

**Ereigniserkennung während der Exploration
linien-basierter Graphiken
in virtuellen haptischen Umgebungen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. nat.

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

der *Universität Hamburg*

Eingereicht beim Fachbereich Informatik von

Matthias Kerzel

aus Hamburg

Januar 2015

Gutachter

Prof. Dr. Christopher Habel

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Menzel

Hamburg, den 10.7.2015 (Tag der Disputation)

Abstract

Haptic representations offer access to graphical information for blind and visually impaired persons. Haptic perception requires active explorative movements, making haptic perception, in contrast to visual perception, sequential and local. In order to improve the information gain during haptic exploration and to compensate its limitations additional information can be conveyed in the auditory sensory channel, e.g., as verbal utterances. For a proactive assisting system, analyzing the user's exploratory movements can provide the basis for selecting and generating situated verbal assistance.

Line-based graphics are a subset of graphical representations based on lines and objects formed from lines. They are well suited for haptic exploration in virtual environments, where the lines are explored via line following using a haptic force feedback device. Line-based graphics are a class of information graphics that can be used to depict graphics relevant to blind and visually impaired people like street maps or line charts.

During haptic interaction the exploration movements are observed (by the assisting system). A knowledge based system recognizes complex exploration events from these observations. For this purpose knowledge representation and processing were developed that comprise a domain independent representation of line-based graphics and haptic exploration events. A rule based approach is used to aggregate simple, directly observed events into more complex exploration events by using knowledge about the ongoing exploration, past exploration events, the geometry of the line-based graphic and temporal reasoning. This approach offers possibilities for multimodal assistance based on the current exploration situation represented by the recognized complex exploration events. For instance the user can be pointed to parts not yet fully explored or be given overview information on the part of the graphic that the haptic exploration is focused on.

Two prototypes for the domains of street maps and line graphs were developed for demonstrating the capabilities of knowledge based event recognition. Both prototypes feature components to create suitable haptic representations and domain specific knowledge from plausible data sources. Specialized 3D algorithms and spatial reasoning are applied for this purpose. Domain specific rule sets govern the recognition of domain specific exploration events. The prototype for recognizing exploration events during the haptic exploration of street maps has been successfully integrated with a component to generate verbal assistance. The resulting software was evaluated in an empirical study. The prototype for recognizing exploration events during the haptic exploration of line graphs has been extended for rule based generation of verbal assistance based on the knowledge base about the explored line based graphic. These prototypes demonstrate plausible scenarios for aiding blind and visually impaired persons in everyday tasks.

The presented work shows how knowledge processing can be used to improve human computer interaction during haptic exploration by recognizing complex exploration events as the basis for multimodal assistance.

Zusammenfassung

Haptische Repräsentationen ermöglichen blinden und sehbehinderten Menschen Zugang zu graphisch dargestellten Informationen. Haptische Wahrnehmung basiert im Gegensatz zur visuellen Wahrnehmung auf aktiven Explorationsbewegungen, sie ist daher sequentiell und lokal. Um den Informationserwerb während einer haptischen Exploration zu unterstützen und die Nachteile der haptischen Wahrnehmung zu kompensieren, kann begleitend zur haptischen Exploration der auditive Sinneskanal genutzt werden, um zusätzliche Informationen zu vermitteln. Diese multimodale Assistenz kann u.a. als verbale Äußerung erfolgen. Als Grundlage für die Auswahl geeigneter, zur Explorationssituation passender Assistenzen, kann ein proaktives Assistenzsystem die Exploration des Benutzers analysieren.

Linien-basierte Graphiken sind graphische Repräsentationen, welche aus Linien und aus Linien gebildeten Objekten bestehen. Sie eignen sich gut für haptische Exploration in virtuellen Umgebungen, in denen Linien-basierte Graphiken durch Linienverfolgung mittels haptischem Force-Feedback-Gerät exploriert werden. Während der haptischen Interaktion können die Explorationsbewegungen in der virtuellen haptischen Umgebung durch das assistierende System beobachtet werden. Ein wissensbasiertes System verarbeitet diese Beobachtungen und baut inkrementell eine Repräsentation komplexer Explorationsereignisse auf. Als Grundlage für diese Wissensverarbeitung wurde eine domänenunabhängige Repräsentation von linien-basierten Graphiken und Explorationsereignissen entwickelt. Ein regelbasiertes System aggregiert einfache, direkt beobachtete Explorationsereignisse in einem iterativen Prozess zu komplexen Explorationsereignissen, wobei Wissen über die aktuelle Exploration, die Historie der Exploration, die linien-basierte Graphik sowie zeitliches Schließen genutzt wird. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit verbale Assistenz zu generieren, welche zur aktuellen Explorationssituation, repräsentiert durch komplexe Explorationsereignisse, passt. Zum Beispiel kann der Benutzer auf Teile der linien-basierten Graphik hingewiesen werden, die noch nicht exploriert worden sind oder Überblicksinformationen über die Teile der Graphik erhalten, auf die die haptische Exploration fokussiert ist.

Zwei Prototypen für die Anwendungsdomänen der Straßenkarten und der Linien-Graphen sind entwickelt worden, um die Möglichkeiten der wissensbasierten Ereigniserkennung zu demonstrieren. Beide Prototypen umfassen Komponenten zur algorithmischen Erzeugung haptischer Repräsentationen und domänenspezifischer Wissensbasen aus domänen-typischen Datenquellen. Anwendungsdomänenspezifische Regeln steuern die regelbasierte Erkennung komplexer Explorationsereignisse. Der Prototyp für die Exploration haptischer Straßenkarten wurde mit einer Komponente zur Generierung von verbaler Assistenz integriert und erfolgreich evaluiert. Der Prototyp zur Exploration haptischer Linien-Graphen wurde mit einer regelbasierten Generierung verbaler Assistenz erweitert.

Die vorgelegte Arbeit zeigt die Nutzung von Wissensverarbeitung, um die Mensch-Computer-Interaktion während der haptischen Exploration durch Erkennung komplexer Explorationsereignisse als Basis für multimodale Assistenz zu verbessern.

Danksagung

Bei der Entstehung dieser Arbeit haben mich viele Menschen begleitet, denen ich an dieser Stelle danken möchte. Diese Arbeit ist im Umfeld der Arbeitsgruppen *Wissens und Sprachverarbeitung* (WSV) und *Natürlichsprachliche Systeme* (NATS) unter der Leitung von Professor Christopher Habel und Professor Wolfgang Menzel entstanden. Ich danke meinen Kollegen, allen voran Carola Eschenbach und Felix Lindner für produktive Diskussionen und für ein angenehmes Arbeitsumfeld. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Christopher Habel, für seine fachliche Hilfe, die Förderung meiner wissenschaftlichen Laufbahn und inspirierende persönlichen Gespräche.

Ebenso gilt mein Dank dem internationalen Graduiertenkolleg *Cross-Modal Interaction in Natural and Artificial Cognitive Systems* (CINACS). Ich hatte das große Glück, als assoziierter Doktorand an diesem Graduiertenkollg teilzunehmen, das mich fachlich wie persönlich bereichert hat. Besonders danke ich den Doktoranden Kris Lohmann und Özge Alacam mit denen ich Teile der empirischen Arbeit gemeinsam durchgeführt habe.

Ich danke meiner Familie und den Menschen, die mir besonders nahe stehen, sie haben mich stets motiviert, begleitet und unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

Teil 1: Audiohaptische Exploration von linien-basierten Graphiken

1	Einleitung & Motivation	14
1.1	Aufbau der Arbeit	18
2	Linien-basierte Graphiken	24
2.1	Linien-basierte Graphiken	24
2.2	Anwendungsgebiete linien-basierter Graphiken	32
2.3	Geometrie als Grundlage von linien-basierten Graphiken	37
2.4	Formales Modell linien-basierter Graphiken	40
3	Virtuelle haptische Exploration von linien-basierten Darstellungen mit Force-Feedback-Geräten	44
3.1	Haptische Wahrnehmung als Substitution visueller Wahrnehmung für blinde oder sehbehinderte Benutzer	44
3.2	Virtuelle haptische Umgebungen mit Force-Feedback-Geräten	46
3.3	Grenzen der modalen Substitution von visuellen linien-basierten Graphiken mit Force-Feedback-Verfahren	53
4	Multimodale Substitution & Audiohaptik	58
4.1	Arbeitsteilung von Sinnesmodalitäten	59
4.2	Audio-Haptik	60
4.3	Interaktionsparadigmen für multimodal assistierte haptische Exploration	66
4.4	Fazit: Ereigniserkennung als Grundlage sprachlicher Assistenz	68
4.5	State-of-the-Art: Haptische Systeme mit sprachlicher Assistenz	70

Teil 2: Ereigniserkennung während der Exploration haptischer linien-basierter Graphiken

5	Architektur zur Ereigniserkennung während haptischer Exploration linien-basierter Graphiken	84
5.1	Zielsetzung: Eine multimodale Interaktion während einer haptischen Exploration einer linien-basierten Graphik	84
5.2	System- Komponenten	86
5.3	Anwendungsszenario: Audio-haptische linien-basierte Graphik aus der Anwendungsdomäne der Schulgeometrie	91
5.4	Informationsfluss und Repräsentationen	96
5.5	Softwaretechnische Realisierung und genutzte Hardware	100
5.6	Versuchsaufbau	102
6	Repräsentation für linien-basierte Graphiken für wissensbasierte Ereigniserkennung	104
6.1	Überblick über die repräsentationellen Schichten	105
6.2	Inventar der Elemente linien-basierter Graphiken (Formales Modell & Beispiele)	109
6.3	3D-Geometrie	119
6.4	Flächen-Repräsentation	120
6.5	Evaluation des Formalismus	122
7	Repräsentation von Explorationsereignissen in haptischen linien-basierten Graphiken	126
7.1	Haptische Exploration von linien-basierten Graphiken	126
7.2	Explorationsereignisse als Grundlage der multimodalen Interaktion	127
7.3	Arten von Explorationsereignissen	130
7.4	Nicht-ausgedehnte Basisereignisse	132
7.5	Ausgedehnte Explorationsereignisse	136
7.6	Nicht ausgedehnte Explorationsereignisse	142
7.7	Spezifikation von ausgedehnten Ereignissen	143
7.8	Domänenspezifische Spezialisierung von Explorationsereignissen	147
7.9	Taxonomie von Ereignissen	149
7.10	Exemplarische Explorationsereignisse und dabei auftretende Explorationsereignisse	150

8	Regelbasierte Ereigniserkennung	154
8.1	Ereigniserkennung als Beobachtungsleistung	154
8.2	Architektur der Ereigniserkennung	157
8.3	Complex Event Processing als Verarbeitungs-Paradigma	158
8.4	Regelbasierte Erkennung von Explorationsereignissen	160
8.5	Architektur regelbasierter Systeme	162
8.6	Regeln für domänenunabhängige Explorationsereignisse	164
8.7	Realisierung von Ereigniserkennung im regelbasierten System Drools 5.0	169
8.8	Formalismus für Regelbedingungen in der Sprache Drools 5.0	171
8.9	Beispiele für Regeln zur Ereigniserkennung	173
8.10	Regeln zur Erkennung domänenspezifischer Ereignisse	175
8.11	Fazit Zur Ereigniserkennung	176

Teil 3: Realisierung von haptischen linien-basierten Graphiken

9	Erzeugung von haptischen Repräsentationen linien-basierter Graphiken	180
9.1	Übersicht der Verarbeitungsschritte	181
9.2	Importierung von Datenquellen und Konsistenzherstellung	182
9.3	Erstellung von 3D-Modellen für linien-basierte Graphiken	185
10	Erstellung von haptischen Karten	196
10.1	Datenquellen und Konsistenz für Straßenkarten	196
10.2	Erstellung von 3D-Modell und Wissensbasis	201
10.3	Evaluation der erzeugten haptischen Straßenkarten	206
11	Erstellung von haptischen Linien-Graphen	208
11.1	Datenquellen für Linien-Graphen	208
11.2	Manuelle Annotation & Extraktion von analytischen Graphen-Landmarken	209
11.3	Herausforderungen bei der Erstellung von 3D-Modellen für gekrümmte linien-basierte Graphiken	210
11.4	Klassische 3D-Verfahren für die Erzeugung von 3D-Körpern	211
11.5	<i>Snowfall</i> -Algorithmus zur fehlerfreien Annäherung von gekrümmten linien-basierten Graphiken für haptische Exploration	213
11.6	Evaluation der erzeugten haptischen Linien-Graphen	219

Teil 4: Fallstudien und Konklusion

12 Fallstudie VAVETaM: Verbal assistierte taktile Karten	224
12.1 Exploration von haptischen Straßenkarten	224
12.2 Regeln zur Erkennung von Explorationsereignissen aus der Anwendungsdomäne der Straßenkarten	226
12.3 VAVETaM-Prototyp	229
12.4 Map-Exploration-Procedures (MEP)	230
12.5 Empirische Evaluation	232
13 Fallstudie OBSERVINGASSISTANT: Prototyp für verbal assistierte Exploration von Linien-Graphen	234
13.1 Domänenspezifische Erweiterung für linien-basierte Graphiken	235
13.2 Domänenspezifische Erweiterung der Ereignisse	239
13.3 Sprachliche Assistenz des OBSERVINGASSISTANT	240
13.4 Anwendungsszenario: Beispiel-Exploration	245
13.5 Evaluation	250
14 Konklusion	252
14.1 Zusammenfassung der Arbeit	252
14.2 Resultate	253
14.3 Ausblick	255
15 Appendix A: Introduction to the rule language Drools	258
16 Appendix B: Specification of Rules for complex event recognition in the language Drools	262
17 Referenzen	268

1 Einleitung & Motivation

Graphische Abbildungen sind allgegenwärtig. Menschen planen Routen mit Hilfe von Straßenkarten oder U-Bahn-Plänen, sie verfolgen Aktienkurse in Form von Linien-Graphen oder studieren technische Diagramme. Generell basiert die Nutzung von Print- und Onlinemedien auf der visuellen Wahrnehmung. Für blinde und sehbehinderte Menschen stellt dies eine erhebliche Barriere dar. Text-to-Speech Programme können sprachliche Inhalte vorlesen, aber die Vermittlung von graphischen Inhalten ist problematisch.

In dieser Arbeit wird der Ansatz verfolgt, Informationsgraphiken für blinde und sehbehinderte Menschen mittels *virtueller haptischer Umgebungen* darzustellen. Informationsgraphiken haben keine (vorrangig) ästhetische Funktion, sondern dienen der effizienten Vermittlung von Wissen. *Linien-basierte Graphiken* sind eine Klasse von Informationsgraphiken, deren Inhalte mit Linien und optionalen Beschriftungen dargestellt werden. Viele Graphiken des täglichen Gebrauchs lassen sich auf linien-basierte Graphiken reduzieren: Straßenkarten, zum Beispiel, bestehen aus einem Netzwerk von Linien mit Beschriftungen für Straßennamen. Eventuell zeigt die Karte auch Landmarken, wie Gebäude oder Parks. Landmarken lassen sich wiederum als Polygone oder als von Linien begrenzte Regionen modellieren. Bei Wohnungsplänen, als ein anderes Beispiel, stehen im Gegensatz zu Straßenkarten Regionen (einzelne Räume) im Vordergrund, aber auch diese sind durch Linien (Wände) begrenzt. Wohnungspläne lassen sich somit ebenfalls als linien-basierte Graphik modellieren. Weitere Anwendungsgebiete für linien-basierte Graphiken sind: Linien-Graphen, Balkendiagramme, Abbildungen aus dem Bereich der Geometrie, Bahn- und Busstreckennetze und technische Diagramme.

Linien-basierte Graphiken eignen sich gut für eine Realisierung in *virtuellen haptischen Umgebungen*. Spezielle Force-Feedback-Geräte erlauben die haptische Darstellung virtueller Objekte. Der Benutzer führt dazu einen Stift (*Stylus*) in der Hand, welcher mit einem Roboterarm gekoppelt ist. Die Position der Stiftspitze wird von den Sensoren des Roboterarms erfasst und in die virtuelle haptische Umgebung übertragen. Die physikalische Interaktion zwischen der Spitze des Stiftes und den virtuellen Objekten wird simuliert. Die berechneten Widerstandskräfte, welche bei Berührungen in der virtuellen Umgebung auftreten, werden durch den Roboterarm auf den realen Stift übertragen. Für den Benutzer fühlt sich die Exploration in einer virtuellen haptischen Umgebung so an, als würde er ein reales Objekt mit einem realen Stift abtasten.



Abbildung 1.1: Visualisierung einer linien-basierten Graphik (Straßenkarte) in einer virtuellen haptischen Umgebung und ein haptisches Force-Feedback-Gerät (Phantom Omni).

Um eine linien-basierte Graphik als virtuelles Objekt zu modellieren, werden Linien als Vertiefungen in einer Grundebene realisiert. Der Benutzer kann diesen Vertiefungen mit der (virtuellen) Spitze des Stiftes folgen und so das gesamte Netzwerk von Linien erkunden. Abbildung 1.1 zeigt die Visualisierung einer linien-basierten Graphik in einer virtuellen haptischen Umgebung, welche mit einem Force-Feedback-Gerät exploriert wird.

Die haptische Exploration einer linien-basierten Graphik ist ein bewusster und aktiver Vorgang. Der Benutzer folgt einzelnen Linien und erkundet so sequentiell die gesamte Graphik. Im Vergleich zu einer visuellen Graphik, kann der Benutzer nicht „auf einen Blick“ Überblickswissen gewinnen. Die Wahrnehmung des Explorierenden ist lokal. Es kann nur der Verlauf einzelner Linien wahrgenommen werden. Jedes Detail der haptischen Graphik wird durch aktive Explorationsbewegungen erkundet. Diese Eigenschaft bietet die Möglichkeit eine haptische Exploration gezielt mit situationsabhängiger multimodaler Assistenz zu unterstützen. Aus der Perspektive eines (menschlichen oder künstlichen) Assistenten ist eine haptische Exploration eine Folge von Explorationsereignissen, auf die zum Beispiel mit sprachlichen Nachrichten reagiert werden kann.

Multimodale Assistenz kann helfen, die Nachteile haptischer Wahrnehmung gegenüber der visuellen Wahrnehmung zu kompensieren. Die Notwendigkeit der sequenziellen Exploration, die lokal beschränkte Wahrnehmung und das Fehlen von Beschriftungen, können durch sprachliche Nachrichten ausgeglichen werden. Inhalte einer visuellen Graphik können auf diese Weise arbeitsteilig durch die haptische und die auditive Sinnesmodalität vermittelt

werden. Die Effizienz multimodaler Assistenz hängt davon ab, ob die Assistenz zu der aktuellen Explorationsbewegung des Benutzers passt und die Exploration tatsächlich unterstützen kann. Die Erkennung von Explorationsereignissen bildet daher die Grundlage für situierte multimodale Assistenz.

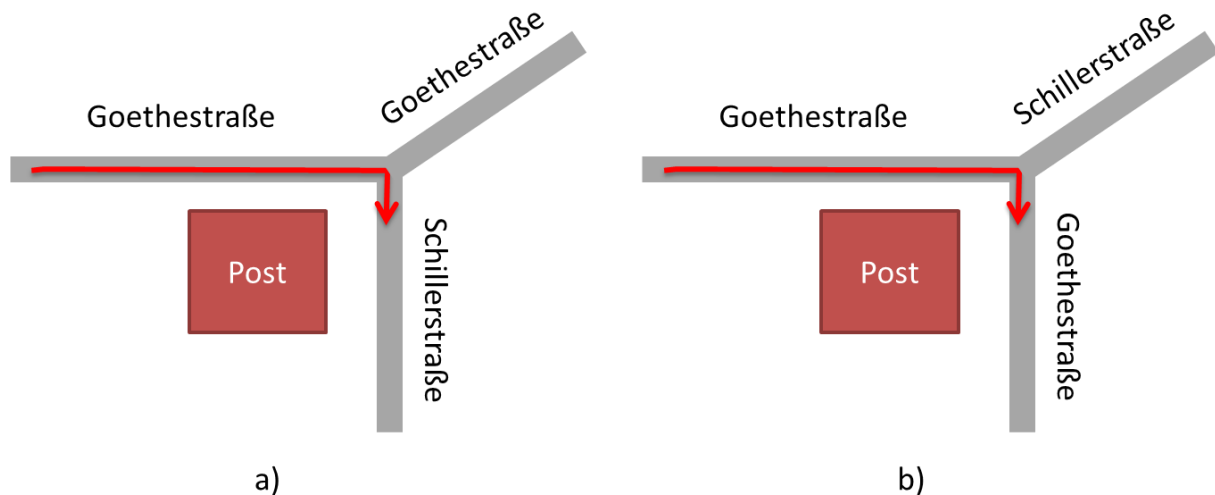


Abbildung 1.2: Beispielexplorationsen haptischer Straßenkarten.

An einem Beispiel kann gezeigt werden, dass Ereigniserkennung während der haptischen Exploration linien-basierter Graphiken auf Wissensverarbeitung basiert. Abbildung 1.2 zeigt zwei ähnliche Ausschnitte aus einer Straßenkarte. Lediglich die Straßennamen hinter der Kreuzung sind vertauscht. Der rote Pfeil zeigt den Verlauf der Explorationsbewegung. Zu dem Zeitpunkt der Exploration, an dem der Benutzer die Spitze des Pfeils erreicht hat, kann die Exploration in Abbildung 1.2 a) wie folgt beschrieben werden: *Der Benutzer ist (an der Post) in die Schillerstraße abgebogen.* In Abbildung 1.2 b) kann eine andere Beschreibung gegeben werden: *Der Benutzer ist nach dem Abbiegen (an der Post) noch immer auf der Goethestraße.* Dieses Beispiel zeigt zwei Eigenschaften der Ereigniserkennung während der Exploration linien-basierter Graphiken in virtuellen Umgebungen:

Erstens gibt es viele Möglichkeiten den gleichen Explorationsvorgang zu beschreiben. Zu erwähnen, dass das Abbiegen an der Post stattgefunden hat ist optional. Es wäre ebenfalls möglich das Beobachtete generell feinkörniger zu beschreiben, als Bewegung entlang der Goethestraße in Richtung der Post, Erreichen der Kreuzung, Wechsel der Bewegungsrichtung und Bewegung entlang der Schillerstraße. Die Ereigniserkennung muss alle Explorationsereignisse erkennen können, die für einen künstlichen Assistenten potentiell relevant sind. Die Entscheidung, auf welche dieser Ereignisse mit welcher multimodalen Assistenz reagiert wird, ist nachgeordnet. Das kann bedeuten, dass während einer Exploration sich mehrfach überlappende Ereignisse erkannt werden müssen.

Zweitens basieren die erkannten Ereignisse aus dem Beispiel auf Wissen über die Historie der Exploration. Explorationsereignisse werden als *komplex* bezeichnet, wenn sie aus mehreren

Teilergebnissen abgeleitet werden. Im Falle des Abbiegens sind das: Bewegung auf einer Straße, Richtungsänderung und Bewegung auf einer anderen Straße. *Komplexe Explorationsereignisse* können auch dadurch charakterisiert werden, dass sie nicht auf Grund einer einzelnen Momentaufnahme, also einer einzelnen Beobachtung, erkannt werden können. Komplexe Explorationsereignisse müssen mit Wissensverarbeitung über bereits erkannte Ereignisse, unter Einbeziehung von Wissen über die linien-basierte Graphik und die Anwendungsdomäne, erschlossen werden. Tabelle 1.1 fasst die Fakten zusammen, die notwendig sind, um die Beispiel-Ereignisse zu erkennen.

Die vorliegende Arbeit präsentiert ein Rahmenwerk, das wissensbasierte Ereigniserkennung als Grundlage für verbale Assistenz während der Exploration von linien-basierten Graphiken ermöglicht. Das Rahmenwerk umfasst, neben der Konzeption einer Systemarchitektur, die Wissensrepräsentationen für linien-basierte Graphiken und Explorationsereignisse und einen regelbasierten Formalismus zum Erkennen komplexer Explorationsereignisse.

Auch wenn die vorgestellten Konzeptionen domänenunabhängig entwickelt worden sind, finden sich durchgängig durch die Arbeit Referenzen zu Straßenkarten und Linien-Graphen, als zwei typische Vertreter linien-basierter Graphiken. Linien-Graphen drücken numerische Werte durch den Verlauf einer Linie in einer Ebene aus. Diese Anwendungsgebiete zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der Praxis relevante Anwendungsgebiete für die Schaffung von Mensch-Computer-Schnittstellen für blinde und sehbehinderte Menschen sind.

Art des Wissens	Beispiel a)	Beispiel b)
Wissen über vergangene Exploration	Der Benutzer hat sich auf der <i>Goethestraße</i> bewegt.	
Wissen über vergangene Exploration	Der Benutzer hat an einer Kreuzung seine Bewegungsrichtung nach unten geändert. (Der Winkel beträgt ca. 90°.)	
Wissen über aktuelle Exploration	Der Benutzer bewegt sich aktuell auf der <i>Schillerstraße</i> .	Der Benutzer bewegt sich aktuell auf der <i>Goethestraße</i> .
Wissen über linien-basierte Graphik	<i>Goethestraße</i> und <i>Schillerstraße</i> bilden eine (T-)Kreuzung.	
Wissen über linien-basierte Graphik	Die Landmarke <i>Post</i> liegt in der unmittelbaren Nähe der Kreuzung zwischen <i>Goethestraße</i> und <i>Schillerstraße</i> .	
Domänenwissen	<i>Abbiegen</i> ist ein Konzept, das zur Beschreibung der Exploration von Karten genutzt werden kann. Das Ereignis <i>Abbiegen</i> besteht aus der Bewegung auf einer Straße, einem Richtungswechsel an einer Kreuzung und der weiteren Bewegung auf einer Straße.	
Resultierende Beschreibung des Explorationsereignisses	<i>Der Benutzer ist (an der Post) in die Schillerstraße abgebogen.</i>	<i>Der Benutzer ist nach dem Abbiegen (an der Post) noch immer auf der Goethestraße.</i>

Tabelle 1.1: Notwendige Fakten zum Erkennen der „Abbiegen“-Ereignisse aus Abbildung 1.2 a) und 1.2 b)

1.1 Aufbau der Arbeit

Zielsetzung dieser Arbeit ist nicht nur die wissenschaftlich fundierte Entwicklung einer wissensbasierten Ereigniserkennung für die Exploration in virtuellen haptischen Umgebungen, sondern auch die Entwicklung haptischer Repräsentationen, einer Systemarchitektur für die auditorisch unterstützte haptische Exploration und konkreter Prototypen für empirische Versuche. Die Arbeit ist in vier Teilen aufgebaut:

Teil 1: Im ersten Teil steht die Mensch-Computer-Interaktion im Vordergrund. In Kapitel 2 werden linien-basierte Graphiken anhand von Beispielen eingeführt. Es werden die Anwendungsgebiete und Möglichkeiten linien-basierter Graphiken zusammengefasst. Dazu wird aufgezeigt, was mit diesen Grafiken dargestellt werden kann und welche Eigenschaften sie gegen Sprache und gegen andere graphische Darstellungen abgrenzen. Die Beispieldomänen der Straßenkarten und der Linien-Graphen werden mit Rückgriff auf Literatur analysiert: Linien-basierte Graphiken bestehen aus einem Inventar geometrischer Elemente und sprachlichen Annotationen. Ein formales, domänenunabhängiges Modell für linien-basierte Graphiken wird vorbereitet.

In Kapitel 3 werden die Möglichkeiten, diese linien-basierten Graphiken haptisch zu realisieren, besprochen. Dazu wird zunächst die haptische Wahrnehmung des Menschen einschließlich der für virtuelle haptische Umgebungen relevanten physiologischen und psychologischen Befunde beschrieben. Verschiedene Verfahren zur (virtuellen) haptischen Darstellung werden verglichen. Die Funktionsweise virtueller haptischer Umgebungen auf der Grundlage von Force-Feedback-Geräten wird erläutert. Im letzten Teil des Kapitels werden die Grenzen und Herausforderungen der haptischen modalen Substitution aufgezeigt, was die Nutzung zusätzlicher auditorischer Assistenz motiviert.

In Kapitel 4 wird die Nutzung auditorischer Assistenz bei der haptischen Exploration eingeführt. Es wird auf den kognitionspsychologischen Hintergrund der Arbeitsteilung der Modalitäten eingegangen und die Idee verfolgt, Informationen optimal auf verfügbare Sinneskanäle aufzuteilen. Im zweiten Teil des Kapitels wird auf mögliche Interaktionsparadigmen für multimodal assistierte haptische Exploration eingegangen. Dabei werden die Möglichkeiten proaktiver Assistenz betont, welches notwendig sind, um Schwierigkeiten bei der haptischen Exploration linien-basierter Graphiken auszugleichen. Hieraus ergibt sich die These, dass Ereigniserkennung und Wissensverarbeitung die Grundlage für effiziente und effektive assistierende Systeme bilden. Das Kapitel endet mit einer Darstellung des State-of-the-Art zu multimodal assistierter haptischer Exploration und der möglichen Erweiterung des State-of-the-Art durch Ereigniserkennung.

Teil 2: Im Hauptteil der Arbeit wird eine wissensbasierte Ereigniserkennung während der Exploration haptischer linien-basierter Graphiken vorgestellt. Kapitel 5 beginnt mit der

Konzeption einer Systemarchitektur für eine multimodal assistierte haptische Exploration von linien-basierten Graphiken auf der Grundlage wissensbasierter Ereigniserkennung. Die Zielsetzung der Systementwicklung wird dargestellt und die Anforderungen an System und einzelne Komponenten werden skizziert. Ein konkretes Anwendungsszenario wird vorgestellt. Eine Systemarchitektur und das Zusammenspiel ihrer Komponenten werden erläutert. Das Kapitel wird ergänzt durch Informationen zur softwaretechnischen Realisierung.

Die folgenden drei Kapitel 6, 7 und 8 führen die zur Ereigniserkennung notwendige Wissensverarbeitung aus. In Kapitel 6 wird die Repräsentation von Wissen über linien-basierte Graphik formalisiert. Es wird eine mehrschichtige Repräsentation für linien-basierte Graphiken eingeführt, welche die Beobachtung der haptischen Exploration, wissensbasierte Ereigniserkennung und auch geometrische Berechnungen für die Ereigniserkennung ermöglicht. Die formale Repräsentation wird anhand von Kriterien aus der Literatur evaluiert.

In Kapitel 7 wird eine Repräsentation für Explorationsereignisse vorgestellt. Die Kriterien für eine Ereignisrepräsentation werden rekapituliert und eine Systematik von Ereignissen eingeführt. Eine Unterscheidung zwischen beobachtbaren und erschlossenen Ereignissen wird eingeführt. Eine formale Repräsentation von Explorationsereignissen für linien-basierte Graphiken wird vorgelegt. Das Kapitel umfasst zudem eine Darstellung des Ablaufs einer Ereigniserkennung mit hierarchischem Aufbau einer Ereignisrepräsentation.

In Kapitel 8 kommen die in den vorangegangenen Kapiteln gelegten Grundlagen für die Erkennung komplexer Explorationsereignisse zusammen. Ein regelbasierter Ansatz für das Erkennen der in Kapitel 7 vorgestellten Explorationsereignisse wird vorgestellt. Kriterien für ein Regelsystem zur Ereigniserkennung werden diskutiert, bevor die entwickelten Regeln zur Ereigniserkennung beschrieben werden. Anhand von mehreren Beispielen wird der Aufbau der Regeln erläutert. Eine komplette Darstellung des Regelsatzes zur Erkennung von domänenunabhängigen Explorationsereignissen in linien-basierten Graphiken findet sich in Appendix B.

Teil 3: Der dritte Teil der Arbeit widmet sich der automatischen Generierung von haptischen Darstellungen und der für die Ereigniserkennung notwendigen Repräsentationen aus Datenquellen. Ziel dieses Teils ist es plausible Verarbeitungsschritte zum automatisierten Aufbau dieser Repräsentationen aufzuzeigen. In Kapitel 9 wird zunächst der generelle Aufbau von 3D-Modellen und spezielle Eigenschaften haptischer 3D-Modelle für virtuelle haptische Umgebungen diskutiert. In Kapitel 10 werden alle Verarbeitungsschritte für die Erstellung multimodaler haptischer Karten dargestellt. Die Verarbeitung reicht vom Einlesen und Aufbereiten von Kartenmaterial aus geographischen Datenbanken, über den Aufbau interner Repräsentationen, bis zur algorithmischen Erzeugung von 3D-Karten und der Anreicherung der Wissensrepräsentation mit räumlichen Relationen, welche für die Ereigniserkennung benötigt werden. Analog hierzu zeigt Kapitel 11 alle Verarbeitungsschritte für die Erstellung multimodaler haptischer Linien-Graphen auf. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf dem eigens für gekrümmte Linien-Graphen entwickelten Algorithmus zur Erstellung haptischer 3D-Modelle.

Teil 4: Die Validierung der entwickelten Konzepte dieser Arbeit erfolgt durch die Realisierung konkreter Prototypen. Dazu wird in Kapitel 12 eine durch Vorstudien zur haptischen Exploration von Straßenkarten motivierte Erweiterung der Ereignisrepräsentation vorgestellt. Im Rahmen einer Kooperation im VAVETaM-Projekt (Verbally Assisted Virtual Environment Tactile Map) ist hieraus ein Prototyp für verbal assistierte Exploration von Straßenkarten entstanden, welcher in einer empirischen Studie evaluiert worden ist. In Kapitel 13 wird der zweite auf Grundlage der vorgelegten Arbeit entstandene Prototyp, der OBSERVINGASSISTENT zur verbal assistierten Exploration von Linien-Graphen, vorgestellt. Im Unterschied zum VAVETaM-Projekt, funktioniert die Generierung und Auslösung verbaler Assistenz als eine Erweiterung der Ereigniserkennung. Verbale Assistenz erfolgt auf Grundlage der gleichen Wissensbasis, welche auch für die Ereigniserkennung genutzt wird und wird vom gleichen regelbasierten System gesteuert. Dazu wird die Interaktion mit dem Benutzer ebenfalls als Ereignis repräsentiert und erlaubt so Schlüsse welche nicht nur auf Wissen über den Linien-Graphen und die Historie der Exploration basieren, sondern auch auf der Historie der gegebenen auditorischen Assistenz.

In Kapitel 14 folgt eine abschließende Konklusion der Arbeit. Die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit werden rekapituliert und weiterführende Ideen in einem Ausblick diskutiert.

Teil 1:

**Audiohaptische Exploration
von linien-basierten
Graphiken**

2 Linien-basierte Graphiken

2.1 Linien-basierte Graphiken

Graphische Darstellungen werden als Hilfsmittel für den Austausch, die Speicherung und die Verarbeitung von Wissen genutzt. Sie unterstützen kommunikative und kognitive Prozesse und finden in einer Vielzahl von Domänen Anwendung. Linien-basierte Graphiken sind eine Teilmenge graphischer Darstellungen, die sich durch einen hohen Grad an Schematisierung auszeichnen. Abbildung 2.1 zeigt drei Beispiele für graphische Darstellungen aus den Anwendungsdomänen der Karten-Skizzen, der Linien-Graphen und der Geometrie. An Hand dieser Beispiele wird eine Analyse linien-basierter Graphiken vorgenommen, ihre Komponenten werden identifiziert und ein formales, domänenunabhängiges Modell linien-basierter Graphiken wird aufgestellt.

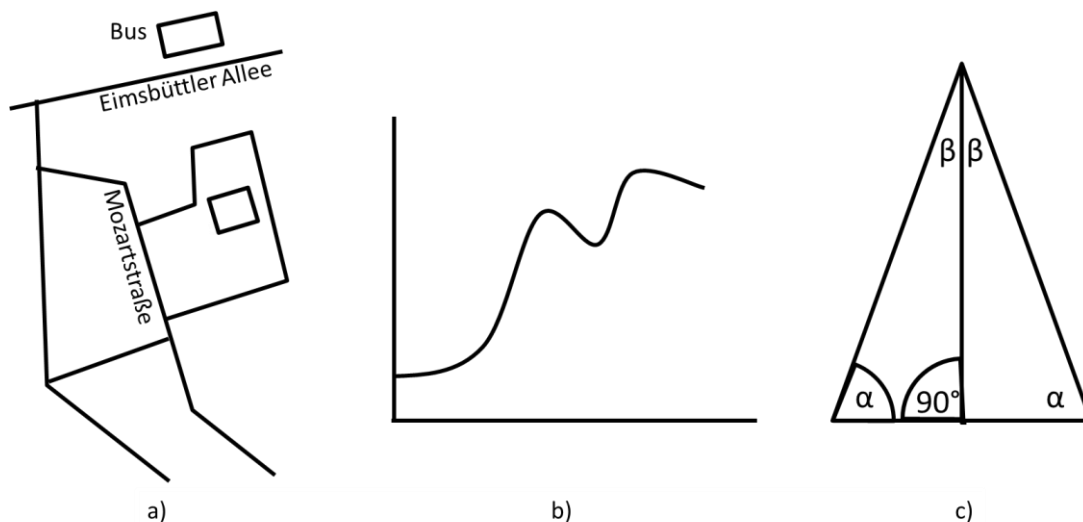


Abbildung 2.1: Graphiken aus dem Bereich der Karten-Skizzen (a), Linien-Graphen (b) und der Geometrie (c).

Die drei Abbildungen haben gemeinsam, dass sie, bis auf einige schriftliche Bezeichner, ausschließlich aus geraden und gekrümmten Linien bestehen. Die Darstellungen haben einen schematischen Charakter. In ihnen wird auf gestalterische Mittel, wie unterschiedliche Farben, verschiedene Strichstärken oder Texturen verzichtet. Neben dem Vorteil, dass derartige Darstellungen schnell zu erstellen und einfach zu reproduzieren sind (zum Beispiel auf einem Schwarz-Weiß-Drucker), fokussieren diese Darstellungen auf die Vermittlung räumlicher Informationen und vermeiden überflüssige oder fehlleitende gestalterische Mittel. Graphiken dieser Art werden im Folgenden als *linien-basierte Graphiken* bezeichnet. Linien-basierte Graphiken dienen der effizienten Vermittlung von Informationen, welche besonders gut in einem räumlichen Medium repräsentiert werden können.

Die Eigenschaften von linien-basierten Graphiken werden an Hand von drei Beispielen herausgearbeitet. Diese Beispiele sind: Straßenkarten, Linien-Graphen und Abbildungen aus dem (schulischen) Geometrieunterricht. Nicht alle Darstellungen aus diesen Anwendungsgebieten sind linien-basierte Graphiken. Im Bereich der Karten werden zum Beispiel auch (bearbeitete) Satellitenfotos genutzt, ebenso gibt es aufwändig gestaltete Linien-Graphen. Allerdings können solche aufwändigeren Graphiken in der Regel auf linien-basierte Graphiken reduziert werden, indem bedeutungstragende gestalterische Mittel als Beschriftungen umgesetzt werden.

Linien-basierte Graphiken sind für die Umsetzung im Rahmen einer multimodal-assistierten, haptischen Exploration besonders geeignet. Haptische Darstellungen bieten nur eine geringe Auflösung und ein eingeschränktes Repertoire an gestalterischen Mitteln. Schematische Darstellungen lassen sich im Gegensatz zu aufwändig gestalteten Darstellungen gut in haptische Darstellungen umsetzen. Die haptische Rezeption von bildhaften Darstellungen ist zudem gegenüber der visuellen Wahrnehmung erschwert. Die Vermeidung von unnötigen oder ablenkenden Informationen ist in diesem Medium besonders wichtig, um eine gute Benutzbarkeit der Darstellungen zu erreichen.

Die drei präsentierten Anwendungsdomänen sind plausible Einsatzgebiete für multimodal-assistierte, haptische Exploration. Sie sind relevant für Menschen ohne Zugang zu entsprechenden visuellen Darstellungen. Auch wenn es im Rahmen dieser Arbeit an erster Stelle darum geht, wissensverarbeitende Prozesse zur Ereigniserkennung zu erforschen und zu entwickeln, ist die Praxisrelevanz der Darstellungen wichtig: Graphische Darstellungen mit Praxisrelevanz erlauben, in Kooperation mit anderen Forschungsprojekten, empirische Versuche unter realistischen Anwendungsbedingungen durchzuführen. Außerdem sind die gewählten Anwendungsdomänen der Beispiele hinreichend in der Literatur verankert, die Analyse der Anwendungsdomänen kann mit Rückgriff auf bestehende Literatur erfolgen. Die Beispiel-Domänen wurden so gewählt, dass sie hinreichend unterschiedlich sind und die Untersuchung verschiedener Aspekte der haptischen Realisierung und Ereigniserkennung während der haptischen Exploration erlauben.

2.1.1 Straßenkarten

Straßenkarten stellen einen Ausschnitt der realen Welt dar. Sie bilden in der Regel eine räumliche Anordnung von Landmarken und Wegen durch eine planare, räumliche Anordnung von Symbolen ab. Straßenkarten werden genutzt um Überblickswissen über eine Umgebung zu erlangen und Routen zu ermitteln.

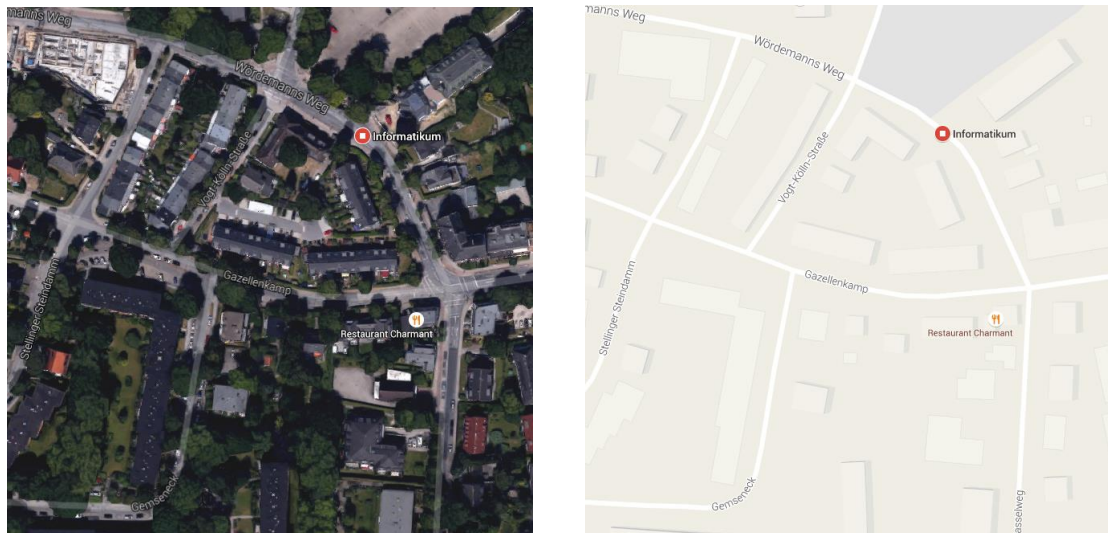


Abbildung 2.2: Satellitenbild einer Umgebung (links) und dazugehörige Karte (rechts) (Quelle: Google).

Karten bilden die reale Welt in der Regel stark vereinfacht ab. Nach Tversky, Zacks und Heiser (2000) werden dazu mehrere Vereinfachungen genutzt: Die dreidimensionale Welt wird auf eine zweidimensionale Abbildung projiziert. Durch den oft kleinen Maßstab werden in Karten Information vereinfacht und weggelassen. Der Inhalt der Karten wird abhängig von der geplanten Nutzung und den erwarteten Anwendern der Karte ausgewählt und abstrahiert: Karten für Radfahrer enthalten Radwege, Karten für Blinde enthalten Fußwege, etc. Der genaue Verlauf von Wegen und Flüssen, beziehungsweise die Konturen von Landmarken und Küsten, werden vereinfacht und regularisiert dargestellt. Auch werden Objekte unabhängig von ihrer tatsächlichen Größe so groß dargestellt, dass sie in der Karte gut zu erkennen sind aber keine anderen Objekte verdecken. Abbildung 2.2 (links) zeigt ein Satellitenbild, Abbildung 2.2 (rechts) zeigt eine dazugehörige Karte, die gegenüber dem Satellitenbild deutlich vereinfacht ist.

Noch stärker treten Vereinfachung und Schematisierung hervor, wenn handgefertigte Kartenskizzen (sketch maps) zur Beschreibungen von Routen oder Umgebungen genutzt werden. Nach Tversky orientieren sich Kartenskizzen der Vagheit von Sprache: Auch wenn eine graphische Darstellung die genaue Spezifikation eines Winkels zwischen zwei Straßen oder ihrer Länge zulässt, werden Berührungspunkte zwischen Straßen oft nur schematisch als X, T oder L dargestellt, der genaue Winkel wird nicht angegeben¹. Wenn eine Kartenskizze eine Route beschreibt, so geschieht das in der Regel als eine Folge von Vorwärts- und Reorientierungsbewegungen (Denis, 1997; Tversky, Zacks & Heiser, 2000; Kerzel, 2008). Routen-Beschreibungen können durch ein kleines Inventar von Elementen ausgedrückt werden. Dieses Inventar umfasst Straßen, verschiedene Arten von Kreuzungen und Kurven, die durch die Straßen gebildet werden und Landmarken wie Gebäude und andere gut sichtbare

¹ Genaugenommen müssen in einer graphischen Darstellung diese Eigenschaften festgelegt werden, es ist nicht möglich, dies vage oder offen zu lassen. Andererseits kann es den Benutzern einer Karte durchaus bewusst sein, dass die abgebildeten Details nicht der Realität entsprechen, siehe Habel (2003)

Objekte. Abbildung 2.3 zeigt ein von Tversky und Lee (1999) vorgeschlagenes, visuelles Inventar für Kartenskizzen, Tabelle 2.1 fasst diese Elemente zusammen.

Straßen	Gerade oder gekrümmte Linien stellen Straßen dar. Folgen von Linien können komplexe Straßenverläufe modellieren.
Pfeile	Pfeile, insbesondere entlang von Straßen oder an Kreuzungen geben Anweisungen über Bewegungen zum Folgen einer vorgegebenen Route. Pfeile zur Kennzeichnung von Routen fehlen in Übersichtskarten.
Kreuzungen & Kurven	Verschiedene Typen von Kreuzungen und Kurven (L-Kreuzung, T-Kreuzung, X-Kreuzung) werden an den Punkten gebildet an denen sich Linien, die Straßen repräsentieren, treffen.
Landmarken	Geschlossene Polygone, oder andere geometrische Figuren wie Ovale können verschiedene Landmarken in der Kartenskizze darstellen.

Tabelle 2.1: Elemente von Kartenskizzen nach Tversky und Lee (1999).

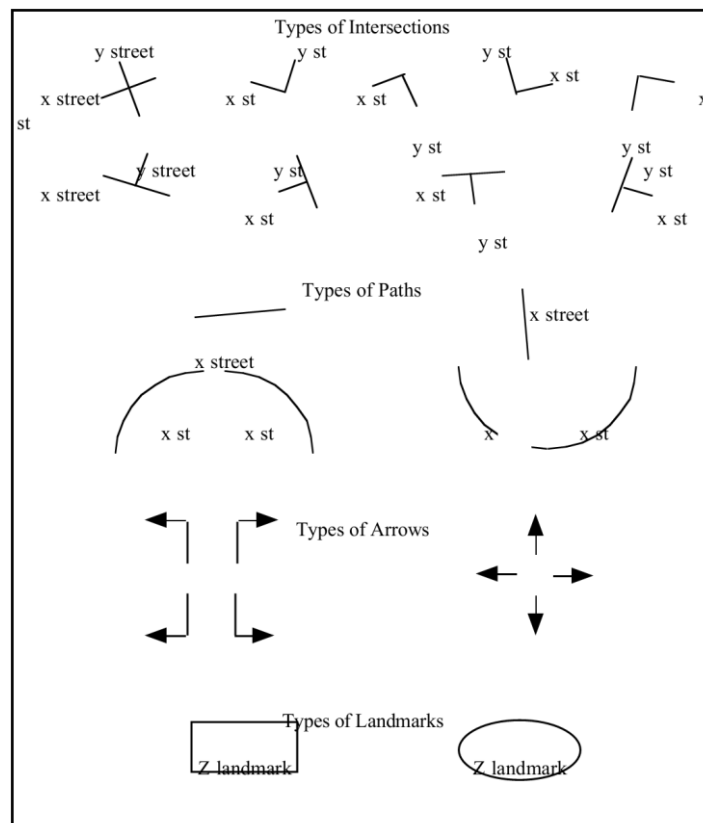


Abbildung 2.3: Inventar für die Erstellung von Kartenskizzen aus (Tversky & Lee, 1999).

2.1.1.1 Beispiel Kartenskizze

Abbildung 2.4 zeigt eine Kartenskizze, die aus diesen Elementen zusammengestellt wurde. Sie zeigt einen Ausschnitt aus der in Abbildung 2.2 dargestellten Karte. Dabei wurde eine Übersichtskarte gewählt, welche keine speziellen Routeninformationen enthält. Neben den von

Tversky vorgeschlagenen Elementen enthält die gezeigte Kartenskizze auch noch Label-Informationen, welche die Namen von Straßen und Landmarken angeben.

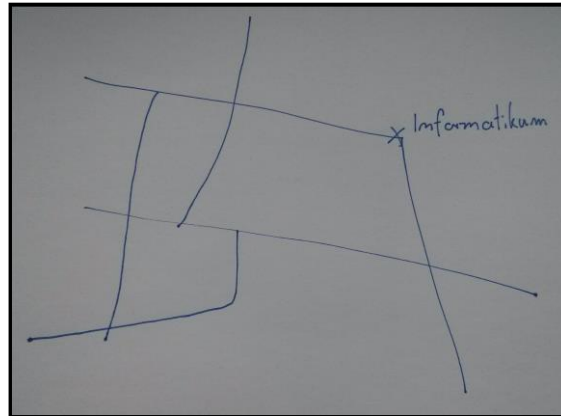


Abbildung 2.4: Kartenskizze zum Kartenausschnitt aus Abbildung 2.2.

2.1.2 Linien-Graphen

Linien-Graphen stellen quantitative Relationen und Verläufe von numerischen Werten räumlich dar. Kosslyn (1989) identifiziert mehrere typische Elemente von Graphen, von Kosslyn als Konstituenten bezeichnet, die in jedem gut gestalteten Graphen zu finden sind. Diese Konstituenten erfüllen spezifische Funktionen innerhalb der graphischen Darstellung. Tabelle 2.2 fasst die Konstituenten zusammen. Diese Konstituenten beschreiben allgemein den Aufbau von Graphen, Abbildung 2.5 zeigt eine Unterteilung eines Linien-Graphen in diese Konstituenten.

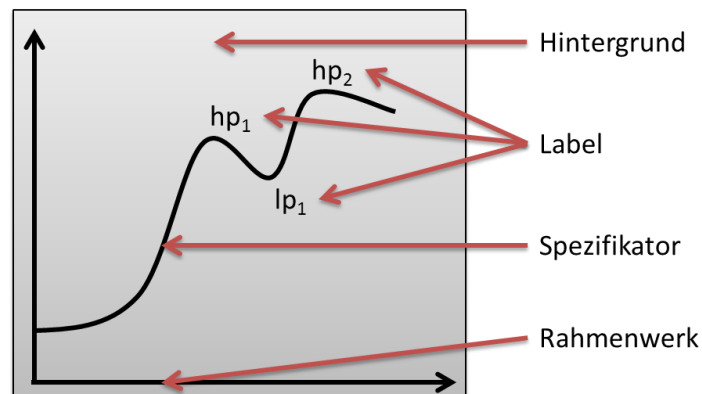


Abbildung 2.5: Konstituenten eines Linien-Graphen Nach Kosslyn (1989).

Hintergrund (Background)	Jede Graphische Darstellung ist zwangsweise auf einem Hintergrund gezeichnet. Dieser Hintergrund trägt in der Regel keine weiteren Informationen zum Graphen bei, kann aber durch Muster oder ein zum Thema des Graphen passendes Foto gestaltet werden.
Rahmenwerk (Framework)	Das Framework repräsentiert die miteinander in Relation gebrachten Entitäten. Hierbei kann es sich um die klassischen X- und Y- Achsen handeln, aber auch um Rahmen, Gitterlinien oder andere visuelle Hilfskonstruktionen. Schriftliche Bezeichnungen an Achsen fallen jedoch nicht in diese Kategorie.
Label	Label stellen schriftliche, symbolische oder bildhafte Beschriftungen und Hinweise zur Interpretation und Erklärung der bereits vorhandenen Elemente dar. Hierunter fallen auch die Beschriftungen an den Achsen des Linien-Graphen, aber dies sind nicht die einzigen Möglichkeiten Label zu verwenden. Sie können zum Beispiel auch genutzt werden, um besondere Punkte oder Abschnitte auf einem Graphen zu kennzeichnen.
Spezifikator (Specifier)	Der Spezifikator trägt Informationen über die dargestellten Entitäten. In einem Liniendiagramm handelt es sich um eine (in der Regel gekrümmte) Linie, deren Punkte die Werte der X-Achse mit denen der Y-Achse in Relation setzen.

Tabelle 2.2: Elemente von Linien-Graphen nach Kosslyn (1989).

2.1.2.1 Graphen-Landmarken und Graphen-Segmente

Ein wichtiges Element von Linien-Graphen im Kontext multimodal assistierter haptischer Exploration sind hervorgehobene einzelne Punkte und Abschnitte von Linien-Graphen. Diese Punkte und Abschnitte können entweder aus dem geometrischen Verlauf des Graphen hervorgehen oder aber als Annotationen bestimmte Punkte und Abschnitte durch zusätzliche Informationen in einen Kontext setzen. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese salienten Punkte als Graphen-Landmarken und Abschnitte eines Graphen als Graphen-Segmente bezeichnet.

Beispiele für Graphen-Landmarken auf Grund des geometrischen Verlaufes sind: Maxima (Hoch und Tiefpunkte), Wende- und Sattelpunkte, Krümmungsmaxima und auch der Start- und Endpunkt des Graphen. Als saliente Graphen-Segmente ergeben sich die Bereiche zwischen diesen Punkten, wie zum Beispiel kontinuierlich steigende und fallende Abschnitte eines Graphen. Annotationen auf Grund eines Kontextes können vielfältiger Natur sein, zum Beispiel kann der zeitliche Verlauf einer Größe durch die Annotation von besonderen punktuellen oder ausgedehnten Ereignissen genauer erläutert werden. Die von Kosslyn definierten Label beziehen sich häufig auf diese Graphen-Landmarken und Graphen-Segmente.

2.1.2.2 Beispiel Graph mit Annotation

Ein Beispiel in Abbildung 2.6 zeigt den zeitlichen Verlauf einer fiktiven Vogelpopulation (in Anlehnung an Acartürk (2010)). Die Abschnitte in denen die gezeigte Population steigt und fällt, sowie den Tiefpunkt der Population ergeben sich aus dem geometrischen Verlauf des Linien-Graphen. Dazu liefert eine weitere Annotation die Information über ein Zeitintervall, in dem ein besonderes Ereignis stattgefunden hat. Dieses Intervall mit seiner Annotation dient dazu den Verlauf des Linien-Graphen zu erklären.

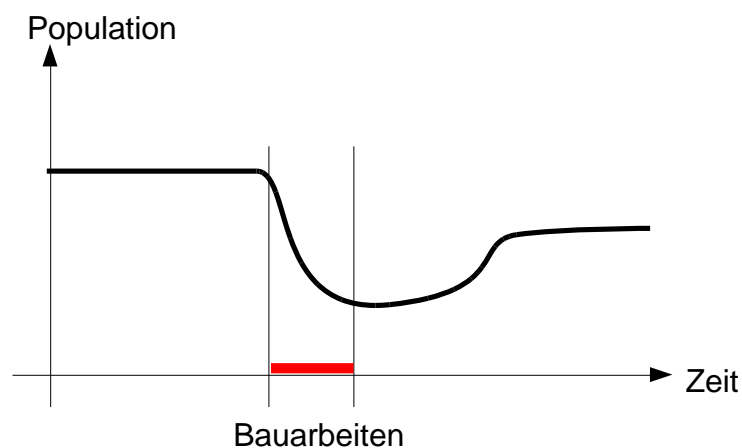


Abbildung 2.6: Linien-Graph mit Annotation.

2.1.3 Abbildungen zum Geometrieunterricht

Geometrieunterricht ist ein weiteres Anwendungsgebiet in dem schematische Graphiken genutzt werden. Graphiken aus dem Geometrieunterricht stellen mathematische Sachverhalte anschaulich dar. Während für den Bereich der Analysis die weiter oben beschriebenen Linien-Graphen genutzt werden, bestehen Abbildungen aus dem Geometrieunterricht aus Elementen wie Punkten, Geraden und Polygonen. Oft finden sich Annotationen zu räumlichen Relationen zwischen diesen Elementen, wie zum Beispiel Angaben zu Winkeln. Tabelle 2.3 gibt eine Übersicht über diese Elemente.

Punkte	Punkte sind ein Grundelement der Schulgeometrie. Sie werden graphisch als (kleine) Kreise dargestellt, da ein Punkt an sich keine Ausdehnung besitzt. Punkte können (für genaue Berechnungen) in einem Koordinatensystem verankert sein. $(P(x, y))$ für Punkt im Koordinatensystem mit den Koordinaten x und y .)
Geraden & Strecken	Mathematische Geraden (durch zwei Punkte) und Strecken (zwischen 2 Punkten) bilden komplexere Elemente, welche sich auf Punkten aufbauen lassen. Dabei ist zu beachten, dass die mathematisch unendlich langen Geraden selbstverständlich nur in endlicher Länge visualisiert werden können.
Polygone (geometrische Figuren)	Geometrische Figuren wie Dreiecke, Vierecke oder andere Polygone (Vielecke), oftmals mit besonderen Eigenschaften (rechtwinklige Dreiecke, Quadrate) können durch ihre Eckpunkte und Strecken zwischen ihnen (den Seiten des Polygons) aufgespannt werden.
Räumliche Relationen	Räumliche Relationen wie die Parallelität von Strecken und Geraden, die parallele oder senkrechte Anordnung von Linien, der (rechte) Winkel zwischen zwei sich treffenden Geraden oder Strecken in einem Punkt werden mittels besonderer Symbole oder Beschriftungen in der Graphik gekennzeichnet.

Tabelle 2.3: Elemente von Darstellungen aus dem Bereich der Schulgeometrie.

2.1.3.1 Beispiel Abbildung aus dem Geometrie-Unterricht

Die unten stehende Abbildung 2.7 zeigt eine linien-basierte Graphik, welche in ähnlicher Form im schulischen Geometrieunterricht genutzt wird. Die Abbildung illustriert den Satz des Pythagoras². Die Illustration zeigt ein rechtwinkliges Dreieck, bei dem über jeder Seite ein Rechteck konstruiert ist, dabei fungieren die Seiten des Dreiecks gleichzeitig als Seite je eines Quadrates. Eine Annotation kennzeichnet den rechten Winkel des Dreiecks.

² Es ist zu beachten, dass die Graphik nur eine einzige Instanz eines rechtwinkligen Dreiecks mit über den Seiten konstruierten Quadraten zeigt. Diese Graphik ist kein hinreichender Beweis für den Satz. Trotzdem finden sich Abbildungen dieses Typs häufig im Schulmaterial.

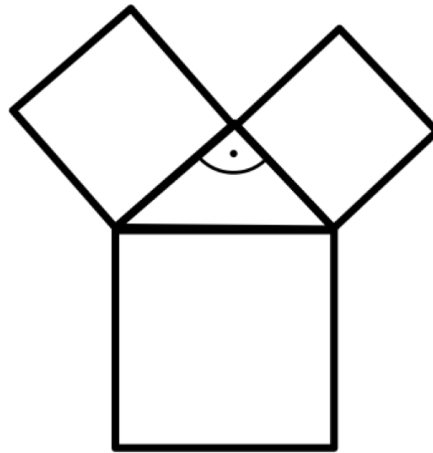


Abbildung 2.7: Illustration zum Satz des Pythagoras.

2.2 Anwendungsgebiete linien-basierter Graphiken

Graphische Darstellungen sind Hilfsmittel, die es erlauben interne kognitive Prozesse zu externalisieren (Tversky, 2000; Tversky, 2005). Diese externalisierte Form von Gedanken kann genutzt werden, um Wissen an andere Menschen weiter zugeben, das eigene Gedächtnis zu entlasten oder auch Berechnungen und Schlüsse einfacher durchführen zu können. Schematische, graphische Darstellungen eignen sich in einigen komplexen Kontexten als besonders effizientes Kommunikationsmedium, weshalb sie auch für blinde und sehbehinderte Menschen relevant sind.

2.2.1 Abgrenzung von Graphiken gegenüber Sprache

Nicht nur Graphiken, sondern auch Sprache erlaubt es, Wissen und kognitive Prozesse zu Externalisieren. Für blinde und sehbehinderte Menschen ist Sprache auditiv uneingeschränkt zugänglich und kann auch in schriftlicher Form mit Hilfe von Blindenschrift (Braille) genutzt werden. Trotzdem besteht auch für blinde und sehbehinderte Menschen ein Bedarf an bildhaften Darstellungen. Diese erlauben, anders als Sprache, eine effiziente Darstellung räumlicher Zusammenhänge. Für sehende Menschen sind graphische Darstellungen wie (digitale) Karten, Diagramme und Linien-Graphen ein fester Bestandteil des Alltags. Graphische Darstellungen sind effizient in der Kommunikation von räumlichen oder auch abstrakten Zusammenhängen, welche auf räumliche Relationen abgebildet werden können.

Wie viel Informationen in einer Graphik aus Linien enthalten sind, zeigt der Versuch auch nur einen kleinen Ausschnitt einer Karte sprachlich zu beschreiben. Möchte man die Lage von einzelnen Straßen und Landmarken zueinander qualitativ beschreiben, muss eine Vielzahl teils komplexer räumlicher Relationen beschrieben werden, um auszudrücken, welche Landmarke in welcher Himmelsrichtung bezogen auf andere Landmarken liegt, welche Landmarken nahe bei einander liegen, wie die Form der Landmarken ist, wie sie zu einander ausgerichtet sind und vieles mehr.

Das wesentliche Problem bei einem solchen Verschriftlichungsversuch einer räumlichen Darstellung liegt darin, dass der Beschreibende eine *Auswahl der räumlichen Relationen*, einen *Detailierungsgrad* und eine *Linearisierung* finden muss:

Auswahl der räumlichen Relationen: Sprache kann genutzt werden um über Entitäten und ihre Relationen zu kommunizieren, dies schließt räumliche Relationen ein. In Bezug auf räumliche Relationen unterscheiden sich Graphiken jedoch von Sprache: Durch die Anordnung der Elemente in der Graphik stehen diese in eindeutigen räumlichen Relationen zueinander. Räumliche Relationen zwischen Elementen werden durch bloße Anordnung der Elemente ausgedrückt. (Mit der Einschränkung, dass Graphiken, als zweidimensionales Medium auch nur zweidimensionale räumliche Relationen darstellen können. Zur Darstellung von dreidimensionalen Relationen können allerdings perspektivische Darstellungen genutzt werden. Im Folgenden werden unter räumlichen Relationen in erster Linie zweidimensional darstellbare Relationen verstanden.) Bei einer sprachlichen Wiedergabe dieses räumlichen Wissens muss eine Auswahl getroffen werden, welche räumlichen Relationen relevant sind. Ist es bei einer Karte wichtig, in welcher Anordnung weit voneinander entfernte Landmarken liegen? Für jemanden der sich von einer hohen Aussichtsplattform einen Überblick verschaffen möchte kann dies zutreffen, für jemanden der mit Hilfe der Beschreibung durch Straßen gehen möchte sind diese Relationen nicht relevant. Der wichtige Vorteil einer Graphik besteht darin, dass ihr Nutzer selbst entscheidet welche Relationen für seine Aufgabe relevant sind und welche Relationen genauer betrachtet und memoriert werden. Diese Autonomie des Nutzers macht graphische Darstellungen effizient. Eine Karte, zum Beispiel, kann für eine Vielzahl von Aufgaben genutzt werden: Es können verschiedene Routen oder Informationen über eine Umgebung gefunden werden. Eine schriftliche oder mündliche Routenbeschreibung kommuniziert hingegen nur einen sehr kleinen Ausschnitt dieser Informationen.

Detailierungsgrad: Neben der Frage, was beschrieben wird, muss bei der Beschreibung einer räumlichen Anordnung auch entschieden werden, wie detailliert Relationen wiedergegeben werden sollen. In der Sprache werden räumliche Relationen mit einer gewissen Ungenauigkeit genutzt, so werden zum Beispiel Winkelverhältnisse zu Konzepten wie „links“ oder „scharf links“ zusammengefasst. Gleiches gilt für Distanzen. Abstände werden in Kategorien angegeben, selten in genauen Zahlen. Zudem gibt es räumliche Anordnungen, die sich nur schwierig, ohne Rückgriff auf Spezialwissen, kommunizieren lassen, etwa wie den genauen Verlauf einer mehrfach gekrümmten Linie eines Linien-Graphen.

Linearisierung: Während die Betrachtung einer Graphik an jedem beliebigen Punkt beginnen und sich in jede Richtung in der Ebene fortsetzen kann, ist Sprache ein lineares Medium. Es ist nicht selbstverständlich, dass sich Informationen über Objekte, die in einer Graphik räumlich benachbart sind, auch tatsächlich in unmittelbarer Nähe in einem Text befinden. Ein Beschreibender muss entscheiden, ob zuerst ein grober Überblick gegeben und später durch Einzelheiten ergänzt werden soll, oder ob ein anderes Linearisierungsschema verwendet wird. Dies macht es für den Rezipienten der Information schwierig, schnell die gewünschten Informationen zu bekommen. Ein Index kann helfen, die Suche in einem linearen Text zu

erleichtern, aber hier stellt sich wieder die Frage der Auswahl und der Detaillierung von Einträgen.

Die genannten Probleme entfallen bei einer graphischen Darstellung. Ihr großer Vorteil besteht darin, dass es dem Nutzer der Darstellung überlassen bleibt, welche Elemente der Graphik mit welcher Genauigkeit und in welcher Reihenfolge betrachtet werden. Graphiken sind ein räumliches Medium und als solche gut für die Repräsentation von räumlichem Wissen geeignet. Dies erleichtert nicht nur einem einzelnen Benutzer die Extraktion von Wissen, Graphiken können auch als Grundlage von Kommunikation und gemeinsamer Problemlösung genutzt werden. Es ist zum Beispiel einfach, in einem Gespräch bei gemeinsamer Betrachtung einer Karte auf besondere Punkte hinzuweisen oder die Aufmerksamkeit des Gegenübers auf einzelne Elemente der Darstellung zu lenken. Dieser kommunikative Aspekt spielt gerade für die Entwicklung multimodal-assistierter haptischer Graphiken eine wichtige Rolle, da in einem solchen System das assistierende System die Rolle des Kommunikationspartners übernimmt.

2.2.2 Linien-basierte Graphiken zur Darstellung der realen Welt

Linien-basierte Graphiken wie Karten zeichnen sich durch Vereinfachung gegenüber der durch sie dargestellten Welt aus. Am Beispiel der Land- oder Straßenkarten oder von Fahrplänen wird deutlich, welche Vorteile eine schematische Darstellung gegenüber einer realitätsgetreuen Darstellungen bringen kann. Nach Monmonier (1991) kann diese Vereinfachung genutzt werden um, gezielt ausgewählte Informationen zu transportieren. Tversky (2000) fasst diese Vorteile wie folgt zusammen:

2D-Darstellung: Graphiken an sich sind zweidimensional, trotzdem bieten sie die Möglichkeit zu einer perspektivischen Darstellung, diese wird jedoch häufig nicht gewählt; Inhalte werden in einer ausschließlich zweidimensionalen Anordnung dargestellt. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass dreidimensionale Diagramme schwieriger zu verstehen sind und somit größeren kognitiven Aufwand für den Benutzer der Graphik bedeuten, siehe Cooper (1989). Die zweidimensionale Darstellung führt gegenüber einer dreidimensionalen Darstellung zu einer kognitiven Entlastung für ihren Benutzer.

Weglassen von Informationen: Wird ein Ausschnitt der realen Welt dargestellt, wird in der Regel nur eine kleine Teilmenge der möglichen Informationen dargestellt. Welche Informationen erhalten bleiben und welche weggelassen werden, hängt vom Anwendungskontext der Graphik ab. Ein Stadtplan der jeden einzelnen Baum zeigt, ist zu detailliert, um zügig eine Route mit seiner Hilfe planen zu können; für einen Bodenplan zur fortwirtschaftlichen Nutzung wären diese Informationen jedoch angebracht.

Regularisierung: U-Bahnpläne sind ein gutes Beispiel dafür, dass graphische Abbildungen durch Regularisierung, die Vereinfachung von Formen, an Übersichtlichkeit und Benutzbarkeit gewinnen. Einzelne Verbindungen zwischen Stationen, oft auch ganze Zweige des Verkehrsnetzes werden als eine einzelne gerade Linie dargestellt. In der Tat ist der genaue Streckenverlauf für die Planung einer Route mit öffentlichen Verkehrsmitteln nicht wichtig und würde den Benutzer der Darstellung nur unnötig kognitiv belasten.

Inkonsistente Skalierung und Perspektiven: Die Skalierung und auch die Perspektive von einzelnen Teilen einer graphischen Darstellung können inkonsistent sein und damit zur Benutzbarkeit der Darstellung beitragen. Wieder sind Karten ein gutes Beispiel, in ihnen sind Verkehrswege als wichtig Bestandteile oft durch breite Linien dargestellt. Diese Breite entspricht proportional keineswegs der Breite der Straße im Vergleich zum Rest der dargestellten Umgebung. Die Breite wird so gewählt, dass die Straßen gut sichtbar und mit dem Auge verfolgbar sind, eventuell werden verschiedene Strichstärken oder Farben genutzt um unterschiedliche Straßentypen zu unterscheiden. Auch inkonsistente Perspektiven finden sich in Karten, deren Draufsicht auf die Umgebung mit der Darstellung einzelner Landmarken in einer frontalen Perspektive unterbrochen wird. Auch bei dieser Abweichung von einer realitätsgetreuen Darstellung steht die Nutzbarkeit im Vordergrund: Während eine Karte in Draufsicht zur Planung von Routen oder zum Gewinnen von Überblickswissen über eine Umgebung genutzt werden kann, werden Landmarken bei einer tatsächlichen Bewegung durch die Umgebung frontal gesehen, die perspektivisch falsche Darstellung in der Karte vereinfacht also das Wiedererkennen.

Auch wenn diese vereinfachenden und schematisierenden Abweichungen gegenüber des dargestellten Ausschnitts der realen Welt eine Konsequenz der technischen Realisierbarkeit des Mediums sind, dienen sie vor allem der besseren Benutzbarkeit der Abbildung. Eine Karte muss zum Beispiel auf kleinstem Raum viele Informationen präsentieren, einzelne Details müssen aber immer noch mit dem bloßen Auge erkennbar sein. Doch auch mit der Möglichkeit frei skalierbarer Satelliten-Fotos, ist es in der Regel einfacher, einen Weg auf einer Karte zu finden, welche Details wie Vegetation ausspart, vergleiche Abbildung 2.2.

Das Fazit dieser Überlegungen ist, dass schematische Darstellungen in bestimmten Anwendungsdomänen Vorteile gegenüber fotorealistischen Darstellungen haben. Sie sind keine Lösungen zweiter Wahl, wenn fotorealistische Abbildungen nicht möglich sind, sondern erleichtern Benutzern durch gezielte Vereinfachungen den Informationserwerb.

2.2.3 Linien-basierte Graphiken zur Darstellung abstrakter Konzepte

Die in einer Graphik dargestellten Informationen können räumlicher Natur sein, so wie zum Beispiel in einer Straßenkarte, welche einen Ausschnitt der Welt beschreibt. Sie können aber auch nur konzeptuell-räumliche (oder metaphorisch-räumliche) Zusammenhänge aufzeigen, so wie das *Steigen* und *Fallen* eines skalaren Wertes über einen Zeitverlauf. Abstrakte Konzepte wie Zeit, Zusammengehörigkeit, Temperatur, oder Geldsummen können durch räumliche Anordnungen übersichtlich repräsentiert und werden. Räumlichkeit dient dabei als eine Metapher um diese abstrakten Konzepte zu vermitteln, siehe Lakoff (2008). Nach Tversky werden die Vertrautheit des Betrachters mit räumlichen Repräsentationen und die erlernten Fähigkeiten im Umgang mit räumlichem Wissen auf einen abstrakten Gegenstandsbereich übertragen. Auch können nicht-räumliche Relationen durch weitere spezielle Symbole (in der Regel Pfeile oder ähnliche Verbindungen) in einer Graphik dargestellt werden.

Graphiken zur Darstellung abstrakter Konzepte wie zum Beispiel den Verlauf einer skalaren Größe in einem Linien-Graphen oder einem Ablauf in einem Diagramm sind in der Regel bereits von Natur aus schematisch, sie können also ohne weiteres als linien-basierte Graphik repräsentiert werden. Dies liegt im Gegensatz zur Schematisierung und Abstraktion bei der Abbildung von Ausschnitten der realen Welt daran, dass die dargestellten Informationen bereits schematisch sind. Zeigt ein Diagramm zum Beispiel die Verknüpfung von verschiedenen Software-Komponenten, so gibt es in dieser abstrakten Domäne keine naturgetreue Darstellung oder Anordnung der einzelnen Komponenten von der im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit abstrahiert werden könnte.

Es kann auch bei der graphischen Darstellung von abstrakten Informationen sinnvoll sein aus der Fülle der vorhandenen Informationen zu selektieren. Sollen beispielsweise in einem Linien-Graphen eine große Anzahl von Datenpunkten dargestellt werden, kann es sinnvoll sein, die entstehende Kurve zu glätten, um sie übersichtlicher zu gestalten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass schematische Darstellungen, wie linien-basierte Graphiken, sowohl für die Abbildung der realen Welt als auch für die Darstellung von abstrakten Zusammenhängen geeignet und relevant sind.

2.2.4 Relevanz der Anwendungsgebiete linien-basierter Graphiken für blinde Menschen

Für die Ersetzung der visuellen Wahrnehmung durch die haptische Wahrnehmung in virtuellen haptischen Umgebungen für blinde und sehbehinderte Menschen sind linien-basierten Graphiken besonders geeignet: In der virtuellen haptischen Substitution sind gestalterische Mittel eingeschränkt. Daher sind schematische Darstellungen deutlich besser umzusetzen und auch besser zu explorieren. Die Vorteile der bildhaften Darstellung als räumliches Medium lassen sich in die haptische Sinnes-Modalität übertragen. Diese modale Substitution wird ausführlich in Kapitel 3 beschrieben. Alle drei aufgezeigten Anwendungsgebiete für linien-basierte Graphen sind für blinde oder sehbehinderte Menschen relevant:

Karten ermöglichen unabhängige Mobilität. Gerade für blinde oder sehbehinderte Menschen ist die Nutzung von Karten ein besonders wichtiges Mittel, um sich auf Wege in unbekannte Umgebungen vorzubereiten. Während moderne Geoinformationssysteme die Produktion einer linearen Route zulassen, welche sich als Text vorlesen oder über eine Braille-Zeile vermitteln lässt, kann eine solche lineare Route kein Überblickswissen über eine Umgebung ermöglichen. Das selbständige Finden neuer Routen ist bei einer solchen Wegbeschreibung nicht möglich. Bei Abweichungen von der geplanten Route ist eine Orientierung ohne Überblickswissen schwierig. Gerade für blinde oder sehbehinderte Menschen ist Überblickswissen daher eine wichtige Hilfe in der alltäglichen Navigation. Arditi, Holmes und Reedijk (1999) haben in empirischen Studien den Vorteil interaktiver haptischer Karten gegenüber sprachlichen Routeninstruktionen nachgewiesen. In Studien mit blinden Versuchspersonen führte eine Vorbereitung mit interaktiven taktilen Karten zu signifikant

weniger Fehlern bei der späteren Navigation, als in der Kontrollgruppe mit mündlichen Routenbeschreibungen.

Linien-Graphen sind ein häufiger Typ von Illustrationen für den Verlauf numerischer Werte, welche in vielen Bereichen anzutreffen sind. Linien-Graphen sind eine wichtige Informationsquelle für viele Bereiche des gesellschaftlichen Lebens von Wissenschaft, über Wirtschaft bis hin zur Politik. Sjöström, Danielsson, Magnusson und Rasmus-Gröhn (2003) berichten, dass 71% der blinden Versuchspersonen, welche ein System zur Exploration haptischer Liniengraphen getestet haben, ein solches System gerne nutzen würden. Als Anwendungsgebiete wurden von den Testpersonen unter anderem soziologische Phänomene, Finanzdaten und Aktienkurse genannt.

Für die Vermittlung von Lerninhalten in der Schulgeometrie für blinde und sehbehinderte Menschen ist es ebenso wie für sehende Schüler wichtig, räumliche Anordnungen von geometrischen Elementen nutzen zu können. Entsprechendes Lehrmaterial für blinde und sehbehinderte Menschen ist in dieser Hinsicht sehr ähnlich zu dem sehender Schüler. Die bekannten visuellen Abbildungen sind durch haptische Realisierungen ersetzt, wobei im Wesentlichen die ansonsten visuell dargestellten Linien und Beschriftungen haptisch wahrnehmbar gemacht werden, siehe Hahn (2010). Diese Anwendungsdomäne für haptische Realisierungen von schematischen Darstellungen schafft einen relevanten Zugang zur mathematischen Bildung und legt somit Grundlagen zur Teilhabe an weiteren schulischen, wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Themen.

2.3 Geometrie als Grundlage von linien-basierten Graphiken

Bei den Analysen von Kartenskizzen (nach Tversky), Linien-Graphen (nach Kosslyn) und Illustrationen zur Schulgeometrie ist gezeigt worden, dass in allen drei Beispielen die graphischen Darstellungen aus einer beschränkten Menge von Elementen bestehen. Dabei werden einfache Elemente zu komplexeren Elementen kombiniert. Ein Element einer linien-basierten Graphik ist im Folgenden definiert als ein aus Linien oder Teilen von Linien gebildeter Teil einer linien-basierten Graphik. Hierzu zählen einfache geometrische Elemente wie Punkte, Linien zwischen Punkten und gekrümmte Linien, aber auch durch Komposition entstehende komplexeren Elemente wie Polygone und Linienzüge. Im Falle von Karten können dies Landmarken und komplexe Straßenzüge sein, bei Linien-Graphen kann es der komplexe Verlauf der Graphen-Linie sein und in der Geometrie unter anderem verschiedene geometrische Figuren wie Rechtecke oder Dreiecke.

Bei der Visualisierung von linien-basierten Graphiken, können gestalterische Mittel eingesetzt werden, um einzelne Elemente der Graphik deutlicher hervorzuheben, zu kennzeichnen oder die Zusammengehörigkeit von Elementen zu verdeutlichen. Zu den gestalterischen Mitteln gehören Farbe, Schraffur (Strichelung) und Strichstärke von Linien so wie Füllung von Flächen. Abbildung 2.8 zeigt eine entsprechend aufbereitete Variante der Abbildung 2.1 a), dickere Linien weisen auf Hauptstraßen, gestrichelte Linien auf Fußwege hin, die Rechtecke

welche Landmarken anzeigen sind farbig gefüllt, um sie besser vom Straßennetzwerk abzuheben.

Gestalterische Mittel können hilfreich sein um die Benutzbarkeit einer linien-basierten Graphik zu erhöhen und auch um kategoriale Information zu kommunizieren, wie in Abbildung 2.8 gezeigt.

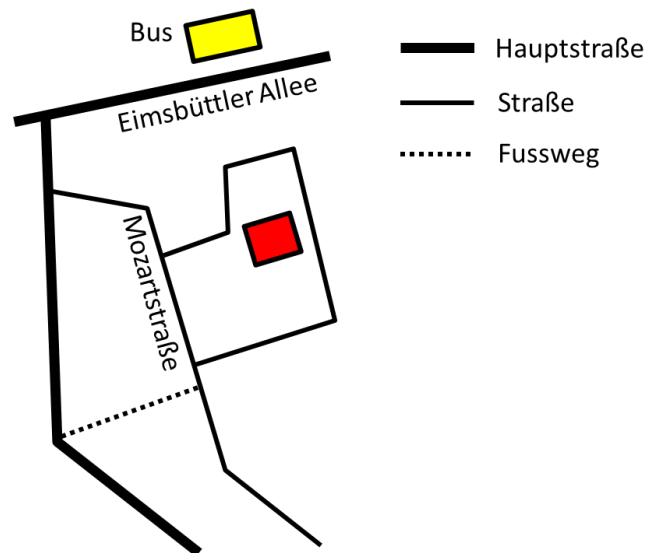


Abbildung 2.8: Gestalterisch aufbereitete Kartenskizze.

Fast man diese Analyse der drei untersuchten Anwendungsdomänen zusammen, so ergeben sich drei Bestandteile der graphischen Darstellung: Räumliche Informationen werden durch Linien dargestellt, sowohl sprachliche Label als auch nicht sprachliche Kennzeichnungen erläutern die räumlichen Informationen und erleichtern die Benutzung der Graphik.

Räumliche Informationen: Linien, offene und geschlossene Linienzüge und Punkte, an denen Linien aufeinander treffen, stellen in allen drei untersuchten Domänen die relevanten Elemente der graphischen Darstellungen dar. Diese Elemente sind rein geometrischer Natur und vermitteln ihre Informationen unabhängig von ihrer eigentlichen Visualisierung.

Sprachliche Label: Beschriftungen an Elementen können zusätzliche Informationen über die einzelnen Elemente beinhalten. Zu den Labels können sowohl kategoriale Informationen als auch Eigennamen gehören. In Abbildung 2.8 werden beide Varianten genutzt, so ist „Bus“ eine Kategorie-Bezeichnung für eine Landmarke während die „Mozartstraße“ ein Eigenname ist (der jedoch eine Kategorie impliziert).

Nicht sprachliche Kennzeichnungen: Kennzeichnung von Elementen durch Symbole oder visuelle Hervorhebung kann einerseits genau wie eine sprachliche Information Namens- oder kategoriale Informationen über Elemente vermitteln; es können aber auch besondere Elemente oder besondere Teile eines Elements hervorgehoben werden.

Tabelle 2.4 zeigt eine Analyse der drei Anwendungsdomänen entsprechend dieser drei Kategorien.

	Karten	Linien-Graphen	Geometrische Abbildungen
Geometrische Informationen	Verlauf und Position von Straßen Form und Position von Landmarken Verlauf von Routen	Verlauf der Graphen-Linie Achsen des Graphen (Framework nach Kosslyn (1989))	Punkte, Geraden, Strecken, Polygone, Berührungs- und Schnittpunkte von Geraden und Strecken, Ecken von Polygonen
Sprachliche Informationen	Namen von Straßen und Landmarken	Beschriftung der Achsen Beschriftung besonderer Punkte und Abschnitte	Benennung einzelner Elemente der Illustration, Angaben zu Längen und Winkeln
Nicht-sprachliche Kennzeichnungen	Hervorhebung von Landmarken,	Hervorhebung besonderer Punkte und Abschnitte	Hervorhebung einzelner Elemente der Abbildung

Tabelle 2.4: Analyierte der Anwendungsdomänen nach geometrischen Informationen, sprachlichen und nicht-sprachlichen Kennzeichnungen.

2.3.1 Perzeptualisierung von geometrischen Informationen mit sprachlichen und nicht-sprachlichen Kennzeichnungen

Die in diesem Kapitel gezeigten Beispiele linien-basierter Graphiken sind Visualisierungen von geometrischen Informationen mit sprachlichen und nicht sprachlichen Kennzeichnungen. Card (1996) schlägt im Kontext von multimedialen (multimodalen) Informationssystemen den Begriff der Perzeptualisierung von Daten vor. Perzeptualisierung bedeutet das Wahrnehmbarmachen von Informationen. Die Wahrnehmung von Informationen muss nicht zwingend in einer einzelnen Sinnesmodalität erfolgen. Mehrere Sinnesmodalitäten können kombiniert werden, um gegebene Daten für einen Benutzer zugänglich zu machen.

