jedes Symbol nur einmal, in der schwierigen zweimal.

Um die Zeit beim Legen mit Computerhilfe messen zu können, wurde das schon vorgestellte Programm um eine Komponente erweitert, welche die Zeit zum Legen eines Steines misst und zusammen mit Angaben zum aktuellen Versuch in einer Datei abspeichert. Bei den Versuchsangaben handelt es sich um die Nummer der Versuchsperson, welche gleichzeitig die Nummer des aktuellen Versuches darstellt, die Nummer des aktuellen Steines, die Uhrzeit der erfolgreichen Platzierung, ob der Stein nach Anleitung des Versuchsleiters oder des Computers gelegt wurde und die Zeit zum Legen des aktuellen Steines. Die Zeit wurde jeweils gemessen seit der Aufforderung durch den Computer, den nächsten Stein zu legen, die vom Versuchsleiter durch einen

Tastendruck ausgelöst wird, bis zum nächsten Tastendruck zum Legen des nächsten Steines bzw. zum Abschluss der Strecke. Die Aufforderung zum Legen des nächsten Steines erfolgt dabei nur dann, wenn der vorherige Stein erfolgreich gelegt wurde.

Einige der genannten Zusatzinformationen ergeben sich aus der Versuchsanordnung (wie die Nummer des gerade gelegten Steines und die Art des Legens) bzw. werden bei der Versuchsauswertung nicht berücksichtigt (wie die aktuelle Uhrzeit). Sie stellen redundante Angaben dar, im positiven Sinne, die den Versuchsablauf nachvollziehbar machen. Dadurch können möglicherweise auftretende Fehler erkannt werden. Um dem Versuchsleiter eine bessere Kontrolle während des Versuchsverlaufs zu geben, wurde zusätzlich eine Pausefunktion implementiert, nach deren Auslösung das System zwar weiter benutzt werden kann, die Uhr jedoch bis zur Aufhebung der Pause angehalten wird. Dem Versuchsleiter wird dadurch beispielsweise die Möglichkeit geben, die Lage von Steinen zu korrigieren, welche die Versuchsperson unabsichtlich verschoben hatte.

Für das Legen der Streckensteine ohne Computerhilfe wurde ebenfalls eine eigene Stoppuhr implementiert. Diese speichert die Angaben zu einem erfolgreich gelegten Stein in derselben Datei wie die schon beschriebene automatische Stoppfunktion, im entsprechenden Format. Prinzipiell könnte das auf Bildverarbeitung basierende System auch das Legen nach Anleitung des Versuchsleiters überwachen und die Zeit automatisch stoppen. Es sollten aber mögliche Nachteile wie falsches Erkennen eines Steines durch Verdeckung und unterschiedliche Arten der Toleranzen beim Computersystem bzw. durch die Versuchsperson und den Versuchsleiter vermieden werden. Die Zeitmessfunktion für das durch den Versuchsleiter angeleitete Legen wird vollständig durch den Versuchsleiter gesteuert. Es gibt also Funktionen zum Starten, Stoppen, Pausieren und Zurücksetzen der Zeitmessung. Zur Kontrolle werden die in die Datei geschriebenen Daten zusätzlich im Bedienfenster der Zeitmessfunktion ausgegeben.

Für den Versuch wurde eine taktile Karte benötigt, die Strecken mit den beschriebenen Eigenschaften darstellt. Dazu wurde ein kleines Programm entwickelt, welches Karten in dem vom Programm zum Erkunden virtueller taktile Karten benutzten GEO-Format (s. Seite 114) erzeugt. Das Programm wurde in Squeak Smalltalk (s. GUZDIAL 2000) geschrieben. Die Eigenschaften einer für den Versuch benutzbaren Karte besitzen einige Freiheitsgrade. Das Programm zur Kartenerzeugung geht nicht alle diese Wahlmöglichkeiten systematisch durch, sondern erzeugt Karten zufällig, wobei es jedoch keine Karte doppelt ausgibt. Der Einfachheit halber durch Überprüfung ausgeschlossen anstatt schon bei der Erzeugung verhindert werden auch Karten, bei denen sich Straßen kreuzen.

Karten werden zufällig erzeugt, weil es eine Reihe möglicher Karten gibt, die benutzt werden könnten, jedoch nicht alle Karten gleich gut geeignet sind. Karten unterscheiden sich einerseits in der Benutzbarkeit. Die schließlich verwendete Karte besitzt zum Beispiel kein Streckenende, welches nahe an einer anderen Strecke liegt. Karten unterscheiden sich andererseits auch in der Nähe zu einer idealtypischen Karte und letztendlich auch in der Gefälligkeit, also bezüglich der Ästhetik. Da diese letzten beiden Aspekte leichter durch einen Menschen zu bewerten als algorithmisch sicherzustellen sind, wurden also eine Reihe von Karten erzeugt und aus diesen nach grafischer Darstellung eine geeignete ausgesucht.

Die erzeugte Karte wurde nicht nur in das kamerabasierte System zur konstruktiven Exploration geladen, sondern auch für die Erstellung der im Versuch benutzten taktile Karte ausgedruckt (s. Abbildung 32). Dazu wurde das von MICHEL im Rahmen seiner Promotion am Institut für Simulation und Graphik entwickelte System zur

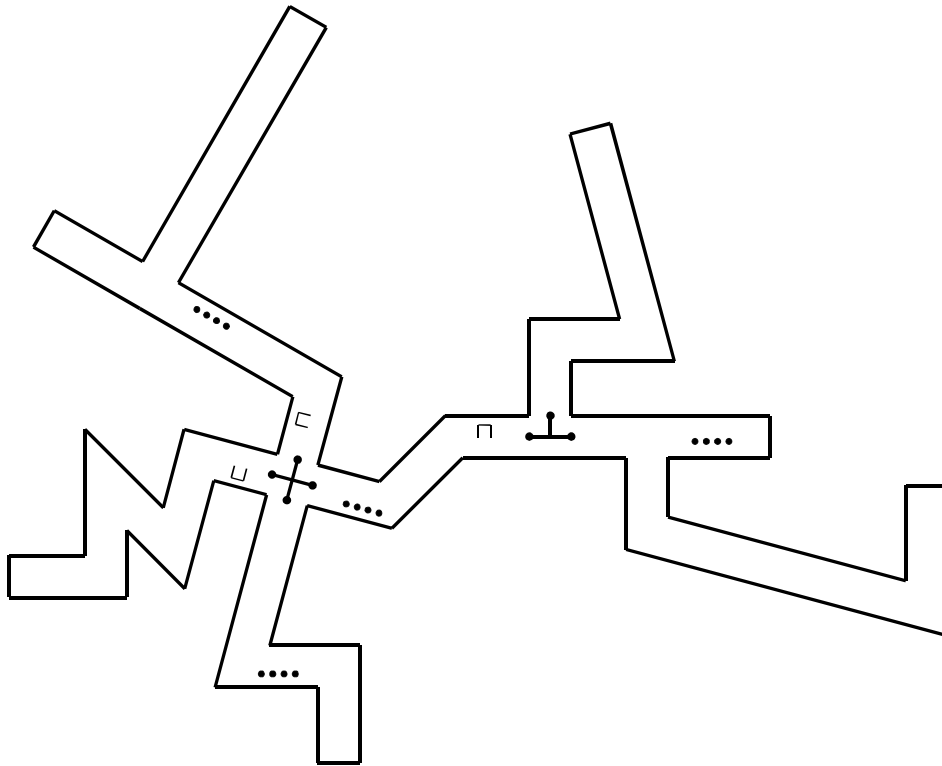


Abbildung 32. Druckvorlage für die taktile Karte

Erstellung von Vorlagen für taktile Karten benutzt, welches Karten ebenfalls im GEO-Format einliest (MICHEL 2000).

### 7.1.3 Durchführung

Jeder Einzelversuch lief in drei Phasen ab. Zunächst hat die Versuchsperson die beiden Routen konstruiert, jeweils mit Hilfe des Systems zur konstruktiven Exploration und nach sprachlichen Angaben auf dem taktilen Koordinatensystem (in dieser oder der umgekehrten Reihenfolge). Danach wurde ihr die taktile Karte vorgelegt, damit sich die Versuchsperson die Zusatzsymbole entlang der Route einprägen konnte. Schließlich hat die Versuchsperson anhand von mit Steinen gelegten Routen gezeigt, wieviele Symbole sie behalten hat und wie sie diese mit den Routen integrieren konnte.

Vor dem Versuch hat sich die Versuchsperson mit dem Arbeitsbereich vertraut gemacht. Ihr wurde die Unterlage zum Ertasten dargeboten, auf der sie anschließend gearbeitet hat. Der Anlegepunkt des jeweils ersten Steines einer Strecke in Form des Streckenanfangssteines wurde vom Versuchsleiter platziert und seine Position der Versuchsperson mitgeteilt. Vor dem Legen der beiden Strecken hat die Versuchsperson jeweils eine kurze Strecke mit dem zu testenden Ansatz gelegt, um die jeweilige Vorgehensweise kennen zu lernen, vor allem das Anlegen der Steine aneinander und das richtige Positionieren des neuen Steines. Vor dem Konstruieren der Strecke auf dem Koordinatengitter wurde dadurch zusätzlich sichergestellt, dass der Versuchsperson das Prinzip des Gitters und die Lage des Nullpunktes bekannt war.

Während des Legens der Versuchsstrecken wurde die Zeit für das Legen jedes einzelnen Steines gemessen, jeweils ab Bekanntgabe der neuen Koordinate des freien Steinendes beim Koordinatensystem bzw. ab Freigabe durch den Versuchsleiter für



das computergestützte System mit Aufforderung zum Legen des nächsten. Beim computergestützten System hat die Person durch das interaktive System durch Verstummen der akustischen Ausgabe des Fehlerwinkels und mittels synthetischer Sprache erfahren, wann ein Stein richtig gelegen hat. Bei dem anderen Ansatz hat sie dies durch den Versuchsleiter erfahren bzw., dass der Stein noch nicht korrekt liegt. Dann musste sie Korrekturen vornehmen, deren Dauer in die Legezeit des Steines mit eingegangen sind.

Wenn die Versuchsperson die Strecke erfolgreich abgeschlossen hatte, hatte sie eine Minute Zeit zum Einprägen des groben Verlaufs der Strecke durch Abtasten. Ihr wurde mitgeteilt, dass sie die Strecke später auf einer taktilen Karte wiederfinden sollte. Nach dem Legen beider Strecken und dem jeweiligen Abtasten wurde eine Pause von fünf Minuten eingelegt. Danach wurde die taktile Karte bearbeitet. Zunächst wurden der Versuchsperson die Symbole auf je einem Kärtchen pro Symbol zum Ertasten gegeben, damit sie die Symbole auf der Karte erkennen konnte.

Beim Ertasten der taktilen Karte musste die Versuchsperson einerseits die beiden Haupttrouten wiederfinden und sich andererseits die Symbole entlang der Routen einprägen. Die Versuchsperson hat das Ertasten beendet, nachdem sie bewiesen hat, dass sie die beiden Routen gefunden hat, indem die Versuchsperson sie unter den Augen des Versuchsleiters zweimal hintereinander fehlerfrei abgetastet hat. Die Zeit zum Bearbeiten der Karte wurde gemessen, war jedoch nicht beschränkt.

Schließlich wurde die taktile Karte entfernt und vom Versuchsleiter wurden nacheinander die beiden Strecken mit den Steinen auf der Unterlage gelegt. Die Versuchsperson hat dann angegeben, auf welchem Stein der jeweils vorliegenden Strecke sich ein Symbol auf der taktilen Karte befinden würde. Sie hat dazu auf den entsprechenden Stein gezeigt. Außerdem hat sie die Abzweigungspunkte und die Richtungen der Nebenstrecken angegeben. Für jedes Symbol (und für jede Strecke), welches die Versuchsperson innerhalb einer Steinlänge genau angegeben hat, hat sie in der Auswertung einen Punkt bekommen, ebenso für die korrekt genannte Richtung von Nebenstrecken. Die beiden Strecken wurden in der Reihenfolge vorgelegt und getestet, in der sie die Versuchsperson am Anfang des Versuches bearbeitet hat.