Für die Perzeptualisierung von räumlichen Informationen ist eine räumliche Sinnesmodalität geeignet. Sowohl visuelle als auch haptische Wahrnehmung erfüllt diese Eigenschaft. Sprachliche Informationen und nicht sprachliche Kennzeichnungen können visuell dargestellt werden, sie könnten aber auch zum Beispiel akustisch vermittelt werden, da sie nicht auf ein räumliches Medium angewiesen sind. Diese Austauschbarkeit von Sinnesmodalitäten und das Prinzip der Verteilung von Informationen auf verschiedene Sinnesmodalitäten wird im Rahmen der auditorisch assistierten haptischen Exploration genutzt, siehe Kapitel 4. Die vorangegangene Analyse stellt eine Grundlage für dar, welche Informationen sich wie auf welche Sinnesmodalitäten verteilen lassen. Tabelle 2.5 zeigt mögliche Verteilungen.

	Geometrische Informationen	Sprachliche Label	Nicht sprachliche Kennzeichnungen
Visuell	Visuelle Graphiken	Schrift	Gestalterische Mittel wie Farbe, Schraffur, Dicke von Linien
Auditorisch		Sprache	Sprache Tonsignale
Haptisch	Haptische Darstellungen	Blindenschrift	Haptische Effekte wie zum Beispiel Rauheit einer Oberfläche

Tabelle 2.5: Modalitätsspezifische Realisierungen von geometrischen Informationen, von Aufteilung der Elemente der analysierten Anwendungsdomänen nach geometrischen Informationen, sprachlichen und nicht-sprachlichen Kennzeichnungen.

2.4 Formales Modell linien-basierter Graphiken

Linien-basierte Graphiken umfassen eine Vielzahl von Anwendungsdomänen, trotzdem können sie auf ein Inventar von wiederkehrenden *Elementen* reduziert werden. Dies schafft die Möglichkeit, Schlüsse über linien-basierte Graphiken und ihre Exploration mit Mitteln der Wissensverarbeitung unabhängig von der Anwendungsdomäne der linien-basierten Graphik zu nutzen.

Ein *Element* einer linien-basierten Graphik ist definiert als ein in dieser Graphik dargestelltes Objekt. Dieses Objekt kann rein geometrischer Natur sein (eine Linie in der Graphik) oder innerhalb der Anwendungsdomäne eine Relevanz besitzen (eine Straße auf der Karte). Der Begriff des Elements ist unabhängig von der Interpretation in einer Domäne definiert. Dies hat den Vorteil, dass die Exploration einer linien-basierten Graphik sowohl in einem domänenspezifischen als auch einem allgemeinen Kontext beschrieben werden kann. Elemente einer linien-basierten Graphik sind (in der Regel) durch einen *geometrischen* und optional durch einen *sprachlichen* Anteil dargestellt.

Die geometrischen Anteile bestehen aus Linien und den aus ihnen abgeleiteten Elementen. Die *geometrischen Basiselemente* linien-basierter Graphiken sind *gerade* oder *gekrümmte Linien* in der Ebene. Aus diesen Linien können *komplexe geometrische Elemente* abgeleitet werden. Komplexe geometrische Elemente sind zum Beispiel (geschlossene) Linienzüge, Kreuzungspunkte und Abschnitte von Linien.

Nicht geometrische, sprachliche Objekte vervollständigen das Inventar und ermöglichen, eine Vielzahl von Anwendungsdomänen abzudecken. Sprachliche Elemente können als Beschriftungen (Label), Erläuterungen und Hinweisen zu graphischen Elementen auftreten.

Das formale Modell linien-basierter Graphiken hat die Zielsetzung ein domänenunabhängiges Rahmenwerk zur haptischen Exploration räumlich dargestellter Inhalte für blinde und sehbehinderte Menschen zu schaffen. Die untersuchten Anwendungsdomänen sind so gewählt, dass sie ein reichhaltiges und heterogenes Inventar an Elementen bieten. Das aus diesen Anwendungsdomänen abgeleitete formale Modell linien-basierter Graphiken ist eine plausible und einfach zu erweiternde Grundlage für konkrete Anwendungsdomänen.

2.4.1 Geometrische Elemente linien-basierter Graphiken

Linien-basierte Graphiken bestehen aus einem Inventar von Basis-Elementen. Durch die geometrische Anordnung zueinander und durch spezielles, domänenspezifisches Wissen werden weitere Elemente nach den Prinzipien der Teil- und Komplexbildung generiert.

Gerade oder gekrümmte Linien in der Ebene bilden das Grundelement linien-basierter Graphiken aus dem weitere Elemente abgeleitet werden. Als Teile von Linien gelten Punkte auf den Linien und Abschnitte von Linien, welche als Segmente bezeichnet werden. Komplexe erster Ordnung werden aus einer zusammenhängenden Menge von Segmenten gebildet. Komplexe zweiter Ordnung entstehen aus Menge von Komplexen der ersten Ordnung. Eine formale Definition dieser Elemente erfolgt in Kapitel 6. Tabelle 2.6 zeigt eine Übersicht der Elemente linien-basierter Graphiken.

Linie (gerade & gekrümmt)	Linien sind die Basiselemente linien-basierter Graphiken. Linien sind durch zwei Endpunkte begrenzt, sie können sowohl gerade als auch gekrümmt sein. Eine gerade Linie ist mathematisch eine Strecke, eine gekrümmte eine Kurve. Der Begriff Linie fungiert als Überbegriff für beide Typen.
Linien Abschnitt (Segment):	Abschnitte von Linien werden als Segmente bezeichnet. Segmente können entweder durch die geometrische Anordnung von Linien entstehen, wie zum Beispiel der Abschnitt einer Linie vor und nach dem Schnittpunkt mit einer anderen Linie, oder sie können durch nicht geometrische zusätzliche Informationen entstehen, wie zum Beispiel ein besonderer Bereich eines Linien-Graphen welcher manuell annotiert ist.
Geschlossene Segmentfolge	Transitiv zusammenhängende Mengen von Segmenten können Folgen bilden. Sind diese Folgen von Segmenten geschlossen, definieren sie eine Form. Im Fall von geraden Linien handelt es sich bei der Form um ein Polygon.
Offene Segmentfolge (nicht verzweigt)	Segmentfolgen können offen sein. Sind sie nicht verzweigt, bilden sie eine lineare Struktur.
Offene Linienfolge (verzweigt)	Verzweigte Segmentfolgen bilden eine nicht lineare Struktur.
Endpunkt einer Linie	Konfigurationspunkte liegen auf existierenden Linien, sie ergeben sich aus der geometrischen Anordnung von Linien. Hierzu gehört auch der Endpunkt einer

(Konfigurationspunkt)	Linie.
Punkt an dem Linien aufeinander treffen (Konfigurationspunkt)	Weitere Typen von Konfigurationspunkten ergeben sich aus dem Zusammentreffen von Linien. Sie können je nach Anzahl der zusammentreffenden Linien und ihrer Anordnung weiter unterschieden werden in: L-Punkt, T-Punkt, X-Punkt und Stern-Punkt.
Punkt auf Linie	Neben Konfigurationspunkten können auch Punkte auf Linien definiert werden, welche sich nicht aus der Anordnung der Linien selbst sondern aus zusätzlichen Informationen, wie einer manuellen Annotation, ergeben.

Tabelle 2.6: Übersicht der Elemente von linien-basierten Graphiken.

2.4.2 Elemente der linien-basierten Graphik in den Anwendungsdomänen

Im Folgenden wird gezeigt wie die in den weiter oben ausgeführten Analysen der Anwendungsdomänen identifizierten Elemente der graphischen Darstellungen auf die vorgeschlagenen Elemente linien-basierter Graphiken abgebildet werden können. Nicht jede Anwendungsdomäne nutzt dabei das volle Inventar linien-basierter Graphiken aus. Tabelle 2.7 zeigt die Zuordnung von Elementen der Anwendungsdomänen zu geometrischen Elementen der linien-basierten Graphik.

Element	Karte	Linien-Graph	Geometrie
Gerade Linie	-	Achsen (Framework)	Gerade
Gekrümmte Linie	-	Graphen-Linie	-
Segment	Teil einer Straße oder Landmarke	Abschnitt eines Graphen	Strecke
Geschlossene Linienfolge (gerade)	Landmarke	-	Polygon
Geschlossene Linienfolge (gekrümmt)	Landmarke	Komplexer Abschnitt eines Graphen	Weitere geometrische Figuren z.B. Oval
Offene Linienfolge (nicht verzweigt)	Straße	Graphen-Linie	-
Offene Linienfolge (verzweigt)	Netzwerk von Straßen		-
Endpunkt einer Linie	Sackgasse	Ende einer Graphenlinie	-
Konfigurationspunkt L-Punkt	Ecke	-	Ecke eines Polygons
Konfigurationspunkt T-Punkt	T-Kreuzung, Mündung	-	-

Konfigurationspunkt X-Punkt	X-Kreuzung	-	Schnittpunkt
Konfigurationspunkt Stern-Punkt	Mehrfach Kreuzung	-	-

Tabelle 2.7: Nutzung verschiedener Elemente linien-basierter Graphik zur Darstellung von Elementen der analysierten Anwendungsdomänen.

3 Virtuelle haptische Exploration von linien-basierten Darstellungen mit Force-Feedback-Geräten

3.1 Haptische Wahrnehmung als Substitution visueller Wahrnehmung für blinde oder sehbehinderte Benutzer

Linien-basierte Graphiken vermitteln räumliche Informationen durch eine Anordnung geometrischer Elemente. Das genutzte Medium für die linien-basierten Graphiken muss den (zweidimensionalen) räumlichen Charakter der Informationen unterstützen. Neben der visuellen Wahrnehmung erfüllt die haptische Wahrnehmung diese Eigenschaft. Es ist daher möglich, eine visuelle linien-basierte Graphik durch entsprechend gestaltete haptische Realisierungen zu ersetzen. Diese Ersetzung eines Sinneskanals durch einen anderen Sinneskanal wird als *sensorische Substitution* bezeichnet.

Sensorische Substitution wird genutzt, um das Fehlen oder eine Beeinträchtigung eines Sinneskanals zu kompensieren (Loomis 2002). Diese Substitution kann spontan in alltäglichen Situationen auftreten, wenn zum Beispiel ein Mensch nachts nach einem Lichtschalter tastet, den er bei Licht visuell finden würde. Für blinde oder sehbehinderte Menschen ist die sensorische Substitution der visuellen Wahrnehmung durch die auditive oder haptische Wahrnehmung eine systematisch genutzte Hilfe. So kann zum Beispiel geschriebener Text mittels einer Sprachsynthese vorgelesen oder in haptisch wahrnehmbarer Blindenschrift (Braille) dargestellt werden.

Das gleiche Prinzip der sensorischen Substitution kann verwendet werden, um die in Kapitel 2 eingeführten linien-basierten Graphiken haptisch wahrnehmbar zu machen. Das Ziel bei der sensorischen Substitution von der visuellen in die haptische Sinnesmodalität ist es, die Vorteile der räumlichen (zweidimensionalen) Darstellungen (siehe Kapitel 2) zu erhalten.

Für diese Substitution räumlicher visueller Wahrnehmung durch räumliche haptische Wahrnehmung können reale, haptisch wahrnehmbare Objekte benutzt werden, welche mit den Händen, genauer mit den Fingerspitzen ertastet werden. Abbildung 3.1 zeigt eine haptisch explorierbare Karte. Mit der Entwicklung spezieller haptischer Ein-/Ausgabegeräte, die als haptisches Interface zwischen Mensch und Computer fungieren, ist es aber auch möglich, nicht nur reale Objekte, sondern auch virtuelle Objekte, haptisch erkundbar zu machen. Virtuelle haptische Darstellungen ermöglichen, die Exploration des Benutzers automatisch zu beobachten und als Grundlage für multimodale Mensch-Computer-Interaktion zu nutzen.

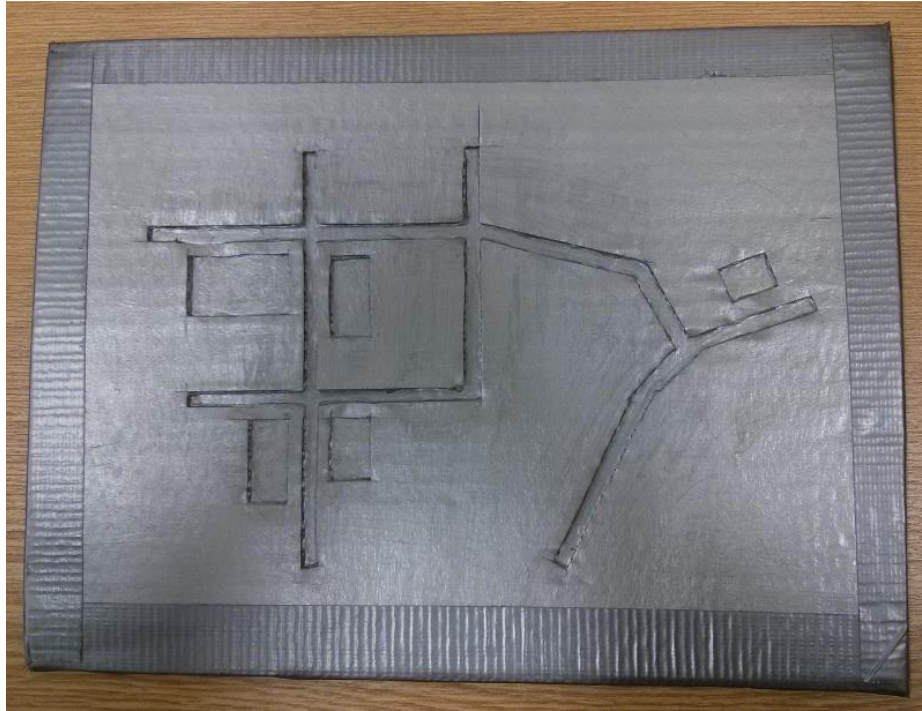


Abbildung 3.1: Haptische explorierbare Karte.
(Demonstrationsobjekt für haptische Exploration, Eigenanfertigung).

3.1.1 Haptische Wahrnehmung

Die haptische Wahrnehmung, oder auch Tastsinn, besteht physiologisch betrachtet aus zwei Subsystemen, der taktilen und der kinästhetischen Wahrnehmung, siehe Loomis und Lederman (1986). *Taktile Wahrnehmung* beschreibt Sinneseindrücke, die direkt durch Reizung von Rezeptoren in der Haut entstehen. Durch taktile Wahrnehmung kann zum Beispiel die Beschaffenheit einer Oberfläche, ein Buchstabe in Blindenschrift oder eine Vibration wahrgenommen werden. Diese Rezeptoren unterscheiden sich bezüglich des rezeptiven Feldes, das heißt der Größe des Bereiches in der Haut, welcher von einem Rezeptor abgedeckt wird, und ihrer Adaptionsrate, das heißt der Geschwindigkeit mit der Veränderungen wahrgenommen werden können. Die durch die Größe der rezeptiven Felder bestimmte räumliche Auflösung der taktilen Wahrnehmung hat nur beschränkt Auswirkung auf die Handhabung von Interfaces für virtuelle haptische Darstellung, da hier ein Zusammenspiel von taktiler und kinästhetischer Wahrnehmung und auch des verwendeten haptischen Gerätes notwendig ist. Die zeitliche Auflösung hingegen, welche bei einigen Rezeptoren bei bis zu 1000 Hz liegt (Drewing & Gießen, 2008), ist entscheidend für den subjektiven Eindruck virtueller haptischer Wahrnehmung: Diese Frequenz von Berechnungen für virtuelle haptische Umgebungen muss oberhalb dieser Schwelle liegen, damit virtuelle Objekte mit einer festen Oberfläche wahrgenommen werden können und der Eindruck von Vibration vermieden wird.

Kinästhetische Wahrnehmung beschreibt Sinneseindrücke, die durch Rezeptoren in Muskeln, Sehnen und Haut entstehen, siehe McCloskey (1978).³ Mittels kinästhetischer Wahrnehmung kann die Lage und Bewegungen des gesamten Körpers (zum Beispiel sitzend oder stehend) oder auch einzelner Körperteile wahrgenommen werden. Ein Beispiel für die kinästhetische Wahrnehmung ist es, mit geschlossenen Augen die Fingerspitzen zusammenführen.

Relevant für den Entwurf (virtueller) haptischer Darstellungen ist die anisotrope Natur der kinästhetischen Wahrnehmung der Hände (Ledermann & Klatzky, 2009). Winkel und Distanzen werden nicht im gesamten ertastbaren Bereich gleich wahrgenommen. Versuche zeigen, dass die Aufgabe Linien (bzw. linienartige Objekte) parallel anzuordnen systematische Verzerrungen beobachten lässt. Abbildung 3.2 zeigt eine vermeintlich parallele Anordnung von Stäben durch eine rechtshändige Person mit verbundenen Augen. Statt einer parallelen Anordnung der Linien findet sich eine zur rechten Schulter der Versuchsperson konzentrische Anordnung. Folge dieser systematischen Verzerrungen ist, dass eine haptische Darstellung als Substitution einer visuellen Darstellung zumindest in Bezug auf quantitative Eigenschaften unzureichend sein kann.

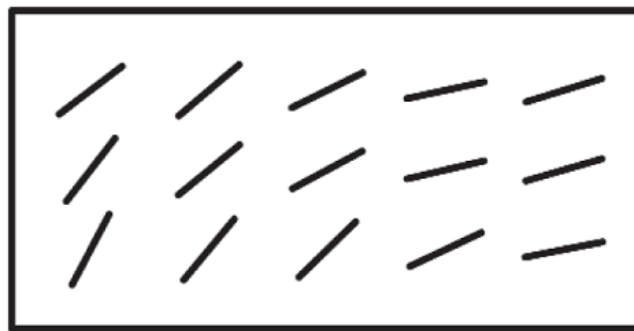


Abbildung 3.2: Vermeintlich parallele Anordnung in der haptischen Wahrnehmung aus Ledermann und Klatzky (2009).

3.2 Virtuelle haptische Umgebungen mit Force-Feedback-Geräten

Die Realisierung von haptisch explorierbaren linien-basierten Graphiken erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mittels Force-Feedback-Geräten in virtuellen haptischen Umgebungen. Diese Realisierung bringt den Vorteil, dass die haptische Exploration perzeptuell für das System, welches die virtuelle haptische Umgebung bereitstellt, gut zu beobachten ist. Hierdurch wird die Grundlage für eine multimodale Interaktion gelegt. (Siehe Kapitel 4.)

Neben Force-Feedback-Verfahren gibt es auch andere Realisierungsmöglichkeiten für haptische Exploration und Beobachtungsfähigkeit, die sich zwar zum Teil erheblich in der

³ Auch sogenannte efferente Kopien werden hierzu genutzt. Dies sind vereinfacht ausgedrückt, neuronale Signale, welche aus den motorischen Bereichen des Gehirns, direkt wieder in die Wahrnehmung des eigenen Körpers gespeist werden.

technischem Umsetzung unterscheiden, im Prinzip aber ebenso für eine beobachtbare und somit für multimodale Interaktion geeignete haptische Exploration von linien-basierten Graphiken eignen.

3.2.1 Konventionelle (physische) taktile Darstellungen

Generell kann unterscheiden werden nach virtuellen und konventionellen, ‚greifbaren‘ Realisierungen für haptische Repräsentationen. Konventionelle Realisierungen werden bereits sehr lange von blinden und sehbehinderten Menschen genutzt. Bei diesen taktilen Darstellungen kann es sich um Reliefs, geprägtes Papier oder Plastikfolien oder auch um Objekte wie Skulpturen handeln. Abbildung 3.1 zeigte bereits ein Beispiel für ein reales haptisch explorierbares Artefakt.

Die Vorteile der konventionellen, taktilen Darstellungen besteht darin, dass sie zum Teil einfach zu transportieren sind, nicht auf Geräte und technische Kenntnisse der Benutzer angewiesen sind und eine uneingeschränkte Exploration mit beiden Händen ermöglichen. Der Nachteil dieser permanenten Darstellungen besteht in ihrer oft geringen Verfügbarkeit. Es entstehen zum Teil hohe Kosten für das Material der Darstellungen selbst oder die Geräte zum Anfertigen der Darstellungen. Darüber hinaus sind oft langwierige Produktionsprozesse notwendig, in denen ein Experte eine visuelle Darstellung in eine haptische umwandelt, bevor sie genutzt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit besteht der entscheidende Nachteil dieser Darstellungen aber vor allem darin, dass eine Beobachtung der Exploration zur Nutzung im Rahmen einer multimodalen Interaktion nur mit zusätzlichen Systemen zur Beobachtung der Exploration möglich ist.

3.2.2 Andere virtuelle haptische Darstellungsverfahren

Virtuelle haptische Darstellungen sind erst mit leistungsstarken Computern und spezieller Hardware möglich geworden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Force-Feedback-Geräte zur Darstellung virtueller haptischer Umgebungen genutzt. Neben Force-Feedback gibt es noch andere Verfahren zur virtuellen haptischen Darstellung. Zum Teil befinden sich diese Ansätze noch in der Entwicklungsphase und sind noch nicht auf dem freien Markt erhältlich. Die Ansätze zeigen aber, dass auf dem Gebiet der haptischen Interaktion Entwicklungen zu erwarten sind.

Braille-Displays, oder Braille Arrays sind eine Weiterentwicklung der bereits seit geraumer Zeit im privaten Handel befindlichen Braille-Zeilen. Sie basieren auf einem Feld von kleinen Stiften, welche mechanisch aus einer perforierten Oberfläche gehoben werden können. Einzelne Elemente mit 2 mal 4 Stiften werden in Braille-Zeilen genutzt, um einzelne Zeichen darzustellen. Durch eine flächige Anordnung der Stifte ist es möglich, einfache Graphiken darzustellen. Vorteil eines Braille-Arrays ist die Möglichkeit der Exploration mit beiden Händen. Der Nachteil von Braille-Arrays besteht in einer geringen Auflösung. Außerdem ist eine Beobachtung der Exploration des Benutzers durch das Gerät nicht möglich, hierzu sind externe Mittel wie zum Beispiel eine Wärmekamera notwendig. Ein Prototyp eines Braille-Displays mit 64 mal 64 Stiften wurde von Shinohara, Shimizu und Mochizuki (1998) bereits

vor über einem Jahrzehnt entwickelt. Nach Kenntnis des Autors gibt es zum Zeitpunkt der Arbeit (2014) jedoch (immer noch) keine flächigen Braille-Displays im privaten Handel.

Vibro-taktile Schnittstellen: Vibro-taktile Schnittstellen stellen haptische Objekte durch Vibration dar. Eine einfache Realisierung stellen zweidimensionale haptische Graphiken dar, indem der Benutzer mit einem Finger eine Touch-Oberfläche exploriert, wobei Objekte dadurch dargestellt werden, dass das gesamte Gerät in Vibration versetzt wird. Eingeschränkt kann dieser Ansatz ohne weitere Hardwareanforderungen mit einem modernen Smartphone umgesetzt werden, auch wenn die Vibration hier nicht besonders stark und die Explorationsfläche klein ist.

3.2.3 Force-Feedback-Geräte

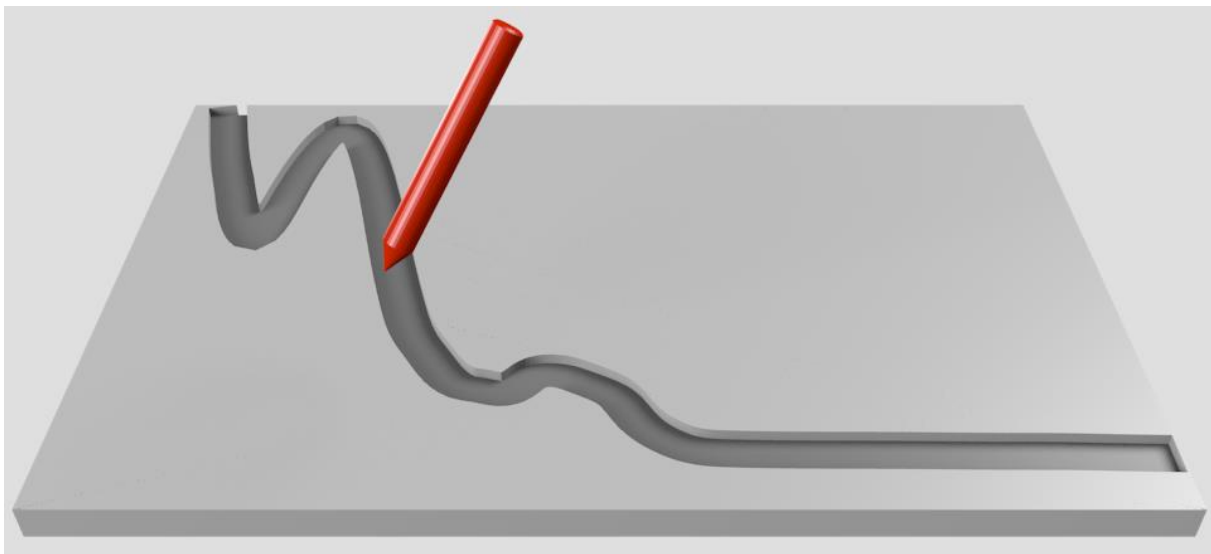


Abbildung 3.3: Stiftmetapher: Exploration eines haptischen Linien-Graphen mit einem Stift.

Force-Feedback-Verfahren beruhen auf dem Prinzip, dass ein starres Objekt bei Berührung durch ein anderes starres Objekt einen Widerstand (engl. Force-Feedback) erzeugt (Massie & Salisbury, 1994). Tastet man mit einem Stift in der Hand ein Objekt ab, kann dieser Widerstand gespürt werden. Abbildung 3.3 zeigt ein 3D-Modell eines haptischen Linien-Graphen welches mit einem Stift exploriert wird. In dem gezeigten Modell kann der Benutzer mit der Spitze des Stiftes die als Vertiefungen realisierten Linien abfahren und so die gezeigte linien-basierte Graphik erkunden. Force-Feedback-Geräte simulieren diese Interaktion von Stift und exploriertem Objekt. Der Benutzer führt dazu einen Stift in der Hand welcher an einem Roboter-Arm, der mit mehreren Motoren und Sensoren ausgestattet ist. Die Position und Lage des Stiftes wird genau erfasst und in eine virtuelle Umgebung übertragen, in der auch das zu explorierende Objekt, als ein 3D-Modell platziert ist. Die physische Interaktion zwischen dem virtuellen Stift und dem 3D-Modell wird berechnet, die dabei auftretenden Kräfte, welche am Stift wirken, werden durch die Motoren des Roboterarms für den Benutzer wahrnehmbar. Für den Benutzer fühlt es sich so an, als würde er mit dem Stift ein tatsächliches Objekt abtasten. Abbildung 3.4 zeigt dieses Prinzip im Detail: Die Spitze des

virtuellen Stiftes ist als eine virtuelle Kugel modelliert. Diese Kugel wird als haptischer Interfacepunkt (HIP) bezeichnet. Solange der HIP über der virtuellen Oberfläche ist, kann er frei im Raum bewegt werden (a) Durchdringt der HIP die Oberfläche des 3D-Modells, so wird eine Kraft berechnet und vom Gerät erzeugt, welche den Stift wieder aus dem Modell herausdrückt (c bis d). Je mehr Kraft der Benutzer aufwendet, desto größer ist auch die der Bewegung entgegenwirkende Kraft. Da die Berechnung der wirkenden Kräfte und die Steuerung der Motoren in einem Frequenzbereich stattfindet, welcher oberhalb der menschlichen taktilen Wahrnehmung liegt (1000 Hz) (Drewing & Gießen, 2008), kommt es zum Eindruck ein Objekt mit fester Oberfläche abzutasten, an dessen Oberfläche der Benutzer mit dem Stift entlangfahren kann. Dabei lassen sich verschiedene Parameter der Interaktion von Stift und Oberfläche, wie Gleit- und Haftreibung simulieren um ein angenehmes explorieren zu ermöglichen.

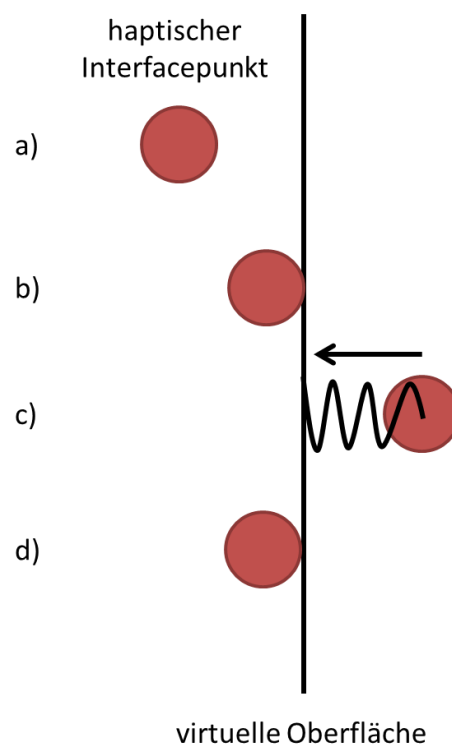


Abbildung 3.4: Berechnung von Force-Feedback. a) Der haptische Interfacepunkt (HIP) bewegt sich frei im Raum. c) bis d) Wenn der HIP die virtuelle Oberfläche durchdringt wird eine Kraft berechnet die den HIP wieder aus der Oberfläche herausdrückt.

Abbildung 3.5 zeigt eine Auswahl von haptischen Force-Feedback-Geräten. Der *Phantom Omni* eignet sich sehr gut für den Einsatz in empirischen Versuchen. Er liegt im mittleren preislichen Segment und zeichnet sich durch eine einfache Handhabung für den Benutzer aus. Die Roboterarme sind mit einer Federung ausgestattet, welche oberhalb einer Kraftschwelle nachgibt und so den Arm frei beweglich macht. Hierdurch behalten die zum Teil mit verbunden Augen und zum Teil blinden oder sehbehinderten Versuchspersonen jederzeit die volle Kontrolle über die Interaktion.

Eine deutlich stärkere Motorik besitzt der Roboterarm des *Phantom Desktop*. Dieses Gerät zeichnet sich durch einen größeren haptischen Arbeitsraum, eine bessere haptische Auflösung und letztendlich durch eine realistischere und härtere Darstellung virtueller Oberflächen aus. Aber es ist zu bedenken, dass ein kräftiger Roboterarm bei Benutzung ohne visuelles Feedback und durch Versuchspersonen, die gerade ihre ersten Erfahrungen mit diesen Geräten machen, nicht optimal ist, da die kräftigen Reaktionen des Gerätes einschüchternd wirken können. Der Phantom Desktop besitzt zudem einen deutlich höheren Anschaffungspreis (ca. 20.000 Euro) im Vergleich zum Omni, zeichnet sich aber auch durch eine höhere Lebensdauer aus.



Abbildung 3.5: Haptische Ein-/Ausgabegeräte: (von links nach rechts) Phantom Omni⁴, Phantom Desktop⁵ und Novint Falcon⁶.

Der *Novint Falcon* basiert auf einem anderen Roboterarm-Aufbau und lässt den Benutzer keinen Stift, sondern eine Kugel manipulieren. Diese Variante des haptischen Interfaces zeigt, dass bereits heute Geräte auf dem Markt sind, welche günstig zu erwerben sind und eine großen Anzahl von Benutzern Zugang zu virtuellen haptischen Simulation erlauben.

Tabelle 3.1 fasst die Eigenschaften der verschiedenen Geräte zusammen.⁷

⁴ Quelle: www.geomagic.com

⁵ Quelle: www.geomagic.com

⁶ Quelle: www.novint.com

⁷ Quelle für Technische Details sind die Webseiten der Hersteller: www.geomagic.com & www.novint.com

	Phantom Omni	Phantom Desktop	Falcon
Freiheitsgrade	6 (3 motorisiert)	6 (3 motorisiert)	3 (3 motorisiert)
Arbeitsbereich (B x H x T)	160 x 120 x 70 mm (Qualitätseinbußen in den Randbereichen)	160 x 120 x 120 mm	100 B x 100 x 100
Auflösung	450 dpi	> 1100 dpi	400 dpi
Maximale Kraft	3.3 N	7.9 N	8,9 N
Kosten	2.000 Euro	20.000 Euro	300 Euro

Tabelle 3.1: Vergleich von Force-Feedback-Geräten.

Force-Feedback-Computer-Mäuse und –Joysticks: Bei diesen Geräten handelt es sich um reguläre Computermäuse und Joysticks, die einen Widerstand (*force feedback*) gegen die Bewegung des Benutzers erzeugen können. Diese Geräte erlauben eine eingeschränkte haptische Exploration in einem zweidimensionalen Raum. Sie sind inzwischen zugunsten von 3D-Force-Feedback-Geräten mehr und mehr vom Markt verschwunden. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher mit der Bezeichnung *Force-Feedback-Gerät* ein Interface zur dreidimensionalen haptischen Exploration bezeichnet. Force-Feedback-Computer-Mäuse oder -Joysticks werden explizit als solche bezeichnet.

3.2.4 Vorteile virtueller haptischer Interfaces

Im Rahmen dieser Arbeit werden Force-Feedback-Geräte für die Realisierung virtueller haptischer Umgebungen genutzt. Die Nutzung von virtuellen haptischen Interfaces bietet sich aus mehreren Gründen an:

Erfassung der Exploration: Die haptische Exploration kann vom Gerät erfasst und für eine wissensbasierte Ereigniserkennung als Grundlage einer multimodalen Interaktion genutzt werden.

Erweiterung bestehender Computerarbeitsplätze: Für blinde Menschen kann die Nutzung von Computern über spezielle Hard- und Software wie Braille-Zeilen oder Sprachausgabe mittels eines Screenreaders realisiert werden. Spezielle Hardware kann die fehlende visuelle Wahrnehmung zum Teil kompensieren. Haptische Interfaces können als eine Erweiterung bereits vorhandener Arbeitsplätze genutzt werden.

Schnelle und automatische Erstellung haptischer Repräsentationen: Virtuelle haptische Repräsentationen können schnell und zum Teil automatisch erstellt werden, es entstehen keine Materialkosten hierfür. Virtuelle haptische Repräsentationen können sehr schnell über das Internet ausgetauscht werden und müssen nicht erst auf dem Postweg zugestellt werden.

Unter den virtuellen haptischen Darstellungsverfahren ist Force-Feedback ein bewährtes Verfahren für das ausgereifte Geräte und Softwarerahmenwerke existieren. Speziell der Phantom Omni wird von verschiedenen Forschungsgruppen eingesetzt, siehe Kapitel 4.

3.2.5 3D-Modelle für haptische linien-basierte Graphiken

3D-Modelle für haptische linienbasierte Graphiken sollen es dem Benutzer ermöglichen, in einer virtuellen haptischen Umgebung Netzwerke von Linien zu explorieren. Der Benutzer soll einzelnen Linien folgen und ihre Lage, Form und Länge wahrnehmen können. Generell gibt es in der Literatur den Konsens, Linien als Vertiefungen und nicht als Erhöhungen zu modellieren (Sjöström, Danielsson, Magnusson & Rasmus-Gröhn, 2003). Die haptische Exploration von erhöhten Bereichen ist deutlich erschwert, da der haptische Interfacepunkt an den Kanten der Erhöhungen leicht in die leere Ebene abrutschen kann. Effizienter ist es Linien als *Rillen* oder als (Innen-) *Kanten* umzusetzen. Abbildung 3.5 b) zeigt eine Rille, die wie eine Gravur in die Oberfläche einer virtuellen haptischen Umgebung eingelassen ist. Der Benutzer folgt dieser Rille mit dem virtuellen haptischen Interfacepunkt wie mit einer Kugel die in einer Rille läuft. Je nach Form-Profil der Rille ist es unterschiedlich schwierig die Rille absichtlich oder zufällig zu verlassen. Eine einseitig permeable Ebene über der Rille kann dazu genutzt werden, ein Verlassen der Rille gänzlich zu verhindern. Wird eine Linie als Kante umgesetzt, folgt der Benutzer bei der Exploration der Innenkante, dabei kann er die Kante jedoch in eine Richtung ohne Widerstand verlassen, was bei der Exploration von begrenzten Flächen gewünscht sein kann. Aufbau und Erstellung von 3D-Modellen für die haptische Exploration von linien-basierten Graphiken wird ausführlich im dritten Teil der Arbeit beschrieben.

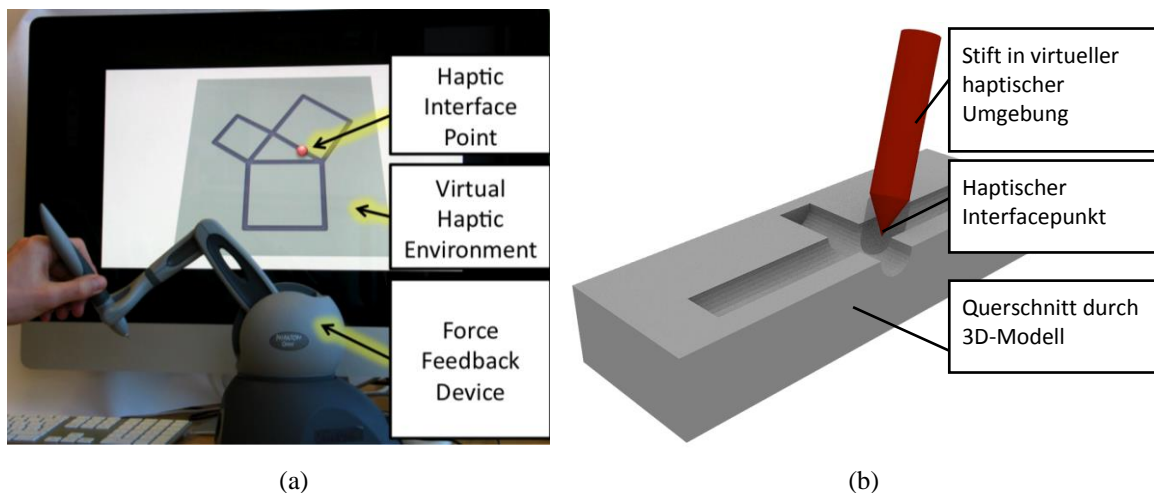


Abbildung 3.5. (a) Phantom Omni und Visualisierung einer haptischen Exploration.
 (b) Querschnitt eines 3D-Modells einer linien-basierten Graphik.

3.3 Grenzen der modalen Substitution von visuellen linien-basierten Graphiken mit Force-Feedback-Verfahren

Haptische Wahrnehmung kann genutzt werden, um die visuelle Wahrnehmung zu substituieren. Diese Substitution hat allerdings ihre Grenzen, das heißt nicht alle Informationen die in einer visuellen linien-basierten Graphik enthalten sind, können in gleicher Qualität, Genauigkeit oder Geschwindigkeit vom Benutzer einer haptischen Abbildung aufgenommen werden. Einige Informationen können gar nicht dargestellt werden. Um diesen Nachteil im Rahmen einer multimodalen Interaktion kompensieren zu können, müssen die Defizite bei der haptischen Exploration von linien-basierten Graphiken mit Force-Feedback-Verfahren identifiziert werden:

3.3.1 Lokale Wahrnehmung

Die Wahrnehmung der Linien erfolgt durch Bewegung entlang von Rillen oder von Außenkanten. Haptische Perzeption ist lokal. Es wird immer nur ein Teil einer Linie oder ein Punkt, an dem mehrere Linien aufeinandertreffen, exploriert. Einzelne Linien bilden die Grundelemente des Wahrgenommenen, welche sequenziell exploriert werden müssen und dann zu einem kohärenten Modell zusammengesetzt werden. Der lokale Charakter der Exploration bringt gegenüber einer visuellen Exploration Nachteile, die sowohl das aktuell explorierte Element der linien-basierten Graphik, die Peripherie des explorierten Objektes und den Gesamtüberblick betreffen, siehe Abbildung 3.6.

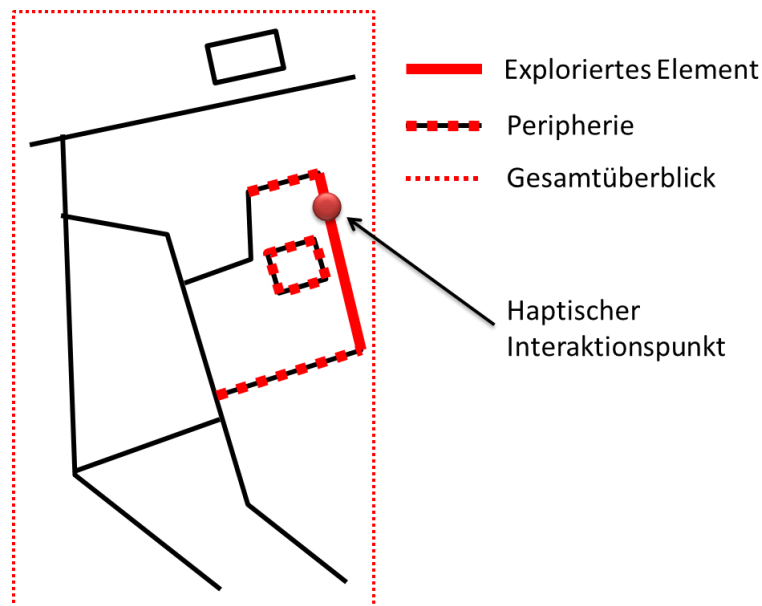


Abbildung 3.6: Haptisch exploriertes Objekt, Peripherie und Gesamtüberblick.

Schwierigkeiten bei der Exploration eines einzelnen Elementes: Die lokale Perzeption erschwert bereits die Exploration eines einzelnen Elementes: Zunächst muss jede einzelne Linie, die Teil eines Elementes ist exploriert werden, das Explorierte muss dann mental

zusammengesetzt werden. Während in einer visuellen Graphik zum Beispiel ein (rechtwinkliges) Dreieck sofort von einem Quadrat zu unterscheiden ist, kann es in der haptischen Exploration vorkommen, dass dieser Unterschied erst im Laufe der Exploration deutlich wird.

Der fehlende lokale Überblick erschwert es auch individuelle Elemente einer linien-basierten Graphik zu differenzieren: Während ein Dreieck und Quadrat im Laufe der Exploration unterschieden werden können, ist es deutlich schwerer, zum Beispiel ein kleines und ein etwas größeres Dreieck zu unterscheiden oder zwei Stellen im Graphen anhand des genauen Kurvenschwunges zu differenzieren.

Fehlender Überblick über die Peripherie des explorierten Elementes: Nicht nur der Überblick über die gesamte Graphik und das gerade explorierte Element der linien-basierten Graphik fehlen bei der haptischen Exploration, auch der Überblick über die Umgebung des aktuell explorierte Elements fehlt. Diese fehlende Sicht auf die Peripherie macht es schwer das aktuell explorierte Objekt in einen Kontext einzuordnen. So ist zum Beispiel bei der Exploration einer Karte nicht klar, ob in unmittelbarer Nähe eines explorierten Straßenabschnitts eine Kreuzung oder eine Landmarke liegt. Hierdurch können wichtige Details übersehen werden und die Planung der weiteren Exploration erschwert werden. Will der Explorierende erfahren, was sich in der Peripherie eines Elements befindet, so muss er dessen Umfeld systematisch absuchen.

Der fehlende Überblick über die Peripherie erschwert die Identifikation individueller Elemente einer linien-basierten Graphik, da diese nicht im Kontext ihrer unmittelbaren Umgebung wahrgenommen werden können.

Fehlender Gesamtüberblick: Durch die lokale Perzeption fehlt dem Benutzer der globale Überblick über die explorierte linien-basierte Graphik. Bei einer visuellen Betrachtung einer Graphik, kann der Betrachter schnell einen Gesamteindruck der Graphik erlangen und einen Überblick über Art und Anzahl der dargestellten Elemente erhalten. Wieder erschwert dies die Identifikation individueller Elemente durch ihre Lage innerhalb der Darstellung.

3.3.2 Einschränkung des Darstellungsumfangs

Gegenüber einer visuellen Graphik ist der Darstellungsumfang einer haptischen linien-basierten Graphik beschränkt:

Fehlende Text-Informationen: Schrift kann in den virtuellen haptischen Umgebungen, die Force-Feedback-Geräte bieten, nur mit sehr hohem Explorationsaufwand für den Benutzer umgesetzt werden. Fehlende Label-Informationen über Elemente der linien-basierten Graphik, das können je nach Anwendungsdomäne Straßennamen, Bezeichnungen von Abschnitten eines Graphen, U-Bahnstationen, etc. sein, lassen sich nicht aus der linien-basierten Graphik durch Exploration erschließen. Sie sind aber für die Nutzung einer linien-basierten Graphik oft essentiell, da sie einen Zusammenhang zwischen abgebildeten und realen Objekten der Anwendungsdomäne herstellen. Zudem erschwert bereits der lokale

Charakter der haptischen Exploration die Identifikation von individuellen Elementen einer linien-basierten Graphik, ohne Label-Informationen kann dies nicht kompensiert werden. Auf Grund fehlender Text-Informationen ist auch die Darstellung zusätzlicher oder erläuternder Texte, welche in visuellen Graphiken üblich sind, nicht möglich.

Eingeschränkte Gestaltungsmöglichkeiten: Gegenüber visuellen graphischen Darstellungen sind die Gestaltungsmöglichkeiten bei haptischen linien-basierten Graphiken eingeschränkt. So können weder Farbe noch Texturen oder andere Effekte zur graphischen Differenzierung oder Hervorhebung von Elementen genutzt werden. Dies schränkt die mögliche Komplexität der Inhalte ein. Zusammen mit dem fehlenden Überblick (s.o.) erschweren fehlende Gestaltungsmöglichkeiten die schnelle Identifikation von Elementen einer linien-basierten Graphik.

Beschränkte Größe des haptischen Arbeitsraumes: Der haptische Arbeitsraum wird durch die genutzten Geräte limitiert. Bei Versuchen mit dem Phantom Omni (Lohmann, Kerzel & Habel, 2012; Alaçam, Habel & Acartürk, 2013) wurde die linien-basierte Graphik zum Beispiel auf einer waagerechten Ebene dargestellt, deren Abmessungen aus technischen Gründen etwa 2/3 des vollen haptischen Arbeitsraumes entsprechen⁸. Hieraus ergibt sich eine doppelte Einschränkung gegenüber der visuellen Repräsentation: Der (genutzte) haptische Arbeitsraum ist im Vergleich zu einer visuellen Repräsentation begrenzt; zusätzlich können Elemente weniger gut differenziert werden, was wiederum eine geringere Komplexität der gesamten Darstellung erfordert.

3.3.3 Ungenauigkeit der Haptischen Wahrnehmung

Die haptische Wahrnehmung der Hände ist anisotrop. Distanzen und Winkel werden in Abhängigkeit von der Position der Hände unterschiedlich wahrgenommen, siehe Abschnitt 3.1.1. Die Ungenauigkeit der haptischen Wahrnehmung kann zu einem fehlerhaften Verständnis räumlicher Relationen und ebenso ungenauem Verständnis quantitativer Informationen führen.

3.3.4 Kognitive Belastung

Bis jetzt wurden perzeptuelle Einschränkungen der haptischen Substitution genannt – einige Möglichkeiten visueller Darstellungen werden ausgeschlossen (z.B. Label), anderen Problemen kann durch eine sorgfältige Exploration entgegengewirkt werden. Aber eine sorgfältige Exploration ist zeitaufwändig und stellt eine hohe kognitive Anforderung an den Benutzer. Zwar kann die genaue Form und Lage eines jeden Elements einer linien-basierten Graphik sequentiell erkundet werden, aber der Benutzer muss all diese Informationen im Gedächtnis behalten und zu einem Gesamtmodell integrieren. Dies ist ein aufwändiger und fehleranfälliger Prozess. Dieses Prinzip der Konzeptualisierung räumlichen Wissens aus einzelnen lokalen Anordnungen entspricht dem Prinzip der mentalen Kollage nach Tversky

⁸ Je nach verwendetem Force-Feedback-Gerät kommt es in den Randbereichen des haptischen Arbeitsraumes vermehrt zu Fehlern in der haptischen Simulation.

(1993). Bei dem mentalen Zusammensetzen aller Teile einer größeren räumlichen Darstellung können Fehler bei der Integration lokalen Wissens auftreten.

3.3.5 Ergonomie

Die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Force-Feedback-Geräte erfordern eine freie Bewegung eines Stiftes im Raum. Anders als bei einem Stift auf Papier oder einer Computermaus liegt dabei die führende Hand nicht auf einer Unterlage auf, das Handgelenk wird nicht unterstützt. Es kann bei längerer Nutzung entsprechender Geräte zu Ermüdungserscheinungen der Benutzer kommen. Spezielle Haltungen und ergonomische Polster können genutzt werden, um die haptische Interaktion angenehmer zu gestalten.⁹

3.3.6 Fazit

Eine modale Substitution von einer visuellen zu einer haptischen Darstellung einer linienbasierten Graphik ist möglich, bringt aber Nachteile mit sich: Einige Informationen lassen sich haptisch gar nicht (Schrift), ungenau (räumliche Relationen, quantitative Werte) oder nur mit erhöhtem Zeitaufwand (Identifikation, Übersicht) vermitteln. Zudem dürfen haptische linien-basierte Graphiken nicht übermäßig komplex sein und sollten zügig exploriert werden um den Benutzer nicht übermäßig (vor allen mental) zu belasten.

Trotzdem sind bildhafte Darstellungen in einigen Bereichen rein schriftlichen Darstellungen überlegen (siehe Kapitel 2). Eine Lösung ist es, die Nachteile der haptischen Wahrnehmung durch multimodale Interaktion (zumindest zum Teil) zu kompensieren. Ein weiterer Sinneskanal kann genutzt werden, um Informationen zu transportieren, die nicht oder schwierig haptisch vermittelt werden können. Die multimodale Interaktion sollte dabei so gestaltet sein, dass sie zügig und begleitend zur eigentlichen haptischen Exploration stattfindet, ohne von der Exploration abzulenken. Die Nutzung des auditiven Sinneskanals für diese Aufgaben wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

⁹ Quelle für diese Aussage sind praktische Erfahrung bei der Durchführung von Versuchen.

4 Multimodale Substitution & Audiohaptik

Ziel der Forschung an multimodal assistierten haptischen linien-basierten Graphiken ist es, einen Ersatz für die visuelle Betrachtung von linien-basierten Graphiken zu finden. Die in Kapitel 3 vorgestellten haptischen Realisierungen von linien-basierten Graphiken unterliegen einigen Einschränkungen (siehe Abschnitt 3.3). Eine Lösung ist die Ergänzung der Interaktion durch eine auditive Komponente, welche die Nachteile der haptischen Wahrnehmung kompensiert. Hieraus ergibt sich eine komplexe multimodale Interaktion: Der Benutzer exploriert eine linien-basierte Graphik in einer virtuellen haptischen Umgebung, hierdurch nimmt der Benutzer geometrische Informationen über die linien-basierte Graphik wahr. Gleichzeitig kann die Exploration von einem assistierenden System beobachtet und als Eingabe für die Generierung von Assistenz genutzt werden. Der Benutzer erhält somit Informationen über die linien-basierte Graphik auf zwei verschiedenen Wegen: Erstens durch die haptische Exploration und zweitens durch die auditorische Assistenz. Abbildung 4.1. zeigt diesen Vorgang.

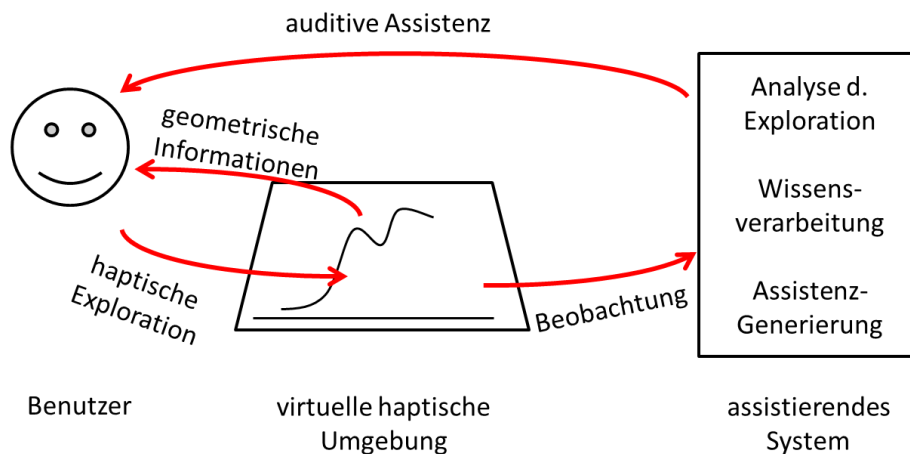


Abbildung 4.1: Interaktion von Benutzer und assistierendem System.

Diese audiohaptische Interaktion kann darin variieren, welche Arten von Assistenz gegeben werden und wann diese Assistenzen gegeben werden. Verschiedene Grade an Interaktion zwischen System und Benutzer und Autonomie des assistierenden Systems sind möglich. Diese Interaktivität und die Autonomie des assistierenden Systems zu realisieren setzt voraus, dass die Exploration des Benutzers vom assistierenden System analysiert werden kann. Dazu müssen einzelne Explorationsereignisse im Kontext der linien-basierten Graphik erkannt und als Grundlage für eine multimodale Interaktion genutzt werden können.

4.1 Arbeitsteilung von Sinnesmodalitäten

Die verschiedenen Sinne des Menschen arbeiten hochgradig parallel um mit einer komplexen Umwelt zu interagieren. Dabei werden die unterschiedliche Sinne arbeitsteilig genutzt: Das heißt die Sinne nehmen gleichzeitig verschiedene Informationen auf oder auch eine einzelne Informationen wird mit zwei Sinnesmodalitäten gleichzeitig wahrgenommen, um somit die Genauigkeit der Wahrnehmung zu verbessern.

Ein Beispiel für eine arbeitsteilige Wahrnehmung verschiedener Informationen ist ein Gespräch von Angesicht zu Angesicht. Auditiv wird die Sprache des Gegenübers wahrgenommen, während Mimik und Gestik visuell erfasst werden. Das Gesprochene kann womöglich erst in Kontext von Mimik und Gestik korrekt verstanden werden, etwa wenn das Gegenüber Ironie nutzt. Ein Beispiel für eine multimodale Integration berichten Stein und Arigbede (1972): Versuchstiere in einem Dunkelkammer-Versuch mitteln die räumlichen Positionen von einem Licht und einem gleichzeitig auftretenden Tonsignal, sofern sie gelernt haben, dass diese beiden Signale für gewöhnlich vom gleichen Ort ausgehen.

Die Kombination verschiedener Sinne funktioniert nicht nur, wenn es um die Wahrnehmung eines einzelnen Individuums oder Objektes geht, sondern auch in komplexen Szenarien. So kann beispielsweise ein Fußballspiel visuell betrachtet und ein Kommentator gehört werden, der Geschehnisse beschreibt, die momentan nicht im Blickwinkel der Kamera sind.

Diese Beispiele zeigen, dass das Gehirn gleichzeitig auftretende Sinneseindrücke in verschiedenen Modalitäten verarbeiten kann. Die Nutzung eines Sinneskanals blockiert nicht die Nutzung eines anderen Sinneskanals. In der Kognitionspsychologie wird dieser Effekt dadurch begründet, dass verschiedene Sinneskanäle als teilautonome Module arbeiten (Anderson, 2007). Jeder Sinn besitzt eigene vorverarbeitende Komponenten, die bis zu einem gewissen Grad parallel arbeiten können. Eingehende Informationen unterschiedlicher Sinneskanäle werden unabhängig voneinander vorverarbeitet und später miteinander integriert.

Durch die parallele Verarbeitung ergänzen sich die Sinneskanäle nicht nur arbeitsteilig, sondern jeder Sinneskanal kann auch mit den Informationen versorgt werden, welche mit ihm besonders gut zu verarbeiten sind. So kann ein Fernsehbild die räumliche Anordnung von Spielern auf einem Spielfeld und ihre Veränderungen gut darstellen (es wäre sehr schwierig, dies in gleicher Genauigkeit sprachlich zu beschreiben), während ein Kommentator zum Beispiel Hintergrundinformationen über einzelne Spieler berichtet, was wiederum schwierig in Bilder zu fassen wäre.

Das Prinzip der Arbeitsteilung hat aber auch Grenzen. Obwohl Teile der modalspezifischen Verarbeitung parallel und unabhängig voneinander ablaufen, kostet die finale Integration einen kognitiven Aufwand. Studiert eine Versuchsperson zum Beispiel eine Landkarte, um einen komplizierten Weg zu suchen (egal ob visuell oder haptisch) und jemand gibt andauernd korrekte, aber nicht der Sache dienliche Hinweise zu der Umgebung, würde dies die Aufgabe

eher erschweren als erleichtern. Bei einem multimodal assistierendem System muss also sehr gründlich ausgewählt werden, wann und welche Assistenzen gegeben werden.

Dieses Prinzip der Arbeitsteilung der Modalitäten funktioniert nicht nur in der Kombination zwischen visuellem und auditorischem Sinn. Auch der haptische Sinn kann mit dem auditorischen Sinn kombiniert werden. Genau wie beim visuellen Sinn sind die entsprechenden Systeme zur Vorverarbeitung im Gehirn voneinander getrennt.

4.2 Audio-Haptik

Haptische Repräsentationen mit auditiven Informationen anzureichern, folgt dem Prinzip der modalen Arbeitsteilung und kann die Nachteile der rein haptischen Exploration gegenüber der visuellen Wahrnehmung kompensieren. Dabei sind grundlegende Unterschiede zwischen den Modalitäten zu beachten: Eine haptische Repräsentation ist ein statisches Medium¹⁰, die Repräsentation ist über die Zeit konstant. Unabhängig davon wie komplex eine linien-basierte Graphik ist, kann der Benutzer sich entscheiden, mit welchem Umfang und mit welcher Geschwindigkeit er die linien-basierte Graphik erkundet.

Eine auditive Assistenz hingegen ist zeitlich verortet. Der auditorische Kanal ist sequentiell, es kann immer nur eine verbale Assistenz zurzeit gegeben werden. Während diese Assistenz gegeben wird, muss der Explorierende ihr seine Aufmerksamkeit widmen, wenn er die Information nutzen möchte. Hier liegt eine Kernherausforderung des Rahmenwerkes zur multimodalen Assistenz bei haptischer Exploration: Es muss ausgewählt werden, wann welche Assistenz am nützlichsten ist.

4.2.1 Sonifikation – Nicht-sprachliche auditorische Assistenz

Eine einfache Variante der auditorischen Assistenz ist das Abspielen nicht-sprachlicher Tonsignale. Bei dieser *Sonifikation* (Hermann & Hunt, 2005) können sowohl kurze prägnante Tonsignale als auch langanhaltende, entweder musikalische oder modulierte (Barras & Kramer, 1999) Töne genutzt werden. Sonifikation zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

Prägnanz: Nichtsprachliche Signale können wesentlich kürzer als ein gesprochener Satz sein. Ein kurzer Signal-Ton kann einem Benutzer einen schnellen Hinweis in einer zeitkritischen Situation geben. Ein kurzer Ton kann zum Beispiel darauf hinweisen, dass der Benutzer jetzt gerade mit dem haptischen Interaktionspunkt die Kreuzung zweier Linien passiert, und somit die Möglichkeit zum Wechsel der explorierten Linie hat. Zudem ist es, anders als bei sprachlichen Assistenzen, nicht notwendig, Äußerungen auf Wort- oder Satzebene zu planen.

¹⁰ Virtuelle haptische Repräsentationen können auch veränderbar gestaltet werden. Von dieser Option wird aber im Rahmen der Arbeit kein Gebrauch gemacht, da dies die Exploration unnötig erschweren würde.

Ein haptischer Effekt oder ein Tonsignal kann zu einem beliebigen Zeitpunkt unterbrochen werden.

Analoge Modulation: Ein Tonsignal oder ein haptischer Effekt kann analog moduliert werden, das heißt seine Lautstärke, Tonhöhe oder eine andere Eigenschaft wird in Abhängigkeit von einem skalaren Wert verändert. Ein langanhaltender Ton kann zum Beispiel mit der aktuellen Höhe eines explorierten haptischen Linien-Graphen moduliert werden.¹¹

Keine sprachlichen Information: Ein wesentlicher Nachteil ist, dass Sonifikation keine fehlenden sprachlichen Informationen, wie Label-Informationen (siehe Abschnitt 3.3), ausgleichen kann. Relevante Informationen, die gerade durch die Nutzung multimodaler Assistenz vermittelt werden soll, bleiben dem Benutzer vorenthalten.

Lernaufwand und beschränktes Inventar: Die Benutzung einer virtuellen haptischen Gerätes benötigt Einarbeitungszeit, das Prinzip ist den meisten Benutzern aber durch die Stift-Metapher (siehe Abschnitt 3.2.3) leicht verständlich zu machen. Ebenso selbsterklärend können sprachliche Assistenz gestaltet werden. Die Bedeutung von verschiedenen durch Sonifikation genutzten Tonsignalen muss hingegen erst erlernt werden. Verbunden mit diesem Lernaufwand ist eine notwendige Beschränkung des Inventars nicht-sprachlicher Assistenz. Die Nutzung zu vieler und zu ähnlicher nicht-sprachlicher Signale kann den Benutzer überfordern.

Für audiohaptische linien-basierte Graphiken eignet sich Sonifikation nur beschränkt, da gerade sprachliche Informationen in der auditorischen Modalität vermittelt werden sollen. Daher wird im Folgenden auf die Nutzung von Sprache als Assistenz während der haptischen Exploration fokussiert.

4.2.2 Sprachliche auditorische Assistenz

Sprachliche auditorische Assistenz kann beliebige sprachliche Informationen vermitteln, dazu gehören nicht nur Label-Informationen welche in der haptischen Modalität nicht zu vermitteln sind, sondern auch beliebige räumliche Relationen oder weitergehende domänenspezifische Informationen. Im Folgenden werden vier verschiedene Kategorien von auditiver Assistenz vorgestellt. Sie können eine Vielzahl von hilfreichen Informationen liefern, sowohl über das, was der Benutzer unmittelbar exploriert, als auch über das Umfeld der Exploration. Welche sprachlichen Informationen gegeben werden können und sollten, hängt stark von der Anwendungsdomäne und der Erfahrung, den Vorlieben und Zielen des Benutzers ab. Die folgende Kategorisierung zeigt verschiedene Möglichkeiten für assistierende Äußerungen auf und gibt an, wann eine solche Äußerung im Verlauf einer Exploration hilfreich sein könnte. Diese Angaben zeigen, dass es von komplexen Bedingungen abhängen kann, wann eine Assistenz sinnvoll ist.

¹¹ Eine solche Sonifikation wurde in einem studentischen Projekt für Linien-Graphen umgesetzt. Siehe Abschnitt 4.2.2.5 für die Vor- und Nachteile von Sonifikation.

4.2.2.1 Label-Informationen

Als Label-Information werden Typ-Bezeichnungen und Eigennamen zusammengefasst, die in visuellen Darstellungen entweder auf einen Blick zu erkennen sind, sich aus gestalterischen Mitteln erschließen lassen, oder als Beschriftungen an Elementen einer Graphik befinden.

Elemente von linien-basierten Graphiken, die in visuellen Graphiken mit einem Blick zu erkennen sind, wie beispielsweise geometrische Figuren, müssen in einer haptischen linien-basierten Graphik erst exploriert werden, eine verbale Assistenz kann hier helfen. Ähnliches gilt für den Einsatz von gestalterischen Mitteln zur Differenzierung von Elementen, welche für visuelle, aber nicht für linien-basierte Graphiken zur Verfügung stehen. So sind zum Beispiel Flüsse in visuellen Karten in der Regel blau dargestellt, in einer haptischen linien-basierten Graphik ist eine solche Gestaltung nicht möglich. Neben der Zuordnung von Elementen einer Graphik zum Typ finden sich in visuellen Karten häufig individuelle Bezeichnungen an Elementen wie zum Beispiel Straßennamen in Karten. Da Schrift in der virtuellen Haptik nicht (oder nur sehr ineffizient) dargestellt werden kann, muss diese Information auf auditorischem Weg vermittelt werden, siehe Abbildung 4.2.

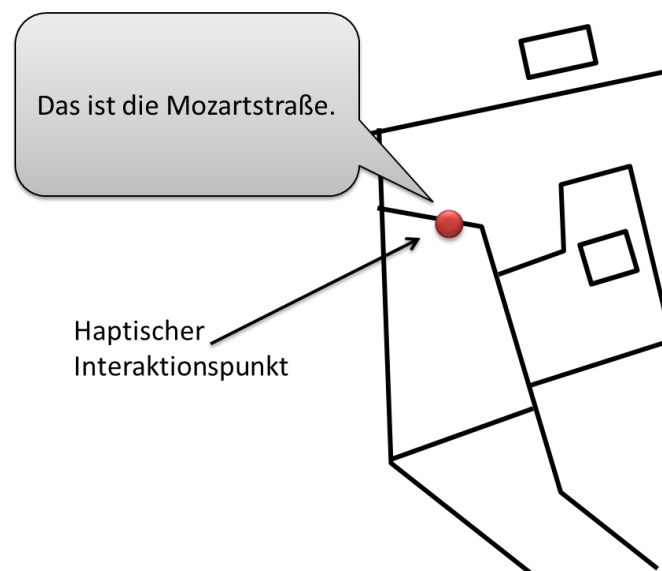


Abbildung 4.2: Assistenz zu Label-Information.

Zeitpunkt: Label-Informationen sollten immer dann gegeben werden, wenn die Möglichkeit besteht, dass der Benutzer nicht weiß, was für ein Element einer linien-basierten Graphik beziehungsweise welches Element genau erkundet wird. Diese Bedingung trifft sicher bei der ersten Exploration eines Elementes zu und ist ebenfalls wahrscheinlich, wenn ein Benutzer ein Element nach einer Unterbrechung erneut exploriert. Sollen sowohl Informationen über den Typ eines Elementes als auch seinen individuellen Bezeichner gegeben werden, bietet es sich an, diese Informationen zu kombinieren. Im Beispiel in Abbildung 4.2 impliziert der Eigenname *Mozartstraße* bereits den Typ des explorierten Elements.

4.2.2.2 Sprachliche Informationen

Neben Eigennamen sind häufig weitere schriftliche Informationen in Graphiken als Text hinterlegt, welche die Elemente der Graphik weiter erläutern oder für den Benutzer relevante Informationen geben. Dies trifft insbesondere auf interaktive Graphiken zu, wie sie zum Beispiel von modernen webbasierten Kartendiensten¹² angeboten werden. Genau wie Label-Informationen müssen derartige Informationen in einer haptisch realisierten linien-basierte Graphik durch auditive Assistenz gegeben werden.

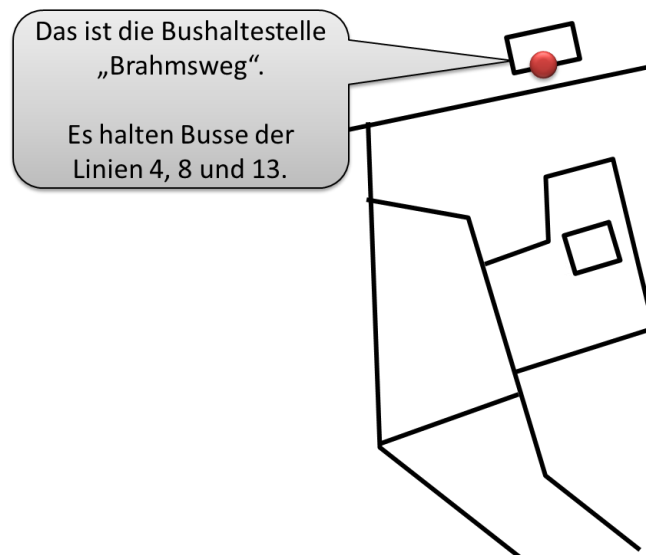


Abbildung 4.3: Assistenz zu weiteren Informationen über ein Element.

Zeitpunkt: Bei sprachlichen Informationen handelt es sich in Abgrenzung zu Label-Informationen um ergänzende Angaben, die für das Verständnis der eigentlichen linien-basierten Graphik zweitrangig sind. Daher sollten sie erstens stets den Label-Informationen untergeordnet werden und zweitens nur gegeben werden, wenn die begründete Annahme besteht, dass der Benutzer ein besonderes Interesse an einem Element, und eventuell weiteren zu diesem Element verfügbaren Informationen, hat. Dies kann zum Beispiel dann der Fall sein, wenn der Benutzer ein Element besonders ausführlich oder mehrfach hintereinander exploriert.

4.2.2.3 Überblicks-Informationen

Bei einem Überblick werden Art und relative Lage umliegender Elemente in Relation zum aktuell explorierten Element beschreiben. Überblicksinformationen sind in der Audiohaptik deswegen so wichtig, da haptische Exploration lokal ist (siehe Abschnitt 3.3). Es ist für den Explorierenden schwierig, seine aktuelle Position in Bezug auf die gesamte linien-basierte Graphik zu bestimmen. Noch gravierender beeinträchtigt der fehlende Überblick über Elemente der linien-basierten Graphik im unmittelbaren Umfeld des haptischen Interaktionspunktes die haptische Exploration.

¹² Zum Beispiel Google Maps (www.google.de/).

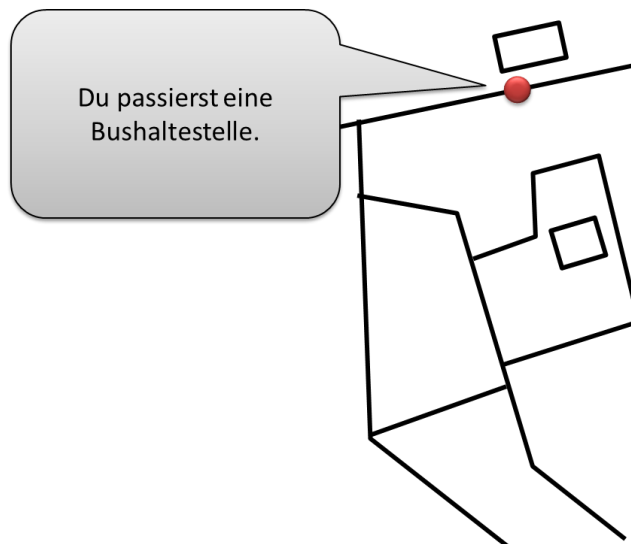


Abbildung 4.4: Assistenz zu Überblicksinformationen.

Zeitpunkt: Eine lokalisierende Überblicksinformation kann als eine ergänzende Information zu einem Element der linien-basierten Graphik aufgefasst werden und sollte somit einer Identifikation (Label-Information) untergeordnet sein. Ähnlich verhält es sich bei Überblicksinformationen über benachbarte Elemente der linien-basierten Graphik, diese sind vor allem dann von Interesse, wenn der Explorierende noch keine Kenntnis von diesen Elementen, weder durch eigene Exploration noch durch Assistenz besitzt.

4.2.2.4 Räumliche Relationen

Räumliche Relationen zwischen Elementen einer linien-basierten Graphik sind haptisch zum Teil schwierig oder nur mit hohem Aufwand wahrzunehmen (siehe Kapitel 3). Sind sie für das Verständnis der linien-basierten Graphik wichtig, zum Beispiel wenn es sich um eine Graphik aus dem Bereich der Schul-Geometrie handelt, können diese Relationen explizit in Form von Assistenz kommuniziert werden. (Nicht unähnlich einer visuellen Geometriedarstellung, auch hier sind Relationen wie Parallelität und Rechtwinkligkeit zum Teil durch besondere Symbole gekennzeichnet.)

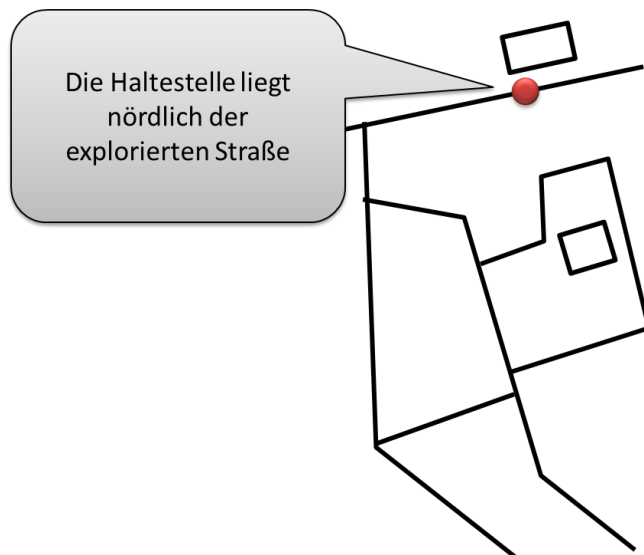


Abbildung 4.5: Assistenz zu räumlichen Relationen.

Zeitpunkt: Je nach Art der räumlichen Relation wird durch sie ein räumliches Verhältnis zwischen dem aktuell explorierten und einem oder mehreren anderen Objekten ausgedrückt. Eine solche Information ist für den Benutzer nur hilfreich, wenn er sie in den Zusammenhang seiner Exploration einordnen kann. Dies wiederum basiert auf der vorangegangenen Exploration des Benutzers und den Äußerungen des assistierenden Systems.

4.2.2.5 Vor- und Nachteile sprachlicher auditorischer Assistenz

Nicht-sprachliche Assistenz bringt für einige Anwendungsszenarien Vorteile, insbesondere dann, wenn wichtige, eindeutige oder seltene Informationen schnell zu übermitteln sind. Für die in dieser Arbeit untersuchten Anwendungsdomänen ist jedoch gerade die Möglichkeit Informationen wie Eigennamen, Typ oder räumliche Relationen sprachlich zu vermitteln wichtig. Die gleichzeitige Nutzung von Sonifikation und sprachlicher Assistenz ist schwierig. Zwar können Sprache und längere Töne gleichzeitig wahrgenommen werden, dies geht aber mit einer erhöhten Anstrengung für den Benutzer einher. Der Gewinn, welcher durch Sonifikation bzw. haptische Effekte gewonnen wird, muss gegen diesen Verlust abgewogen werden.

Für die Nutzung sprachlicher auditorischer Assistenz muss beachtet werden, dass Kommunikation in natürlicher Sprache Sprechzeit proportional zur Länge des Textes benötigt. Explorationsbewegungen in virtuellen haptischen Umgebungen können sich schnell und abrupt ändern. Da natürliche Sprache auf verschiedenen Granularitätsebenen aus Einheiten fester Größe besteht, ist eine sofortige Reaktion auf die veränderte Explorationsbewegung schwierig. Wird ein begonnener Satz während der Äußerung abgebrochen, so endet er in der Regel grammatikalisch inkorrekt und ist für den Hörer ebenso wenig hilfreich wie ein unvollständig gesprochenes Wort. Dies macht eine genaue Planung der Äußerungen während der Exploration ebenso wie einen sorgfältigen Entwurf der sprachlichen Assistenzen notwendig.

Die entwickelte Ereigniserkennung und auch prototypische Assistenz-Generierung ist so angelegt, dass sprachliche Assistenz im Vordergrund steht. Sonifikation von Informationen ist ebenfalls möglich, ihr wird im Rahmen dieser Arbeit aber auf Grund der genannten Nachteile eine untergeordnete Rolle eingeräumt.

4.3 Interaktionsparadigmen für multimodal assistierte haptische Exploration

Bei der Entwicklung eines multimodal assistierenden Systems muss entschieden werden, wie die Interaktion zwischen Computer und assistierendem System ablaufen soll. Der Benutzer erkundet eine haptische Repräsentation, das System assistiert bei dieser Exploration - wann und nach welchen Regelmäßigkeiten es dies tut, ist entscheidend dafür, wie der Benutzer das System erlebt und wie effizient ihm die gegebene Assistenz bei der Aneignung von Wissen hilft.

Die Interaktion zwischen explorierendem Menschen und einer multimodal assistierenden haptischen linien-basierten Graphik kann auf verschiedene Weisen gestaltet sein. Eine grundlegende Eigenschaft dieser Interaktion ist die Selbstständigkeit und Proaktivität des assistierenden Systems. Wenig selbstständig ist ein ausschließlich *reaktives System*, das in immer gleicher Weise auf die Eingaben des Benutzers reagiert. Deutlich selbständiger ist ein *Computer als Partner* (Beaudouin-Lafon, 2004). In diesem Interaktionsszenario übernimmt das assistierende System die Rolle eines menschlichen Assistenten, der eine haptische Exploration beobachtet und eine zur Situation passende Assistenz gibt. Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes ist ein *System als Dialogpartner* in einem Gespräch über den gemeinsamen Kontext einer haptischen Exploration. Diese drei Interaktionsparadigmen zeigen, dass die Möglichkeiten aber auch die Anforderungen an ein assistierendes System stark variieren können. Mit dieser Arbeit soll ein Rahmenwerk zur Ereigniserkennung während der haptischen Exploration geschaffen werden, das die Anforderungen dieser möglichen Interaktionsparadigmen erfüllt, ohne sich dabei speziell auf ein Paradigma festzulegen. Im Folgenden werden die einzelnen Interaktionsparadigmen genauer beschrieben, ebenso wie ihre Anforderungen an eine Ereigniserkennung und eine Wissensverarbeitung und die innerhalb dieser Paradigmen realisierbaren Kategorien sprachlicher Assistenz.

4.3.1 Exploration als Eingabe - Nutzer als Bediener

In diesem Interaktionsparadigma bedient der Benutzer das System welches ausschließlich auf seine Befehle reagiert. Diese Eingabe kann zum Beispiel das Berühren bestimmter Flächen in der virtuellen haptischen Umgebung, das Ausführen bestimmter Gesten oder ein Knopfdruck sein. Der Vorteil dieses klassischen Interaktionsparadigmas ist, dass das System zuverlässig und in gleichbleibender Weise auf die Aktionen des Benutzers reagiert. Zudem kann durch die fehlende Eigeninitiative des System vermieden werden, dass der Benutzer durch nicht nachvollziehbare Systemreaktionen verwirrt wird.

Dieser Ansatz hat aber auch deutliche Nachteile: Die Bewegungen im virtuellen haptischen Raum dienen nicht ausschließlich der Exploration, sondern auch der aktiven Steuerung. Der Benutzer kann also nicht die volle Explorationszeit und auch nicht die volle Aufmerksamkeit nutzen um die linien-basierte Graphik zu erkunden.

Ein noch gravierenderer Nachteil eines ausschließlich reaktiven Systems ist, dass gerade in den Situationen Assistenz benötigt wird, in denen die Schwächen einer ausschließlich haptischen Exploration ausgeglichen werden müssen. Zu diesen Schwächen gehört unter anderem ein fehlender Überblick (siehe Kapitel 3) – ob und wann es sinnvoll ist Überblicksinformationen zu geben, kann das System entscheiden, welches die vollständige linien-basierte Graphik kennt. Überlässt man diese und ähnliche Entscheidungen dem Benutzer, so kann das dazu führen, dass der Benutzer systematisch ausprobieren muss, ob er eine hilfreiche Information bekommen kann.

Die Anforderungen an ein ausschließlich reaktives System sind überschaubar: Die Exploration muss beobachtet werden und die aktuelle Position des haptischen Interaktionspunktes in Bezug auf die linien-basierte Graphik analysiert werden. Mit einem solchen Formalismus kann bereits ein reaktives System umgesetzt werden. Ebenso ist es möglich, nicht-haptische Bedienelemente, wie etwa den Druck auf einen der Knöpfe des Phantom-Stylus oder der Tastatur, umzusetzen.

4.3.2 Computer als Partner

Beaudouin-Lafon (2004) schlägt ein Interaktionsparadigma vor, in dem der Computer als intelligenter proaktiver Partner agiert. Diese Sicht entspricht der Zielsetzung, ein Assistenzsystem zu entwickeln, das sich an der Frage orientiert: Welche Assistenz würde ein menschlicher Assistent wann geben? Der menschliche Assistent kann über die Fähigkeiten eines reaktiven Agenten hinausgehen: Er kann mutmaßen, für welche Details einer Karte sich der explorierende Benutzer interessiert und auf diese besonders eingehen, er kann sich an bereits gegebene Assistenzen erinnern und entweder probieren, an diese anzuknüpfen oder dem Explorierenden neue Informationen zu präsentieren und letztendlich kann er auch überlegen, welche Informationen für den Explorierenden eventuell relevant aber auf Grund des fehlenden Überblicks nicht zugänglich sind. Ein System, das als proaktiver Partner agiert, kann alle der in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Kategorien von sprachlichen Assistenzen realisieren.

Die Anforderungen an ein assistierendes System, das als proaktiver Partner agiert, sind deutlich größer als bei einem reaktiven System: Die Grundlage für die Entscheidungsfähigkeit des Systems ist ein Verständnis der aktuellen Exploration sowie der Historie der Exploration und der Interaktion zwischen System und Benutzer. Eine wichtige Komponente ist daher eine Ereigniserkennung der Explorationsereignisse im Kontext der linien-basierten Graphik. Darüber hinaus muss eine weitere Komponente die Aufgabe übernehmen, aus der Vielzahl möglicher verbaler Assistenzen eine einzelne auszuwählen, welche in der aktuellen Explorationssituation und unter Beachtung der bereits gegebenen Assistenzen passend und hilfreich ist.

4.3.3 Dialogsystem

Eine Weiterentwicklung eines proaktiv assistierenden Systems, ist ein vollständiges Dialogsystem. Der Benutzer exploriert eine haptisch realisierte linien-basierte Graphik, ein assistierendes System beobachtet diese Exploration. Benutzer und System führen während der Exploration einen Dialog im gemeinsamen Kontext der haptischen Exploration. Nach Garrod und Pickering (2004) schafft der gemeinsame Kontext ein Alignment zwischen den Gesprächspartnern. Dieses Alignment erlaubt es, Vorteile eines Dialogs, wie zeitsparende Anaphern und nicht eindeutige sprachliche Äußerungen zu nutzen, da ein gemeinsamer Konsens über die Situation besteht.

Dieses Alignment setzt voraus, dass komplexe Explorationsbewegungen des Benutzers in Bezug auf die explorierte linien-basierte Graphik vom assistierenden System erkannt und im Dialog adressiert werden können. So könnten Dialogpartner je nach Anwendungsdomäne über Explorationsvorgänge wie zum Beispiel „*annähern*“, „*abbiegen*“, „*passieren*“ oder „*umkreisen*“ reden.

In diesem Interaktionsparadigma sind die Vorteile der vorhergehenden Interaktionsparadigmen vereint: Der Benutzer kann aktiv beeinflussen, welche Informationen er erhalten kann. Er kann dabei insbesondere gezielt an seine aktuelle haptische Exploration und die Assistenz des Systems anknüpfen. Trotzdem kann das System aus eigener Initiative Assistenz anbieten.

Dies setzt natürlich voraus, dass das assistierende System nicht nur in der Lage ist, mit der rein sprachlichen Seite eines Dialoges umzugehen, sondern auch den Kontext – in diesem Fall die haptische Exploration – verstehen und in einem Zusammenhang mit dem sprachlichen Anteil des Dialoges bringen kann. Wieder ist eine leistungsstarke Erkennung von Explorationsereignissen hierzu notwendig, die eng in das Dialogsystem integriert sein muss.

4.4 Fazit: Ereigniserkennung als Grundlage sprachlicher Assistenz

Multimodale Assistenz soll die Nachteile der modalen Substitution von der visuellen Wahrnehmung zur haptischen Wahrnehmung kompensieren. Ein rein reaktives System kann die in der virtuellen Haptik schwierig darzustellende Schrift durch verbale Nachrichten kompensieren. Mit diesem Szenario wäre die minimale Anforderung an ein audihaptisches System erfüllt, dem Benutzer stehen sowohl räumliche als auch Label-Informationen einer linien-basierten Graphik zur Verfügung. Allerdings wird der Benutzer weitestgehend mit den Nachteilen virtueller haptischer Umgebungen allein gelassen. Tabelle 4.1 fasst noch einmal die Vor- und Nachteile der vorgestellten Interaktionsparadigmen zusammen.

	Benutzer als Bediener	Computer als Partner	Dialogsystem
Vorteile	Konsistente Reaktion des Systems Benutzer hat vollständige Kontrolle über Interaktion	Aktive Assistenz durch System Wissen über Exploration, gegebene Assistenz und LBG wird genutzt	Benutzer kann Dialog steuern, aktiv Fragen und Interesse äußern Alignment zwischen System und Benutzer durch Adressierung komplexer Explorationsbewegungen im Kontext der LBG
Nachteile	Keine Eigeninitiative des Systems Fehlende Übersicht wird nicht kompensiert Benutzer ist mit Bedienung des Systems belastet	Unerwartete Systemreaktionen Höhere technische Anforderungen	Hohe technische Anforderungen aus verschiedenen Bereichen der Informatik
Sprachliche Assistenz	Alle Kategorien von Assistenzen realisierbar, aber nur auf Anfrage des Benutzers. Keine intelligente Auswahl von passenden Assistenzen	Alle Assistenzen können passend zur Situation automatisch ausgelöst werden.	Assistenz im Rahmen eines Dialoges
Anforderungen	Detektion von simplen Berührungseignissen, Eingabe durch Tastatur oder Knöpfe am haptischen Gerät	Erkennung von komplexen Explorationseignissen, Wissensverarbeitung über Inhalt der linien-basierten Graphik	Zusätzlich: Dialogsystem mit Integration von Ereigniserkennung und Wissensverarbeitung

Tabelle 4.1: Interaktionsparadigmen.

Eine virtuelle haptische Umgebung erlaubt es aber diese Nachteile gezielt auszugleichen, indem neben Label-Informationen, auch Hilfen in Bezug auf Überblick und räumliche Relationen gegeben werden. Dieser Zugewinn an möglichen Mitteilungen des assistierenden Systems macht eine sorgfältige Auswahl der Assistenzen notwendig. Für die Realisierung einer assistierenden Systemreaktion muss ein geeigneter Zeitpunkt (und eine Begründung) für die Äußerung gefunden werden. Die Grundlage hierzu ist eine leistungsstarke Ereigniserkennung, die je nach Interaktionsparadigma nicht nur die Exploration beobachtet, sondern auch Wissen über die explorierte linien-basierte Graphik und die vergangene Interaktion mit dem Benutzer nutzt.

Die in 4.2.2 eingeführten Kategorien von sprachlicher Assistenz machen deutlich, dass eine Ereigniserkennung nicht nur erkennen muss, welchen Teil einer linien-basierten Graphik ein

Benutzer momentan exploriert, also welches Element oder welche Elemente der haptische Interaktionspunkt gerade berührt, sondern auch folgendes Erkennen:

- Wie lange oder wie intensiv (gemessen an der Zahl wiederholter Explorationen) exploriert ein Benutzer ein Element der linien-basierten Graphik?
- Führt der Benutzer komplexe Explorationsbewegungen aus, wie zum Beispiel „Abbiegen“, „Umkreisen“ oder „Passieren“?
- Welche Elemente der linien-basierten Graphik wurden in der Vergangenheit exploriert?
- Wurde ein Element der linien-basierten Graphik vollständig exploriert?
- Wohin bewegt der Benutzer (Richtung) den haptischen Interaktionspunkt? Diese Frage kann in Bezug auf einen globalen Referenzrahmen aber auch in Bezug auf ein lineares Element einer linien-basierten Graphik beantwortet werden.
- Wie schnell bewegt sich der haptische Interaktionspunkt? Und wie lange wird die Exploration des aktuell explorierten Elements der linien-basierten Graphik bei dieser Geschwindigkeit andauern?

Erst durch eine Ereigniserkennung, welche diese Fragen (zu jedem Zeitpunkt) beantworten kann, ist es möglich, ein assistierendes System zu entwickeln, welches sich als (Dialog-) Partner gegenüber dem Benutzer verhält.

4.5 State-of-the-Art: Haptische Systeme mit sprachlicher Assistenz

Verschiedene Ansätze zur sprachlichen oder auditorischen Assistenz während der haptischen Exploration schematischer Darstellungen existieren in der Literatur. Für die Anwendungsdomänen der Linien-Graphen und der (Straßen-) Karten wird eine Übersicht existierender Systeme gegeben. Diese werden insbesondere daraufhin untersucht, welche Kategorien von Assistenz gegeben wird und wie die Interaktion mit dem Benutzer gestaltet ist. Um Entwicklungen und Trends in der Literatur herauszuarbeiten, werden die verschiedenen Ansätze in chronologischer Reihenfolge präsentiert. Dabei werden die verschiedenen Ansätze nach dem Jahr der ersten Veröffentlichung zu einem System sortiert, auch wenn es zu dem vorgestellten System Folgepapiere gibt.

4.5.1 Audio-Haptische Karten

Relevant für den State-of-the-Art sind Ansätze audio-haptischer Karten, die sprachliche Assistenz geben. Ansätze die ausschließlich mit Sonifikation arbeiten, sind von dieser Übersicht ausgenommen. Die vorgestellten Ansätze nutzen zum Teil nicht-virtuelle haptische Realisierungen, die Exploration wird mit anderen Hilfsmitteln beobachtet. Für die Analyse dieser Ansätze ist die zur Beobachtung genutzte Sensorik jedoch zweitrangig. Entscheidend ist, in wie fern die beobachtete Exploration genutzt wird, um die Interaktion mit dem Benutzer zu steuern. Es folgt eine Übersicht über bestehende Ansätze in chronologischer Reihenfolge.

4.5.1.1 NOMAD (Parkes, 1988)

Das *NOMAD*-System von Parkes (1988) nutzt eine nicht virtuelle Realisierung einer Karte für die haptische Exploration. Geprägtes Papier oder Folie wird dazu auf ein Touchpad platziert. Berührung von Elementen der haptischen Karte wird mit dem Touchpad detektiert und Label-Informationen werden gegeben. Dieses System nutzt keine Ereigniserkennung im engeren Sinne. Das System reagiert reflexartig auf Berührungen einzelner Elemente der haptischen Repräsentation.

4.5.1.2 MoBIC (Petrie, Johnson, Strothotte, Raab, Fritz & Michel, 1996)

Das MoBIC-System von Petrie et al. (1996) nutzt nur eine monomodale sprachliche Interaktion, um dem Benutzer bei einer Vorbereitung einer Route zu unterstützen. Das System besteht aus zwei Komponenten: Eine Komponente erlaubt die virtuelle Exploration einer Umgebung zur Vorbereitung einer Route, eine weitere Komponente unterstützt den Benutzer während er in einer realen Umgebung navigiert. Während der Vorbereitungsphase bewegt sich der Benutzer in einer virtuellen Karte und bekommt auditorische Hilfestellungen bezüglich seiner Umgebung und seiner geplanten Route. Bemerkenswert ist der Umfang der sprachlichen Assistenz, sie umfasst neben Labelinformationen wie Straßennamen, Angaben zur aktuellen Richtung der Bewegung, Geschäfte in unmittelbarer Nähe, Landmarken an denen sich blinde oder sehbehinderte Menschen orientieren können, wie zum Beispiel Parkbänke, Straßenlaternen oder auch die Beschaffenheit des Untergrundes. Die verbalen Assistenzen werden durch Tastendruck auf einem Keypad ausgelöst.

4.5.1.3 Jacobson (1998)

Jacobson (1998) stellt ein System vor, das ähnlich wie das *Nomad*-System von Parkes (1988) auf einer taktilen Karte über einem Touchpad basiert. Bei Berührung von Regionen der Karte werden sowohl nicht sprachliche Geräusche als auch sprachliche Assistenz gegeben. Die sprachliche Assistenz umfasst Beschreibungen der Umgebung der aktuell explorierten Position in der Karte („*Im Westen ist ein Ozean.*“) generelle Informationen über explorierte Elemente („*Der Safari-Park hat viele Tiere aus Ostafrika.*“) und Überblicksinformationen über die gesamte gezeigte Karte („*Die Karte zeigt eine Stadt und ihre Umgebung. Im Westen ist ein Ozean. ...*“). Hervorzuheben außerdem, dass in diesem Ansatz auditorische Ikons genutzt werden um dem Benutzer die Exploration der Karte zu erleichtern, so wird der Benutzer darauf hingewiesen, dass er den Rand der Karte erreicht hat beziehungsweise, dass er die Exploration auf einer anderen Karte fortsetzen kann. Genau wie das *Nomad*-System reagiert auch dieses System reflexartig auf Berührungen, eine interne Repräsentation von Explorationsereignissen findet nicht statt.

4.5.1.4 BATS (Parente & Bishop, 2003)

Parente und Bishop (2003) nutzen für das *BATS*-System Force-Feedback-Gamepads und Joysticks, um virtuelle, haptische Karten darzustellen. Dabei werden nichtsprachliche Tonsignale genutzt, um anzuzeigen, was für eine Region exploriert wird. Städte erzeugen zum

Beispiel Verkehrsgeräusche. Auf Knopfdruck kann sprachliche Assistenz zu Label-Informationen ausgelöst werden. Auch dieses System nutzt keine Ereigniserkennung um proaktives Systemverhalten zu erzeugen.

4.5.1.5 Magnusson und Rasmus-Gröhn (2004)

Magnusson und Rasmus-Gröhn (2004) nutzen virtuelle haptische Umgebungen welche mittels Force-Feedback-Geräten exploriert werden können um blinde und sehbehinderte Menschen Wissen über eine Umgebung und Routen zu vermitteln. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen, welche mit virtuellen haptischen Umgebungen arbeiten, erfolgt die Darstellung der Umgebung nicht schematisch, Straßen, Bordsteine, Bäume, Ampeln und weitere Elemente der Umgebung werden als (vereinfachte) 3D-Objekte modelliert. Außerdem verfügt die virtuelle Umgebung über dynamische Objekte in Form von Fahrrädern und Autos. Während der Exploration kann sprachliche Assistenz in Form von Labelinformation durch Drücken eines Knopfes am Force-Feedback-Gerät ausgelöst werden. Eine Ereigniserkennung oder proaktive multimodale Assistenz des Systems liegt nicht vor.

4.5.1.6 Talking TMAP (Miele, Landau & Gilden, 2006)

Miele et al. (2006) stellen mit *Talking TMAP* ein weiteres System vor, welches auf einer taktilen Prägedruckkarte über einem Touchpad basiert. Während der Exploration kann der Benutzer durch Druck auf Objekte der Karte verbale Assistenz zu explorierten Straßen erhalten. Die verbale Assistenz umfasst zum einem Straßennamen zum anderen weiterführende Informationen wie Hausnummern am Abschnitt der Straße, Länge des Straßenabschnittes und ein Buchstabieren des Straßennamens. Die sprachliche Assistenz wird durch ein kurzes Antippen der Straße mit dem Finger ausgelöst. Bei einmaligem Antippen wird lediglich der Straßename genannt, durch mehrfaches Antippen werden weitere Informationen verbalisiert. Dies kann als seine einfache Art der Ereigniserkennung gewertet werden, da hier das System eine Repräsentation der Historie der Interaktion nutzt, um die verbale Assistenz zu steuern, auch wenn das System kein proaktives Verhalten zeigt.

4.5.1.7 Kostopoulos, Moustakas, Tzouvaras, Nikolakis, Thillou und Gosseli (2007) / Moustakas, Nikolakis, Kostopoulos, Tzouvaras und Strintzis (2007)

Kostopoulos et al. (2007) und Moustakas et al. (2007) nutzen Force-Feedback-Geräte, um Straßenkarten für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich zu machen. Der von Kostopoulos et al. vorgestellte Ansatz zeichnet sich dadurch aus, dass das haptische Kartenmaterial nicht manuell erstellt wird, sondern mittels Graphikverarbeitung aus existierenden Karten erzeugt wird. Im Rahmen dieser automatischen Erstellung werden auch Straßennamen analysiert, um später als multimodale Assistenz genutzt zu werden. Die multimodalen Assistenzen umfassen neben Straßennamen auch Hinweise auf Kreuzungen. Während der Exploration werden dem Benutzer diese multimodalen Assistenzen über ein Text-to-Speech-Modul automatisch gegeben. Der genaue Vorgang der Assistenz-Auslösung ist nicht genauer beschrieben, es ist anzunehmen, dass die entsprechende Assistenz dann gegeben wird, wenn der Benutzer eine Straße beziehungsweise eine Kreuzung zum ersten Mal in der

virtuellen haptischen Umgebung berührt. Eine Analyse der Explorationsbewegungen mit einer internen Konzeption von Explorationsereignissen findet in diesem Ansatz nicht statt.

4.5.1.8 Lahav und Mioduser (2008)

Lahav und Mioduser (2008) stellen ein System vor, das die Exploration von virtuellen haptischen Raumplänen mit Force-Feedback-Joystick ermöglicht. Während der Exploration erhält der Benutzer multimodale Assistenz in Form von haptischen Effekten wie Vibration und Anziehung oder Abstoßung oder durch sprachliche Assistenz. Die sprachliche Assistenz umfasst Informationen zu Art und Namen von Objekten, sowie weitere Eigenschaften von Objekten, ihrer unmittelbaren Umgebung und Instruktionen zur weiteren Navigation. Ausgelöst wird sowohl die haptische als auch die sprachliche Assistenz durch Berührung von Objekten in der virtuellen Umgebung oder das Betreten von festgelegten Arealen um die Objekte.

4.5.1.9 Instant Tactile-Audio Map (Wang, Li, Hedgpeth & Haven, 2009)

Wang et al. (2009) stellen mit *Instant Tactile-Audio Maps* ein weiteres System vor, das auf der Grundlage von taktilen Karten auf einem Touchpad basiert. Dieser Ansatz zeichnet sich dadurch aus, dass sowohl die taktilen Karten als auch die sprachliche Assistenz automatisch auf der Grundlage von Bildverarbeitung aus bestehendem Kartenmaterial erstellt werden kann. Der Benutzer kann während der Exploration sprachliche Assistenz erhalten, indem er auf taktile Symbole in Form von erhöhten und abgesenkten Punkten drückt. Die sprachliche Assistenz umfasst im Wesentlichen Labelinformationen, welche auch in der ursprünglichen Karte zu finden ist. Das heißt, Namen von Landmarken und Straßen, aber auch Angaben zu Himmelsrichtungen werden mit den taktilen Symbolen in der Karte verknüpft, die taktilen Symbole werden automatisch auf oder in der Nähe von Straßen und Landmarken platziert. Die Assistenz dieses Systems ist nicht proaktiv und basiert nicht auf einer Erkennung komplexer Explorationsereignisse.

4.5.1.10 Zeng und Weber (2010)

Zeng und Weber (2012) nutzen ein mobiles Braille-Display um Straßenkarten für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich zu machen. Der Benutzer kann das System während der Navigation in einer realen Umgebung nutzen. Das mobile Braille-Display zeigt sowohl Position als auch Orientierung des Benutzers während der Bewegung an. Sprachliche Assistenz kann vom Benutzer durch Berühren der im Braille-Display dargestellten Objekte ausgelöst werden. Die sprachliche Assistenz soll Informationen umfassen, welche speziell für blinde oder sehbehinderte Menschen nützlich ist, wie räumliche Relationen zu umgebenden Landmarken, Informationen zur Barrierefreiheit von Gebäuden oder Orientierungshilfen auf dem Gehweg. Die Assistenzen zu einzelnen Objekten sollen nach dem Prinzip der kollaborativen geographischen Informationssysteme von einer Vielzahl von Benutzern gesammelt werden. Das System nutzt keine Erkennung komplexer Bewegungsereignisse.

4.5.1.11 BlindAid (Schloerb, Lahav, Desloge & Srinivasan, 2010)

Schloerb et al. (2010) stellen mit BlindAid ein weiteres auf Force-Feedback basierendes System zur haptischen Exploration von Karten vor. Das System nutzt vornehmlich Sonifikation um dem Benutzer die Exploration der virtuellen Umgebung zu erleichtern. Dabei wird *Spatialized Sound* genutzt, um die Orientierung zu erleichtern. Geräusche werden im Raum lokalisiert, als ob der Benutzer tatsächlich in einer Umgebung unterwegs ist. Dazu wird die Grund-Lautstärke als Maß für die Distanz und unterschiedliche Lautstärken für stereophones Hören moduliert. Die Sonifikation umfasst Geräusche für berührte Objekte, charakteristische Geräusche für Regionen und Geräusche für Landmarken. Über Tastendruck können Kommandos an das System gegeben werden, unter anderem kann auch zwischen Geräuschen und verbalen Beschreibungen für berührte Objekte gewechselt werden. Eine Erkennung komplexer Ereignisse findet nicht statt.

4.5.1.12 HapticRiaMaps (Kaklanis, Votis, Moschonas & Tzovaras, 2011)

Kaklanis et al. (2011) nutzen Force-Feedback-Geräte, um haptische Karten für blinde und sehbehinderte Menschen darzustellen. Die haptischen Karten werden automatisch aus den Informationen eines frei verfügbaren geographischen Datenbanksystems generiert. Sonifikation wird eingesetzt, um den Benutzer während der Exploration auf Kreuzungen im Straßennetzwerk hinzuweisen. Unterschiedliche Töne werden eingesetzt, um den Benutzer darauf hinzuweisen, dass eine Kreuzung in der Nähe oder direkt an der Position des haptischen Interface-Punktes liegt. Die Analyse der aktuellen Position des haptischen Interface-Punktes in Relation zu den ihn umgebenden Punkten kann als eine Form der Explorationsanalyse angesehen werden, auch wenn keine Erkennung von komplexen Explorationsereignissen vorgenommen wird.

4.5.1.13 Überblick über Systeme zur multimodalen Exploration von haptischen Karten

Es existieren vielfältige Ansätze in der Literatur, um multimodale, haptische Karten zu realisieren. Tabelle 4.2 zeigt eine entsprechende Übersicht. Einige der Systeme zeigen proaktives Verhalten, indem Assistenz dann gegeben wird, wenn der Benutzer während der Exploration einen bestimmten Bereich betritt, ein Objekt berührt oder in dessen Nähe gerät. Eine Erkennung von komplexen Explorationsereignissen findet jedoch in keinem der Ansätze statt.

Unter den verbalen Assistenzen sind Labelinformationen prominent, jedoch zeigen die verschiedenen Ansätze auch eine große Bandbreite an anderen Arten von Informationen. In mehreren der vorgestellten Systeme wird der möglichen Informationsflut dadurch begegnet, dass der Benutzer Assistenz aktiv auslösen muss, beziehungsweise den Umfang der Assistenz aktiv beeinflussen kann. Besonders sticht hier der Ansatz von Miele, Landau und Gilden (2006) hervor, bei dem mehrfaches Antippen des explorierten Objektes sukzessiv tiefergehende sprachliche Assistenz über das explorierte Objekt auslöst.

Zwei Trends werden in der Literatur deutlich: Erstens nutzen aktuelle Systeme vorwiegend Force-Feedback-Geräte für die Exploration von virtuellen haptischen Umgebungen, oder es werden taktile Karten auf Touchpads genutzt. Force-Feedback-Computer-Mäuse und -Joysticks werden zunehmend weniger genutzt.

Zweitens zielen frühe Systeme vorrangig darauf ab, zu belegen, dass Systeme zur multimodal assistierten Exploration von haptischen Karten möglich sind, und dass diese Systeme gegenüber monomodalen haptischen Repräsentationen einen, in empirischen Studien belegbaren, Mehrwert für blinde und sehbehinderte Menschen haben. In neueren Arbeiten (Kostopoulos, Moustakas, Tzouvaras, Nikolakis, Thillou & Gosseli, 2007; Moustakas, Nikolakis, Kostopoulos, Tzouvaras & Strintzis, 2007; Wang, Li, Hedgpeth & Haven, 2009; Kaklanis, Votis, Moschonas & Tzouvaras, 2011) steht jedoch auch die Möglichkeit im Vordergrund, multimodale haptische Karten automatisch und ohne weitere manuelle Bearbeitung aus verfügbaren Datenquellen zu erstellen.

System	Haptische Realisierung	Sonifikation	Sprachliche Assistenz	Auslösung der sprachlichen Assistenz	Nutzung von Ereigniserkennung
NOMAD, Parkes (1988)	Geprägtes Papier auf Touchpad	nein	Labelinformationen	Berührung von Element der Karte	nein
MoBIC, Petrie et al. 1996	nein	Nein		Eingabe des Benutzers (Tastendruck)	nein
Jacobson 1998	Geprägtes Papier auf Touchpad	Geräusche für aktuell explorierte Region Auditorische Icons als Navigationshilfe	Labelinformationen	Berührung von Element der Karte	Nein
BATS, Parente und Bishop (2003)	Force-Feedback-Gamepad oder Joystick	Charakteristische Geräusche für aktuell explorierte Region	Beschreibungen der Umgebung Details zu explorierten Elementen Überblicksinformationen	Eingabe des Benutzers	Nein
Magnusson und Rasmussen-Gröhn 2004	Force-Feedback	nein	Labelinformationen	Eingabe des Benutzers (klick)	Nein

Talking TMAP, Miele et al. (2006)	Geprägtes Papier auf Touchpad	nein	Labelinformationen, weitere Informationen zu Straßen	Eingabe des Benutzers: (mehrfaches) Antippen der explorierten Straße	eingeschränkt
Kostopoulos et al. (2007) & Moustakas et al. (2007)	Force-Feedback	nein	Straßennamen Hinweise auf Kreuzungen	Berührung von Objekten	Nein
Lahav und Mioduser (2008)	Force-Feedback-Joystick	nein	Labelinformationen Angaben zu Eigenschaften von Objekten und ihrer Umgebung Navigationsinstruktionen	Berührung von Objekten	Nein
Wang et al. (2009)	Geprägtes Papier auf Touchpad	nein	Labelinformationen Angaben zu Himmelsrichtungen	Druck auf taktile Symbole in der explorierten Karte	Nein
BlindAid, Schloerb et al. (2010)	Force-Feedback	Objekte, Landmarken, Regionen	Optional: Beschreibungen von Objekten	Kontinuierlich, Bei Berührung von Objekten	Nein
HapitcRia-Maps, Kaklanis et al. (2011)	Force-Feedback	Hinweise auf Kreuzungen	Nein	Nähe zu Kreuzungen	Eingeschränkt

Tabelle 4.2: Überblick über Systeme zur multimodalen Exploration von (Straßen-)Karten.

4.5.2 Audio-Haptische Linien-Graphen

Es existieren verschiedene Ansätze in der Literatur, um numerische Daten für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich zu machen. Da es in dieser Arbeit vorrangig darum geht, die Möglichkeiten einer multimodalen Interaktion auf der Grundlage einer wissensbasierten Ereigniserkennung zu erforschen, werden bestehende Ansätze vorrangig darauf hin untersucht, wie die Interaktion mit dem Benutzer gestaltet ist. Die Frage, wie auditorische

Assistenz ausgelöst wird, steht im Vordergrund. Im Folgenden werden verschiedene existierende Systeme in chronologischer Abfolge zusammen getragen:

4.5.2.1 Ramloll, Yu, Brewster, Riedel, Burton und Dimigen (2000)

Ramloll et al. (2000) nutzen Force-Feedback-Geräte, um haptische Liniengraphen darzustellen. Während der Exploration wird der Benutzer sowohl mittels Sonifikation als auch durch Sprachausgabe unterstützt. Die kontinuierliche Sonifikation erzeugt einen Ton, dessen Höhe analog zur Y-Position des haptischen Interfacepunktes im explorierten Graphen moduliert wird. Bei steigender Höhe erhöht sich die Frequenz des Tones. Eine Besonderheit bei diesem Ansatz ist der Wechsel der Ausgabe der Sonifikation vom linken zum rechten Kopfhörer wenn der haptische Interface Punkt die x-Achse passiert, also bei einem Wechsel von positiven zu negativen Werten. Dies kann als eine Reaktion des Systems auf ein Ereignis während der haptischen Exploration aufgefasst werden, auch wenn eine formale Ereigniskonzeption im Hintergrund steht. Die Ausgabe von sprachlicher Assistenz beschränkt sich auf die Ausgabe der aktuellen Koordinaten, sie wird durch einen Klick des Benutzers am Griff des haptischen Eingabegerätes ausgelöst.

4.5.2.2 Yu und Brewster (2002)

Yu und Brewster (2002) nutzen haptische Balkendiagramme mit multimodaler Assistenz. Die haptische Realisierung erfolgt wahlweise mittels einer haptischen Computer-Maus oder einem Force-Feedback-Gerät. Zur multimodalen Assistenz wird eine Kombination aus Sonifikation und sprachlicher Assistenz genutzt. Mittels Sonifikation wird die Höhe des aktuell explorierten Balkens vermittelt. Auf Anfrage des Benutzers mit einem Klick am Eingabegerät wird die genaue Höhe des Balkens ausgegeben.

4.5.2.3 Sjöström, Danielsson, Magnusson und Rasmus-Gröhn (2003)

Sjöström et al. (2003) nutzen multimodale haptische Repräsentationen um unterschiedliche Typen von Graphen haptisch zu realisieren. Dazu zählen Linien-Graphen, Balken- und Tortendiagramme. Der von Sjöström et al. präsentierte Ansatz hebt sich dadurch ab, das Graphen nicht nur exploriert werden können, sondern auch interaktiv vom Benutzer erstellt werden können. Eine haptische Computer-Maus oder ein Force-Feedback-Gerät werden zur haptischen Darstellung genutzt. Die Eingabe der Graphen erfolgt mittels Maus oder Tastatur.

Bei der Konstruktion von Liniengraphen erfolgt eine Sonifikation der aktuellen Y-Position des haptischen Interfacepunktes. Mit steigender Höhe im Graphen steigt die Höhe des ausgegebenen Tones.

Die sprachliche Assistenz kann auf Anfrage des Benutzers genutzt werden, um zum einen Auskunft über den letzten gesetzten Punkt des Linien-Graphen zu erhalten oder einen Überblick über alle bis her gesetzten Punkte zu bekommen. Diese Form der Assistenz wird zwar vom Benutzer ausgelöst, berücksichtigt jedoch die Historie der Konstruktion des Graphen. Auch wenn keine explizite interne Repräsentation von Ereignissen für das System

erwähnt wird, berücksichtigt das System die zuletzt ausgeführte Aktion des Benutzers bei der Erzeugung von Assistenz.

4.5.2.4 Abu Doush, Pontelli, Simon, Son, und Ma (2009)

Abu Doush et al. (2009) nutzen Force-Feedback-Verfahren zur haptischen Realisierung von Linien-Graphen. Das System bietet neben einem passiven Modus, in dem der Benutzer durch den Graphen geführt wird und einem Zusammenfassungs-Modus, in dem der Graph generell beschrieben wird, einen Explorationsmodus, in dem der Benutzer den Linien-Graphen exploriert und sprachliche Assistenz anfordern kann. Die Assistenz umfasst eine Aussage darüber, ob der Benutzer die Linie des Graphen gefunden hat und welche numerischen Werte der nächstgelegene Datenpunkt aufweist.

Dieser Ansatz erkennt und analysiert die aktuelle Position des haptischen Interfacepunktes um auf Anforderung des Benutzers verbale Assistenz zu generieren. (Es wird u.a. mitgeteilt welchen Wert der nächstgelegene Datenpunkt hat.) Jedoch erfolgt diese Information ausschließlich auf Anforderung des Benutzers. Eine durch Ereigniserkennung gesteuerte Benutzerinteraktion liegt nicht vor, da das System nicht autonom assistiert.

4.5.2.5 Überblick über Systeme zur multimodalen Exploration von haptischen Linien-Graphen

Es existieren mehrere, zum Teil erfolgreich empirisch erprobte, Systeme zur multimodal unterstützten Exploration von Linien-Graphen. Eine Übersicht der Systeme ist in Tabelle 4.3 zusammengestellt.

Auffällig ist, dass bei der Mehrheit der Ansätze vor allem eine Information über die aktuelle Höhe (Y-Koordinate) des haptischen Interfacepunktes mittels Sonifikation oder, auf Anfrage des Benutzers, mittels sprachlicher Assistenz vermittelt wird. Dies lässt sich dadurch begründen, dass absolute räumliche Positionen in virtuellen haptischen Umgebungen schwer einschätzen lassen, siehe Abschnitt 3.3.

Trotzdem zeigen die Ansätze auch Möglichkeiten auf, sprachliche Assistenz zu nutzen, um Informationen nicht nur über die aktuell explorierte Stelle des Graphen zu geben, sondern auch auf den nächstgelegenen, beziehungsweise den zuletzt gesetzten Datenpunkt einzugehen. Ebenso wird auf das Überqueren der X-Achse im Rahmen von Sonifikation hingewiesen. Dies kann als eine eingeschränkte Form der Ereigniserkennung angesehen werden.

System	Haptische Realisierung	Sonifikation	Sprachliche Assistenz	Auslösung der sprachlichen Assistenz	Nutzung von Ereigniserkennung
Ramloll et al. (2000)	Force-Feedback	Frequenz moduliert durch Y-Koordinate Wechsel der Seite	Koordinaten	Eingabe des Benutzers (Klick)	eingeschränkt

		bei Überschreiten der X-Achse			
Yu et al. (2002)	Haptische Maus oder Force- Feedback	Frequenz moduliert durch Y- Koordinate	Wert des explorierten Balkens	Eingabe des Benutzers (Klick)	nein
Sjöström et al. (2003)	Haptische Maus oder Force- Feedback	Frequenz moduliert durch Y- Koordinate	Zuletzt gesetzter Punkt des Linien- Graphen Überblick über alle Punkte	Eingabe des Benutzers	eingeschränkt
Abu Doush et al. (2009)	Force- Feedback	-	Zusammenfassung des Graphen Wert des Nächstgelegenen Datenpunktes Finden der Graphen-Linie	Eingabe des Benutzers	nein

Tabelle 4.3: Überblick über Systeme zur multimodalen Exploration von haptischen Linien-Graphen.

4.5.3 Fazit

Audio-Haptik kann zur Kompensation der Nachteile der modalen Substitution des visuellen durch den haptischen Sinn genutzt werden. Bestehende Systeme wurden positiv in Benutzerstudien evaluiert und zeigen, dass dieser Ansatz erfolgreich eingesetzt werden kann. Die bestehenden Ansätze in der Literatur können in den Anwendungsdomänen der Karten und der Linien-Graphen entlang von zwei Dimensionen erweitert werden: Bestehende Systeme gehen vom „Benutzer als Bediener“ aus. Eine Erweiterung des Interaktionsparadigmas zu einem „mitdenkenden“ Assistenten benötigt als Grundlage Rasonieren über die stattfindende Exploration. Der erste Schritt hierzu ist eine leistungsstarke Ereigniserkennung.

Eine weitere Dimension, in der der bestehende State-of-the-Art erweitert werden kann, ist die Art der verbalen Assistenz. Mehr Kategorien von Informationen können helfen, die linienbasierte Graphik besser zu explorieren. Auch diese Erweiterung basiert auf einer leistungsstarken Ereigniserkennung. Mehr Informationen können auch vom „Benutzer als Bediener“ getriggert werden, aber je mehr der auditive Kanal genutzt werden soll, desto wichtiger ist eine zielführende und zur Explorationssituation passende Auswahl der verbalen Assistenz. Sprachliche Nachrichten, die, einmal ausgelöst, unabhängig der aktuellen Exploration abgespult werden, können eher verwirren als dem Nutzer weiterhelfen. Auch Wissen über die Vergangenheit der Exploration und berechtigte Annahmen über den weiteren Verlauf der Exploration (z.B. der Explorierende bewegt sich auf ein Ziel zu) können das zeitliche Fenster, in dem über ein Element in der Karte gesprochen werden kann, vergrößern.

Grundlage für diese Erweiterungen ist die Fähigkeit eines assistierenden Systems, die Exploration des Benutzers zu beobachten und im Kontext der linien-basierten Graphik zu analysieren. Ein System mit diesen Fähigkeiten wird in den folgenden Kapiteln 5 bis 8 vorgestellt.

Teil 2:
**Ereigniserkennung während
der Exploration haptischer
linien-basierter Graphiken**

5 Architektur zur Ereigniserkennung während haptischer Exploration linien-basierter Graphiken

5.1 Zielsetzung: Eine multimodale Interaktion während einer haptischen Exploration einer linien-basierten Graphik

Linien-basierte Graphiken können für blinde und sehbehinderte Menschen durch virtuelle Haptik als sensorische Substitution für die visuelle Wahrnehmung perzeptuell zugänglich gemacht werden (Kapitel 3). Multimodale Interaktion, durch die Ausgabe von sprachlichen Äußerungen oder nichtsprachlichen Tonsignalen, kann die haptische Exploration unterstützen und die Nachteile der sensorischen Substitution gegenüber der visuellen Wahrnehmung ausgleichen (Kapitel 4).

In diesem und den folgenden Kapiteln wird ein System vorgestellt, das eine audiohaptische Exploration von linien-basierten Graphiken auf Grundlage einer Wissensbasierten Ereigniserkennung ermöglicht, siehe (Kerzel & Habel, 2013; Kerzel & Habel 2012; Kerzel & Habel, 2011). Die Zielsetzung dabei ist es, den bestehenden State-of-the-Art dahingehend zu erweitern, dass die Exploration des Benutzers im Kontext der linien-basierten Graphik, ihrer Anwendungsdomäne und der bisherigen Exploration analysiert wird. Hierdurch wird die Grundlage für die Auswahl einer sprachlichen Assistenz im Sinne eines „Computers als Partner“ (Beaudouin-Lafon, 2004) realisiert, der proaktiv und situativ mit dem Benutzer interagiert. Diese situative Auswahl von verbalen Assistenzen ermöglicht es zudem, den State-of-the-Art dahingehend zu erweitern, dass ein größerer Umfang von möglichen Assistenzen genutzt werden kann (siehe Abschnitt 4.5.).

Um das Beobachten¹³ der Exploration, das Erkennen von Ereignissen und die Auswahl (oder Generierung) von Assistenz zu realisieren, müssen eine Reihe von Systemkomponenten konzeptualisiert, formal entwickelt und software-technisch implementiert werden. Diese Komponenten umfassen die gesamte audio-haptische Interaktion, von der automatisierten Erstellung haptischer Darstellungen bis hin zur multimodal begleiteten haptischen Exploration. Im Vordergrund steht dabei die Ereigniserkennung als eine Kernkomponente des assistierenden Systems. Folgende Designziele leiten die Konzeption und Entwicklung des Systems.

5.1.1 Wissensbasierte Verarbeitung

Ein Assistent, der eine audiohaptische Exploration ermöglicht, realisiert eine Abbildung von beobachteter Exploration auf verbale Äußerungen. Für die vorgestellte Architektur wird

¹³ *Beobachten* wird als ein in erster Linie perzeptueller Akt verstanden, während *Erkennen* als ein in erster Linie kognitiver Akt aufgefasst wird.

hierzu ein symbolischer, wissensbasierter Ansatz gewählt. Die beobachtete Exploration wird als Menge von Explorationsereignissen im Kontext der explorierten linien-basierten Graphik und ihrer Anwendungsdomäne konzeptualisiert. Auf Basis dieser explizit repräsentierten Explorationsereignisse wird schließlich eine geeignete Assistenz ausgewählt. Abbildung 5.1. zeigt diesen mehrstufigen Prozess.

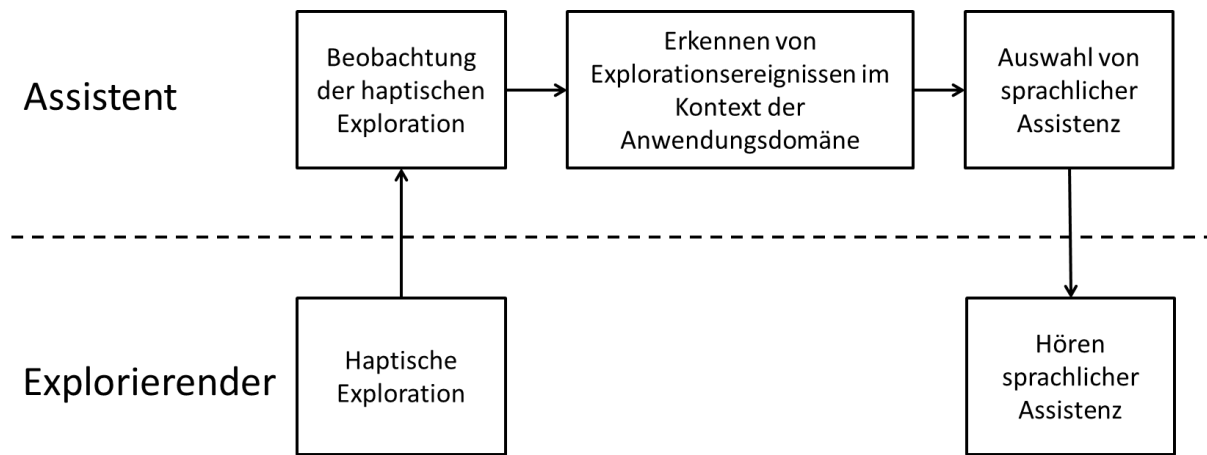


Abbildung 5.1: Ablauf einer audiohaptischen Exploration: Arbeitsschritte des Assistenten.

Das Erkennen und explizite Repräsentieren von Explorationsereignissen ermöglicht einen modularen Aufbau des Systems. Das Erkennen von Explorationsereignissen und das Auslösen oder Generieren von Assistenzen auf der Grundlage von Explorationsereignissen kann in zwei unabhängigen Komponenten realisiert werden. Explorationsereignisse dienen als Schnittstelle zwischen diesen Komponenten.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der für Ereigniserkennung notwendigen Wissensrepräsentation und Wissensverarbeitung. Diese umfasst symbolische Repräsentation von räumlichem und domänenspezifischem Wissen über die explorierte linien-basierte Graphik, symbolische Repräsentation von Explorationsereignissen, wissensbasierte Verarbeitung zum Erkennen von Explorationsereignissen im Kontext der explorierten linien-basierten Graphik und wissensbasierte Auswahl oder Generierung von multimodaler Assistenz.

5.1.2 Domänenunabhängigkeit

Das vorgestellte audiohaptische System ist anhand der konkreten Anwendungsdomänen der Straßenkarten und der Linien-Graphen entwickelt worden. Diese Domänen wurden gewählt, da sie linien-basierte Graphiken mit unterschiedlicher Geometrie und mit verschiedenen Explorationsmustern bieten. Trotzdem sind die vorgestellten Formalismen domänenunabhängig entworfen. Mit der im Folgenden vorgestellten Konzeption können linien-basierte Graphiken aus verschiedenen Anwendungsdomänen als audiohaptisch explorierbare Darstellungen realisiert werden.

Die Unabhängigkeit von einer konkreten Anwendungsdomäne wird dadurch realisiert, dass Repräsentation von linien-basierter Graphik und Anwendungsdomäne voneinander getrennt sind (siehe Kapitel 6).

5.1.3 Weitere Zielsetzungen

Neben den formalen und inhaltlich motivierten Anforderungen an das vorgestellte System, ergeben sich weitere Zielsetzungen durch den Einsatz des Systems in empirischen Forschungsprojekten und der Evaluation. Es soll zudem ein System entwickelt werden, das plausible Lösungen für audiohaptische Realisierungen aufzeigt, die in der Praxis genutzt werden können.

Automatisierte Vorverarbeitung: In Kapitel 4 wurden verwandte Arbeiten zu empirischen Versuchen mit haptischen oder multimodalen Repräsentationen vorgestellt. In einigen der Ansätze sind automatische und systematische Erzeugungsverfahren für die haptischen Darstellungen und die multimodale Assistenz eingesetzt worden. Dabei wurde die Wichtigkeit automatischer Erstellungsverfahren für die Forschungsfrage nach praktisch realisierbaren modalen Substitutionen für die visuelle Wahrnehmung betont. Daher ist die Automatisierung der notwendigen Vorverarbeitung ein weiteres Designziel des vorgelegten Systems. Dies umfasst unter anderem die Erzeugung von haptisch explorierbaren 3D-Umgebungen zur Darstellung von linien-basierten Graphiken und den Aufbau einer zum Teil domänenspezifischen Wissensbasis für die Ereigniserkennung.

Konzeption und Implementation als Gesamtsystem: Der Fokus der vorgestellten Arbeit liegt in der Wissensrepräsentation und Methoden der Wissensverarbeitung im Kontext der multimodalen Mensch-Computer-Interaktion. Diese Wissensrepräsentationen und wissensverarbeitenden Methoden sind in ein System eingebunden, welches alle Arbeitsschritte von der Eingabe einer linien-basierten Graphik bis hin zur multimodal unterstützten haptischen Exploration ermöglicht. Die Integration einzelner Komponenten zu einem Gesamtsystem und dessen Implementation sind notwendige Voraussetzungen, um empirische Studien durchzuführen, in deren Rahmen auch eine Evaluation des Systems stattfinden kann (siehe Kapitel 10). Zudem dient das realisierte System als *Proof of Concept* für die einzelnen entwickelten Komponenten, deren Funktionalität außerhalb eines Systems weniger gut untersucht und evaluiert werden kann.

5.2 System-Komponenten

Die Komponenten des Systems können in drei Gruppen aufgeteilt werden: Erstens gibt es mehrere Komponenten welche für die Eingabe und Vorverarbeitung von linien-basierten Graphiken aus verschiedenen Anwendungsdomänen zuständig sind. Die zweite Gruppe von Komponenten bildet den Hauptteil der Architektur, der zuständig ist für Wissensrepräsentation und Verarbeitung während der multimodalen Interaktion zum Zweck der Ereigniserkennung. Die dritte Gruppe von Komponenten ermöglicht die Interaktion mit

dem Benutzer durch haptische Darstellung und multimodale Systemreaktionen (siehe Abbildung 5.2).

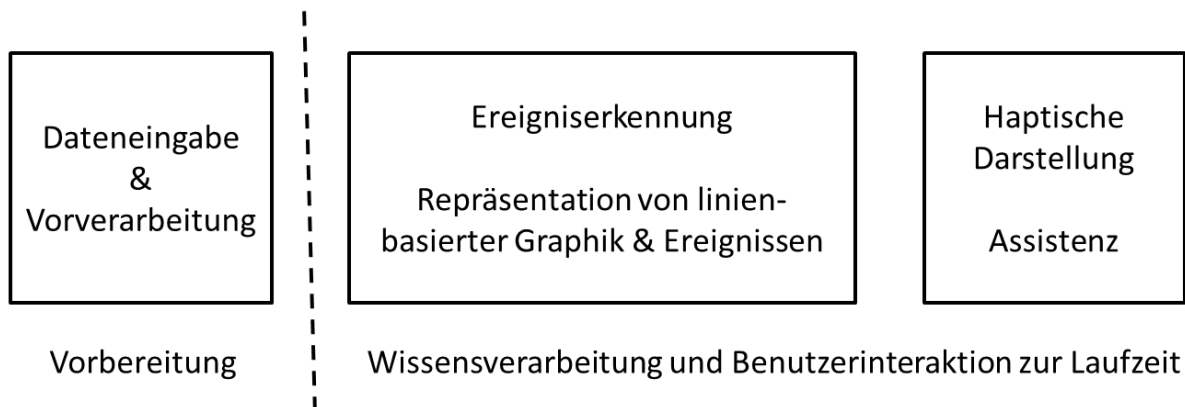


Abbildung 5.2: Gruppen von Systemkomponenten.

Benutzer interagieren mit dem System entweder in der Rolle dessen, der die audiohaptische Exploration nutzt, um Informationen zu erhalten oder in der Rolle des Gestalters einer solchen Interaktion. Dies sind die beiden sichtbaren Seiten des Systems. Der Explorierende wird die haptische Darstellung und die multimodale Assistenz wahrnehmen, während der Gestalter einer solchen Interaktion mit Werkzeugen zur Dateneingabe und Vorverarbeitung arbeiten wird. Die wissensverarbeitenden und –repräsentierenden Systemkomponenten, welche es erlauben, eingegebene Informationen für die haptische Interaktion aufzubereiten, die multimodale Interaktion während der Exploration zu steuern und zu diesem Zweck Explorationsereignisse zu erkennen, bilden den Hauptteil der Systemarchitektur.

Die Aufteilung der Architektur in diese drei Teile entspricht der Zielsetzung ein modulares System zu entwickeln, in dem sowohl die oft domänenspezifischen Komponenten zur Eingabe, Vorverarbeitung und sprachlichen Interaktion als auch die hardware-abhängigen Komponenten zur Realisierung der virtuellen Haptik austauschbar gestaltet werden. Abbildung 5.3 zeigt einen Überblick über die Systemkomponenten.

5.2.1 Komponente für Wissensverarbeitung und Ereigniserkennung

Die wissensverarbeitenden und –repräsentierenden Komponenten des Systems schaffen die Grundlage für ein Interaktionsparadigma, in welchem der Computer als selbständiger Assistent den Explorierenden beobachtet, um auf Grund dieser Beobachtungen geeignete Hilfestellungen zu geben. Wird eine haptische Exploration von einem menschlichen Beobachter visuell verfolgt, kann der Mensch Explorationsvorgänge erkennen, sie in einem Kontext der dargestellten linien-basierten Graphik interpretieren und auf dieser Basis Assistenz leisten. Der menschliche Beobachter würde nicht nur auf direkt beobachtbare Ereignisse reagieren, sondern auch auf Ereignisse, die erst durch eine Integration mehrerer Beobachtungen und Rückschlüsse auf die Historie der Exploration erkannt werden können.

Beispiele für solche komplexen Explorationsereignisse, die mittels geeigneter Wissensverarbeitung erkannt werden können, sind unter anderem das vollständige Explorieren von Linienzügen, welche spezielle Figuren bilden oder Objekte darstellen, Bewegungsmuster, wie das Passieren eines Abschnittes in einer Richtung oder auch die Feststellung, dass etwas nicht exploriert wurde, obwohl es im derzeitigen Explorationskontext relevant ist. Diese Beispiele setzen nicht nur die Möglichkeit voraus, die Exploration zu beobachten sondern auch die aktuellen Explorationsbewegungen in einem Kontext zu interpretieren und die Explorationshistorie mit einzubeziehen.

Die Ereigniserkennung beobachtet die Exploration in der virtuellen haptischen Umgebung, baut eine Wissensrepräsentation der beobachteten Exploration im Kontext der explorierten linien-basierten Graphik auf und schafft somit die Grundlage für die Interaktion mit dem Benutzer. Hierfür müssen mehrere Komponenten zusammenarbeiten:

Beobachtung der Exploration: Die haptische Exploration in der virtuellen haptischen Umgebung wird vom System beobachtet, dabei werden Basisereignisse detektiert. Dies sind direkt beobachtbare, qualitative Veränderungen in den Explorationsbewegungen des Benutzers, wie zum Beispiel das Eintreten oder Verlassen eines bestimmten Bereiches der Karte oder Veränderungen in der Bewegungsrichtung.

Wissensbasis der linien-basierten Graphik und der Historie der Explorationsereignisse: Grundlage für die Detektion von Basisereignissen ist eine mehrschichtige Repräsentation der explorierten linien-basierten Graphik. Sie erlaubt die Abbildung von einer Position in der virtuellen haptischen Umgebung auf diskrete Elemente der linien-basierten Graphik. Außerdem werden in dieser Wissensbasis geometrisches und domänenspezifisches Wissen für die Erkennung von Ereignissen repräsentiert. Die mehrschichtige Repräsentation wird in Kapitel 6 ausgeführt. Die gleiche Wissensbasis ist verantwortlich für die Speicherung von Ereignissen, die direkt beobachtet oder von der Ereigniserkennung erkannt werden.

Regelbasierte Erkennung von Ereignissen: Die Erkennung von Ereignissen nutzt ein regelbasiertes System zur Aggregation von Ereignissen. Dabei werden sowohl neu detektierte Ereignisse, bereits in der Historie gespeicherte Ereignisse und Wissen über die linien-basierte Graphik genutzt. In Kapitel 9 werden die interne Struktur und die genaue Funktionsweise der regelbasierten Ereigniserkennung erläutert.

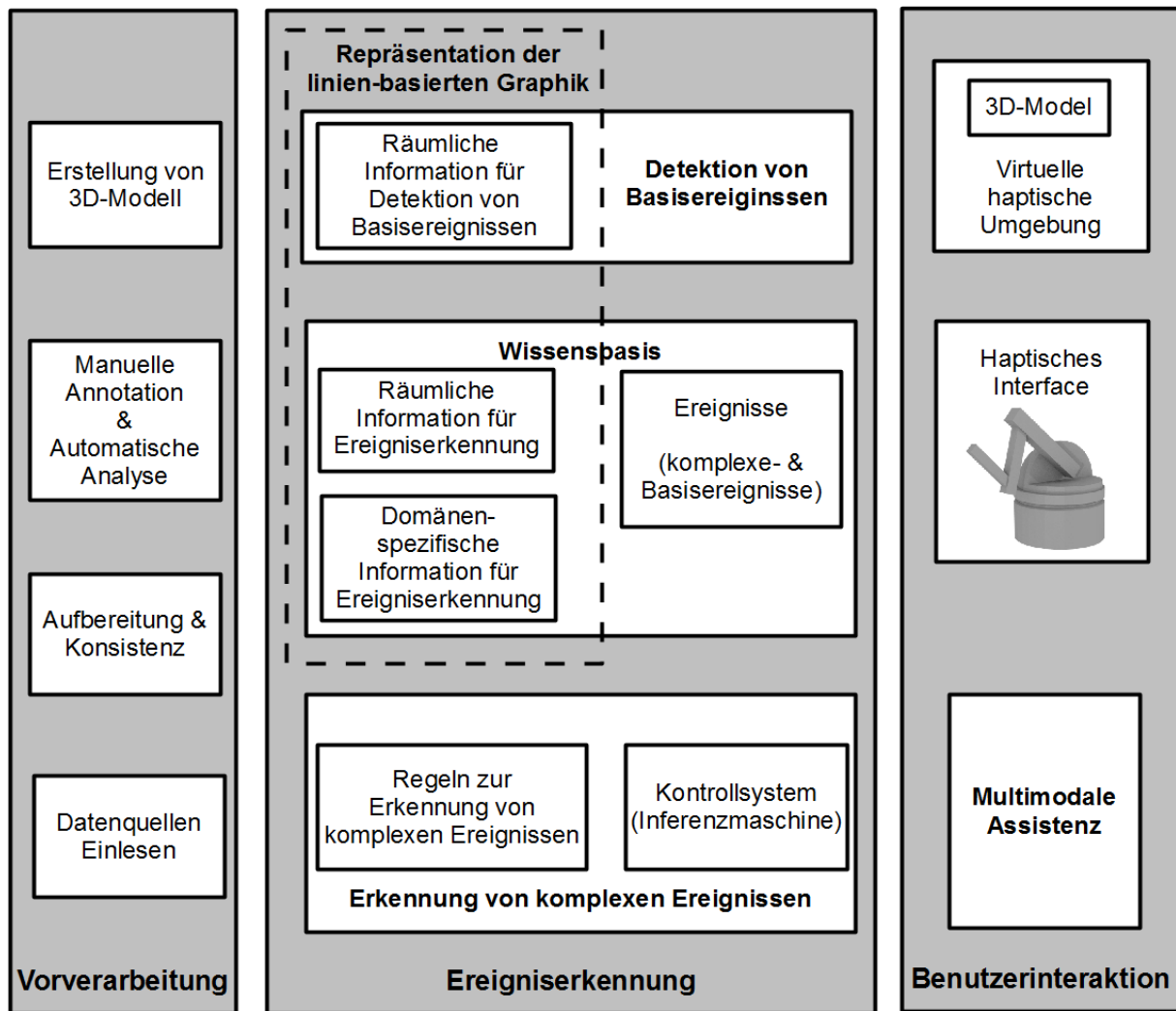


Abbildung 5.3: System-Komponenten.

5.2.2 Komponenten für Eingabe, Vorverarbeitung und Erstellung von Wissensbasen und 3D-Modellen

Die Gruppe der Komponenten zur Eingabe und Vorverarbeitung umfasst mehrere anwendungsspezifische Softwarewerkzeuge: Komponenten zum Einlesen und zur Vorverarbeitung von Daten, Werkzeuge zur Entwicklung haptisch multimodaler linien-basierter Graphiken aus verschiedenen Anwendungsdomänen, Komponenten zur manuellen Gestaltung der Interaktion und Komponenten zur automatischen Erzeugung von 3D-Modellen und Wissensbasen für die Ereigniserkennung und multimodale Interaktion. In Kapitel 7 sind diese Komponenten ausführlich beschrieben.

Einlesen von Daten (aus Fremdquellen): Der erste Schritt für die Erstellung einer haptisch multimodalen linien-basierten Graphik besteht im Einlesen der eigentlichen Liniengraphik. Je nach Datenquellen können in diesem Schritt bereits weitere Informationen wie zum Beispiel domänenspezifische Eigenschaften und Bezeichnungen von Elementen der linien-basierten Graphik mit verarbeitet werden. Als Datenquelle können entweder verschiedene Spezifikationen von linien-basierten Graphiken etwa XML-Dateien, Vektor- oder Pixel-

Graphiken sowie anwendungsdomänenspezifische Quellen wie geographische Datenbanken genutzt werden.

Aufbereitung von Daten für 3D-Modell-Aufbau: Haptische Realisierungen von linien-basierten Graphen unterliegen gegenüber visuellen linien-basierten Graphiken einigen Einschränkungen, wie zum Beispiel einem Mindestabstand einzelner Linien und Schnittpunkte. Daher kann es je nach Datenquelle notwendig sein, die eingelesenen Daten so aufzubereiten, dass eine haptische Realisierung der linien-basierten Graphik problemlos möglich ist. Ebenfalls in diesen Bereich fällt die Herstellung von Konsistenzeigenschaften in Bezug auf spezielle Anwendungsdomänen.

Automatische Analyse und manuelle Annotation der eingelesenen Daten: Bei der Erstellung eines haptischen 3D-Modells wird eine Wissensrepräsentation aufgebaut, welche die für die Ereigniserkennung notwendigen Informationen über die linien-basierte Graphik beinhaltet. Dies umfasst unter anderem qualitatives räumliches Wissen über die linien-basierte Graphik und domänenspezifische Informationen. Dieser Aufbauprozess ist domänenspezifisch und kann zum Teil automatisiert, zum Teil basierend auf manueller Annotation erfolgen. Bei der automatischen Analyse kommen unter anderem geometrische Prozeduren (Bischel, Stahovich, Peterson, Davis & Adler, 2009) zum Einsatz, die qualitative räumliche Relationen aus geometrischen Spezifikationen der linien-basierten Graphiken extrahieren.

Automatische Generierung von haptisch explorierbaren 3D-Modellen: 3D-Modelle für haptische Darstellungen unterliegen gegenüber 3D-Modellen für visuelle Darstellungen besonderen Anforderungen in Bezug auf die 3D-Geometrie (siehe Kapitel 7). Im Rahmen dieser Dissertation sind verschiedene Softwarewerkzeuge entstanden, welche unterschiedliche Arten von haptischen linien-basierten Graphiken realisieren können.

5.2.3 Komponenten für multimodale Interaktion

Die Komponenten für die multimodale Interaktion realisieren den sensorisch wahrnehmbaren Teil der Interaktion mit dem explorierenden Benutzer. Diese Komponenten umfassen im Einzelnen:

Haptische Interaktion und Visualisierung: Virtuelle haptische Interaktion mit Force-Feedback (siehe Kapitel 3) wird im Rahmen der vorgestellten Architektur von einer eigenständigen Software-Komponente realisiert, welche speziell auf die hohen Performanzanforderungen der haptischen Simulation ausgelegt ist. (Die Komponente kann neben der Darstellung des zu explorierenden 3D-Körpers auch haptische Effekte wie Reibung oder Vibration erzeugen.) Die genaue Funktionsweise einer Komponente zur Erzeugung virtueller Haptik ist in Kapitel 3 erläutert.

Eng verknüpft mit der virtuellen haptischen Simulation ist auch eine Visualisierung der Interaktion im virtuellen Raum. Diese erfüllt im skizzierten Interaktionsszenario keine Funktion, hat sich aber als wichtiges Hilfsmittel für die Durchführung und Auswertung von Versuchen und die Entwicklung von Anwendungen erwiesen.

Multimodale Interaktion: Die Komponente zur multimodalen Interaktion realisiert die Produktion von sprachlichen Äußerungen, in dem etwa ein zuvor eingesprochener Text abgespielt oder eine Text-to-Speech-Synthese genutzt wird. Darüber hinaus muss diese Komponente auch die Planung der eigentlichen Interaktion übernehmen, wozu die Auswahl und Priorisierung der Äußerungen sowie die Verwaltung von Warteschlangen von Äußerungen zählen. Alternativ kann diese Komponente auch statt sprachlicher Assistenz Tonsignale (Sonifikation) nutzen. Für die Sonifikation werden in Abhängigkeit von erkannten Explorationsereignissen nichtsprachliche Tonsignale erzeugt. Weitere Informationen, wie zum Beispiel die genaue Position in einem explorierten Graphen, kann genutzt werden, um die Sonifikation zu modulieren, etwa in dem die Tonhöhe mit dem y-Wert des Graphen variiert.

5.3 Anwendungsszenario: Audio-haptische linien-basierte Graphik aus der Anwendungsdomäne der Schulgeometrie

Das vorgestellte Interaktionsszenario beschreibt die Exploration einer linien-basierten Graphik aus dem Anwendungsgebiet der Geometrie. Dabei werden die während der Exploration erkannten Ereignisse und mögliche multimodale Systemreaktionen beschrieben.

Das explorierte haptische Modell und die entsprechenden Repräsentationen, welche eine multimodale Interaktion ermöglichen, sind bereits im Rahmen der Vorverarbeitung angelegt worden (siehe Kapitel 7). An Hand dieses Beispiels soll gezeigt werden:

- Welche perzeptuellen Eindrücke der Benutzer hat, und welche Informationen im Gegensatz zur visuellen Betrachtung möglicherweise fehlen.
- Welche Explorationsereignisse während der haptischen Erkundung stattfinden und beobachtet beziehungsweise erkannt werden können.
- Und schließlich wie (in diesem Beispiel verbale) multimodale Interaktion auf Basis der erkannten Ereignisse genutzt werden kann, um dem Benutzer mehr Informationen zu geben.

Als Beispiel für die dargestellte linien-basierte Graphik in diesem Szenario wurde eine einfache geometrische Figur gewählt, die den Satz des Pythagoras illustriert. Ähnliche Abbildungen werden unter anderem im schulischen Geometrieunterricht genutzt. Dieses Beispiel wurde gewählt, da es überschaubar ist und trotzdem komplexe Explorationsereignisse zulässt. Der Satz von Pythagoras wird an dieser Stelle als ein leicht zugängliches Beispiel für die Möglichkeiten multimodaler haptischer Interaktion und Ereigniserkennung gewählt. Da der Satz von Pythagoras zu einem der bekanntesten Lehrsätze aus der Schulmathematik gehört, sind wenig zusätzliche Erläuterungen notwendig. In realen empirischen Versuchen, wurden jedoch für die Versuchspersonen unbekannte Darstellungen mit einer größeren Komplexität genutzt, vergleiche (Lohmann, Kerzel & Habel 2012).

5.3.1.1 Perzeption bei der haptischen Exploration

Gegenüber visueller Wahrnehmung ist haptische Wahrnehmung durch ihre lokale und sequentielle Natur benachteiligt. Dieser Nachteil zeigt sich bereits bei der Betrachtung einfacher linien-basierter Graphiken. Der Betrachter nimmt dabei lokale haptische Features, wie Linienabschnitte und Punkte an denen Linien sich treffen, wahr.

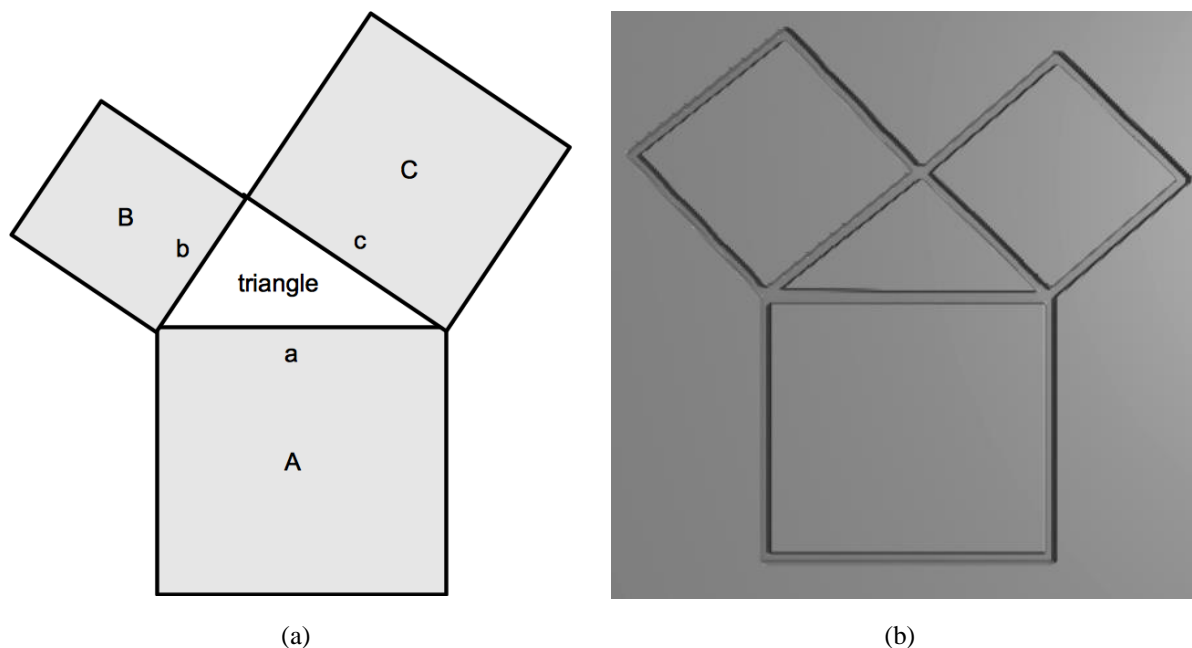


Abbildung 5.4: (a) Visuelle Darstellung des Satzes von Pythagoras, wie u.a. im schulischen Geometrieunterricht genutzt.
(b) 3D-Modell für virtuelle haptische Exploration.

Abbildung 5.4 (a) zeigt eine visuelle Darstellung der Illustration zum Satz des Pythagoras, Abbildung 5.4 (b) eine haptische Realisierung dieser Abbildung in der Linien durch Rillen dargestellt sind. Bei der visuellen Betrachtung dieser geometrischen Figur wird ein Betrachter unmittelbar in der Lage sein, individuelle geometrische Figuren zu erkennen, voneinander zu unterscheiden und zu lokalisieren. Während einer haptischen Exploration hingegen muss jeder einzelne Teil der geometrischen Figuren erkundet und erst in einem zweiten Schritt zu einer Figur zusammengesetzt werden. Eine haptische Exploration beginnt daher mit der Wahrnehmung einzelner Linien und der Konfigurationen, welche diese Linien an den Punkten bilden, an denen sie aufeinander treffen. Abbildung 5.5 (b) zeigt eine Folge von Explorationsbewegungen in der haptischen Realisierung, die dazu korrespondierende Tabelle 5.1 zeigt welche einzelnen haptischen Eindrücke bei der Exploration entstehen – eine Folge von geraden Strecken und „Ecken“ an denen diese Strecken aufeinander treffen.

5.3.1.2 Multimodale Assistenz bei der haptischen Exploration

Um Benutzer bei der haptischen Exploration, insbesondere bei der Integration der einzelnen wahrgenommenen Einzelheiten, zu unterstützen und die Probleme, die durch die Sequenzialität und Lokalität der Exploration entstehen, zu überwinden, können verschiedene

multimodale Systemreaktionen genutzt werden. In diesem Szenario wird die haptische Exploration durch sprachliche Hinweise unterstützt. Auf technischer Ebene sind einzelne sprachliche Äußerungen an das Erkennen von Explorationsereignissen geknüpft. Im vorangegangenen Abschnitt wurde skizziert, wie eine solche multimodale Interaktion entwickelt werden kann. In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, wie Ereigniserkennung genutzt werden kann, um eine multimodale Interaktion zu realisieren. Verwandte Ansätze (vergleiche Kapitel 4) knüpfen multimodale Interaktion ausschließlich an das Berühren von Objekten in der virtuellen haptischen Umgebung. In diesem Szenario wird gezeigt, dass erst eine komplexe Ereignisverarbeitung bestimmte Arten der multimodalen Interaktion realisieren kann.

Inbesondere in virtuellen haptischen Umgebungen, in denen sich mehrere Objekte überlappen, also gemeinsame Punkte oder Linien haben, ist das Erkennen von Explorationsereignissen unter Berücksichtigung der Explorationshistorie – also der bereits erkannten Explorationsereignisse – notwendig, um zu erkennen welches Element einer linienbasierten Graphik im Augenblick im Fokus der haptischen Exploration des Benutzers steht und somit auch im Fokus einer multimodalen Interaktion stehen sollte.

An dem Beispiel der Exploration des mittleren Dreiecks der haptischen Realisierung der Illustration des Satzes von Pythagoras, soll gezeigt werden, welche Explorationsereignisse auftreten und wie diese an multimodale Assistenz gekoppelt werden können. Die visuelle Darstellung des Satzes von Pythagoras besteht aus einem Dreieck und drei Quadraten, welche jeweils über den Seiten des Dreiecks gebildet werden. Die Abbildung illustriert die Tatsache, dass die Fläche des Quadrates über der Hypotenuse gleich der Summe der Flächen der Quadrate über den beiden anderen Seiten des Dreiecks ist. In einer virtuellen haptischen Realisierung, welche zum Beispiel im Geometrieunterricht für blinde Schüler eingesetzt werden könnte, sind die Linien durch vertiefte Rillen dargestellt. Das Dreieck und die Quadrate werden exploriert, in dem der Benutzer dem Verlauf der Rillen folgt und so die Form, Lage und Größe der geometrischen Figuren erkundet.

Die erkannten Ereignisse sind sowohl vom Typ der prozesshaften Ereignisse (extended events - ausgedehnte Ereignisse) als auch momenthafte Ereignisse (non extended event - nicht ausgedehnte Ereignisse). Das Hauptaugenmerk liegt in diesem Beispiel auf dem Erkennen ausgedehnter Ereignisse. Im Beispiel soll verdeutlicht werden, dass ausgedehnte Ereignisse eine komplexe interne Struktur haben können, da sie aus mehreren kürzeren Ereignissen zusammengesetzt sind. Zum Erkennen dieser Ereignisse muss die Explorationshistorie bedacht werden. Dies ist möglich, da das assistierende System nicht nur Zugriff auf die räumlichen und domänenspezifischen Informationen über die haptische Repräsentation sondern auch über die im Rahmen der Interaktion stattgefundenen Explorationsereignisse hat. Abbildung 5.5 (b) zeigt eine Folge von Explorationsbewegungen, Tabelle 5.1 beschreibt die einzelnen Schritte dieser Explorationsbewegungen.

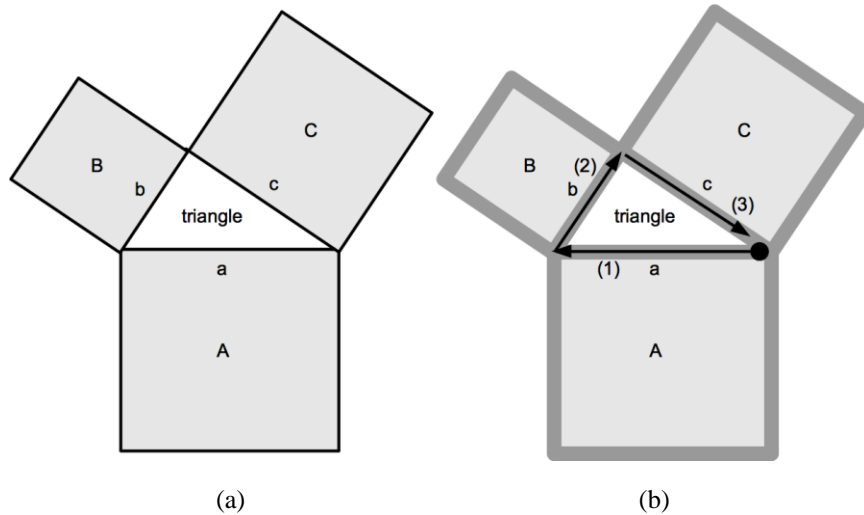


Abbildung 5.5: Visualisierung einer haptischen Exploration der haptischen Darstellung des Satzes von Pythagoras. (a) zeigt die explorierte Liniengraphik. (b) zeigt eine 2D-Visualisierung des haptischen 3D-Modells. Linien (dunkel grau) sind als Rillen realisiert und können so verfolgt werden. Die schwarzen Pfeile entsprechen Explorationsbewegungen auf die im Text Bezug genommen wird.

	Explorationsbewegung	Erkannte Ereignisse	Mögliche Assistenz
(a)		Begin der Exploration der Hypotenuse.	Dies ist die untere rechte Ecke eines rechtwinkligen Dreiecks
(b)		Laufende Exploration der Hypotenuse.	Dies ist die Hypotenuse des Dreiecks. Die verfolgte Linie ist auch die Seite eines Quadrates über der Hypotenuse.
(c)		Vervollständigung der Exploration der Hypotenuse und Beginn der Exploration der Seite b des Dreiecks.	Die Hypotenuse ist vollständig exploriert. Dies ist die untere linke Ecke des Dreiecks.
(d)		Laufende Exploration der Seite b des Dreiecks.	Dies ist die linke Seite des Dreiecks. Sie ist auch Teil eines Quadrates über dieser Seite.
(e)		Vervollständigung der Exploration der Seite b und Beginn der Exploration der Seite c.	Die linke Seite des Dreiecks ist vollständig exploriert. Dies ist die obere Ecke des Dreiecks.
(f)		Laufende Exploration der Seite c.	Dies ist die rechte Seite des Dreiecks. Sie ist auch Teil eines Quadrates über dieser Seite.


(g)		Vervollständigung der Exploration der Seite c und somit auch Vervollständigung der Exploration des Dreiecks.	Das Dreieck wurde vollständig exploriert. Der Explorationsvorgang ist wieder an der rechten unteren Ecke des Dreiecks angelangt.
-----	-----------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabelle 5.1: Einzelne Abschnitte während der Exploration aus Abbildung 5.5. (b), erkannte Explorationsereignisse und mögliche verbale Assistenz.

(a)(b)(c) Eine Linie wird exploriert. Sie ist gleichzeitig die Hypotenuse des rechtwinkligen Dreiecks als auch die Seite des Quadrates über der Hypotenuse. Die Explorationsbewegung ist daher Teil von zwei ausgedehnten Explorationsereignissen: Der Exploration des Dreiecks und des Quadrates über der Hypotenuse.

(c)(d)(e) Die nächste Explorationsbewegung folgt einer weiteren Seite des Dreiecks. Diese Seite des Dreiecks ist wiederum die Seite eines anderen Quadrates. Der Explorationsprozess des einen Quadrates wurde also beendet und ein neuer Explorationsprozess in Bezug auf ein anderes Quadrat begonnen. Der Explorationsprozess des Dreiecks wird hingegen fortgesetzt.

(e)(f)(g) Die dritte Explorationsbewegung endet dort, wo die Exploration begonnen hat, in der rechten unteren Ecke des Dreiecks. Derartige Informationen über Zyklen in den Explorationsbewegungen oder bereits erkundete Teile der linien-basierten Graphik sollten durch multimodale Interaktion vermittelt werden, da sie haptisch schwierig zu perzipieren sind.

In diesem Beispiel kommen sowohl ausgedehnte Explorationsereignisse, wie die Exploration einer Seite eines Dreiecks, als auch nicht ausgedehnte Explorationsereignisse, wie das Erreichen des Startpunktes der Exploration vor. Mehrere Eigenschaften von Explorationsereignissen werden an diesem Beispiel deutlich:

- Explorationsereignisse sind nicht eindeutig in Bezug auf ihre Beschreibungen. Die erste längere Explorationsbewegung aus Abbildung 5.5 (b) kann sowohl beschrieben werden als „*Exploration der Hypotenuse des Dreiecks*“ als auch als „*Exploration der oberen Seite eines Quadrates*“.
- Explorationsereignisse haben eine hierarchische Struktur. Die Explorationsbewegungen entlang der Seiten des Dreiecks kann auch zur „*Exploration des Dreiecks*“ zusammengefasst werden. Diese „*Exploration des Dreiecks*“ besitzt eine komplexe interne Struktur, sie ist aus drei ausgedehnten Explorationsereignissen aufgebaut.
- Explorationsereignisse können sich zeitlich überlappen. Die Exploration des Dreiecks überlappt zum Beispiel zeitlich mit der Exploration der Seiten der Quadrate.

Die konkreten verbalen Äußerungen, welche an die Explorationsereignisse gekoppelt werden und insbesondere die Präzedenz dieser Äußerungen, also die Reihenfolge in welcher sie dem Explorierenden präsentiert werden, muss für jede Anwendungsdomäne speziell entwickelt

werden. In dem oben gezeigten Beispiel kann die Explorationshistorie genutzt werden, um diese Entscheidung zur Laufzeit zu beeinflussen: Es treten mehrere Explorationsereignisse auf, welche verschiedene Interpretationen zulassen. So kann zum Beispiel festgelegt sein, dass für die multimodale Assistenz zum Satz des Pythagoras das Dreieck vor einem Quadrat genannt werden soll. Eine mögliche Assistenz könnte sein: *„Du explorierst die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks. Diese Hypotenuse ist auch die Seite eines Quadrates.“* Ein anderes Beispiel könnte eine Regel für das zweite Explorationsereignis sein, welche besagt, dass einem fortgesetzten Explorationsereignis, also der Exploration des Dreiecks, der Vorzug vor einem neuen Explorationsereignis gegeben werden soll. Eine entsprechende Assistenz könnte lauten: *„Du setzt die Exploration des Dreiecks an der linken Seite fort. Diese Seite ist ebenfalls die Seite eines Quadrates.“*

5.4 Informationsfluss und Repräsentationen

In Abschnitt 5.2 sind die Komponenten des Systems und ihre Aufgaben innerhalb der Architektur vorgestellt worden. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Komponenten genauer betrachtet und insbesondere der Informationsfluss zwischen ihnen beschrieben. Eine besondere Rolle spielen dabei die verwendeten Wissensrepräsentationen von linien-basierten Graphiken und Ereignissen. Diese Repräsentationen bilden die Grundlage für wissensverarbeitende Prozesse zur Ereigniserkennung und Interaktionssteuerung.

Abbildung 5.6 zeigt den Fluss der verschiedenen Informationen innerhalb der Architektur. Im Folgenden werden die einzelnen Informationsströme beschrieben:

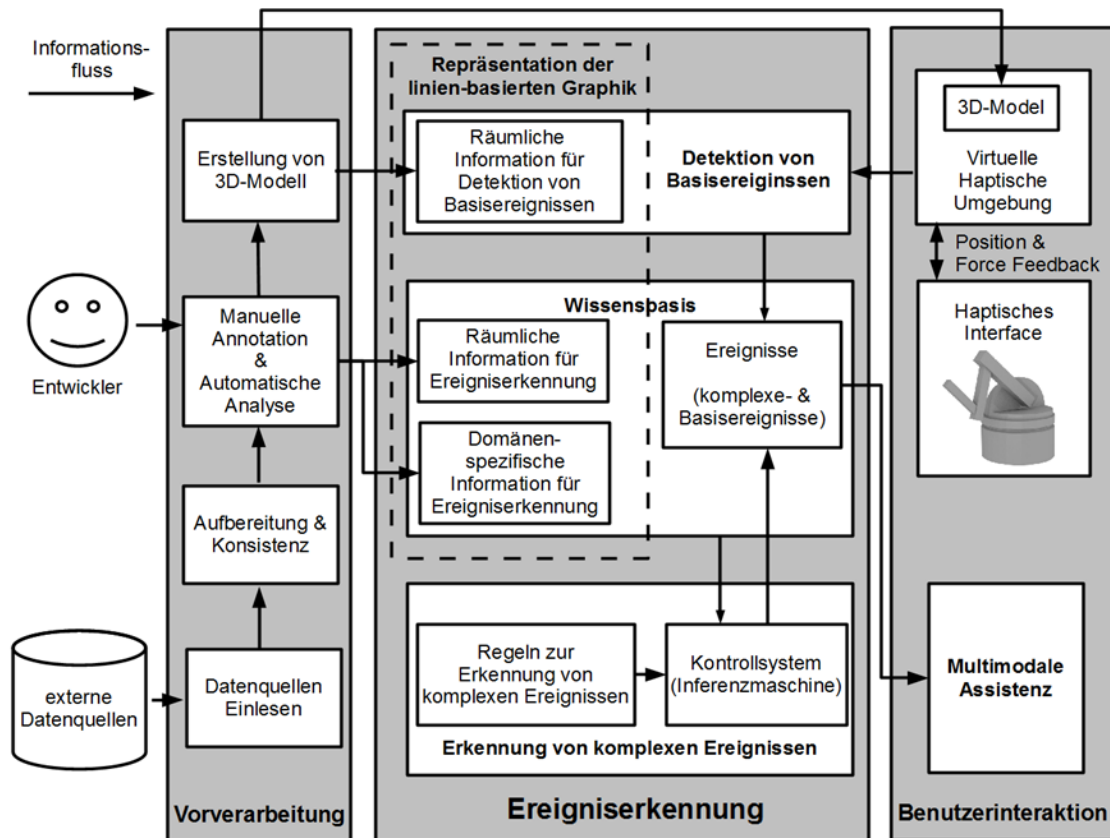


Abbildung 5.6: Informationsfluss in der Architektur zur Ereigniserkennung.

5.4.1 Vorverarbeitung

Datenquellen einlesen, Aufbereitung und Konsistenz: Bei der Vorverarbeitung werden Informationen aus einer *Datenquelle* extrahiert, diese Informationen umfassen die *Geometrie der linien-basierten Graphik* und optional *domänenspezifisches Wissen über die Elemente der linien-basierten Graphik*, wie zum Beispiel Eigennamen. Die aus den Datenquellen eingelesenen Daten werden gegebenenfalls unter Erhaltung der relevanten räumlichen Eigenschaften auf Konsistenz geprüft und entsprechend aufbereitet. Als Datenquelle können verschiedene Medien von Pixelgraphiken bis hin zu geographischen Datenbanken genutzt werden.

Erstellung der internen Repräsentation der linien-basierten Graphik: Aus den aufbereiteten Daten der Datenquelle wird durch *automatische Analyse* eine interne Repräsentation der linien-basierten Graphik erstellt. Sie verfügt über mehrere Schichten: Eine propositionale Schicht wird in der Wissensbasis der Ereigniserkennung genutzt, um Ereignisse zu erkennen. Diese propositionale Schicht umfasst sowohl räumliches als auch domänenspezifisches Wissen. Eine geometrische Schicht wird genutzt, um mit automatisierten Analyseprozessen weiteres relevantes räumliches Wissen abzuleiten und den propositionalen Schichten hinzuzufügen.

Optional kann während dieses Prozesses eine manuelle Annotationen der linien-basierten Graphik vorgenommen werden, um besondere Abschnitte oder Punkte festzulegen, Elementen

Eigennamen oder domänenrelevante Eigenschaften zuzuschreiben oder weitere Optimierungen für die audiohaptische Exploration vorzunehmen.

Erstellung von 3D-Modellen: Aus den aufbereiteten und konsistenten Daten der Datenquelle wird ein *3D-Modell der linien-basierten Graphik* erstellt, welches zur Laufzeit in der *virtuellen haptischen Umgebung* exploriert wird. Da das haptisch explorierbare 3D-Modell, in dem Linien als ausgedehnte Rillen dargestellt werden, und die eigentliche Liniengeometrie, in der Linien keine Breite haben, nicht geometrisch kongruent sind, wird eine weitere Repräsentationsebene der linien-basierten Graphik benötigt, um eine Abbildung der Ebenen aufeinander zu ermöglichen. Diese Repräsentation wird während der Erstellung des 3D-Modells erzeugt und an die Komponente zur Detektion von Basisereignissen gegeben.

5.4.2 Ereigniserkennung

Detektion von Basisereignissen: Die Position des haptischen Interaktionspunktes in der Virtuellen haptischen Umgebung wird durch die Komponente zur Detektion von Basisereignissen analysiert. Erkannte *Basisereignisse* werden in die Wissensbasis der Ereigniserkennung eingefügt.

Erkennung von komplexen Ereignissen: Komplexe Ereignisse werden erkannt, indem eine regelbasierte Inferenzmaschine Ereignisse inkrementell zu komplexeren Ereignissen aggregiert. Erkannte komplexe Ereignisse werden der Wissensbasis hinzugefügt. Das regelbasierte System greift dabei auf alle Anteile der Wissensbasis zu: Räumliches und domänenspezifisches Wissen sowie detektierte Basisereignisse und erkannte komplexe Ereignisse werden genutzt, um komplexe Ereignisse zu erkennen. Das regelbasierte System ist dadurch in der Lage, iterativ komplexer werdende Ereignisse zu konzeptualisieren. Ein Satz von Regeln steuert das Erkennen von Ereignissen. Erkannte Ereignisse bilden die Grundlage, um die multimodale Interaktion zu steuern. Eine formale Beschreibung für die Repräsentation von Ereignissen ist in Kapitel 8 dargestellt.

5.4.3 Benutzerinteraktion

Virtuelle haptische Umgebung: Die virtuelle haptische Umgebung berechnet die physikalische Interaktion zwischen dem haptischen Interfacepunkt und dem 3D-Modell der explorierten linien-basierten Graphik. Der haptische Interfacepunkt wird durch ein haptisches Interface gesteuert, durch das auch die Darstellung der berechneten physikalischen Kräfte erfolgt. Zudem wird eine graphische Darstellung der Interaktion zwischen HIP und 3D-berechnet, welche optional zur Versuchskontrolle oder Protokollierung genutzt werden kann.

Während der haptischen Exploration werden kontinuierlich Positionsdaten vom haptischen Interface über die virtuelle haptische Umgebung an die Detektion von Basisereignissen geliefert.

Multimodale Assistenz: Die Komponente zur verbalen Assistenz greift auf Ereignisse aus der Wissensbasis des Systems zu, um multimodale Assistenz zu generieren. Die Ereignisse aus

der Wissensbasis werden mit Assistenzen verknüpft. Dabei kann der Status von Ereignissen genutzt werden, um zum Beispiel zu unterscheiden, ob Explorationsbewegungen aktuell anhalten oder bereits in der Vergangenheit stattgefunden haben. Je nach Aufbau der Komponente zur multimodalen Assistenz kann es notwendig sein, eine Übersetzungskomponente vorzuschalten, welche die Assistenzkomponente auf Grundlage der erkannten Ereignisse steuert. In Kapitel 10 werden zwei unterschiedliche Komponenten zur multimodalen Assistenz vorgestellt.

5.4.4 Optional: Protokollierung der audiohaptischen Interaktion

Im Rahmen von Versuchen kann es notwendig sein, Daten bezüglich der Exploration zu erheben, welche der späteren Auswertung dienen. Daten zur Versuchsauswertung können verschiedene Teile der Interaktion dokumentieren. Gemeinsam haben sie, dass sie für das Ablaufen der haptisch-multimodalen Interaktion selbst nicht notwendig sind, sondern ausschließlich protokollierenden Charakter haben.

Screenrecording: Eine Visualisierung der haptischen Interaktion ermöglicht es, ein Screenrecording der Exploration aufzunehmen, in dem visuell die haptische Exploration nachvollzogen werden kann. Zusätzlich bietet ein Screenrecording die Möglichkeit, die Audio-Assistenz aufzuzeichnen. Für die Auswertung von Explorationen ist dies ein wichtiges Werkzeug.

Heatmap: Der Verlauf einer haptischen Exploration kann durch eine Heatmap zu einem einzelnen Bild zusammengefasst werden, welches anzeigt, welche Areale der linien-basierten Graphik, wie intensiv exploriert worden sind. Abbildung 5.7 zeigt die Heatmap zu einer haptischen Exploration eines Linien-Graphen.