#### *7.1.4 Ergebnisse*

Die Legezeiten für das System zur konstruktiven Exploration fallen stets geringer aus als bei Einsatz des taktilen Koordinatensystems für die jeweilige Strecke (s. Tabelle 13). Die durchschnittliche Legedauer eines Steines beträgt für das System zur konstruktiven Exploration 19, für die Koordinaten jedoch 84 Sekunden. Bei einer durchschnittlichen Routenlänge von 9 Steinen beträgt die durchschnittliche Zeit zum Legen der Gesamtroute unter der erstgenannten Bedingung 3, mit der letztgenannten 13 Minuten. Es lassen sich weder in Bezug auf die Routenlänge noch auf die Reihenfolge durchgängige Unterschiede nachweisen.

Die Varianzanalyse ergibt für die Legezeit einen statistisch signifikanten Hilfsmiteffekt (s. Tabelle 13). Es hat sich also gezeigt, dass Versuchspersonen mit dem System zur konstruktiven Exploration Routen schneller nachlegen konnten als mit dem taktilen Koordinatensystem. Es gibt keinen weiteren Effekt für die Variable „Legezeit“, auch keine Interaktion zwischen Faktoren.

Versuchspersonen konnten sich durchschnittlich an 43% der auf der taktilen Karte ertasteten Symbole erinnern (s. Tabelle 14). Es finden sich starke Streuungen zu den jeweiligen Mittelwerten. Die Anzahl der jeweils erinnerten Symbole liegt für die Koordinatenangaben durchgängig höher als für das System zur konstruktiven Exploration.

Abfolge <sup>a</sup>	Route	Hilfsmittel	Mittelw. $\bar{x}$	Standardabw. (s)	Anzahl der Messwerte
1	leicht	konstr. Expl.	20,53	3,26	4
1	leicht	Koordinaten	78,22	51,19	4
1	leicht	gesamt	49,38	45,59	8
1	schwierig	konstr. Expl.	20,05	7,41	4
1	schwierig	Koordinaten	60,18	9,92	4
1	schwierig	gesamt	40,11	22,93	8
1	gesamt	konstr. Expl.	20,29	5,31	8
1	gesamt	Koordinaten	69,30	35,47	8
1	insgesamt		44,74	35,19	16
2	leicht	konstr. Expl.	17,94	2,86	4
2	leicht	Koordinaten	84,41	48,49	4
2	leicht	gesamt	51,17	47,68	8
2	schwierig	konstr. Expl.	17,23	4,43	4
2	schwierig	Koordinaten	116,43	85,00	4
2	schwierig	gesamt	66,83	76,92	8
2	gesamt	konstr. Expl.	17,58	3,47	8
2	gesamt	Koordinaten	100,42	66,31	8
2	insgesamt		59,00	62,35	16
gesamt	leicht	konstr. Expl.	19,23	3,16	8
gesamt	leicht	Koordinaten	81,31	46,28	8
<b>leichte Route insgesamt</b>			50,27	45,08	16
gesamt	schwierig	konstr. Expl.	18,64	5,8	8
gesamt	schwierig	Koordinaten	88,30	63,58	8
<b>schwierige Route insgesamt</b>			53,47	56,54	16
<b>konstr. Expl. insgesamt</b>			18,94	4,55	16
<b>Koordinaten insgesamt</b>			84,80	53,84	16
<b>Legezeit insgesamt</b>			51,87	50,32	16

Tabelle 13. Deskriptive Daten der Legezeit

a. Position der Route im Versuchsablauf (erste oder zweite Stelle)

Es ergibt sich weder für einen Haupt- noch für einen Interaktionseffekt nach der Varianzanalyse eine signifikante Korrelation bezüglich der Variablen Abfolge, Route und Hilfsmittel (s. Tabelle 15). Die Versuchspersonen erzielten zwar bei Benutzung des Koordinatensystems eine bessere Erinnerungsleistung als bei Benutzung des Systems zur konstruktiven Exploration, diese Aussage ist jedoch mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 12% behaftet.

### 7.1.5 Diskussion

Beim Vergleich der Konstruktionszeit zwischen Koordinatensystem und System zur konstruktiven Exploration ergibt sich eine viermal bessere Zeit für letzteres. Bei Vergleich der Behaltensleistung zeigt sich hingegen tendenziell eine höhere Anzahl korrekt erinnertes Symbole für ersteres. Das erste Ergebnis entspricht also den Hypothesen des Versuches bezüglich der Überlegenheit des Systems zur konstruktiven Exploration, das zweite Ergebnis widerspricht ihnen hingegen.

Das Lesen taktiler Karten stellt viele Menschen vor eine große Herausforderung und erfordert viel Übung (UNGAR U.A. 1997). Geburtsblinde werden auf dieses Lesen trainiert, die sehenden Versuchspersonen in diesem Experiment hatten darin jedoch keine Erfahrung. Weiterhin wurde ihnen die Karte jeweils vorgelegt, nachdem sie bereits einige Zeit mit dem Legen von Routen verbracht hatten. Ihre Konzentration dürfte zu diesem Zeitpunkt bereits abgenommen haben.

Das Behalten wurde wiederum erst nach Bearbeiten der taktilen Karte überprüft, wobei das Auffinden der Routen und Erkennen und Merken der Symbole bei einigen Versuchspersonen merklich Anspannung erzeugt hat, was wiederum negative Auswirkungen auf die noch verbliebene Konzentrationsfähigkeit gehabt haben dürfte. Bei der Übertragung der Lage der erinnerten Symbole waren die Versuchspersonen wahrscheinlich noch weniger auf der Höhe ihrer Leistungsfähigkeit.

Aus diesen Überlegungen heraus können die relativ geringen Erinnerungsleistungen beim Zuordnen der Symbole aus der Karte zu Positionen auf den Steinen erklärt werden. Offen bleibt dann immer noch die Frage, warum beim Zuordnen zu der auf dem taktilen Koordinatensystem gelegten Strecke die Erinnerungsleistung durchschnittlich höher war.

Die höhere Leistung nach Benutzung des Koordinatensystems ist nicht signifikant. Dennoch stellt sich die Frage, warum eine eindeutige Tendenz in diese Richtung feststellbar ist. Beim Bauen der Route nach Koordinatenangaben haben die Versuchspersonen taktile Koordinatenlinien ertastet und Punkte auf der von den Linien gebildeten Fläche ermittelt. In gewisser Weise ähnelt dies dem Verfolgen von Straßenlinien auf einer taktilen Karte und dem Erlernen von Symbolpositionen zwischen diesen Linien. Das Legen der Strecke könnte also auf das Ertasten der taktilen Karte vorbereitet haben, auch wenn sich auf dem Koordinatengitter keine taktilen Symbole befunden haben.

Nach diesen Überlegungen würde sich jedoch auch ein Reihenfolgeeffekt ergeben, weil die Vorbereitung auf die taktile Karte durch Benutzung des taktilen Koordinatensystems besser sein dürfte, wenn nach Ertasten des Gitters als nächstes die taktile Karte ertastet worden war, das Koordinatengitter also als zweites Hilfsmittel benutzt wurde. Ein solcher Reihenfolgeeffekt ist jedoch nicht feststellbar. Andererseits wurde vor Ertasten der Karte bei beiden Hilfsmittelreihenfolgen eine fünfminütige Pause eingelegt, die Karte wurde also nie direkt nach dem Gitter benutzt.

Beim Benutzen des Systems zur konstruktiven Exploration gab es kein Erfühlen von taktilen Linien. Weiterhin konnten die Steine gelegt werden, ohne räumliche Ver-

Abfolge <sup>a</sup>	Route	Hilfsmittel	Mittelw. $\bar{x}$	Standardabw. (s)	Anzahl der Messwerte
1	leicht	konstr. Expl.	42,86	36,88	4
1	leicht	Koordinaten	46,43	31,67	4
1	leicht	gesamt	44,64	31,88	8
1	schwierig	konstr. Expl.	40,91	37,48	4
1	schwierig	Koordinaten	45,46	26,77	4
1	schwierig	gesamt	43,18	30,25	8
1	gesamt	konstr. Expl.	41,88	34,44	8
1	gesamt	Koordinaten	45,94	27,15	8
1	insgesamt		43,91	30,03	16
2	leicht	konstr. Expl.	46,43	41,03	4
2	leicht	Koordinaten	57,14	11,66	4
2	leicht	gesamt	51,79	28,51	8
2	schwierig	konstr. Expl.	9,09	10,50	4
2	schwierig	Koordinaten	54,55	7,42	4
2	schwierig	gesamt	31,82	25,71	8
2	gesamt	konstr. Expl.	27,76	34,16	8
2	gesamt	Koordinaten	55,84	9,16	8
2	insgesamt		41,80	28,18	16
gesamt	leicht	konstr. Expl.	44,64	36,17	8
gesamt	leicht	Koordinaten	51,79	22,83	8
<b>leichte Route insgesamt</b>			48,21	29,45	16
gesamt	schwierig	konstr. Expl.	24,30	30,64	8
gesamt	schwierig	Koordinaten	50,00	18,82	8
<b>schwierige Route insgesamt</b>			37,50	27,75	16
<b>konstr. Expl. insgesamt</b>			34,82	33,93	16
<b>Koordinaten insgesamt</b>			50,89	20,23	16
<b>Legezeit insgesamt</b>			42,86	28,67	16

Tabelle 14. Deskriptive Daten der behalteneen Symbole

a. Position der Route im Versuchsablauf (erste oder zweite Stelle)

abhängige Variable	Varianzquelle	MQ <sup>a</sup>	F <sup>b</sup>	p(F) <sup>c</sup> ≤	signifikant <sup>d</sup>
<b>Arbeitszeit</b>	Abfolge	1625,57	1,05	0,316	nein
	Route	81,68	0,05	0,820	nein
	Hilfsmittel	34711,19	22,41	0,000	ja
	Abfolge × Route	1241,58	0,80	0,379	nein
	Abfolge × Hilfsmittel	2302,24	1,49	0,235	nein
	Route × Hilfsmittel	115,05	0,08	0,788	nein
	Abfolge × Route × Hilfsmittel	1264,73	0,82	0,375	nein
<b>Behaltenszahl</b>	Abfolge	35,60	0,04	0,836	nein
	Route	918,38	1,14	0,297	nein
	Hilfsmittel	2066,44	2,56	0,120	nein
	Abfolge × Route	685,15	0,85	0,367	nein
	Abfolge × Hilfsmittel	1154,28	1,43	0,244	nein
	Route × Hilfsmittel	637,87	0,79	0,383	nein
	Abfolge × Route × Hilfsmittel	570,12	0,71	0,409	nein

Tabelle 15. Ergebnisse der Varianzanalysen

a. mittleres Quadrat

b. statistische Prüfgröße

c. Wahrscheinlichkeit für F; entspricht unter Zufallsbedingungen höchstens dem angegebenen Wert

d.  $p(F) \leq 0,05$ .

hältnisse zu beachten, weil nur die relative Änderung der akustischen Ausgabe beim Drehen der Steine relevant war. Die Aufforderung zum schnellen Legen der Steine mit dem Wissen, dass die dafür benötigte Zeit gestoppt wurde, wird das Beachten von für die Legeaufgabe unwichtigen Gegebenheiten wie Positionen auf der Fläche verhindert haben. Die Lage der Streckensteine wurde den Versuchspersonen dann erst beim auf das Legen folgende einminütige Ertasten der Gesamtstrecke bewusst.