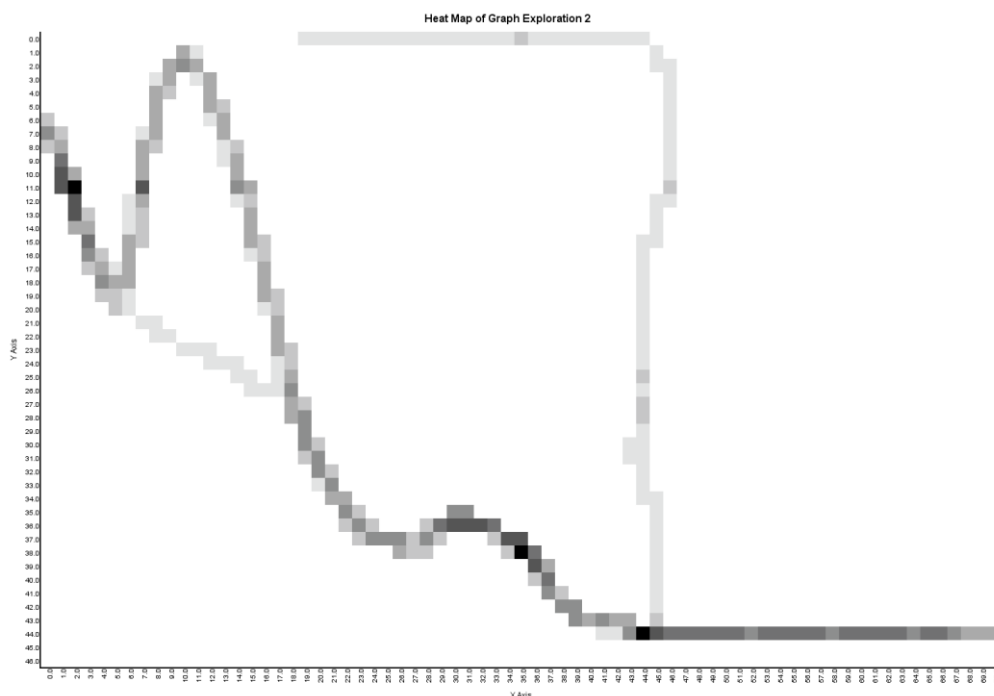


Abbildung 5.7: Heatmap der haptischen Exploration eines Linien-Graphen.

Trace of Events & Trace of Interaction: Auf der qualitativen Ebene ist es möglich ein zeitlich datiertes Ablaufprotokoll der erkannten Explorationsereignisse und der erfolgten Interaktionsereignisse aufzuzeichnen.

5.5 Softwaretechnische Realisierung und genutzte Hardware

Ziel der vorgestellten Forschung ist es, Grundlagen für multimodale haptische Interaktion zu erforschen und zu schaffen. Die entwickelten Konzepte und wissensverarbeitenden Methoden werden in den folgenden Kapiteln formal beschrieben und sind unabhängig von konkreten Implementationen, Betriebssystemen oder Hardware. Während der Entwicklung der vorgestellten Architektur wurde jedoch deutlich, dass an mehreren Stellen Verarbeitungsschritte notwendig sind, welche eine hohe Zeitkomplexität mit sich bringen. Für eine benutzergerechte multimodale haptische Interaktion ist die Echtzeitfähigkeit des Systems entscheidend. Eine sorgfältige Auswahl und Umsetzung von Algorithmen sowie die Wahl geeigneter Hardware sind daher notwendige Anforderungen für die Erstellung von benutzbaren Prototypen für empirische Versuche. In mehreren Kooperationen (Lohmann, Kerzel & Habel, 2012; Alaçam, Habel & Acartürk, 2013) bestand das Interesse an der Ereigniserkennung nicht nur auf theoretischer Ebene, sondern zielte auf die konkrete Durchführung von empirischen Versuchen ab.

5.5.1 Softwaretechnische Realisierung

Die softwaretechnische Realisierung wurde überwiegend in der Sprache JAVA vorgenommen. Dazu wurde für die regelbasierte Wissensverarbeitung das Programmpaket Drools genutzt, welches sich neben seinen formalen Eigenschaften auch durch seine gute Integrierbarkeit in JAVA auszeichnet. JAVA eignet sich als Sprache zur Umsetzung der wissensverarbeitenden Komponenten gut, da das objektorientierte Programmierparadigma von JAVA mit Hilfe von Drools, eine formal eindeutige und zugleich effiziente Verwaltung von Wissensbasen erlaubt (siehe Kapitel 8).

Weiterer Vorteil der Sprache Java ist Plattformunabhängigkeit. Auch wenn die verwendete Treibersoftware der haptischen Ein-/Ausgabegeräte zurzeit nur für bestimmte Betriebssysteme vorliegen, ist die Software mit dem Ziel entwickelt worden die Kernkomponenten strikt plattformunabhängig zu entwickeln.

Die besonders zeitkritische Berechnung der Interaktion in der virtuellen haptischen Umgebung wurde basierend auf der Programmbibliothek CHAI-3D (Conti, Barbagli, Morris & Sewell, 2005) in der Sprache C++ umgesetzt. Ebenfalls in C++ wurde die dazugehörige

graphische Visualisierung des Explorationsvorgangs mit der Bibliothek OpenGL¹⁴ implementiert.

Beide Teile des Systems sind über ein Java Native Interface miteinander verbunden, in dem die haptische Interaktion als externe Bibliothek fungiert. Der Bruch in den Sprachen findet an einer Stelle statt, die durch ein möglichst klares Interface definiert ist. Der für die Haptik verantwortliche Teil der Architektur kann so problemlos ausgetauscht werden. Tabelle 5.2 zeigt in welchen Sprachen verschiedene Teile der Software realisiert sind.

JAVA	C++
Rahmenwerk der Architektur	Haptik Berechnungen, basierend auf Bibliothek CHAI-3D
Objektorientierte Regelbasierte Wissensverarbeitung, basierend auf DROOLS	Visualisierung, basierend auf Bibliothek OpenGL
MARY – Text to Speech Synthese	

Tabelle 5.2: Software Realisierung und genutzte Bibliotheken.

5.5.1.1 Engpässe in der Verarbeitung

Die Echtzeitfähigkeit der haptischen Simulation und der multimodalen Interaktion besitzt eine hohe Priorität, um ein benutzerfreundliches Arbeiten mit dem System zu ermöglichen. Diese Anforderung betrifft insbesondere die Komponenten für die Ereigniserkennung und die gesamte Haptik-Komponente. Sie bilden die beiden wesentlichen Engpässe in der Verarbeitung.

Ereigniserkennung als Wissensverarbeitung setzt das Verarbeiten eines schnellen Stroms von Positionsdaten, die Verwaltung einer großen Wissensbasis mit statischem, räumlichem und veränderlichem Wissen über Explorationshistorie und einer relativ großen Anzahl komplexer Muster für Ereigniserkennung voraus. Ein regelbasiertes System kann diese Anforderung mit Hilfe spezieller Algorithmen bewältigen, dies ist genauer in Kapitel 9 beschrieben.

Für die Haptik-Komponente ist insbesondere eine schnelle Kollisionsberechnung für realistisches und benutzerfreundliches haptisches Feedback notwendig. Siehe Kapitel 3 für weitere Details.

Im Gegensatz zur Verarbeitung während der laufenden Interaktion unterliegt die Vorverarbeitung keinen zeitlichen Einschränkungen. Daher spielt für die einzelnen

¹⁴ <https://www.opengl.org/>

vorverarbeitenden Komponenten die Laufzeit der genutzten Algorithmen eine untergeordnete Rolle.

5.6 Versuchsaufbau

Ein typischer Versuchsaufbau besteht aus einem Versuchsrechner, an dem die Versuchsperson mittels eines Phantom-OMNI-Gerätes eine linien-basierte Graphik haptisch exploriert. Soll die Versuchsperson ihre visuelle Wahrnehmung bei der Versuchsdurchführung nicht benutzen, so kann dazu eine Augenbinde getragen werden. Auch wenn die Visualisierung der haptischen Interaktion in der virtuellen Umgebung nicht einsehbar ist, kann eine Versuchsperson die eigenen Bewegungen mit dem Phantom visuell verfolgen, dies kann durch eine Augenbinde vermieden werden. Besonders bei längerer Benutzung des haptischen Interfaces bietet es sich an, ergonomische Polster für den Benutzer anzubieten.

Die Versuchssoftware läuft auf einem handelsüblichen Windowsrechner (oder auch einem I-Mac mit entsprechendem Betriebssystem). Der Rechner muss über eine Soundausgabe verfügen, welche die Versuchsperson in der Regel über einen Kopfhörer wahrnimmt. Der Versuchsleiter verfolgt die Exploration visuell und kann so bei möglichen Problemen Hilfestellung anbieten.

In der praktischen Versuchsdurchführung ist es oft wichtig, für die spätere Auswertung der erhobenen Versuchsdaten, Bild und evtl. Tonmitschnitte einer Exploration und gegebenenfalls einer multimodalen Assistenz zu machen. Ein solcher Mitschnitt lässt sich per Software auf dem eigentlichen Versuchsrechner durchführen.

5.6.1 Haptisch virtuelle Versuchsanordnung

In der virtuellen haptischen Umgebung wird das 3D-Modell in einer virtuellen Versuchsumgebung so eingebettet, dass eine möglichst benutzerfreundliche und fehlerarme Exploration möglich ist: Primär wird eine Ebene mit Vertiefungen, den Linien der linien-basierten Graphik, exploriert. Diese Ebene wird auch als Explorationskörper bezeichnet. Die Ebene wird so in der virtuellen Umgebung platziert, dass sie parallel zur Tischplatte liegt. Dies hat gegenüber einer senkrechten Positionierung den Vorteil, dass Bewegungen in alle Richtungen den gleichen (geringen) Kraftaufwand für den Benutzer bedeuten. Zudem wird der Explorationskörper so in der virtuellen Umgebung positioniert, dass er möglichst niedrig liegt. Dies erlaubt eine ergonomisch angenehme Exploration, da der Ellenbogen des Explorierenden auf einer gepolsterten Unterlage abgelegt werden kann. Die Exploration findet durch Bewegungen des Unterarms und der Hand statt. Diagonale oder waagerechte Positionierung der Explorationsebene führen hingegen zu einer Variante des als „Gorillaarm“ bekannten Effektes, bei dem das ständige Anheben des Arms, für die Benutzung vertikaler taktile Oberflächen, zu Ermüdungserscheinungen im Arm des Benutzers führt. (Hincapié-

Ramos, Guo, Moghadasian & Irani, 2014). Ein gleicher Effekt stellt sich auch beim andauernden Anheben des Stiftes eines Phantom Gerätes ein.¹⁵

Der eigentliche Explorationskörper ist von einem „Kasten“ oder „Käfig“ umgeben, welcher aus einseitig permeablen Oberflächen besteht. Dieser Käfig sorgt dafür, dass die Oberfläche des Explorationskörpers, welcher nur einen Teil des virtuellen haptischen Raumes ausmacht, zwar betreten werden kann, aber ein Verlassen der Oberfläche verhindert wird. So wird vermieden, dass es durch eine ungeplante oder abrupte Bewegung des Explorierenden dazu kommt, dass eine zeitaufwändige Neuorientierung und erneutes Finden des Explorationskörpers in der haptischen Umgebung notwendig wird. Der Käfig kann in zwei Varianten genutzt werden. Entweder ist die Oberseite als eine einseitig durchdringbare Ebene knapp über der explorierten Ebene realisiert, so dass der Benutzer noch aus dem Liniennetzwerk herausspringen und uneingeschränkt an andere Stellen des Liniennetzwerkes gelangen kann, oder aber die Ebene liegt knapp unterhalb der Explorationsebene, so dass der Benutzer das Liniennetzwerk nicht mehr verlassen kann. Das Herausspringen aus dem Liniennetzwerk ist dann erforderlich, wenn nicht alle Teile der linien-basierten Graphik zusammenhängen, was zum Beispiel in der Domäne der Straßenkarten vorkommt, in der Landmarken abseits des Straßennetzwerkes liegen.

Position von Käfig und Explorationskörper in der virtuellen haptischen Umgebung sind so gewählt, dass sie den virtuellen haptischen Raum, welcher durch das haptische Interfacegerät zur Verfügung gestellt wird, optimal ausnutzen.¹⁶

¹⁵ Diese Beobachtung hat sich bereits während der Entwicklung der linien-basierten Graphiken gezeigt und wurde von mehreren Personen bestätigt.

¹⁶ Je nach Art des Gerätes, hat dieser Raum eine unterschiedliche Größe. Es hat sich als *best practise* erwiesen, den virtuellen haptischen Raum nicht bis an seine Grenze auszunutzen, da sich in den Randbereichen erste Verschleißerscheinungen in der Mechanik der Geräte besonders schnell bemerkbar machen.

6 Repräsentation für linien-basierte Graphiken für wissensbasierte Ereigniserkennung

Für die multimodal unterstützte, haptische Exploration einer linien-basierten Graphik sind grundlegend zwei Arten von Repräsentationen notwendig: Erstens sorgt ein 3D-Modell für eine durch den Benutzer in einer virtuellen haptischen Umgebung explorierbare Repräsentation. Zweitens gibt es eine interne Repräsentation, die es erlaubt, die Exploration zu analysieren und als diskrete Explorationsereignisse zu konzeptualisieren, welche Bezug auf die in der linien-basierten Graphik dargestellten Elemente¹⁷ nehmen und als Basis für die Benutzerinteraktion genutzt werden können. Genau genommen erfüllt die interne Repräsentation folgende vier Aufgaben:

- Während der Exploration müssen die Explorationsbewegungen, mit denen der Benutzer das 3D-Modell der linien-basierten Graphik in einer virtuellen haptischen Umgebung exploriert, zu Elementen der linien-basierten Graphik zugeordnet werden. Dies erlaubt die Detektion von Basisereignissen.
- Eine Repräsentation der exakten Geometrie der linien-basierten Graphik ermöglicht es, im Rahmen der Vorverarbeitung oder während der Ereigniserkennung, räumliche Eigenschaften der linien-basierten Graphik beziehungsweise ihrer Exploration zu analysieren.
- Eine qualitative Repräsentation der linien-basierten Graphik dient als Wissensbasis für das Erkennen von komplexen Ereignissen auf Grundlage der detektierten Basisereignisse unter Einbeziehung von räumlichem und domänenspezifischem Wissen.
- Domänenspezifische und interaktionsspezifische Informationen, welche mit den Elementen der linien-basierten Graphik verknüpft sind, erlauben schließlich die Generierung und Auslösung von sprachlicher und nichtsprachlicher Audio-Assistenz.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Repräsentation für haptisch-multimodale linien-basierte Graphiken zeichnet sich dadurch aus, dass Linien als kleinste Bausteine bedeutungstragender, räumlicher Elemente und nicht als visuelles Gestaltungsmittel aufgefasst werden. Insofern ist die vorgestellte Repräsentation kein (weiteres) Format für die Darstellung von Vektor-Graphiken sondern verknüpft haptisch explorierbares 3D-Modell, Geometrie einer linien-basierten Graphik und propositionale Informationen mit dem Ziel der Ereigniserkennung und multimodalen Interaktion.

¹⁷ In Kapitel 2 wird der Begriff Element in Bezug auf linien-basierte Graphiken eingeführt. Ein Element einer linien-basierten Graphik ist ein Teil dieser Graphik, welcher eine Bedeutung in Bezug auf die Anwendungsdomäne besitzt. So kann zum Beispiel bereits der Endpunkt einer Linie, ein Abschnitt einer Linie aber auch eine komplexe Anordnung von mehreren Linien ein Element sein.

In diesem Kapitel wird die Grundlage für die Repräsentation von räumlichem und domänenspezifischem Wissen für die Ereigniserkennung und Benutzerinteraktion gelegt. Es wird motiviert, welche verschiedenen Arten von Repräsentationen notwendig sind, um die weiter oben aufgelisteten Aufgaben zu erfüllen. Es wird gezeigt, wie diese unterschiedlichen Repräsentationen in einem Schichtenmodell verknüpft werden, um quantitative räumliche und propositionale Informationen zu verbinden. Ein Formalismus für linien-basierte Graphiken wird auf Grundlage der Inzidenz-Geometrie zunächst domänen-unabhängig ausgearbeitet und dann für die Anwendungsdomänen der Karten und der Linien-Graphen erweitert. Am Ende des Kapitels werden formale Kriterien für eine gemischt propositionale und bildhafte räumliche Repräsentation diskutiert und die entwickelte Repräsentation anhand dieser Kriterien evaluiert.

6.1 Überblick über die repräsentationellen Schichten

Die in der Einleitung geschilderten Aufgaben werden nicht durch eine einzelne Repräsentation, sondern durch mehrere verbundene Schichten von Repräsentationen erfüllt.

Konzeptuell handelt es sich bei einer linien-basierten Graphik, wie in Kapitel 2 ausgeführt, um eine räumliche Anordnung von auf geraden oder gekrümmten Linien basierenden Elementen, welche in einer Ebene eingebettet sind. Diese Form der Repräsentation eignet sich, um die linien-basierte Graphik im Rahmen der Vorverarbeitung und der laufenden Ereigniserkennung zu analysieren, um räumliche Eigenschaften von Elementen oder räumliche Relationen zwischen Elementen zu extrahieren oder eine genaue Analyse der Explorationstrajektorie in Relation zur linien-basierten Graphik vorzunehmen.

Für den eigentlichen Vorgang der Ereigniserkennung ist eine ausschließlich auf Linien-Geometrie basierende Repräsentation der linien-basierten Graphik jedoch nicht ausreichend. Auch wenn das explorierte 3D-Modell auf geometrischen Linien basiert und die erkannten Ereignisse auf diese Linien Bezug nehmen, stellen sich für die Aufgabe der Ereigniserkennung während der haptischen Exploration linien-basierter Graphiken jedoch zwei Herausforderungen:

Die erste Herausforderung besteht darin, dass die Exploration einer linien-basierten Graphik konzeptuell zwar eine Exploration von Linien ist, sensorisch oder motorisch aber die Oberfläche eines 3D-Modells abgetastet wird. In diesem sind Linien als flächige Vertiefungen dargestellt und bieten auch bei der Exploration ein wenig Bewegungsfreiraum zu den Seiten. Noch deutlicher tritt dieses Problem bei der Exploration von Punkten, zum Beispiel dem Endpunkt einer Linie auf. Hier besteht die von Benutzern ausgeführte Explorationsbewegung in der Regel aus einer Folge von mehreren kurzen Bewegungen oder Stößen gegen das Ende der Linie. Obwohl diese bei Punktexploration üblichen Trajektorien weit mehr als einen einzelnen Punkt einer Ebene umfassen, soll auf konzeptueller Ebene genau dies erkannt werden. Daher ist eine Repräsentationsschicht notwendig welche eine Abbildung von Explorationsbewegungen auf der Oberfläche eines 3D Modells auf Elemente einer linien-

basierten Graphik ermöglicht. Abbildung 6.1 zeigt Beispiele für genaue Bewegungstrajektorien in Relation zur Oberfläche eines 3D-Modells.

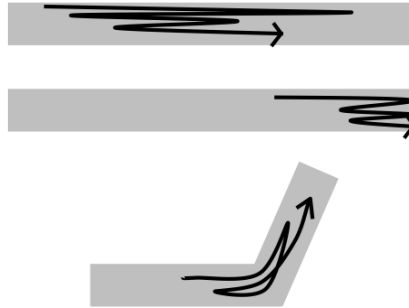


Abbildung 6.1: Typische Explorationsbewegungen.

Die zweite Herausforderung besteht darin, dass die für die Ereigniserkennung genutzten wissensverarbeitenden Prozesse Zugriff auf die in der linien-basierten Graphik codierten Informationen benötigen. Da die Ereigniserkennung ein Prozess ist, welcher die Benutzerinteraktion begleitet, genügt es nicht, dass diese Informationen implizit vorhanden sind, also zur Laufzeit mit aufwändigen Verfahren extrahiert werden müssen. Die Informationen müssen in einer Repräsentation vorliegen, welche direkt von der Ereigniserkennung genutzt werden kann. Dem regelbasierten Ansatz zur Erkennung komplexer Ereignisse folgend (siehe Kapitel 9), ist es daher notwendig, dass alle für die Ereigniserkennung relevanten Informationen in propositionaler Weise, genauer in Prädikatenlogik erster Ordnung, vorliegen.

Die dritte Herausforderung besteht darin, erkannte Ereignisse so durch domänenspezifische oder interaktionsspezifische Informationen aufzubereiten, dass diese Ereignisse im Rahmen einer multimodalen Benutzerinteraktion genutzt werden können.

Diese Herausforderungen werden gelöst, indem die beiden separaten Aufgaben von drei mit einander verbundenen repräsentationellen Schichten erfüllt werden (siehe Abbildung 6.2). Dabei erfüllen die Schichten verschiedene der oben genannten Anforderungen:

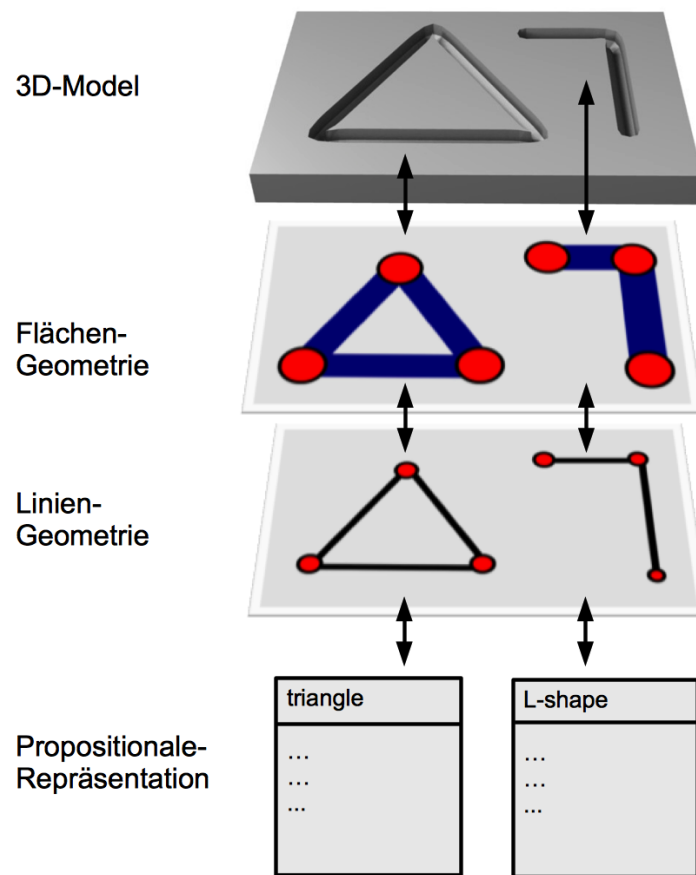


Abbildung 6.2: Veranschaulichung des Schichtenmodells. Die Oberfläche des 3D-Modells wird über eine Flächen-Geometrie auf eine Linien-Geometrie abgebildet, welche wiederum mit propositionalen Informationen zu räumlichem und domänenspezifischem Wissen verknüpft ist.

- Die Flächen-Geometrie stellt einen Bezug zwischen der Oberfläche des haptisch explorierbaren 3D-Modells und den Elementen der linien-basierten Graphik in der internen Repräsentation her. Jeder Punkt der Oberfläche des haptischen 3D-Modells wird durch diese Repräsentationsschicht einem oder mehreren Elementen der linien-basierten Graphik zugeordnet.
- Die Linien-Geometrie ist eine möglichst originalgetreue Wiedergabe der Geometrie der zu explorierenden linien-basierten Graphik. Sowohl Elemente linien-basierter Graphiken mit geraden als auch gekrümmten Linien (siehe Kapitel 2) werden geometrisch so repräsentiert, dass im Rahmen der Vorverarbeitung und der Ereigniserkennung räumliche Eigenschaften und Relationen der Elemente analysiert werden können. Die Linien-Geometrie wird, soweit für die Ereigniserkennung relevant, in eine propositionale Repräsentation überführt.
- Propositionale Repräsentation: Elemente der linien-basierten Graphik werden zusammen mit Informationen über räumliche, domänenspezifische oder interaktionsspezifische propositional repräsentiert. Diese Repräsentationsschicht dient als eigentliche Grundlage für die Wissensverarbeitung.

Das Schichtenmodell der Repräsentationen legt, richtigerweise, nahe, dass die verschiedenen Ebenen der Repräsentation in der Ereigniserkennung sequentiell zur Anwendung kommen: Ein Benutzer exploriert die Oberfläche eines 3D-Modells, der haptische Interaktionspunkt (HIP) wird zunächst mittels der Flächen-Repräsentation einem oder mehreren Elementen einer linien-basierten Graphik zugeordnet. Zu diesem Element kann es weitere propositionale Informationen geben, welche der propositionalen Schicht entnommen werden und im Rahmen der Ereigniserkennung und der Interaktionssteuerung verwendet werden. Die repräsentationelle Schicht der Liniengeometrie wird hierbei (in der Regel) nicht direkt genutzt, da die für die Ereigniserkennung relevanten Informationen bereits in eine propositionale Repräsentation überführt worden sind.

Auf der konzeptionellen Ebene kann das repräsentationelle Modell daher auch so aufgefasst werden, dass den Elementen der linien-basierten Graphik in jeder der repräsentationellen Schichten ein Repräsentant zugeordnet wird. Abbildung 6.3 zeigt ein entsprechendes Modell: Elemente der linien-basierten Graphik (Mitte der Abbildung) sind vier verschiedenen Teilrepräsentationen zugeordnet. Innerhalb des explorierten 3D-Modells gibt es explorierbare dreidimensionale Strukturen, die zu dem entsprechenden Element korrespondieren. In der Flächen-Repräsentation wird dieser Teil der Oberfläche des 3D-Modells dem entsprechenden Element der linien-basierten Graphik zugeordnet. Dem Element der linien-basierten Graphik ist außerdem ein Teil der Linien-Repräsentation zugeordnet, ebenso wie eine propositionale Repräsentation, welche wiederum mit propositionalen Eigenschaften und Relationen zu anderen Elementen der linien-basierten Graphik versehen sind.

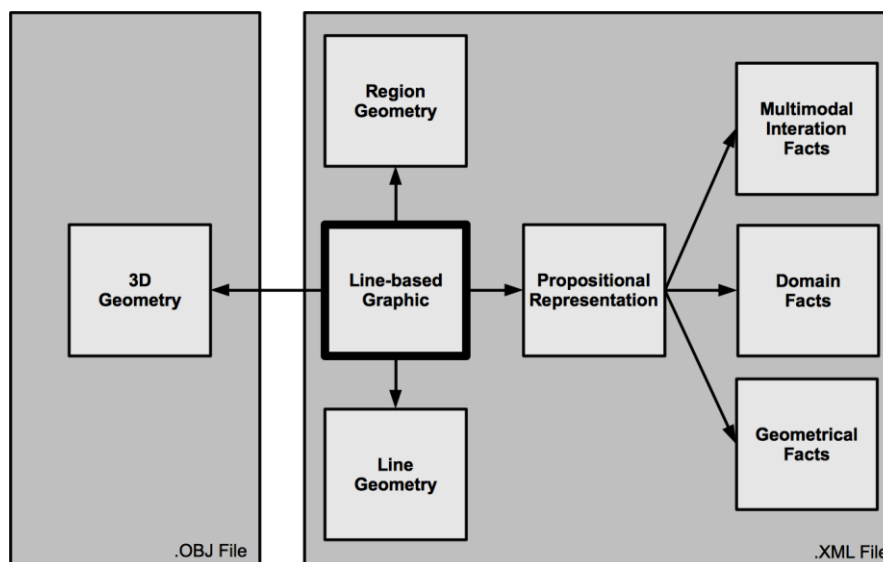


Abbildung 6.3: Struktur der Repräsentation für multimodale linien-basierte Graphiken.

6.2 Inventar der Elemente linien-basierter Graphiken (Formales Modell & Beispiele)

Linien-basierte Graphiken bestehen aus einem Inventar von Basis-Elementen. Durch die geometrische Anordnung zueinander und durch spezielles, domänenspezifisches Wissen werden weitere Elemente nach den Prinzipien der Teil- und der Komplexbildung generiert.

Gerade oder gekrümmte Linien in der Ebene bilden das Grundelement linien-basierter Graphiken aus dem durch Teil- und Komplexbildung weitere Elemente abgeleitet werden. Als Teile von Linien gelten Punkte auf den Linien und Abschnitte von Linien, welche als Segmente bezeichnet werden. Komplexe werden in der ersten Stufe in der Form von zusammenhängenden Mengen von Segmenten gebildet, in der zweiten Stufe als Menge von Komplexen erster Ordnung.

In Abschnitt 6.1 wurden die verschiedenen Schichten aus Sicht der Wissensverarbeitung mit dem Ziel der Ereigniserkennung skizziert. Dabei wurde vor allem beschrieben welche Funktion die repräsentationellen Schichten in Bezug auf die Ereigniserkennung (und automatisierte Assistenzgenerierung) haben. In diesem Abschnitt wird das Inventar der linien-basierten Graphiken sowohl anhand von Beispielen als auch formal beschrieben. Dabei steht auch im Vordergrund, dass linien-basierte Graphiken noch aus einem weiteren Blickwinkel beleuchtet werden: Linien-basierte Graphiken als räumliche Repräsentation im Rahmen der Mensch-Computer-Interaktion.

Linien-basierte Graphiken sind mit dem Ziel entwickelt worden, ein domänenunabhängiges Rahmenwerk zur haptischen Exploration räumlich dargestellter Inhalte für blinde und sehbehinderte Menschen zu schaffen. Im Vordergrund des Designs steht daher in erster Linie eine benutzerfreundliche Gestaltung der Teile der Repräsentation mit denen der Benutzer tatsächlich interagiert. Dies umfasst auf perzeptueller Ebene die Gestaltung des explorierten 3D-Modells und die Interaktion in der virtuellen haptischen Umgebung, auf kognitiver Ebene die Komplexität einzelner, dargestellter, räumlicher Elemente und ihrer Anordnung.

Während die Gestaltung von 3D-Modell und haptischer Interaktion nur eine einzelne Schicht der Repräsentation beziehungsweise eine einzelne Komponente in der Peripherie der Gesamtarchitektur (siehe Kapitel 5) betrifft, bestimmt die Wahl des Inventars für linien-basierte Graphiken alle Repräsentationen und wissensverarbeitenden Komponenten.

6.2.1 Designziele: Benutzbarkeit und Darstellbarkeit

Bei dem Entwurf der linien-basierten Graphiken müssen verschiedene Designziele miteinander vereinbart werden. Zum einen soll der Formalismus der linien-basierten Graphiken in dem Sinne domänenunabhängig sein, dass die Modellierung vieler potentieller Anwendungsdomänen mit einem kleinen, für den Benutzer leicht zu erlernenden Satz von Elementen möglich ist. Zum anderen soll die Repräsentation aus Sicht des Modellierenden auf einem formalen Gerüst aufgebaut sein.

Ein kleines Inventar erlaubt schnelles Lernen auf Seiten des Benutzers. Diese Eigenschaft ist grundsätzlich für ein assistierendes System nützlich, bringt aber darüber hinaus noch besondere Vorteile für die Entwicklungsphase, da ein kleines und überschaubares Inventar ein schnelles Eingewöhnen von Versuchspersonen im Rahmen empirischer Studien erlaubt.

Darüber hinaus ist selbst bei ausführlichen Lernphasen zu vermuten, dass ein unnötig komplizierter Aufbau der linien-basierten Graphiken die Exploration erheblich erschweren kann, daher ist eine Reduktion der Komplexität der linien-basierten Graphiken auf das Notwendige bereits beim Entwurf des Formalismus ein wichtiges Designziel.

6.2.2 Geometrische Repräsentation von räumlichen Informationen

In der Computergraphik gibt es zwei Paradigmen zur Speicherung von bildhaften Daten. Zum einen werden zwei oder auch dreidimensionale Graphiken als geometrische Information mit weiteren Anweisungen zur visuellen Darstellung der geometrischen Elemente gespeichert. Dies wird auch als Vektorgraphik bezeichnet. Dieses Paradigma entspricht dem hier vorgeschlagenen Ansatz. Das zweite Paradigma repräsentiert zwei (selten auch dreidimensionale) Bilddaten als Skalarfeld, dies wird als Pixelgraphik bezeichnet.

Die Wahl für eine geometrische Repräsentation von räumlichem Wissen und als Grundlage für die haptische Interaktion begründet sich in den Vorteilen dieses Ansatzes: In einer geometrischen Repräsentation werden nur die Punkte und Elemente repräsentiert die in der Graphik vorhanden sind. In einer Pixel-Graphik muss für jedes Pixel ein Farbwert vorliegen – auch wenn dieses gar kein Element beinhaltet oder die Information kompakter darzustellen ist. Zwar können Kompressionsverfahren diesen Nachteil zum Teil wieder ausgleichen, aber generell bleibt für eine Pixelgraphik das Problem der Auflösung gegenüber der Feinheit der Darstellung bestehen. Möchte man bei einer Pixel-Graphik Treppeneffekte (Aliasing) und Probleme beim Vergrößern oder Verkleinern der Darstellung vermeiden, bestehen verhältnismäßig große Speicheranforderungen.

Während Speicherkapazität eine ausbaubare Ressource ist, die nicht grundsätzlich gegen die Nutzung einer Repräsentationsform sprechen sollte, gibt es aber noch einen wichtigeren Grund gegen eine pixelbasierte und für eine geometrie-basierte Repräsentation. Es wurde bereits deutlich, dass Elemente der analysierten Domänen durch Kennzeichnungen wie Label ergänzt werden. Im Rahmen einer multimodal assistierten haptischen Interaktion werden weitere Informationen mit einzelnen Elementen verknüpft. Im Gegensatz zu einer Pixelgraphik ermöglicht eine auf Geometrie basierte Graphik eine genaue Identifikation von diesen Elementen. Außerdem können geometrische Eigenschaften von Elementen ohne weitere Analyse im Rahmen geometrischer Berechnungen genutzt werden. Eine auf Geometrie basierte Repräsentation erlaubt also Verarbeitungsschritte, welche bei einer pixelbasierten Graphik erst nach einer ausführlichen Analyse, wie Objekterkennung, möglich wären.

Die weite Verbreitung von Pixelgraphiken ist unter anderem dadurch zu erklären, dass Digital-Kameras diese Art von Bilddaten aufnehmen können – jedoch keine Vektorgraphiken.

Pixelbasierte Bilddaten müssen erst analysiert werden, bevor sie als Vektorgraphik repräsentiert werden können. Für den kleinen Bereich der Liniengraphik wird ein solcher Ansatz im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt. Für andere Anwendungsdomänen, wie zum Beispiel Karten, ist es jedoch viel plausibler auf bereits existierende geometrische Datenquellen zurückzugreifen.

Für die Entwicklung der linien-basierten Graphiken wird eine informatische Perspektive eingenommen bei der es um die Entwicklung einer geeigneten Repräsentation auf Wissensbasis von künstlichen Systemen geht. Die Frage nach der Verarbeitung und Speicherung von bildhaftem Wissen in natürlichen kognitiven Systemen ist zweitrangig (Pylyshyn, 2003). Die Form von Datenquellen und die Anforderungen von Speicherung und Verarbeitung im entwickelten System sind ausschlaggebend für die Wahl einer geometrischen Repräsentation.

6.2.3 Formalismus für linien-basierte Graphiken

Linien-basierte Graphiken werden aus einem Inventar geometrischer Konzepte aufgebaut. Linien-basierte Graphiken beschreiben räumliches Wissen sowohl qualitativ als auch quantitativ und erlauben so, verschiedene Arten von Wissensverarbeitung wie qualitatives räumliches Schließen oder die qualitative Analyse mit Hilfe visueller Routinen (Habel, Kerzel & Lohmann, 2010).

Im Folgenden werden die Elemente linien-basierter Graphiken vorgestellt. Neben einer Beschreibung der verschiedenen Elemente und ihrer Relationen zueinander findet sich eine formale Beschreibung und ein Anwendungsbeispiel für die einzelnen Elemente in einer Anwendungsdomäne.

Die folgenden Definitionen beziehen sich auf Elemente einer linien-basierten Graphik. Wird zum Beispiel von einer Linie gesprochen, ist damit eine Linie im Rahmen einer linien-basierten Graphik gemeint.

6.2.3.1 Linien

In eine Ebene eingebettete Linien sind die Basiselemente linien-basierter Graphiken. Durch Teil- oder Komplexbildung werden weitere Elemente aus Linien gebildet. Linien können entweder gerade (straight) oder gekrümmt (bent) sein. Sowohl gerade als auch gekrümmte Linien sind durch zwei Endpunkte in der Ebene definiert. Im Fall einer gekrümmten Linie ist natürlich noch eine Beschreibung der Form notwendig. Diese Form wird in einer linien-basierten Graphik durch eine Liste von miteinander verbundenen Stützpunkten spezifiziert.¹⁸

¹⁸ Während die Nutzung von Stützpunkten keine genaue Modellierung von Kurven erlaubt (im Vergleich zu Bezier-Kurven z.B.) kann diese Modellierung eins-zu-eins haptisch umgesetzt werden ohne dass es zu Diskrepanzen zwischen exploriertem 3D-Modell und internem Modell kommt.

$\text{line}(l)$	Element l ist eine Linie in der Ebene
$\text{point}(p)$	Element p ist ein Punkt in der Ebene
$\text{located}(p, x, y)$	Punkt p ist durch das Koordinatenpaar x, y in der Ebene eingebettet
$\text{straight}(l)$	Linie l ist gerade
$\text{bent}(l)$	Linie l ist gekrümmt
$\text{endPoint}(l, p)$	Punkt p ist ein Endpunkt von Linie l
$\text{shape}(l, [p_1, \dots, p_n])$	Der Verlauf der gekrümmten Linie l ist durch die Stützpunkte p_1 bis p_n bestimmt

Tabelle 6.1: Prädikate zur Spezifikation von linien-basierten Graphiken.

Teile von Linien werden als Segmente modelliert, siehe unten. Es gilt: Eine Linie ist entweder gerade oder gekrümmt. Jede Linie hat 2 Endpunkte. Jede gekrümmte Linie hat eine Form (shape), bestehend aus einer geordneten Liste von Punkten. Linien können keine Teile von Linien sein.

6.2.3.2 Konfigurationspunkte und Domänenpunkte

Linien haben zwei Endpunkte, dies sind Punkte die nicht zwischen zwei Punkten einer Linie liegen. Anordnungen von Linien können durch Punkte an denen sich die Linien schneiden oder berühren weitere Punkte spezifizieren. Endpunkte, Berührungspunkte von Linien und Schnittpunkte von Linien werden als Konfigurationspunkte zusammengefasst, da sie sich geometrisch aus der Konfiguration von Linien ergeben. Entsprechend ihrer Art können Konfigurationspunkte als Enden (end), Verbindungen (junction), Mündungen (tee) und Kreuzungen (crossing) differenziert werden, diese Untertypen hängen von der Anzahl und dem Teil der sich in dem Konfigurationspunkt treffenden Linien ab, siehe Tabelle 6.2.

Treffen sich mehr als 2 Linien in einem Punkt, so wird dies ohne weitere Unterscheidung als Mehrfach-Kreuzung bezeichnet. Auch wenn der Formalismus für linien-basierte Graphiken keine Obergrenze für die an einer Mehrfach-Kreuzung beteiligten Linien vorgibt, ist zu bedenken, dass zu viele Linien, welche sich in einem einzelnen Punkt treffen in der Umsetzung als haptische Repräsentation zu Schwierigkeiten führen können, da die Breite der Rillen dafür sorgt, dass benachbarte Linien miteinander verschmelzen.

Art des Konfigurationspunktes	Anzahl der beteiligten Linien	Kriterien
Ende	1 Linie	Konfigurationspunkt ist Endpunkt der Linie
Verbindung	2 Linien	Konfigurationspunkt ist Endpunkt beider Linien
Mündung	2 Linien	Konfigurationspunkt ist Endpunkt einer Linie und kein Endpunkt der anderen Linie
Kreuzung	2 Linien	Konfigurationspunkt ist kein Endpunkt einer der beiden Linien
Mehrfach-Kreuzung	Mehr als 2 Linien	Keine weiteren Kriterien

Tabelle 6.2: Typen von Konfigurationspunkten.

$\text{configurationPoint}(c)$	Punkt c ist ein Konfigurationspunkt
$\text{endPoint}(l, p)$	Punkt p ist ein Endpunkt Linie l
$\text{teePoint}(c, l_1, l_2)$	Am Punkt p mündet die Linie l_1 in die Linie l_2
$\text{junction}(c, l_1, l_2)$	Am Punkt p treffen sich die Enden der Linien l_1 und l_2
$\text{crossing}(c, l_1, l_2)$	Am Punkt p kreuzen sich die Linien l_1 und l_2
$\text{multiJunction}(c, [l_1, \dots, l_n])$	Am Punkt p treffen sich die Linien l_1 bis l_n

Tabelle 6.3: Prädikate zur Spezifikation von linien-basierten Graphiken.

Nicht nur durch die geometrische Anordnung von Linien können Punkte induziert werden. Auch durch die abgebildete Domäne können Punkte auf Linien induziert werden. Diese Domänenpunkte zeigen besondere Punkte auf einer Linie aus Sicht der Anwendungsdomäne. Domänenpunkte können zum Beispiel genutzt werden um U-Bahnstationen in einem U-Bahn-Linien-Netz darzustellen oder besondere Punkte auf einem Linien-Graphen.

$\text{domainPoint}(p, l)$	Punkt p ist ein Domänenpunkt auf der Linie l , die Lage von p wird durch das Prädikat $\text{located}(p, x, y)$ beschrieben.
----------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabelle 6.4: Prädikate zur Spezifikation von linien-basierten Graphiken.

Die Differenzierung dieser beiden Arten von Punkten ist nicht nur aus formaler Sicht sinnvoll, da diese beiden Arten von Punkten aus unterschiedlichen Bereichen der Modellierung von linien-basierter Graphik beziehungsweise Anwendungsdomäne stammen. Die Differenzierung ist auch nützlich, da sich die haptische Wahrnehmbarkeit der beiden Arten von Punkten

unterscheidet. Während Konfigurationspunkte, in der Regel¹⁹ haptisch wahrgenommen werden können, ist dies für Domänenpunkte nicht der Fall. Dies muss beim späteren Design der Assistenz berücksichtigt werden, ein Domänenpunkt der nicht durch eine multimodale Assistenz hervorgehoben wird, ist für den Explorierenden nicht wahrzunehmen. Konfigurationspunkte hingegen können in der Regel auch ohne solche Hilfe erkannt werden.

6.2.3.3 Segmentierung: Konfigurations-Segmente und Domänen-Segmente

Ausgezeichnete Teile von Linien werden als Segmente bezeichnet. Durch Konfigurationspunkte kann eine Linie, induziert durch die Lage anderer Linien, in mehrere Segmente zerlegt werden. Gleichfalls ist es möglich, einzelne Abschnitte von Linien auf Grund domänenspezifischer Eigenschaften hervorzuheben. Generell wird dieses Bilden von Teilen von Linien als Segmentierung bezeichnet. Die Grundlage der Segmentierung bestimmt die Bezeichnung der jeweiligen Segmente.

Segmentierung ist durch ein Segmentierungs-Prädikat modelliert, welches sich immer auf genau eine Linie bezieht. Eine Linie kann jedoch beliebig viele Segmentierungen besitzen, welche sich ebenfalls beliebig überlappen können.

Konfigurations-Segmente: Konfigurations-Segmente (C-Segmente) entstehen durch die Zerlegung von Linien an den auf ihnen liegenden Konfigurationspunkten. Ein C-Segment liegt immer zwischen zwei benachbarten Konfigurationspunkten auf einer Linie. Eine Linie, welche keine Kreuzungs- oder Berührungspunkte mit anderen Linien besitzt, besteht daher nur aus einem einzelnen C-Segment, welches sich von Endpunkt zu Endpunkt erstreckt.

Die Menge aller C-Segmente einer linien-basierten Graphik ergeben einen eingebetteten planaren Graphen, die Endpunkte der C-Segmente entsprechen den Knoten des Graphen. Formal entspricht eine linien-basierte Graphik daher einem PEG (planar embedded Graph), was es erlaubt, bekannte Algorithmen zur Graphenanalyse zu verwenden um beispielsweise geschlossene Zyklen in der linien-basierten Graphik zu erkennen.

Domänen-Segmente: Analog zu Domänenpunkten können Domänen-Segmente (D-Segmente) genutzt werden, um Abschnitte einer Linie zu repräsentieren, die in der dargestellten Anwendungsdomäne eine herausragende Rolle spielen. Zum Beispiel können Abschnitte einer Straße in einer haptischen Karte, welche an einer bestimmten Landmarke liegen, auf diese Weise modelliert werden.

Die haptische Wahrnehmbarkeit von Konfigurations- und Domänensegmenten verhält sich analog zur haptischen Wahrnehmbarkeit von Konfigurations- und Domänenpunkten: Ohne

¹⁹ Durch sorgfältige haptische Exploration können Konfigurationspunkte in einer virtuellen haptischen Umgebung auch ohne visuelles Feedback wahrgenommen werden. Lediglich der Sonderfall eines Konfigurationspunktes vom Typ Junction, der zwei kollineare Linien verbindet ist auf diese Weise nicht wahrzunehmen. Der Formalismus schließt einen solchen Konfigurationspunkt nicht aus – es sei aber als Richtlinie davon abgeraten, derartige Konfigurationspunkte zu verwenden und diese stattdessen durch Domänenpunkte zu ersetzen.

eine multimodale Assistenz ist die Zerlegung einer Linie in Domänen-Segmente allein durch haptische Exploration nicht wahrnehmbar.

Projektions-Segmente: D-Segmente können auch systematisch, nach geometrischen Prinzipien generiert werden, um bestimmte Bereiche von Linien zu markieren. Ein Beispiel für eine solche systematische Generierung von Segmenten ist die Nutzung von Projektion. Dabei werden Elemente der linien-basierten Graphik auf Linien innerhalb eines bestimmten Abstandes projiziert. Der Abschnitt der Linie, welcher von der Projektion überdeckt wird, bildet ein neues Segment. Diese Gruppe von Segmenten wird als P-Segment bezeichnet. In der Anwendungsdomäne der Straßenkarten wird dieses Prinzip genutzt, um Abschnitte an Straßen, welche neben einer Landmarke liegen, zu identifizieren.

P-Segmente sind ein Beispiel für algorithmisch erzeugte Segmentierungen. Je nach Anwendungsdomäne können weitere derartige Segmentierungen genutzt werden.

$\text{segmentation}(seg, l, [s_1, \dots, s_n])$	Eine Segmentierung seg zerlegt die Linie l in die Segmente s_1 bis s_n .
$\text{c-segment}(s, seg, p_1, p_2)$	Konfigurations-Segment s ist Teil der Segmentierung seg und geht von Punkt p_1 bis zu Punkt p_2 . Die Lage der Punkte wird durch das $\text{located}(p, x, y)$ Prädikat bestimmt.
$\text{d-segment}(s, seg, p_1, p_2)$	Domänen-Segment s ist Teil der Segmentierung seg und geht von Punkt p_1 bis zu Punkt p_2 . Die Lage der Punkte wird durch das $\text{located}(p, x, y)$ Prädikat bestimmt.
$\text{p-segment}(s, seg, p_1, p_2)$	Projektions-Segment s ist Teil der Segmentierung seg und geht von Punkt p_1 bis zu Punkt p_2 . Die Lage der Punkte wird durch das $\text{located}(p, x, y)$ Prädikat bestimmt.

Tabelle 6.5: Prädikate zur Spezifikation von linien-basierten Graphiken.

6.2.3.4 Linien-Komplexe und Komplexe

Konfigurations-Segmente haben unter den möglichen Segmentierungen nicht nur deswegen eine herausragende Rolle, weil sie (größtenteils) haptisch wahrnehmbar sind, sie bilden auch die Grundlage für die Bildung komplexer Elemente in linien-basierten Graphiken:

Eine Menge von transitiv verbundenen C-Segmenten kann einen Linien-Komplex bilden. Linien-Komplexe sind zusammenhängende Teile der linien-basierten Graphik, welche eine bedeutungstragende Einheit in der Anwendungsdomäne darstellen. Linien-Komplexe können sich überlappen und Teil voneinander sein.

So können zum Beispiel in einer Darstellung eines U-Bahn-Netzes einzelne U-Bahn-Linien als Linien-Komplexe modelliert werden, auch wenn sich diese U-Bahn-Linien zum Teil dasselbe Gleis teilen. In diesem Netz sind, wie bereits oben eingeführt, die einzelnen Strecken zwischen den Haltestellen als C- und D-Segmente modelliert. Möchte man nun eine

komplette Linie modellieren, so werden mehrere dieser Segmente zu einem Linien-Komplex zusammengefasst und bilden ein neues Element der linien-basierten Graphik.

Ein C-Segment kann zu mehreren Linien-Komplexen gehören. Alle Konfigurationspunkte aller C-Segmente eines Linien-Komplexes gehören ebenfalls zu diesem Linien-Komplex. Diese Modellierung folgt einer intuitiven Auffassung typischer Anwendungsdomänen virtueller haptischer linien-basierter Graphiken:

Treffen sich zwei Straßen in einer Kreuzung, so haben nach einer intuitiven Auffassung beide Straßen eine Kreuzung mit der jeweils anderen, die Kreuzung selbst gehört nicht exklusiv zu einer der beiden Straßen. Ähnliche Argumentationen gelten für verwandte Anwendungsdomänen.

Abhängig von der Konfiguration der zu einem Linien-Komplex zusammengefassten C-Segmente, kann der Linien-Komplex verschiedene Eigenschaften haben: Ein Linien-Komplex ist verzweigend (branching), wenn es einen Konfigurationspunkt des Linien-Komplexes gibt, in welchem sich mehr als zwei C-Segmente des Linienkomplexes treffen. (Beispiel: Flüsse in einer Karte können verzweigen). Ein Linien-Komplex ist geschlossen (closed), wenn die C-Segmente des Linien-Komplexes einen geschlossenen Pfad (im Sinne der Graphentheorie) ergeben. Ein nicht verzweigender, geschlossener Linien-Komplex umschließt eine Region, welche durch C-Segmente begrenzt ist. Linien-Komplexe bilden somit die Grundlage für weitere komplexe Elemente höherer Ordnung.

$\text{lineComplex}(lc, \{s_1, \dots, s_n\})$	Linien-Komplex lc wird durch die transitive verbundenen C-Segmente s_1 bis s_n gebildet.
$\text{branching}(lc)$	Linien-Komplex lc ist verzweigend.
$\text{non-branching}(lc)$	Linien-Komplex lc ist nicht verzweigend.
$\text{closed}(lc)$	Linien-Komplex lc ist geschlossen (und nicht verzweigend).
$\text{innerRegion}(r, lc)$	Die Region r wird vom geschlossenen und nicht verzweigenden Linien-Komplex lc umschlossen.

Tabelle 6.6: Prädikate zur Spezifikation von linien-basierten Graphiken.

Segment-Komplex: Nicht nur aus C-Segmenten können Komplexe gebildet werden. Beliebige Segmente, also zum Beispiel eine Menge bestehend aus C-, D- und P-Segmenten kann zu einem Segment-Komplex zusammengefasst werden. In diesem Fall gilt nicht mehr die Beschränkung, dass die Segmente des Komplexes transitiv miteinander verbunden sein müssen.

Komplex (zweiter Ordnung): Komplexe zweiter Ordnung (oder einfach nur Komplexe) entstehen aus der Zusammenfassung mehrerer Linien- oder Segment-Komplexe. Komplexe zweiter Ordnung können wiederum zu neuen, höhergradigen Komplexen kombiniert werden.

Dies erlaubt eine hierarchische Strukturierung von Elementen einer linien-basierten Graphik. Zum Beispiel können verschiedene Linien-Komplexe Landmarken in einer haptischen Karte darstellen, diese wiederum können zu Gebäudekomplexen zusammengefasst werden.

Region und Region-Komplex: Ein nicht verzweigender, geschlossener Linien-Komplex definiert durch sein Inneres eine Region. Mehrere transitiv adjazente Regionen können zu einem Regionskomplex zusammengefasst werden. Als adjazent gelten zwei Regionen wenn es mindestens ein C-Segment gibt, welches zur Umrandung jeder der beiden Regionen gehört.

$\text{segmentComplex}(sc, \{s_1, \dots, s_n\})$	Segment-Komplex sc wird durch die Segmente s_1 bis s_n gebildet.
$\text{complex}(c, \{c_1, \dots, c_n\})$	Komplex c wird durch die Komplexe, Segment- oder Linien-Komplexe c_1 bis c_n gebildet.
$\text{regionComplex}(rc, \{r_1, \dots, r_n\})$	Regions-Komplex rc wird durch die adjazenten Regionen r_1 bis r_n gebildet.

Tabelle 6.7: Prädikate zur Spezifikation von linien-basierten Graphiken.

6.2.3.5 Domänenabhängige Erweiterungen für linien-basierte Graphiken

Die Repräsentation von linien-basierten Graphiken trennt zwischen Elementen der linien-basierten Graphik selbst und Elementen der dargestellten Domäne. Jedes Element in einer linien-basierten Graphik kann ein Element innerhalb der Anwendungsdomäne darstellen, muss es aber nicht. Zum Beispiel könnte es einige besondere Regionen geben, welche innerhalb einer haptischen Karte als Plätze oder Parks modelliert sind, während andere potentielle Regionen keine besondere Bedeutung in der Anwendungsdomäne haben.

Jede Anwendungsdomäne bringt ihre eigene Taxonomie von repräsentierten Entitäten mit sich. Durch das Prädikat $\text{domaintype}(e, t)$ wird einem Element e der linien-basierten Graphik ein Typ t aus der dazugehörigen Anwendungsdomäne zugeordnet. Abbildungen 6.4 und 6.5 zeigen Taxonomien für die Domänen der Straßenkarten und der Linien-Graphen.

Andere domänenspezifische Prädikate können genutzt werden, um weitere Eigenschaften der Elemente innerhalb der Domäne zu modellieren. So kann zum Beispiel der Eigenname einer Straße repräsentiert werden.

$\text{domainType}(e, t)$	Element e einer linien-basierten Graphik ist einem Typ t aus einer Anwendungsdomäne zugeordnet.
$\text{domainName}(e, n)$	Element e einer linien-basierten Graphik repräsentiert ein Element mit Namen n in der Anwendungsdomäne.

Tabelle 6.8: Prädikate zur Spezifikation von linien-basierten Graphiken.

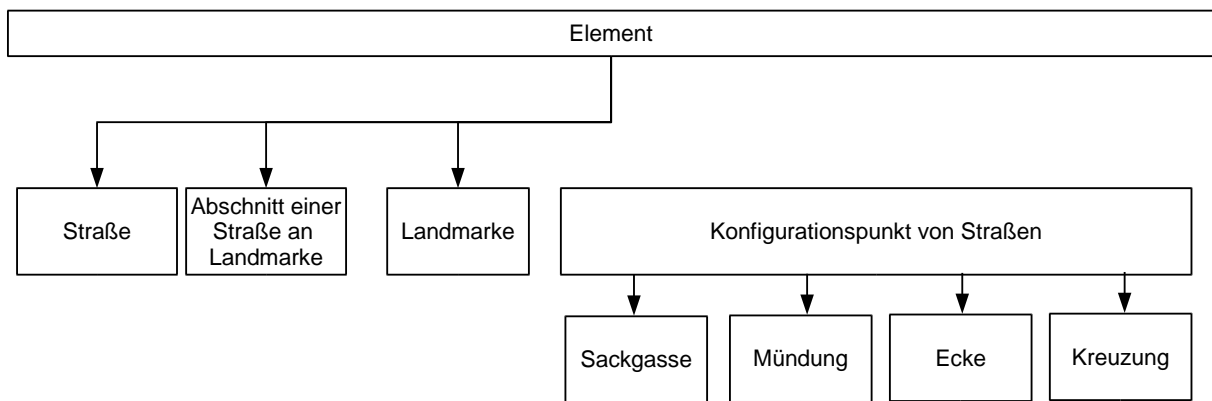


Abbildung 6.4: Taxonomie von Elementen einer linien-basierten Graphik für die Anwendungsdomäne der Straßen-Karten.

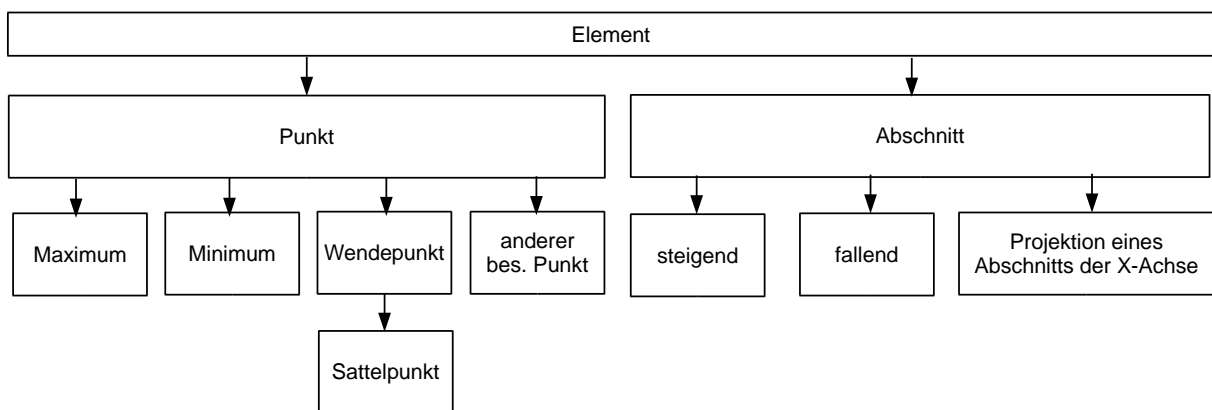


Abbildung 6.5: Taxonomie von Elementen einer linien-basierten Graphik für die Anwendungsdomäne der Linien-Graphen.

6.2.4 Weitere räumliche Relationen

Die eingeführten Prädikate zur Beschreibung linien-basierter Graphiken stellen bereits zum Teil eine propositionale Modellierung von linien-basierten Graphiken dar. Weitere Prädikate die räumliche Relationen zwischen Elementen der linien-basierten Graphik oder auch innerhalb der Domäne beschreiben können genutzt werden, um für die Ereigniserkennung notwendiges Wissen zu repräsentieren.

So kann zum Beispiel der Winkel zwischen zwei Straßen in einer haptischen Karte repräsentiert werden um zu unterscheiden, ob eine Straße in eine andere übergeht oder ob man an einer Ecke abbiegt um von einer Straße auf die andere zu wechseln. Tabelle 6.9 zeigt einige mögliche räumliche Prädikate. Es ist zu beachten, dass je nach Anwendungsdomäne eine strikt geometrische Auslegung der Begriffe hinderlich sein kann. So könnten zwei Straßen nur in etwa parallel verlaufen, trotzdem mag es sinnvoll sein im Rahmen einer multimodalen Interaktion mit dem Benutzer von Parallelität zu sprechen.

$\text{angle}(s_1, s_2, \text{ang})$	Der Winkel zwischen den Straßen s_1 und s_2 beträgt ang Grad.
$\text{parallel}(s_1, s_2)$	Die Straßen s_1 und s_2 verlaufen (grob) parallel.

Tabelle 6.9: Prädikate zur Spezifikation von linien-basierten Graphiken.

6.3 3D-Geometrie

Für die haptische Exploration einer linien-basierten Graphik wird ein 3D-Modell verwendet. In Kapitel 3 wurden bereits die Grundlagen virtueller haptischer Exploration geschildert. In diesem Abschnitt soll die konkrete Umsetzung einer linien-basierten Graphik als 3D-Modell beschrieben werden, also wie genau die eine Spezifikation einer linien-basierten Graphik als 3D-Modell aussieht. Die automatische Erzeugung dieser Modelle ist in Kapitel 7 beschrieben.

Die Zielsetzung für den Entwurf eines 3D-Modells zu einer linien-basierten Graphik ist die möglichst originalgetreue Wiedergabe des räumlichen Wissens, welches in der linien-basierten Graphik repräsentiert wird: Bei der Exploration, auch ohne multimodale Interaktion, soll der Benutzer ein möglichst originalgetreues Abbild der linien-basierten Graphik wahrnehmen können.

Das Grundproblem hierbei ist, dass Linien der linien-basierten Graphik keine Breite haben, es sind Linien im mathematischen Sinne. Rillen im 3D-Modell haben jedoch eine Breite, ansonsten können sie nicht perzipiert werden. Dies hat mehrere Konsequenzen:

Erstens muss festgelegt werden, wie genau eine linien-basierte Graphik als „Rillendarstellung“ umgesetzt wird, um möglichst originalgetreu zu sein.

Zweitens muss überlegt werden, welche Einschränkungen sich für linien-basierte Graphiken ergeben, wenn eine originalgetreue haptische Umsetzung gewünscht wird. Dies ist in Kapitel 7 beschrieben. Hier soll es erst einmal nur darum gehen wie eine linien-basierte Graphik als Rillen-Darstellung umgesetzt wird:

Linien werden als vertiefte Rillen dargestellt. Abbildung 6.6 zeigt einen Querschnitt durch ein solches Modell. Die Exploration erfolgt durch eine simulierte Kugel (oder abgerundete Spitze), welche recht genau in die Rille passt, ohne einen großen Spielraum zu den Seiten zu erlauben. Für die Umsetzung einer linien-basierten Graphik gilt:

- Die Mitte der Rille entspricht immer dem genauen Verlauf der dargestellten Linie
- Endet eine Linie, so endet auch die sie darstellende Rille an diesem Punkt – Rillen sind nicht zum Ende hin schräg auslaufend, sondern haben ein Ende in Form einer senkrechten Beschränkung, damit der Benutzer nicht versehentlich aus der Rille springen kann.

Die Repräsentation eines 3D-Modells erfolgt in einem etablierten Format für 3D-Graphiken. Im Rahmen der vorgestellten Architektur werden die 3D-Modelle im OBJ-Format erstellt. Generell sind 3D-Modelle aus Punkten im Raum, Kanten zwischen diesen Punkten und Flächen die von diesen Kanten begrenzt werden (Vertex, Edge & Face) aufgebaut. Im Fall haptischer 3D-Modelle werden darüber hinaus noch möglichst regelmäßige und spärliche 3D-Modelle benötigt, das heißt die 3D-Modelle sollten aus so wenig Punkten, Kanten und Flächen wie möglich bestehen um eine schnelle und einwandfreie haptische Simulation zu ermöglichen, siehe Kapitel 9.

Das 3D-Modell wird unabhängig vom den anderen Repräsentationsschichten der linienbasierten Graphik repräsentiert. Der Aufbau des 3D-Modells ist für die haptische Exploration optimiert, nicht für Wissensrepräsentation oder Verarbeitung im Rahmen der Ereigniserkennung oder der multimodalen Interaktion.

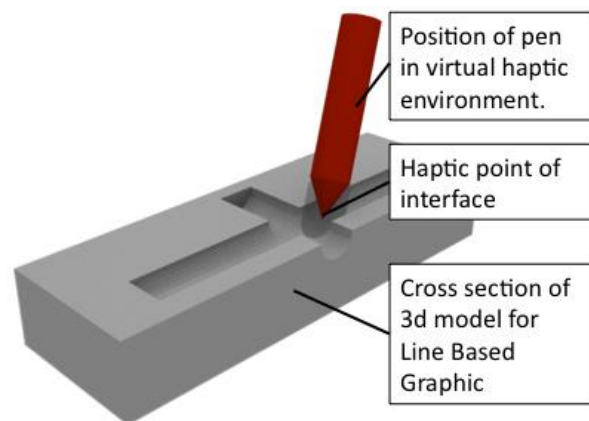


Abbildung 6.6: 3D-Modell, Rillen in der Ebene können als Linien verfolgt werden.

6.4 Flächen-Repräsentation

Die Aufgabe der Flächen-Repräsentation ist die Abbildung von Explorationen in der 3D-Umgebung auf die interne Repräsentation der linienbasierten Graphik. Analog zur Umsetzung der linienbasierten Graphik in ein 3D-Modell, bei der es zu einer „Verbreiterung von Linien zu Rillen“ kommt, muss hier nun der umgekehrte Weg gegangen werden. Positionen in einem dreidimensionalen Raum müssen auf ein Netzwerk von Linien und Punkten abgebildet werden. Wichtig dabei ist, dass die detektierten Positionen den durch den Benutzer „vermuteten“ bzw. wahrgenommenen Positionen entsprechen. Das heißt ein einfaches „Zurück-Kartieren“ ist nicht möglich. Vielmehr muss für jedes Element einer linienbasierten Graphik festgelegt werden, in welchem Bereich der Oberfläche eines 3D-Modell ein Benutzer beispielweise der Aussage zustimmen würde, dass er gerade einen Endpunkt einer Linie oder eine Linie selbst exploriert.

Punkte: Für Punkte wird ein Bereich um den eigentlichen Punkt herum modelliert, welcher auf den Punkt abgebildet wird. Dies kann typische Explorationsbewegungen, auf einen

einzelnen Punkt abbilden. Abbildung 6.7 zeigt die Bereiche welche einem Endpunkt einer Linie beziehungsweise einer Ecke zwischen zwei Linien zugeordnet werden. Der haptische Interfacepunkt (HIP) gilt dann als an der qualitativen Position eines Punktes befindlich, wenn er sich innerhalb des festgelegten Bereiches um einen Punkt und innerhalb einer Rille befindet. Das bedeutet zum Beispiel, wenn sich der haptische Interaktionspunkt einem Endpunkt einer Linie von außerhalb der Rille nähert, wird er nicht als „am Endpunkt befindlich“ erkannt, wohl aber in dem Augenblick in dem der Benutzer in die Rille gleitet. Dies entspricht einem intuitiven Verständnis der haptischen Darstellung. Es ist nicht sinnvoll mit dem Benutzer multimodal über einen Endpunkt zu kommunizieren, dem er keine passende haptische Wahrnehmung zuordnen kann.

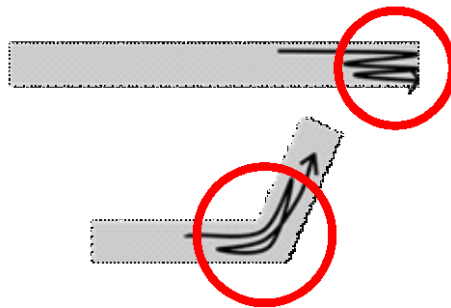


Abbildung 6.7: Umgebung von Punkten in der Flächen-Repräsentation mit entsprechenden Explorationsbewegungen dieser Punkte.

Linien und Segmente: Für Linien und Segmente ist die Frage der Umgebung weniger problematisch. Eine Linie beziehungsweise ein Segment hat als Entsprechung eine Rille im haptischen 3D-Modell, die Projektion des Randes dieser Rille auf eine Ebene wird als Bereich der Linie bzw. eines Segmentes angesehen.

Überlappung in der Flächen-Repräsentation: Durch die Ausdehnung von Punkten in der Flächen-Repräsentation kommt es dazu, dass sich der haptische Interaktionspunkt gleichzeitig an mehreren Positionen befinden kann, zum Beispiel kann er gleichzeitig in einer Linie und am Endpunkt einer Linie sein. Wieder entspricht dies einem intuitiven Verständnis der Zugehörigkeit eines Endpunktes zu einer Linie.

Komplizierter wird es, wenn ein Punkt zu mehreren Linien oder Segmenten gehört. Abbildung 6.8 zeigt vier C-Segmente welche sich in einem Konfigurationspunkt treffen. Der schraffierte Bereich zeigt den Bereich des Konfigurationspunktes, während der graue Bereich den der C-Segmente zeigt. In der Mitte der entstehenden Kreuzung gibt es einen Bereich der zu keinem der C-Segmente aber zum Konfigurationspunkt gehört. Werden aus den jeweils zwei kollinearen C-Segmenten Linien-Komplexe gebildet, gehört der Konfigurationspunkt per Definition (s.o.) zu jedem der beiden Linien-Komplexe. Es ist also möglich, dass sich der haptische Interaktionspunkt entlang eines Linien-Komplexes bewegt und dabei die C-Segmente des Linien-Komplexes verlässt, jedoch nicht den Linien-Komplex selbst.

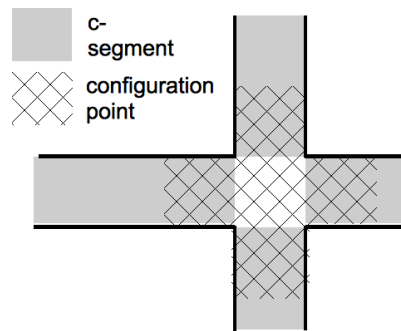


Abbildung 6.8: Flächen-Repräsentation von C-Segmenten und Konfigurationspunkt.

6.5 Evaluation des Formalismus

Ob der gegebene Formalismus die an ihn gestellten Aufgaben erfüllt, kann in erster Linie im Rahmen der Leistungsfähigkeit der Gesamtarchitektur bewertet werden. Trotzdem kann bereits an dieser Stelle diskutiert werden, ob der gewählte Ansatz den Richtlinien verwandter Problembereiche der Wissensverarbeitung und Repräsentation entspricht.

Mackworth (1988) stellt eine Reihe von Kriterien auf, denen eine propositionale Repräsentation für visuelle Szenen genügen sollte. Auch wenn es sich bei diesen Richtlinien explizit um eine visuelle Repräsentation handelt die im Kontext der Szeneninterpretation eingesetzt werden soll, besteht doch eine deutliche Ähnlichkeit zu einer Repräsentation welche für multimodale haptische linien-basierte Graphiken entwickelt wird. Mackworth nennt zuerst Kriterien der deskriptiven Adäquatheit (descriptive adequacy) welche angeben, ob ein Formalismus generell in der Lage ist, seine repräsentationelle Funktion zu erfüllen. Anhand dieser Kriterien soll die vorgeschlagene Repräsentation im Folgenden untersucht werden.

Kapazität (capacity): Die generative Kraft (generative power) einer Repräsentation gilt als ausreichend, wenn alles was dargestellt werden soll, auch dargestellt werden kann. Dieses Kriterium ist immer an den zu repräsentierenden Inhalten zu messen. Für die Anwendungsdomäne der Karten und der Linien-Graphen wurde gezeigt, dass dieses Kriterium erfüllt ist.

Primitive und Komposition (primitives & composition): Die Repräsentation soll auf Primitiven basieren, aus denen sich durch Komposition neue strukturierte Objekte bilden lassen. Linien bilden im Falle der linien-basierten Graphiken die Primitive. Statt nur die Komposition von Linien zu erlauben wird im gewählten Ansatz jedoch auch die Möglichkeit der Teilbildung und der anschließenden Komposition dieser Teile eingeräumt. Dies ist eine bewusste Abweichung von dem von Mackworth genannten Kriterium, welches einem intuitiven Verständnis der dargestellten Anwendungsdomänen folgt: Zum Beispiel gibt es die Linie eines Linien-Graphen, dies ist ein Primitiv einer linien-basierten Graphik. Durch Teilbildung kann ein besonderer Abschnitt in diesem Graphen repräsentiert werden.

Spezialisierung (specialization): Strukturierte Objekte sollen durch Spezialisierung weiter verfeinert werden. Dies geschieht an mehreren Stellen im Formalismus der linien-basierten Graphiken. So werden zum Beispiel Konfigurationspunkte weiter nach ihrer Struktur unterschieden oder Elementen der linien-basierten Graphik werden verschiedene Typen aus der Taxonomie der Anwendungsdomäne zugeordnet.

Subwelten und Darstellung (subworlds & depiction): Mackworth (1988) bezeichnet mit dem „Subworlds“ Kriterium eine Trennung zwischen Wissen über das Bild (image) und Wissens über die dargestellte Szene. Die Motivation für diese Unterscheidung ist es, keine Vermischungen zwischen Elementen verschiedener Repräsentationsebenen aufkommen zu lassen. Das „Depiction“-Kriterium sagt aus, dass es eine klare Vorschrift für die Abbildung von einer Szene in ein Bild geben muss.

Um diese Kriterien auf den vorgestellten Formalismus für linien-basierte Graphiken übertragen zu können, muss erst einmal die Terminologie angepasst werden. In einer linien-basierten Graphik stellt das Wissen aus der Anwendungsdomäne das Pendant zum „Wissen über die Szene“ dar und die linien-basierte Graphik selbst das „Bild“. Zwischen Elementen der Anwendungsdomäne und Elementen der linien-basierten Graphik besteht eine klare Trennung. Elemente der linien-basierten Graphik können durch die Prädikate „domainType“ und „domainName“ einem individuellen Element der Anwendungsdomäne zugeordnet werden, per se sind jedoch Elemente einer linien-basierten Graphik keine Elemente der Anwendungsdomäne.

Der Formalismus für linien-basierte Graphiken legt nicht fest, wie eine Abbildung von einer Anwendungsdomäne in eine linien-basierte Graphik stattfinden muss. Es ist denkbar, eine gegebene Karte (welche bereits eine Abbildung einer realen Szene auf ein Bild ist) auf verschiedene Weisen in eine linien-basierte Graphik umzusetzen. Für die praktische Anwendung von linien-basierten Graphiken in multimodalen Kontexten ist jedoch vorgesehen, diese Umsetzung stets einheitlich zu gestalten. Im Rahmen der realisierten Prototypen sorgen automatisierte Generierungsverfahren für einheitliche Umsetzungen.

Prozedurale Kriterien (procedural criteria): Da die Kriterien von Mackworth für den Bereich der Bildanalyse entwickelt worden sind, können das Kriterium der Korrektheit (Correctness) und die prozeduralen Kriterien, welche auf die Bildanalyse als Vorgang angewendet werden, nicht direkt übertragen werden.

Im Rahmen der Nutzung der linien-basierten Graphiken für die Ereigniserkennung während der haptischen Exploration können zumindest die Kriterien der Korrektheit (correctness), der Vollständigkeit (completeness), und der Effizienz (efficiency) übertragen werden. Das heißt die Repräsentation einer linien-basierten Graphik muss in der Lage sein, einer ereigniserkennenden Komponente die Grundlage zu schaffen, alle (relevanten und für die Erkennung vorgesehenen) Explorationsereignisse zu erkennen. Jedes erkannte Ereignis muss auch tatsächlich stattgefunden haben. Effizienz kann im Rahmen eines multimodalen,

interaktiven Szenarios so definiert werden, dass das entsprechende multimodale Reaktion von Seiten des Systems zeitgleich zur entsprechenden Explorationsereignis stattfinden soll.

Diese prozeduralen Kriterien sind jedoch bei Weitem nicht allein von der verwendeten Repräsentation abhängig, sondern vielmehr von den wissensbasierten Verfahren, welche die Repräsentation der linien-basierten Graphik nutzen, und wird an entsprechender Stelle diskutiert (siehe Kapitel 9 und folgende).

7 Repräsentation von Explorationsereignissen in haptischen linien-basierten Graphiken

7.1 Haptische Exploration von linien-basierten Graphiken

Aktive Exploration, das heißt das aktive Ertasten von Objekten, spielt in der haptischen Wahrnehmung nach Lederman und Klatzky (2009) eine herausragende Rolle. Lederman und Klatzky identifizieren verschiedene Arten von *explorativen Prozeduren* (*exploratory procedures*) mit denen verschiedene Eigenschaften explorierter Objekte untersucht werden. So kann beispielsweise die exakte Kontur eines Objektes exploriert werden in dem der Explorierende einer Kante des explorierten Objektes mit einem aufliegenden Finger verfolgt ohne den Kontakt zum explorierten Objekt abubrechen. Weitere Eigenschaften von Objekten, die mittels geeigneter explorativer Prozeduren erkundet werden können, sind Oberflächenbeschaffenheit, Härte, Temperatur, Gewicht und die globale (grobe) und exakte Form des explorierten Gegenstandes.

Im Falle haptischer Explorationen linien-basierter Graphiken in virtuellen Umgebungen steht ein deutlich anderes Inventar von haptischen Explorationsprozeduren zur Verfügung. Immer noch kann der Explorierende einzelne räumliche Details verfolgen, diese Wahrnehmung ist jedoch über ein haptisches Ein-/Ausgabegerät vermittelt – entspricht also dem Abtasten eines Objektes mit einem Stift oder ähnlichem (siehe Kapitel 3). Zwar können Eigenschaften wie Härte oder Oberflächenbeschaffenheit in der virtuellen haptischen Umgebung (mit einigen Einschränkungen) simuliert werden, jedoch tragen sie für die Vermittlung von domänenrelevanten oder räumlichen Informationen keine Funktion. Einzig der Verlauf der Linien in der Ebene wird exploriert – was am ehesten der Konturverfolgung nach Lederman und Klatzky entspricht.

In einer virtuellen haptischen Umgebung sind Linien als vertiefte Rillen dargestellt. Diese können leicht mittels des haptischen Interaktionspunktes verfolgt werden. In diesem Punkt unterscheiden sich virtuelle von nicht-virtuellen (hardcopy) taktilen linien-basierten Darstellungen (siehe Kapitel 3). Der Großteil der Exploration linien-basierter Graphiken in virtuellen haptischen Umgebungen besteht daher im Folgen der in der Regel netzwerkartig angeordneten Rillen des haptischen 3D-Modells, welche die Linien der linien-basierten Graphik darstellen.

Ein Großteil der Explorationsbewegungen ist somit auf das Folgen von linearen Strukturen beschränkt. Das Netzwerk der Rillen muss nur dann verlassen werden, wenn ein Element der linien-basierten Graphik nicht mit dem Rest des Netzwerkes verbunden ist. Je nach Anwendungsdomäne ist dies unterschiedlich stark verbreitet. So kommen alleinstehende Elemente der linien-basierten Graphik, welche nicht an das Netzwerk angebunden sind, bei Linien-Graphen überhaupt nicht vor. In der Domäne der Straßenkarten kommt dies nahezu ausschließlich bei Landmarken (welche neben dem Straßennetz stehen), nicht aber bei dem

eigentlichen Straßennetz vor. In der Domäne der Geometrie sind alleinstehende Elemente hingegen nicht unüblich. Die Explorationsbewegungen gleichen somit anderen, auf lineare Strukturen beschränkte Bewegungen, wie etwa die von Fahrzeugen in einem Straßennetz, oder Zügen in einem Schienennetz; vergleiche Pfoser und Jensen (2003). Die haptische Exploration von Liniennetzwerken ist in diesem Punkt vergleichbar mit haptischer Exploration von anderen Repräsentationen in denen das Verfolgen von Wänden und anderen Begrenzungen, also die Exploration von Objektkonturen, eine herausragende Rolle spielen; vergleiche Yu und Habel (2012).

Eine formale Ereignisrepräsentation ist sowohl als Grundlage der multimodalen Benutzerinteraktion, in der erkannte Ereignisse unter anderem mit sprachlichen Äußerungen verknüpft werden, als auch für die wissensverarbeitenden Prozesse zur Erkennung komplexer Ereignisse unter Berücksichtigung der Historie der bereits erkannten Ereignisse notwendig. Explorationsereignisse beschreiben (a) welche Explorationsvorgänge aktuell in der Exploration stattfinden, (b) welche Explorationsereignisse soeben begonnen haben, verändert oder beendet wurden oder (c) in der Vergangenheit stattgefunden haben. Letzterer Punkt ist vor allem für Schlüsse über komplexe Explorationsereignisse relevant, wenn etwa ermittelt werden soll, ob zum Beispiel bereits alle Elemente eines bestimmten Typs in einer linien-basierten Graphik exploriert worden sind.

7.2 Explorationsereignisse als Grundlage der multimodalen Interaktion

Erkannte Explorationsereignisse dienen als Grundlage einer multimodalen Mensch-Computer-Interaktion. Daher ist die wichtigste Anforderung, nach der eine formale Ereignisrepräsentation entwickelt wird, solche Explorationsereignisse zu erkennen und zu repräsentieren, welche im Rahmen einer multimodalen Interaktion mit sprachlichen oder nicht sprachlichen akustischen Signalen verknüpft werden. Die Ereignisrepräsentation wurde daher nach folgenden Grundgedanken entwickelt:

7.2.1 Bezug zu Elementen der linien-basierten Graphik

Ereignisse nehmen in ihrer Repräsentation Bezug auf die in Kapitel 6 definierten Elemente einer linien-basierten Graphik. Diese Elemente sind der Gegenstand der explorierten linien-basierten Graphik. In der multimodalen Assistenz soll auf diese Elemente eingegangen werden, etwa indem zusätzliche nicht-räumliche, und somit nicht durch haptische Exploration erfahrbare, Informationen wie Eigennamen oder aber schwierig zu explorierende räumliche Relationen akustisch vermittelt werden.

Das Erkennen von Explorationsereignissen soll stets aktuelle Informationen darüber liefern, welche Elemente einer linien-basierten Graphik aktuell exploriert werden. Auf Grund der Möglichkeit, Elemente einer linien-basierten Graphik durch Komposition zu komplexeren Elementen aufzubauen, können dies mehrere Elemente zur gleichen Zeit sein. Außerdem soll nicht nur die Tatsache, dass ein Element einer linien-basierten Graphik exploriert wird,

erkannt werden, es soll auch der Zustand dieser Exploration erkannt werden, das heißt es soll erkannt werden, ob eine Exploration gerade begonnen wurde, wie weit sie fortgeschritten ist, ob sie vollständig ausgeführt wurde und wann sie beendet wurde.

Neben Assistenzen, welche sich direkt auf die aktuelle Exploration beziehen, erlaubt eine Speicherung der bereits vergangenen Explorationsereignisse auch Schlüsse darüber zu ziehen, welche Elemente einer linien-basierten Graphik zum Beispiel noch nicht oder nur unvollständig exploriert worden sind. Auch solche Schlüsse, welche sich auf die gesamte Exploration einer linien-basierten Graphik beziehen, können im Rahmen von multimodaler Assistenz genutzt werden.

7.2.2 Erweiterbarkeit und Spezialisierbarkeit

Welche Ereignisse erkannt werden sollen und warum diese Ereignisse für die Assistenz-Generierung relevant sind, kann nur von Einzelfall zu Einzelfall für jede einzelne Anwendungsdomäne und Zielsetzung in Zusammenarbeit mit Domänenexperten geklärt werden. Unabhängig von der konkreten Domäne lässt sich jedoch ein Inventar an Explorationsereignissen entwickeln, welches als Basis für domänen- und anwendungsspezifische Ereignisse genutzt werden kann.

Genau wie die Elemente linien-basierter Graphiken nach dem Prinzip der Komposition und der Spezialisierung formalisiert sind, können auf diese Weise auch zusammengesetzte oder spezialisierte Ereignisse auf Grundlage bestehender Ereignisse definiert werden.

Ein komplexes Ereignis, das erkannt werden kann, ist zum Beispiel die vollständige Exploration eines Linien-Komplexes. Nach dem Prinzip der Spezialisierung kann ein Linien-Komplex durch Hinzufügen eines Faktes zu der propositionalen Repräsentation einer linien-basierten Graphik als eine geometrische Figur definiert werden. Ein weiterer Fakt kann genutzt werden, um zu repräsentieren, dass es sich bei dieser geometrischen Figur um ein Dreieck handelt.

Dieses Schema der Spezialisierung kann ohne großen Aufwand auf die Spezifikationen und Regeln zur Ereignisrepräsentation und -erkennung übertragen werden. Statt die allgemeine Exploration eines Linien-Komplexes zu erkennen, kann so in diesem Beispiel die Exploration einer geometrischen Figur oder eines Dreiecks erkannt und im Rahmen einer multimodalen Interaktion angemessen reagiert werden.

7.2.3 Hierarchische Komposition

Eine beobachtete Abfolge von Bewegungen kann unterschiedlich fein beschrieben werden, siehe Shipley und Maguire (2008). So kann eine haptische Exploration zum Beispiel als Exploration einer geometrischen Figur beschrieben werden. Ebenso kann die gleiche Exploration als eine Folge von mehreren Explorationsereignissen in Bezug auf die Seiten der geometrischen Figur beschrieben werden. Die gleiche beobachtete Explorationsbewegung kann so als Sequenz feinerer Explorationsereignisse beschrieben werden.

Genau wie die Repräsentation von linien-basierten Graphiken eine hierarchische Komposition von komplexen Elementen erlaubt, muss die Ereignisrepräsentation den hierarchischen Aufbau von Explorationsereignissen ermöglichen. Zum Beispiel besteht die Exploration eines Linien-Komplexes, der ein Dreieck formt, aus der Exploration aller drei Seiten des Dreiecks, das bedeutet, aus der vollständigen Exploration aller C-Segmente, welche Teil des Linien-Komplexes sind, welcher das Dreieck bildet. Die vollständige Exploration dieser C-Segmente besteht wiederum aus einer Explorationsbewegung, welche von einem Endpunkt des C-Segmentes zum anderen Endpunkt des C-Segmentes reicht. Diese vollständige Exploration eines C-Segmentes besteht somit wiederum aus einfacheren (Basis-) Explorationsereignissen, wie dem Erreichen der beiden Endpunkte ohne das explorierte C-Segment zu verlassen.