Der hier postulierte Vorbereitungseffekt des Koordinatengitters auf die taktile Karte hätte verhindert werden können, wenn die Versuchspersonen die taktile Karte ertastet hätten, bevor sie die Strecken nachgebaut hätten. Dann wäre allerdings das Lernen bei Benutzung des Systems zur konstruktiven Exploration möglicherweise übermäßig bevorteilt worden, weil die Versuchspersonen dabei neben der für das Legen der Steine nötigen Konzentration mehr Aufmerksamkeit auf die Zuordnung des bisher gelegten Wegstückes auf die kurze Zeit vorher ertastete Karte hätten verwenden können. Beim anschließenden Ertasten des gesamten Weges hätten sie dann wiederum mehr Zeit gehabt, die Kartensymbole Steinen zuzuordnen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Überlegenheit des Systems zur konstruktiven Exploration gegenüber der sprachlichen Angabe von Koordinaten auf einem taktilen Gitter bezüglich der Legezeit von Strecken nachgewiesen werden konnte. Für die Behaltensleistung gilt dies jedoch nicht. Diese Ergebnisse ermutigen zur Durchführung weiterer Versuche. Dabei sollte die Behaltensleistung durch Bege-

hen einer Labor- oder Außenumgebung getestet und Blinde als Versuchspersonen eingesetzt werden.

## 7.2 Konstruktive Exploration mit simulierten Objekten

Neben dem System zur konstruktiven Exploration mit physischen Objekten wurde auch eines zur konstruktiven Exploration mit simulierten Objekten implementiert und getestet. Es wurden beide Aspekte eines Systems zur konstruktiven Exploration mit simulierten Objekten umgesetzt: Die Möglichkeit der Erkundung einer Karte und das Bauen einer Strecke. Zur Erkundung einer Karte wurde ein Programm entwickelt, um eine GEO-Karte in eine VRML-Datei umzuwandeln, die mit dem Haptic Explorer (s. Abschnitt 5.6.2) erkundet werden kann (s. Abbildung 30). Die VRML-Datei wurde aus der Straßenblockdarstellung der Karte erzeugt (s. Abschnitt 6.3.3.1). Das Bauen einer Karte wurde an Hand eines weiteren Programmes getestet. Dies erlaubt die Konstruktion einer Strecke als Platzierung aufeinanderfolgender Streckensegmente mit dem Phantom, wie in Abschnitt 6.3.3.2 beschrieben.

Die implementierten Methoden zur Exploration und Konstruktion wurden mit zwei Versuchspersonen getestet. Bei den Versuchspersonen handelte es sich um Sehende, denen während des Tests die Augen verbunden wurden. Zunächst haben sie jeweils eine kleine Szene mit dem Phantom exploriert, um sich mit dem Gerät und der Interaktion mit ihm vertraut zu machen. In der Szene haben sich zwei einfache geometrische Objekte befunden, ein Zylinder und ein Quader (Abbildung 33). Außerdem gab es in der Szene eine Bodenfläche, auf der die beiden Objekte saßen. Dadurch konnten sich die Versuchspersonen an die Orientierung durch die Bodenfläche gewöhnen, die in den eigentlichen Tests auch vorhanden war.

Bei dem ersten Test war eine Strecke nach Anleitung durch den Computer zu konstruieren. Es sollte damit untersucht werden, ob der Phantom für eine solche Konstruktionsaufgabe geeignet ist und inwieweit die Umsetzung der Konstruktion mit simulierten Bausteinen gelungen war. Die Versuchspersonen haben jeweils einen Weg mit zehn Bausteinen konstruiert. Die Zeit für das Legen eines Steines wurde jeweils gemessen, um sie mit der Zeit für das Legen eines physischen Steines vergleichen zu können. Es gab keine Lernphase vor dem Konstruieren.

Nach Anforderung des ersten Steines durch den Versuchsleiter wurde ein Stein in der Szene platziert. Der Phantom wurde dann zu dem freien Ende des Steines gezogen. Die Versuchsperson sollte nun den Stein mit dem Phantom drehen, wobei sich eine simulierte Drehachse am anderen Ende des Steines befunden hat als dem, zu dem der Phantom gezogen worden war. Vor dem Drehen und bei der Drehbewegung waren Kräfte spürbar, wie bereits beschrieben. Wenn sich der Stein in der richtigen Drehlage befunden hat, wurde die Kraft vermindert, so dass ein Einrasten spürbar war. Beim Weiterdrehen nach dem Einrasten war wieder die ursprüngliche Drehkraft spürbar.

Wenn die Versuchsperson dachte, einen Stein richtig platziert zu haben, teilte sie dies dem Versuchsleiter mit. Wenn ihre Vermutung richtig war, wurde durch den Versuchsleiter der nächste Stein angefordert, wodurch der vorherige Stein automatisch arretiert wurde. Die Drehachse des neuen Steines befand sich am ehemals freien Ende des vorherigen Steines. Dieser und die folgenden Steine wurden wie der erste durch die Versuchsperson in die jeweils richtige Drehlage gebracht, bis die ganze Strecke platziert war.

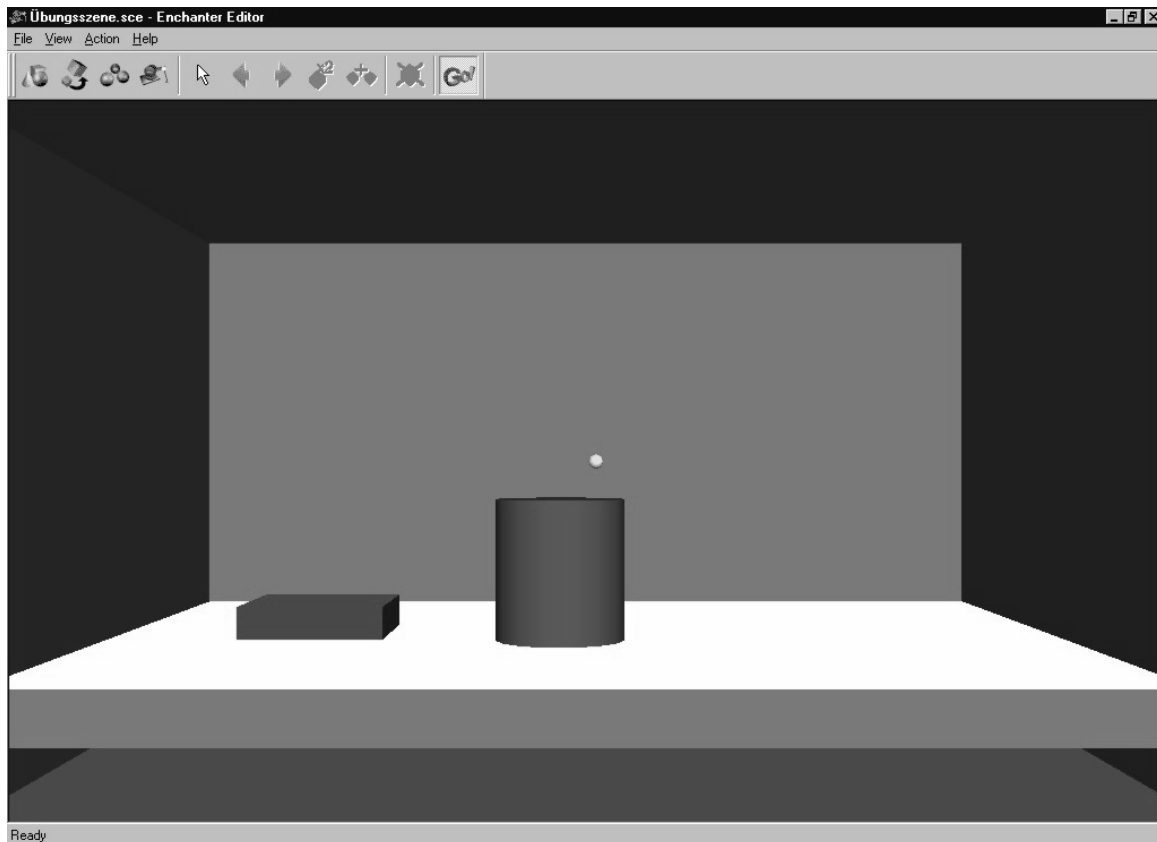


Abbildung 33. Trainingsszene

In Tabelle 16 sind die Zeiten für das Legen der Bausteine zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Werte im selben Bereich wie beim Platzieren von physischen Bausteinen liegen (s. Tabelle 13). Es ergibt sich jedoch eine relativ große Standardabweichung. Da beim Legen mit dem Phantom das Legen eines Bausteines nicht geübt wurde, kann das Platzieren des ersten Bausteines als Trainingsphase interpretiert werden. Es werden daher auch die Durchschnittszeiten und die Standardabweichung für die restlichen, also den zweiten bis zehnten Baustein aufgeführt. Die sich dadurch ergebenden Werte liegen noch näher an denen beim Legen mit den physischen Bausteinen gemessenen (durchschnittlich 18,95 s für das Legen eines physischen, 19,33 s für das Legen eines virtuellen Bausteines).

Die Versuchspersonen haben angegeben, dass die Stärke der eingesetzten Kräfte noch verbessert werden kann. So wurden die Führungskraft zum äußeren Ende eines Steines und der Kraftabfall beim Einrasten als zu klein, die zum Bewegen eines Steines nötige Kraft jedoch als zu groß empfunden. Es scheint also sinnvoll, die Kräfte entsprechend anzupassen und für das Bewegen eines eingerasteten Steines eine höhere Kraft vorzusehen als die, die nötig ist, um den Stein an einer anderen Position aus der Ruhelage zu bringen.

Für die Erkundung der simulierten taktilen Karte wurden qualitative Daten erhoben. Aus ihnen ergibt sich, dass die beiden Versuchspersonen mit dem System zur Erkundung der Gesamtkarte nach kurzer Zeit gut zurechtgekommen sind. Nur selten sind sie aus den Rillen, welche die Straßen darstellen, herausgerutscht. Die Versuchspersonen konnten gerade Streckenstücke gut nachziehen. Auch das Abbiegen und der Wechsel zwischen Straßen an Kreuzungen gelang ihnen, wenn eine der Versuchspersonen auch angegeben hat, dass das Einbiegen in Kreuzungen verwirrend war. Kreuz-

Versuchsperson	Mittelw. $\bar{x}$	Standardabw. (s)	$\bar{x}$ für n = 2 ... 10	(s) für n = 2 ... 10
1	32,80	30,86	23,33	7,95
2	18,60	11,33	15,33	4,92
gesamt	25,70	23,77	19,33	7,62

Tabelle 16. Deskriptive Daten der Legezeit (in Sekunden)

zungen sollten also besser hervorgehoben werden, zum Beispiel durch zusätzliche Vertiefungen.

### 7.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Fallstudien der konstruktiven Exploration mit physischen und simulierten Objekten beschrieben. Die Umsetzung der konstruktiven Exploration mit physischen Objekten wurde mit 16 Versuchspersonen getestet. Dabei wurde dieser Ansatz mit dem Bauen von Strecken nach Koordinatenangaben auf einem taktilen Koordinatengitter verglichen. Der Vergleich wurde auf zwei verschiedene Aspekte hin durchgeführt: auf die Legezeit der Steine und auf das Erinnern von Symbolen auf einer taktilen Karte mit den Strecken. Jede Versuchsperson hat jeweils eine Strecke mit beiden Ansätzen gelegt, wobei sich die Strecken bezüglich der Lege- und Behaltensschwierigkeit unterschieden haben.

Entsprechend der vor dem Versuch formulierten Hypothesen konnten mit dem kamerabasierten System zur konstruktiven Exploration die Strecken durchschnittlich signifikant schneller gelegt werden als auf Basis des taktilen Koordinatengitters. Entgegengesetzt der Hypothesen ergab sich jedoch kein signifikanter Unterschied in der Erinnerungsleistung der Symbole auf den Strecken, die auf einer taktilen Karte ertastet wurden. Die Erinnerungsleistung nach Benutzung des taktilen Koordinatengitters war sogar durchschnittlich besser als nach Benutzung des anderen Systems.

Es wurden Vermutungen dargelegt, wie dieses Ergebnis zustande gekommen sein könnte. Es wurde darauf verwiesen, dass die sehenden Versuchspersonen, die nicht zur eigentlichen Zielgruppe des Ansatzes gehören, keine Erfahrung mit dem Ertasten taktiler Karten besaßen und daher jede Benutzung taktiler Darstellungen für sie zu einer Verbesserung ihrer Fähigkeit zum Lesen dieser Karten geführt haben könnte. Nur die Benutzung des taktilen Koordinatengitters hätte ein solches Lernen bewirkt, was die Ergebnisse erklären könnte.

Es wurde weiterhin ein erster Test des Systems zur konstruktiven Exploration mit simulierten Objekten unter Benutzung des Krafrückkopplungsgerätes Phantom beschrieben. Dabei wurden zwei Versuchspersonen eingesetzt. Sie haben einerseits jeweils eine Strecke aus simulierten Bausteinen mit dem Phantom konstruiert und andererseits eine mit dem Phantom dargestellte taktile Karte ertastet. Die Zeiten zum Platzieren der Bausteine haben denen des Platzierens der physischen Objekte aus dem entsprechenden Versuch entsprochen. Beide Versuchspersonen waren in der Lage, die simulierte taktile Karte zu ertasten. Es wurden Kritikpunkte der Versuchspersonen an der Darstellung der Bausteine und der Karte im Phantom beschrieben und die entsprechenden Lösungsmöglichkeiten erläutert.

Die Versuche haben gezeigt, dass die beiden Systeme zur konstruktiven Exploration benutzbar sind und von ungeübten Versuchspersonen bedient werden können. Weiterhin hat sich gezeigt, dass der Ansatz mit physischen Objekten es Benutzern erlaubt,



Strecken schneller mit Steinen nachzubauen als nach Angabe von Koordinaten auf einem taktilen Gitter. Die Versuchspersonen konnten also schnell mit den eingesetzten Interaktionstechniken umgehen und sie effizient nutzen. Bei dem Kurztest konnten die Versuchspersonen die simulierten Steine ähnlich schnell mit Computerhilfe legen. Die durch die Evaluationen nicht geklärten oder durch sie gar aufgeworfenen Fragen können nur durch weitere Versuche erhellt werden, bei denen blinde Versuchspersonen eingesetzt und die Behaltensleistung durch Begehung von Strecken überprüft wird.

Die eingesetzten Platzierungshilfen in Form der Kraftausgabe inklusive Einrasten für die simulierten Steine scheinen also sinnvoll zu sein. Die Platzierung der physischen Objekte fiel den Versuchspersonen leicht, sie wurde nur erschwert durch die Eigenschaft des entwickelten Systems, dass die Steine während der Platzierung unverdeckt sein müssen. Die entsprechende Handhabung der Steine gelang jedoch allen Versuchspersonen nach einer kurzen Lernphase. Die Steinplatzierung im Phantom unterliegt keiner solchen Einschränkung. Das Bewegen der simulierten Steine an sich scheint jedoch schwieriger zu sein als das der echten Steine. Die Versuchspersonen hatten der Beobachtung nach mehr Schwierigkeiten mit der Ertastung der taktilen Karte im Phantom als mit der Ertastung der taktilen Karte. Dies erklärt sich unter anderem aus der Tatsache, dass mit dem Phantom nur ein einziger Punkt der Karte wahrnehmbar ist, während eine taktile Karte sogar beidhändig ertastet werden kann. Die simulierte taktile Karte sollte also durch Tasthilfen in Form von Änderungen der Geometrie wichtiger Elemente wie Kreuzungen überarbeitet werden.



## 8.1 Zusammenfassung

Neue Interaktionsgeräte und -techniken erlauben es Computerbenutzern, Daten konkret mit den Händen zu erfahren. In dieser Arbeit werden dafür neuartige Interaktionskonzepte und ihre Implementierung vorgestellt, mit denen sich Benutzer räumliche Daten erarbeiten können, indem sie diese aus Bausteinen konstruieren. Dabei liegt die Datenaneignung bei den Benutzern selbst, Computersysteme leiten sie in der Interaktion an.

Bei der Zielgruppe der Konzepte handelt es sich um Blinde, denen klassische Medien keine kurzfristige und flexible Aneignung flächiger Daten erlauben. In dieser Arbeit wird daher mit der virtuellen taktilen Karte ein neues Medium zur Darstellung digitaler Karten entwickelt. Eine virtuelle taktile Karte ermöglicht das haptische Erkunden von Kartendaten. Dieses Medium wird auf der Basis von Erkenntnissen zur nichtvisuellen Wahrnehmung, zu Vorstellungen über geographische Gebiete, zur Darstellung in Karten, zu taktilen Medien und zur Kartenbenutzung entwickelt. Entsprechend werden Straßennetze als Inhalt, die Straßensicht als Perspektive und Akustik und Haptik als Darstellungsmodalitäten virtueller taktiler Karten festgelegt.

Die konstruktive Exploration wird als neuartige Aneignungstechnik flächiger Daten entwickelt. Die konstruktive Exploration ist eine Interaktionstechnik zur Aneignung räumlicher Daten durch Konstruktion einer haptischen Darstellung mittels Bausteinen. Sie basiert auf Erkenntnissen der Gedächtnispsychologie, Pädagogik, Umgebungskognition und der Theorie der Herstellung von Grafiken durch Blinde. Die entsprechenden Forschungen belegen die Leistungsfähigkeit der Informationsvermittlung durch eigenes Konstruieren. Sie zeigen auch die bisher mangelnde Unterstützung von Blinden dabei, was durch die konstruktive Exploration einschließlich der Methoden und Werkzeuge zu ihrer Umsetzung behoben wird.

Diese Methoden und Werkzeuge werden auf der Basis von Anforderungen entwickelt, die aus den genannten Erkenntnissen abgeleitet sind. Dabei handelt es sich um Anforderungen bezüglich der Struktur und Verwaltung der zugrundeliegenden Daten und der haptischen Interaktion mit ihnen. Zur Darstellung werden echte und simulierte Bausteine benutzt, die sowohl die Darstellungskonstruktion als auch die Ertastung der fertigen Darstellung erlauben. Positionen und Namen von Kartenelementen werden akustisch ausgegeben.

Die Methoden zur Erfassung der physischen und zum haptischen Rendering der simulierten Bausteine werden auf der Basis von Bildverarbeitungstechniken und Systemen zur haptischen virtuellen Realität entwickelt. Es wird eine effiziente Technik zum Erkennen farbiger Objekte durch Momentenberechnung konzipiert. Die Konstruktion mittels Krafrückkopplung wird durch neue Methoden der Führung und Positionsvermittlung unterstützt. Die korrekte Lage eines physischen Bausteines kann durch eine leicht erlernbare akustische Kodierung Benutzern effizient vermittelt werden. Der Vergleich der hier entwickelten mit bisherigen räumlichen Medien zeigt die Überlegenheit der vorgestellten Methoden und Werkzeuge zur konstruktiven Aneignung.

Systeme zur konstruktiven Exploration erlauben die händische Interaktion auf einer Arbeitsfläche, die eine Karte symbolisiert. Die Systeme besitzen unabhängig von der verwendeten Hardware zur Konstruktion immer einen Sensor, ein GIS und eine akustische Ausgabe. Sie besitzen weiterhin eine kompakte Steuereinheit zur effizienten Kommunikation zwischen den genannten Komponenten. Schließlich stellen sie Karten und Interaktionsschritte visuell dar, um die Kooperation von Blinden und Sehenden zu ermöglichen.

Der Entwurf von Systemen zur Interaktion mit physischen Bausteinen basiert auf der akustischen als einzige Ausgabetechnik. Die notwendige Genauigkeit der Objekterkennung wird durch Heranziehen der vollständig sichtbaren Objektdeckelfläche zur Positionsbestimmung erreicht, die notwendige Geschwindigkeit durch Verarbeiten nur der für den aktuellen Interaktionsschritt relevanten Daten. Die festgelegte Größe der Bausteine macht die nichtlineare Skalierung von Streckensegmenten unter Beibehaltung von Streckenanfangs- und -endpunkt notwendig, wofür ein neuer Ansatz entwickelt wird.

Das für ein weiteres Computersystem eingesetzte Krafrückkopplungsgerät Phantom stellt sowohl ein Ein- als auch ein Ausgabegerät dar. Der Schwerpunkt des Entwurfs eines Systems mit diesem Gerät liegt daher in der haptischen Darstellung und Interaktion mit Bausteinen. Es werden Techniken der automatischen Platzierung von Bausteinen und Führung an das jeweils freie Ende vorgestellt, weil das Phantom-Gerät die haptischen Eindrücke zum freien Bewegen und Platzieren von Objekten nicht simulieren kann.

Implementierungen zeigen die Umsetzbarkeit der Entwürfe. Beim kamerabasierten System steht die Einbettung der Objekterkennung in die Standardarchitektur eines interaktiven Programmes im Vordergrund. Für das System mit Krafrückkopplung werden zunächst Methoden zur Umwandlung einer linienbasierten Karte in eine dreidimensionale Darstellung implementiert. Schließlich werden auf Basis des Ghost-SDK für das Phantom-Gerät die interaktive Kraftberechnung zur Führung, zur Steindrehung und zum -einrasten programmiert.

Der Erfolg der Entwicklung eines neuen Computersystems, aber vor allem eines zur Nutzung durch Blinde kann nur durch einen Versuch sichergestellt werden. Eine formale Evaluation mit 16 Teilnehmern belegt die überlegene Konstruierbarkeit von Strecken mit Hilfe des bildverarbeitungs-basierten Systems im Vergleich zur einer

sprachlichen Positionsvermittlung. Die bezüglich einer taktilen Karte als zusätzlichem Medium gemessene Behaltensleistung ist nicht höher, woran auch der Versuchsaufbau selbst Anteil hat. Ein Test des Systems mit Krafrückkopplung mit 2 Versuchspersonen zeigt die Angemessenheit der gewählten Kartendarstellung und eine ähnlich hohe Steinlegegeschwindigkeit wie bei dem anderen System.

## 8.2 Ausblick

### *8.2.1 Erweiterung der bisherigen Ansätze*

Die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze der Interaktion und der dafür nötigen Techniken bilden die Grundlage für weitere Forschungsarbeiten. Beispiele dafür sind die bessere Unterstützung der freien Kartenexploration durch akustische Ausgabe zusätzlicher Aspekte wie die Entfernung zwischen Objekten und die Unterstützung der Suche von Objekten nach Namen und Führung zu der jeweiligen Objektposition auf der Karte. Weiterhin sollte die Unterstützung der Konstruktion anderer Objekte als Strecken untersucht werden, zum Beispiel durch angeleitete Konstruktion von Flächen bzw. Umrissen.

Nächste Schritte der Entwicklung von Algorithmen zur Anpassung einer Strecke an Steingrößen sind die Übertragung von Methoden der Inversen Kinematik. Die Umwandlung einer digitalen Karte in eine räumliche Darstellung für die Ertastung in einem Krafrückkopplungsgerät könnte bezüglich der Unterstützung der Führung durch Straßen erweitert werden. Für den praktischen Einsatz der entwickelten Systeme als Hilfsmittel für Blinde wäre schließlich die automatische Diagnose und Kalibrierung der Bildverarbeitungskomponente wünschenswert.