Der vorgestellte Ansatz versucht nicht, das Problem einer optimalen Feinheit der Repräsentation von Explorationsereignissen von haptischen linien-basierten Graphiken abschließend zu klären. Stattdessen wird eine hierarchische Ereignisrepräsentation vorgeschlagen. Analog zum Prinzip der Komposition von Elementen einer linien-basierten Graphik können komplexere Explorationsereignisse aus einfachen Explorationsereignissen zusammengesetzt werden. Welche Ebene in einer solchen hierarchischen Komposition von Explorationsereignissen tatsächlich im Rahmen einer multimodalen Interaktion genutzt werden, hängt wiederum von der Anwendungsdomäne und den zu vermittelnden Inhalten ab. Der vorgestellte Ansatz zielt darauf ab, für gegebene Elemente einer linien-basierten Graphik Explorationsereignisse in unterschiedlichen „Feinheitsgraden“ zu erkennen und für nachgeordnete assistenzgenerierende Komponenten zur Verfügung zu stellen. Eine Auswahl der Explorationsereignisse, auf welche mit einer multimodalen Äußerung seitens des Systems reagiert wird, wird in diesen Komponenten getroffen. Jedes Explorationsereignis in dieser hierarchischen Struktur kann wiederum genutzt werden, um eine andere multimodale Assistenz auszulösen oder zu generieren. So kann zum Beispiel die Exploration des gesamten Dreiecks kommentiert werden, die Explorations jeder einzelnen Seite oder auch das Erreichen eines der Eckpunkte des Dreiecks.

7.2.4 Beschränkung auf Linien-Exploration

Unabhängig von der Anwendungsdomäne bietet das Netzwerk von Linien eine verlässliche Führung für die haptische Exploration. Orientierung ist ohne visuelles Feedback in einer virtuellen haptischen Umgebung schwierig, da es schwer fällt Distanzen und Winkel abzuschätzen (siehe Kapitel 3).

Erste Vorversuche haben gezeigt, dass Versuchspersonen dieses Netzwerk selten verlassen und dies erst dann tun, wenn sie bereits einige Zeit mit der Exploration des Liniennetzwerkes verbracht haben. In späteren Versuchen wurden Versuchspersonen für Explorationsereignisse haptischer linien-basierter Graphiken im Rahmen von Experimenten instruiert linienverfolgend zu explorieren. Nur in wenigen Fällen wurden Explorationsbewegungen außerhalb der Rillen des Liniennetzwerkes durchgeführt um Regionen flächendeckend zu erkunden.

Die für die multimodale Interaktion zu erkennenden Explorationsereignisse sind daher vorrangig Explorationsereignisse in Bezug auf die Linien und die durch sie gebildeten Elemente der linien-basierten Graphiken. Obwohl diese Aussage selbstverständlich scheint, ist zu beachten, dass in anderen Wahrnehmungsmodalitäten, etwa in der visuellen Wahrnehmung, das Verfolgen von Konturen eine weniger große Rolle spielt.

7.2.5 Analyse der Explorationsbewegung in Bezug auf Linienexploration

Bewegungen in der Ebene lassen sich nicht nur in Bezug auf die in dieser Ebene vorhandenen Elemente beschreiben, sondern auch unabhängig von diesen als eine Trajektorie in der Ebene auffassen. Man stelle sich dazu vor, die Explorationsbewegungen in der Ebene zu betrachten ohne zu wissen, ob und welche Elemente einer linien-basierten Graphik sich in dieser Ebene befinden.

Die Trajektorie der Explorationsbewegung wird – der oben aufgezeigten Argumentation folgend – ebenfalls in Bezug auf ein Liniennetzwerk vorgenommen. So wird erkannt, ob der haptische Interaktionspunkt während der Exploration stehen bleibt, wann er sich wieder beginnt zu bewegen und ob hierbei die Richtung gewechselt wurde.

7.3 Arten von Explorationsereignissen

Explorationsereignisse lassen sich in verschiedene Gruppen einteilen. Alle Explorationsereignisse können innerhalb der vorgeschlagenen Architektur genutzt werden, um eine multimodale Interaktion mit dem Benutzer zu steuern, jedoch werden die verschiedenen Gruppen von Ereignissen an verschiedenen Stellen der Architektur generiert und dann in eine gemeinsame Wissensbasis eingespeist.

Im Folgenden werden die verschiedenen Arten von Explorationsereignissen vorgestellt:

7.3.1 Beobachtete und erschlossene Explorationsereignisse

Explorationsereignisse können danach unterschieden werden, ob sie innerhalb der Softwarearchitektur direkt beobachtet werden können oder erst unter Rückgriff auf bereits beobachtete und/oder innerhalb der Wissensbasis des Systems repräsentierte Ereignisse erschlossen werden können.

Diese Unterteilung ist angelehnt an ein Modell eines menschlichen Beobachters, welcher einige Ereignisse ebenfalls durch bloßes Hinsehen im richtigen Augenblick erkennen kann (wie zum Beispiel das Ankommen des haptischen Interfacepunktes am Ende einer Linie); andere jedoch unter Rückgriff auf die eigene Erinnerung erschließen muss (wie zum Beispiel die Frage ob eine geometrische Figur vollständig exploriert wurde). Es ist nicht Gegenstand der präsentierten Forschung menschliche Ereigniserkennung zu untersuchen. Daher bezieht sich die Unterteilung in beobachtbare und nur durch Schlüsse erkennbare Ereignisse

ausschließlich auf die Perzeption und Wissensverarbeitung innerhalb des entwickelten Systems zur Ereigniserkennung.

Explorationsereignisse welche vom System perzipiert werden, werden als *Basisereignisse* bezeichnet, da sie im Rahmen der Wissensverarbeitung zur Ereigniserkennung die kleinste Einheit bilden, aus denen weitere Ereignisse hierarchisch aufgebaut werden. Nicht direkt beobachtbare Ereignisse werden *komplexe Ereignisse*, oder der Einfachheit halber nur Ereignisse, genannt.

7.3.2 Zeitlich ausgedehnte und nicht ausgedehnte Ereignisse

Explorationsereignisse können ebenfalls nach ihrer zeitlichen Ausdehnung unterschieden werden. *Zeitlich nicht-ausgedehnte (non-extended)* Explorationsereignisse beantworten die Frage „*Was ist gerade passiert?*“ während zeitlich ausgedehnte Explorationsereignisse die Frage beantworten „*Was findet gerade statt?*“.

Nicht-ausgedehnte Ereignisse geschehen in einem einzelnen Moment. Auf technischer Ebene bedeutet dies, dass sich in einem einzelnen Beobachtungszyklus²⁰ der Position des haptischen Interfacepunktes eine qualitative Aussage über dessen Position oder Bewegung ändert: In einem Augenblick fährt der Benutzer mit dem haptischen Interfacepunkt eine Rille entlang die eine Straße darstellt – im nächsten ist er an einer Kreuzung angekommen.

Zeitlich ausgedehnte Explorationsereignisse beschreiben anhaltende Explorationsprozesse. Diese ausgedehnten Explorationsereignisse sind für eine multimodale Assistenz begleitend zu einer haptischen Exploration besonders wichtig. Multimodale Assistenz soll begleitend zu einer laufenden Explorationsbewegung gegeben werden und nicht erst im Nachhinein nach einer abgeschlossenen oder abgebrochenen Exploration eines Elementes einer linien-basierten Graphik.

7.3.3 Direkte Beobachtbarkeit und zeitliche Ausdehnung von Explorationsereignissen

Direkte Beobachtbarkeit und zeitliche Ausdehnung sind nur begrenzt unabhängige Eigenschaften von Explorationsereignissen:

Zeitlich ausgedehnte Explorationsereignisse sind per Definition stets komplexe Explorationsereignisse, da sie hierarchisch auf mindestens einem (Start-) Ereignis beruhen und oftmals mehrere zeitlich auseinanderliegende Ereignisse in ihrem Aufbau umfassen.

Zeitlich nicht-ausgedehnte Explorationsereignisse müssen nicht zwangsläufig direkt beobachtbar sein. Das oben genannte Beispiel, an einer Kreuzung (einem besonderen Punkt in

²⁰ Während die Berechnung der haptischen Simulation mit etwa 1000 Herz abläuft, läuft der Abgleich der Position des haptischen Interfacepunktes und die Analyse der Bewegungstrajektorie mit nur etwa 100 Herz – was für einen menschlichen Beobachter immer noch verzögerungsfrei wirkt und das System nicht unnötig mit erhöhtem Aufwand belastet. Das zeitliche Intervall, in dem ein nicht ausgedehntes Ereignis stattfindet, kann also auf 10 Millisekunden genau bestimmt werden.

einer linien-basierten Graphik) anzukommen, ist direkt beobachtbar. Das mit diesem Ankommen zum Beispiel ein Linien-Komplex vollständig exploriert wurde, kann erst mit Rückgriff auf das Wissen um vergangene Explorationsereignisse erschlossen werden.

Tabelle 7.1. zeigt Beispiele für die verschiedenen möglichen Kombinationen von Beobachtbarkeit und zeitlicher Ausdehnung. In den folgenden drei Abschnitten werden diese drei Arten von Ereignissen, die nicht-ausgedehnten Basisereignisse, die nicht zeitlich ausgedehnten (erschlossenen) Ereignisse und die zeitlich ausgedehnten (erschlossenen) Ereignisse genauer erläutert.

	Beobachtbar	nicht beobachtbar
zeitlich nicht-ausgedehnt	Nicht-ausgedehnte Basisereignisse	Nicht-ausgedehnte Ereignisse z.B.:
	Ankommen an einem ausgezeichneten Punkt einer linien-basierten Graphik	Abschließen einer vollständigen Exploration einer Linie
	Verlassen einer Linie	Abbrechen der Exploration einer geometrischen Figur
	Stoppen der Explorationsbewegung	
zeitlich ausgedehnt	-	Ausgedehnte Ereignisse z.B.:
		Exploration einer Linie, einer Kreuzung, einer geometrischen Figur

Tabelle 7.1. Arten von Explorationsereignissen mit Beispielen.

7.4 Nicht-ausgedehnte Basisereignisse

Explorationsereignisse welche zeitlich nicht ausgedehnt sind und direkt vom System beobachtet werden können, werden als *nicht-ausgedehnte Basisereignisse* (*basic nonextended events*) bezeichnet. Sie werden direkt aus den Positionsdaten des haptischen Interfacepunktes mit Rückgriff auf eine interne Repräsentation der haptischen linien-basierten Graphik detektiert. Dieser Vorgang entspricht dem Übergang von kontinuierlicher Perzeption, dem Strom von Positionsdaten, zu einer Folge diskreter Explorationsereignisse.

Basisereignisse bilden die kleinsten diskreten Bausteine von Explorationsereignissen. Aus ihnen werden komplexere Ereignisse mit Hilfe einer regelbasierten Wissensverarbeitung unter Rückgriff auf die propositionale Repräsentation räumlichen und domänenspezifischen Wissens über die explorierte linien-basierte Graphik erschlossen.

Es gibt zwei Arten von nicht-ausgedehnten Basisereignissen, *Enter-* und *Exit-Ereignisse* beziehen sich auf eine Veränderung der qualitativen Position des haptischen Interfacepunktes in Relation zur explorierten linien-basierten Graphik. *Trajektionsereignisse* beziehen sich auf

eine qualitative Veränderung einer Bewegungstrajektorie des haptischen Interfacepunktes in Bezug auf die Linienverfolgung einer haptischen linien-basierten Graphik.

7.4.1 Enter- & Exit- Basisereignisse

Dem Prinzip der Komposition von Elementen einer linien-basierten Graphik folgend, beziehen sich die Basisereignisse, welche qualitative Positionsveränderungen bei der Exploration einer haptischen linien-basierten Graphik beschreiben, auf die kleinsten möglichen Elemente linien-basierter Graphiken. Diese Elemente sind Konfigurationspunkte und Segmente als kleinste Teile einer Linie. Es ist zu beachten, dass eine Linie in der internen Repräsentation stets als eine verbundene Folge von C-Segmenten repräsentiert ist, auch wenn die Linie selbst gar nicht durch Konfigurationspunkte unterbrochen wird – in diesem Fall besteht die Linie aus einem einzelnen C-Segment, welches kongruent zur Linie selbst ist. Daher genügt es, Segmente als kleinste Einheiten qualitativer Positionsveränderungen zu nutzen.

Für jedes Segment und jeden Punkt einer linien-basierten Graphik ist ein dreidimensionaler Raum in der virtuellen haptischen Umgebung definiert. Die qualitative Position des haptischen Interfacepunktes besteht in der Menge aller Segmente und Punkte in dessen assoziiertem Raum sich der haptische Interfacepunkt befindet. Ändert sich die qualitative Position des haptischen Interfacepunktes im Laufe einer Exploration, wird dies als ein nicht-ausgedehntes Basisereignis detektiert: Kommt ein Punkt oder ein Segment einer linien-basierten Graphik neu in die Menge der qualitativen Positionen hinzu, ist dies ein Enter-Ereignis (enter event), verschwindet ein Element aus dieser Menge, handelt es sich um ein Exit-Ereignis (exit event) jeweils in Bezug auf das entsprechende Element.

Da linien-basierte Graphiken in der Ebene eingebettet sind, kann auf die dritte Dimension in dieser Raumdefinition weitestgehend verzichtet werden. Befindet sich der haptische Interfacepunkt unterhalb der virtuell haptisch erkundbaren Ebene in welcher die Rillen der Linien ausgespart sind, so gilt der haptische Interfacepunkt als innerhalb der Rille. Es wird dabei vernachlässigt, ob auch tatsächlich ein Kontakt zum Boden der Rille besteht, um zu vermeiden, dass leichte Kontaktverluste durch Bewegungen des Benutzers als ein Verlassen einer explorierten Rille erkannt werden. So wird eine Robustheit gegenüber unterschiedlicher Handhabung des haptischen Ein-/Ausgabegerätes erreicht.

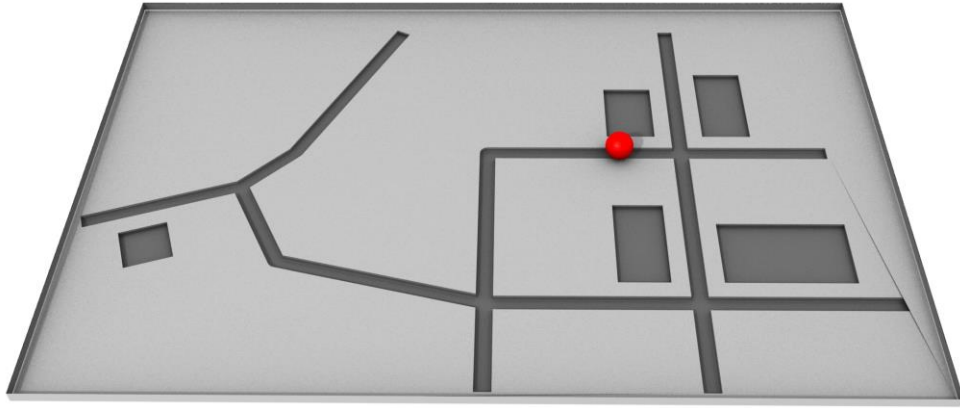


Abbildung 7.1: Visuelle Darstellung des haptischen 3D-Modelles einer linien-basierten Graphik aus der Domäne der Straßenkarten. Landmarken sind als Vertiefungen realisiert.

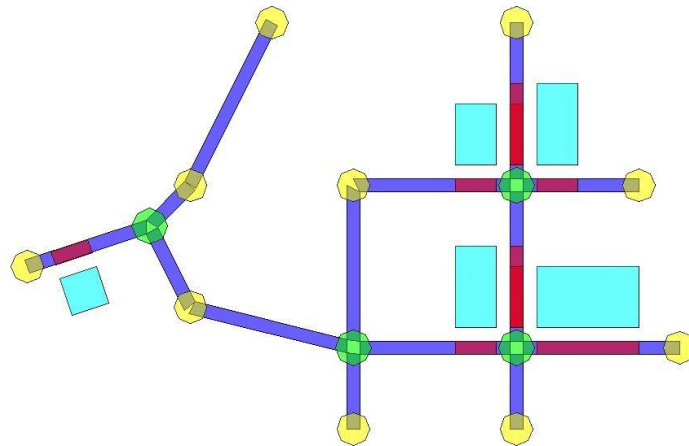


Abbildung 7.2: Assoziierte Bereiche zu den einzelnen Elementen der linien-basierten Graphik aus Abbildung 7.1.

Jedes Segment und jeder Punkt hat darüber hinaus eine individuelle zweidimensionale Repräsentation, welche beschreibt, an welcher Koordinaten des haptischen Interfacepunktes als innerhalb des Segmentes beziehungsweise des Punktes gelten. Auch wenn Punkte mathematisch keine Ausdehnung haben, werden sie in einer virtuellen haptischen Umgebung durch aktive Explorationsbewegungen in der Umgebung des Punktes erkundet. Dazu gehören zum Beispiel wiederholte Stoßbewegungen gegen die virtuelle Wand, welche das Ende einer Linie in der virtuellen haptischen Umgebung markiert, oder wiederholtes Entlangfahren einer Ecke, welche durch zwei sich treffende Linien gebildet wird. Daher werden für Punkte einer linien-basierten Graphik kreisförmige Flächen um einen Punkt herum definiert, innerhalb derer der haptische Interfacepunkt als an dem Punkt befindlich gilt, sofern er sich unterhalb der eigentlichen Explorationsebene und somit innerhalb des Netzwerkes aus Rillen befindet. Hierdurch wird erreicht, dass es nicht dem Zufall überlassen bleibt, ob der haptische Interfacepunkt sich genau an einem nicht ausgedehnten Punkt befindet. Typische Explorationsbewegungen (siehe Abbildung 7.3 bis 7.5), die der Erkundung eines Punktes einer haptischen linien-basierten Graphik gelten, führen nicht dazu, dass eine Oszillation

zwischen Betreten- und Verlassen des Punktes auftritt, sondern der haptische Interfacepunkt als kontinuierlich an dem explorierten Punkt befindlich gilt. Tabelle 7.2 zeigt die propositionale Repräsentation von Enter- und Exit-Basisereignissen. Abbildung 7.1 zeigt eine haptische linien-basierte Straßenkarte als visuelles 3D-Modell. Abbildung 7.2 zeigt eine Darstellung der mit den einzelnen Elementen dieser linien-basierten Graphik assoziierten Bereiche.

Propositionale Beschreibung	Verbale Beschreibung
$\text{enter}(e, o, t)$	Das nicht-ausgedehnte Basisereignis e beschreibt das Betreten (enter) eines mit einem C-Segment oder Konfigurationspunkt o assoziierten Bereiches zum Zeitpunkt t .
$\text{exit}(e, o, t)$	Das nicht-ausgedehnte Basisereignis e beschreibt das Verlassen (exit) eines mit einem C-Segment oder Konfigurationspunkt o assoziierten Bereiches zum Zeitpunkt t .

Tabelle 7.2: Propositionen zur Repräsentation von nicht-ausgedehnten Enter- und Exit- Basisereignissen.

7.4.2 Basisereignisse in Bezug auf die Bewegungstrajektorie

Basisereignisse in Bezug auf die Bewegungstrajektorie beschreiben qualitative Veränderungen der Bewegung des haptischen Interfacepunktes in Relation zu einer verfolgten Linie einer haptischen linien-basierten Graphik, also einer Bewegung innerhalb einer Rille. Qualitativ wird eine solche Bewegung dadurch beschrieben, ob überhaupt eine Bewegung stattfindet und wenn ja in welcher Richtung die Bewegung innerhalb der Rille stattfindet. Sowohl Bewegung als auch Richtung werden binär repräsentiert:

Entweder findet eine Bewegung statt oder der haptische Interfacepunkt steht still, dabei sorgt ein Toleranzbereich dafür, dass es nicht zu Oszillationen zwischen Start- und Stopp-Ereignissen kommt. Dem Prinzip des Schmidt-Triggers (Tietze & Schenk, 2002) folgend, fallen die Schwellen für das Detektieren eines Stopp-Ereignisses und eines Start-Ereignisses nicht zusammen. Unterhalb einer festgelegten Geschwindigkeitsschwelle gilt der haptische Interfacepunkt als stehend, erst wenn die Bewegung eine Geschwindigkeit erreicht, die leicht oberhalb dieser Schwelle liegt, wird ein Startereignis detektiert.

Die Richtung der Bewegung wird in Bezug auf die aktuell explorierte Linie repräsentiert, sie kann also von einem Endpunkt der Linie zu einem anderen oder aber genau entgegengesetzt verlaufen. Dadurch wird wiederum eine Robustheit gegenüber den Schwankungen in der manuellen Handhabung des haptischen Ein-/Ausgabegerätes erreicht, indem von leichten Änderungen in der Richtung der Bewegung innerhalb einer Rille abstrahiert wird. Auch Bewegungen innerhalb von gekrümmten Linien werden auf diese Art beschrieben.²¹

²¹ Möchte man den genauen Winkel der Richtungsänderung bestimmen, welche beim Wechsel des haptischen Interfacepunktes zwischen zwei nicht kollinearen Linien bestimmen, so genügt es, den Winkel zu kennen, in

Tabelle 7.3 zeigt propositionale Repräsentation von Basisereignissen in Bezug auf die Bewegungstrajektorie.

Propositionale Beschreibung	Verbale Beschreibung
$t\text{-start}(e, p, d, t)$	Das nicht ausgedehnte Basisereignis e beschreibt den Start einer Bewegung des haptischen Interfacepunktes in einer Linie ausgehend vom Punkt p , in Richtung d zum Zeitpunkt t .
$t\text{-stop}(e, p, d, t)$	Das nicht ausgedehnte Basisereignis e beschreibt den Stopp einer Bewegung des haptischen Interfacepunktes in einer Linie am Punkt p , aus der Richtung d kommend zum Zeitpunkt t .
$t\text{-turn}(e, p, d, t)$	Das nicht ausgedehnte Basisereignis e beschreibt das Umkehren der Bewegung des haptischen Interfacepunktes in einer Linie ohne dabei zu stoppen am Punkt vom Punkt p in Richtung d zum Zeitpunkt t .

Tabelle 7.3: Propositionen zur Repräsentation in Bezug auf die Bewegungstrajektorie.

7.5 Ausgedehnte Explorationsereignisse

Ausgedehnte Explorationsereignisse beschreiben Explorationsprozesse in Bezug auf Elemente einer linien-basierten Graphik. Je nach Art des Elementes der linien-basierten Graphik können diese Explorationsprozesse in unterschiedlichen Explorationsbewegungen bestehen, welche je nach Benutzer zudem deutlich unterschiedlich ausgeführt werden können. Ziel der Repräsentation von Explorationsereignissen ist es, von diesen Variationen in der konkreten Explorationsbewegung zu abstrahieren. Unabhängig davon, mit welchen Bewegungen ein Benutzer ein Element einer linien-basierten Graphik exploriert, soll dies intern als seine Exploration dieses Elements erkannt und repräsentiert werden.

In diesem Kapitel werden zuerst exemplarisch einige ausgewählte ausgedehnte Explorationsereignisse vorgestellt. Danach werden die in der propositionalen Repräsentation dieser Ereignisse genutzten Eigenschaften erläutert. Erst nachdem in Abschnitt 7.6 die komplexen nicht-ausgedehnten Ereignisse, welche ausgedehnte Ereignisse modifizieren, eingeführt worden sind, wird eine vollständige Spezifikation der ausgedehnten Explorationsereignisse in Abschnitt 7.7 ausgeführt.

welchem diese Linien zueinander stehen. Eine solche räumliche Relation kann innerhalb der propositionalen Beschreibung einer multimodalen linien-basierten Graphik repräsentiert werden.

7.5.1 Exemplarische Explorationsbewegungen für verschiedene Elemente einer linien-basierten Graphik

Im Folgenden sollen exemplarisch einige Explorationsbewegungen dargestellt werden, um aufzuzeigen, welche Bandbreite an verschiedenen Explorationsbewegungen existiert und welche unterschiedlichen Formen sie bei verschiedenen Benutzern annehmen können.

7.5.1.1 Exploration eines Segments

Explorationen von Segmenten bestehen oft (aber nicht immer) aus mehreren Vor- und Zurückbewegungen. Diese wiederholten Bewegungen erlauben es dem Explorierenden, den genauen Winkel und die Länge eines Segmentes besser einzuschätzen. Abbildung 7.3 zeigt drei verschiedene Explorationsbewegungen, die bei einer solchen Exploration ausgeführt werden können: (a) Eine einfache gerade Bewegung von einem Ende des Segments zum anderen. (b) Eine Bewegung von einem Ende des Segments zum anderen mit einer einzigen langen Vor- und Zurückbewegung. (c) Eine Bewegung welche an einem Ende eines Segmentes startet, aus vielen kleinen Vor- und Zurückbewegungen besteht, aber das andere Ende des Segmentes nicht erreicht – das Segment wurde in diesem Fall also nicht vollständig exploriert.

Vor- und Zurückbewegungen werden zwar im Rahmen der Trajektorienanalyse als Basisereignisse erkannt, haben aber keinen Einfluss darauf ob ein Explorationsereignis erkannt und in die Wissensbasis aufgenommen wird.

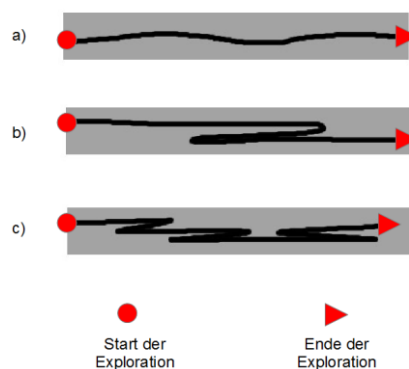


Abbildung 7.3: Drei Explorationsbewegungen in einem Segment: (a) Annähernd gerade Explorationsbewegung. (b) Explorationsbewegung mit einer Vor- und Zurückbewegung. (c) Explorationsbewegung mit mehreren kurzen Vor- und Zurückbewegungen.

Was hier für die Exploration eines Segmentes beschrieben wird, kann auf die Exploration anderer linearer Elemente einer linien-basierten Graphik, wie eine Linie oder einen Linien-Komplex aus seiner nicht verzweigenden Folge von C-Segmenten, übertragen werden – in diesen Fällen finden sich ähnliche Bewegungsmuster.

7.5.1.2 Exploration eines Konfigurationspunktes

Konfigurationspunkte werden durch Bewegungen in ihrer Umgebung exploriert. Treffen sich mehr als zwei C-Segmente in einem Konfigurationspunkt, ist es notwendig, jedes dieser C-Segmente kurz zu explorieren, um zu erfahren wie viele C-Segmente zusammentreffen und in welchem Winkel sie zueinander liegen. Abbildung 7.4 zeigt zwei verschiedene Explorationsbewegungen, die bei einer solchen Exploration ausgeführt werden können: (a) Eine gerade Bewegung durch einen Explorationspunkt, allerdings wurde dabei nicht das dritte C-Segment, welches in diesem Punkt mit den beiden anderen C-Segmenten zusammentrifft exploriert. Die Exploration des Konfigurationspunktes gilt daher nicht als vollständig. Es ist nicht sicher, ob der Benutzer diesen Konfigurationspunkt überhaupt als einen solchen wahrgenommen hat. (b) Der Konfigurationspunkt wird vollständig durch eine kurze Vor- und Zurückbewegung in den "Seitenarm" exploriert.

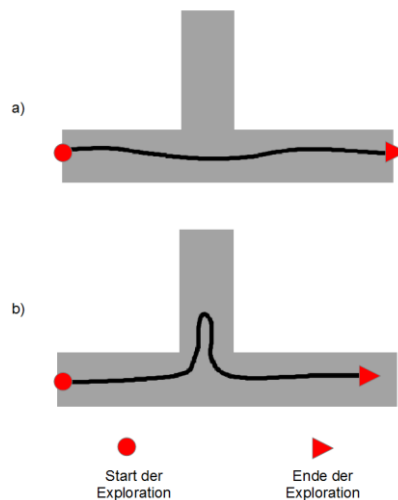


Abbildung 7.4: Zwei Explorationsbewegungen in einem Konfigurationspunkt: (a) Annähernd gerade Explorationsbewegung, der Seitenarm wird nicht exploriert. (b) Explorationsbewegung mit einer Vor- und Zurückbewegung in den Seitenarm.

Die Bereiche des haptisch explorierten 3D-Modells, welche C-Segmenten und Konfigurationspunkten zugeordnet sind, überlappen sich. Daher ist es möglich, wie in Beispiel (b), alle "Arme" eines Konfigurationspunktes zu explorieren ohne den Konfigurationspunkt selbst zu verlassen. Umgekehrt ist es ebenso möglich, die (Konfigurationspunkte an den) Enden eines C-Segments zu explorieren, ohne das C-Segment selbst zu verlassen.

7.5.1.3 Exploration einer geometrischen Figur (Linien-Komplex)

Die Explorationsbewegungen von Linien-Komplexen lassen im Vergleich zu der Exploration von einzelnen Segmenten oder Konfigurationspunkten noch komplexere Bewegungsmuster mit mehrfachen Wiederholungen zu. Auch in diesem Fall soll von den individuellen Bewegungsmustern verschiedener Explorationen durch unterschiedliche Benutzer abstrahiert werden können.

Abbildung 7.5 zeigt drei verschiedene Explorationsbewegungen innerhalb eines Linien-Komplexes, welcher eine geometrische Figur (ein Dreieck) formt. (a) und (b) Es wird eine vollständige Exploration der geometrischen Figur durchgeführt, wobei wiederholte Vor- und Zurückbewegungen stattfinden. In (a) konzentrieren sich diese wiederholten Explorationsbewegungen auf die Eckpunkte des Dreiecks (Konfigurationspunkte), in (b) beziehen sie sich auf die Seiten des Dreiecks (C-Segmente). (c) Auch in diesem Beispiel wird das Dreieck vollständig exploriert, statt wie in (a) und (b) jedoch einzelne Teile des Dreiecks durch wiederholte Bewegungen genauer zu explorieren, wird das Dreieck in seiner Gesamtheit mehrfach abgefahren.

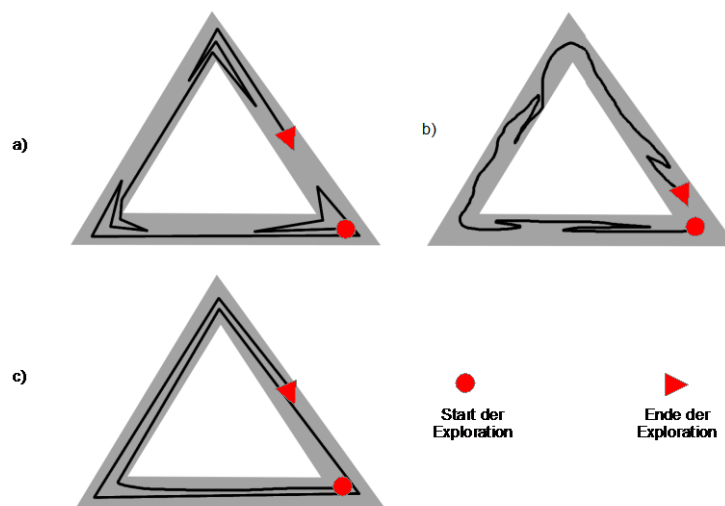


Abbildung 7.5: Drei Explorationsbewegungen in einem Linien-Komplex: (a) Exploration mit Fokus auf Eckpunkte. (b) Exploration mit Fokus auf Seiten. (c) Mehrfache Exploration.

Alle drei Explorationsbewegungen in diesem Beispiel sind vollständige Explorationsbewegungen des Dreiecks und sollen als solche erkannt und repräsentiert werden. Dazu ist es notwendig, dass die Exploration eines Linien-Komplexes von der Reihenfolge der Exploration seiner Bestandteile und möglichen Wiederholungen abstrahiert.

7.5.2 Eigenschaften von ausgedehnten Ereignissen

Ausgedehnte Ereignisse werden in propositionaler Form durch ihren Typ, einen Bezeichner für das individuelle Ereignis und eine Menge weiterer Eigenschaften beschrieben, welche den hierarchischen Aufbau des Explorationsprozesses und seinen aktuellen Zustand beschreiben. Diese Eigenschaften dienen sowohl der genaueren Beschreibung der Explorationsereignisse für deren Nutzung im Rahmen der multimodalen Interaktion mit dem Benutzer, als auch der regelbasierten Ereigniserkennung selbst, dies wird genauer im folgenden Kapitel 9 erläutert. An dieser Stelle werden zunächst die verschiedenen Eigenschaften beschrieben:

7.5.2.1 Hierarchischer Aufbau: Liste der untergeordneten Ereignisse

Ausgedehnte Ereignisse werden durch die Aggregation einfacherer Ereignisse in einer hierarchischen Struktur erkannt. Zeitlich nicht-ausgedehnte Basisereignisse bilden die

Grundlage für das Erkennen von einfachen ausgedehnten Explorationsereignissen in Bezug auf Segmente und Konfigurationspunkte. Diese ausgedehnten Explorationsereignisse werden wiederum genutzt, um komplexere Ereignisse wie zum Beispiel die Exploration von Linien-Komplexen zu erkennen.

Ist ein Ereignis E_1 Teil des hierarchischen Aufbaus eines anderen Ereignisses E_2 so gilt das Ereignis E_1 als dem Ereignis E_2 untergeordnet (subordinated). Jedes Ereignis, das kein Basisereignis ist, enthält in seiner Repräsentation eine Liste seiner untergeordneten Ereignisse. Dies erlaubt es, die hierarchische Struktur eines Ereignisses zu repräsentieren. Darüber hinaus kann diese Liste von untergeordneten Ereignissen im Rahmen der wissensbasierten Ereignisverarbeitung genutzt werden.

7.5.2.2 Zeitliche Eigenschaften: Zeitstempel, qualitative zeitliche Relationen und Abgeschlossenheit

Direkt beobachtete Ereignisse, also zeitlich nicht-ausgedehnte Basisereignisse, werden bei ihrer Beobachtung mit einem (Pseudo-) Zeitstempel versehen, welcher den Zeitpunkt ihrer Erkennung im Rahmen der Abtastfrequenz der Beobachtungen auf 10 Millisekunden genau bestimmt.

Da alle anderen Ereignisse hierarchisch aufgebaut sind und diese Hierarchie bis hinunter zu diesen nicht-ausgedehnten Basisereignissen reicht, ist es möglich durch Nutzung dieser Hierarchie den Zeitpunkt aller nicht-ausgedehnten komplexen Ereignisse beziehungsweise den Start- und Endzeitpunkt jedes ausgedehnten komplexen Ereignisses zu bestimmen.

Für die Spezifikation von Explorationsereignissen und ihre Erkennung innerhalb der regelbasierten Wissensverarbeitung sind qualitative zeitliche Relationen oft nützlicher als genaue (Pseudo-) Zeiten. Der Ablauf eines komplexen Ereignisses kann auf qualitative Weise oft genau genug, aber trotzdem verallgemeinerbar beschrieben werden. Auf Basis von (Pseudo-) Zeitstempeln lassen sich qualitative zeitliche Relation, wie zum Beispiel die von Allen (1981) vorgeschlagenen Relationen, welche im gleichnamigen Allen-Kalkül genutzt werden, berechnen. Die Nutzung qualitativer zeitlicher Relationen wird in Kapitel 8 genauer ausgeführt.

Zu einem gegebenen Zeitpunkt der Exploration kann für ein ausgedehntes Explorationsereignis gelten, dass es entweder gerade stattfindet oder aber abgeschlossen ist in dem Sinne, dass dieses Explorationsereignis unwiderrufbar vorbei ist. Dies wird über die Eigenschaft *offen* (*open*) beschrieben. Ein offenes Explorationsereignis findet gerade statt, ein geschlossenes (nicht offenes) Explorationsereignis hat in der Vergangenheit stattgefunden und ist nur als Teil der Explorationshistorie in der Wissensbasis repräsentiert. Diese Eigenschaft ist in einem multimodalen Assistenzszenario wichtig, da in der Regel explorationsbegleitende Assistenzen zu offenen Ereignissen gegeben werden. Trotzdem kann es vorkommen, dass darüber geschlossen werden soll, ob Elemente der linien-basierten Graphik bereits in der Vergangenheit exploriert worden sind. Zudem wird diese Eigenschaft genutzt, um im Rahmen der regelbasierten Wissensverarbeitung den Berechnungsaufwand zu verringern.

Geschlossene Ereignisse werden nicht mehr modifiziert und müssen daher nicht in jedem regelbasierten Berechnungszyklus beachtet werden. Spezielle Regeln erkennen, wann ein Ereignis abgeschlossen wird, siehe Kapitel 8.

Wird ein Element einer linien-basierten Graphik, zu dem bereits ein geschlossenes Explorationsereignis in der Wissensbasis existiert, erneut exploriert, so wird dies als ein neues, von der Explorationshistorie unbeeinflusstes Explorationsereignis modelliert. In der Wissensbasis, welche die Historie der haptischen Exploration repräsentiert, können sich auf diese Weise mehrere Explorationsereignisse zu dem gleichen Element einer linien-basierten Graphik ansammeln. Eine solche wiederholte Exploration von Elementen ist in den durchgeführten Versuchen zu haptischen Explorationen eher die Regel als eine Ausnahme. Diese Information kann zum Beispiel genutzt werden, um im Laufe der Exploration oder nach ihrem Ende zu ermitteln, welche Elemente besonders häufig und intensiv (also mit langanhaltenden ausgedehnten Explorationsereignissen) und welche selten oder überhaupt nicht exploriert worden sind.

7.5.2.3 Vollständige Exploration eines Elementes einer linien-basierten Graphik: Vervollständigung (completion)

Ein ausgedehntes Explorationsereignis gilt als *vollständig (completed)*, wenn alle Teile des explorierten Elementes der linien-basierten Graphik vollständig exploriert worden sind. Dieses Kriterium ist dann erreicht, wenn die untergeordneten Ereignisse des ausgedehnten Explorationsereignisses ein definiertes Muster ergeben. Wann eine vollständige Exploration eines Elementes einer linien-basierten Graphik stattgefunden hat, hängt von der Art des jeweiligen Elementes ab: Ein C-Segment ist zum Beispiel dann vollständig exploriert, wenn beide Konfigurationspunkte an seinen Enden erreicht worden sind, ohne dass dabei das C-Segment verlassen wurde. In einem solchen Fall wären Explorationen beider Konfigurationspunkte an den Enden der Exploration des C-Segmentes untergeordnet.

7.5.2.4 Interaktion von Abgeschlossenheit und Vollständigkeit

Die Eigenschaften der Abgeschlossenheit und Vollständigkeit sind unabhängige Eigenschaften eines zeitlich ausgedehnten Ereignisses. Ein ausgedehntes Explorationsereignis kann offen und nicht vollständig sein, das bedeutet, dass der Benutzer zum Beispiel gerade eine geometrische Figur exploriert, aber nicht alle Teile dieser Figur exploriert hat; ihm könnte zum Beispiel noch eine Seite eines Dreiecks in seiner Exploration fehlen. Falls der Benutzer die Exploration abbricht, um etwa eine andere geometrische Figur zu explorieren, so wäre das vorherige Explorationsereignis geschlossen, aber nicht vollständig. Andererseits könnte der Benutzer auch alle Teile der geometrischen Figur exploriert haben und trotzdem mit der Exploration dieser Figur fortfahren um ein besseres Verständnis der räumlichen Anordnung dieser Figur zu bekommen. Eine solche Exploration wäre vollständig, aber noch nicht abgeschlossen. Letztendlich könnte der Benutzer nach der vollständigen Exploration der Figur mit der Exploration einer anderen Figur fortfahren – die ursprüngliche Exploration wäre damit sowohl vollständig als auch (ab)geschlossen.

Es sind also alle vier möglichen Kombinationen der beiden Eigenschaften Abgeschlossenheit und Vollständigkeit zur Beschreibung des Zustandes eines ausgedehnten Ereignisses möglich.

7.6 Nicht ausgedehnte Explorationsereignisse

Zeitlich nicht ausgedehnte komplexe Ereignisse beschreiben Ereignisse in der haptischen Exploration, welche in einem einzelnen Augenblick eintreten, aber nicht direkt beobachtet werden können, sondern aus räumlichem Wissen und der Historie der Exploration erschlossen werden.

Ein einfaches Beispiel ist die Vervollständigung einer Exploration eines Elementes einer linien-basierten Graphik. Ohne das Vorwissen darüber, welche Teile des Elements bereits exploriert worden sind, ist ein solcher Schluss nicht möglich. Das Ankommen an einem Konfigurationspunkt kann direkt beobachtet werden, die Tatsache, dass mit dieser Explorationsbewegung zum Beispiel eine geometrische Figur vollständig erkundet wurde, muss erschlossen werden. Ein Beispiel für ein nicht-ausgedehntes komplexes Explorationsereignis, das erschlossen werden kann, ohne Rückgriff auf ein aktuell laufendes Explorationsereignis zu nehmen, ist der Abschluss der vollständigen Exploration aller Elemente einer linien-basierten Graphik.

7.6.1 Nicht ausgedehnte Ereignisse in Bezug auf laufende ausgedehnte Explorationsereignisse

Im Folgenden werden vier spezielle nicht ausgedehnte Explorationsereignisse beschrieben, welche laufende Explorationsereignisse modifizieren. Der Beginn eines ausgedehnten Explorationsereignisses, erzeugt eine Repräsentation eines Explorationsereignisses in der Wissensbasis, andere nicht ausgedehnte Ereignisse modifizieren die Eigenschaften der Abgeschlossenheit, der Vollständigkeit und den hierarchischen Aufbau eines ausgedehnten Explorationsereignisses.

Start-Ereignis: Wird der Beginn eines ausgedehnten Explorationsereignisses erkannt, so wird dies als Start-Ereignis erkannt. Die Exploration eines einzelnen Elementes einer linien-basierten Graphik kann mehrere Start-Ereignisse auslösen. Bewegt der Benutzer den haptischen Interfacepunkt zum Beispiel in einen Konfigurationspunkt, welcher die Ecke eines Dreiecks repräsentiert, beginnt hiermit sowohl die Exploration des Konfigurationspunktes, zweier Seiten des Dreiecks und des Dreiecks an sich.

Abschluss-Ereignis: Analog zum Start-Ereignis findet ein Abschluss-Ereignis in dem Moment statt, in dem ein laufendes (das heißt offenes) Explorationsereignis unwiderruflich beendet wird. Das ist in der Regel dann der Fall, wenn der haptische Interfacepunkt sich nicht mehr in einem Element der linien-basierten Graphik befindet, welches dem zuvor explorierten Element zugeordnet wird.

Zum Beispiel könnte der Benutzer eine geometrische Figur explorieren und mit einer Bewegung die Figur vollständig verlassen. Dies wird als Abschluss-Ereignis bezeichnet. Das abgeschlossene Ereignis befindet sich weiterhin in der Wissensbasis und repräsentiert einen Teil der Explorationshistorie, aber es kann nicht mehr durch die zukünftige Exploration modifiziert werden, es ist in diesem Sinne (ab)geschlossen. Sollte der Benutzer während seiner Exploration zu einem Element einer linien-basierten Graphik zurückkehren, so startet ein neues Explorationsereignis.

Vervollständigungs-Ereignis: Ausgedehnte Explorationsereignisse werden erkannt, bevor sie vollständig abgeschlossen sind. Dies ist nützlich für die multimodale Interaktion, in der Assistenz begleitend zu der Exploration eines Elementes einer linien-basierten Graphik gegeben werden soll und nicht erst wenn diese vorbei ist. Zum Beispiel ist es günstig, einem Benutzer mitzuteilen, dass er gerade ein Dreieck oder eine bestimmte Straße exploriert, bevor er dies vollständig getan hat. Die vollständige Exploration eines Elementes wird daher als eigenständiges Ereignis erkannt. Dies kann im Rahmen der multimodalen Interaktion genutzt werden, um den Benutzer darüber in Kenntnis zu setzen, dass ein Element vollständig exploriert wurde und bei der Exploration nichts ausgelassen wurde.

Subordinations-Ereignis: Neu erkannte oder detektierte Ereignisse können in die hierarchische Struktur eines bestehenden, offenen Ereignisses integriert werden, dies wird als Subordination bezeichnet. Ein Subordinations-Ereignis beschreibt also den Moment in dem ein bestehendes Ereignis in seiner hierarchischen Struktur durch ein neu hinzugefügtes Ereignis wächst. Das so erweiterte Ereignis ist nicht nur zeitlich gewachsen, etwa indem der Benutzer längere Zeit Teile eines zusammengesetzten Elements einer linien-basierten Graphik erkundet, es ist auch auf konzeptueller Ebene gewachsen, da der Benutzer nun zusätzlich zu den bereits explorierten Teilen des zusammengesetzten Elements ein neues Element exploriert hat. Zum Beispiel beginnt mit der Exploration der ersten Seite eines Dreiecks auch die Exploration des Dreiecks selbst. Wird nun die nächste Seite des Dreiecks exploriert, wird dieses Explorationsereignis in Bezug auf die neue Seite dem bestehenden Explorationsereignis in Bezug auf das Dreieck untergeordnet. Das Explorationsereignis in Bezug auf das Dreieck besteht nun in der obersten Ebene eines hierarchischen Aufbaus aus der Exploration zweier seiner Seiten, welche wiederum eine eigene hierarchische Struktur haben.

7.7 Spezifikation von ausgedehnten Ereignissen

In Folgenden wird ein Grundstock an ausgedehnten Explorationsereignissen spezifiziert. Ausgedehnte Ereignisse beschreiben die andauernde Exploration eines Elementes einer linien-basierten Graphik. Für verschiedene Elemente von linien-basierten Graphiken sind dabei unterschiedliche Kriterien für den Start, die Vervollständigung, den Abschluss und die Unterordnung anderer Explorationsereignisse angegeben.

Enter-Ereignis (nicht ausgedehnt): Das Ereignis e ist ein nicht-ausgedehntes Basisereignis, welches das Eintreten des haptischen Interfacepunktes in den Bereich beschreibt, welcher dem Segment oder dem Konfigurationspunkt c assoziiert ist. Das Ereignis e findet zum Zeitpunkt t statt.

$\text{enter}(e, c, t)$

Exit-Ereignis (nicht ausgedehnt): Das Ereignis e ist ein nicht-ausgedehntes Basisereignis, welches das Eintreten des haptischen Interfacepunktes in den Bereich beschreibt, welcher nicht mehr dem Segment oder dem Konfigurationspunkt c assoziiert ist. Das Ereignis e findet zum Zeitpunkt t statt.

$\text{exit}(e, c, t)$

C-Segment Exploration: Das ausgedehnte Ereignis e beschreibt die Exploration des C-Segments s . Das Ereignis e startet, wenn ein Enter-Ereignis für s detektiert wurde. Das Ereignis e ist vollständig, wenn beide Konfigurationspunkte an den beiden Enden des C-Segments s exploriert worden sind, also wenn die Liste $[e_1, \dots, e_n]$ der untergeordneten (surordinated) Ereignisse Explorationsereignisse beider Konfigurationspunkte an den Enden enthält, ohne dass e zwischendurch beendet (geschlossen) wurde. Das Ereignis e wird geschlossen, wenn ein Element der linien-basierten Graphik, welches nicht s oder einer der beiden Konfigurationspunkte an den Enden ist, exploriert wird. Es ist zu beachten, dass die Konfigurationspunkte mit einem Bereich in einem festgelegten Umkreis um den eigentlichen Punkt assoziiert sind, welcher über die eigentliche Ausdehnung von s hinausgeht. Dies erlaubt die ausführliche (vollständige) Exploration der Konfigurationspunkte, ohne dass die zuvor begonnene Exploration des C-Segments geschlossen wird. Der Radius des Umfangs hängt von der Komplexität der haptischen Repräsentation, der Erfahrungen des Benutzers mit virtuellen haptischen Umgebungen und dem verwendeten Force-Feedback-Gerät ab. Für Prototypen im Rahmen dieser Arbeit wurden empirisch erprobte Radien genutzt.

$\text{cSegmentEx}(e, s, \text{open}, \text{completed}, [e_1, \dots, e_n])$

In Versuchen hat sich gezeigt, dass es nicht unüblich ist, dass Benutzer die Enden von Segmenten ausführlich, einschließlich eines kurzen „Abstechers“ (ein kurzes Hinein- und wieder Hinausbewegen) in alle dort zusammenlaufenden C-Segmente erkunden, bevor sie erneut die genaue räumliche Lage des C-Segments und den gegenüberliegenden Konfigurationspunkt erkunden.

Konfigurationspunkt-Exploration: Das ausgedehnte Ereignis e beschreibt die Exploration des Konfigurationspunktes c . Das Ereignis startet wenn ein Enter-Ereignis für den Konfigurationspunkt c detektiert worden ist. Die Liste $[e_1, \dots, e_n]$ enthält die Bezeichner aller Ereignisse die dem Ereignis e untergeordnet (subordinated) sind. Dazu gehören neben dem Enter-Ereignis in Bezug auf c alle ausgedehnten Explorationsereignisse in Bezug auf solche C-Segmente welche in dem Konfigurationspunkt c zusammentreffen. Das Ereignis e ist

vollständig wenn diese Liste an untergeordneten Ereignissen Explorationsereignisse für alle sich im Konfigurationspunkt c treffenden C-Segmente enthält, ohne dass der festgelegte Bereich um den Konfigurationspunkt c verlassen (und ein entsprechendes Exit-Ereignis detektiert) wurde, in diesem Fall gilt das Ereignis e als beendet (geschlossen).

$\text{cpEx}(e, c, \text{open}, \text{completed}, [e_1, \dots, e_n])$

Explorationen von C-Segmenten und Konfigurationspunkten können nach dieser Spezifikation einander gegenseitig untergeordnet werden. Zur vollständigen Exploration eines C-Segments gehört die Exploration der Konfigurationspunkte an seinen Enden, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben. Gleichfalls gilt, dass zu der vollständigen Exploration eines Konfigurationspunktes eine Exploration aller in diesem Punkt zusammenlaufenden C-Segmente gehört.

Linien-Exploration: Das ausgedehnte Ereignis e beschreibt eine Exploration der Linie l . Das Ereignis e startet, wenn eine Exploration eines C-Segments, welches zu l gehört, erkannt wurde. Die Liste $[e_1, \dots, e_n]$ enthält die Bezeichner aller Ereignisse, die dem Ereignis e untergeordnet (subordinated) sind. Dem Ereignis e werden die Explorationsereignisse alle C-Segmente, welche zu l gehören, untergeordnet. Das Ereignis e gilt als vollständig, wenn alle zur Linie l gehörenden C-Segmente vollständig exploriert worden sind, das heißt, wenn zu jedem C-Segment, welches zur Linie l gehört, mindestens ein Explorationsereignis in der Liste der dem Ereignis e untergeordneten Ereignisse enthalten ist, und dieses Explorationsereignis wiederum vollständig ist. Dies ist ein Beispiel dafür, wie die Vollständigkeit eines Explorationsereignisses durch die Vollständigkeit seiner untergeordneten Ereignisse definiert werden kann. Wird während der Exploration der Linie l ein Element der linien-basierten Graphik exploriert, das nicht zu l gehört, wird das Explorationsereignis e geschlossen.

$\text{lineEx}(e, l, \text{open}, \text{completed}, [e_1, \dots, e_n])$

Segment Exploration: Das ausgedehnte Ereignis e beschreibt die Exploration des Segments s , die Spezifikation dieses Ereignisses ist analog zur Spezifikation der Exploration einer C-Segment-Exploration.

$\text{segEx}(e, l, \text{open}, \text{completed}, [e_1, \dots, e_n])$

Das Ereignis e startet wenn ein Enter-Ereignis für s detektiert wurde. Das Ereignis e ist vollständig, wenn beide Punkte an den beiden Enden des Segments s exploriert worden sind, also wenn die Liste $[e_1, \dots, e_n]$ der untergeordneten (subordinated) Ereignisse Explorationsereignisse beider Punkte an den Enden enthält, ohne dass e zwischendurch beendet (geschlossen) wurde. Das Ereignis e wird geschlossen, wenn ein Element der linien-basierten Graphik, welches nicht s oder einer der beiden Punkte an den Enden ist, exploriert wird. Es ist zu beachten, dass die Punkte mit einem Bereich in einem festgelegten Umkreis

um den eigentlichen Punkt assoziiert sind, welcher über die eigentliche Ausdehnung von s hinausgeht.

In der Regel ist dieser Bereich um die Endpunkte von Segmenten deutlich kleiner als bei Konfigurationspunkten und gerade einmal so groß wie die Breite der haptisch explorierbaren Rille, mit welcher die Linie dargestellt wird, auf der das Segment liegt.

Regions-Exploration: Das ausgedehnte Ereignis e beschreibt die Exploration der Region r . Das Ereignis startet wenn ein Enter-Ereignis für die Region r detektiert worden ist. Die Liste $[e_1, \dots, e_n]$ enthält die Bezeichner aller Ereignisse die dem Ereignis e untergeordnet (subordinated) sind. Das Ereignis e besitzt kein Kriterium zur Vollständigkeit. Wird die Region r verlassen (und ein entsprechendes Exit-Ereignis detektiert), gilt das Ereignis e als beendet (geschlossen).

$\text{RegionEx}(e, r, \text{open}, [e_1, \dots, e_n])$

Regionsexplorationen werden genutzt, um festzustellen, dass der Benutzer das Netzwerk aus Linien verlassen hat, um eventuell Hilfestellung zu leisten, um zu diesem zurückzufinden.

Linien-Komplex-Exploration: Das ausgedehnte Ereignis e beschreibt eine Exploration des Linien-Komplexes lc . Das Ereignis e startet, wenn eine Exploration eines C-Segments welches zum Linien-Komplex lc gehört erkannt wurde. Die Liste $[e_1, \dots, e_n]$ enthält die Bezeichner aller Ereignisse, die dem Ereignis e untergeordnet (subordinated) sind. Dem Ereignis e werden die Explorationsereignisse alle C-Segmente, welche zu lc gehören, untergeordnet. Das Ereignis e gilt als vollständig, wenn alle zum Linien-Komplex lc gehörenden C-Segmente vollständig exploriert worden sind, das heißt, wenn zu jedem C-Segment, welches zum Linien-Komplex lc gehört, mindestens ein Explorationsereignis in der Liste der dem Ereignis e untergeordneten Ereignisse enthalten ist, und dieses Explorationsereignis wiederum vollständig ist. Wird während der Exploration des Linien-Komplexes lc ein Element der linien-basierten Graphik exploriert, das nicht zu l gehört, wird das Explorationsereignis e geschlossen.

$\text{ComplexEx}(e, lc, \text{open}, \text{completed}, [e_1, \dots, e_n])$

Diese Spezifikation der Exploration eines Linien-Komplexes gleicht der Spezifikation der Exploration einer Linie, mit dem einzigen Unterschied, dass sich hier auf die Menge aller zu einem Linienkomplex gehörenden C-Segmente bezogen wird. Dies zeigt, dass auf formaler Ebene, Linien als ein Spezialfall eines Linien-Komplexes betrachtet werden können, welche geometrisch durch die Tatsache ausgezeichnet sind, dass alle C-Segmente kollinear sind und eine überlappungsfreie, zusammenhängende Folge bilden.

7.8 Domänenspezifische Spezialisierung von Explorationsereignissen

Auf Basis des vorgestellten Satzes an Explorationsereignissen lassen sich weitere Ereignisse je nach Anwendungsdomäne spezifizieren. Betrachtet man eine spezielle Anwendungsdomäne kommt es vor, dass menschliche Beobachter die beobachteten Explorationsereignisse mit für die Domäne typischen Begriffen beschreiben:

Für die Domäne der Straßenkarten wird Linien die Straßen darstellen, „*entlang gefahren*“, der Explorierende „*passiert Landmarken*“, „*stoppt in einer Sackgasse*“ oder „*biegt an einer Kreuzung ab*“.

Es ist nicht Ziel der vorgelegten Arbeit, die genauen natürlich sprachlichen Beschreibungen zu untersuchen, mit welchen menschliche Beobachter solche Vorgänge beschreiben, noch soll untersucht werden, welche Arten von Beschreibungen für den Explorierenden besonders vorteilhaft sind. Was jedoch aufgezeigt werden soll ist, wie sich derartige Beschreibungen aus den erkannten Explorationsereignissen und weiteren Informationen aus der propositionalen Beschreibung einer linien-basierten Graphik erschließen lassen. In Kapitel 12 und 14 werden für die Anwendungsdomänen der Straßenkarten und der Liniengraphen domänenspezifische Explorationsereignisse und entsprechende Regeln zum Erkennen dieser Ereignisse vorgestellt. Im Folgenden wird die Funktionsweise der domänen-spezifischen Adaption gezeigt.

7.8.1 Explorationsereignisse und propositionale Informationen der linien-basierten Graphik

Explorationsereignisse beziehen sich auf Elemente einer linien-basierten Graphik. Werden diese Elemente nach dem Prinzip der Spezialisierung genauer beschrieben, so kann diese Information auch auf erkannte Explorationsereignisse übertragen werden. Aus der Exploration eines Konfigurationspunktes kann so zum Beispiel die Exploration einer Sackgasse, einer Ecke oder einer Kreuzung werden, je nachdem, welche weiteren Informationen zu dem Konfigurationspunkt bekannt sind.

Am Beispiel der Exploration einer Kreuzung kann gezeigt werden, wie eine solche Erweiterung möglich ist:

$\text{crossingEx}(e, c, \text{open}, \text{completed}, [e_1, \dots, e_n])$

Das ausgedehnte Ereignis *crossingEx* beschreibt die Exploration einer Kreuzung. Es ist analog zu der Exploration eines Konfigurationspunkts definiert, mit der weiteren Beschränkung, dass der Konfigurationspunkt *c* auf zwei sich kreuzenden Linien liegt. Es muss also zusätzlich gelten: (Siehe Kapitel 6 für die Spezifikation von linien-basierten Graphiken.)

$\text{Crossing}(c, l_1, l_2)$

$\text{domainType}(l_1, \text{straße})$

$\text{domainType}(l_2, \text{straße})$

Dieses Prinzip kann für beliebige Elemente der Anwendungsdomäne übernommen werden. Die Repräsentation domänenspezifischer Explorationsereignisse basiert auf den bereits vorhandenen Definitionen von Explorationsereignissen.

7.8.2 Explorationsereignisse durch Einführung neuer Elemente einer linien-basierten Graphik

Auch domänenspezifische Explorationsereignisse, die sich nicht direkt auf ein einzelnes Element einer linien-basierten Graphik beziehen, können in der Regel auf eines der vorgestellten Explorationsereignisse zurückgeführt werden. Dazu kann es notwendig sein, neue Elemente in der linien-basierten Graphik einzuführen, welche es ermöglichen, passende Explorationsereignisse zu erkennen.

Dieses Prinzip wird am Beispiel des Ereignisses „*Passieren einer Landmarke*“ aus der Domäne der Straßenkarten verdeutlicht: Eine Landmarke wird dann passiert, wenn der haptische Interfacepunkt auf einer Linie, welche eine Straße darstellt, an einem Linien-Komplex, welcher eine Landmarke darstellt, vorbeibewegt wird.

Für die Erkennung dieses Ereignisses ist kein grundsätzlich neuer Ereignistyp notwendig, denn das Passieren bedeutet im Grunde nichts weiter, als dass ein besonderer Abschnitt der Linie (der Straße) passiert wird. Besondere Abschnitte von Linien sind bereits als Segmente in der Konzeption der linien-basierten Graphiken vorgesehen. Und das Passieren eines Segments ist nichts weiter als das Explorieren dieses Segments, wobei das Passieren der vollständigen Exploration – also der Bewegung von einem Ende zum anderen – entspricht.

Abbildung 7.6 zeigt, wie die passenden Segmente algorithmisch durch eine Projektion von Linien-Komplexen eines bestimmten Typs (Landmarke) auf Linien, welche Straßen darstellen, berechnet werden können. Dabei kommt die domänenspezifische Bedingung hinzu, dass es einen Höchstabstand zwischen Straße und Landmarke gibt. Ist dieser überschritten, wird nicht mehr von Passieren gesprochen – also werden auch keine entsprechenden Segmente erstellt.

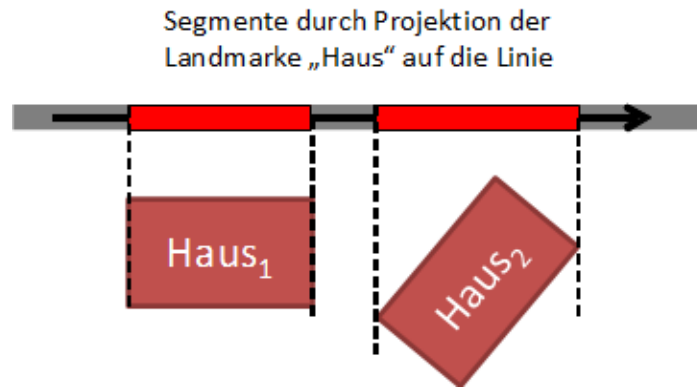
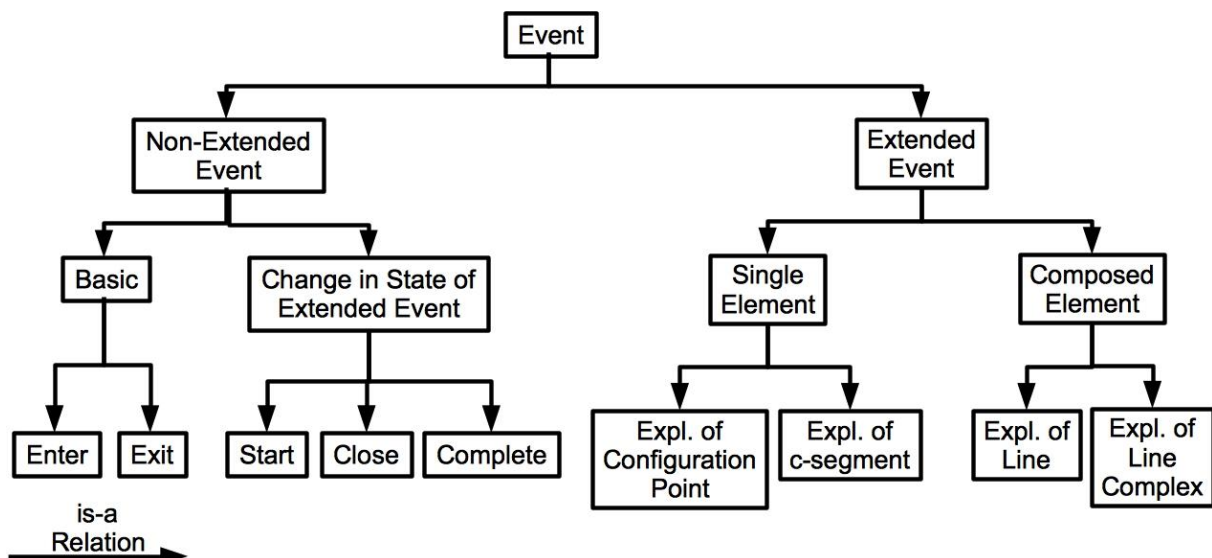


Abbildung 7.6: Projektion von Landmarken auf eine Straße um Segmente zum Erkennen eines „Passieren-Ereignisses“ zu erstellen.

Dieses Beispiel zeigt die Anreicherung von linien-basierten Graphiken nach den Anforderungen der Anwendungsdomäne. Dieser Vorgang ist automatisiert möglich, da alle notwendigen Informationen in den verschiedenen Ebenen der linien-basierten Graphik enthalten sind.

7.9 Taxonomie von Ereignissen

Abbildung 7.7 zeigt eine Taxonomie der in diesem Kapitel vorgestellten Explorationsereignisse. Diese Taxonomie ist nicht erschöpfend, der Benutzer einer haptisch explorierbaren multimodalen linien-basierten Graphik kann Explorationsbewegungen ausführen welche, nicht im Rahmen der vorgestellten Konzeption repräsentiert sind. Trotzdem ist der vorgestellte Satz an Explorationsereignissen darauf ausgelegt, zu einer laufenden haptischen Exploration Explorationsereignisse zu erkennen, welche zu jedem Zeitpunkt eine adäquate multimodale Interaktion ermöglichen, indem sie der assistenzgenerierenden Komponente Informationen über die laufende Exploration und die vom Benutzer in seiner Exploration fokussierten Elemente der linien-basierten Graphik geben.



7.10 Exemplarische Explorationsereignisse und dabei auftretende Explorationsereignisse

Abschließend wird ein Beispiel einer kurzen haptischen Exploration und der dabei erkannten Explorationsereignisse vorgestellt. Abbildung 7.8 zeigt eine linien-basierte Graphik welche den Satz des Pythagoras illustriert. Die Folge von schwarzen Pfeilen zeigt die Explorationsbewegungen des Benutzers an. Abbildung 7.9 zeigt einen schematischen Ablauf der Exploration. Die folgenden elf Schritte erläutern die dabei detektierten und erkannten Explorationsereignisse und ihre Veränderungen. Jeder Schritt korrespondiert zu einem detektierten Enter- oder Exit-Ereignis in Bezug zu einem C-Segment oder einem Konfigurationspunkt..

Schritt 1: Die Explorationsbewegung beginnt in der rechten unteren Ecke des Dreiecks. Zu Beginn der Exploration befindet sich der haptische Interfacepunkt sowohl innerhalb des Bereiches, welcher mit dem Konfigurationspunkt c_1 (der rechten unteren Ecke des Dreiecks) und dem Bereich, der mit dem C-Segment s_1 , der Hypotenuse des Dreiecks, assoziiert ist. In diesem Schritt werden c_1 und s_1 betreten. Enter-Ereignisse für c_1 und s_1 werden erkannt und entsprechende Explorationsereignisse für c_1 und s_1 , welche offen sind (also zu diesem Zeitpunkt andauern), werden erkannt. Da das C-Segment c_1 ein gemeinsamer Teil der Linie l_1 , des Linien-Komplexes *triangle* und des Linien-Komplexes *square₁* ist, werden darüber hinaus Explorationsereignisse für diese drei Elemente erkannt.

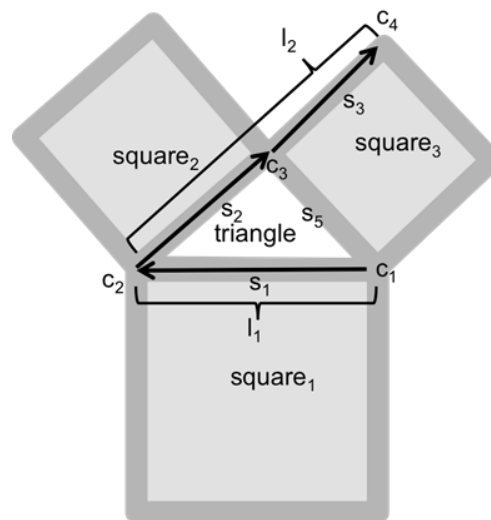


Abbildung 7.8: Explorationsbewegungen in einer linien-basierten Graphik zur Illustration des Satzes von Pythagoras.

Schritt 2: Der schwarze Pfeil in Abbildung 7.8. zeigt die erste Explorationsbewegung. Die Hypotenuse des Dreiecks wird von rechts nach links mit einer einzelnen

Explorationsbewegung erkundet. Zuerst wird dabei der Bereich, welcher mit dem Konfigurationspunkt c_1 (der rechten unteren Ecke des Dreiecks) assoziiert ist verlassen. Ein entsprechendes Exit-Ereignis wird erkannt und das zu c_1 gehörende Explorationsereignis wird geschlossen. Es ist nicht vervollständigt worden, da nicht alle C-Segmente, welche sich in dem Konfigurationspunkt c_1 treffen, exploriert worden sind. Aus der unvollständigen Exploration des Konfigurationspunktes c_1 kann geschlossen werden, dass dem explorierenden Benutzer nicht bewusst ist, wie dieser Konfigurationspunkt mit anderen Linien in der linienbasierten Graphik verbunden ist, dieser Schluss kann als Basis für eine entsprechende multimodale Interaktion genutzt werden.

Schritt 3: Am Ende der ersten Explorationsbewegung wird die untere linke Ecke des Dreiecks, der Konfigurationspunkt c_2 erreicht. Das Erreichen dieses Punktes vervollständigt die Exploration des C-Segmentes s_1 . Da s_1 das einzige C-Segment der Linie l_1 , der Hypotenuse des Dreiecks ist, wurde somit auch die Linie cl_1 vollständig exploriert.

Schritte 4 bis 6: In der zweiten Explorationsbewegung wird der haptische Interfacepunkt entlang der linken Seite des Dreiecks nach oben bewegt, dies entspricht einer Exploration des C-Segments s_2 . Das C-Segment s_1 wird dabei verlassen und das C-Segment c_2 anschließend betreten, entsprechende Exit- und Enter-Ereignisse werden detektiert. Bis zu diesem Zeitpunkt waren die Explorations der Linien-Komplexe *triangle* und *square₁* offen. Da das C-Segment s_2 Teil der Linien-Komplexes *triangle* und *square₂* aber nicht Teil des Linien-Komplexes *square₁* ist, wird die Exploration des Linien-Komplexes *triangle* fortgeführt, während die Exploration des Linien-Komplexes *square₁* geschlossen wird. Dafür wird ein neues Explorationsereignis für den Linien-Komplex *square₂* gestartet. Da das C-Segment ebenfalls Teil der Linie l_2 ist wird ein ebenfalls für diese Linie korrespondierendes Explorationsereignis erkannt. Sobald der haptische Interfacepunkt im Laufe dieser Explorationsbewegung den mit dem Konfigurationspunkt c_2 assoziierten Bereich verlässt, wird ein entsprechendes Exit-Ereignis detektiert und die Exploration von c_2 geschlossen, sie bleibt ebenso wie die Exploration des Konfigurationspunktes c_1 unvollständig.

Schritt 7: Der Konfigurationspunkt c_2 , die Spitze des Dreiecks wird erreicht, ein entsprechendes Enter-Ereignis wird erkannt. Damit wird die Exploration des C-Segments s_2 , welches die linke Seite des Dreiecks bildet, vervollständigt.

Schritte 8 bis 10: Die dritte Explorationsbewegung geht in einer geraden Linie weiter entlang der Seite des Linien-Komplexes *square₃*. Das C-Segment s_2 wird verlassen und das C-Segment s_3 wird betreten, entsprechende Exit- und Enter-Ereignisse werden erkannt. Das C-Segment s_2 ist Teil des Linien-Komplexes *square₃* aber nicht Teil des Linien-Komplexes *triangle*. Die Exploration des Linien-Komplexes *triangle* wird somit geschlossen und ein neues Explorationsereignis für den Linien-Komplex *square₃* startet. Der Benutzer bewegt sich immer noch entlang der Linie l_2 und das entsprechende Explorationsereignis bleibt weiterhin offen. Da die Exploration in einer geraden Linie verläuft und der Konfigurationspunkt c_3 , die Spitze des Dreiecks nicht vollständig exploriert wurde, kann geschlossen werden, dass der

Benutzer nicht bemerkt haben könnte, dass er aufgehört hat, das Dreieck zu explorieren. Dieser Schluss kann als Basis für eine multimodale Assistenz genutzt werden.

Schritt 11: Am Ende erreicht der haptische Interfacepunkt den Konfigurationspunkt c_4 , die oberste Ecke des Linien-Komplexes $square_3$. Dadurch wird die Exploration des C-Segments s_3 vervollständigt. Da die Linie l_2 aus den beiden C-Segmenten s_2 und s_3 besteht und für beide Segmente im Laufe der Exploration der Linie l_2 vollständig exploriert worden sind, ist auch die Exploration von l_2 vollständig.

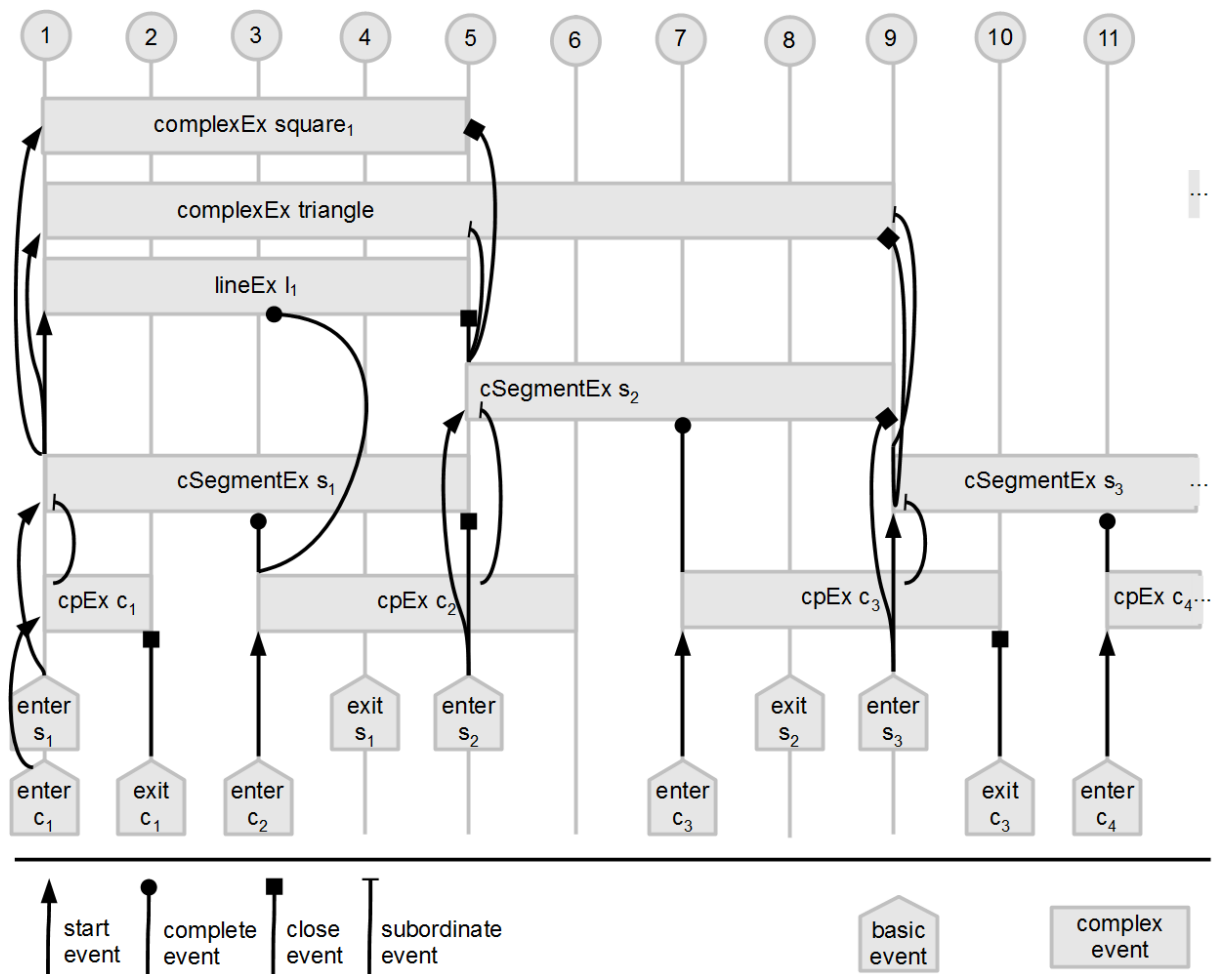


Abbildung 7.9: Ausgewählte Explorationsereignisse, welche während der in Abbildung 7.6 gezeigten Exploration erstellt und modifiziert werden.

8 Regelbasierte Ereigniserkennung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde beschrieben, welche Elemente eine linien-basierte Graphik enthält und wie Explorationsereignisse in Bezug auf diese Elemente ablaufen und repräsentiert werden können. In diesem Kapitel wird der zentrale, wissensverarbeitende Mechanismus vorgestellt, welcher die vorgestellten Ereignisse erkennt. Dieser Mechanismus analysiert den Strom von Positionsinformationen des haptischen Ein-/Ausgabegerätes, detektiert Basisereignisse und konzeptualisiert auf dieser Grundlage eine fortlaufend aktualisierte Repräsentation komplexer Explorationsereignisse. Die Ereigniserkennung realisiert eine inkrementelle Ereigniskonzeptualisierung (Guhe, Habel & Tappe, 2000).

8.1 Ereigniserkennung als Beobachtungsleistung

Ereigniserkennung während der haptischen Exploration von linien-basierten Graphiken kann als eine algorithmische Automatisierung einer Beobachtungsleistung aufgefasst werden, die ein menschlicher Assistent beim visuellen Nachverfolgen einer haptischen Exploration vollbringen kann. Beobachtet ein Mensch eine solche Exploration, mit der Absicht, verbale Assistenz begleitend zu dieser Exploration zu geben, wird er versuchen, die beobachteten Bewegungen als einzelne diskrete Ereignisse in Bezug auf die explorierte linien-basierte Graphik aufzufassen.

Die Leistungen, welche ein menschlicher Ereigniserkenner vollbringen muss, um Explorationsereignisse konzeptualisieren zu können, sind vielfältig: Um die in Kapitel 7 aufgezeigten Explorationsereignisse zu erkennen, muss der Betrachter über eine Reihe von Fähigkeiten verfügen. Die in der folgenden Aufzählung genutzten Beispiele sind informell gehalten, um zu verdeutlichen, dass es sich bei dem fiktiven Beobachter um einen „Laien“ handelt, der eine Exploration ohne Kenntnis der formalen Repräsentation von linien-basierten Graphiken und in einer deutlich anwendungsdomänen-orientierten Sprache beschreibt.

Quantitative Beobachtung der Explorationsbewegung: Vom Betrachter muss die Bewegungstrajektorie quantitativ analysiert werden, um Geschwindigkeit und Richtung der Bewegung zu ermitteln um letztendlich Aussagen treffen zu können wie *„Der haptische Interfacepunkt steht (mehr oder weniger) still“* oder *„jetzt wurde abrupt die Explorationsrichtung gewechselt.“*

Qualitative Beobachtung der Explorationsbewegung mit Bezug zur linien-basierten Graphik: Die eigentlichen Explorationsereignisse werden qualitativ beschrieben, dabei nehmen diese Beschreibungen Bezug zu der explorierten linien-basierten Graphik, dies kann zu Explorationsbeschreibungen führen wie: *„Exploration der Linie L_1 “* oder *„Wechsel von der Linie L_1 zur Linie L_2 “*.

Qualitative zeitliche Aussagen: Beschreibungen von Ereignissen können qualitative zeitliche Aussagen beinhalten, wie zum Beispiel *„Nach dem Wechsel von Linie L_1 zu Linie L_2 findet*

jetzt ein Wechsel zur Linie L_3 statt. Dazwischen wurden keine anderen Elemente der linien-basierten Graphik exploriert.“ Um ein Ereignis, das aus mehreren Teilereignissen besteht, auf diese Weise zu beschreiben, müssen qualitative zeitliche Schlüsse gezogen werden.

Quantitative zeitliche Aussagen: Auch quantitative zeitliche Schlüsse können dann von Interesse sein, wenn es darum geht, zum Beispiel eine Mindestdauer festzulegen, welche während einer Exploration verstreichen muss, bevor der Beobachter sich dazu äußert. Auf diese Weise kann es vermieden werden, auf all zu kurze „Abstecher“ in nicht ausführlich explorierte Elemente einer linien-basierten Graphik multimodal zu reagieren.

(Logische) Quantifikation über Ereignisse: Logische Quantifikationen über Explorationsereignisse und Elemente der explorierten linien-basierten Graphik können ebenfalls notwendig werden, wenn Aussagen der Form „Alle Linien wurden exploriert“ oder „Es wurde keine Linie mehrfach exploriert“ getroffen werden sollen.

Propositionale Information über die linien-basierte Graphik: Viele Ereignisse werden im Kontext der Anwendungsdomäne der linien-basierten Graphik gemacht. So kann zum Beispiel bei der Exploration einer linien-basierten Graphik, welche eine Straßenkarte darstellt, nicht bloß von einem Wechsel von einer Linie zu einer anderen an einem Konfigurationspunkt gesprochen werden, sondern vom „Wechsel von der Müller-Straße zur Maier-Straße an einer Kreuzung“.

Geometrische Informationen über die linien-basierte Graphik: Neben propositionalen Informationen in Bezug auf die linien-basierte Graphik und ihre Anwendungsdomäne, können auch rein geometrische Informationen bei der Konzeptualisierung von Ereignissen genutzt werden. Entsprechende Beschreibungen von Ereignissen könnten lauten: „Jetzt ist die Umrundung des Dreiecks abgeschlossen“, „Du bist im 90-Grad Winkel nach links abgebogen“ oder „Du bewegst dich auf eine T-Kreuzung mit der Mozart-Straße zu.“

8.1.1 Vorverarbeitung und Analyse zur Laufzeit:

Ein menschlicher Betrachter kann Ereignisbeschreibungen „spontan“ generieren, das heißt er muss nicht vorher über ein festes Inventar an möglicherweise explorierten Elementen der linien-basierten Graphik verfügen, da er in der Lage ist, schnell und selbständig eine linien-basierte Graphik zu verstehen und im Kontext einer Domäne einzuordnen. Exploriert ein Benutzer beispielsweise eine Straßenkarte, dann wäre eine Aussage wie „Du explorierst gerade eine Kreuzung“ durch einen Beobachter nicht ungewöhnlich. Die weiter oben genannten Beispiele können so oder in ähnlicher Form von einem Menschen geäußert werden. Der Kommentierende entscheidet spontan, dass das was er jetzt gerade beobachtet die subjektiven Kriterien eines diskreten Ereignisses erfüllt und beschreibt dieses Ereignis in Bezug auf die linien-basierte Graphik im Kontext der Anwendungsdomäne.

Dieses Vorgehen setzt ein gutes Verständnis der Anwendungsdomäne und die generelle Möglichkeit zum Verstehen räumlicher Repräsentationen voraus. In einem künstlichen System sind diese Fähigkeiten schwierig zu erzielen – sie können aber bis zu einem gewissen

Grad durch eine ausführliche Vorverarbeitung ersetzt werden, ohne dass darunter die Performanz der Ereigniserkennung leidet.

Dieses Prinzip kann an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden: Bei der Beispielexploration in Kapitel 7 wurde ein Dreieck (teilweise) exploriert. Ein menschlicher Betrachter erkennt auf der Abbildung, dass es sich bei der geometrischen Figur um ein Dreieck handelt, er muss hierzu (subjektiv) keine komplizierten Überlegungen anstellen. Für ein künstliches System, stellt eine solche Aufgabe jedoch durchaus eine Herausforderung dar.

Im Rahmen der Ereigniserkennung wird das für einen solchen Schluss notwendige Wissen, in einer propositionalen Wissensbasis repräsentiert, welche zur Laufzeit genutzt werden kann, um komplexe Ereignisse zu konzeptualisieren. Für das oben genannte Beispiel bedeutet dies also, dass über das explorierte Dreieck bereits in der Wissensbasis bekannt ist, dass es sich bei den 3 Linien um eine besondere geometrische Form der Art Dreieck handelt – dies muss nicht erst zur Laufzeit berechnet werden. Für die vorgestellte Architektur zur Ereigniserkennung wird davon ausgegangen, dass diese Wissensbasis alle relevanten Informationen erhält. Es wird also nicht erst zur Laufzeit interpretiert, ob es sich bei einem Element einer linien-basierten Graphik um ein Dreieck oder ein Viereck, um eine Straße oder einen Fluss handelt.

Wie diese Informationen in die Wissensbasis gelangen, hängt vom jeweiligen Anwendungsszenario ab. Generell können drei Herangehensweisen unterschieden werden:

- Konvertierung vorhandener Informationen: Propositionales Wissen über die linien-basierte Graphik in ihrer Anwendungsdomäne kann von einer bereits vorhandenen Wissensquelle übernommen werden. So können beispielweise für die Domäne der Straßenkarten, nicht nur die geometrische Anordnung von Straßen und Landmarken aus geographischen Datenbanken wie *OpenStreetMap* übernommen werden, sondern auch genaue Typ-Informationen und Eigennamen von Straßen und Gebäuden. Dieser Ansatz ist in Kapitel 10 ausgeführt.
- Visuelle Routinen zur Analyse der linien-basierten Graphik: Geometrische Informationen können auch automatisch im Rahmen der Erstellung der linien-basierten Graphik generiert werden. Hierzu können unter anderem visuelle Routinen genutzt werden. Für eine ausführliche Darstellung dieses Vorgehens siehe (Habel, Kerzel & Lohmann, 2010).
- Es ist auch möglich, dass Informationen über die explorierte linien-basierte Graphik manuell eingegeben werden. Dies ist vor allen dann eine sinnvolle Option wenn nicht die Entwicklung eines vollständig automatisierten Systems sondern die Forschung zur multimodalen Interaktion und Ereigniserkennung im Vordergrund steht. Softwarewerkzeuge für die manuelle Annotation von haptischen Linien-Graphen sind in Kapitel 11 beschrieben.

Bei diesen Optionen ist zu bedenken, dass es innerhalb der Literatur keineswegs Einigkeit über qualitative räumliche Relationen oder zum Beispiel die „korrekte“ Interpretation von Karten gibt. So sprechen Menschen zum Beispiel von parallelen Straßen zum Beispiel auch dann, wenn diese Straßen geometrisch nicht parallel verlaufen, ja nicht einmal für sich genommen eine gerade Linie bilden (Kerzel, 2008). Ob und unter welchen Bedingungen in solchen Fällen von bestimmten qualitativen räumlichen Relationen im Rahmen der multimodalen Interaktion gesprochen werden soll, ist nicht Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Es soll hingegen aufgezeigt werden, dass eine vollständig automatisierte haptische multimodale Interaktion im Prinzip möglich ist, siehe Kapitel 9.

8.2 Architektur der Ereigniserkennung

Die Ereigniserkennung während der Exploration haptischer linien-basierter Graphiken analysiert den Strom der Positionsdaten, welche vom haptischen Ein-/Ausgabegerät geliefert wird, und konzeptualisiert diskrete Explorationsereignisse, welche zum Teil eine komplexe hierarchische Struktur haben, siehe (Kerzel & Habel 2013).

Diese Funktionalität wird in einem zweischrittigen Prozess innerhalb des Systems zur Ereigniserkennung realisiert. Abbildung 8.1 zeigt eine grobe Darstellung der dazu entwickelten Architektur:

Der Benutzer exploriert eine haptische Realisierung einer linien-basierten Graphik welche durch ein haptisches Ein-/Ausgabegerät zur Verfügung gestellt wird. Diese haptische Interaktion wird in einer virtuellen haptischen Umgebung simuliert, basierend auf einem 3D-Modell der linien-basierten Graphik.

Die Position des haptischen Interaktionspunktes wird als Strom von Koordinaten in die Komponente zur *Detektion von Basisereignissen* eingespeist. Diese Komponente realisiert den Übergang von einem kontinuierlichen Strom propositionaler Informationen zu einer diskreten propositionalen Repräsentation von Basisereignissen.

Die Folge von detektierten Basisereignissen wird an die eigentliche Komponente zur Erkennung komplexer Ereignisse weitergegeben. Diese Komponente zur Erkennung komplexer Ereignisse ist ein regelbasiertes System welches aus einer Menge propositionaler Informationen neue Informationen ableitet.

Sowohl die Detektion der Basisereignisse als auch das Erkennen komplexer Ereignisse setzen räumliches und optional domänenspezifisches Wissen über die explorierte linien-basierte Graphik voraus. Diese Informationen sind in einer von beiden Komponenten genutzten Wissensbasis repräsentiert. Darüber hinaus werden alle detektierten und erkannten Ereignisse in einer Wissensbasis für die Nutzung durch die Komponente zur Erkennung komplexer

Ereignisse abgelegt. Hierdurch ist es möglich, bei der Erkennung komplexer Ereignisse die Historie der Exploration zu berücksichtigen.

Diese Architektur kann als ereignis-getriebene Architektur (*event-driven architecture* oder EDA) bezeichnet werden. Die Detektion von Basisereignissen erzeugt Ereignisse innerhalb des Systems, welche von der Komponente zur Erkennung von komplexen Ereignissen genutzt wird, um aus ihnen komplexere Ereignisse zu konzeptualisieren, diese wiederum werden genutzt, um multimodal mit dem explorierenden Benutzer zu interagieren. Am Anfang dieser Interaktion steht die Detektion von Basisereignissen. Diese Detektion treibt die Ereigniserkennung und letztendlich die Interaktion mit dem Benutzer an.

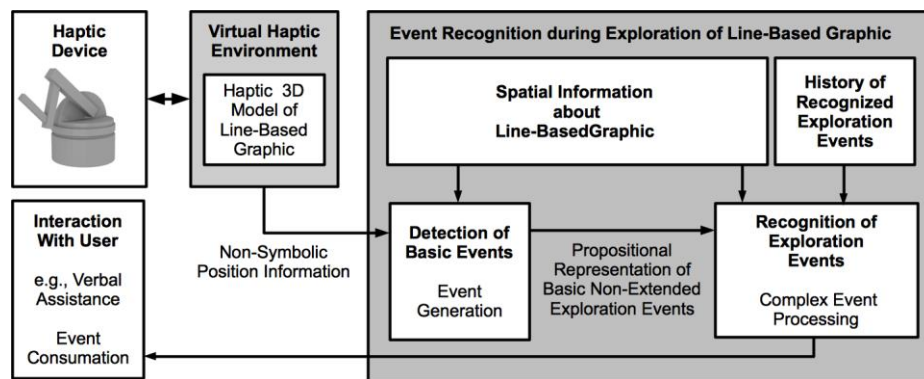


Abb. 8.1: Überblick über die Architektur zur Erkennung von basalen und komplexen Ereignissen während der Exploration haptischer linien-basierter Graphiken.

8.3 Complex Event Processing als Verarbeitungs-Paradigma

Um ein geeignetes Verarbeitungs-Paradigma für das Erkennen komplexer Explorationsereignisse auszuwählen, ist es notwendig die besonderen Herausforderungen der zu lösenden Aufgabe zu verstehen. Generell geht es bei der Ereigniserkennung darum, aus einem Strom von Sensordaten diskrete Ereignisse zu konzeptualisieren. Im Fall der Ereigniserkennung während der Exploration in virtuellen haptischen Umgebungen liegen einige besondere Umstände vor, welche sich auf diese Wahl auswirken:

Genau und eindeutige Beobachtbarkeit der Bewegung: Im Bereich der Ereigniserkennung liegt oftmals das Problem vor, dass aufgenommene Sensordaten unzuverlässig oder unvollständig sind. Sollen beispielsweise Ereignisse von mit einer Kamera beobachteten Ereignissen analysiert werden, so muss erst einmal bestimmt werden, welche Objekte an welchen Positionen und in welchen Posen sich in dem zu analysierenden Videostrom befinden. In einer virtuellen Umgebung kann die exakte Position aller Objekte, einschließlich der Position des haptischen Interfacepunktes eindeutig bestimmt werden. Daher liegt die Herausforderung der Ereigniserkennung in diesem Bereich weniger auf der Detektion von Objekten und ihrer Position (also der Detektion von Basisereignissen) sondern auf der Konzeptualisierung komplexer Ereignisse aus diesen Daten.

Bekannte Umgebung: Ein weiterer Vorteil bei der Ereigniserkennung während der Exploration von haptischen linien-basierten Graphiken ist, dass die Umgebung, in welcher die Exploration stattfindet zum Zeitpunkt der Exploration vollständig bekannt ist. Es tauchen keine „unbekannten“ Objekte in einer zu analysierenden Situation auf.

Mehrfache Interpretation der beobachteten Bewegung: Wie bereits in Kapitel 7 erläutert, kann die gleiche Explorationsbewegung auf mehrere Weisen zu diskreten Ereignissen konzeptualisiert werden. Sowohl in der Granularität der erkannten Ereignisse als auch im Bezug zu den explorierten Elementen der linien-basierten Graphik sind mehrfache Interpretationen möglich und im Rahmen der vorgeschlagenen Architektur sinnvoll, da die Entscheidung, auf welches Ereignis wie mit einer multimodalen Äußerung des Systems reagiert werden soll, von einer speziellen, für die jeweilige Anwendungsdomäne entwickelten Systemkomponente getroffen werden soll, und nicht bereits bei der Ereigniserkennung. Dieser Komponente müssen alle möglichen Interpretationen der Exploration zur Verfügung gestellt werden.

Schnelle Verarbeitung: Da die multimodale Interaktion begleitend zur Exploration stattfinden soll, muss die Erkennung von Explorationsereignissen zeitnah zu ihrer Ausführung erfolgen, damit durch sie stets eine zur aktuellen Exploration passende multimodale Interaktion stattfinden kann.

Nachvollziehbarkeit der Verarbeitung: Die Erkennung von komplexen Ereignissen muss in einer für den Explorierenden nachvollziehbaren Weise geschehen um dem Benutzer die größte mögliche Kontrolle über seine Exploration und auch die sie begleitende multimodale Interaktion zu geben. Im Rahmen einer Anleitung für die Exploration muss es möglich sein, die Prinzipien, auf Grund derer Ereignisse erkannt und multimodale Assistenz gegeben wird, nachvollziehbar darzustellen. Dies gilt auch für die Entwickler domänenspezifischer Assistenz-Komponenten, sie müssen wissen, unter welchen Umständen welches Ereignis erkannt wird. Dieses Kriterium schließt viele Ansätze zur Ereigniserkennung, welche auf subsymbolischer Verarbeitung basieren (wie zum Beispiel neuronale Netze) aus.

Deterministisches Verhalten der Ereigniserkennung: Neben der Nachvollziehbarkeit der Ereigniserkennung ist es wichtig, dass sich diese Ereigniserkennung stets deterministisch verhält, auch dies gibt dem Explorierenden mehr Kontrolle über seine Exploration. Wenn in einer bestimmten Situation eine bestimmte multimodale Interaktion stattfindet, muss dies in gleicher Form in ähnlichen Situationen geschehen. Daher eignen sich stochastische Algorithmen für die Erkennung von Ereignissen in diesem Kontext nicht.

Mehrschichtige, hierarchische Struktur von Ereignissen: Explorationsereignisse können, wie in Kapitel 7 gezeigt, eine hierarchische Struktur haben, welche sich über mehrere Schichten aus einfacheren Ereignissen zusammensetzt.

Diese Kriterien stimmen weitestgehend mit dem Paradigma des Complex Event Processing überein. Der Begriff wurde von Luckham (2002) geprägt um das kontinuierliche Erkennen

von komplexen Ereignissen aus einem Strom von einfacheren Ereignissen nach regelhaften, also nachvollziehbaren und deterministischen, Prinzipien zu beschreiben. Die Detektion der Basisereignisse während der haptischen Exploration linien-basierter Ereignisse erzeugt diesen Strom von einfachen Ereignissen aus der Beobachtung der Positionsdaten des haptischen Interfacepunktes. Das Verarbeitungsparadigma des Complex Event Processing erlaubt die Erkennung mehrerer Interpretationen des Beobachteten ebenso wie eine schnelle und kontinuierliche Verarbeitung.

Auch Erkennung hierarchisch aufgebauter Ereignisse ist nach diesem Paradigma möglich, da erkannte Ereignisse wiederum in den Eingangsstrom der Verarbeitung eingefügt werden können.

8.4 Regelbasierte Erkennung von Explorationsereignissen

Das Erkennen von Ereignissen, welche nicht direkt beobachtbar sind, erfordert Schlüsse über eine große Menge von Propositionen, diese Propositionen sind entweder räumliche beziehungsweise domänenspezifische Informationen über die explorierte linien-basierte Graphik, oder Repräsentationen von bereits detektierten oder erkannten Ereignissen. Während die Menge, der in der Wissensbasis repräsentierten Ereignisse stetig wächst, setzt die Ereigniserkennung trotzdem voraus, dass neue Ereignisse explorationsbegleitend, ohne für den Benutzer bemerkbare Verzögerungen, erkannt werden.

Diese Aufgabenstellung fällt in das Gebiet des Complex Event Processing (CEP). Eckert und Bry (2009) identifizieren drei wesentliche Ansätze des Complex Event Processing:

1. Spezielle (formale) Sprachen mit Ereignis-Kompositions-Operatoren (event composition operators), diese werden auch Ereignis-Algebren genannt.
2. Sprachen zur Verarbeitung von Datenströmen (Datenstrom Sprachen)
3. Regelbasierte Systeme

Formale Sprachen mit Ereignis-Kompositions-Operatoren: Sind der in der Literatur am wenigsten vertretenen Ansatz. Eckert und Bry (2009) schreiben dies ihrer manchmal unklaren Semantik einiger Kompositionsoperatoren zu. Sprachen mit Ereignis-Kompositions-Operatoren zeichnen sich positiv dadurch aus, dass zeitliche Schlüsse unterstützt werden und das „Konsumieren“ von verarbeiteten Ereignissen erlauben, also einen integrierten Mechanismus bieten, um zu verhindern, dass einmalige Beobachtungen mehrfach zum Aufbau gleicher Ereignisse führen.

Sprachen zur Verarbeitung von Datenströmen: Sprachen zur Verarbeitung von Datenströmen stammen aus dem Bereich von Datenbanken. In ihnen werden Ereignisse als Datenbankeinträge repräsentiert. Primär besteht das Anwendungsgebiet dieser Ansätze in der Verarbeitung großer eingehender Datenströme. Der Nachteil dieser Sprachen besteht darin, dass (prädikatenlogische) Negation und zeitliche Schlüsse schwierig zu handhaben sind.

Regelbasierte Ansätze: Regelbasierte Sprachen und Systeme sind nicht speziell für die Verarbeitung von Ereignissen ausgelegt. Regelbasierte Systeme sind zustands- und nicht ereignisorientiert. Oft müssen temporale Logik und qualitative zeitliche Eigenschaften von Ereignissen nachträglich in diesen Systemen umgesetzt werden. Allerdings eignet sich der vorwärts-verkettende (forward chaining) Schlussmechanismus sehr gut den hierarchischen Aufbau von Ereignissen zu ermöglichen.

Diese Fähigkeit regelbasierter Systeme wird in der Erkennung von Explorationsereignissen während der Exploration haptischer linien-basierter Graphiken genutzt, um das Complex Event Processing als Kernstück eines Systems zu nutzen, dass auf der einen Seite Perzeptions-Leistungen vollbringt, indem es den Strom von Positionsdaten analysiert und somit die Basis für die komplexe Ereigniserkennung schafft, auf der anderen Seite, die erkannten Ereignisse nutzt, um multimodal mit dem Benutzer zu interagieren. Weder formale Sprachen mit Ereignis-Kompositions-Operatoren noch Sprachen zur Verarbeitung von Datenströmen ermöglichen die herausragend intuitive Integration von Wissen über die linien-basierte Graphiken, welche regelbasierte Ereigniserkennung ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil regelbasierter Systeme und ihrer Sprachen ist die gute Kommunizierbarkeit der genutzten Regeln. Dies ist für die Einbeziehung von Domänenexperten in die Entwicklung der multimodalen Interaktion, aber auch für die Dokumentation des Systemverhaltens gegenüber den Benutzern sinnvoll. Genutzte Regeln können manuell in natürliche Sprache übersetzt werden. Die Spezifikationen der Ereignisse in Kapitel 7 (Abschnitt (7.7) stellen ein Beispiel für eine solche natürlichsprachliche Beschreibung der Ereignisse dar, welche schon sehr nahe an einer regelhaften Formulierung ist. Neben der Möglichkeit einer manuellen Übersetzung gibt es auch die Möglichkeit, spezielle domänen-spezifische Sprachen (*domain specific languages*, DSL) zu nutzen. Hierbei handelt es sich um eingeschränkte Inventare aus existierenden Sprachen, mit einer einfachen Grammatik. DSLs erlauben eine automatische Übersetzung zwischen Regeln und (annähernd) natürlich scheinenden Texten.

Schließlich bieten regelbasierte Systeme auf softwaretechnischer Ebene unter den drei vorgestellten Ansätzen die beste Integration in bestehende (wissensbasierte) Komponenten²². Regelbasierte Systeme arbeiten aufgrund ihrer Konzeption eng mit ihrer Softwareumgebung zusammen: Regeln spezifizieren Bedingungen in einer eigenen Regelsprache. Die Konsequenzen von Regeln, welche bei Erfüllung der Bedingungen ausgeführt werden, können jedoch den vollen Umfang der Programmiersprache nutzen, in welche das regelbasierte System eingebettet ist. Insbesondere mit Hinblick auf die Entwicklung von Prototypen zu empirischen Versuchen und die Möglichkeit, die entwickelten Komponenten in anderen Systemen wieder zu verwenden, ist dies ein nicht zu vernachlässigender Vorteil.

²² Diese Aussage gilt im Allgemeinen für die Nutzung regelbasierter Ereigniserkennung (Eckert & Bry, 2009), aber insbesondere vor dem Hintergrund universitärer Forschung, bei der Rücksicht auf bestehende Konzeptionen und Software Komponenten genommen werden muss.

8.5 Architektur regelbasierter Systeme

Regelbasierte Systeme arbeiten durch die logische Vorwärtsverkettung von “wenn - dann” Regeln. Diese Regeln repräsentieren prozedurales Wissen, also Wissen darüber wie eine zielgerichtete Handlung oder ein zielgerichteter Schluss ausgeführt wird, siehe Hayes-Roth (1985). Diese Regeln interagieren mit dem deklarativen Wissen, dies sind die bekannten und beobachteten Fakten der modellierten Domäne. Die Gesamtheit dieses deklarativen Wissens wird als Wissensbasis bezeichnet.

Regeln bestehen aus einer Bedingung, welche als eine Anforderung an die Wissensbasis gestellt wird. Ist diese Bedingung erfüllt, wird die Konsequenz der Regel ausgeführt, diese kann wiederum die Wissensbasis modifizieren oder andere Funktionen auslösen. Regelbasierte Systeme werden daher auch Produktionssysteme genannt, aus dem vorhandenen Wissen in einer Wissensbasis kann durch Anwendung von regelhaftem Wissen neues Wissen gewonnen und in die Wissensbasis eingeführt werden.

Deklaratives Wissen wird in der Wissensbasis als eine Menge von Fakten repräsentiert. In Abhängigkeit von der Anwendungsdomäne können diese Fakten entweder statisch oder dynamisch sein. Im Falle der Ereigniserkennung während der Exploration haptischer linien-basierter Graphiken, besteht der statische Teil des repräsentierten Wissens aus räumlichen und domänenspezifischen Informationen in Bezug auf die explorierte linien-basierte Graphik. Der dynamische Anteil der Wissensbasis besteht in den detektieren und erkannten Ereignissen, welche sich fortlaufend verändern.

Eine Interferenz-Maschine (*inference engine*) führt die Funktionalität des regelbasierten Systems aus. Diese Interferenz-Maschine arbeitet in einer nie endenden Schleife die folgenden 3 Verarbeitungsschritte ab:

1. **Match:** Abgleich der Bedingungen für die einzelnen Regeln mit der Wissensbasis.
2. **Select:** Auswahl einer der Regeln, für welche die Bedingungen erfüllt sind.
3. **Execute:** Ausführung der Konsequenz einer Regel.

Veränderungen in der Wissensbasis, welche sich durch eine Regel-Ausführung in einem Verarbeitungsschritt ergeben, können zur positiven Auswertung von anderen Regel-Bedingungen führen und so eine ganze Kaskade von Regel-Ausführungen nach sich ziehen.

Das Einfügen neuer Fakten oder Modifikationen existierender Fakten in der Wissensbasis, kann auch durch externe Komponenten erfolgen. Diese Form der Wissensverarbeitung kann daher auch als datengetrieben beschrieben werden: Sind erst einmal alle möglichen Konsequenzen zu einer gegebenen Wissensbasis durch Ausführung von Regeln produziert worden, kommt das regelbasierte System zum Stillstand. Werden nun neue Fakten in die Wissensbasis hineingefügt, beginnt die Verarbeitung erneut. Die Verfügbarkeit neuer Daten treibt also die Verarbeitung an. Neue Daten, also neue Einträge in der Wissensbasis werden durch das Detektieren neuer Basisereignisse generiert.

Abbildung 8.2 zeigt den Ausführungszyklus und die Architektur eines regelbasierten Systems. Die Interferenz-Maschine evaluiert die Vorbedingungen aller Regeln gegen die Fakten in der Wissensbasis, dieser Teil des Zyklus wird auch als Abgleich (matching) bezeichnet. Aus der Menge der Regeln, deren Vorbedingungen erfüllt sind muss, nun eine einzelne Regel ausgewählt (select) werden, deren Konsequenz nun ausgeführt wird (execution). Die Ausführung der Regel kann die Wissensbasis modifizieren und auch externe Aktionen auslesen, wie zum Beispiel eine multimodale Interaktion.

Ist ein Match-Select-Execute-Zyklus vollständig ausgeführt, beginnt er erneut, das bedeutet, alle Regel-Bedingungen müssen erneut überprüft werden. Regeln deren Bedingungen im vorherigen Zyklus als nicht erfüllt ausgewertet worden sind, können nun positiv evaluiert werden. Umgekehrt kann es vorkommen, dass Regeln deren Vorbedingungen im vorherigen Zyklus positiv evaluiert werden und nicht zur Ausführung selektiert worden sind, nun nicht mehr positiv selektiert werden. Die Auswahl der auszuführenden Regel bestimmt also den Ablauf der regelbasierten Verarbeitung. Daher wurde beim Entwurf des Regelsatzes zur Erkennung der in dieser Arbeit vorgestellten Ereignisse darauf geachtet, derartige Seiteneffekte zu vermeiden. Zwar gilt oft, dass mehr als eine Regelvorbedingung in einem Zyklus wahr ist, jedoch wirkt sich die Ausführung der Regelkonsequenz nicht so aus, dass eine zuvor als wahr ausgewertete Regelbedingung durch Ausführung einer anderen Regel unwahr wird.

Mit wachsender Wissens- und Regelbasis wird vor allem die Evaluation der Regelbedingungen zum algorithmischen Engpass bei der regelbasierten Verarbeitung. Um mit diesem Problem umzugehen, wurde von Forgy (1982) der sogenannte Rete-Algorithmus entwickelt, welcher Regelvorbedingungen in einem Netzwerk (lat. rete = das Netz) verwaltet. Mit Hilfe des Rete-Algorithmus kann so eine große, sich schnell verändernde Wissensbasis mit vertretbarem Zeitaufwand verarbeitet werden.

Regelbasierte Systeme bieten von sich aus keine Unterstützung für zeitliches Schließen. Walzer, Breddin und Groch (2008) zeigen aber, wie der Rete-Algorithmus für die Nutzung im Rahmen des Complex Event Processing durch die Einführung qualitativer zeitlicher Relationen erweitert werden kann.

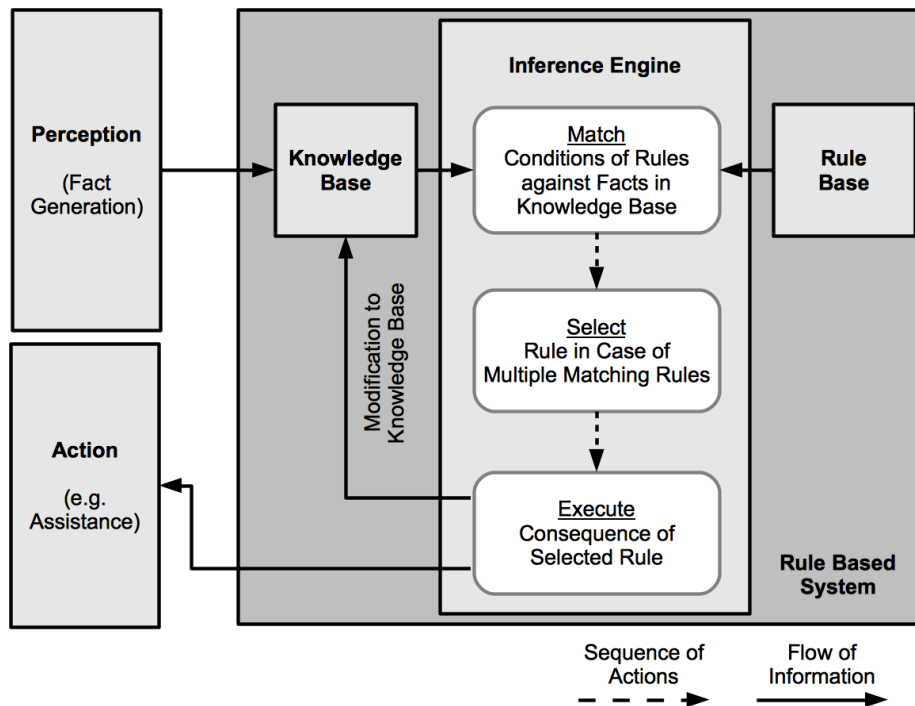


Abbildung 8.2: Match-Select-Execute-Zyklus und Architektur eines regelbasierten Systems.

8.6 Regeln für domänenunabhängige Explorationsereignisse

Komplexe Ereignisse, haben ihren Namen von ihrer internen Struktur. Komplexe Ereignisse werden iterativ aus einfacheren Ereignissen aufgebaut. Für diesen Aufbau von komplexen Ereignissen sind in erster Linie Subordinations-Regeln und Vervollständigungs-Regeln notwendig, die überprüfen, ob ein erkanntes Ereignis einem bereits bestehenden Ereignis untergeordnet wird und somit dessen Struktur erweitert, beziehungsweise ob die Struktur eines Ereignisses die notwendigen Kriterien erfüllt, um als vollständig zu gelten.

Die Regeln zum Erkennen von Ereignissen sind aber auch komplex in dem Sinne, dass ihre Bedingungen Informationen verschiedener Art miteinander verknüpfen. Diese Informationen umfassen *Beobachtung der aktuellen Explorationsbewegung, Wissen über den aktuellen Zustand von Explorationsereignissen, Wissen über vergangene Explorationsereignisse, Wissen über die linien-basierte Graphik und ihre Geometrie und Domänenspezifisches Wissen.*

Beobachtung der aktuellen Exploration: Die Beobachtung der aktuellen Exploration umfasst eine Analyse der Trajektorie der Exploration wie auch eine Analyse der Position. Die Beobachtung der aktuellen Exploration wird durch Basisereignisse (siehe Abschnitt 7.4) repräsentiert. Basisereignisse sind punktuelle Beobachtungen die nicht zeitlich ausgedehnt sind.

Aktueller Zustand: Anders als zeitlich nicht ausgedehnte Basisereignisse umfasst der Aktuelle Zustand der Exploration auch solche Explorationsereignisse die zeitlich ausgedehnt

sind. Während Beobachtungen der aktuellen Exploration nur dann neue Basisereignisse in die Wissensbasis einfügen, wenn sich eine qualitative Veränderung in der Trajektorie der Explorationsbewegung oder den explorierten Elementen der linien-basierten Graphik ergeben hat, kann der aktuelle Zustand der Exploration jederzeit im Rahmen eine Regelbedingung überprüft werden.

Historie der Exploration: Die Historie der Exploration umfasst alle bisher beobachteten Explorationsereignisse mit allen ihren Einzelheiten. Insbesondere können im Rahmen von Regelbedingungen zeitliche Schlüsse über die Abfolge von Ereignissen (bzw. ihren Start und Endzeitpunkten) und die hierarchische Struktur von Ereignissen abgefragt werden.

Wissen über linien-basierte Graphik und Domänenspezifisches Wissen: Neben Wissen über gerade stattfindende und die vergangene Exploration ist Wissen über die linien-basierte Graphik notwendig, um einige Ereignisse zu erkennen. Soll zum Beispiel eine Regel Teilexplorations hierarchisch aggregieren, so muss diese Regel auf Wissen zugreifen können, das beschreibt, welche Elemente der linien-basierten Graphik in welchen Relationen zueinander stehen.

Je spezifischer das zu erkennende Ereignis ist und je stärker es von ähnlichen Ereignissen abgegrenzt werden soll, desto kompliziertere Muster zur Ereigniserkennung sind notwendig. Im diesem Kapitel wird ein Satz von Regeln zur Erkennung von Basisereignissen und domänenunabhängigen komplexen Explorationsereignissen vorgestellt. Dabei wird zum einen gezeigt, wie die Regeln zur Erkennung von weniger komplexen Ereignissen die Basis für weitere Regeln schaffen und zum anderen, wie Regelbedingungen verschiedene Informationen miteinander verknüpfen, um komplexe Ereignisse zu erkennen. In Kapitel 11 und 12 werden Sätze von Regeln zum Erkennen von Explorationsereignissen in haptischen Straßenkarten beziehungsweise haptischen Linien-Graphen vorgestellt. Diese domänenspezifischen Regelsätze sind im Rahmen von konkreten Anwendungen zur verbal assistierten haptischen Exploration von linien-basierten Graphiken entwickelt worden. Sie zeigen, wie domänenspezifische Explorationsereignisse auf Basis von domänenunabhängigen Explorationsereignissen erkannt werden. Diese domänenspezifischen Explorationsereignisse werden genutzt, um verbale Assistenz auszulösen oder zu generieren.

8.6.1 Formale Kriterien der Regeln

Zwei formale Eigenschaften sind für das den Entwurf des Regelsystems wichtig: Zum einen soll das Regelsystem so aufgebaut sein, dass keine Zyklen von einzelnen Regeln oder Regelmengen existieren, die unentwegt aktiv sind, zum anderen soll das System deterministisch in dem Sinne sein, dass der gleiche Input, also die gleiche beobachtete Exploration, zu der gleichen Menge an erkannten Explorationsereignissen führt.

Zyklenfreiheit: Das Regelsystem ist darauf ausgelegt, dass keine Endloszyklen von feuernenden Regeln entstehen. Das heißt, jede Regel sorgt mit den von ihr ausgeführten Konsequenzen dafür, dass die Bedingungen der Regel selbst nicht mehr erfüllt sind. Wenn die Konsequenz einer Regel die Bedingungen für andere Regeln erfüllen kann, was bei einem

Regelsystem zum hierarchischen Aufbau von komplexen Ereignissen der Normalfall ist, ist sichergestellt, dass keine der nachfolgenden Regeln die Bedingungen für eine vorhergehende Regel wiederherstellen können. Zu einem gegebenen Zeitpunkt darf eine neue Information in der Wissensbasis nur für eine endliche Folge von ausgeführten Regeln sorgen.

Determinismus: Zu einem gegebenen Zeitpunkt kann es mehrere Regeln mit erfüllten Bedingungen geben. Verschiedene Möglichkeiten existieren, um in einem solchen Fall zu entscheiden, welche der Regeln ausgeführt wird. Drools unterstützt unter anderem die explizite Priorisierung von Regeln (dies wird unter anderem im Prototypen zur verbal assistierten Exploration von haptischen Linien-Graphen genutzt, siehe Kapitel 13). Die Regeln für die Ereigniserkennung sind jedoch so entwickelt, dass bei mehreren Regeln mit erfüllter Vorbedingung die Reihenfolge in der die Regeln ausgeführt werden, keinen Einfluss auf die letzten Endes erkannten Ereignisse hat. Dies wird dadurch erreicht, dass Regeln ihre eigenen Bedingungen bei der Ausführung falsch machen, aber keine Seiteneffekte auf andere Regeln haben, die nicht gezielt dem iterativen hierarchischen Aufbau von komplexen Ereignissen dienen.

Bei der Beschreibung der Regeln werden diese beiden Aspekte nicht gesondert hervorgehoben, um die Aggregation von komplexen Ereignissen deutlicher hervorzuheben.

8.6.2 Regeln zur Erkennung von Basisereignissen

Regeln zur Erkennung von Basisereignissen nutzen die systeminternen Methoden zur Analyse der Position und der Bewegung des HIP in der virtuellen haptischen Umgebung um Basisereignisse in die Wissensbasis einzufügen. Diese Regeln bilden den Ausgangspunkt für den Aufbau komplexer Ereignisse. Tabelle 8.1 zeigt die 5 Regeln für die Erkennung von Basisereignissen. Jede der Regeln ist so angelegt, dass einmal beobachtete Basisereignisse beim Auslösen der Regeln konsumiert werden, das heißt sie lösen die mit ihnen assoziierte Regel genau einmal aus. Es kommt nicht zu einer anhaltenden Aktivierung entsprechender Regeln.

Regel	Bedingung	Ergebnis (wird der Wissensbasis hinzugefügt)
Basisereignis ENTER(e)	Position des HIP liegt in Element e der LBG, in dem der HIP im vorherigen Analyseschritt noch nicht lag.	Enter-Event für Element e
Basisereignis EXIT(e)	Position des HIP liegt nicht mehr in Element e der LBG, in welchem der HIP im vorherigen Analyseschritt lag.	Exit-Event für Element e
Basisereignis STOP	Die Geschwindigkeit der Bewegung des HIP liegt unterhalb einer bestimmten Schwelle (für ein Zeitintervall von mindestens ca. 500 ms.)	Stop-Event
Basisereignis GO	Die Geschwindigkeit der Bewegung des HIP liegt	Go-Event

	oberhalb einer bestimmten Schwelle (für ein Zeitintervall von mindestens ca. 500 ms.)	
Basisereignis TURN	Die Bewegungsrichtung des HIP wechselt um 90° oder mehr, innerhalb eines Zeitintervalls von 500 ms, ohne dass ein Stop-Event detektiert wurde.	Turn-Event

Tabelle 8.1: Übersicht der Regeln zur Erkennung von Basisereignissen.

8.6.3 Regeln zur Erkennung von domänenunabhängigen Explorationsereignissen

Die domänenunabhängigen Regeln erkennen und modifizieren die Explorationsereignisse für linien-basierte Graphiken, welche in Kapitel 7 vorgestellt worden sind. Dazu wurden für jedes Explorationsereignis, welches in Abschnitt 7.5 vorgestellt wurde, bis zu vier Regeln, welche Modifikationen an bestehenden Ereignissen und die Konzeptualisierung neuer Ereignisse in der Wissensbasis ermöglichen, aufgestellt: Eine Start-Regel (*start rule*) spezifiziert, wann ein neues Ereignis erkannt und in die Wissensbasis eingefügt wird. Eine komplementäre Abschluss-Regel (*closure rule*) spezifiziert, wann ein ausgedehntes Ereignis die Eigenschaft abgeschlossen wird. Für solche Ereignisse, die ein Vollständigkeits-Kriterium besitzen, spezifiziert eine Vervollständigungs-Regel (*completion rule*) in Abhängigkeit der untergeordneten Teil-Ereignisse, wann das Ereignis vollständig ist. Eine Subordinations-Regel (*subordination rule*) bestimmt, wann der Liste der untergeordneten Ereignisse eines gegebenen Ereignisses ein neues Ereignis untergeordnet wird. Die Bedingungen für die entsprechenden Regeln sind in Kapitel 7 in natürlicher Sprache ausgeführt, eine Umsetzung der Regeln im Drools-Formalismus findet sich in Appendix B. Tabelle 8.2 gibt eine Übersicht über diese Regeln.

Regel	Bedingung		Ergebnis (wird der Wissensbasis hinzugefügt)
CSegment Start	Enter-Event für CSegment cs	Beobachtung	CSegmentExploration(cs) wird erkannt
CSegment Close	Offene CSegmentExploration(cs)	Aktueller Zustand	CSegmentExploration(cs) wird geschlossen
	Enter-Event für CSegment $cs' \neq cs$ oder Region r nach Beginn von CSegmentExploration(cs)	Beobachtung Zeitlicher Schluss	
CSegment Subordinate	Offene CSegmentExploration(cs)	Aktueller Zustand	Exploration des Configurationspunktes cs_2 wird der Exploration von cs untergeordnet
	Offene CpExploration(cs_2) eines der Endpunkte von cs	Aktueller Zustand	

CSegment Complete	Nicht vollständige CSegmentExploration(<i>cs</i>)	Aktueller Zustand	CSegmentExploration(<i>cs</i>) ist vollständig
	Konfigurationspunkt-Explorationen der beiden Endpunkte von <i>cs</i> sind der Exploration von <i>cs</i> untergeordnet	Historie der Exploration	
Cp Start	Enter-Event für Konfigurationspunkt <i>cp</i>	Beobachtung	CpExploration(<i>cp</i>) wird erkannt
Cp Close	Offene CpExploration(<i>cp</i>)	Aktueller Zustand	CpExploration(<i>cp</i>) wird geschlossen
	Exit-Event für Konfigurationspunkt <i>cp</i> nach Beginn von Exploration von <i>cp</i>	Historie der Exploration	
Cp Subordinate	Offene CpExploration(<i>cp</i>)	Aktueller Zustand	Exploration des CSegments <i>cs</i> wird der Exploration von <i>cp</i> untergeordnet
	Offene CSegmentExploration von einem CSegment <i>cs</i> , das den Konfigurationspunkt <i>cp</i> als Endpunkt hat.	Aktueller Zustand Wissen über LBG	
Cp Complete	Nicht vollständige CpExploration(<i>cp</i>)	Aktueller Zustand	CpExploration(<i>cp</i>) ist vollständig
	CSegmentExplorationen aller CSegmente welche <i>cp</i> als Endpunkt haben sind der Exploration von <i>cp</i> untergeordnet	Historie der Exploration Wissen über LBG	
LineComplex Start	Offene CSegmentExploration(<i>lc</i>)	Aktueller Zustand	LineComplexExploration(<i>lc</i>) wird erkannt
	CSegment <i>cs</i> ist Teil des Linienkomplexes <i>lc</i>	Wissen über LBG	
	Es existiert kein offenes LineExploration Ereignis für Linienkomplex <i>lc</i>	Historie der Exploration	
LineComplex Close	Offene LineComplexExploration(<i>lc</i>)	Aktueller Zustand	LineComplexExploration(<i>lc</i>) wird geschlossen
	Es existiert kein offenes Explorationsereignis für ein CSegment oder Konfigurationspunkt	Aktueller Zustand Wissen über	

	der Teil von lc ist.	LBG	
LineComplex Subordinate	Offene CSegmentExploration(cs)	Aktueller Zustand	Exploration des CSegments cs wird der Exploration des Linienkomplexes lc untergeordnet
	Es existiert ein offenes Explorationsereignis für einen Linienkomplex lc dessen Teil cs ist.	Aktueller Zustand Wissen über LBG	
LineComplex Complete	Nicht vollständige LineComplex Exploration(lc)	Aktueller Zustand	LineComplex Exploration(lc) ist vollständig
	Vollständige CSegmentExplorations aller CSegmente, welche Teil von lc sind, sind der Exploration von lc untergeordnet	Historie der Exploration Wissen über LBG	
Region Start	Enter-Event für Region r	Beobachtung	RegionExploration(r) wird erkannt
Region Close	Offene RegionExploration(r)	Aktueller Zustand	RegionExploration(r) wird geschlossen
	Exit-Event für Region r nach Beginn von Exploration von r	Beobachtung	

Tabelle 8.2: Übersicht der Regeln zur Erkennung von komplexen Ereignissen.

Tabelle 8.2 zeigt, dass die Regeln zur Erkennung von komplexen Ereignissen die oben genannten Quellen, Beobachtungen, Wissen über die linien-basierte Graphik, die aktuelle Exploration und die Historie der Exploration nutzen.

8.7 Realisierung von Ereigniserkennung im regelbasierten System Drools 5.0

Das regelbasierte System für die Erkennung von Explorationsereignissen von haptischen linien-basierten Graphiken wurde in dem Java-basierten, open-source Rahmenwerk Drools 5.0 implementiert, siehe (Bali, 2009; Browne, 2009; Proctor, Neale, Lin & Frandsen, 2008) für weitere Informationen. Die zwei genutzten Hauptkomponenten des Rahmenwerks sind Drools Expert, eine vorwärts verkettende, regelbasierte Interferenzmaschine, und Drools Fusion eine Erweiterung für Drools Expert zur Unterstützung zeitlicher Schlüsse im Rahmen der Ereignisverarbeitung.

Das Drools-Framework kann auf Grund seiner natürlichen Integration in die Sprache Java sehr gut mit anderen Teilen der vorgestellten Architektur, wie zum Beispiel der Detektion von Basisereignissen aber auch der Generierung von multimodaler Interaktion integriert werden. Lohmann, Kerzel und Habel (2012) stellen ein Beispiel für die Integration von Drools-basierter Ereigniserkennung während der Exploration von haptischen Straßenkarten und eine Java-basierte verbale Assistenz vor, für weitere Beispiele für die Nutzung von Drools in Assistenz und Tutorial-Systemen siehe (Jaques, Seffrin, Rubi, Morais, Guilardi, Bittencourt & Isotani, 2013; Schneider, Velten & Hauptert, 2010).

Drools Expert basiert auf dem objektorientierten Ansatz von Java. In der Wissensbasis des durch Drools realisierten regelbasierten Systems werden Fakten als Objekte modelliert. Dies bringt viele Vorteile für die Integration in größere Softwaresysteme mit sich: Objekte, welche Fakten in der Wissensbasis repräsentieren, können ohne Aufwand mit anderen Komponenten des Systems ausgetauscht werden. So kann zum Beispiel ein erkanntes Explorationsereignis gleichermaßen innerhalb der Wissensbasis genutzt werden, um auf seiner Grundlage weitere komplexe Ereignisse zu erkennen und gleichfalls kann das selbe Ereignis zu einer Komponente gesendet werden, welche die Interaktion mit dem Benutzer steuert und als Grundlage für eine multimodale Äußerung genutzt werden.

Für die schnelle Evaluation von Regel-Bedingungen wurde der Rete-Algorithmus (Forgy, 1982) für die Verarbeitung einer objekt-basierten Regelbasis weiterentwickelt. Nicht nur die Evaluation von Regelbedingungen wurde an das objektorientierte Programmierparadigma angepasst, auch andere Funktionen wie eine automatische Entfernung (garbage collection) von Fakten der Wissensbasis, welche nicht mehr für die Regelevaluation benötigt werden. Hierdurch kann die Wissensbasis in ihrem Umfang reduziert werden, indem beispielsweise Ereignisse, welche nicht mehr für die weitere Ereigniserkennung oder Auswertung der Exploration benötigt werden, entfernt werden. Hierdurch werden innerhalb des Systems zur Ereigniserkennung während der Exploration haptischer linien-basierter Graphiken Basis-Ereignisse aus der Wissensbasis entfernt, sobald sie nicht mehr für die Verarbeitung benötigt werden. Hierdurch wird verhindert, dass eine lang andauernde Exploration die Verarbeitung neuer Ereignisse negativ beeinflusst.

8.7.1 Qualitatives zeitliches Schließen

Ein wichtiger Aspekt des Complex Event Processing ist die Fähigkeit des verarbeitenden Systems, qualitative zeitliche Schlüsse auszuführen. In einem regelbasierten System kann der aktuelle Zustand einer Wissensbasis zur Repräsentation des aktuellen Zustands der beobachteten Domäne genutzt werden. Im vorgestellten Ansatz entspricht dieser aktuelle Zustand der Domäne dem aktuellen Zustand der Exploration der haptischen linien-basierten Graphik. An der Stelle von speziellen ereignis-basierten Anfragen an eine Datenbank oder einen Datenstrom, werden Regelbedingungen in Bezug auf diesen Zustand der Exploration aufgestellt. Hierzu werden die in Kapitel 7 vorgestellten Eigenschaften komplexer Ereignisse wie Abgeschlossenheit, Vollständigkeit und die Liste der untergeordneten Ereignisse genutzt.

Für Fälle, in denen komplexere zeitliche Schlüsse notwendig sind, um bestimmte Explorationsereignisse zu erkennen, stellt Drools Fusion eine Erweiterung der Funktionalität von Drools Expert durch die Integration qualitativer zeitlicher Schlüsse über ausgedehnte Zeitintervalle und nicht-ausgedehnte Zeitpunkte auf der Basis der von Allen (1981) definierten Relationen.

8.8 Formalismus für Regelbedingungen in der Sprache Drools 5.0

Die in Kapitel 8 eingeführten Spezifikationen von Explorationsereignissen müssen in eine Sprache für Regelbedingungen umgesetzt werden. Dabei muss der formale Umfang der genutzten Regelsprache in der Lage sein, die gegebenen Spezifikationen darzustellen. Im Folgenden wird der Drools Formalismus vorgestellt, bevor gezeigt wird, wie mit diesem Formalismus die Spezifikationen der vorgestellten Ereignisse umgesetzt werden.

Im Folgenden wird eine einfache prädikatenlogische Notation verwendet um darzustellen, wie die Spezifikation von Regelbedingungen auf formaler Ebene funktioniert. Diese Form der Darstellung wird auch weiter unten in Abschnitt 8.9 genutzt um, einige ausgewählte Beispiele für Regeln zur Ereigniserkennung vorzustellen. Für eine genauere Einführung in die Regelsprache von Drools siehe *Appendix A*.

Regel-Struktur: Eine Regel in einem regelbasierten System besteht im Wesentlichen aus drei Teilen: Ein Regelkopf identifiziert die Regel und ermöglicht es, weitere Eigenschaften der Regel zu spezifizieren, dazu gehört zum Beispiel eine Priorisierung bei mehreren gleichzeitig ausführbaren Regeln.

Im Anschluss wird die Bedingung für die Regelausführung spezifiziert. Auch wenn die von Drools genutzte Wissensbasis auf einem objektorientierten Datenmodell basiert, kann diese Bedingung als prädikatenlogische Spezifikation angesehen werden, mit der bestimmte Bedingungen an den aktuellen Stand der Wissensbasis gestellt werden. Jeder einzelne Teil dieser Spezifikation ist formal ein Prädikat, welches für die aktuelle Wissensbasis gelten (positiv evaluiert werden) muss. Die einzelnen Teile dieser Bedingung sind konjunktiv verknüpft.

Als dritter Teil wird die Konsequenz der Regel spezifiziert. Hierbei kann es sich um Modifikationen an der Wissensbasis zur Modifikation eines bereits vorhandenen Objektes, die Entfernung eines Objektes oder das Hinzufügen eines neuen Objektes handeln. Alternativ können imperative Anweisungen genutzt werden, um Funktionalitäten des Systems zu realisieren.

Einfache Bedingungen: Die Wissensbasis besteht aus Java Objekten. Die einfachste Form der Bedingung besteht darin, das Vorhandensein eines Objektes mit bestimmtem Typ in der Wissensbasis abzufragen. Eine solche Bedingung evaluiert zu wahr, wenn mindestens eine Instanz eines solchen Objektes in der Wissensbasis vorhanden ist.

Linie()

Diese Bedingung stellt die Anforderung an die Wissensbasis, dass mindestens ein Objekt vom Typ Linie in der Wissensbasis vorhanden ist.

Bedingung an Eigenschaften von Objekten: In einer Bedingung können Eigenschaften spezifiziert werden, welche das entsprechende Objekt aufweisen muss, also Eigenschaften, welche ein Element der linien-basierten Graphik oder ein Ereignis aufweisen muss, damit die Regelbedingung erfüllt ist.

lineEx(_, _, *open*, not *completed*, [e_1, \dots, e_n])

Die oben gezeigte Bedingung stellt die Anfrage ob ein offenes, nicht abgeschlossenes Explorationsereignis in Bezug auf eine Linie in der Wissensbasis enthalten ist.

Variablen-Bindung in Bedingungen: Jede einzelne Bedingung stellt die Anforderung an die Wissensbasis, dass ein Objekt mit bestimmten Eigenschaften vorhanden sein muss. Um Bedingungen zu formulieren, die Relationen zwischen zwei Objekten ausdrücken, können Eigenschaften von Objekten an Variablen gebunden werden.

CSegmentEx(E_1, C , *open*, _, [e_1, \dots, e_n])

exit(E_2, C, t)

E_2 nach E_1

In der ersten Bedingung wird ein spezifisches C-Segment an die Variable C gebunden. Die zweite Bedingung fragt ab, ob es ein Exit-Ereignis in Bezug auf das gleiche C-Segment gibt. Die dritte Bedingung fragt ab, ob das Exit-Ereignis nach dem (Beginn des) der C-Segment-Exploration stattgefunden hat.

In natürlicher Sprache ließe sich diese Bedingung wie folgt ausdrücken: Gibt es ein Exit-Ereignis in Bezug auf ein C-Segment das nach dem Beginn eines noch offenen Explorationsereignisses für dieses C-Segment stattfindet.

Logische Operatoren und Negation: Bedingungen sind per Default konjunktiv verknüpft; das heißt alle einzelnen Bedingungen müssen erfüllt sein, damit die Gesamtbedingung als erfüllt gilt. Es ist aber auch möglich, andere logische Operatoren zu nutzen. Eine mehrfache Verschachtelung von logischen Operatoren ist ohne Beschränkung möglich. Die Negation kann als einstelliger logischer Operator benutzt werden.

exit(E_2, L_1, t)

(LineComplex(L_1)

 or

 Line(L_1)

)

Diese Bedingung fragt ab, ob es ein Exit-Ereignis für ein Element L_1 gibt, bei dem es sich um eine Linie oder einen Linien-Komplex handelt.

Logische Quantoren: Existenzquantor und Allquantor können genutzt werden um komplexe Bedingungen zu formulieren. Der Existenzquantor ist implizit schon in der einfachen Bedingung, also der Abfrage, ob ein Objekt mit bestimmten Eigenschaften in der Wissensbasis existiert, enthalten. Explizit kann er zusammen mit der Negation (siehe unten) verwendet werden. Der Allquantor kann genutzt werden, um Aussagen über alle Elemente einer Wissensbasis zu treffen.

```

enter( $e_{enter}, s, time$ )
 $\neg \exists e_{cp}: cSegmentEx(e_{cp}, cp, \_, \_, list)$ 
in( $e_{enter}, list$ )

```

In diesem Beispiel wird der negierte Existenzquantor genutzt, um auszudrücken, dass es kein Explorationsereignis eines C-Segments in der Wissensbasis geben darf, welches in seiner Liste der untergeordneten Ereignisse das Enter-Ereignis e_{enter} enthält. (Die Funktion $in(e, l)$ wird weiter unten genauer erläutert.)

Eine Spezifikation der genutzten Regeln zur Ereigniserkennung in der Regelsprache Drools findet sich in *Appendix B* dieser Arbeit. Diese Spezifikation umfasst je vier Regeln (Start-, Abschluss-, Vervollständigungs- und Subordinationsregel) für die Elemente einer linienbasierten Graphik des Typs: Linie, Segment, C-Segment, Konfigurationspunkt & Linien-Komplex.

8.9 Beispiele für Regeln zur Ereigniserkennung

An zwei ausgewählten Beispielen sollen die Regeln zur Ereigniserkennung demonstriert werden. Die Regeln sind in Prädikatenlogik erster Ordnung spezifiziert, welche weitestgehend den Möglichkeiten der Regelsprache Drools entspricht.

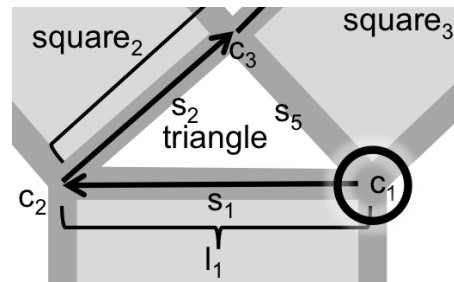
Ein Satz von Hilfsfunktionen wird genutzt, um diese Spezifikationen zu erstellen.

- **id():** Die Funktion $id()$ gibt einen neuen einzigartigen Bezeichner für ein Ereignis zurück.
- **in(l, e):** Die Funktion $in(l, e)$ gibt den Wert *wahr* zurück, wenn das Ereignis e in der Liste von Ereignissen l enthalten ist, ansonsten wird der Wert *falsch* zurückgegeben.
- **append(l, e):** Die Funktion $append(l, e)$ fügt das Ereignis e am Ende der Liste von Ereignissen l ein.

Zeitliche Relationen werden qualitativ angegeben, hierzu werden die zeitlichen Relationen des Allen-Kalküls genutzt, siehe (Allen 1981). Der Unterstrich () wird genutzt, um anzuzeigen, dass an dieser Stelle eines Prädikates jeder mögliche Wert akzeptiert wird, beziehungsweise, dass dieser Wert in der Konsequenz einer Regel nicht verändert wird.

8.9.1 Regel zur Erkennung des Starts einer C-Segment-Exploration

IF
 $\text{enter}(e_{\text{enter}}, s, \text{time})$
 $\neg \exists e_{cp}: \text{cSegmentEx}(e_{cp}, cp, _, _, \text{list})$
 $\text{in}(e_{\text{enter}}, \text{list})$
 THEN
 Create:
 $\text{cSegmentEx}(\text{id}(), s, t, f, [e])$



(a)

(b)

Abbildung 8.3: (a) Regel zur Erkennung des Starts einer Exploration eines C-Segments.
 (b) Beispielhafte Explorationssituation für den Start einer C-Segment-Exploration.

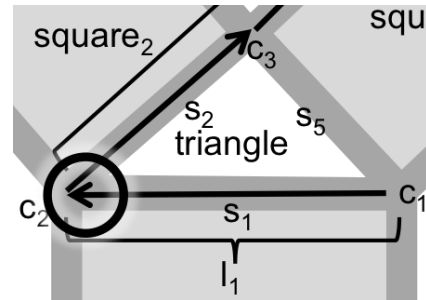
Abbildung 8.3 (b) zeigt den Beginn der Exploration aus dem Beispiel in Abschnitt 8.10. Das C-Segment s_1 , die Hypotenuse eines explorierten Dreiecks, wird betreten. Diese Explorationsbewegung erzeugt ein entsprechendes Explorationsereignis, da zum Zeitpunkt des Explorationsbeginns kein Explorationsereignis auf der Basis des detektierten Enter-Ereignisses vorliegt. Das erzeugte Explorationsereignisse in Bezug auf das C-Segment ist offen, das heißt es ist noch nicht abgelaufen und findet aktuell statt; es ist zudem noch nicht vollständig, das C-Segment wurde also nicht gänzlich exploriert.

Die Regel in Abbildung 8.3 (a) zeigt die entsprechende Regel für diesen Vorgang. Sobald ein entsprechendes Explorationsereignis für das C-Segment der Wissensbasis hinzugefügt wurde, wird das zweite Konjunkt der Regelbedingung nicht mehr erfüllt – es existiert nun ein entsprechendes Explorationsereignis in der Wissensbasis. Auf diese Weise wird ein erneutes Ausführen der Regel verhindert.

Zeitgleich zum Erkennen der Exploration des C-Segments s_1 wird der Konfigurationspunkt c_1 betreten, ein entsprechendes Enter-Ereignis wird detektiert und eine weitere Regel sorgt für das Erkennen eines entsprechenden Explorationsereignisses und das Hinzufügen dieses Ereignisses zur Wissensbasis. Eine Subordinations-Regel sorgt daraufhin dafür, dass das Explorationsereignis des Konfigurationspunktes c_1 der *offenen* Exploration des C-Segments s_1 untergeordnet wird. Propositionales, räumliches Wissen über die explorierte linien-basierte Graphik wird dabei genutzt, um festzustellen, dass der Konfigurationspunkt c_1 tatsächlich ein Endpunkt des C-Segments s_1 ist.

8.9.2 Regel zur Erkennung der Vollständigkeit einer Exploration eines C-Segments

IF
 $cSegmentEx(e_{seg}, s, t, f, list)$
 $c\text{-segment}(s, seg, cp1, _)$
 $cpEx(e_{cp1}, cp1, _, _, _)$
 $in(e_{cp1}, list)$
 $c\text{-segment}(s, seg, _, cp2)$
 $cpEx(e_{cp2}, cp2, _, _, _)$
 $in(e_{cp2}, list)$
 THEN
 Modify:
 $cSegmentEx(e_{seg}, _, _, t, _)$



(a) (b)

Abbildung 8.4: (a) Regel zur Erkennung der Vollständigkeit einer Exploration eines C-Segmentes.
 (b) Vollständige Explorationsbewegung entlang des C-Segmentes s_1 .

Abbildung 8.4 (b) zeigt die erste Explorationsbewegung der Beispiexploration aus Abschnitt 8.10. Der haptische Interfacepunkt ist entlang des C-Segments s_1 von rechts nach links bewegt worden, die Bewegung hat also auf dem C-Segment vom Konfigurationspunkt c_1 zum Konfigurationspunkt c_2 stattgefunden. Am Ende dieser Bewegung wird ein Explorationsereignis in Bezug auf den Konfigurationspunkt c_2 in die Wissensbasis eingefügt. Eine Subordinations-Regel ordnet dieses Ereignis der Exploration des C-Segmentes s_1 unter.

Hiermit wurden dem Explorationsereignis in Bezug auf das C-Segment s_1 insgesamt drei Explorationsereignisse untergeordnet: Das Enter-Ereignis in Bezug auf das C-Segment selbst und Explorations-Ereignisse für die beiden Konfigurations-Punkte an den Enden dieses Segmentes. Hiermit ist das Kriterium für die vollständige Exploration des C-Segments s_1 erfüllt. Der Zustand des Explorationsereignisses wird entsprechend aktualisiert. Die Regel hierfür ist in Abbildung 8.4. (a) angegeben.

8.10 Regeln zur Erkennung domänenspezifischer Ereignisse

Die in diesem Kapitel vorgestellten Regeln erlauben das Erkennen von domänenunabhängigen Explorationsereignissen auf linien-basierten Graphiken in haptischen virtuellen Umgebungen. Für einen konkreten Prototypen innerhalb einer gegebenen Anwendungsdomäne muss der hier vorgestellte Ansatz dann erweitert werden, wenn in der Anwendungsdomäne Explorationsereignisse erkannt werden sollen, welche sich nur mit domänenspezifischem Wissen erschließen lassen. Hierzu muss sowohl die Wissensbasis über die linien-basierte Graphik mit domänenspezifischem Wissen erweitert werden, als auch ein Satz domänenspezifischer Regeln ausgearbeitet werden.

Während in einer linien-basierten Graphik Linien oder von ihnen abgeleitete Elemente exploriert werden, können in einer Straßenkarte zum Beispiel Straßen und Landmarken exploriert werden. Je nach Anwendungsdomäne sind aber auch komplexere Explorationsereignisse möglich. Es kann zum Beispiel bei der Exploration einer Straßenkarte zu einem „Abbiegen“-Ereignis kommen, wenn der HIP von einer Straße zu einer anderen Straße bewegt wird, welche in einem Winkel innerhalb eines festgelegten Intervalls von der ersten Straße abgeht. Bei der Exploration einer Abbildung aus dem Bereich der Geometrie würde dieses Ereignis keine sinnvolle Interpretation haben. Zwar könnte in der Geometrie-Domäne ein Wechsel von einer explorierten geometrischen Figur zu einer anderen erkannt werden, aber in einem solchen Fall würde zum Beispiel der Winkel, mit der die entsprechenden Linien aufeinander treffen, keine Rolle spielen.

Domänenspezifische Ereignisse zu erkennen, kann aus zwei Gründen wünschenswert sein: Erstens können domänenspezifische Ereignisse als Grundlage für das Auslösen verbaler Assistenz genutzt werden, ohne dass eine möglicherweise unintuitive Übersetzung zwischen linien-basierter Graphik und Anwendungsdomäne stattfinden muss. Aus Sicht der Entwicklung einer Applikation in einer konkreten Anwendungsdomäne kann dann zum Beispiel festgelegt werden, wie das System reagieren soll, wenn eine „Straße“ exploriert wird, denn genau so ein Explorationsereignis kann mittels domänenspezifischer Regeln erkannt werden. Der Zugriff auf derartige kategorielle Informationen erlaubt es, die Interaktion mit dem Benutzer auf einer hohen Abstraktionsebene zu entwickeln. Der in Kapitel 13 vorgestellte OBSERVINGASSISTANT als Prototyp für verbal assistierte Exploration von Linien-Graphen nutzt diese Möglichkeit, um Assistenz auf der Basis domänenspezifischer Explorationsereignisse zu generieren.

Zweitens kann es je nach Interaktionsparadigma gewünscht sein, innerhalb der Assistenz sprachlich auf das Vokabular der explorierten Domäne einzugehen. Dies kann die Interaktion mit dem Benutzer verbessern und helfen einen gemeinsamen Kontext (Common Ground, siehe Kapitel 4) herzustellen. Es ist die Aufgabe der domänenspezifischen Ereigniserkennung, räumliche Konzepte aus der Anwendungsdomäne so umzusetzen, dass entsprechende Explorationsereignisse zuverlässig erkannt werden. In Kapitel 12 werden Regeln zur Erkennung von domänenspezifischen Ereignissen für die Anwendungsdomäne der Straßenkarten vorgestellt. Mit diesen ist es zum Beispiel möglich festzustellen, wann ein Benutzer mit dem HIP ein „Abbiegen“ vollführt.

8.11 Fazit zur Ereigniserkennung

Eine wesentliche Aufgabenstellung dieser Arbeit besteht im hierarchischen Aufbau komplexer Ereignisse auf der Grundlage von direkten Beobachtungen der Exploration haptischer linien-basierter Graphiken unter Nutzung von Wissen über die explorierte Graphik. In den Kapiteln 5 bis 8 sind eine geeignete Repräsentation des Wissens über die explorierte Graphik, der Explorationsereignisse und ein Satz von Regeln zum Aufbau komplexer Ereignisse vorgestellt worden. Der dabei genutzte Ansatz stützt sich auf eine systematische Erstellung und

Aufbereitung sowohl haptischer als auch wissensbasierter Repräsentationen aus gegebenen Datenquellen. Dieser Vorgang wird im dritten Teil der Arbeit dargestellt, bevor eine Evaluation der Ereigniserkennung in konkreten Anwendungsdomänen erfolgt. Dabei wird die Erweiterbarkeit des Ansatzes und Anpassung an Anwendungsdomänen gezeigt, sowie die Möglichkeit, die regelbasierte Verarbeitung auch zur Generierung und Auslösung verbaler Assistenz zu nutzen.

Als Zwischenfazit zur regelbasierten Ereigniserkennung kann festgehalten werden, dass dieser Formalismus einen hierarchischen Aufbau komplexer Explorationsereignisse von linien-basierten Graphiken ermöglicht. Die Ereigniserkennung verläuft deterministisch und kann parallel oder überlappend ablaufende Explorationsereignisse erkennen.

Es bleibt zu überprüfen, in wie weit der vorgestellte Formalismus die realisierten Komponenten zur Ereigniserkennung in einer Anwendungsdomäne im Rahmen einer prototypischen Anwendung genutzt werden können. Dazu müssen die Repräsentation von linien-basierter Graphik, der Explorationsereignisse und auch die Regeln zu Erkennung von Ereignissen entsprechend angepasst werden. In den Kapiteln 12 und 13 werden Prototypen für verbal assistierte haptische Exploration von linien-basierten Graphiken für die Anwendungsdomänen der Straßenkarten und der Linien-Graphen vorgestellt.

Teil 3:

Realisierung von haptischen linien-basierten Graphiken

9 Erzeugung von haptischen Repräsentationen linien-basierter Graphiken

Um eine multimodal assistierte Exploration einer linien-basierten Graphik zu ermöglichen, wird sowohl ein haptisch explorierbares 3D-Modell der linien-basierten Graphik als auch eine dazu passende Wissensbasis benötigt, in der neben den geometrischen Informationen über die linien-basierte Graphik auch domänenspezifische Informationen über den Inhalt der linien-basierten Graphik hinterlegt sind. In diesem Kapitel wird eine zum Teil automatisierte Vorverarbeitung für die Anwendungsdomänen Straßenkarten und Linien-Graphen gezeigt. Die ausgewählten Anwendungsdomänen decken exemplarisch verschiedene Arten von Geometrie, Datenquellen, manueller Nachbearbeitung und automatisierter Extraktion von qualitativen räumlichen Relationen ab. Tabelle 9.1 fasst diese Unterschiede zusammen.

	Straßenkarten	Linien-Graphen
Geometrie	Netzwerk von geraden Linien	Gekrümmte Linien
Daten-Quellen	Vektor-Graphiken Geodatenbanken	Pixel-Graphiken Tabellenkalkulation ²³
Extrahierte räumliche Relationen	Einmündungen, Kreuzungen, Abschnitte nahe Landmarken	Maxima, Wende- und Krümmungspunkte
Manuelle Annotation	Straße- und Landmarkennamen	Besondere Punkte und Abschnitte des Linien-Graphen

Tabelle 9.1: Geometrie, extrahierte Relationen und Annotation der Anwendungsdomänen Straßenkarten und Linien-Graphen.

Straßenkarten: Straßenkarten bilden ein komplexes Netzwerk von Linien, welche wiederum verschiedene komplexe Elemente wie Landmarken, Regionen und Straßenzüge bilden. Als Datenquelle kann entweder eine Vektorgraphik oder eine geographische Datenbank genutzt werden²⁴. Die Aufbereitung der geometrischen Daten umfasst unter anderem die Erkennung von verschiedenen Kreuzungstypen und die Segmentierung von Straßen nach Abschnitten in der Nähe von Landmarken. Im Falle von Vektorgraphiken als Datenquelle erfolgt eine manuelle Annotation mit Straßen- und Landmarkennamen.

Linien-Graphen: Linien-Graphen bestehen im Vergleich zu Straßenkarten aus weniger Elementen, oft nur aus einer einzelnen zu explorierenden Linie. Anders als bei Straßenkarten ist diese Linie jedoch in der Regel gekrümmt. Dies stellt sowohl für die Exploration der Liniengraphik als auch für die Erstellung des haptischen 3D-Modells eine Herausforderung

²³ Ein Beispiel für ein Tabellenkalkulationsprogramm ist Microsoft Excel.

²⁴ Eine frei verfügbare geographische Datenbank ist das Projekt: *OpenStreetMap* (<http://www.openstreetmap.de/>).

dar. Darüber hinaus bestehen die Linien eines Linien-Graphen aus einer Reihe von innerhalb der Anwendungsdomäne relevanten Abschnitten und Punkten, welche mit Methoden aus dem Bereich der Analysis automatisch erkannt und im Rahmen einer multimodalen Interaktion als Grundlage für Assistenz benutzt werden können.

Die beiden gewählten Anwendungsdomänen bieten auf Grund ihrer verschiedenen Eigenschaften ein geeignetes Testfeld für Entwicklung und Erprobung der Methoden zur Vorverarbeitung für die Generierung von 3D-Modellen und Wissensbasen aus verschiedenen Datenquellen. Die vorgestellten Methoden zur Erstellung von 3D-Modellen und Wissensbasen wurden als Grundlage empirischer Arbeiten im Rahmen der Forschung zu diesem Thema genutzt (Lohmann, Kerzel & Habel, 2012; Alaçam, Habel & Acartürk, 2013).

9.1 Übersicht der Verarbeitungsschritte

Für die ausgewählten Anwendungsdomänen wird eine Verarbeitungskette aufgezeigt, welche als Vorlage für andere Anwendungsdomänen genutzt werden kann. Die für die beiden Anwendungsdomänen der Straßenkarten und Linien-Graphen notwendigen Verarbeitungsschritte und genutzten Softwarekomponenten sind auf Grund der spezifischen Aufgaben unterschiedlich, realisieren aber die gleichen Verarbeitungsschritte:

1. **Einlesen von Daten:** Im ersten Schritt müssen geeignete Daten aus einer Datenquelle eingelesen und relevante Informationen extrahiert werden. Dazu zählt die Geometrie der linien-basierten Graphik, ohne die ein Aufbau eines haptisch explorierbaren 3D-Modells nicht möglich ist. Aber auch weitere anwendungsdomänenspezifische Informationen, wie zum Beispiel Eigennamen von Elementen der linien-basierten Graphik, können in diesem Schritt extrahiert werden.
2. **Aufbereitung von Daten für den 3D-Modell-Aufbau:** Die eingelesenen Daten müssen gegebenenfalls für die Erstellung von haptisch explorierbaren 3D-Modellen aufbereitet werden, das heißt es muss sichergestellt werden, dass die Geometrie der linien-basierten Graphik geeignet für eine haptische Realisierung ist und keine Inkonsistenzen in der linien-basierten Graphik bestehen, die zu Fehlern während des Umsetzungsprozesses führen können.
3. **Generierung von haptisch explorierbaren 3D-Modellen:** Aus den aufbereiteten eingelesenen Daten wird ein explorierbares 3D-Modell und eine dazugehörige Wissensbasis erstellt. In diesem Schritt werden gegebenenfalls aus der ursprünglichen Datenquelle übernommene Informationen über die linien-basierte Graphik in die Wissensbasis eingepflegt.
4. **Manuelles Nachbearbeiten der eingelesenen Daten:** In diesem Schritt werden manuell Informationen in der Wissensbasis der linien-basierten Graphik ergänzt oder Annotationen in der linien-basierten Graphik vorgenommen.

5. Automatische Analyse & Extraktion von Relationen (Automatisches Nachbearbeiten): Je nach Anwendungsdomäne werden relevante räumliche Relationen oder Eigenschaften von Elementen der linien-basierten Graphik für die Ereigniserkennung und die multimodale Interaktion durch automatische Verfahren erkannt und der Wissensbasis hinzugefügt.

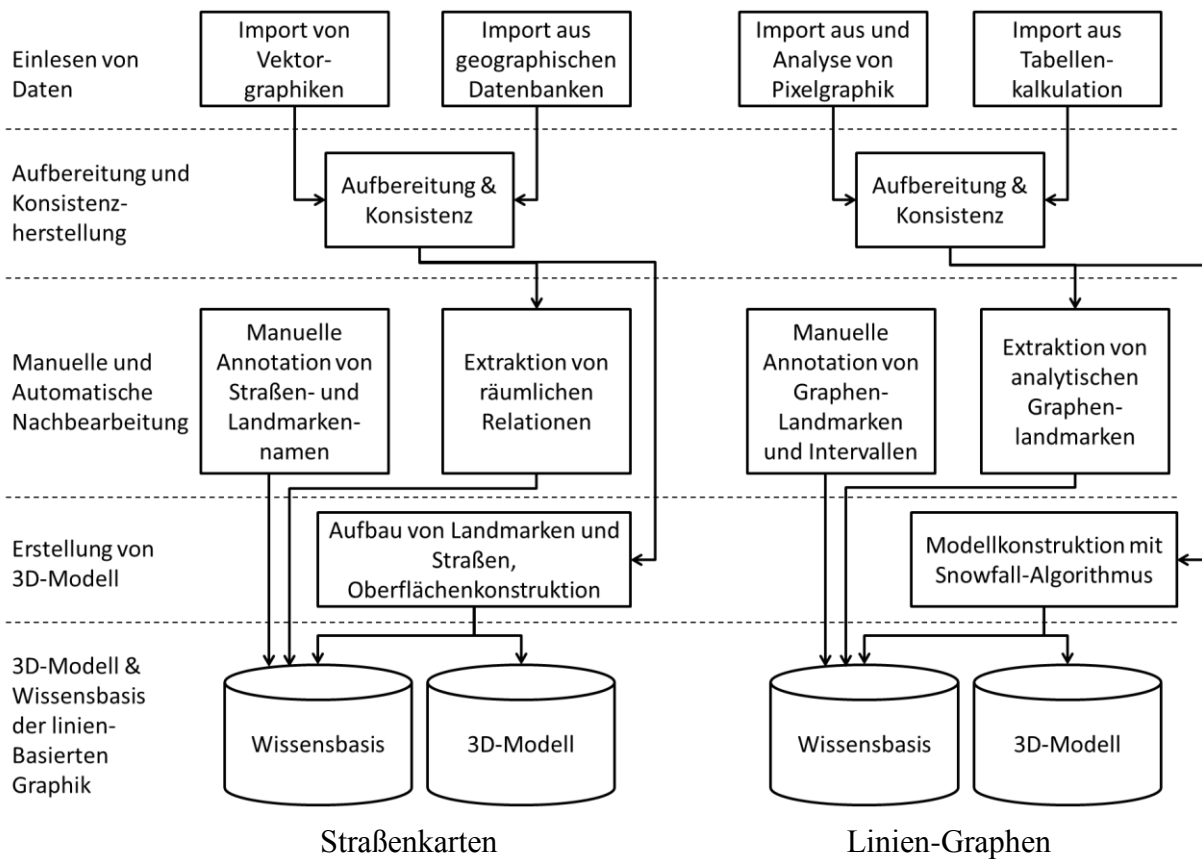


Abbildung 9.1: Verarbeitungsschritte für die Erstellung von audiohaptischen linien-basierten Graphiken aus den Anwendungsdomänen der Straßenkarten (links) und Linien-Graphen (rechts).

Abbildung 9.1 zeigt einen Überblick der Verarbeitungsschritte für die Anwendungsdomänen der Straßenkarten und der Linien-Graphen. Im Folgenden werden die domänenunabhängigen Eigenschaften und Anforderungen der Konsistenzherstellung und Erstellung von 3D-Modellen vorgestellt, bevor die komplette Vorverarbeitung für die Domänen der Straßenkarten der Linien-Graphen vorgestellt wird.

9.2 Importierung von Datenquellen und Konsistenzherstellung

Der erste Schritt für die Erstellung einer haptisch multimodalen linien-basierten Graphik besteht im Einlesen der umzusetzenden Graphik aus einer Datenquelle. Aus ihr wird die Geometrie der linien-basierten Graphik entnommen. Formal wird die Geometrie der linien-basierten Graphik als planarer, eingebetteter Graph (PEG) beschrieben (siehe Kapitel 2). Je

nach Datenquelle können weitere propositionale Informationen extrahiert werden, welche später in die Wissensbasis eingepflegt werden.

Zielsetzung bei der Auswahl möglicher Quellen und Importierungsverfahren ist es, auf der einen Seite eine effiziente Möglichkeit zu schaffen, haptische Repräsentationen für die Nutzung im Rahmen von Versuchen zu erstellen. Auf der anderen Seite sollen Lösungen für plausible Anwendungsszenarien die Nutzbarkeit des entwickelten Systems belegen. Mehrere Werkzeuge sind im Rahmen verschiedener Projekte im Bereich der haptisch multimodalen linien-basierten Graphen entstanden und werden weiter unten vorgestellt.

9.2.1.1 Manuelle Spezifikation domänenunabhängiger linien-basierter Graphiken

Neben den für spezielle Anwendungsdomänen entwickelten Werkzeugen zur Handhabung von Datenquellen ist es zudem möglich, linien-basierte Graphiken manuell anzulegen. Formal werden die linien-basierten Graphiken als *planare, eingebettete Graphen* spezifiziert, das heißt die Lage von Knoten in der Ebene und die Kanten des Graphen werden manuell angegeben. Diese domänenunabhängige Lösung zur Dateneingabe kann als Rückfall-Lösung für die schnelle Erstellung von haptischen Modellen zu linien-basierten Graphiken aus beliebigen Anwendungsdomänen, genutzt werden.

9.2.1.2 Konsistenz-Kriterien

Ausgehend von einer linien-basierten Graphik, formal repräsentiert als ein planarer eingebetteter Graph, wird ein 3D-Modell für die haptische Exploration erstellt. Damit bei diesem Prozess keine Fehler auftreten und die resultierende haptische Repräsentation eine effiziente Exploration erlaubt, muss die linien-basierte Graphik eine Reihe von Konsistenzeigenschaften erfüllen: Ein planarer eingebetteter Graph ist ein Netzwerk von verbundenen und unverbundenen Linien, welche überschneidungsfrei in der Ebene liegen.

Mindestabstand zwischen unverbundenen Linien: Nicht-verbundene Linien müssen einen bestimmten Mindestabstand zueinander einhalten, andernfalls kann es zu ungewollten Überlappungen der haptisch explorierbaren Vertiefungen kommen, welche in einem nicht nutzbaren 3D-Modell resultieren würden. Abbildung 9.2 zeigt mehrere Probleme, die bei fehlendem Mindestabstand auftreten können: a) Es ist unklar ob die beiden Linien verbunden sein sollen oder nicht. Es kann vorkommen, dass Punkte in einer Datenquelle kongruent sein sollen, aber auf Grund von Rundungsfehlern oder zeichnerischer Ungenauigkeit nicht aufeinander liegen. Im Rahmen der Konsistenzherstellung kann es daher sinnvoll sein, den Abstand von Punkten zu überprüfen und Punkte unterhalb eines Mindestabstandes zusammen zu legen. b) Das Ende einer Linie ragt in die Vertiefung einer anderen Linie hinein. Sollen die Linien nicht verbunden sein, führt dies zu Fehlern im 3D-Modell. c) Parallel zueinander liegende Linien verschmelzen bei zu geringem Abstand zu einer einzelnen Vertiefung. Dieses Kriterium schließt ebenfalls aus, dass Endpunkte von Linien auf Linien liegen, ohne dass hierfür ein entsprechender Konfigurationspunkt (und somit eine Teilung der Linie am Berührungspunkt) vorliegt. Der Mindestabstand muss über der doppelten Vertiefungsbreite liegen. So ist sichergestellt, dass auch im ungünstigsten Fall (2 parallele Linien) keine Teile

der entstehenden Vertiefungen verschmelzen. d) Neben einem Mindestabstand zwischen unverbundenen Linien muss es auch einen Mindestwinkel zwischen verbundenen Linien geben, da die benachbarten Linien ansonsten über lange Abschnitte zu einer einzigen Linie verschmelzen. Anders als bei dem Kriterium des Mindestabstandes ist es hier nicht möglich, einen festen Wert für den Mindestwinkel zwischen verbundenen Linien in Abhängigkeit der Liniendicke festzulegen, ab dem keine Verschmelzung der Linien stattfindet. Allgemein kann nur von der Nutzung zu geringer Winkel abgeraten werden, da diese nicht nur zu mehrdeutigen 3D-Modellen führen, sondern auch haptisch schwierig zu differenzieren sind.

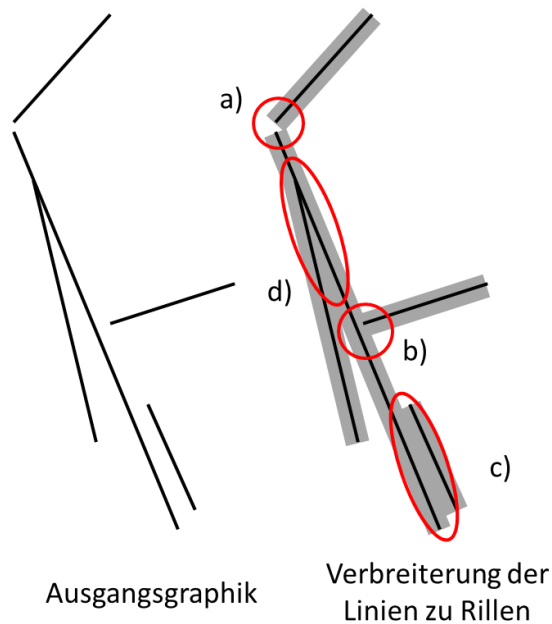


Abbildung 9.2: Probleme beim Erstellen von 3D-Modellen durch Unterschreitung des Mindestabstandes zwischen unverbundenen Linien.

Vermeidung unnötiger Punkte: Unnötige Unterteilungen von geraden Linien führen zu einer unnötigen Komplexität des 3D-Modells, ohne dass ein Mehrwert in der haptischen Exploration entsteht. Bei komplexen linien-basierten Graphiken mit dicht beieinander liegenden Punkten kann es daher sinnvoll sein, benachbarte Punkte zusammenzufassen. Dies wurde zum Beispiel beim Import von Daten aus geometrischen Datenbanken genutzt (siehe Kapitel 10).

Domänenspezifische-Konsistenz: Neben der reinen Geometrie der linien-basierten Graphik können auch weitere Informationen über Elemente der Graphik aus einer Datenquelle extrahiert und für die weitere Verarbeitung genutzt werden. Ausführungen hierzu finden sich in den entsprechenden Abschnitten weiter unten.

9.3 Erstellung von 3D-Modellen für linien-basierte Graphiken

3D-Modelle für haptische Darstellungen unterliegen gegenüber 3D-Modellen für visuelle Darstellungen besonderen Anforderungen in Bezug auf die 3D-Geometrie. Existierende Verfahren für die Generierung von 3D-Modellen sind nicht für die Nutzung als haptische Modelle ausgelegt. Im Rahmen dieser Dissertation sind verschiedene Softwarewerkzeuge entstanden, welche unterschiedliche Arten von haptischen linien-basierten Graphiken algorithmisch erzeugen können.

Ein gut explorierbares 3D-Modell, das fehlerfrei in der virtuellen haptischen Umgebung genutzt werden kann, ist die Grundlage einer haptischen Exploration. Die automatische Generierung von 3D-Modellen, schafft zusätzlich die Grundlage für die Ereigniserkennung während der Exploration haptischer linien-basierter Graphiken, indem während der Generierung des 3D-Modells gleichzeitig Wissen über die genaue Lage und Geometrie von Elementen einer linien-basierten Graphik in einer Wissensbasis hinterlegt wird: Ereigniserkennung analysiert Explorationsbewegungen mit wissensverarbeitenden Methoden im Kontext von räumlichem und domänenspezifischem Wissen. Konkret müssen dazu die Explorationsbewegungen in Relation zum explorierten 3D-Modell gesetzt werden. Hierzu ist Wissen über das 3D-Modell notwendig. Dies wird, wie in Kapitel 6 beschrieben, unter Nutzung mehrerer Repräsentationsschichten gespeichert. Das vorgestellte System zeigt, dass diese Repräsentationen systematisch generiert werden können.

9.3.1 Aufbau eines 3D-Modells

Ein 3D-Modell ist definiert als ein *exaktes mathematisches Modell der Oberfläche eines dreidimensionalen Objektes*. 3D-Modelle, als Oberflächenmodelle, abstrahieren physikalischen Eigenschaften wie Masse, Verformbarkeit, und Materialbeschaffenheit. Letztere schließt für visuelle 3D-Modelle Eigenschaften die Farbe, Reflektion und Brechung ein. Für virtuelle haptische Simulation sind vor allem mechanische Eigenschaften wie Reibung, Festigkeit und Dämpfung relevant.

Formal beschreibt ein 3D-Modell die Oberfläche eines Objektes durch Punkte (vertice), Kanten (edge) und Flächen (face) im Raum. Dabei sind die Punkte im dreidimensionalen Raum eingebettet. Die Kanten sind zwischen den Punkten definiert. Damit gleicht das 3D-Modell in seinem Aufbau aus Punkten und Kanten einem im Raum eingebetteten Graphen.

Auf Basis dieses Gerüsts werden Flächen (faces) durch Zyklen in diesem eingebetteten Graphen definiert. Häufig werden minimale Zyklen mit drei Kanten genutzt, das so entstehende 3D-Modell wird dann als ein *Trimesh* bezeichnet. Der Vorteil eines Trimeshes besteht darin, dass die durch drei Kanten, beziehungsweise durch drei Punkte, definierten Flächen stets planar sind.

Abbildung 9.3 zeigt den Aufbau einer Rechteckspyramide: (a) Zunächst sind 5 Punkte im Raum durch je ein Tripel von Koordinaten definiert. (b) Acht Kanten werden durch je zwei

ungleiche Punkte definiert. Die aufgespannten Kanten lassen die Struktur der Pyramide schon deutlich erkennen. (c) Fünf Flächen werden durch je drei Kanten definiert – jeder dieser Flächen ist planar. Zusammen bilden die fünf Flächen die geschlossene Oberfläche einer Pyramide.