### *8.2.2 Fragen der Mensch-Computer-Interaktion*

Die Auswertungen psychologischer und kartographischer Forschungsergebnisse zur Entwicklung von Gebietsvorstellungen und zur Kartenbenutzung hat zu Anforderungen geführt, die bei der Entwicklung der konstruktiven Exploration virtueller taktiler Karten beachtet wurden. Die Entwicklung eines neuen Mediums zur Erkundung räumlicher Strukturen wirft neue Fragen auf. Dabei handelt es sich vor allem um die nach der jeweils sinnvollen Umsetzung der Strecken-, Horizont- und Überblicksperspektive. Es sind weitere Untersuchungen durch die Psychologie nötig, welche die Rolle verschiedener Perspektiven eines Gebietes erhellen.

Es existieren immer noch nur wenige systematische Untersuchungen des Ertastens dreidimensionaler Objekte mit einem Krafrückkopplungsgerät durch Blinde. Es sind vor allem weitere Untersuchungen der Effekte bei der Erkundung von simulierten im Vergleich zu echten Objekten nötig, unter anderem zum besseren Verständnis des sogenannten Tardis-Effektes und der schlechten Erkennbarkeit taktiler Texturen und Hinweise zur Kompensation bzw. Nutzbarmachung dieser Effekte.

Die beiden durchgeführten Evaluationen haben Fragen beantwortet und neue aufgeworfen. Die formale Evaluation konnte nicht zeigen, dass die Behaltensleistung nach Benutzung des Systems zur konstruktiven Exploration besser ist als beim Vergleichsansatz. Zunächst sollte dieser Versuch mit Versuchspersonen wiederholt werden, die im Ertasten taktiler Karten geübt sind. Dabei könnte es sich um Sehende unter Lichtabschluss handeln, die vor dem Versuch mit taktilen Karten trainiert haben. Vor allem aber sollte der Ansatz der konstruktiven Exploration mit blinden

Versuchspersonen überprüft werden, weil es sich bei ihnen um die eigentliche Benutzergruppe handelt.

Sinnvoll wäre auch die Überprüfung der Behaltensleistung ohne Benutzung von taktilen Karten als zusätzlichen Medien, was letztlich nur durch eine Begehung einer Strecke im Gelände oder in einem Testparcours möglich ist. Die Ergebnisse des Kurztests des Ansatzes mit simulierten Objekten ermutigen zur Verfeinerung des Ansatzes. Auch hierbei ist die Durchführung einer formalen Evaluation mit Begehung der entsprechenden Strecke angebracht.

### *8.2.3 Kombination von simulierten und echten Objekten*

Aus der Arbeit ergeben sich interessante Ansätze zur Kombination von echten und simulierten Bausteinen zur konstruktiven Exploration. Dadurch können die Vorteile beider Ansätze kombiniert werden: Die einfache und auch beidhändige Manipulation physischer Bausteine und die flexible Darstellung dreidimensionaler Objekte mit einem Krafrückkopplungsgerät.

Die physischen Objekte können dabei der Unterstützung der Orientierung dienen, weil sie leicht platziert und wiedergefunden werden können. Sie können mit der anderen Hand als der benutzt werden, welche ein Gerät wie den Phantom bedient. Möglicherweise können sie auch einen Ansatz zur Lösung des Problems des ‚Verlorengehens im haptischen Raum‘ bieten. Zur Kombination der beiden Ansätze ist es nötig, die Objekterkennung mittels Bildverarbeitung robuster gegen Verdeckungen zu machen und Kollisionen zwischen dem Phantomarm und physischen Objekten durch geeignete Programmierung des Phantom zu verhindern.

### *8.2.4 Erweiterung des Phantom*

Die Beschränkung der haptischen Darstellung durch ein Krafrückkopplungsgerät wie den Phantom auf einen Punkt zu einem bestimmten Zeitpunkt stellt eine große Einschränkung für die Umsetzung der konstruktiven Exploration dar. Dadurch ist es nämlich nicht möglich, einen Baustein und einen Andockpunkt gleichzeitig zu erfühlen. Ein Phantom könnte jedoch auf vergleichsweise einfache Art zum Greifen erweitert werden, ohne dass der Einsatz eines zusätzlichen Phantom nötig wäre. Dazu könnten haptische oder auch einfache taktile Aktoren am Ende des Greifarms befestigt werden. Zur noch einfacheren Simulation des Ergreifens und Loslassens von Objekten könnten auch entsprechende Bedienelemente in Form von Zangengriffen an dem Armende befestigt werden.

### *8.2.5 Konstruktive Exploration für Sehende*

Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden der konstruktiven Exploration virtueller taktiler Karten können nicht nur von Blinden, sondern auch von Sehenden benutzt werden, sowohl mit echten als auch mit simulierten Objekten. Die entwickelten Systeme bieten bereits eine grafische Ausgabe. Die entsprechende Erkundung ist sinnvoll, weil auch Sehende nur mit viel Übung in der Lage sind, aus Karten alle relevanten Informationen zu entnehmen (MILLAR 1994, 248). Die Kombination von haptischer und visueller Darstellung dürfte die Erfassbarkeit der Informationen im Sinne der Multimodalität verbessern. Beide Ansätze können durch die Projektion einer Karte o.ä. auf der Arbeitsfläche ergänzt werden, womit die Erfahrung der ‚Aug-

## **Ausblick**

mented Reality‘ vertieft würde. Schon mit den existierenden Systemen können Versuche durchgeführt werden, welche die Möglichkeiten der Darstellung räumlicher Strukturen durch die Programme für Sehende überprüfen.





- ADAMS, R.J., D. KLOWDEN, B. HANNAFORD. o.J. Virtual Training for a Manual Assembly Task. Arbeitspapier. Universität Washington. URL: <http://rcs.ee.washington.edu/BRL/people/radams/haptics-e99.pdf>.
- ANDERSEN, P.B., B. HOLMQVIST, J.F. JENSEN, Hg. 1993. *The Computer as Medium*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ANDERSON, J.R. 1995. *Kognitive Psychologie*. 2. Aufl. Heidelberg u.a.: Spektrum Akademischer Verlag.
- ANGEL, E. 2000. *Interactive Computer Graphics: a Top-Down Approach with OpenGL*. 2. Aufl. Reading, MA u.a.: Addison-Wesley.
- BARTH, J.L., E. FOULKE. 1979. „Preview: a Neglected Variable in Orientation and Mobility“. *Journal of Visual Impairment and Blindness* 73, 2, 41-48.
- BEDERSON, B.B., A. DRUIN. 1995. „Computer-Augmented Environments: New Places to Learn, Work, and Play“. In: J. NIELSEN. *Advances in Human-Computer Interaction* 5. Norwood, NJ: Ablex, 37-66.
- BEGAULT, D.R. 1994. *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*. Chestnut Hill, MA: AP Professional.
- BENSAID, A.M., L.O. HALL, J.C. BEZDEK, L.P. CLARKE. 1996. „Partially Supervised Clustering for Image Segmentation“. *Pattern Recognition* 29, 5, 859-871.
- BENTZEN, B.L. 1980. „Orientation Aids“. In: R.L. WELSH, B.B. BLASCH, Hg. *Foundations of Orientation and Mobility*. New York, NY: American Foundation for the Blind, 291-355.
- BIGGS, J.B. 1992. „Modes of Learning, Forms of Knowing, and Ways of Schooling“. In: A. DEMETRIOU, M. SHAYER, A. EFKLIDES, Hg. *Neo-Piagetian Theories of Cognitive Development*. London u.a.: Routledge, 31-49.
- BLADES, M. 1997. „Research Paradigms and Methodologies for Investigating Children’s Wayfinding“. In: FOREMAN, N., R. GILLET, Hg. *Handbook of Spatial Research Paradigms and Methodologies*. Vol. 1. East Sussex: Psychology Press, 103-129.

- BLATTNER, M.M., D.A. SUMIKAWA, R.M. GREENBERG. 1989. „Earcons and Icons: Their Structure and Common Design Principles“. *Human-Computer Interaction* 4, 11-44.
- BÖLKE, L. 1997. *Ein akustischer Interaktionsraum für blinde Rechnerbenutzer*. Dissertation. Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg. Oldenburg: Berichte aus dem Fachbereich Informatik.
- BRAMBRING, M. 1982. „Language and Geographic Orientation for the Blind“. In: R.J. JARVELLA, Hg. *Speech, Place and Action*. Chichester: Wiley, 203-216.
- BRAMBRING, M., C. WEBER. 1981. „Taktile, verbale und motorische Informationen zur geographischen Orientierung Blindler“. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie* 28, 23-37.
- BRAMBRING, M., W. SCHNEIDER. 1986. „Lokomotion und Verkehrsverhalten sehgeschädigter Personen“. *Rehabilitation* 25, 74-79.
- BREWSTER, S.A. 1994. *Providing a Structured Method for Integrating Non-Speech-Audio into Human-Computer Interfaces*. Dissertation. Univ. of York.
- BRIGGS, R. 1973. „Urban Cognitive Distance“. In: R.M. DOWNS, D. STEA. *Image and Environment*. Chicago, IL: Aldine, 361-388.
- BRÖCKL-FOX, U. 1995. *Untersuchung neuer, gestenbasierter Methoden für die 3D-Interaktion*. Dissertation. Universität Stuttgart. Berichte aus der Informatik. Aachen: Shaker.
- BURDEA, G.C. 1996. *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. New York, NY u.a.: John Wiley & Sons.
- BYRNE, R.W. 1979. „Memory for Urban Geography“. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 31, 147-154.
- BYRNE, R.W., E. SALTER. 1983. „Distances and Directions in the Cognitive Maps of the Blind“. *Canadian Journal of Psychology* 37, 2, 293-299.
- CARSE, B., T.C. FOGARTY, A. MUNRO. 1996. „Evolving Fuzzy Rule Based Controllers Using Genetic Algorithms“. *Fuzzy Sets and Systems* 80, 273-293.
- COLWELL, C., H. PETRIE, D. KORNBROT, A. HARDWICK. 1998. „Haptic Virtual Reality for Blind Computer Users“. *Proc. of the Third International ACM Conference on Assistive Technologies (ASSETS 1998)*. New York, NY: ACM, 92-99.
- COMENIUS (J.A. KOMENSKY). 1992. „Große Didaktik“. Ausschnitte in: H. SCHEUERL, Hg. *Lust an der Erkenntnis: Die Pädagogik der Moderne. Von Comenius und Rousseau bis zur Gegenwart*. München, Zürich: Pieper, 23-29.
- COY, W. 1995. „Automat – Werkzeug – Medium“. *Informatik Spektrum* 18, 1, 31-38.
- CRAIG, J.C., C.E. SHERRICK. 1982. „Dynamic Tactile Displays“. In: W. SCHIFF, E. FOULKE, Hg. *Tactual Perception: a Sourcebook*. Cambridge, u.a.: Cambridge Univ. Press, 209-233.
- CRATTY, B.J. 1967. „The Perception of Gradient and the Veering Tendency while Walking without Vision“. *American Foundation for the Blind Research Bulletin* 14, 31-51. Zitiert in MILLAR 1994.
- DENIS, M., F. PAZZAGLIA, C. CORNOLDI, L. BERTOLO. 1999. „Spatial Discourse and Navigation: an Analysis of Route Directions in the City of Venice“. *Applied Cognitive Psychology* 13, 145-174.
- DEUTSCHER BLINDEN- UND SEHBEHINDERTENVERBAND. 2001. Zahlen und Fakten. [http://home.t-online.de/home/dbsv\\_/fakten.htm](http://home.t-online.de/home/dbsv_/fakten.htm)
- DEWEY, J. 1916. *Democracy and Education*. Neuaufl. 1997. New York, NY: Free Press.
- DIETRICH, T. 1991. „Der Beitrag der Reformpädagogik zur Unterrichtsgestaltung heute“. In: H.-J. Ipfling, Hg. *Unterrichtsmethoden der Reformpädagogik*. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 35-50.

- DIJKSTRA, E.W. 1959. „A Note on Two Problems in Connexion with Graphs“. *Numerische Mathematik* 1, 269-271.
- DOWNS, R.M., D. STEA. 1977. *Maps in Minds: Reflections on Cognitive Mapping*. New York, NY u.a.: Harper & Row.
- EARNSHAW, R.A., M.A. GIGANTE, H. JONES, Hg. 1993. *Virtual Reality Systems*. London: Academic Press.
- EDDON, G., H. EDDON. 1998. *Inside Distributed COM*. Redmond, WA: Microsoft Press.
- EDMAN, P.E. 1992. *Tactile Graphics*. New York, NY: American Foundation for the Blind.
- ENGELKAMP, J. 1997. *Das Erinnern eigener Handlungen*. Göttingen u.a.: Hofgreffe.
- ESPINOSA, M.A., S. UNGAR, E. OCHAITA, M. BLADES, C. SPENCER. 1998. „Comparing Methods for Introducing Blind and Visually Impaired People to Unfamiliar Environments“. *Environmental Psychology* 18, 277-287.
- FEINER, S., B. MACINTYRE, B. SELIGMANN. 1993. „Knowledge-Based Augmented Reality“. *Communications of the ACM* 36, 7, 52-62.
- FITZMAURICE, G.W., H. ISHII, W. BUXTON. 1995. „Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces“. *Proc. Computer Human Interaction (CHI) '95*. New York, NY: ACM, 442-449.
- FOLEY, J.D., A. VAN DAM, S.K. FEINER, J.F. HUGHES. 1990. *Computer Graphics: Principles and Practice*. 2. Aufl. Reading, MA u.a.: Addison-Wesley.
- FRICKE, J. 1995. „Vergleich zwischen realen und virtuellen Graphikdisplays“. In: W. LAUFENBERG, J. LÖTZSCH, Hg. *Taktile Medien: Kolloquium über tastbare Abbildungen für Blinde*. Freital bei Dresden: Deutsche Blindenstudienanstalt, Blinden- und Sehbehinderten-Verband Sachsen, 55-61.
- FRITZ, J.P. 1996. *Haptic Rendering Techniques for Scientific Visualization*. M.S. Thesis. Univ. of Delaware.
- GAGE, N.L., D.C. BERLINER. 1996. *Pädagogische Psychologie*. Weinheim: Psychologie-Verlags-Union.
- GALPERIN, P. 1980. *Zu Grundfragen der Psychologie*. Berlin: Volk und Wissen.
- GAMMA E., R. HELM, R. JOHNSON, J. VLISSIDES. 1995. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley.
- GAVER, W.W. 1989. „The SonicFinder: an Interface That Uses Auditory Icons“. *Human-Computer Interaction* 4, 67-94.
- GIBSON, J.J. 1979. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston, MA: Houghton Mifflin.
- GLASER, W.R. 1994. „Menschliche Informationsverarbeitung“. In: E. EBERLEH, H. OBERQUELLE, R. OPPERMANN, Hg. *Einführung in die Software-Ergonomie*. Berlin, New York, NY: W. de Gruyter, 7-51.
- GOERTZ, R., R. THOMPSON. 1954. „Electronically Controlled Manipulator“. *Nucleonics*, Nov., 46-47.
- GOLLEDGE, R.G. 1976. „Methods and Methodological Issues in Environmental Cognition Research“. In: MOORE U. GOLLEDGE 1976B, 300-313.
- GOLLEDGE, R.G., R.L. KLATZKY, J.M. LOOMIS. 1996. „Cognitive Mapping and Wayfinding by Adults without Vision“. In: J. PORTUGALI, Hg. *The Construction of Cognitive Maps*. Dordrecht u.a.: Kluwer. 215-246.
- GOLLEDGE, R.G., R.J. STIMSON. 1997. *Spatial Behavior: a Geographic Perspective*. New York, NY: Guilford.
- GREENSTEIN, J.S. 1997. „Pointing Devices“. In: M. HELANDER, T.K. LANDAUER, P. PRABHU, Hg. *Handbook of Human-Computer Interaction*. 2., vollst. überarb. Ausg. Amsterdam u.a.: Elsevier Science, 1317-1348.

- GUDJONS, H. 1992. *Handlungsorientiert lehren und lernen: Schüleraktivität – Selbsttätigkeit – Projektarbeit*. 3., neubearb. u.erw. Aufl. Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- GUZDIAL, M. 2000. *Squeak: Object-Oriented Design with Multimedia Applications*. Upper Saddle River, NJ u.a.: Prentice Hall.
- HAGER, G., K. TOYAMA. 1998. „XVision: A Portable Substrate for Real-Time Vision Applications“. *Computer Vision and Image Understanding* 69, 1, 23-37.
- HAKE, G. 1988. „Gedanken zu Form und Inhalt heutiger Karten“. *Kartographische Nachrichten* 38, 65-72.
- HAKE, G., D. GRÜNREICH. 1994. *Kartographie*. 7. Aufl. Berlin, New York, NY: W. de Gruyter.
- HANNAFORD, B. 1989. „A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback“. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5, 426-434. Zitiert in BURDEA 1996.
- HARDER, A. 1993. *Zur Aneignung von Wegen: ein Feldversuch mit geburtsblinden Menschen*. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen.
- HARDER, A., E. KASTEN, B.A. SABEL. 1999. „Möglichkeiten der Mobilität blinder Menschen“. *Aktuelle Augenheilkunde* 2, 8-13.
- HOLLYFIELD, R., E. FOULKE. 1983. „The Spatial Cognition of Blind Pedestrians“. *Journal of Visual Impairment and Blindness* 77, 204-210.
- HOLLYFIELD, R.L. 1987. „Spatial Cognition, with Reference to Blind Mobility“. In: E. FOULKE, Hg. *Proc. Louisville Space Conf.* Louisville, KY: Univ. of Louisville, College of Arts and Sciences, 85-96.
- HOLMES, E., R. MICHEL, A. RAAB. 1995. „Computerunterstützte Erkundung digitaler Karten durch Sehbehinderte“. In: W. LAUFENBERG, J. LÖTZSCH, Hg. *Taktile Medien: Kolloquium über tastbare Abbildungen für Blinde*. Freital bei Dresden: Deutsche Blindenstudienanstalt, Blinden- und Sehbehinderten-Verband Sachsen, 81-87.
- ISHII, H., B. ULLMER. 1997. „Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits, and Atoms“. *Proc. Computer Human Interaction (CHI) '97*. New York, NY: ACM.
- JACKSON, B., L. ROSENBERG. 1995. „Force Feedback and Medical Simulation“. In: K. MORGAN, R. SATAVA, H. SIEBURG, R. MATTHEUS, J. CHRISTENSEN, Hg. *Interactive Technology and the New Paradigm for Healthcare*. Amsterdam: IOS Press, 147-151.
- JACOBSON, R.D., R.M. KITCHIN, T. GARLING, R.G. GOLLEDGE, M. BLADES. 1998. „Learning a Complex Urban Route without Sight: Comparing Naturalistic versus Laboratory Measures“. *Proc. Mind III: The Annual Conference of the Cognitive Science Society of Ireland*. Amsterdam u.a.: John Benjamins.
- JAMES, G.A. 1982. „Mobility Maps“. In: W. SCHIFF, E. FOULKE, Hg. *Tactual Perception: a Sourcebook*. Cambridge, u.a.: Cambridge Univ. Press, 334-363.
- JAMES, G.A., J. ARMSTRONG, D. CAMPBELL. 1973. „Verbal Instructions Used by Mobility Teacher to Give Navigational Directions to Their Clients“. *New Beacon* 57, 86-91.
- JANSSON, G. 1991. „The Functions of Present and Future Electronic Travel Aids for Visually Impaired Children and Adults“. *Proc. 6th International Mobility Conference*, Madrid, 9.-12. September 1991, 59-64.
- JANSSON, G. 2000a. „Spatial Orientation and Mobility of People with Visual Impairment“. In: B. SILVERSTONE, M. A. LANG, B. ROSENTHAL, E. E. FAYE, Hrsg. *The Lighthouse Handbook on Visual Impairment and Rehabilitation*. New York, NY: The Lighthouse and Oxford University Press, 359-375.

- JANSSON, G. 2000b. Tactile Maps — Overview of Research and Development. Vortrag auf einer Konferenz über taktile Karten, organisiert von der Talking Book and Braille Librarian in Stockholm, 3.-4. Februar 2000. Manuskript.
- KAWAI, Y., F. TOMITA. 1996. „Interactive Tactile Display System — a Support System for the Visually Disabled to Recognize 3D Objects“. *Proc. Second International ACM Conference on Assistive Technologies (ASSETS 1996)*. New York, NY: ACM, 45-50.
- KAZMAREK, K., M. TYLER, P. BACH-Y-RITA. 1994. „Electrotactile Display on the Fingertips: Preliminary Results“. *Proc. of the 16th Annual International IEEE Conference on Engineering in Medicine and Biology*. Piscataway, NJ: IEEE. Zitiert in BURDEA 1996.
- KEATES, J.S. 1996. *Understanding Maps*. 2. Ausgabe. Essex: Addison Wesley Longman.
- KENNEDY, J.M. 1980. „Blind People Recognizing and Making Haptic Pictures“. In: M.A. HAGEN, Hg. *The Perception of Pictures Vol II*. New York, NY: Academic Press, 263-303.
- KILPATRICK, P. 1976. *The Use of Kinesthetic Supplement in an Interactive System*. Dissertation. Univ. of North Carolina at Chapel Hill. Zitiert in BURDEA 1996.
- KITCHIN, R.M., M. BLADES, R.G. GOLLEDGE. 1997. „Understanding Spatial Concepts at the Geographic Scale without the Use of Vision“. *Progress in Human Geography* 21, 2, 225-242.
- KLOSE, A., J. SCHNEIDER. 2001. „Semi-supervised Induction of Fuzzy Rules Applied to Image Segmentation“. *Proc. Joint IFSA/NAFIPS, Vancouver, Canada July 25-28, 2001*. Piscataway, NJ: IEEE, 1425-1430.
- KÖNIG, H. 1999. Nichtvisuelle Exploration eines virtuellen Gebäudes. Diplomarbeit. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- KÖNIG, H., J. SCHNEIDER, TH. STROTHOTTE. 2000. „Haptic Exploration of Virtual Buildings Using Non-Realistic Rendering“, *Proc. International Conference on Computers Helping People With Special Needs (ICCHP) 2000*. Wien: Österreichische Computer Gesellschaft, 377-384.
- KÖNIG, H., J. SCHNEIDER, TH. STROTHOTTE. 2001. „Orientation and Navigation in Virtual Haptic-Only Environments“. *Workshop on Usability Centred Design and Evaluation of Virtual 3D Environments*. C.LAB Publication. Aachen: Shaker, 123-134.
- KRECH, D., R.S. CRUTCHFIELD, N. LIVSON, W.A. WILSON JR., A. PARDUCCI. 1985. *Grundlage der Psychologie in 8 Bänden. Band 2: Wahrnehmungspsychologie*. Weinheim u. Basel: Beltz.
- KRUEGER, M. 1991. *Artificial Reality II*. 2. Aufl. Reading, MA u.a.: Addison-Wesley.
- KRUEGER, M., D. GILDEN. 1997. „KnowWhere: an Audio/Spatial Interface for Blind People“. *Proc. International Conference on Auditory Display (ICAD) 1997*. Palo Alto, CA: Xerox PARC, 1-4.
- KUBLI, F. 1983. *Erkenntnis und Didaktik: Piaget und die Schule*. München, Basel: Ernst Reinhardt Verlag.
- LAPIERRE, C. 1998. Personal Navigation System for the Visually Impaired. Master's Thesis. Carleton University.
- LARKIN, J.H. 1989. „Display-Based Problem Solving“. In: D. Klahr, K. Kotovsky, Hg. *Complex Information Processing: The Impact of Herbert A. Simon*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 319-341.
- LAURINI, R., D. THOMPSON. 1992. *Fundamentals of Spatial Information Systems*. London u.a.: Academic Press.