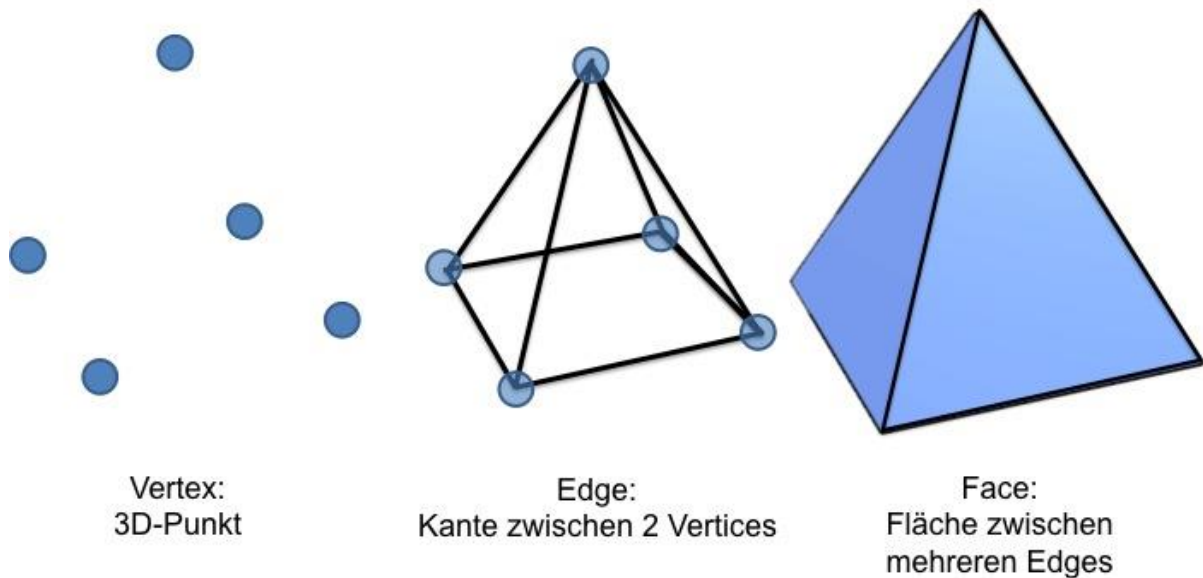


Abbildung 9.3: Aufbau eines 3D-Modells: Vertices, Kanten und Flächen.

Oberflächen (face) sind in üblichen Formaten für 3D-Modelle orientiert, das bedeutet es gibt eine Oberflächen-Normale die festlegt in welche Richtung eine Oberfläche zeigt – also wo das „Außen“ der definierten Oberfläche ist. Abbildung 9.4 zeigt eine aus Dreiecken zusammengesetzte Sphäre, bei der einige Dreiecke herausgelöscht wurden. Die visuelle Darstellung der Sphäre erlaubt so einen Blick in das Innere der Sphäre. Hierbei kann man sehen, dass alle Flächen nach außen orientiert sind, denn von Innen ist es möglich, einfach durch die Sphäre hindurch zu blicken. Diese Eigenschaft von Oberflächen von 3D-Modellen kann in der Haptik genutzt werden, um einseitig durchlässige Oberflächen zu definieren. Einseitig durchlässige Oberflächen erlauben es in der virtuellen Haptik zum Beispiel, in eine Rille einer haptischen Liniengraphik einzudringen, aber nicht mehr, etwa durch eine unvorsichtige Bewegung heraus zu rutschen.

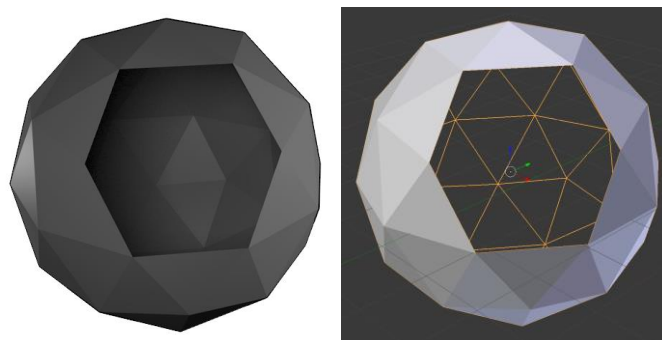


Abbildung 9.4: Oberflächenorientierung in einem 3D-Modell: Links ein 3D-Modell mit beidseitig opaken Oberflächen. Durch das Loch in der Oberfläche des Polyeders kann die Innenseite des Polyeders betrachtet werden. Rechts: Ein 3D-Modell dessen Oberflächen nur nach außen zeigen. Durch das Loch in der Oberfläche des Polyeders wird direkt hindurchgeblickt.

Für die Darstellung von 3D-Modellen werden diese in einer sogenannten Szene arrangiert. Dazu werden ein oder mehrere 3D-Modelle in einem Koordinatensystem platziert. Für die visuelle Darstellung müssen zusätzlich eine Kamera (der Punkt der Betrachtung) und mindestens eine Lichtquelle hinzugefügt werden. Im Falle der haptischen Darstellung werden weder Kamera noch Lichtquelle benötigt, dafür ist es wichtig, das haptische Modell in Relation zum haptisch explorierbaren Raum (in Bezug auf Lage, Ausrichtung und Größe) korrekt zu platzieren. Die Visualisierung der haptischen Exploration erfolgt in OpenGL (Kessenich, Baldwin & Rost, 2014).

9.3.2 Eigenschaften für haptisch explorierbare 3D-Modelle

3D-Modelle werden sowohl für Bildgenerierung im Rahmen von Filmen, Bildern und virtuellen Welten sowie für die Simulation (mechanischer) physikalischer Systeme genutzt. Diese verschiedenen Anwendungsfelder stellen unterschiedliche Anforderungen an die 3D-Modelle. Generell gilt, dass mit steigender Komplexität des Modells qualitativ hochwertigere Bilder oder physikalische Simulationen möglich sind. Unter der Komplexität wird die Anzahl der Vertices, Kanten oder Flächen verstanden. Gegen eine hohe Komplexität der 3D-Modelle spricht jedoch, dass ein komplexeres Modell mehr Rechenleistung bei der Erzeugung von Bildern und insbesondere bei physikalischen Simulationen benötigt. Ist es gewünscht, zur Laufzeit eine 3D-Szene und ihre Veränderungen zu beobachten, so sind 3D-Modelle mit begrenzter Komplexität notwendig, dies gilt umso mehr, wenn nicht nur eine visuelle Darstellung der Szene erfolgt, sondern auch eine physikalische Simulation stattfindet, so wie im Fall der virtuellen Haptik.

Während ein komplexeres Modell mehr Feinheiten erlaubt, wirkt sich diese Komplexität negativ auf den Zeit und Platzbedarf von Algorithmen aus, welche dieses Modell verarbeiten. Übersteigt der Zeitbedarf für die Berechnung von Force-Feedback in der virtuellen Haptik eine gewisse Grenze, so erzeugt dies nicht nur Wartezeit für den Benutzer, sondern die haptische Simulation ist nicht mehr möglich. Daher ist es trotz effizienter Algorithmen für haptische Force-Feedback-Berechnungen wichtig, stets eine möglichst geringe Komplexität der Modelle zu gewährleisten.

Neben einer niedrigen Komplexität ist es für ein haptisch zu explorierendes 3D-Modell unbedingt erforderlich, dass die Geometrie des 3D-Modells „sauber“²⁵ ist, das heißt, dass die Flächen des Modells auch tatsächlich eine lückenlose, überlappungsfreie Oberfläche bilden. Stehen einzelne Flächen im Raum oder gibt es auch nur kleinste Lücken in der Oberfläche kann es zu Problemen bei der virtuellen haptischen Exploration kommen, da sich der

²⁵ Der Begriff „sauber“ (engl. clean) wird im Bereich der 3D-Modellierung verwendet, um ein fehlerfrei modelliertes 3D-Modell zu beschreiben.

haptische Interfacepunkt sowohl auf augenscheinlich glatter Fläche festhaken als auch durch die Oberfläche hindurchfallen kann.

9.3.3 Eigenschaften haptisch explorierbarer 3D-Modelle für linien-basierte Graphiken

Während der haptischen Exploration werden Linien verfolgt, welche als Vertiefungen in der Ebene dargestellt sind. Dabei soll der haptische Interfacepunkt entlang der Linie und auch an Ecken und Verzweigungen im Liniennetzwerk mühelos und ohne Fehler in der haptischen Darstellung bewegt werden können. Damit dies möglich ist, müssen die 3D-Modelle und insbesondere die Vertiefungen für die Linien mehrere Kriterien erfüllen:

Feste Breite von Vertiefungen: Um eine problemlose haptische Exploration der Linien zu ermöglichen, ist eine feste Breite der Linien notwendig, welche zum Durchmesser des virtuellen haptischen Interfacepunktes passt. Der haptische Interfacepunkt wird in der virtuellen Umgebung als Kugel simuliert, die Breite der Rillen muss geringfügig größer sein als der Durchmesser der Kugel, um eine mühelose Bewegung zu gewährleisten. Allerdings darf es nicht zu viel Freiraum zu den Seiten geben, da ansonsten eine gute Führung innerhalb der Linie nicht mehr gewährleistet ist. Eine konstante Breite der Linien ist notwendig, um zu verhindern, dass der haptische Interfacepunkt an einer zu schmalen Stelle steckenbleibt oder der Benutzer an einer zu weiten Stelle den Eindruck verliert, auf einer Linie geführt zu werden.

Durchgängigkeit an Ecken und Kanten: Der Anschluss von geraden Linien an Ecken und Kanten muss so gestaltet sein, dass ein müheloser Übergang möglich ist. Dies wird durch leichte Abrundungen an den Ecken und Kanten gewährleistet.

Feste Tiefe: Die Tiefe der Linien trägt keine inhaltliche Information und soll so gewählt sein, dass eine gute Führung ohne versehentliches Herausrutschen gewährleistet ist. Sollte es gewünscht sein, dass ein Liniennetzwerk während der Exploration verlassen wird, etwa um nicht verbundene Teile des Netzwerkes zu erkunden, dürfen die Linien ebenfalls nicht zu tief sein, um das einfache Verlassen der Linien zu ermöglichen. Straßenkarten sind ein Beispiel für linien-basierte Graphiken, bei denen das Verlassen des Liniennetzwerkes genutzt wird um die genaue Position von Landmarken zu erkunden. Linien-Graphen sind auf der anderen Seite ein Beispiel für eine linien-basierte Graphik in der ein Springen aus dem Graphen unerwünscht ist. In diesem Fall kann die Linie mit einer einseitig durchlässigen Ebene nach oben hin verschlossen werden, die es zwar möglich macht, die Linie mit dem haptischen Interfacepunkt zu betreten, aber sie kann nicht mehr verlassen werden. In beiden Fällen soll die Tiefe der Linien konstant bleiben, da sie keine inhaltliche Information trägt und der Benutzer während der Exploration nicht durch Veränderungen in der Tiefe abgelenkt werden soll.

Reibung & haptische Effekte: Haptische Effekte, können genutzt werden um physikalische Eigenschaften von haptischem Interfacepunkt und exploriertem Modell zu simulieren. Eine dieser Eigenschaften ist Reibung, also der Widerstand, welcher sich ergibt, wenn der HIP über das Modell bewegt wird. In den Vorversuchen zur haptischen Exploration hat sich gezeigt,

dass die Simulation einer Gleitreibung zwischen Interface-Punkt und 3D-Modell die Exploration der 3D-Modelle erleichtert. (Vermutlich führt diese Reibung und der damit verbundene Kraft- und Energieaufwand dazu, dass zurückgelegte Entfernungen besser eingeschätzt werden können. Bei einer nahezu vollkommen reibungsfreien Interaktion können schon kleine Bewegungen der Hand dazu führen, dass der HIP in der virtuellen Umgebung große Strecken zurücklegt. Dies wird durch eine Gleitreibung verhindert.) Andererseits darf die Reibung im System nicht so groß werden, dass es für den Benutzer anstrengend wird, das System zu benutzen.

Regelmäßige Netzstruktur: Eine möglichst regelmäßige Struktur des 3D-Modells minimiert Rundungsfehler in der haptischen Kollisions- und Kraftberechnung. An einigen Stellen eines 3D-Modells ist die Struktur des Netzes durch die dargestellte linien-basierte Graphik vorgegeben. Doch in großen Teilen des Netzes gibt es verschiedene Möglichkeiten der Triangulation (des Füllens einer Fläche mit Dreiecken) von denen eine möglichst regelmäßige erreicht werden sollte um (Rundungs-)Fehler bei der Berechnung der haptischen Simulation zu vermeiden.

Vertices-Anzahl: Das 3D-Modell sollte trotz der angestrebten regelmäßigen Netzstruktur eine möglichst geringe Anzahl von Knoten und Kanten und sich daraus ergebenden Faces besitzen. Auch bei der Nutzung effizienter hierarchischer Algorithmen zur Kollisionskontrolle sinkt die Performanz der haptischen Simulation bei zu großem Detailgrad, 'Festhaken' und ungewollte Vibrationen können die Folge sein.

9.3.4 Generierungsmethoden für 3D-Modelle von linien-basierten Graphen

Bei der Generierung von 3D-Modellen kann zwischen der manuellen Modellierung der Modelle mit Hilfe geeigneter Softwarewerkzeuge und prozeduraler Generierung der Modelle aus einer geeigneten Datenquelle unterschieden werden. Für die manuelle Modellierung mit 3D-Programmen (z.B. Blender oder 3DS-Max) steht eine große Bandbreite von Modellierungswerkzeugen zur Verfügung, welche eine Bearbeitung von 3D-Modellen mit visuellem Feedback in Echtzeit erlauben. Ebenso ist es möglich, 3D-Modelle auf Grundlage einer Datenbasis prozedural zu generieren. An dieser Stelle wird ein Überblick über einen Ausschnitt der Methoden der 3D-Modellierung für Liniennetzwerke als Vertiefungen (Rinnen) in einer Ebene gegeben und eine Wahl der verwendeten Methode begründet.

9.3.4.1 Boolesche Operation (Differenz-Geometrie)

Bei der Erzeugung eines Explorationskörpers durch eine boolesche Differenzoperation wird zunächst ein Positiv-Körper erstellt und dieser dann von einer Ebene oder Grundplatte abgezogen. Dieses Verfahren wird als boolesche Operation bezeichnet, da das 3D-Modell als Volumen betrachtet und vom Volumen der Grundplatte abgezogen wird.

Differenzoperationen sind algorithmisch komplex, da das resultierende Modell eine vollständig neue 3D-Geometrie besitzt, welche aus der vorhandenen Geometrie berechnet werden muss. Insbesondere die Oberfläche der Grundplatte muss komplett neu erstellt

werden, was auch ihre Zerlegung in Dreiecke umfasst. Hierbei kann es zu Fehlern in der Oberflächenberechnung kommen, welche die haptische Exploration erschweren oder unmöglich machen kann. Je nach verwendetem Algorithmus und Komplexität des Modells schwankt die Auftretenswahrscheinlichkeit eines solchen Fehlers, sie sind aber bei konventionellen Algorithmen für Differenzoperationen nicht auszuschließen (Bernstein & Fussell 2009).

Bei diesem Verfahren kann der „Positiv-Körper“ sowohl manuell als auch algorithmisch erzeugt werden. Mit Hinblick auf die Problematik dieses Verfahrens macht dies keinen Unterschied aus. Auch gekrümmte Linien lassen sich auf diese Weise modellieren, wobei aber zu beachten ist, dass bei einer gekrümmten Linie deutlich mehr Vertices für die Modellierung der Linie benötigt werden und somit beim Abziehen der gekrümmten Linie auch deutlich mehr Punkte in der Oberfläche vorhanden sind, welche zu mehr Fehlern bei der Berechnung der neuen 3D-Geometrie führen können. Abbildung 9.5 zeigt die Erstellung eines haptischen 3D-Modells einer linien-basierten Graphik mit Hilfe einer booleschen Differenzoperation.

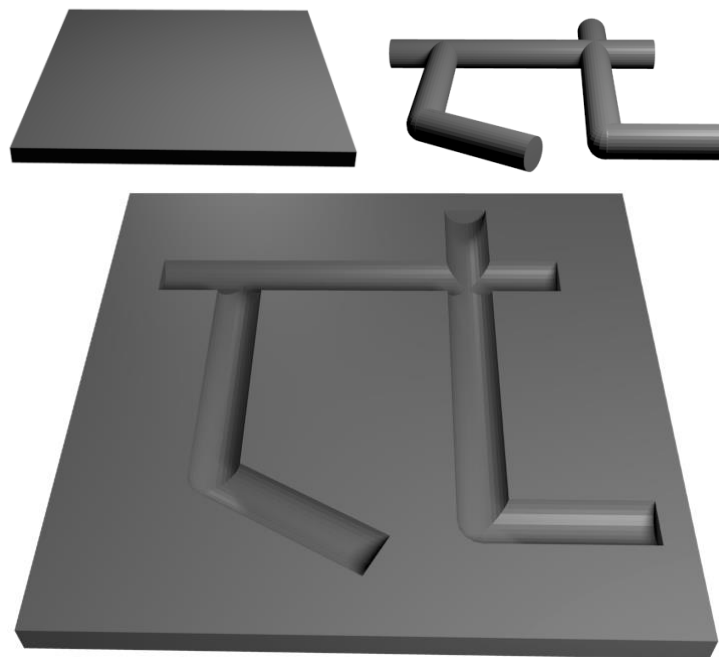


Abbildung 9.5: Erzeugung eines 3D-Modells durch boolesche Operation. Ein Subtraktionskörper (r.o.) wird von einer „Platte“ (l.o.) abgezogen. Das Ergebnis ist eine Ebene mit Vertiefungen (unten).

9.3.4.2 Höhen-Mapping (Heightmaps)

Bei diesem Verfahren wird eine Pixel-Graphik genutzt, um ein regelmäßiges, ebenes Gitter von Vertices zu verformen. Im Bereich der Haptik kann dieses Verfahren genutzt werden, um visuelle Graphiken einfach in ein haptisch explorierbares Modell zu übertragen oder sogar interaktiv haptisch zu malen, vergleiche Rasmus-Gröhn, Szymczak, Fahlströ und Björk (2012). Abbildung 9.6 zeigt die Umsetzung einer Skizze in ein haptisches Modell.

Analog zu Pixelgraphiken kann es bei zu geringer Auflösung (Dichte des Gitters von Vertices) zu Aliasing-Problemen kommen, das heißt, Kanten welche nicht exakt entlang der vorgegebenen Gitterstruktur verlaufen, werden als Treppen dargestellt. Anders als bei einer Pixelgraphik ist eine hohe Auflösung für eine haptische Exploration wegen der Berechnung von Kollision und Force-Feedback aber nicht zu realisieren. Dieses Verfahren kann sowohl teils manuell durchgeführt werden als auch vollständig automatisch, dies hat keinen Einfluss auf die Probleme durch das Aliasing. Gerade Linien können genauso wie gekrümmte Linien dargestellt werden. Probleme durch Aliasing sind nur dann bei einem geraden Liniennetzwerk geringer, wenn zufällig alle Linien entlang der zu verformenden Gitternetzlinien verlaufen. Abbildung 9.7 zeigt Aliasing-Probleme bei verschiedenen Auflösungen eines zu verformenden Gitternetzes.

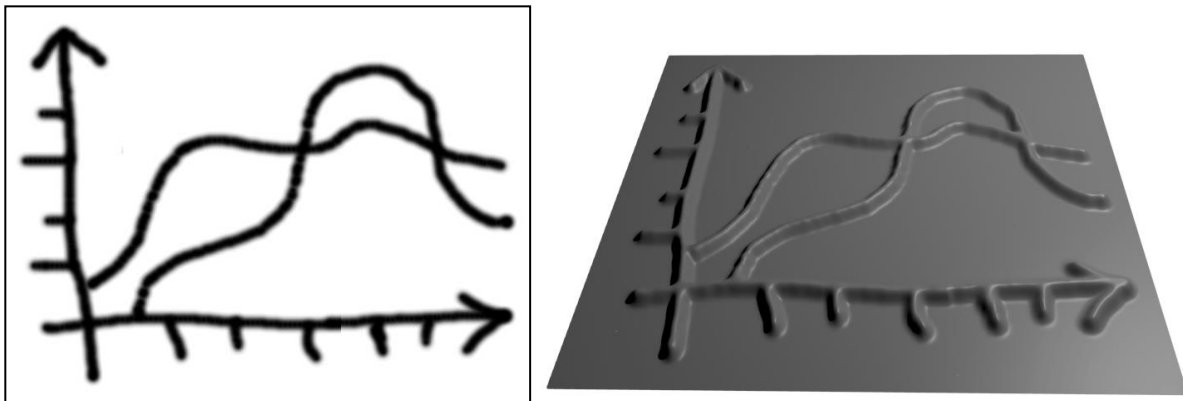


Abbildung 9.6: Heightmap-Verfahren zur Erzeugung von 3D-Modellen. Ausgangsbild (links) und resultierendes 3D-Modell (rechts).

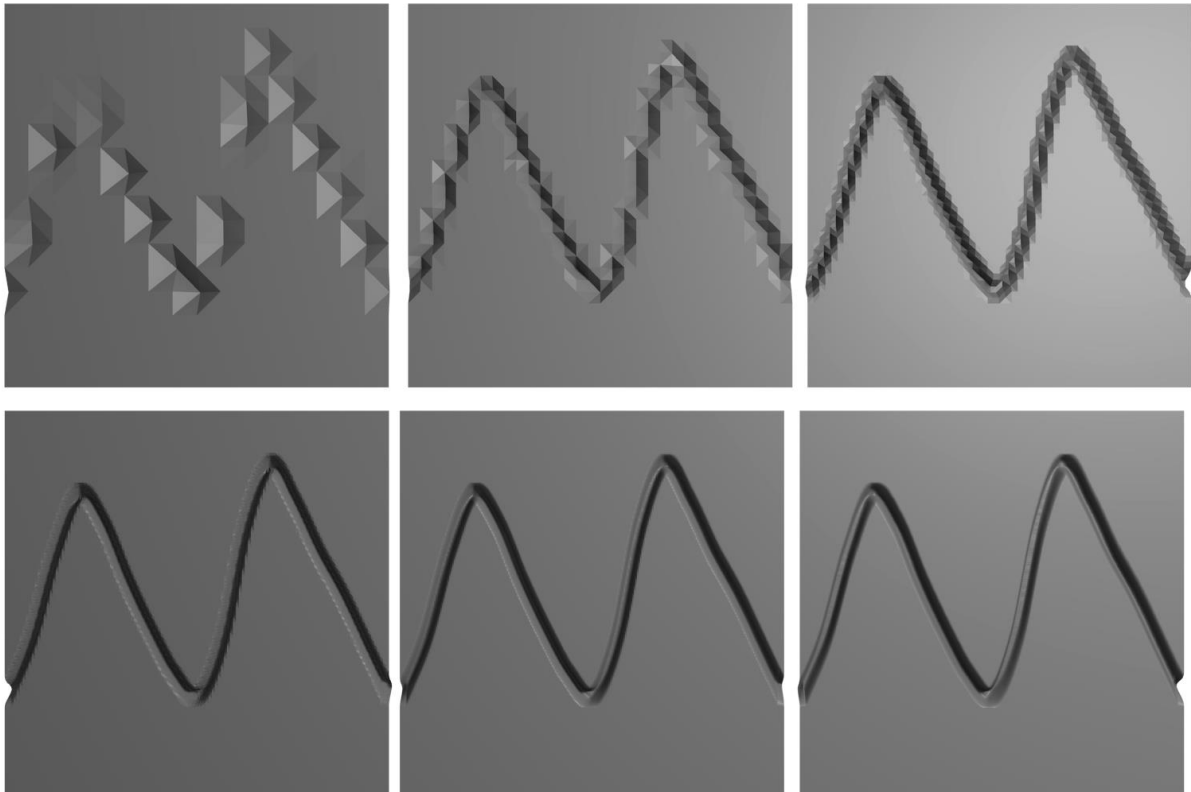


Abbildung 9.7: Höhen-Mapping mit verschiedenen Auflösungen. Die Anzahl der Faces beträgt: 256 (l.o.), 1.024 (m.o.), 4.096 (r.o.), 16.384 (l.u.), 64.536 (m.u.), 262.144 (r.u.). Erst ab einer Anzahl von 64.536 Faces sind keine Aliasing-Fehler mehr zu bemerken. Ein algorithmisch erstelltes Modell eines vergleichbaren Graphen verfügt hingegen nur über ca. 500 Faces.

9.3.4.3 Algorithmischer Aufbau des 3D-Modells

Eine dritte Möglichkeit besteht darin, die Geometrie eines 3D-Modells von Grund auf aus seinen Bestandteilen, Punkten, Kanten und Flächen, aufzubauen. Bei dieser dreidimensionalen Konstruktionsausgabe wird ausgehend von den Linien einer linien-basierten Graphik ein dreidimensionales Modell aufgebaut.

Der Vorteil dieses Verfahren besteht darin, dass nicht nur die Oberfläche des 3D-Modells vollständig, sondern auch die darunterliegende Geometrie des 3D-Modells vollständig kontrolliert werden kann. Dieser Vorteil hebt das Verfahren deutlich von den beiden anderen bereits vorgestellten Verfahren ab.

Generell kann dieses Verfahren zur Erzeugung von 3D-Modellen von sowohl geraden als auch gekrümmten linien-basierten Graphiken genutzt werden. Je nach Art der linien-basierten Graphik sind für diese beiden Fälle jedoch unterschiedliche geometrische Konstruktionsverfahren erforderlich.

Die algorithmische Erstellung von 3D-Modellen von linien-basierten Graphiken bestehen aus zwei getrennten Arbeitsschritten. Zuerst wird das eigentliche Liniennetzwerkes erstellt, im zweiten Schritt erfolgt die Erstellung der Oberfläche des Explorationskörpers.

9.3.4.4 Fazit

Verschiedene Methoden zeigen Unterschiede in Bezug auf den Ablauf des Erstellungsprozesses, die Möglichkeit der Erzeugung von geraden und gekrümmten linien-basierten Graphiken, der Komplexität & Fehler des 3D-Modells und letztendlich dem Aufwand der Realisierung des Verfahrens (worunter sowohl der einmalige Aufwand für die Entwicklung des Verfahrens als auch der Aufwand für die Erstellung eines Modells fallen). Tabelle 9.2 zeigt eine Übersicht über diese Eigenschaften. Die vollständig manuelle Generierung der Modelle wurde nicht in die Tabelle aufgenommen, da der Großteil der Eigenschaften der erstellten 3D-Modelle auf den individuellen Fähigkeiten des Modellierers basieren, diese Fähigkeiten nur bei eingearbeiteten Experten zu finden sind und der Vorgang zudem um Größenordnungen zeitaufwändiger ist.

	Boolesche Operationen	Höhen-Mapping	Algorithmischer Aufbau
Erzeugung von Oberfläche und Linien	Erfolgt in einem Schritt	Erfolgt in einem Schritt	Erfolgt in zwei getrennten Schritten
Gerade und gekrümmte linien-basierte Graphiken	Schwierigkeit der Erstellung gekrümmter Kurven wird auf die Erstellung des zu subtrahierenden Körpers verlagert	Form der Linien nicht durch Verfahren eingeschränkt	Benötigt spezielle Algorithmen für verschiedene Formen von linien-basierten Graphiken
Komplexität des 3D-Modells	Hängt in erster Linie von der Komplexität des zu subtrahierenden Körpers ab (Verlagerung des Problems)	Komplexität ist enorm hoch, reziprok proportional zur Qualität des Modells (siehe unten)	Kann im Rahmen des algorithmischen Aufbaus gering gehalten werden
Fehler des 3D-Modells	Fehler können bei booleschen Operationen auftreten	Aliasing-Probleme bei zu geringer Auflösung des zu verformenden Gitters	keine Fehler
Aufwand der Umsetzung	Der Aufwand ergibt sich im Wesentlichen durch die Erstellung des zu subtrahierenden Körpers (Verlagerung des Problems)	Sehr geringer Aufwand, entsprechende Algorithmen existieren bereits	Einzelne Algorithmen müssen entwickelt und realisiert werden

Tabelle 9.2: Überblick über verschiedene Verfahren zur Erstellung von 3D-Modellen für die haptische Exploration von linien-basierten Graphiken.

Linien-basierte Graphen werden in der vorgestellten Software-Architektur durch mehrere vollständig automatisierte und implementierte geometrische Konstruktionsverfahren erzeugt. Der Nachteil dieser Methode liegt vor allem darin, dass die Verfahren zum Teil komplex zu implementieren sind, wobei nicht auf bestehende Algorithmen zurückgegriffen werden kann.

Dafür ergibt sich eine gute Kontrolle über die entstehende Geometrie des 3D-Netzes welche genauso viele Details wie notwendig enthält. Die entwickelten Verfahren erlauben gegenüber manueller Methoden zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse, welche bei einer manuellen Erstellung und den damit verbundenen Abweichungen nicht zu gewährleisten ist. Zudem lassen sich Eigenschaften in Bezug auf die 3D-Umsetzung einer Linie, wie zum Beispiel Tiefe, Breite und auch Form der Vertiefung, einfach parametrisieren. Entsprechende Modelle können schnell und einfach erzeugt werden. Dies ermöglicht sowohl ein systematisches Testen und Optimieren der Parameter während der Entwicklungsphase als auch die Nutzung vorhandener Datenquellen und Datensätze im späteren Einsatz mit bereits optimierten Parametern.

Algorithmische Verfahren für die Erstellung von 3D-Modellen gerader beziehungsweise gekrümmter linien-basierter Graphiken werden in den Kapiteln 10 und 11 vorgestellt.

10 Erstellung von haptischen Karten

Es werden zwei Ansätze zum Einlesen von Daten für Karten vorgestellt. Die Extraktion von Relationen in der Domäne der Karten ist bereits in Kapitel 6 beschrieben worden.

10.1 Datenquellen und Konsistenz für Straßenkarten

Für das Einlesen von Karten wurden zwei Optionen ausgearbeitet. Ein Werkzeug zum Einlesen von Karten als Vektorgraphiken wurde entwickelt. Außerdem wurde ein Programm zum Import von geographischen Daten aus der frei verfügbaren Datenbank *OpenStreetMap* implementiert.

10.1.1 Nutzung von Vektorgraphiken (SVG)

Im Rahmen der Betreuung einer studentischen Arbeit ist ein Werkzeug zum Einlesen von Straßenkarten als Vektor-Graphik entstanden. Straßenkarten werden als Scalable-Vector-Graphik-Datei spezifiziert. Scalable-Vector Graphics (SVG) folgen einer Spezifikation des World Wide Web Consortiums²⁶ und werden von vielen Programmen zur Bearbeitung von Vektor-Graphiken unterstützt. Datenquellen für Straßenkarten können somit mit nahezu beliebigen Programmen erstellt, und anschließend automatisch eingelesen und weiterverarbeitet werden. Abbildung 10.8 zeigt die Erstellung eines SVG-Bildes in der frei verfügbaren Software SVG-Edit²⁷.

²⁶ Spezifikation von Scalable Vector Graphics: <http://www.w3.org/TR/2003/REC-SVG11-20030114/>

²⁷ SVG Edit ist ein frei verfügbarer, browserbasierter SVG-Editor, <https://code.google.com/p/svg-edit/>

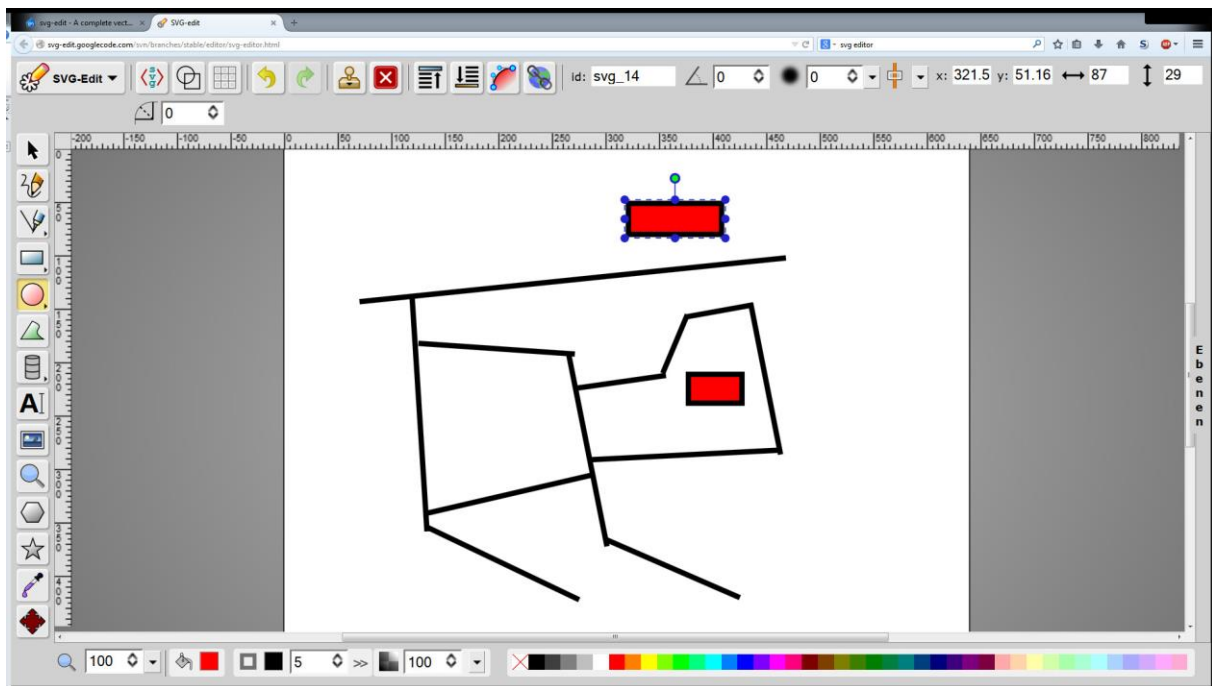


Abbildung 10.8: Graphischer Editor für SVG-Graphiken.

SVG-Graphiken werden in einer XML-Datei gespeichert und können von der entwickelten Software eingelesen und als Straßenkarte interpretiert werden. Die Spezifikation von Straßen erfolgt dabei durch Linien oder Linienzüge, Landmarken werden durch Polygone dargestellt. Auch Linienzüge können geschlossene Figuren bilden, jedoch ermöglicht die Unterscheidung zwischen Linien(-zügen) und Polygonen im SVG-Format eine eindeutige Zuordnung.

10.1.2 Geographischen Datenbanken als Quelle für haptische Straßenkarten

Geographische Datenbanken können in Browsern oder mit speziellen Navigationsgeräten visualisiert werden und erlauben Zugang zu umfangreichem Kartenmaterial. Beispiele für browserbasierte, geographische Datenbanken sind unter anderem Google Maps²⁸ und *OpenStreetMap*²⁹. Die automatische Umsetzung der geometrischen Datenbanken in eine haptische Realisierung ist ein realistisches Anwendungsszenario um blinden oder sehbehinderten Menschen einen einfachen Zugang zu Kartenmaterial zu ermöglichen.

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Werkzeug zum Auslesen der frei verfügbaren geometrischen Datenbank *OpenStreetMap* (OSM) entstanden. Die geometrischen Daten von *OpenStreetMap* lassen sich kostenlos in einem XML-Dateiformat anfordern, so kann jederzeit aktuelles Kartenmaterial bezogen werden. Die Aufbereitung zu einer haptischen Karte erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst wird der gewünschte Kartenausschnitt als ein Rechteck

²⁸ maps.google.de/

²⁹ www.openstreetmap.de/

spezifiziert, durch Angabe von Längen und Breitengraden festgelegt. Die browserbasierte Darstellung von OSM bietet hierzu ein graphisches Werkzeug an (siehe Abbildung 10.9).

Im nächsten Verarbeitungsschritt werden die relevanten Daten automatisch vom OSM-Server geladen und in eine interne Datenbank überführt. Auf das Auslesen der Daten folgt eine Filterung: Aus dem großen Umfang möglicher geographischer Informationen, die in OSM verfügbar sind, wird ein für die haptische Karte relevantes Inventar ausgewählt. Abbildung 10.10 zeigt einen Import von Wegen verschiedenen Typs von Straßen bis zu Fußwegen.

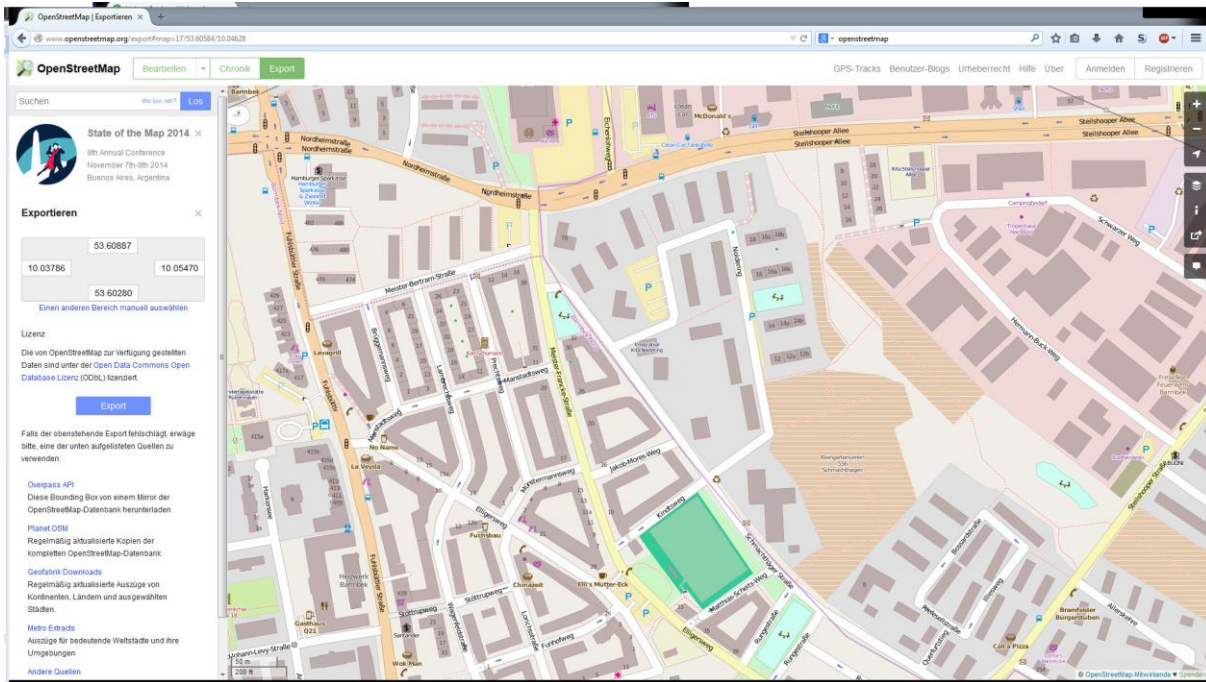


Abbildung 10.9: Auslesen eines Ausschnitts aus einer OSM-Karte, spezifiziert über Längen- und Breitengrad.

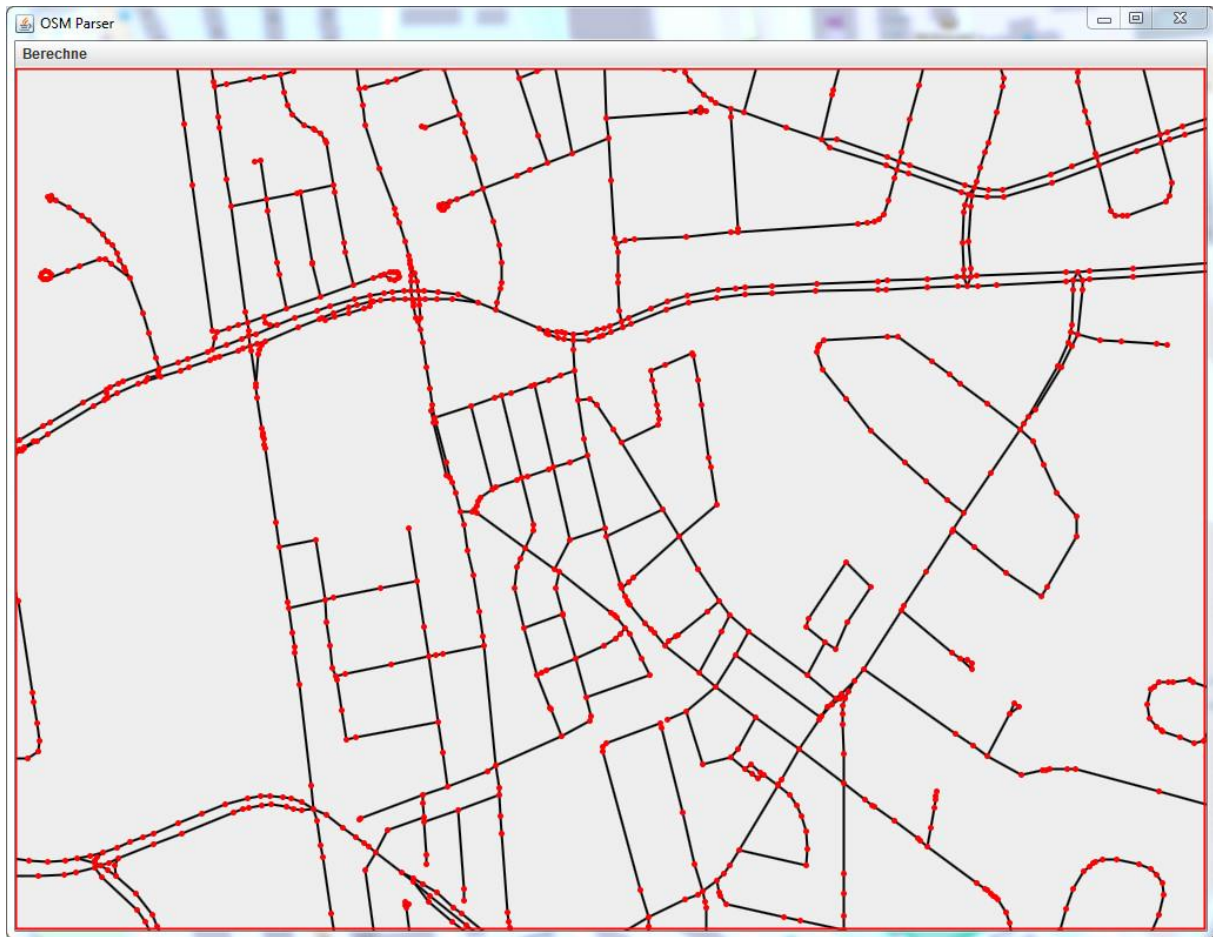


Abbildung 10.10: Importiertes Wegenetz aus der OSM-Datenbank.

Während der Aufbereitung werden zunächst alle Linien-Segmente, welche den Rand der Karte überschneiden, entfernt. Anschließend folgt eine Vereinfachung der linien-basierten Graphik durch iteratives Zusammenlegen von benachbarten Punkten. Abbildung 10.11 zeigt das Resultat dieser Vereinfachung.



Abbildung 10.11: Durch Zusammenlegen von Punkten vereinfachtes Wegenetz.

Im Rahmen des Imports von Daten aus bereits annotierten Quellen ist auch eine automatische Übernahme dieser Annotationen möglich. Zum Beispiel könnten Annotationen wie Straßennamen aus der Datenquellen OSM übernommen werden. Weitere domänenspezifische Informationen können manuell ergänzt werden.

10.1.3 Konsistenz

In der Anwendungsdomäne der Straßenkarten werden besondere Kriterien an die Konsistenz der linien-basierten Graphik gestellt: Linien können sowohl Straßen als auch die Umrisse von Landmarken beschreiben. Schneiden sich zwei Linien, die eine Straße darstellen, entsteht eine Kreuzung. Der Schnitt von einer Linie welche eine Straße darstellt und einer Linie welche die Begrenzung einer Landmarke darstellt besitzt jedoch keine sinnvolle Interpretation, eine solche linien-basierte Graphik wäre sowohl haptisch nicht zu realisieren³⁰ als auch widersprüchlich in der gegebenen Anwendungsdomäne, da der Schnitt zwischen Straße und Landmarken-Grenze keine sinnvolle Interpretation besitzt.

³⁰ Landmarken werden als flächige Vertiefungen realisiert während Straßen als Rillen umgesetzt werden. Eine Kombination aus diesen beiden Realisierungen ist nicht möglich.

10.2 Erstellung von 3D-Modell und Wissensbasis

Verfahren zur Erstellung von 3D-Modellen für die haptische Exploration von linien-basierten Graphiken müssen grundsätzlich zwei Aufgaben erfüllen: Erstens die Konstruktion des Linien-Netzwerkes als abgerundete Vertiefungen und zweitens die Konstruktion der Oberfläche der Explorationsebene. Diese beiden Schritte können algorithmisch gemeinsam stattfinden, sie können aber auch sequentiell ablaufen. Im Fall der Konstruktion der 3D-Modelle für linien-basierte Graphiken mit geraden Linien bietet es sich an, diese Schritte getrennt durchzuführen, da die Konstruktion des Liniennetzwerkes algorithmisch ein grundlegend anderes Problem darstellt als die Konstruktion der Oberfläche.

Bei der Erstellung eines 3D-Modells für gerade, linien-basierte Graphiken werden Punkte zunächst in der Ebene berechnet. Auf Grundlage dieser Punkte wird ein Gerüst von Kanten berechnet, welches anschließend in der Höhe verformt wird um rundliche Vertiefungen zu erzeugen. Im letzten Arbeitsschritt wird das Gerüst zu einer vollständigen Oberfläche ergänzt.

Im Folgenden wird das Verfahren an einem Beispiel erläutert. Abbildung 10.12 zeigt die Ausgangsgraphik für eine haptische linien-basierte Graphik.

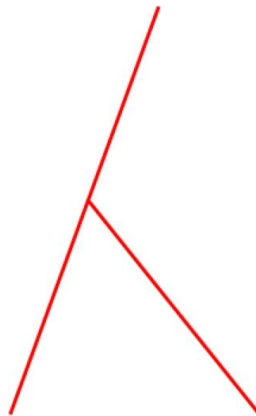


Abbildung 10.12: Ausgangs-Graphik für haptische linien-basierte Graphiken.

Schritt 1 - Normalen an Enden der Linien: An den Enden von Linien welche nicht mit einer anderen Linie verbunden sind werden Normalen konstruiert. An ihnen verlaufen später die Enden der Vertiefungen (in der Domäne der Straßenkarten zum Beispiel eine Sackgasse). Auf diese Weise erhalten alle Linien einen geraden Abschluss, der genau dort endet, wo auch die ursprüngliche Linie der linien-basierten Graphik endete. (Auf die hierdurch entstehenden (in der Regel sehr geringen) systematischen Verzerrungen wird im Rahmen der Evaluation eingegangen. Abbildung 10.13 zeigt diesen Konstruktionsschritt.

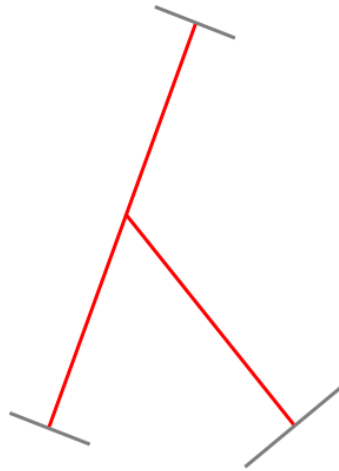


Abbildung 10.13: Konstruktion von Normalen an den Enden der Linien.

Schritt 2 - Parallelen zu den Linien: Im zweiten Schritt erfolgt die Konstruktion von Parallelen zu den bestehenden Linien in einem festen Abstand zu den ursprünglichen Linien der linien-basierten Graphik. Die Anzahl der parallelen Linien entspricht der gewünschten Anzahl der Abrundungsschritte der Vertiefungen im 3-D Modell. Die Parallelen bilden paarweise (links und rechts der Linie) die zukünftigen „Höhenzüge“ der Vertiefung. Abbildung 10.14 zeigt die Konstruktion dieser Parallelen.

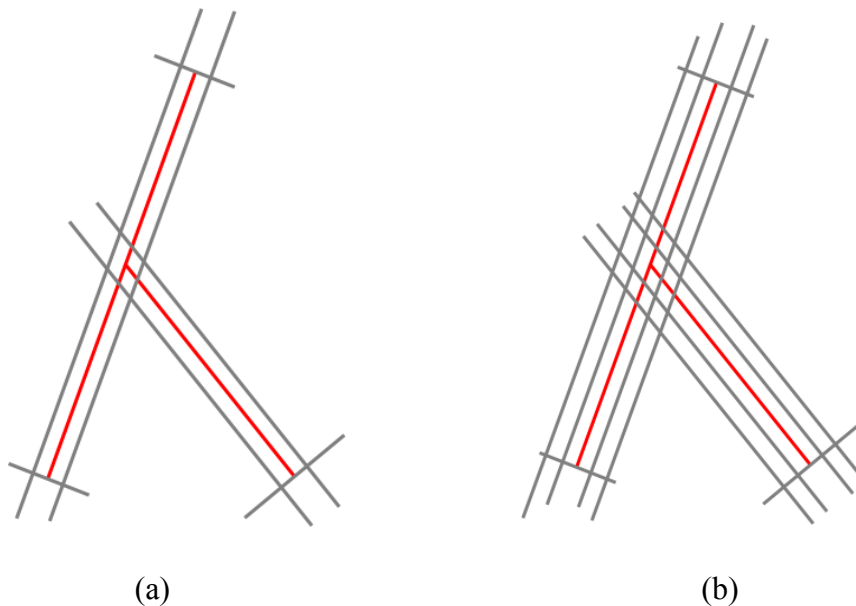


Abbildung 10.14: Konstruktion von Parallelen.

Schritt 3 – Schnittpunkte: An den Schnittpunkten von Parallelen gleicher Höhenlinien und an den Schnittpunkten von Parallelen und den Normalen an den Enden der Linien werden Punkte erstellt. Dabei gilt die ursprüngliche Linie selbst als unterste Höhenlinie.

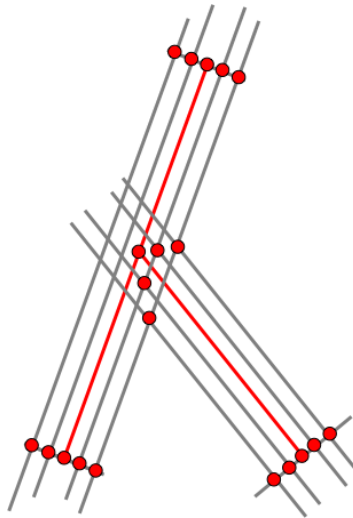


Abbildung 7.15: Bestimmung von Schnittpunkten.

Schritt 4 - Stützpunkte für das 3D-Modell: Die so erzeugten Stützpunkte sind die Vertices des neuen 3D-Modells. Die bis zu diesem Zeitpunkt konstruierten Hilfslinien können nun verworfen werden. Intern wird die Zugehörigkeit der Stützpunkte zu den verschiedenen Höhenzügen der Vertiefungen im 3-D-Modell weiterhin gespeichert. Dies erlaubt es, im nächsten Verarbeitungsschritt Kanten zwischen den Punkten zu ziehen. Abbildung 10.16 zeigt die nach dem Entfernen der Hilfslinien übriggebliebenen Punkte.

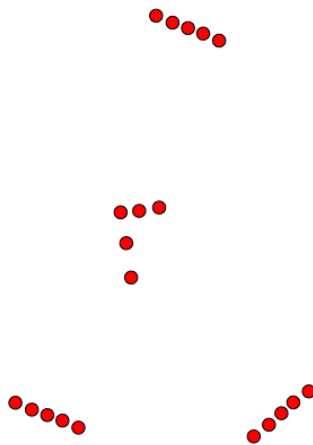


Abbildung 10.16: Resultierende Stützpunkte.

Schritt 5 - Aufbau der Kanten des 3D-Modells: Umläufig werden Kanten zwischen den Punkten gleicher Höhenlinien erstellt. Außerdem werden Kanten zwischen benachbarten Punkten direkt benachbarter Höhenlinien an den Enden und Übergängen von Linien eingezogen. Diese Kanten bilden später die Schrägen innerhalb der Vertiefungen. Abbildung 10.17 zeigt die konstruierten Kanten.

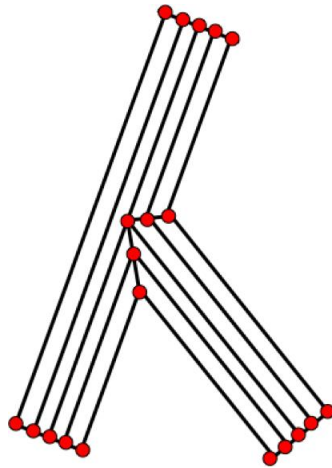


Abbildung 10.17: Verbinden der Stützpunkte.

Schritt 6 - Verschieben der Punkte in der Höhe: Entsprechend der Zugehörigkeit zu verschiedenen Höhenlinien werden die Punkte entlang der Achse des Koordinatensystems verschoben, welche später die Höhe in der virtuellen haptischen Umgebung ausmacht. Die Verschiebung muss dabei so erfolgen, dass sich die gewünschte Form des Querschnitts des Profils ergibt. Abbildung 10.18 zeigt die verschobenen Höhenlinien.

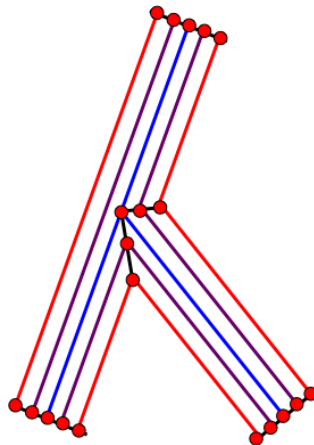


Abbildung 10.18: Verschiebung der Stützpunkte entlang der Z-Achse.

Schritt 7 - Ergänzung zum Trimesh: Vor diesem Schritt besteht das 3-D-Modell ausschließlich aus viereckigen Maschen (es handelt sich um ein so genanntes Quadmesh). Dieses Quadmesh kann algorithmisch einfach in ein Trimesh umgewandelt werden, in dem jede der viereckigen Maschen durch Verbindung von zwei nicht benachbarten Eckpunkten in zwei Dreiecke unterteilt wird. Diese Unterteilung ist auch bei unregelmäßigen, beispielsweise stark in die Länge gezogenen, Vierecken immer möglich.

10.2.1.1 Implementation der Linien-Konstruktion

Das Verfahren zur Erzeugung von Liniennetzwerken wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit implementiert. Dabei wurde nicht exakt die oben beschriebene Konstruktionsvorschrift verfolgt sondern mit effizienteren Algorithmen zur Umsetzung wie folgt vorgegangen:

An den Enden der Linien der linien-basierten Graphik wird statt einer normalen Linie ein Halbkreis konstruiert. Die Endpunkte der Halbkreise bilden den Querschnitt der späteren Vertiefungen. Im nächsten Schritt werden die Stützpunkte der Halbkreise, welche sich auf gleicher Höhe befinden, umlaufend verbunden. Hierdurch erfolgt die Berechnung der finalen Position der Punkte einschließlich der Verschiebung in der Höhe in einem einzelnen Schritt.

10.2.1.2 Konstruktion der Oberfläche durch eine Constrained Delaunay Triangulation

Bei dem genutzten Verfahren zur Konstruktion von 3-D-Modellen für linien-basierte Graphiken mit geraden Linien werden die Vertiefungen und die Oberfläche des 3-D-Modells in zwei getrennten Arbeitsschritten erstellt. Zur Konstruktion der Oberfläche muss der Bereich, welcher sich durch den Rand der linien-basierten Graphik und den Aussparungen durch die Vertiefungen ergibt, mit Dreiecken überdeckt werden. Diese Überdeckung einer Fläche mit Dreiecken wird als Triangulation bezeichnet.

Es gibt verschiedene Arten von Triangulationen, welche durch verschiedene Algorithmen berechnet werden können. Die verschiedenen Triangulationen erfüllen verschiedene Optimalitätskriterien. Für die Erstellung der Oberfläche eines 3-D Modells ist eine Triangulation wünschenswert, welche regelmäßige Dreiecke erzeugt. Durch die Vermeidung spitzer Winkel werden bei der Berechnung der Kollision und der Force-Feedback-Kräfte zwischen den 3-D Modellen und dem haptischen Interface-Punkt Rundungsfehler vermieden.

Die Delaunay-Triangulation (Delaunay 1934) ist eine Art der Triangulation, welche das Optimalitätskriterium regelmäßiger Dreiecke erfüllt, indem die inneren Winkel aller Dreiecke maximiert werden. Diese Eigenschaft macht die Delaunay-Triangulation zu einem beliebten Verfahren in der Computergraphik und optimal für die Erstellung von haptischen 3D-Modellen. Die Delaunay-Triangulation arbeitet auf einer Menge von Punkten und gibt eine optimale Triangulation für diese Punkte aus.

Für die Triangulation einer Oberfläche einer haptischen linien-basierten Graphik ist eine einfache Delaunay-triangulation jedoch nicht ausreichend, da vorhandene Aussparungen nicht durch neue Kanten geschnitten werden dürfen. Die bereits in dem unvollständigen 3D-Modell existierenden Kanten müssen Teil der entstehenden Triangulation sein, auch wenn dies die Optimalität der entstehenden Triangulation mindert.

Um eine korrekte Triangulation zu erstellen, welche die Kanten der Vertiefungen enthält, muss das Triangulations-Verfahren neben der Menge der Punkte der Oberfläche auch die Menge der Kanten der Vertiefungen berücksichtigen. Die Constrained Delaunay-Triangulation (CDT) ist eine Weiterentwicklung der Delaunay-Triangulation welche dies leistet. Die CDT

erzeugt keine optimale Triangulation, da bereits vorhandene Kanten zur Bildung von spitz zulaufenden Dreiecken führt. Jedoch garantiert CDT eine unter den gegebenen Umständen optimale Triangulation mit möglichst regelmäßigen Dreiecken. Dies ist auch als schwache Delaunay- Eigenschaft bekannt.

Es existieren verschiedene algorithmische Umsetzungen der CDT, welche sich in ihrer Platz- und Zeit-Komplexität unterscheiden. Da Erstellung von Oberflächen für haptische 3D-Modelle keine zeitkritische Aufgabe ist und nur eine verhältnismäßig kleine Eingabe von Punkten und Kanten hat, ist die Optimierung von Platz und Zeitbedarf nicht entscheidend. Für die CDT wurde eine bestehende Bibliothek von Domiter und Žalik (2008) genutzt.

10.3 Evaluation der erzeugten haptischen Straßenkarten

Im Rahmen einer empirischen Versuchsreihe (Lohmann, Kerzel & Habel, 2012) wurde die Benutzbarkeit der algorithmisch erzeugten haptischen Repräsentationen und der ereignisbasierten verbalen Assistenz zu haptischen Straßenkarten evaluiert. Es wurden insgesamt 13 Versuchspersonen mit einem Durchschnittsalter 24,7 Jahren (Standardabweichung 7.2 Jahre) befragt, 4 davon waren weiblich, 9 männlich. Es handelt sich ausschließlich um sehende Universitätsstudenten, welche während der haptischen Exploration eine Augenbinde trugen.

Die Versuchspersonen haben einen Prototypen (siehe Kapitel 12) zur verbal assistierten Exploration von Straßenkarten getestet. Die haptischen Repräsentationen der Straßenkarten wurden dabei mit dem in Kapitel 10 vorgestellten Verfahren erstellt. Nach der Exploration wurden die Versuchspersonen mittels einer Likert-Skala befragt. Dabei wurde nach der Zustimmung der Benutzer zu Aussagen auf einer Skala von 1 (ich stimme zu) und 5 (ich stimme nicht zu) gefragt. Tabelle 12.3 zeigt die Ergebnisse zu diesen Fragen.

Frage	Durchschnitt (1 = Ich stimme zu, 5 = Ich stimme nicht zu.)	Standardabweichung
<i>Die haptische Repräsentation ist verständlich.</i>	1,70	0,68
<i>Es ist einfach, den Straßen in der Karte zu folgen.</i>	1.50	0,53

Tabelle 12.3: Empirische Ergebnisse zur Benutzbarkeitsstudie von haptischen Karten.

Unter anderem wurden die Benutzer danach befragt, ob die haptische Repräsentation verständlich war und ob es einfach war, dem Verlauf der Straßen zu folgen. Die durchschnittliche Antwort zeigt, dass die haptische Repräsentation sowohl als Ganzes verständlich sind, als auch, dass die Benutzer in der Regel den Linien (in diesem Fall den Straßen) einfach folgen konnten.

11 Erstellung von haptischen Linien-Graphen

Linien-Graphen stellen auf Grund ihrer gekrümmten Linien besondere Anforderungen an die Erstellung eines 3D-Modells und den Aufbau einer zugehörigen Wissensbasis. In diesem Abschnitt werden Werkzeuge zum Einlesen und für die automatische Analyse von Pixelgraphiken von Linien-Graphen, Werkzeuge zur manuellen Annotation der eingelesenen Linien-Graphiken und ein Algorithmus zur Erstellung von haptischen 3D-Modellen vorgestellt. Eine Erweiterung des Formalismus linien-basierter Graphiken für die Anwendungsdomäne der Linien-Graphen wird in Kapitel 12 eingeführt.

11.1 Datenquellen für Linien-Graphen

11.1.1 Pixel-Graphiken

Pixelgraphiken sind eine häufige Quelle für Linien-Graphen. In diesem Format sind Linien-Graphen in Online-Medien häufig verfügbar. Liegen Linien-graphen nicht in dieser Form vor, können sie in der Regel einfach in ein solches Format überführt werden, indem ein digitales Foto oder eine Bildschirmaufnahme von ihnen gemacht wird oder in dem per Hand ein Linien-Graph abgepaust wird.

Wird eine Pixelgraphik als Datenquelle für einen Linien-Graphen genutzt, so muss in der gegebenen Implementation, die Linie des Graphen als einziges Element in der Pixel-Graphik sein. Die Linie muss sich deutlich vom einfarbigen (am besten weißen) Untergrund abheben. Die Linie selbst muss eine hinreichende Dicke haben, da eine Analyse des Ursprungsbildes auf Pixel-Ebene stattfindet. Abbildung 11.19 (links) zeigt eine solche Pixelgraphik, die als Basis für die Erstellung eines 3D-Modells eines Graphen geeignet ist. Abbildung 11.19 (rechts) zeigt den eingelesenen Linien-Graphen, der intern als eine Folge von Datenpunkten repräsentiert wird.

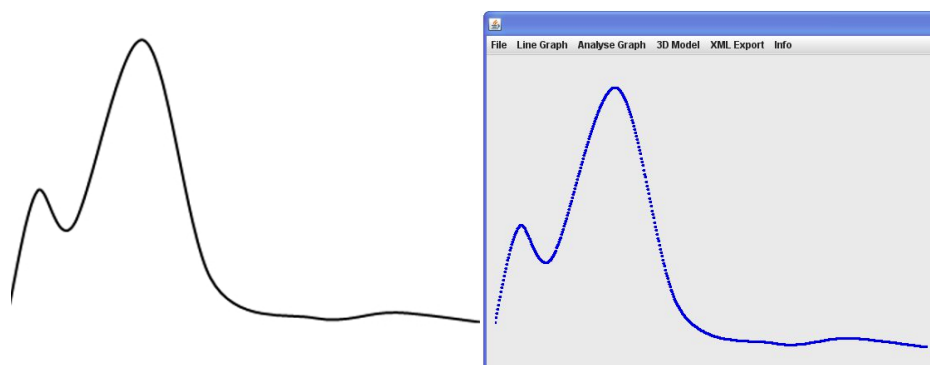


Abbildung 11.19: Pixelbild eines Graphen³¹ (links).

Eingelesener und analysierter Liniengraph im Werkzeug zur Erstellung von haptischen Liniengraphen (rechts).

³¹ Die Abbildung stammt aus dem Versuchsmaterial zu (Alaçam et al., 2013).

Beim Einlesen und Analysieren des Pixelbildes wird für jede (Pixel-)Spalte im Bild eine Kantenerkennung vorgenommen, also die Stellen bestimmt, an denen ein größtmöglicher Wechsel in Farbe und oder Helligkeit stattfindet. Bei breiteren Linien-Graphen ergeben sich auf diese Weise genau zwei Kanten-Punkte pro Pixel-Spalte, diese entsprechen der unteren und der oberen Kante der Graphen-Linie. Der Mittelpunkt dieser beiden Punkte bildet den Punkt der neuen Linie. Abb. 11.20 zeigt dieses Vorgehen. Auf diese Weise können Graphen-Linien beliebiger Breite erarbeitet werden, auch wenn diese Breite auf Grund von Ungenauigkeiten Schwankungen aufweist.

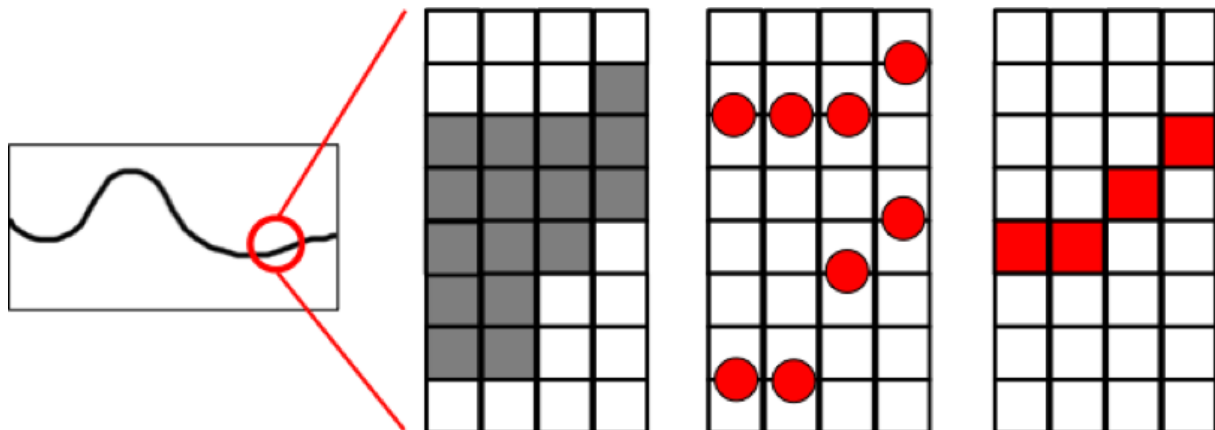


Abbildung 11.20: Analyse einer Pixelgraphik eines Linien-Graphen.

Es ist zu beachten, dass die Bildanalyse (und auch der Rest des Verfahrens) nur für Graphen im mathematischen Sinne erlaubt ist, welche eine eindeutige Abbildung von der X- auf die Y-Achse realisieren.

11.2 Manuelle Annotation & Extraktion von analytischen Graphen-Landmarken

Ein Liniengraph hat in der Regel einige saliente Abschnitte und Punkte, welche eindeutig aus dem geometrischen Verlauf des Graphen hervorgehen, wie zum Beispiel die Abschnitte, in denen der dargestellte Wert steigt und fällt, sowie Hoch- und Tiefpunkte oder Punkte abrupter Steigungsänderung. Das entwickelte Werkzeug bietet die Möglichkeit, analytisch bestimmbare Punkte wie Minima und Maxima des Graphen so wie Minima und Maxima der Krümmung des Graphen zu bestimmen. Die automatisch extrahierbaren Graphen-Landmarken werden genauer in Kapitel 13 beschrieben.

Aus dem Kontext des Linien-Graphen kann es aber auch weitere relevante Punkte oder Abschnitte geben, welche keine besonderen geometrischen Eigenschaften aufweisen. Das Werkzeug zur Annotation von Linien-Graphen bietet die Möglichkeit, Abschnitte und Punkte auf einem Linien-Graphen festzulegen und mit speziellen Bezeichnungen zu versehen. Dazu werden die Punkte bzw. Abschnitte mittels Schieberegler auf dem Graphen verschoben, bis

sie die gewünschte Position haben. Einzelne Intervalle und Punkte werden mit einem individuellen Bezeichner versehen. Abbildung 11.21 zeigt diesen Arbeitsschritt.

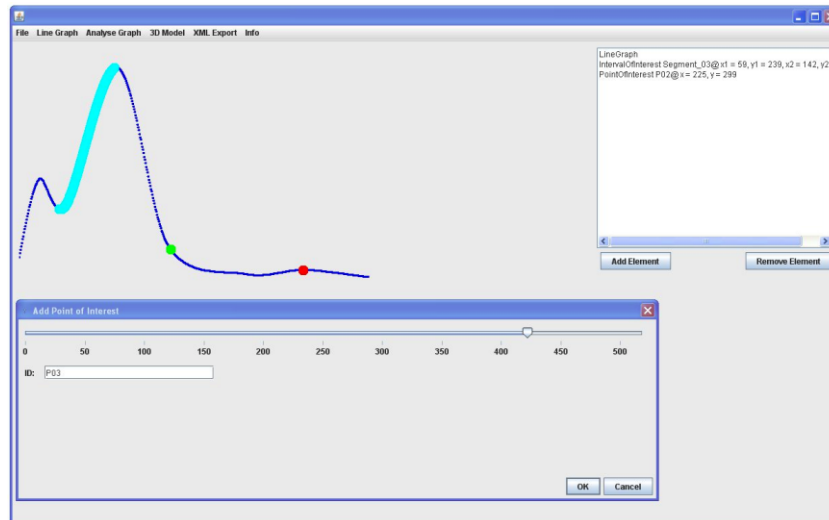


Abbildung 11.21: Annotation eines Punktes auf dem Linien-Graphen mit Hilfe der Software.

Automatisch extrahierte Graphen-Landmarken sowie manuelle Annotationen werden für die weitere Nutzung während der Ereigniserkennung in der Repräsentation der linien-basierten Graphik gespeichert.

11.3 Herausforderungen bei der Erstellung von 3D-Modellen für gekrümmte linien-basierte Graphiken

Das Konstruktionsverfahren zum Aufbau von haptischen 3D-Modellen für gekrümmte Graphen erzeugt ein 3D-Modell als haptischen Explorationskörper. Bei der Erstellung von 3D-Modellen für die haptische Darstellung einer gekrümmten Linie gelten die gleichen Kriterien wie für gerade Linien (siehe Kapitel 9).

Die wesentliche Herausforderung bei der Erstellung von 3D-Modellen für gekrümmte linien-basierte Graphik, ist die konstante Breite der Vertiefungen einzuhalten. Selbst kleine Verengungen des Kanals führen zu Fehlern, da der haptische Interaktionspunkt, welcher als eine Kugel berechnet wird, in Verengungen stecken bleibt und eine Verfolgung der Linie somit unmöglich macht. Verbreiterungen sollen ebenfalls vermieden werden, da an zu breiten Stellen die dargestellte Linie den haptischen Interaktionspunkt nicht mehr eindeutig führen kann.

Werden 3D-Modelle für gekrümmte linien-basierte Graphiken mit dem gleichen Verfahren erstellt, das zur Erstellung von 3D-Modellen für geraden linien-basierten Graphiken genutzt wird, werden durch die Krümmung der Linien viele kleine Linienstücke benötigt, da Kurven durch eine Reihe von Stützpunkten auf der gekrümmten Linie angenähert werden. Je genauer

die Krümmung angenähert wird, desto mehr Stützpunkte werden benötigt. Liegen die Stützpunkte aber zu dicht beieinander, kommt es zu Überlappungen beim Konstruktionsprozess und somit zu Fehlern im haptischen Modell. Sollen diese Kriterien bei dem entstehenden Modell eingehalten werden, so sind herkömmliche Erstellungsmethoden nicht anwendbar. Im Folgenden werden zunächst klassische Verfahren zur Erstellung von 3D-Modellen diskutiert, im Anschluss wird der Snowfall-Algorithmus zur Erstellung von haptischen 3D-Modellen von gekrümmten Linien-Graphen vorgestellt.

11.4 Klassische 3D-Verfahren für die Erzeugung von 3D-Körpern

Für die Erzeugung von gekrümmten linien-basierten Graphiken können im Prinzip die gleichen, bereits oben beschriebenen Verfahren zur Erstellung von geraden linien-basierten Graphiken genutzt werden, allerdings treten einige neue Herausforderungen auf:

Das Heightmap-Verfahren, das bereits für die Erstellung von geraden linien-basierten Graphiken auf Grund des Aliasing-Problems (siehe oben) ausscheidet, erzeugt bei gekrümmten linien-basierten Graphiken die gleichen treppenförmigen Kurvenverläufe und wird daher ausgeschlossen.

Für das Differenzverfahren mittels boolescher Operation liegt die Schwierigkeit auf der Erstellung des von der Grundfläche abzuziehenden Körpers. Gekrümmte 3D-Körper, welche einem vorgegebenen Kurvenverlauf entsprechen, werden in der 3D-Modellierung durch sogenannte Extrusion erzeugt. Bei diesem Verfahren wird der gewünschte Querschnitt des 3D-Körpers so entlang der Kurve bewegt, dass die Kurve normal zur Ebene des Querschnitts steht. In regelmäßigen Abständen werden die Stützpunkte des Querschnitts gespeichert und später zu einem vollständigen 3D-Modell zusammengefügt. Abb. 11.22 zeigt dieses Verfahren in einer zweidimensionalen Draufsicht.

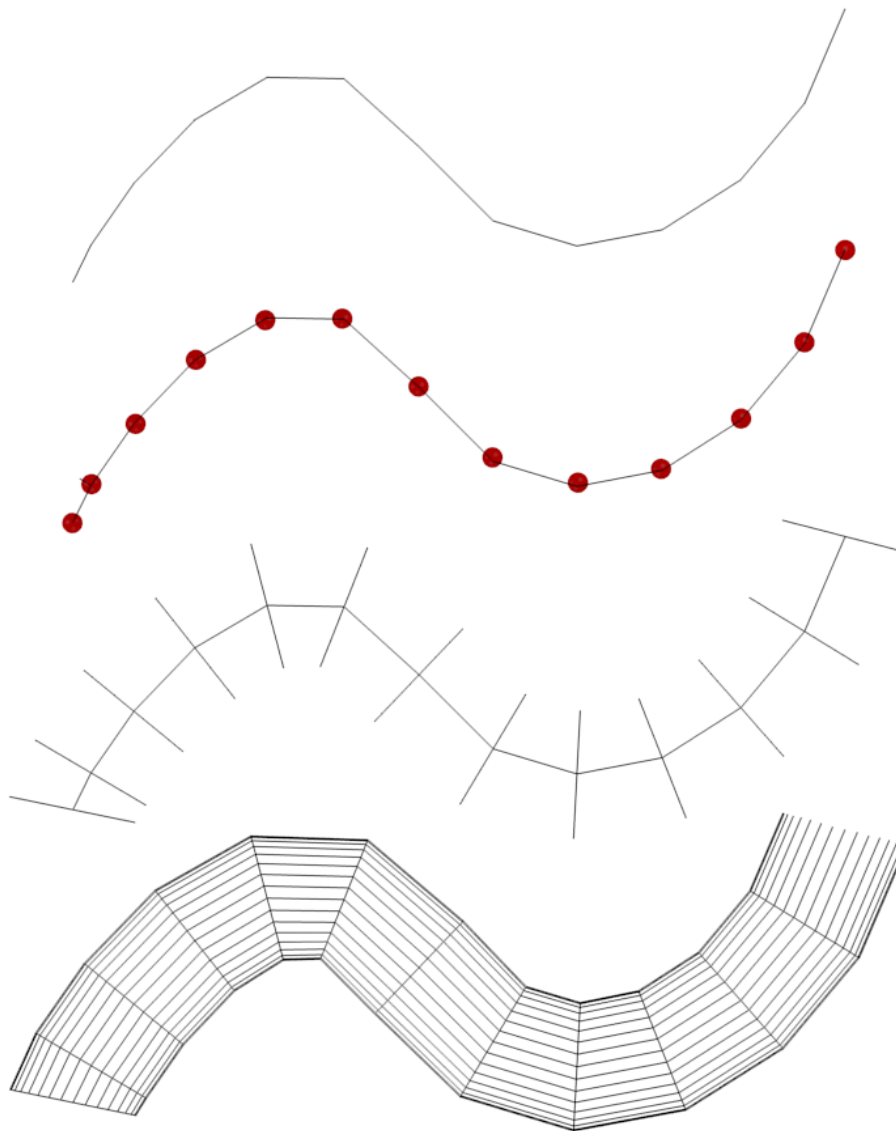


Abbildung 11.22: Fehler bei der Erstellung von Kurven mittels Extrusion bei starken Krümmungen.

Das so erstellte 3D-Modell kann mittels boolescher Operation von einer „Grundplatte“ abgezogen werden. Hierdurch entsteht dann ein explorierbares 3D-Modell in dem die Linien als Vertiefungen dargestellt sind.

Probleme ergeben sich jedoch bei starker Krümmung der Linie. Abb. 11.23 zeigt, dass sich bei starker Krümmung (und hoher Breite des Querschnitts) die „Rippen“ der Konstruktion beginnen zu überschneiden, was zu einer unsauberer Geometrie führt. Wird eine solche unsaubere 3D-Geometrie im Rahmen einer booleschen Differenz-Operation genutzt, ist die erzeugte Geometrie ebenfalls unsauber, die Folge sind haptisch nicht problemfrei explorierbare 3D-Modelle in denen der haptische Interaktionspunkt durch die Explorationsebene fällt oder sich in ihr festhakt. Ein solches unsauberes Modell kann manuell nachkorrigiert werden, was jedoch einen erheblichen Aufwand darstellt, da eine hohe Anzahl von einzelnen 3D-Punkten bewegt oder miteinander verschmolzen werden muss.

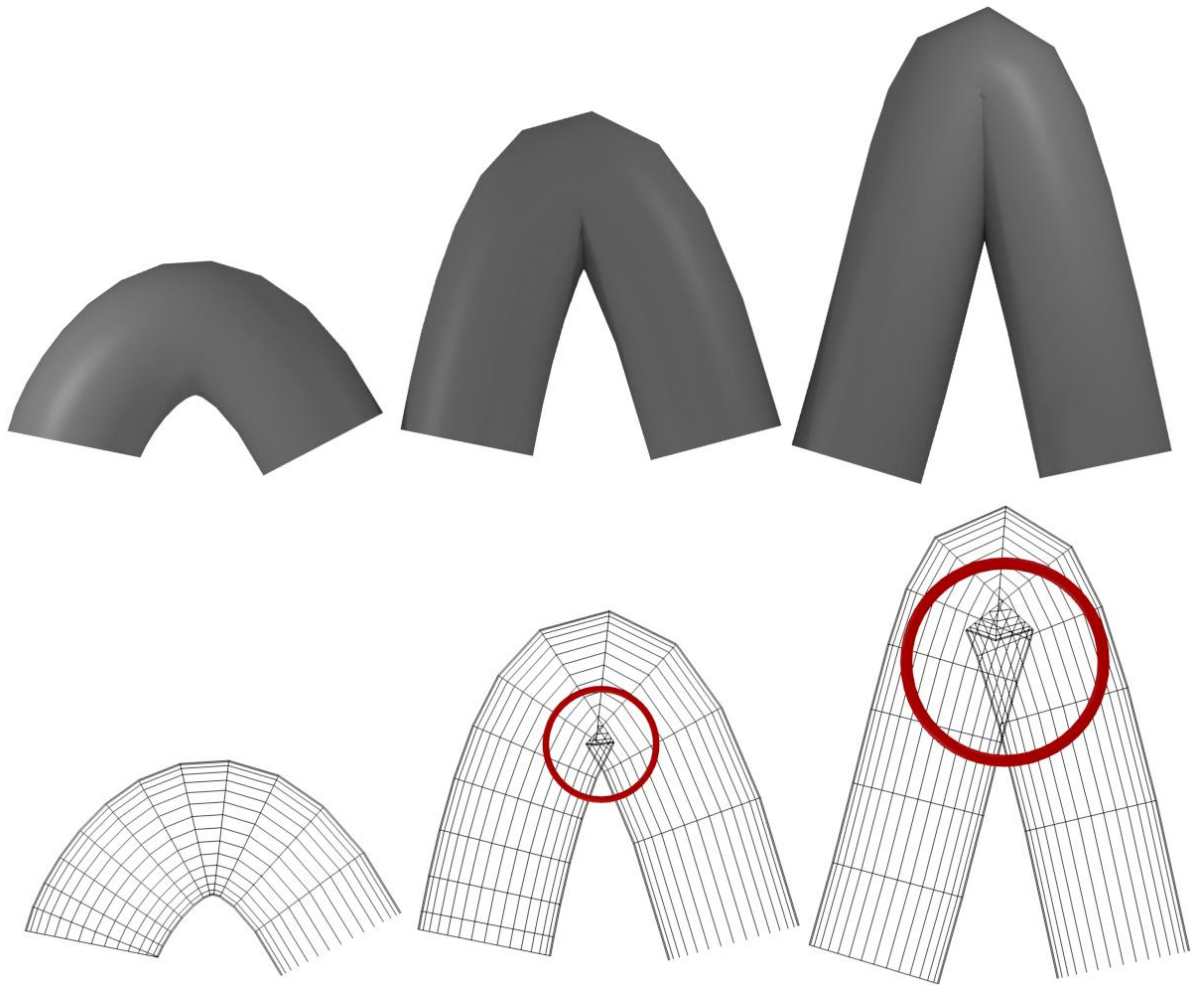


Abbildung 11.23: Fehler bei der Erstellung von Kurven mittels Extrusion bei starken Krümmungen.

Dieses Verfahren wurde im Rahmen einer Studie zur Exploration haptischer Graphen genutzt (Habel, Alaçam & Acartürk, 2013). Dabei traten bei starken Krümmungen immer wieder Fehler und Unregelmäßigkeiten auf, die manuell korrigiert werden mussten, bevor die haptischen Graphen genutzt werden konnten.

11.5 *Snowfall*-Algorithmus zur fehlerfreien Annäherung von gekrümmten linien-basierten Graphiken für haptische Exploration

Für den Aufbau von haptischen 3D-Modellen gekrümmter Graphen wurde wegen der im obigen Abschnitt geschilderten Probleme bei konventionellen Modellierungstechniken ein neues Verfahren zur 3D-Modell-Erstellung entwickelt.

Eine gleichbleibende Mindestbreite kann geometrisch dadurch konstruiert werden, dass ein Kreis entlang einer (gekrümmten) Linie bewegt wird, wobei in regelmäßigen Abständen die Kreisform aufgetragen wird, abschließend wird eine Hülle um die aufgetragenen Kreisformen

gebildet. Auf diese Weise ist (bei einem hinreichend geringem Abstand der aufgetragenen Kreise) sichergestellt, dass an jedem Punkt auf der Bahn ein Abstand r (Radius des Kreises) zum Rand existiert. Abbildung 11.24 (1 bis 3) zeigt diese Konstruktion.

Bei diesem Verfahren ergibt sich zwangsläufig ein erhöhter Abstand in „spitzen“ Kurven. Dies ist unvermeidbar. Würde man den Abstand in der spitzen Kurve verringern, würde zwangsläufig der Abstand an den Seiten der spitzen Kurve unter den festgelegten Mindestabstand (den Radius des Kreises) fallen. Dies ist in Abbildung 11.24 (4) dargestellt.

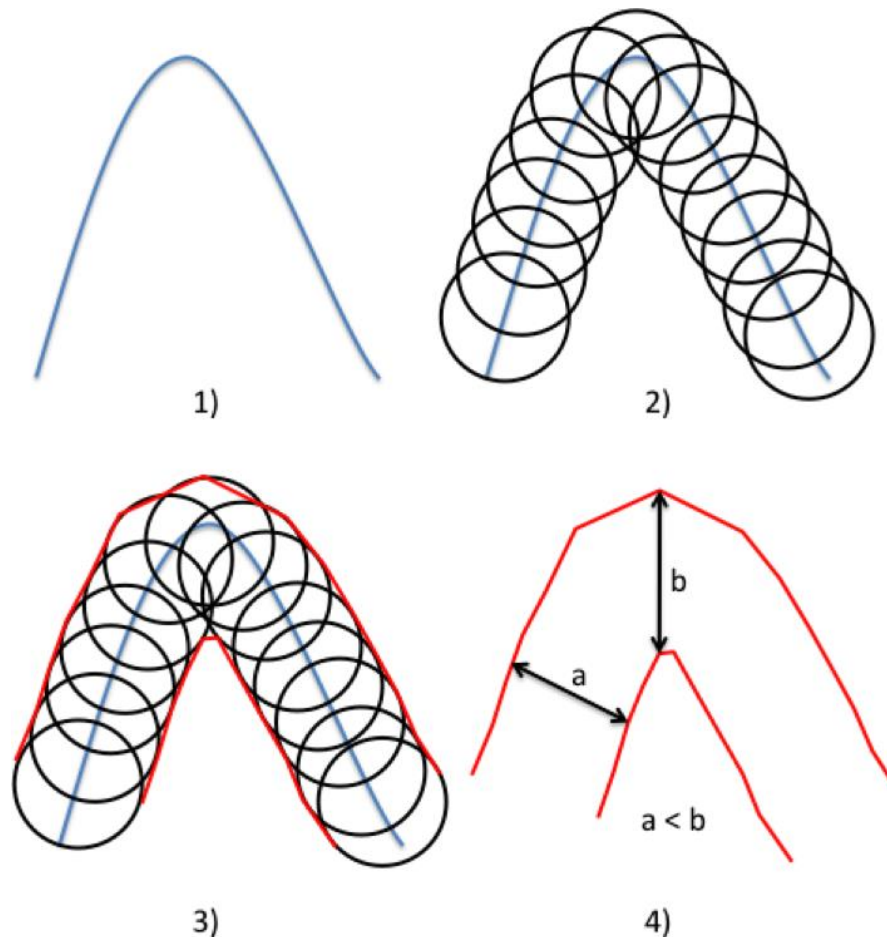


Abbildung 11.24: Konstruktion von Vertiefungen mit konstanter Mindestbreite.