- LEFRANCOIS, G.R. 1994. *Psychologie des Lernens*. Berlin u.a.: Springer.
- LIPPMANN, A. 1980. „Movie-Maps: an Application of the Optical Videodisc to Computer Graphics“. *Computer Graphics* 14, 3, 32-42.
- LOOMIS, J.-M., R.G. GOLLEDGE, R.L. KLATZKY. 1998. „Navigation System for the Blind: Auditory Display Modes and Guidance“. *Presence* 7, 2, 193-203.
- MARCUS, B., P. CHURCHILL. 1989. *Human Hand Sensing for Robotics and Teleoperation*. Techn. Ber. Cambridge, MA: Arthur D. Little. Zitiert in BURDEA 1996.
- MASSIE, T. 1998. „A Tangible Goal for 3D Modelling“. *IEEE Computer Graphics and Applications* 18, 3, 62-65.
- MASSIE, T., J.K. SALISBURY. 1994. „The PHANTOM Haptic Interface: a Device for Probing Virtual Objects“. *Proc. ASME Winter Annual Meeting, Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 295-301.
- MATURANA, H., F.J. VARELA. 1987. *Der Baum der Erkenntnis: die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens*. Bern u.a.: Scherz.
- MEDYCKYJ-SCOTT, D., H.M. HEARNshaw. 1993. *Human Factors in Geographical Information Systems*. London u.a.: Belhaven.
- MEHLHORN, K., S. NÄHER. 1999. *LEDA, a Platform for Combinatorial and Geometric Computing*. Cambridge, MA u.a.: Cambridge Univ. Press.
- MICHEL, R. 2000. *Interaktiver Layoutentwurf für individuelle taktile Karten*. Dissertation. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Berichte aus der Informatik. Aachen: Shaker.
- MICROSOFT CORP. 1998. Microsoft Speech API 4.0 — C++ Objects. Technische Dokumentation. 19. August.
- MILLAR, S. 1991. „A Reversed Lag in the Recognition and Production of Tactual Drawings: Theoretical Implications for Haptic Coding“. In: M.A. HELLER, W. SCHIFF, Hg. *The Psychology of Touch*. Hillsdale, NJ u.a.: Lawrence Erlbaum, 301-325.
- MILLAR, S. 1994. *Understanding and Representing Space. Theory and Evidence from Studies with Blind and Sighted Children*. Oxford: Clarendon.
- MINSKY, M., S. PAPER. 1972. Artificial Intelligence Progress Report. Technischer Bericht. MIT Artificial Intelligence Memo No. 252. MIT.
- MINSKY, M., M. OUH-YOUNG, O. STEELE, F. BROOKS JR., M. BEHENSKY. 1990. „Feeling and Seeing: Issues in Force Display“. *Computer Graphics* 24, 2, 235-243.
- MITCHELL, T. 1997. *Machine Learning*. New York, NY: McGraw-Hill.
- MOATS, L.C. 1998. „Teaching Decoding“. *American Educator/American Federation of Teachers Spring/Summer 1998*.
- THE MOBIC CONSORTIUM. 1995. Definition of Geographic File Format (.geo). Technischer Bericht. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- MOORE, G.T., R.G. GOLLEDGE. 1976a. „Environmental Knowing: Concepts and Theories“. In: MOORE U. GOLLEDGE 1976B, 3-24.
- MOORE, G.T., R.G. GOLLEDGE, Hg. 1976b. *Environmental Knowing: Theories, Research, and Methods*. Stroudsburg, PA: Dowden, Hutchinson & Ross.
- MOSHER, R.S. 1964. „Industrial Manipulators“. *Scientific American* 211, 4, 88-96. Zitiert in BURDEA 1996.
- MUEHRCKE, P.C. 1978. *Map Use: Reading, Analysis, and Interpretation*. Madison, WA: JP Publications.
- MÜLLER, D. 1998. *Simulation und Erfahrung: Ein Beitrag zur Konzeption und Gestaltung rechnergestützter Simulatoren für die technische Bildung*. Dissertation. Universität Bremen.

- NAKE, F. 1994. „Human-Computer Interaction – Signs and Signals Interfacing“. *Languages of Design 2*, 193-205.
- NEGROPONTE, N. 1994. „Learning by Doing: Don't Dissect the Frog, Build It“. *Wired 2*, 7, 144.
- NENTWIG, P. 1977. „Schülerexperimente im Chemieunterricht schleswig-holsteinischer Realschulen“. *Naturw. im Unterricht Ph/Ch*, 84-89. Zitiert in KUBLI 1983.
- NÖTH, W. 1998. „Kartosemiotik und das kartographische Zeichen“. *Zeitschrift für Semiotik 20*, 1-2, 25-39.
- OBERQUELLE, H. 1994. „Formen der Mensch-Computer-Interaktion“. In: E. EBERLEH, H. OBERQUELLE, R. OPPERMANN, Hg. *Einführung in die Software-Ergonomie*. Berlin, New York, NY: W. de Gruyter, 95-143.
- OREN, T. 1990. „Designing a New Medium“. In: B. LAUREL, Hg. *The Art of Human-Computer Interface Design*. Reading, MA, u.a.: Addison-Wesley, 467-479.
- O'ROURKE, J. 1997. *Computational Geometry in C*. Cambridge, MA: Cambridge Univ. Press.
- V. OVERVELD, K. 1998. Vorwort. In: STROTHOTTE 1998, VII-XI.
- PAPANEK, V. 1995. *The Green Imperative: Natural Design for the Real World*. New York, NY: Thames and Hudson.
- PAPERT, S. 1980. *Mindstorms: Children, Computers and Powerful Ideas*. New York, NY: Basic Books.
- PARKES, D. 1988. „Nomad: an Audio-Tactile Tool for the Acquisition, Use and Management of Spatially Distributed Information by Partially Sighted and Blind Persons“. In: A.F. TATHAM, A.G. DODDS, Hg. *Proc. of the Second International Symposium on Maps and Graphics for Visually Handicapped People*. Nottingham: Univ. of Nottingham, 24-29.
- PAVLOVIC, V.I., R. SHARMA, T.S. HUANG. 1997. „Visual Interpretation of Hand Gestures for Human-Computer Interaction: a Review“. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 19*, 7, 677-695.
- PEIRCE, C.S. 1998. „What Is a Sign?“. In: PEIRCE EDITION PROJECT, Hg. *The Essential Peirce: Selected Philosophical Writings. Volume 2 (1893-1913)*. Bloomington, IN u.a.: Indiana Univ. Press, 5-10.
- PIAGET, J., B. INHELDER. 1975. *Die Entwicklung des räumlichen Denkens beim Kinde*. Stuttgart: Ernst Klett.
- PITAS, I. 1993. *Digital Image Processing Algorithms*. New York u.a.: Prentice Hall.
- PITT, I. 1998. „From Graphics to Pure Text“. In: STROTHOTTE 1998, 177-196.
- PITT, I.J., A.D.N. EDWARDS. 1995. „Pointing in an Auditory Interface for Blind Users“. *Intelligent Systems for the 21st Century: Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 1995)*. Piscataway, NJ: IEEE, 280-285.
- PITTARALLO, F., A. CELANTO. 2000. A Multimodal Approach for Orientation and Navigation in 3D Scenes. Technischer Bericht Nr. 99-25. Tech. Rep. Series in Computer Science, Dept. of Computer Science, Ca' Foscari University.
- PRATT, W.K. 1991. *Digital Image Processing*. New York, NY u.a.: John Wiley & Sons.
- RAMLOLL, R., W. YU, S. BREWSTER, B. RIEDEL, M. BURTON, G. DIMIGEN. 2000. „Constructing Sonified Haptic Line Graphs for the Blind Student: First Steps“. *Proc. Fourth International ACM Conference on Assistive Technologies (ASSETS 2000), November 13-15, Arlington, VA*. New York, NY: ACM, 17-25.
- RAUTERBERG, M., P. STEIGER. 1996. „Pattern Recognition as a Key Technology for the Next Generation of User Interfaces“. *Proc. of the 1996 IEEE International*

- Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC) '96*. Piscataway, NJ: IEEE, 2805-2810.
- RISSANEN, J. 1983. „A Universal Prior for Integers and Estimation by Minimum Description Length“. *Annals of Statistics* 11, 416-431.
- RUNDSTROM, R. 1990. „A Cultural Interpretation of Inuit Map Accuracy“, *Geographical Review* 80, 2. Zitiert in WOOD 1993.
- RUSS, J.C. 1994. *The Image Processing Handbook*. 2., überarb. Aufl. Boca Raton, FL u.a.: CRC Press.
- SCHELHOWE, H. 1997. *Das Medium aus der Maschine: zur Metamorphose des Computers*. Frankfurt/M., New York, NY: Campus.
- SCHNEIDER, J., TH. STROTHOTTE. 1999. „Virtuelle taktile Karten – digitale Stadtpläne für Blinde“. U. AREND, E. EBERLEH, K. PITSCHKE, HG. *Proc. Software-Ergonomie '99*. Stuttgart u. Leipzig: Teubner, 299-308.
- SCHNEIDER, J., TH. STROTHOTTE. 1999. „Virtual Tactile Maps“. H.-J. Bullinger, J. Ziegler, Hg. *Proc. 8th International Conference on Human-Computer Interaction, HCI International '99, Ergonomics and User Interfaces, Vol. 1*. London: Laurence Erlbaum, 531-535.
- SCHNEIDER, J., TH. STROTHOTTE. 2000. „Constructive Exploration of Spatial Information by Blind Users“. *Proc. Fourth International ACM Conference on Assistive Technologies (ASSETS 2000)*. New York, NY: ACM, 188-192.
- SCHNEIDER, J. 2000a. „Constructing the Yellow Brick Road: Route Bricks on Virtual Tactile Maps“. In: R. VOLLMAR, R. WAGNER, Hg. *Proc. International Conference on Computers Helping People With Special Needs (ICCHP) 2000*. Wien: Österreichische Computer Gesellschaft, 641-648.
- SCHNEIDER, J. „Elektronische Reisehilfen für Blinde: Einführung und neue Entwicklungen“. 2000b. *FIfF-Kommunikation* 17, 2, 50-53.
- SCHRÖTER, S. 1997. „Automatic Calibration of Lookup-Tables for Color Image Segmentation“. In: H.-P. SEIDEL, B. GIROD, H. NIEMANN, Hg. *Proc. 3D Image Analysis and Synthesis '97*. St. Augustin: Infix.
- SCHUMANN-HENGSTLER, R. 1995. *Die Entwicklung des visuell-räumlichen Gedächtnisses*. Göttingen u.a.: Hofgrefe.
- SCHWEIKHARDT, W. 1985. „Interaktives Erkunden von Graphiken durch Blinde“. In: H.-J. BULLINGER, Hg. *Software-Ergonomie '85*. Stuttgart: Teubner, 366-375.
- SEKULER, R., R. BLAKE. 1994. *Perception*. 3. Aufl. New York, NY u.a.: McGraw-Hill.
- SENSABLE TECHNOLOGIES INC. 1999. GHOST SDK Programmer's Guide Version 3.0.
- SHEWCHUK, J.R. 1996. „Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator“, *Proc. First Workshop on Applied Computational Geometry*. New York, NY: ACM.
- SHNEIDERMAN, B. 1983. „Direct Manipulation: a Step Beyond Programming Languages“. *IEEE Computer* 16, 8, 57-69.
- SIKORA, C.A., L. ROBERTS, L.T. MURRAY. 1995. „Musical vs. Real World Feedback Signals“. *Proc. Computer Human Interaction (CHI) '95 Companion*, Denver, CO. New York, NY: ACM.
- SONKA, M., V. HLAVAC, R. BOYLE. 1999. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. 2., überarb. Aufl. Pacific Grove, CA: PWS.
- STACHOWIAK, H. 1973. *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York, NY: Springer.
- STATISTISCHES BUNDESAMT. 2000. „Jeder zwölfte schwerbehindert“. Pressemitteilung. URL: <http://www.statistik-bund.de/presse/deutsch/pm2000/p3760085.htm>
- STEA, D. 1973. „Program Notes on a Spatial Fugue“. In: MOORE U. GOLLEDGE 1976B, 106-120.



- STRELOW, E.R. 1985. „What is Needed for a Theory of Mobility: Direct Perception and Cognitive Maps — Lessons From the Blind“. *Psychological Review* 92, 2, 226-248.
- STROTHOTTE, TH., Hg. 1998. *Computational Visualization: Graphics, Abstraction, and Interactivity*. Berlin u.a.: Springer
- STROTHOTTE, TH., S. FRITZ, R. MICHEL, A. RAAB, H. PETRIE, V. JOHNSON, L. REICHERT, A. SCHALT. 1996. „Development of Dialogue Systems for a Mobility Aid for Blind People: Initial Design and Usability Testing“. *Proc. Second International ACM Conference on Assistive Technologies (ASSETS 1996)*. New York, NY: ACM. 139-144.
- SUTHERLAND, I.E. 1968. „A Head-Mounted Three Dimensional Display“. *Proc. AFIPS Fall Joint Computer Conference San Francisco, California, December 9- 11, 1968*, 757-764.
- TAYLOR, H.A., B. TVERSKY. 1996. „Perspective in Spatial Descriptions“. *Journal of Memory and Language* 35, 371-391.
- TOLMAN, E.C. 1948. „Cognitive Maps in Rats and Men“. *The Psychological Review* 55, 4, 189-208.
- TURKLE, S., S. PAPERT. „Epistemological Pluralism and the Revaluation of the Concrete“. In: I. HAREL, S. PAPERT. Hg. *Constructionism*. Norwood, NJ: Ablex Publishing, 161-191.
- UNGAR, S. 2000. „Cognitive Mapping without Visual Experience“. In: R. KITCHIN, S. FREUNDSCHUH. *Cognitive Mapping: Past, Present and Future*. London u.a.: Routledge.
- UNGAR, S., M. BLADES, C. SPENCER. 1997. „Teaching Visually Impaired Children to Make Distance Judgements from Tactile Maps“. *Journal of Visual Impairment and Blindness* 93, 526-535.
- UNGAR, S., A. ESPINOSA, M. BLADES, E. OCHAÍTA, C. SPENCER. 1998. „Blind and Visually Impaired People Using Tactile Maps“. *Cartographic Perspectives* 28, 4-12.
- WANG, L.-C.T., C.C. CHEN. 1991. „A Combined Optimization Method for Solving the Inverse Kinematics Problem of Mechanical Manipulators“. *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 7, 4, 489-499.
- WARREN, D.H., E.R. STRELOW, Hg. 1985. *Electronic Spatial Sensing for the Blind: Contributions from Perception, Rehabilitation, and Computer Vision*. Dordrecht u.a.: Martinus Nijhoff.
- WATT, A., M. WATT. 1996. *Advanced Animation and Rendering Techniques: Theory and Practice*. Harlow u.a.: Addison-Wesley.
- WATZLAWICK, P., Hg. 1994. *Die erfundene Wirklichkeit: wie wissen wir, was wir zu wissen glauben?* München: Piper.
- WEBER, G. 2000. *Temporale Modellierung multimedialer interaktiver Systeme*. Habilitationsschrift. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Berichte aus der Informatik. Aachen: Shaker.
- WEBER, G., TH. STROTHOTTE, J. SCHNEIDER, H. KÖNIG, A. FÄNGER. 2000. „Guided and Free Haptic Exploration of 3D Models“, In: R. VOLLMAR, R. WAGNER, Hg. *Proc. International Conference on Computers Helping People With Special Needs (ICCHP) 2000*. Wien: Österreichische Computer Gesellschaft, 745-752.
- WEIR, S. 1987. *Cultivating Minds: a Logo Casebook*. Harper & Row.
- WEISER, M. 1993. „Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing“. *Communications of the ACM* 36, 7, 74-84.
- WIENER, W.R., G.D. LAWSON. 1997. „Audition for the Traveller Who Is Visually Impaired“. In: B.B. BLASCH, W.R. WIENER, R.L. WELSH, Hg. *Foundations of*

## Literatur

- Orientation and Mobility*. 2. Aufl. New York, NY: American Foundation for the Blind, 104-169.
- WILHELMY, H. 1990. *Kartographie in Stichworten*. 5., überarb. Aufl. v. A. HÜTTERMANN U. P. SCHRÖDER. Unterägeri: F. Hirt.
- WOOD, D. 1993. *The Power of Maps*. London: Routledge.
- YNGSTRÖM, A. 1991. „The Tactile Map – the Surrounding World in Miniature“. *Proc. 6th International Mobility Conference*. Madrid: The Spanish National Organisation of the Blind, 223-238.
- YOUNG, P., T. CHEN, D. ANDERSON, J. YU, S. NAGATA. 1998. „LEGOWORLD: A Multi-Sensory Environment for Virtual Prototyping“. *Proc. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems V*. SPIE Proc. 3295. Bellingham, WA: SPIE, 313-321.
- YU, W., R. RAMLOLL, S. BREWSTER. 2000. „Haptic Graphs for Blind Computer Users“. *Proc. First International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction*, 102-107.
- ZARUDINSKY, A. 1981. Remote Handling Device. U.S.-Patent Nr. 4,392,138. 24. November. Zitiert in BURDEA 1996.

Systemzweck	Entwickler	Programmiersprache	Entwicklungsdauer
Kartenerkundung mit physischen Objekten	Schneider	VisualWorks Smalltalk, C++ (Objekterkennung)	6 Mannmonate
Kartenerkundung und konstruktive Exploration mit physischen Objekten	Schneider	C++	10 Mannmonate
Erzeugung von Karten für die Evaluation	Schneider	Squeak Smalltalk	1/4 Mannmonat
Konstruktive Exploration mit simulierten Objekten	König	C++	1/4 Mannmonat
Überführung einer digitalen Karte in eine dreidimensionale Darstellung (VRML) zur haptischen Erkundung	Schneider	C++	1/2 Mannmonat
Erkundung einer simulierten taktilen Karte (Haptic Explorer)	König	C++	3 Mannmonate

*Tabelle 17.* Die für die vorliegende Arbeit implementierten Systeme



Es wird kurz der mathematische Hintergrund zur Berechnung von Objektmerkmalen in Bildern durch Momente beschrieben (PRATT 1991, 636ff). Die Darstellung lehnt sich an die von BRÖCKL-FOX an (BRÖCKL-FOX 1995, 31ff). Geometrische Momente der Ordnung  $p + q$  sind definiert als

$$m_{p,q} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) x^p y^q dx dy. \quad (\text{GL 11})$$

Die Fläche des Objektes ergibt sich aus dem Moment der nullten Ordnung  $m_{0,0}$ .

Der Schwerpunkt der Bildenergie (das Zentrum des Objektes) kann auf folgende Art als Vektor dargestellt werden:

$$\vec{c} = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix}. \quad (\text{GL 12})$$

Dieser kann berechnet werden aus

$$c_x = \frac{m_{1,0}}{m_{0,0}}, c_y = \frac{m_{0,1}}{m_{0,0}}. \quad (\text{GL 13})$$

Eine zentrale Bildkoordinate wird dann definiert als

$$(\bar{x}, \bar{y}) = (x - c_x, y - c_y). \quad (\text{GL 14})$$

Die zentralen Momente können dann mittels der zentralen Bildkoordinaten definiert werden als

$$\mu_{p,q} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \bar{x}^p \bar{y}^q dx dy. \quad (\text{GL 15})$$

Im diskreten Fall stellt  $f(x,y)$  die Grauwertfunktion eines Bildes dar. Farbsegmentierung kann als Berechnung eines Schwellwertbildes interpretiert werden,  $f(x,y)$  als Bildfunktion des Schwellwertbildes stellt dann bezüglich des Farbbildes ein boolesches Prädikat dar:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{falls } (x, y) \text{ im Farbbild zum Objekt gehört} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{GL 16})$$

Die herkömmlichen Momente der Ordnung  $p + q$  für ein Bild der Größe  $N \times M$  ergeben sich dann zu

$$m_{p, q} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) x^p y^q. \quad (\text{GL 17})$$

Die zentralen Momente ergeben sich dann im diskreten Fall als

$$\mu_{p, q} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) \bar{x}^p \bar{y}^q. \quad (\text{GL 18})$$

Der zweidimensionale Trägheitstensor lautet dann

$$J = \begin{bmatrix} \mu_{2, 0} & \mu_{1, 1} \\ \mu_{1, 1} & \mu_{0, 2} \end{bmatrix}. \quad (\text{GL 19})$$

Diese Matrix ist symmetrisch und daher diagonalisierbar. Die Eigenvektoren spannen die Trägheitsachsen auf, die Eigenwerte sind das maximale und minimale Trägheitsmoment  $j_1, j_2$ . Diese berechnen sich daher aus (PRATT 1991, 644)

$$j_1, j_2 = \frac{1}{2} (\mu_{2, 0} + \mu_{0, 2} \pm \sqrt{(\mu_{2, 0} - \mu_{0, 2})^2 + 4\mu_{1, 1}^2}). \quad (\text{GL 20})$$

Der Winkel des zu  $j_1$  gehörenden Eigenvektors  $\phi$ , das heißt der Winkel der Hauptträgheitsachse, also intuitiv der Winkel eines Objektes, ergibt sich dann zu

$$\phi = \frac{1}{2} \text{atan} \left( \frac{2\mu_{1, 1}}{\mu_{2, 0} - \mu_{0, 2}} \right). \quad (\text{GL 21})$$

Um die enthaltenen zentralen Momente  $\mu_{1, 1}$ ,  $\mu_{2, 0}$  und  $\mu_{0, 2}$  zu berechnen, sind laut Gleichung 18 zunächst die zentralen Bildkoordinaten nach Gleichung 14 zu bestimmen, also laut Gleichung 13 aus den herkömmlichen Momenten der nullten und ersten Ordnung. Die zentralen Momente können jedoch auch aus den herkömmlichen Momenten durch Verschiebung um den Verschiebungsvektor  $\vec{c}$  wie oben berechnet werden:

$$\mu_{p, q} = \sum_{k=0}^p \sum_{l=0}^q \binom{p}{k} \binom{q}{l} c_x^{p-k} c_y^{q-l} m_{k, l}. \quad (\text{GL 22})$$

Die genannten zentralen Momente für die Berechnung von  $\phi$  ergeben sich dann unter Berücksichtigung der zentralen Bildkoordinaten zu

$$\mu_{1,1} = m_{1,1} - c_y m_{1,0}, \quad \text{(GL 23)}$$

$$\mu_{2,0} = m_{2,0} - c_x m_{1,0}, \quad \text{(GL 24)}$$

$$\mu_{0,2} = m_{0,2} - c_y m_{0,1}. \quad \text{(GL 25)}$$

Die benötigten herkömmlichen Momente  $m_{0,0}$  (s. Gleichung 13),  $m_{0,1}$ ,  $m_{0,2}$ ,  $m_{1,0}$ ,  $m_{1,1}$  und  $m_{2,0}$  können in einem einzigen Durchlauf über alle Bildpunkte eines Objektes mittels Addition und Multiplikation effizient berechnet werden.