Die algorithmische Umsetzung dieses Verfahrens basiert auf der Idee, das 3D-Modell durch eine schrittweise Annäherung einer Rohform an die gewünschte Kontur zu erzeugen. Stützpunkte des 3D-Modells werden von beiden Seiten der gekrümmten Linie iterativ angenähert, bis diese einen gewünschten Abstand zur Linie und auch untereinander erreicht haben. Anschaulich kann man sich diesen Ablauf (zumindest von der oberen Seite) wie fallende Schneeflocken vorstellen, welche eine gegebene Kontur abdecken und durch ihren eigenen Durchmesser ein Duplikat der Kontur in einigen Zentimetern Höhe entstehen lassen.

Dieses Verfahren ist durch die Snake-Algorithmen (auch bekannt als Active-Contour-Algorithmen) zur Kantenerkennung in der Graphikverarbeitung inspiriert (Kass, Witkin &

Terzopoulos, 1988), insbesondere durch jene Varianten des Verfahrens, welche mit diskreten Stützpunkten arbeiten. Bei diesem Verfahren findet eine iterative Annäherung einer Kette von Punkten an eine gegebene Form (Kurve) statt, indem diese Punkte unter Einhaltung weiterer Form-Constraints entlang eines Gradienten wandern.

Beim Snowfall-Algorithmus wird eine Kette von Punkten beidseitig an eine gegebene gekrümmte Linie angenähert, bis jeder einzelne der Punkte einen bestimmten Abstand zu der Linie erreicht. Dieser Abstand entspricht der halben gewünschten Breite der Vertiefung. Die Punkte bilden dann die Stützpunkte für das 3D-Modell. Im Folgenden wird der genaue Ablauf für die Konstruktion eines Ein-Linien-Graphen beschrieben.

Schritt 1 – Initialisierung: Eine regelmäßige Kette von Punkten und ihren Umkreisen wird am unteren und oberen Bildrand erstellt. Der Durchmesser der Kreise entspricht dem gewünschten Durchmesser der Vertiefung. Abb. 11.25 und die drei folgenden Abbildungen zur Illustration des Verfahrens zeigen dies zunächst nur für den oberen Bildrand. Das gezeigte Vorgehen kann ohne Beschränkung der Allgemeinheit aber sowohl von oben als auch von unten durchgeführt werden.

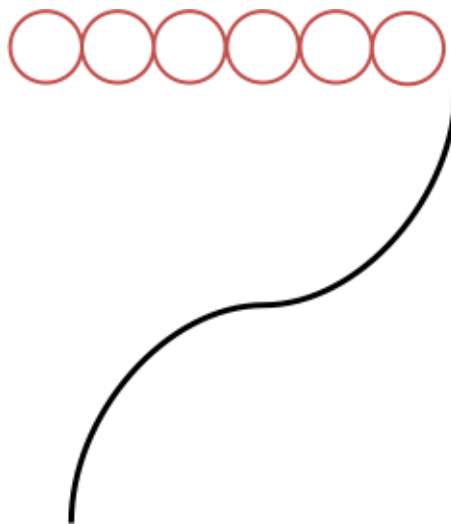


Abbildung 11.25: Initialisierung für Snowfall-Algorithmus.

Schritt 2 - Absenken der Kreise entlang der Y-Achse: Die Kreise werden parallel zur Y-Achse abgesenkt. Anders als bei klassischen Active-Contour-Algorithmen bewegen sich alle Stützpunkte der Kontur entlang dieser zuvor festgelegten Achse. Durch diese Bewegung ist sichergestellt, dass der Abstand der Stützpunkte der Kontur entlang der X-Achse konstant bleibt.

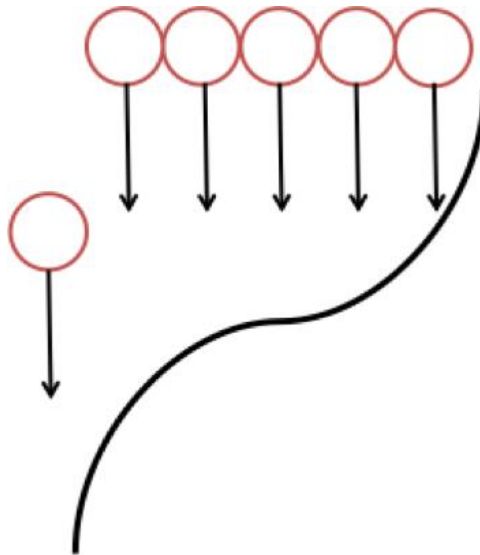


Abbildung 11.26: Absenken der Kreise entlang der Y-Achse.

Die einzelnen Kreise werden unabhängig voneinander abgesenkt. Die Abwärtsbewegung wird gestoppt, wenn der Kreis die anzunähernde Linie berührt. Hierdurch ist sichergestellt, dass der Mittelpunkt des Kreises einen Mindestabstand zur Linie einhält. Dies wird für jeden der Kreise individuell ausgeführt.

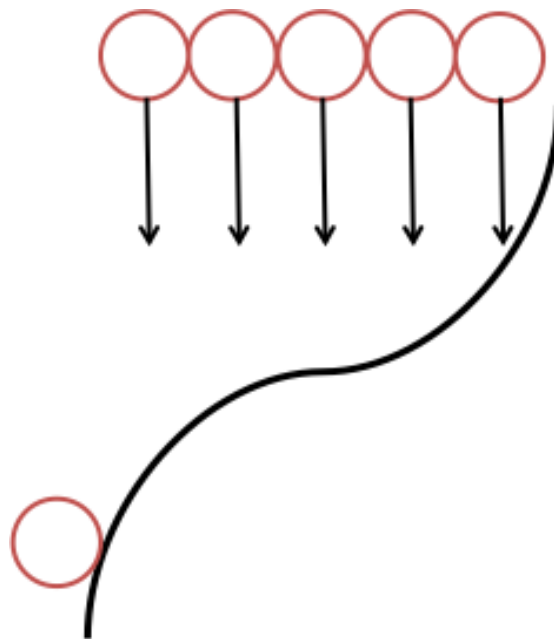


Abbildung 11.27: Stopp des Absenkens wenn der Kreisradius die anzunähernde Graphen-Linie berührt.

Nach dem Absenken aller Kreise: Jeder der Kreismittelpunkte hält einen Mindestabstand von r zur Graphen-Linie ein.

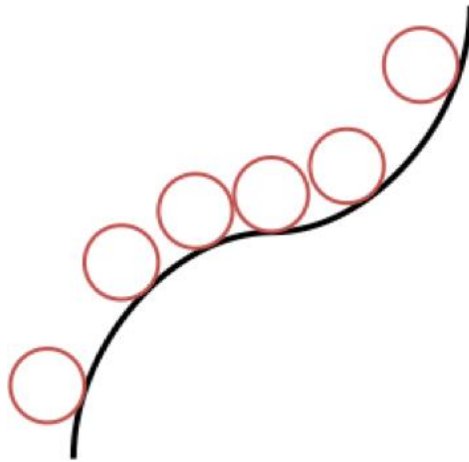


Abbildung 11.28: Wiederholung des Arbeitsschrittes für alle Kreise.

Das Verfahren wird vom unteren Bildrand ausgehend wiederholt.

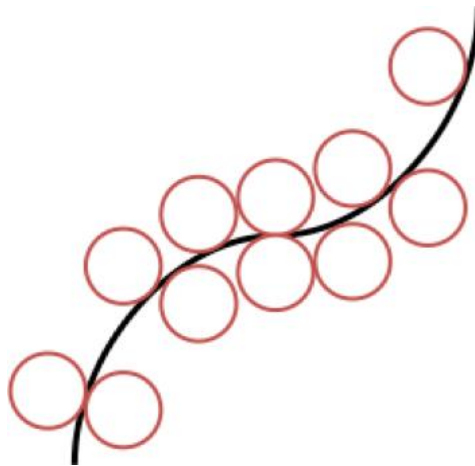


Abbildung 11.29: Wiederholung der Arbeitsschritte von der Unterseite.

Schritt 3 - Aufbau eines 3D-Modells: Durch Verbinden der Kreismittelpunkte werden die neuen Kanten der Vertiefung bestimmt (siehe Abbildung 11.30 (links)). Auf Grundlage der neuen Kanten wird zunächst ein planares Quadmesh aufgebaut, Abbildung 11.30 (rechts). Anschließend wird durch Absenken der Vierecke (quads), welche die Graphen-Linie überdecken, entlang der Z-Achse die gewünschte Tiefe der Linie im haptischen 3D-Modell eingestellt, Abbildung 11.31. Außerdem werden Seitenwände der Vertiefung eingefügt. Als letzter Schritt folgt eine Umwandlung des Quadmeshes in ein Trimesh.

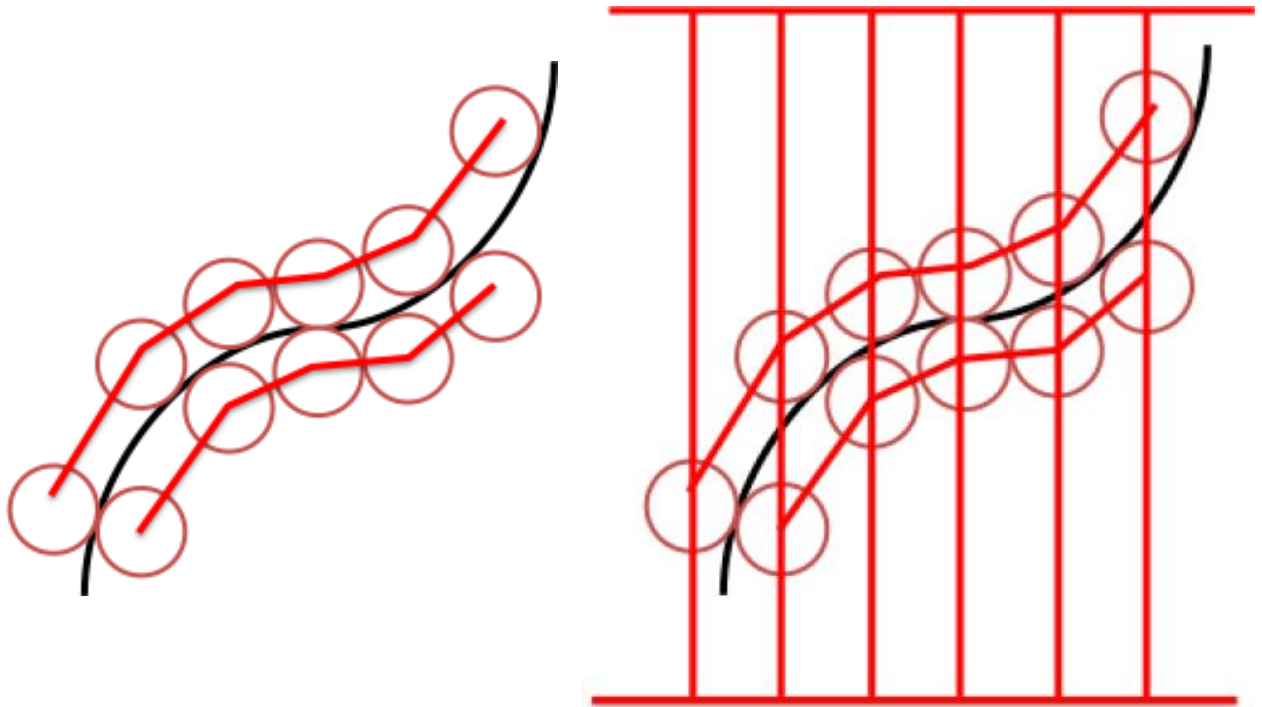


Abbildung 11.30: Aufbau von Kanten (links) und Quadmesh (rechts).

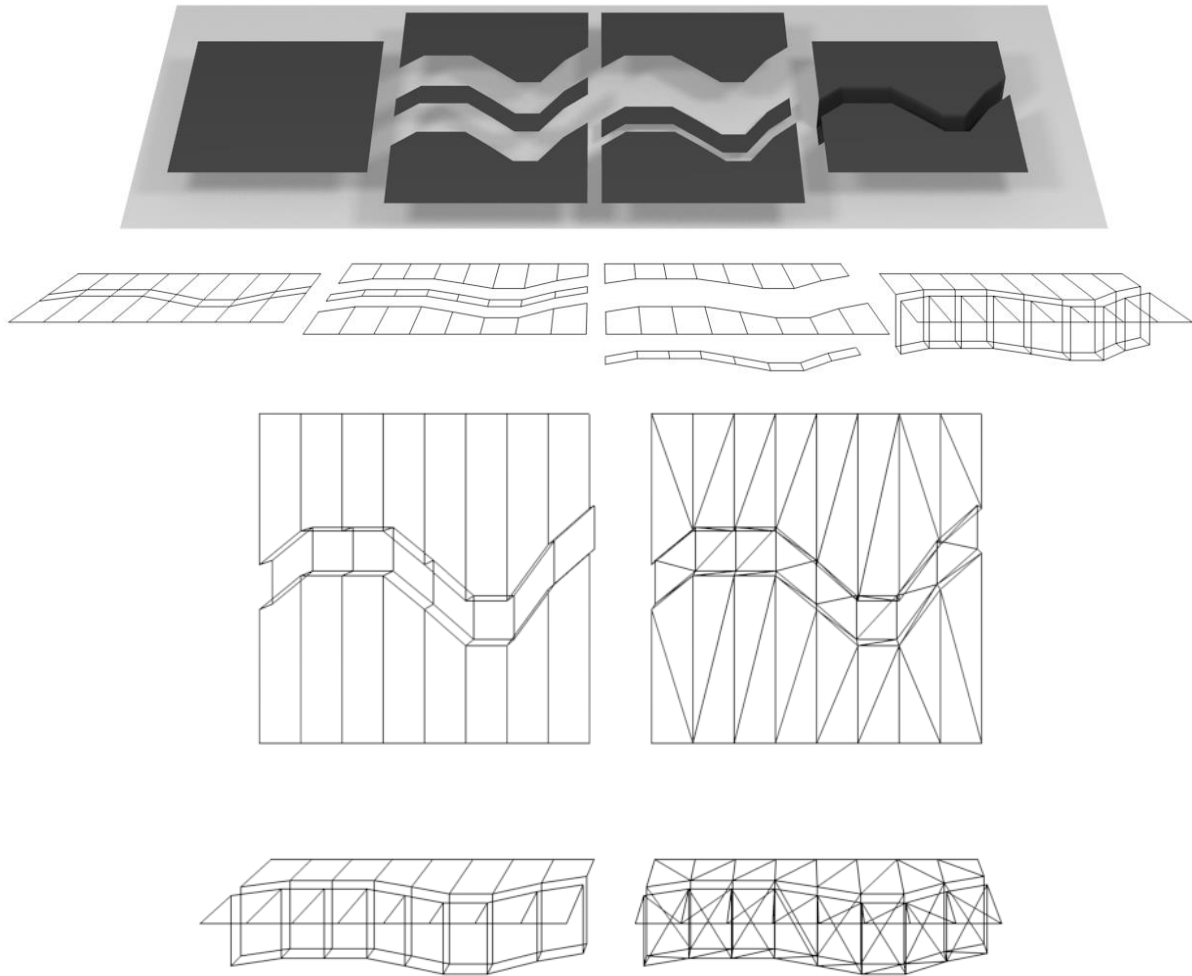


Abbildung 11.31: Konstruktion eines 3D-Modells.

11.6 Evaluation der erzeugten haptischen Linien-Graphen

Die mit dem vorgestellten Verfahren erzeugten Linien-Graphen wurden im Rahmen von empirischen Forschungsprojekten und studentischen Arbeiten erfolgreich eingesetzt.

Im Rahmen der Arbeit von Selke (2014) wurde die Benutzbarkeit der haptischen Linien-Graphen evaluiert: Es wurden insgesamt 18 Versuchspersonen befragt, 9 davon waren weiblich, 9 männlich. Es handelte sich bei den Versuchspersonen größtenteils um Universitätsstudenten ohne Einschränkung der Sehfähigkeit. Die Versuchspersonen trugen während der haptischen Exploration eine Augenbinde. Die Versuchspersonen haben mehrere haptische Linien-Graphen mit einer speziellen Aufgabenstellung exploriert. Bei der anschließenden Befragung wurde die Benutzbarkeit der haptischen Linien-Graphen abgefragt. Die Benutzer stimmten dabei den folgenden Aussagen zur Benutzbarkeit der haptischen Repräsentation einer Skala von 1 (ich stimme zu) und 5 (ich stimme nicht zu) zu. Tabelle 12.3 zeigt die Ergebnisse zu diesen Fragen.

Frage	Durchschnitt (1 = Ich stimme zu, 5 = Ich stimme nicht zu.)	Standardabweichung
<i>Die haptische Repräsentation ist verständlich.</i>	1,53	0,61
<i>Es ist einfach, dem Verlauf des Graphen zu folgen.</i>	1,18	0,38
<i>Es ist einfach, den Graphen zu lokalisieren.</i>	2,29	1,18
<i>Ich konnte mich gut in der virtuellen Umgebung orientieren.</i>	1,94	0,87
<i>Die Benutzung des Phantoms zur Exploration der virtuellen Graphen ist genau so anstrengend wie die Benutzung einer Computer-Maus.</i>	2,76	1,21
<i>Es gab keine Probleme bei der haptischen Exploration</i>	1,76	1,00

Tabelle 12.3: Empirische Ergebnisse zur Benutzbarkeitsstudie von haptischen Linien-Graphen.

Es gab generell keine Probleme dem Verlauf des Linien-Graphen zu folgen und die haptische Repräsentation zu verstehen. Meistens gab es ebenfalls keine Probleme bei der Exploration oder der Orientierung in der virtuellen Umgebung zu orientieren. Schwieriger haben es einige Benutzer es jedoch empfunden, den Linien-Graphen anfänglich zu lokalisieren. Auffallend ist, dass die Benutzer den Umgang mit dem haptischen Force-Feedback-Gerät als anstrengender als die Benutzung einer Computermaus einstufen, siehe Abschnitt 3.3.5.

Teil 4:

Fallstudien und Evaluation

12 Fallstudie VAVETaM: Verbal assistierte taktile Karten

Im Rahmen der Evaluation des Systems werden zwei Fallstudien vorgestellt. Sie zeigen den Einsatz des entwickelten Systems in den Anwendungskontexten der Straßenkarten und der Linien-Graphen. Die Anwendungsdomänen unterscheiden sich nicht nur inhaltlich, sondern auch in Bezug auf ihre geometrischen Eigenschaften und die Benutzerinteraktion.

Ein Prototyp zur Ereigniserkennung während der haptischen Exploration von Straßenkarten ist im Rahmen des VAVETaM-Projektes entstanden und nutzt eine externe Komponente für Verbalisierungen. Erkannte Ereignisse werden mittels einer Übersetzungskomponente vorverarbeitet und als Nachricht an eine Verbalisierungs-Komponente zur Erzeugung von sprachlichen Assistenzen geschickt.

Die implementierten Prototypen ermöglichen eine Evaluation der in dieser Arbeit entwickelten Formalismen in konkreten Anwendungsszenarios. Sie zeigen mehrere Aspekte der Arbeit: Die Repräsentation von linien-basierten Graphiken aus speziellen Anwendungsdomänen einschließlich ihrer domänenspezifischen Erweiterungen, den funktionierenden Ablauf der regelbasierten Ereigniserkennung und entsprechende domänenspezifische Erweiterungen der Regeln.

12.1 Exploration von haptischen Straßenkarten

Verbale Assistenz zur Unterstützung der haptischen Exploration von Straßenkarten war die erste untersuchte Anwendungsdomäne für die in dieser Arbeit vorgestellte Ereigniserkennung. Zu Beginn der Konzeption und Entwicklung wurden Vorstudien zur Exploration dieser Art von haptischen Repräsentationen durchgeführt, die einen Überblick über zu erkennende Ereignisse und auch mögliche verbale Assistenz geben (Lohmann, 2013).

In den Vorstudien wurde eine haptische Exploration einfacher Straßenkarten durch eine Versuchsperson mit verbundenen Augen durchgeführt. Eine weitere Person beobachtet die Exploration visuell und gibt mündlich verbale Assistenz zur Exploration. Abbildung 12.1 zeigt eine der explorierten haptischen Straßenkarten.



Abbildung 12.1: Visualisierung einer haptischen Straßenkarte für das VAVETaM-Projekt.

Sowohl eine Visualisierung der haptischen Exploration als auch die verbale Assistenz wurden in den Vorversuchen aufgenommen. Für die Entwicklung der Ereigniserkennung sind einige Beobachtungen relevant, welche sich in erster Linie aus der beobachteten haptischen Exploration ergeben haben:

Exploration entlang des Straßennetzwerkes: Die Exploration bewegt sich im Wesentlichen entlang des Netzwerkes von Straßen. Die haptische Exploration von Straßenkarten kann daher als Exploration einer linien-basierten Graphik kategorisiert und mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz zur Ereigniserkennung analysiert werden.

Fokussierung der Exploration auf einzelne Elemente: Oft werden bei der Exploration einzelne Bereiche der Graphik mehrfach exploriert bevor der Explorierende zu anderen Teilen übergeht. Schnelle „hin und her“ Bewegungen an geraden Linien sowie an Ecken, Enden und Verzweigungen waren häufig zu beobachten. Daraus lässt sich folgern, dass einzelne Linien und von Linien gebildete Konfigurationspunkte im Fokus der Exploration stehen. Die vorgestellte Ereigniserkennung kann die Exploration von Konfigurationspunkten als zusammenhängend erkennen, auch wenn der Benutzer Explorationsbewegungen innerhalb der Umgebung des eigentlichen Konfigurationspunktes durchführt.

Assistenz zum Auffinden von Landmarken: Landmarken werden durch verbale Hilfestellung oder seltener durch zufällige Exploration in der Karte gefunden. Es ist plausibel, dass Landmarken, die nicht Teil des verbundenen Netzwerkes von Straßen sind, schwieriger vom Explorierenden aufgefunden werden können. Daher ist es hilfreich, den Benutzern mittels verbaler Assistenz auf Landmarken während der Exploration des Straßennetzwerkes

hinzuweisen. Die Exploration von Straßenabschnitten in der Nähe von Landmarken kann erkannt und geeignete Assistenz gegeben werden.

Domänenspezifische Bewegungskonzepte: Bei der verbalen Assistenz werden Konzepte der Bewegung in tatsächlichen Umgebungen wie „Abbiegen“, „Passieren von Landmarken“ oder „Passieren von mehreren Landmarken“ genutzt. Durch Nutzung von Wissen über die linienbasierte Graphik und die Bewegung des Benutzers können solche Ereignisse erkannt und im Rahmen verbaler Assistenz genutzt werden.

12.2 Regeln zur Erkennung von Explorationsereignissen aus der Anwendungsdomäne der Straßenkarten

Die folgenden Regeln zur Erkennung von Explorationsereignissen aus der Domäne der Straßenkarten sind ein Beispiel für die Erweiterung und Domänenanpassung der Regeln zur Ereigniserkennung in einem komplexen Anwendungsszenario, in dem Konzepte und spezielle Ausdrücke für räumliche Bewegungen existieren. Zu den räumlichen Konzepten gehören unter anderem das Abbiegen an Kreuzungen und das Passieren von Landmarken.

Die Ausführungen der domänenspezifischen Regeln zur Ereigniserkennung zeigen, dass mit steigender Komplexität der Explorationsereignisse auch die Regelbedingungen komplexer werden. Der modulare Aufbau des Regelsystems erlaubt es aber bei der Definition von komplizierten domänenspezifischen Explorationsereignissen auf einfachere Explorationsereignisse zurückzugreifen. So entspricht die Exploration einer Straße der Exploration eines Linienzuges, welcher vom Domänen-Typ „Straße“ ist.

Exploration von Straßen: Straßen (tracks³²) sind als nicht verzweigende Linienkomplexe (siehe Abschnitt 6.2) modelliert. Daher kann die Exploration einer Straße im Wesentlichen auf die Exploration eines Linienkomplexes zurückgeführt werden. Der Unterschied zur *LineComplexExploration* besteht darin, dass die Regel für die Vollständigkeit der Exploration erweitert wurde: Die Exploration einer Straße gilt nur dann als vollständig, wenn alle Teile der Straße ohne Unterbrechung, das heißt ohne Verlassen der Straße, exploriert worden sind. Dies entspricht dem in Vorstudien beobachteten Verhalten der Versuchspersonen einzelne Straßen sequentiell zu explorieren. Neben der Exploration von ganzen Straßen wird auch die die Exploration von Teilen von Straßen wie Kreuzungen, Ecken beziehungsweise Kurven und Sackgassen erkannt.

³² Der Begriff „track“ beschreibt beliebige passierbare Wege wie Straßen, Radwege oder Fußgängerwege. Da im Rahmen der Forschung zu haptischen Karten in den haptischen Darstellungen aus Gründen der Überschaubarkeit ausschließlich Straßen gezeigt werden, wird an dieser Stelle der Begriff „track“ gleichbedeutend mit Straße gesetzt.

Exploration von Landmarken: Landmarken sind in den haptischen Karten des VAVETaM-Prototypen als vertiefte Regionen modelliert. Sie werden im Gegensatz zum Straßennetzwerk durch Kantenverfolgung (siehe Abschnitt 3.2) exploriert.

Vollständigkeit der Exploration: Ebenfalls in den Vorstudien zur Exploration haptischer Karten hat sich gezeigt, dass Versuchspersonen oft zunächst das Straßennetzwerk explorieren und anschließend die Landmarken entlang des Straßennetzes. Um den Übergang zwischen diesen Phasen zu erkennen und so eventuell durch geeignete Assistenz reagieren zu können muss das beobachtende System erkennen, wann alle Straßen vollständig exploriert worden sind. Ebenso ist es relevant zu wissen, wann alle Landmarken exploriert worden sind. Die Explorationsereignisse *AllTrackEx* beziehungsweise *AllLandmarkEx* stehen für die vollständige Exploration aller Straßen beziehungsweise Landmarken.

Passieren einer Landmarke: In haptischen Straßenkarten sind Landmarken für den explorierenden Benutzer schwierig aufzufinden, da sie nicht mit dem Straßennetzwerk verbunden sind. Um geeignete Assistenz zu generieren, muss das assistierende System erkennen, wann genau ein explorierender Benutzer einen Abschnitt einer Straße passiert, welcher neben einer Landmarke gelegen ist. Diese Abschnitte werden als Segmente einer Linie repräsentiert und können im Rahmen der Vorverarbeitung automatisch erstellt werden.

Summation von Ereignissen: Summation von Ereignissen bezeichnet das Zusammenfassen von mehreren aufeinanderfolgenden gleichartigen Ereignissen. Ein relevantes Beispiel ist die Summation von Passieren-Ereignissen, da es vorkommen kann, dass der Explorierende mit dem HIP mehrere Landmarken in schneller Folge passiert. Bei der Summation von Passieren-Ereignissen ist zu unterscheiden, ob tatsächlich verschiedene Landmarken passiert werden oder (etwa beim Abbiegen an einer Ecke) die gleiche Landmarke zweimal passiert wird, siehe Abbildung 12.2.

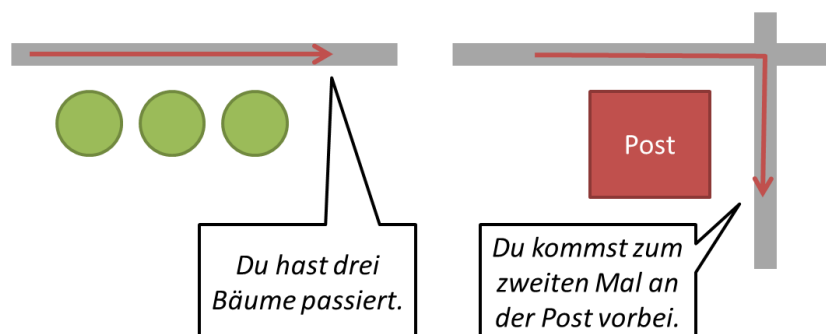


Abbildung 12.2: Summation von Explorationsereignissen.

Abbiegen: Es ist naheliegend, Explorationsbewegungen in einer haptischen Straßenkarte mit Konzepten der Bewegung auf realen Straßen zu vergleichen. So wurde zum Beispiel in den Vorstudien zur haptischen Exploration von Straßenkarten das Konzept des *Abbiegens* genutzt, um die Explorationsbewegungen zu beschreiben. Dabei hat sich gezeigt, dass *Abbiegen* ein komplexes Ereignis ist, welches dann eintritt, wenn der HIP von einer Straße auf eine andere

Straße bewegt wird, welche in einem Winkel von der ersten Straße abgeht. Dieser Ereignisdefinition ist ein Beispiel für die Kombination von Wissen über die linien-basierte Graphik und über die Bewegung des HIP.

Die Anpassung und Erweiterung der Regeln an eine spezielle Anwendungsdomäne der Straßenkarten zeigt die Nutzung der bestehenden Explorationsereignisse zum Aufbau domänenspezifischer Ereignisse. Tabelle 12.1 gibt einen Überblick über die domänenspezifischen Explorationsereignisse und skizziert die zu ihrer Erkennung genutzten Regeln. Der vollständige domänenspezifische Regelsatz enthält für jedes Explorationsereignis bis zu vier Regeln zum Erkennen von Beginn, Ende und Vervollständigung des Explorationsereignisses sowie zur Subsumation von Teilereignissen. In Tabelle 12.1 ist jedoch nur ein allgemeines Schema für die entsprechenden Regeln angegeben, welches zum einen zeigt, auf welchem bestehenden Explorationsereignis die domänenspezifischen Ereignisse aufbauen und welche weiteren Bedingungen für das Erkennen des Ereignisses gegeben sein müssen. Hieraus lassen sich dann die entsprechenden Regeln herleiten.

So wird zum Beispiel der Beginn einer Straßenexploration (*TrackEx*) erkannt, wenn der Beginn einer Linienexploration (*LineEx(l₁)*) erkannt wird und die Linie *l₁* den Domänen-Typ *Straße* hat. Entsprechend wird ebenso das Ende, und die Vollständigkeit der Straßenexploration auf das Ende beziehungsweise die Vollständigkeit der Linienexploration zurückgeführt. Es ist zu beachten, dass keine domänenspezifische Subsumationsregel benötigt wird, da nur mit Hilfe bestehender Regeln subsumiert wird.

Regel	Grundlegendes Explorationsereignis	Weitere Bedingungen
TrackEx	LineEx(<i>l₁</i>)	domainType(<i>l₁</i> , <i>track</i>)
TrackExContinuous	LineEx(<i>l₁</i>)	domainType(<i>l₁</i> , <i>track</i>) spez. Vervollständigungsregel
LandmarkEx	RegionEx(<i>r₁</i>)	domainType(<i>r₁</i> , <i>landmark</i>)
CrossingEx	CpEx(<i>c₁</i>)	crossing(<i>c₁</i> , <i>l₁</i> , <i>l₂</i>) domainType(<i>l₁</i> , <i>track</i>) domainType(<i>l₂</i> , <i>track</i>)
CornerEx	CpEx(<i>c₁</i>)	junction (<i>c₁</i> , <i>l₁</i> , <i>l₂</i>) domainType(<i>l₁</i> , <i>track</i>) domainType(<i>l₂</i> , <i>track</i>)
DeadendEx	CpEx(<i>c₁</i>)	endpoint (<i>c₁</i> , <i>l₁</i>) domainType(<i>l₁</i> , <i>track</i>)
AllTrackEx	TrackEx(<i>l₁</i>) TrackEx(<i>l₂</i>) ...	Allquantifizierung über Straßen in Wissensbasis

AllLandmarkEx	LandmarkEx(l_1) LandmarkEx(l_2) ...	Allquantifizierung über Landmarken in Wissensbasis
PassLandmark	PSegmentEx(s)	projection(l_1, s_1) landmark(l_1)
SummationPassDifferentLandmark	PSegmentEx(s_1) PSegmentEx(s_2) ...	projection(l_1, s_1) landmark(l_1) projection(l_2, s_2) landmark(l_2) ... $l_1 \neq l_2 \neq \dots$
SummationPassSameLandmark	PSegmentEx(s_1) PSegmentEx(s_2) ...	projection(l_1, s_1) landmark(l_1) projection(l_2, s_2) landmark(l_2) ... $l_1 = l_2 = \dots$
Turn	LineEx(l_1) LineEx(l_2) CpEx(c)	crossing(c, l_1, l_2) oder teePoint(c, l_1, l_2) angle($l_1, l_2, > 60^\circ$)

Tabelle 12.1: Domänenspezifische Explorationsereignisse und Regelbedingungen für die haptische Exploration von Straßenkarten.

12.3 VAVETaM-Prototyp

Das in dieser Arbeit entwickelte Rahmenwerk zur Ereigniserkennung für die haptische Exploration von linien-basierten Graphiken wurde im Rahmen des VAVETaM Projektes genutzt, um die Exploration von virtuellen haptischen Straßenkarten zu analysieren und auf Basis dieser Analyse verbale Assistenzen begleitend zur Exploration zu generieren. Ein lauffähiger Prototyp des Systems ist implementiert worden (Lohmann, Kerzel & Habel, 2012). Der Prototyp umfasst die Generierung von haptisch explorierbaren Straßenkarten (als linien-basierte Graphiken), die Erkennung von komplexen Explorationsereignissen und die Ansteuerung einer Verbalisierungskomponente unter Verwendung des Map-Exploration-Procedures-Formalismus (Habel, Kerzel & Lohmann, 2010) als Interface zwischen Ereigniserkennung und Verbalisierungskomponente. Das System wurde im Rahmen einer Benutzerstudie positiv evaluiert. Der Map-Exploration-Procedures-Formalismus ermöglicht die Verknüpfung von häufigen verbalen Assistenzen aus der Vorstudie mit den Explorationsbewegungen des Benutzers. Dabei wird nur eine Teilmenge der möglichen erkannten Ereignisse in MEPs übersetzt und für die Auslösung verbaler Assistenz genutzt. Trotzdem führt die verbale Assistenz in empirischen Versuchen zu einer signifikanten

Verbesserung in der Reproduktion der explorierten Straßenkarten, (Lohmann, Kerzel & Habel, 2012; Lohmann, 2013).

12.3.1 Architektur von VAVETaM

Das System zur Ereigniserkennung wird wie in Kapitel 5 beschrieben genutzt und um ein Übersetzungsmodul erweitert, welches die erkannten Ereignisse in den MEP-Formalismus übersetzt und somit die Schnittstelle zur Verbalisierungskomponente bildet. Die Verbalisierungskomponente löst auf Grundlage der übermittelten MEPs zuvor festgelegte verbale Assistenzen aus. Die Verbalisierungskomponente basiert auf einer Warteschlange (queue) zu verbalisierender Nachrichten. Auf Grundlage erkannter MEPs werden sprachliche Nachrichten ausgewählt und der Warteschlange hinzugefügt. Eine Text-to-Speech Komponente arbeitet die Warteschlange sukzessive ab. Dabei werden verbalisierte Assistenzen markiert und für eine bestimmte Zeit von der wiederholten Verbalisierung ausgeschlossen, um Wiederholungen zu vermeiden. Für eine genaue Darstellung der Architektur der Verbalisierungskomponente siehe (Habel, Kerzel & Lohmann, 2010; Lohmann, Kerzel & Habel, 2012).

12.4 Map-Exploration-Procedures (MEP)

Der Formalismus der Map-Exploration-Procedures wurde von Habel, Kerzel und Lohmann (2010) vorgeschlagen, um eine semantische Repräsentation haptischer Exploration von Straßenkarten aufzubauen. Map-Exploration-Procedures (MEPs) stellen eine auf die Domäne der Straßenkarten spezialisierte Form der haptischen Explorationsereignisse dar. MEPs basieren auf den Elementen haptischer Straßenkarten: Straßen (tracks), Landmarken (landmarks) und Regionen (regions). Die Exploration dieser Elemente wird mit spezifischen MEPs repräsentiert: track-MEPs, landmark-MEPs und region-MEPs. Habel et al. (2010) führen weitere MEPs ein, um die haptische Exploration von nicht visuellen taktilen Karten zu repräsentieren. Diese MEPs beschreiben Bewegungen, welche entweder der Ermittlung räumlicher Relationen dienen oder nicht explorativer Natur sind, wie das Stoppen der Explorationsbewegung an einem Punkt. Im Rahmen des VAVETaM-Prototypen wurden ausschließlich MEPs mit Bezug zu Landmarken und Straßen, beziehungsweise Teilen von Straßen, genutzt; dabei umfassen Teile von Straßen Konfigurationen wie Kreuzungen und Enden, sowie Abschnitte von Straßen an einer Landmarke.

Unterschiede zwischen MEPs und Ereignisrepräsentation in dieser Arbeit: MEPs unterscheiden sich in drei wesentlichen Aspekten von den in dieser Arbeit vorgestellten Explorationsereignissen.

Ersten sind MEPs im Gegensatz zu den in dieser Arbeit vorgestellten Explorationsereignissen nicht speziell auf die Exploration einer virtuellen haptischen Umgebung ausgelegt. Sie wurden anhand von Explorationen von physischen, taktilen Karten entwickelt und zeigen daher abweichende Explorationsmuster.

Zweitens beschreiben MEPs die haptische Exploration einer Straßenkarte als eine lückenlose Folge nicht überlappender MEPs. Parallelität und Nebenläufigkeit von Explorationsereignissen ist im MEP-Formalismus nicht vorgesehen mit der Ausnahme, dass die Exploration eines Elementes A einer Karte auf ein Teil-Element B des Elementes A fokussiert sein kann. So kann zum Beispiel die Exploration einer Straße auf einen spezifischen Abschnitt der Straße fokussiert sein.

Drittens ist die formale Repräsentation von MEPs gegenüber den in dieser Arbeit verwendeten Repräsentation nicht darauf ausgelegt, während des Explorationsverlaufes aktualisiert zu werden: Mit dem MEP-Formalismus wird eine haptische Exploration als eine Folge von einzelnen MEPs repräsentiert. Veränderungen im Status eines MEPs während der Exploration sind nicht vorgesehen. Insbesondere ist es nicht möglich, die Vollständigkeit oder Abgeschlossenheit eines MEPs zu repräsentieren.

Übersetzung zwischen erkannten Ereignissen und MEPs: Tabelle 12.2 zeigt die Übersetzung zwischen erkannten Explorationsereignissen und MEPs, welche im Rahmen des VAVETaM-Prototypen genutzt worden sind. Landmark-MEPs beziehen sich auf eine einzelne Landmarke, während track-MEPs sich auf eine Straße und zusätzlich einen besonderen Abschnitt einer Straße beziehen können.

Beschreibung der Explorationsbewegung	Explorationsereignis	MEP
Exploration einer Landmarke	LandmarkEx	LANDMARK(id)
Exploration einer Straße	TrackEx	TRACK(id)
Exploration einer Kreuzung	CrossingEx	TRACK(id, id_2)
Exploration eines Segments einer Straße an einer Landmarke	PSegmentEx	TRACK(id, id_2)
Exploration einer Sackgasse	DeadendEx	TRACK(id, id_2)
Ende der Exploration eines Elementes	Entsprechendes Ende-Ereignis	STOP()

Tabelle 12.2: Übersetzung zwischen Explorationsereignissen und Map-Exploration-Procedures (MEP).

Stopp-Ereignis: Zusätzlich zu den übermittelten MEPs als Schnittstelle zwischen der Ereigniserkennung und der Verbalisierungskomponente wurde ein Stopp-Ereignis definiert, welches das Ende des zuletzt übermittelten MEPs beziehungsweise das Ende des entsprechenden Explorationsereignisses signalisiert. Auf der Seite der Verbalisierung führt dieses Stopp-Ereignis dazu, dass alle noch in der Warteschlange befindlichen Verbalisierungen entfernt werden. Somit wird verhindert, dass das assistierende System weiter Verbalisierungen zu einem Element erzeugt, nachdem der Benutzer es nicht mehr exploriert.

12.5 Empirische Evaluation

Der VAVETaM-Prototyp wurde im Rahmen einer empirischen Studie (Lohmann, Kerzel & Habel, 2012) evaluiert. 13 Studenten der Universität Hamburg haben an der Versuchsreihe teilgenommen. Ihr Durchschnittsalter betrug 24.7 Jahre (Standardabweichung 7.2 Jahre). Die Versuchspersonen verfügten über normale Sehfähigkeiten, trugen aber für die Durchführung des Versuchs eine Augenblende. Nach einer Trainingsphase, um mit haptischen Force-Feedback-Geräten vertraut zu werden, haben die Versuchspersonen eine verbal assistierte haptische Exploration einer Straßenkarte durchgeführt. Die Versuchspersonen wurden darüber informiert, dass sie die Karte im Anschluss an die Exploration reproduzieren sollen. Die Zeit zur Exploration war nicht begrenzt. Durchschnittlich wurde die haptische Karte für 14:16 Minuten exploriert (Standardabweichung 4:46 Minuten). Nach Beendigung der Exploration haben die Versuchspersonen die explorierte Karte als Skizze reproduziert und im Anschluss daran einen Fragebogen zur Benutzbarkeit des Systems ausgefüllt. Die Versuchspersonen haben ihre Zustimmung zu einer Reihe von Aussagen auf einer Likert-Skala von 1 (*Ich stimme voll zu.*) bis 5 (*Ich stimme nicht zu.*) angegeben. Tabelle 12.3 zeigt eine Übersicht der empirischen Ergebnisse.

Frage	Durchschnitt (1 = Ich stimme zu, 5 = Ich stimme nicht zu.)	Standardabweichung
<i>Die haptische Karte ist verständlich.</i>	1.70	0.68
<i>Verbale Assistenzen für solche Karten sind sinnvoll.</i>	1.10	0.32
<i>Die Assistenzen waren verständlich.</i>	2.50	0.97
<i>Die Assistenzen waren hilfreich.</i>	1.70	0.68
<i>Es ist einfach, den Straßen in der Karte zu folgen.</i>	1.50	0.53
<i>Es ist einfach, die Landmarken in der Karte zu finden.</i>	2.90	1.37
<i>Es war verwirrend, dass Assistenzen weitergingen, wenn bereits andere Objekte der Karte exploriert worden sind.</i>	1.80	1.03
<i>Ich wusste für gewöhnlich, auf welches Objekt der Karte sich eine Assistenz bezieht.</i>	1.70	0.48
<i>Das System verhält sich nachvollziehbar.</i>	1.50	0.53

Tabelle 12.3: Empirische Evaluation des VAVETaM-Prototypen.

Die Antworten der Versuchsteilnehmer zeigen, dass die verbale Assistenz während der haptischen Exploration als hilfreich empfunden wurde. Abschließende Interviews mit den Versuchsteilnehmern haben jedoch ergeben, dass auf Grund der genutzten Sprachsynthese Eigennamen zum Teil schwierig zu verstehen waren. Die Benutzbarkeit der haptischen

Repräsentation wurde positiv bewertet. Entscheidend für die Evaluation der Ereigniserkennung ist die Aussage, dass die Benutzer die gegebenen Assistenzen den von ihnen explorierten Objekten zuordnen konnten und dass das Verhalten des Systems von den Benutzern als nachvollziehbar eingestuft wurde. Lediglich der Umstand, dass Assistenzen, sobald sie einmal ausgelöst worden sind, weiterliefen, auch wenn die Exploration bereits an einem anderen Ort fortgesetzt wurde, wurde zum Teil als verwirrend eingestuft. Dies ist jedoch der Architektur der Verbalisierungskomponente geschuldet, welche einen Abbruch oder eine Anpassung einer einmal begonnenen sprachlichen Assistenz nicht zulässt, auch wenn bereits erkannt wurde, dass ein Explorationsereignis beendet wurde.

Der VAVETaM-Prototyp unterstützt den Explorierenden auf Grundlage einer wissensbasierten Ereigniserkennung mit situativer, proaktiver sprachlicher Assistenz. Auch wenn nicht das volle Potential der Ereigniserkennung ausgeschöpft wurde, erweitert es somit den State-of-the-Art im Bereich der verbal-assistierten haptischen Karten.

13 Fallstudie OBSERVINGASSISTANT: Prototyp für verbal assistierte Exploration von Linien-Graphen

Für die Anwendungsdomäne der Linien-Graphen wurde der OBSERVINGASSISTANT als Prototyp für haptische Exploration von Linien-Graphen mit integrierter, regelbasierter Verbalisierungskomponente entwickelt. Der OBSERVINGASSISTANT erzeugt verbale Assistenz basierend auf erkannten Ereignissen und der Wissensbasis über den explorierten Linien-Graphen. Diese Kombination aus haptischen Linien-Graphen und verbaler Assistenz kann numerische Daten für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich machen. Der OBSERVINGASSISTANT übernimmt dabei die Rolle eines proaktiven Assistenten, der die haptische Exploration beobachtet und verbale Hilfestellung zu dem explorierten Graphen gibt.

Der entwickelte Prototyp des OBSERVINGASSISTANT zeigt eine Erweiterung der Ereigniserkennung und der entwickelten Architektur im Kontext der Anwendungsdomäne der Linien-Graphen. Der Prototyp zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

Vorverarbeitung: Der OBSERVINGASSISTANT verfügt über eine umfangreiche Vorverarbeitung. Diese umfasst die Aufbereitung von praxisnahen, plausiblen Datenquellen und die automatisierte Berechnung von relevanten Punkten und Abschnitten des Linien-Graphen, wie zum Beispiel Extrema, Berechnung von Steigungen, lokale Krümmungsmaxima und ähnliche analytisch bestimmbare Elemente eines Linien-Graphen.

Regelbasierte multimodale Interaktion: Die Steuerung der multimodalen Interaktion ist in die bestehenden Komponenten zur Ereigniserkennung integriert. Dazu wird die sprachliche Interaktion, das heißt das Äußern einer verbalen Assistenz, als Ereignis modelliert und in der Historie der Ereignisse archiviert. Verbale Assistenzen werden durch Interaktionsregeln im gleichen regelbasierten System realisiert, welches auch die Erkennung von Ereignissen vornimmt. Die Interaktionsregeln basieren auf erkannten Ereignissen; dies umfasst sowohl die Explorationsereignisse des Benutzers als auch die Historie der verbalen Äußerungen des assistierenden Systems. Das System berücksichtigt bei der Auswahl von verbaler Assistenz also auch bereits gegebene Äußerungen. Dies wird unter anderem genutzt, um Wiederholungen zu vermeiden. Eine Priorisierung von Interaktionsregeln steuert, welche Art von Assistenz bevorzugt gegeben wird.

Integration von Sprachsynthese: Die Interaktionsregeln können den Status der Sprachsynthese abfragen. Eine neue sprachliche Äußerung wird nur begonnen, wenn die vorherige Äußerung bereits abgeschlossen ist.

Dynamischer Aufbau von verbalen Assistenzen: Der Inhalt der sprachlichen Äußerungen wird mittels Template-Schemata zur Laufzeit aus der Wissensbasis über die linien-basierte Graphik generiert. Die Schemata geben Satzbausteine vor, die mittels Informationen aus der Wissensbasis über die linien-basierte Graphik angereichert werden. Eine automatische Abbildung von geometrischen oder numerischen Eigenschaften erfolgt dabei während der

Vorverarbeitung. So werden zum Beispiel automatisch Adjektive (flach, medium-steil, steil) zur Beschreibung eines monoton steigenden Abschnittes des Linien-Graphen berechnet.

Das Verhalten des Systems wird von einem Regelsatz definiert. Nur wenn eine mögliche verbale Assistenz zum aktuellen Zeitpunkt passend ist, sie noch nicht gegeben wurde, sie die höchste Priorität aller möglichen verbalen Assistenzen besitzt und die Sprachsynthese momentan zur Verfügung steht (also nicht bereits mit der Produktion einer anderen Assistenz beschäftigt ist) wird eine sprachliche Assistenz ausgelöst.

Im Folgenden werden die Erweiterungen der Repräsentation der linien-basierten Graphen, der Explorationsereignisse und der Systemarchitektur bis hin zur Assistenz-Generierung vorgestellt.

13.1 Domänenspezifische Erweiterung für linien-basierte Graphiken

Linien-Graphen werden als linien-basierte Graphiken mit gekrümmten Linien modelliert. Der bestehende Formalismus für linien-basierte Graphiken wird mit speziellen Elementen für Linien-Graphen erweitert. Das Ziel der hier vorgestellten domänenspezifischen Erweiterung ist es, ein plausibles Inventar von Elementen zur Beschreibung eines Linien-Graphen zu entwickeln, das sowohl im Rahmen eines Prototyps zur Assistenz-Auslösung als auch der automatisierten Vorverarbeitung genutzt werden kann.³³

Für den OBSERVINGASSISTANT werden im Wesentlichen 2 neue Gruppen von Elementen linien-basierter Graphiken eingeführt: Ein *PointOfInterest* (Graphen-Landmarke) ist ein Punkt auf einer (gekrümmten) Linie, der eine besondere Eigenschaft hat. *PointsOfInterest* werden danach unterteilt, ob sie durch eine manuelle Annotation definiert worden sind, oder ob es sich um einen prominenten Punkt des Linien-Graphen handelt, der mit Mitteln der Numerik bestimmt werden kann, wie zum Beispiel ein Hoch- oder Tiefpunkt. Ein *G-Segment* ist ein Teil eines Linien-Graphen zwischen zwei *PointsOfInterest*. Abhängig davon zwischen welchen Graphen-Landmarken ein G-Segment definiert ist, kann das G-Segment eine spezielle Bedeutung im Linien-Graphen haben, so ist zum Beispiel ein G-Segment zwischen benachbarten Tief- und Hochpunkt eine steigende Flanke. Abbildung 13.1 zeigt einen Überblick der neuen Elemente.

³³ Ein umfangreicheres, auf Korpusanalyse menschlicher Beschreibungen basiertes Inventar zur Repräsentation von Linien-Graphen als Erweiterung der linien-basierten Graphiken ist im Rahmen einer studentischen Arbeit entwickelt worden (Bachler, 2014). Im Rahmen der studentischen Arbeit ist ebenfalls die Integrierbarkeit des Inventars in das vorliegende Rahmenwerk belegt worden.

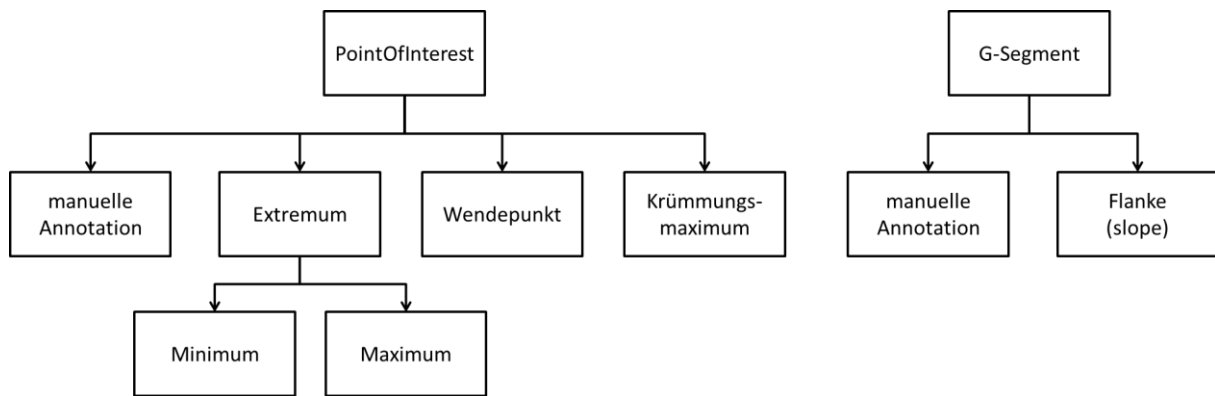


Abbildung 13.1: Elemente von Linien-Graphen als Erweiterung des Formalismus von linien-basierten Graphiken.

13.1.1 Graphen-Landmarke (Point of Interest)

PointsOfInterest (Graphen-Landmarken) werden aus dem Domänen-Punkt (siehe Abschnitt 6.2) abgeleitet. Es gibt verschiedene Typen von Graphen-Landmarken:

Manuelle Annotation: Manuelle Annotationen werden vom Entwickler des haptischen Linien-Graphen angelegt und können besondere Punkte des Linien-Graphen bezeichnen.

Extremata, Wende- und Sattelpunkte: Hoch und Tiefpunkte des Graphen werden während der automatischen Vorverarbeitung des Linien-Graphen automatisch bestimmt. Ein Sonderfall sind Punkte zu Beginn und am Ende des Linien-Graphen sie werden ebenfalls, in Abhängigkeit des benachbarten Extremums, als Hoch- oder Tiefpunkt klassifiziert. Wende- und Sattelpunkte werden ebenfalls automatisch während der Vorverarbeitung erkannt

Krümmungsmaxima: Krümmungsmaxima beschreiben Punkte stärkster lokaler Krümmung auf einem Graphen. Formal entspricht die Krümmung eines Graphen an einem Punkt x als Quotient: $k(x) = \frac{f''(x)}{(1+f'(x)^2)^{\frac{3}{2}}}$. Krümmungsmaxima können an Extremata vorliegen, da hier die

Krümmung besonders stark ist. Sie können aber auch abseits von Extremata auftreten. Krümmungsmaxima entsprechen einem abrupten Wechsel der Steigung, sie sind perceptuell salient und entsprechen einem „Knick“ in einer Flanke eines Graphen. Ein Beispiel für ein Krümmungsmaximum abseits eines Maximums ist in Abbildung 13.2. gezeigt.

Formal werden Graphen-Landmarken über das Prädikat $\text{domainType}(e,t)$ (siehe Abschnitt 6.2) und eine Reihe weiterer Eigenschaften definiert. Tabelle 13.1 zeigt die möglichen Typen für Graphen-Landmarken:

DomainType	Bedeutung
Maximum	Ein Maximum des Linien-Graphen
Minimum	Ein Minimum des Linien-Graphen
Krümmungsmaximum	Ein lokales Maximum der Krümmung welches nicht mit einem Maximum oder Minimum des Linien-Graphen koinzidiert
Turnpoint	Wendepunkt

Tabelle 13.1: Domänentypen von Elementen von Linien-Graphen.

Weitere Eigenschaften werden genutzt, um die Graphen-Landmarken zu beschreiben, die entsprechenden Prädikate sind in Tabelle 13.2 aufgeführt. Durch das Order-Prädikat wird die Abfolge von Graphen-Landmarken gleichen Typs im Graphen repräsentiert, so dass während der Assistenz darauf Bezug genommen werden kann. Durch die qualitativen Positions-Prädikate wird die Position der Elemente in natürlichsprachlichen Begriffen beschrieben, so kann ein Punkt zum Beispiel im oberen Drittel eines Linien-Graphen lokalisiert werden.

Prädikat	Bedeutung
$order(gl, n)$	Die Graphen-Landmarke gl ist die n -te Graphen-Landmarke ihres Typs. $Order(gl_l, 3)$ mit $domainType(gl_l, maximum)$ bedeutet zum Beispiel, dass gl_l das dritte Maximum des Graphen ist.
$qualitativePositionX(gl, qp)$	Die Position auf der X-Achse der Graphen-Landmarke gl hat eine qualitative Positionsbeschreibung qp . Die qualitative Positionsbeschreibung wird während der Vorverarbeitung bestimmt.
$qualitativePositionY(gl, qp)$	Die Position auf der Y-Achse der Graphen-Landmarke gl hat eine qualitative Positionsbeschreibung qp . Die qualitative Positionsbeschreibung wird während der Vorverarbeitung bestimmt.
$manualAnnotation(gl, text)$	Die Graphen-Landmarke gl hat die manuelle Annotation $text$.

Tabelle 13.2: Prädikate zur Beschreibung von Elementen von Linien-Graphen.

13.1.2 Graphen-Segmente

Graphen-Segmente (G-Segment) werden aus dem Domänen-Segment (siehe Abschnitt 6.2) abgeleitet. Sie beschreiben einen Abschnitt eines Linien-Graphen zwischen zwei Punkten des Graphen. In Abhängigkeit des Typs der Punkte können verschiedene Typen von G-Segmenten unterschieden werden: Wird das G-Segment durch zwei manuelle Annotations-Punkte definiert, so entspricht das G-Segment einem manuell annotierten Intervall. Im folgenden Anwendungsszenario wird das G-Segment genutzt, um Flanken (slopes) eines Graphen, das heißt monoton steigende oder fallende Abschnitte eines Graphen, zu modellieren. Flanken

haben folgende Eigenschaften: Sie werden zwischen *zwei unmittelbar benachbarten Maxima* definiert. Für die Komposition von verbaler Assistenz auf Grundlage von Satz-Schemata werden zudem verbale Beschreibungen von *Steigung*, *Grad der Steigung*, sowie ein passendes *Bewegungsverb* festgelegt. Dies geschieht automatisch während der Vorverarbeitung.

13.1.3 Repräsentation eines Beispiel Graphen

Die Erweiterung des Formalismus zu linien-basierten Graphiken für Linien-Graphen wird anhand eines Beispiel-Graphen erläutert. Der in Abbildung 13.2 gezeigte Liniengraph hat 7 Graphen-Landmarken und 4 Flanken (slopes). Die Graphen-Landmarken setzen sich aus 2 Hochpunkten, 3 Tiefpunkten, einem lokalen Krümmungsmaximum und einer manuellen Annotation zusammen. Es ist anzumerken, dass der Graph natürlich über mehr lokale Krümmungsmaxima verfügt, diese sind aber in allen anderen Fällen koinzident zu Maxima des Graphen und werden daher nicht gesondert aufgeführt. Die Tabellen 13.3 und 13.4 zeigen die Eigenschaften der Graphen-Landmarken und Flanken.

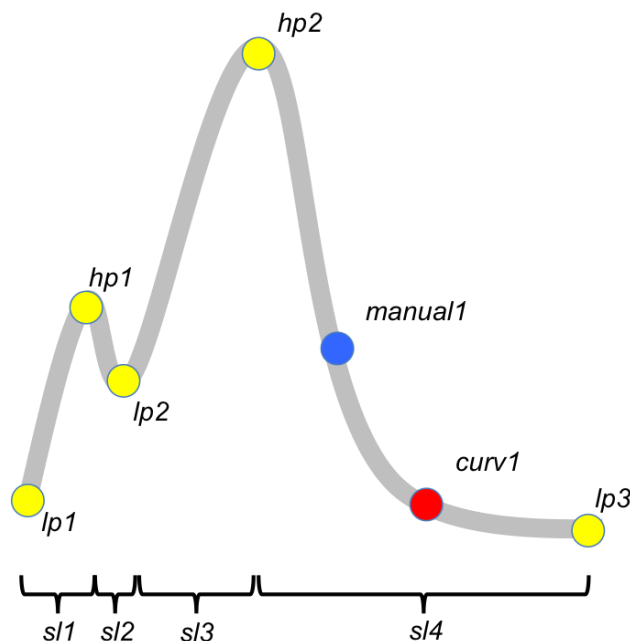


Abbildung 13.2: Beispiel-Liniengraph, unterschiedliche Graphen-Landmarken und Flanken sind annotiert.

PointOf-Interest	Typ	Order	Art des Extremums	Annotation	Lage X-Achse	Lage Y-Achse
lp_1	Tiefpunkt	erster	lokal		erstes Viertel	unteres Drittel
hp_1	Hochpunkt	erster	lokal		erstes Viertel	mittleres Drittel
lp_2	Tiefpunkt	zweiter	lokal		zweites Viertel	mittleres Drittel
hp_2	Hochpunkt	zweiter	global		zweites Viertel	oberes Drittel
lp_3	Tiefpunkt	dritter	global		drittes Viertel	unteres Drittel

$curv_1$	Krümmungsmaximum	erstes			letztes Viertel	unteres Drittel
$manual_1$	Manuelle Annotation	erste		<i>freier Text</i>	letztes Viertel	mittleres Drittel

Tabelle 13.3: Eigenschaften von Graphen-Landmarken zu Beispiel 13.2.

Flanken	Steigung	Grad der Steigung	Qualitative Position
sl_1	steigend	steil	erstes Viertel
sl_2	fallend	steil	erstes Viertel
sl_3	steigend	medium steil	zweites Viertel
sl_4	fallend	medium steil	letztes Viertel

Tabelle 13.4: Eigenschaften von Graph-Segmenten zu Beispiel 13.2.

Zum Beispiel-Graph aus Abbildung 13.2 wird in Abschnitt 13.4 eine Beispielexploration mit der generierten verbalen Assistenz vorgestellt. Die verbale Assistenz gründet auf die in diesem Abschnitt dargestellten Eigenschaften des Graphen, welche automatisch während der Vorverarbeitung erkannt werden.

13.2 Domänenspezifische Erweiterung der Ereignisse

Als Erweiterung zu den bestehenden, nicht domänenspezifischen Explorationsereignissen für linien-basierte Graphiken werden zwei domänenspezifische Explorationsereignisse eingeführt. Die *POI-Exploration* beschreibt die ausgedehnte Exploration einer Graphen-Landmarke (Point of Interest). Das Ereignis wird aus dem Ereignis für die Exploration eines Konfigurationspunktes abgeleitet. Die *GSegmentExploration* beschreibt die ausgedehnte Exploration eines G-Segments eines Graphen und ist wiederum aus der Exploration eines C-Segments abgeleitet. Tabelle 13.5 zeigt diese beiden Explorationsereignisse, zusammen mit den weiteren Bedingungen, welche für ihre Erkennung notwendig sind.

Für die Domäne der Linien-Graphen wurden lediglich typ-spezifische Explorationsereignisse aus bestehenden Explorationsereignissen abgeleitet, anders als bei der Domäne der Straßenkarten war es nicht notwendig, gänzlich neue Explorationsbewegungen zu erkennen, um die für den Prototypen des OBSERVINGASSISTANT gewünschte Funktionalität zu erreichen.

Regel	Grundlegendes Explorationsereignis	Weitere Bedingungen
POIEx	CPEx(p_i)	domainType(p_i , <i>POI</i>)
GSegmentEx	CSegmentEx(s_i)	domainType(s_i , <i>slope</i>)

Tabelle 13.5: Explorationsereignisse von haptischen Linien-Graphen.

13.3 Sprachliche Assistenz des OBSERVINGASSISTANT

Die sprachliche Assistenz des OBSERVINGASSISTANT dient in erster Line dazu, die Fähigkeiten der Ereigniserkennung und der erweiterten Systemarchitektur zu demonstrieren. Der Umfang der sprachlichen Assistenz bezieht sich auf Graphen-Landmarken und Flanken des Graphen. Die Steuerung der Assistenz geschieht regelbasiert, wobei die sprachlichen Assistenzen als Interaktionsereignisse repräsentiert werden.

13.3.1 Umfang der sprachlichen Assistenz

Während der Exploration erhält der Explorierende Auskunft über Art, Reihenfolge, qualitative und quantitative Lage von Graphen-Landmarken. Im Fall von Extrema erhält er zudem Auskunft darüber, ob es sich um ein globales oder ein lokales Minimum beziehungsweise Maximum handelt. Exploriert der Benutzer eine Flanke, wird ihm eine qualitative Information über die Steigung gegeben. Ihm wird mitgeteilt, wann er eine Flanke vollständig exploriert hat. Zudem erhält der Benutzer eine Auskunft über die nächste Graphen-Landmarke, auf welche er beim Fortführen der aktuellen Explorationsbewegung treffen wird. Um die Orientierung in der virtuellen haptischen Umgebung zu erhöhen, wird der Benutzer darüber informiert, wenn er zu einer bereits explorierten Graphen-Landmarke zurückkehrt.

Bei der Zusammenstellung der Assistenz aus Textbausteinen wird außerdem beachtet, welche Bewegung der Benutzer ausführt. Bewegt sich der Benutzer nach oben, wird vom Aufstieg einer Flanke gesprochen, bewegt sich der Benutzer nach unten wird vom Abstieg einer Flanke gesprochen. Ist die Bewegungsrichtung nicht eindeutig festzustellen, weil der Benutzer schnelle Hin-und-her-Bewegungen ausführt oder auf der Stelle steht, wird diese Information weggelassen, es wird einfach von Exploration gesprochen. Diese Art der Assistenz gibt dem Benutzer zwar keine neue Information, sorgt aber dafür, dass der Benutzer die Sicherheit erhält, dass sich das assistierende System auf die aktuelle Exploration des Benutzers bezieht. Hierdurch wird das Alignment (Garrod & Pickering, 2004) zwischen Benutzer und System verstärkt und ein gemeinsamer Kontext geschaffen.

Tabelle 13.6 zeigt eine Übersicht von verbalen Assistenzen in Abhängigkeit von der aktuellen Exploration. Es sind jeweils Beispielassistenzen angegeben, wobei die variablen Satzbausteine unterstrichen sind. Neben dem Explorationsereignis, zu welchem eine Assistenz

gegeben wird, ist zusätzlich eine Salienz angegeben, welche die Priorität der Regeln untereinander beschreibt. Es wird stets zuerst die Regel mit höchster Salienz ausgeführt.

Explorationsereignis	Salienz	Beispiel für Assistenz. Variable Satz-Bausteine, welche aus der Wissensbasis entnommen werden sind <u>unterstrichen</u> .
Exploration einer Flanke bei eindeutig detektierter Bewegungsrichtung	10	<i>You are now <u>descending</u> an overall <u>steep</u> slope.</i>
Vollständige Exploration einer Flanke	9	<i>You fully explored the <u>downward</u> slope.</i>
Exploration einer Flanke	7	<i>You are exploring a <u>steep</u> slope in the <u>first quarter</u> of the graph.</i>
Annäherung an Graphen-Landmarke	2	<i>You approach the <u>second maximum</u> of the graph.</i>
Annäherung an Graphen-Landmarke	1	<i>It is a <u>global maximum</u>.</i>
Wiederholte Exploration eines Extremums	9	<i>This is the <u>global maximum</u> again. This is the <u>second minimum</u> again.</i>
Kurze Exploration eines Extremums	8	<i>You reached the <u>global maximum</u> of <u>133</u>.</i>
Lange Exploration eines Extremums	8	<i>You reached a <u>local minimum</u>.</i>
Lange Exploration eines Extremums	7	<i>It is located in the <u>first quarter</u> of the graph.</i>
Lange Exploration eines Extremums	6	<i>It lies at $x = \underline{42}$.</i>

Tabelle 13.6: Explorationsereignisse von haptischen Liniengraphen.

13.3.2 Erweiterung der Architektur zum Auslösen verbaler Assistenz

Für das Auslösen von verbaler Assistenz wurde die bestehende Architektur erweitert: Die Wissensbasis umfasst nicht nur eine Repräsentation der explorierten linien-basierten Graphik und Explorationsereignisse, sondern auch von Interaktionsereignissen. Der Regelsatz wurde mit Regeln für die Interaktion erweitert. Die Regeln für die Interaktion werden von der gleichen Inferenzmaschine verarbeitet wie die Regeln zur Erkennung von komplexen Ereignissen.

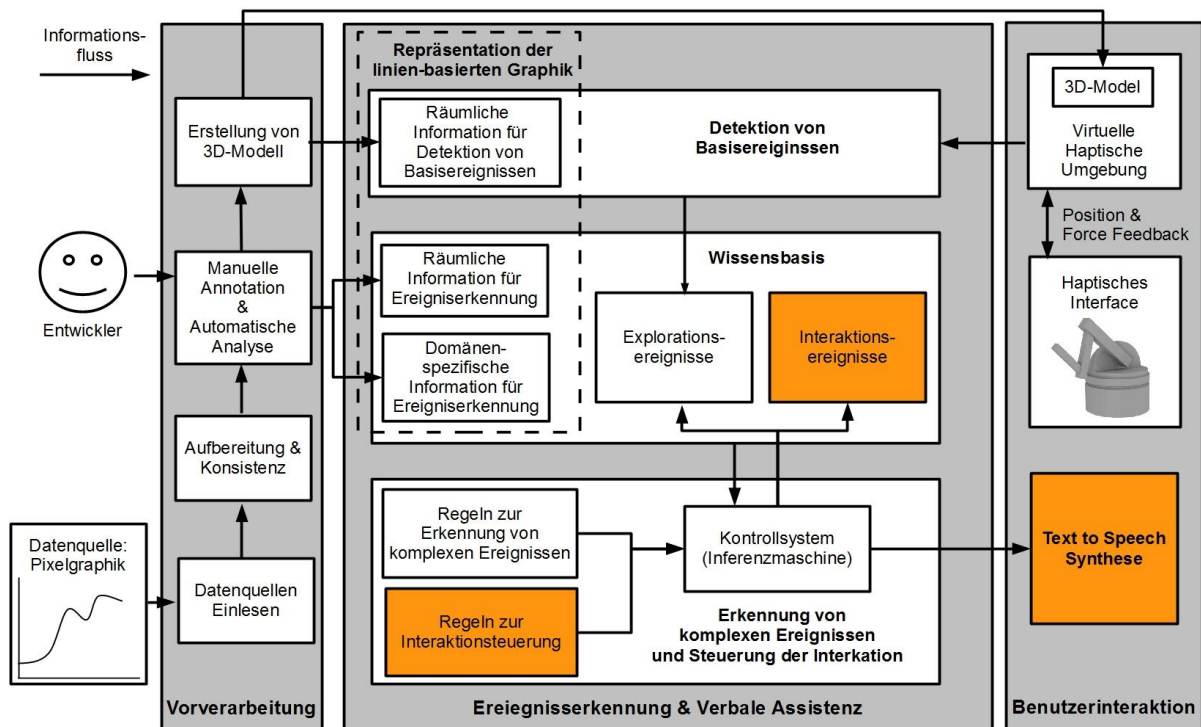


Abbildung 13.3: Erweiterte Architektur der Ereigniserkennung und Assistenzauslösung, neue Systemkomponenten sind hervorgehoben.

Das Auslösen verbaler Assistenz wird von einem Satz von Interaktionsregeln gesteuert. Eine Interaktionsregel verknüpft ein Explorationsereignis oder ein komplexes Muster von Explorationsereignissen mit einer verbalen Assistenz. Dabei stellen die Regelbedingungen der Interaktionsregeln sicher, dass die Assistenz passend zur aktuellen Explorationssituation ist, nicht mit anderen verbalen Assistenzen konfliktiert, im Einklang mit der Historie der bereits gegebenen Assistenzen ist und die Prioritäten der verschiedenen verbalen Assistenzen berücksichtigt. Die Interaktionsregeln werden in den kommenden Abschnitten genauer vorgestellt.

Eine Interaktionsregel wird ausgelöst, wenn alle Vorbedingungen für die Interaktionsregel erfüllt sind und wenn die Interaktionsregel unter allen Interaktionsregeln, deren Vorbedingungen erfüllt sind, die höchste Priorität besitzt. Wenn eine Interaktionsregel ausgelöst wird, wird eine verbale Nachricht auf Basis eines Satz-Schemas mit Hilfe der Wissensbasis über die linien-basierte Graphik zusammengesetzt. Diese verbale Nachricht wird an eine Text-to-Speech-Komponente geschickt und für den Benutzer verbalisiert. Gleichzeitig wird ein Verbalisierungsereignis erstellt und in die Wissensbasis des Systems eingefügt. Das wissensbasierte System merkt sich hierdurch den Verlauf der verbalen Assistenzen um, diesen bei zukünftigen Assistenzen berücksichtigen zu können.

13.3.3 Interaktions-Ereignisse

Interaktionsereignisse repräsentieren die nicht haptische Interaktion zwischen assistierendem System und Benutzer. Verbalisierungsereignisse sind ein spezieller Typ von

Interaktionsereignissen, welche Verbalisierungen des Systems an den Benutzer repräsentieren. Verbalisierungereignisse sind ausgedehnte Ereignisse, welche über einen Startzeitpunkt und Dauer verfügen. Verbalisationsereignisse sind wie folgt definiert:

$\text{verbInteraction}(e, \textit{cause}, \textit{message}, \textit{element})$

Das Verbalisierungereignis e beschreibt die Verbalisierung einer sprachlichen Nachricht an den Benutzer. Die Verbalisierung wurde durch das Explorationsereignis \textit{cause} ausgelöst, welches sich auf das Element der linien-basierten Graphik $\textit{element}$ bezieht³⁴. Die gegebene sprachliche Assistenz ist aus der Kategorie $\textit{message}$. Die Variable $\textit{message}$ speichert also nicht den Wortlaut der verbalen Nachricht, sondern die Kategorie der Assistenz.

13.3.4 Interaktionsregeln

Im OBSERVINGASSISTENT basiert die verbale Assistenz auf einem regelbasierten Ansatz der das Auslösen verbaler Nachrichten regelbasiert steuert und verbale Nachrichten auf Grundlage der Wissensbasis über den explorierten Graphen zusammensetzt. Diese Interaktionsregeln basieren in ihren Bedingungen auf erkannten Explorationsereignissen, der Historie der Interaktion und dem Zustand der Sprachausgabe.

Am Beispiel der Regel zur vorausschauenden Assistenz für die nächste Graphen-Landmarke während der Exploration einer Flanke wird die Funktionsweise von Interaktionsregeln erläutert. Tabelle 13.7 zeigt eine prädikatenlogische Formulierung der Interaktionsregel für vorausschauende Assistenz bei der Bewegung nach links.

Regel	Erläuterung
$\textit{salienz}(2)$	Die Regel hat eine Salienz von 2, d.h. sie besitzt eine niedrige Priorität gegenüber anderen Regeln.
IF	
$\textit{verbalization}(\textit{free})$	Die Text-to-Speech-Komponente des Systems ist nicht mit der Verbalisierung einer anderen Assistenz beschäftigt.
$\textit{moving}(\textit{true})$ $\textit{direction}(\textit{left})$	Der HIP wird aktuell bewegt, die Bewegung geht nach links.
$\textit{GSegmentEx}(e_{\textit{seg}}, \textit{seg}, \textit{true}, _ , _)$	Das Ereignis $e_{\textit{seg}}$ ist ein offenes Explorationsereignis des G-Segments \textit{seg} .

³⁴ Sollen an dem Explorationsereignis mehrere Elemente der linien-basierten Graphik beteiligt sein, so muss ein repräsentatives und eindeutiges Element für dieses Feld gewählt werden. Zweck dieser Angabe ist es, im späteren Verlauf der Exploration ermitteln zu können, welche verbalen Nachrichten zu welchen Elementen gegeben wurden, beziehungsweise abfragen zu können, ob es Elemente gibt, zu welchen noch keine verbalen Nachrichten gegeben worden sind.

<code>pointOfInterest(glm)</code> <code>extremum(glm)</code>	Das Element der linienbasierten Graphik <i>glm</i> ist eine Graphen-Landmarke und es handelt sich um ein Extremum.
<code>leftEndpoint(seg, glm)</code>	Die Graphen-Landmarke <i>glm</i> ist der linke Endpunkt des G-Segmentes <i>seg</i> .
$\neg \exists \text{verbInteraction}(e_{seg}, \text{„foresight_left“})$	Es existiert kein Verbalisierungsereignis, welches durch das Explorationsereignis <i>e_{seg}</i> ausgelöst wurde und eine Nachricht vom Typ <i>foresight_left</i> (Vorausschau, links) enthält.
$\neg \exists \text{PoiEx}(open)$	Es gibt kein offenes Explorationsereignis einer Graphen-Landmarke. (Sollte bereits eine Graphen-Landmarke erreicht sein, oder der Benutzer sich in ihrer unmittelbaren Nähe befinden, greift eine andere Regel.)
THEN	
<code>Modify(Verbalization(buzy))</code>	Die Text-to-Speech-Komponente wird reserviert, d.h. keine andere Verbalisierungsregel kann jetzt mehr ausgelöst werden. Die Text-to-Speech-Komponente setzt ihren Zustand nach Abschluss der Verbalisierung automatisch auf frei (<i>free</i>) zurück.
<code>Insert(VerbInteraction(_ e_{seg}, „foresight_left“, seg))</code>	Es wird ein neues Interaktionsereignis in die Wissensbasis eingefügt: Es hat eine Verbalisierung, ausgelöst durch das Ereignis <i>e_{seg}</i> zum Element <i>seg</i> mit dem Inhalt <i>foresight_left</i> , stattgefunden.
<code>Say(„You approach the “ + glm.getOrder() + glm.getType() + „of the graph.“)</code>	Die Text-to-Speech-Komponente wird angesteuert. Die sprachliche Nachricht wird aus Satzbausteinen und zuvor in der Wissensbasis angelegten Eigenschaften der Graphen-Landmarke zusammengesetzt.

Tabelle 13.7: Beispiel für Interaktionsregel: Vorausschauende Assistenz bei Bewegung nach links.

Zusätzlich zu Wissen über Explorationsereignisse und die linien-basierte Graphik, nutzt die Regel zur Interaktionssteuerung Salienz zur Priorisierung der verbalen Assistenzen, den aktuellen Zustand der Text-to-Speech-Komponente und die Historie der gegebenen verbalen Assistenzen.

Das Beispiel zeigt auch, dass mehrere Regeln notwendig sein können, um eine der in Abschnitt 13.3.1 vorgestellten Assistenzen zu realisieren. So werden zum Beispiel zwei unterschiedliche Regeln für die vorausschauende Assistenz benötigt. Eine Regel für eine Bewegung nach rechts eine andere für die Bewegung nach links.

Generell folgen die Interaktionsregeln einem einfachen Schema, es wird ein Explorationsereignis mit einer verbalen Assistenz verknüpft. Die verbale Assistenz wird aus Satzbausteinen zusammengesetzt, die zum Teil im Rahmen der Vorverarbeitung bei den Elementen der Linien-Graphik angelegt worden sind. Salienz steuert die Priorisierung der Verbalisierungen und eine interne Repräsentation des Verbalisierungsereignisses vermeidet Wiederholungen.

13.4 Anwendungsszenario: Beispiel-Exploration

Das folgende Anwendungsszenario zeigt die Ereigniserkennung und die ausgelöste verbale Assistenz während der haptischen Exploration eines Linien-Graphen durch den OBSERVINGASSISTANT. Das vorgestellte Beispiel stammt aus einer lauffähigen Implementation des OBSERVINGASSISTANT, (Kerzel, Alacam, Habel & Acartürk, 2014). Die verbalen Äußerungen werden in der bestehenden Implementation in englischer Sprache generiert. Die Exploration und die vom OBSERVINGASSISTANT gegebene verbale Assistenz kann in 5 Schritte gegliedert werden:

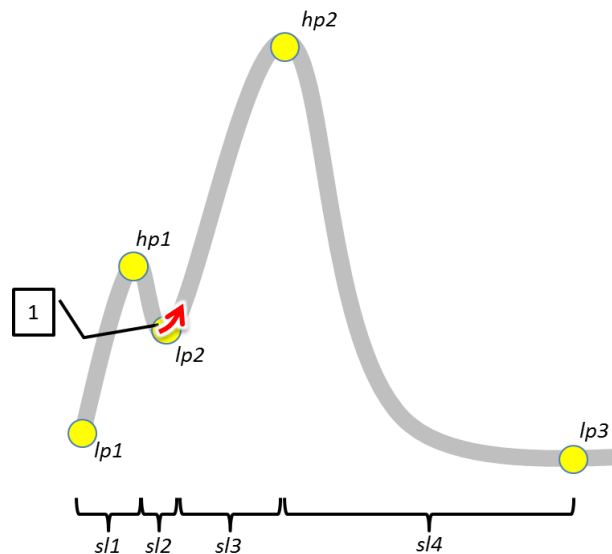


Abbildung 13.4: Erste Phase der Exploration des Beispielgraphen: Beginn des Aufstiegs der Flanke sl_3 ausgehend vom Tiefpunkt lp_2 .

Phase 1: Zum Beginn der haptischen Exploration ist der haptische Interfacepunkt am unteren Ende der Flanke sl_3 positioniert. Die Positionierung des haptischen Interaktionspunktes in der Flanke wird als ein Basisereignis detektiert. Die Ereigniserkennung verarbeitet dieses Basisereignis weiter zu einem ausgedehnten Explorationsereignis der Flanke sl_3 und fügt es in die Wissensbasis der Ereignisse ein. Dieses Ereignis löst verbale Assistenz zur aktuellen Position des haptischen Interaktionspunktes in der explorierten Flanke aus: „*Du explorierst eine steile Flanke im ersten Viertel des Graphen*“.

Die Position des haptischen Interaktionspunktes im Tiefpunkt lp_2 wird ebenfalls als ein Basisereignis detektiert und unter das laufende Explorationsereignis der Flanke sl_3 subsumiert (siehe Kapitel 8).

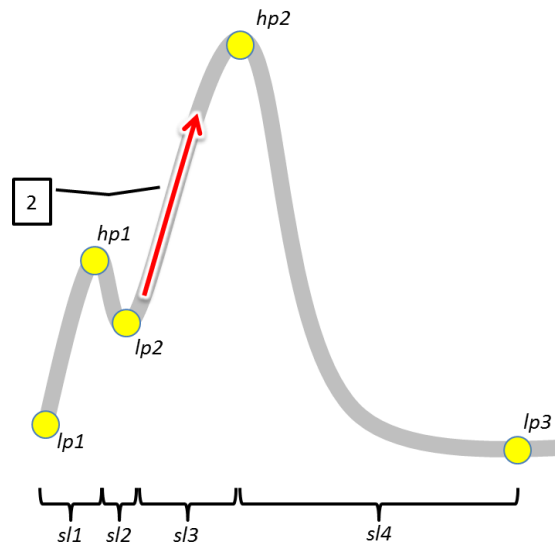


Abbildung 13.5: Zweite Phase der Exploration des Beispielgraphen: Aufstieg der Flanke $s/3$.

Phase 2: Der Benutzer beginnt eine rechtsgerichtete Aufwärtsbewegung entlang der Flanke $s/3$. Die Bewegung wird, einschließlich ihrer Richtung, als ein Basisereignis detektiert. Die Ereigniserkennung nutzt dieses Basisereignis zusammen mit dem laufenden Explorationsereignis von Flanke $s/3$ um die nächste Graphen-Landmarke zu bestimmen, auf die der Benutzer den HIP zubewegt. Es handelt sich dabei um den Hochpunkt hp_2 . Durch diese Berechnung wird eine vorausschauende Assistenz ausgelöst: „Du nährst dich dem zweiten Maximum des Graphen. Es ist ein globales Maximum mit einer Höhe von $Y=123$ “.

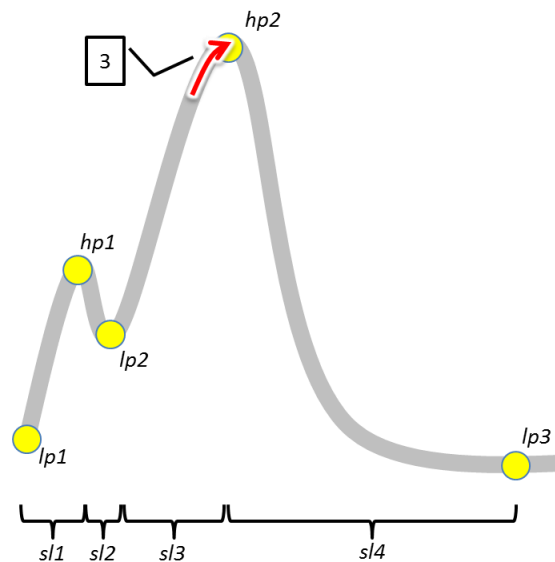


Abbildung 13.6: Dritte Phase der Exploration des Beispielgraphen: Erreichen des globalen Hochpunktes hp_2 .

Phase 3: Der Benutzer erreicht den Hochpunkt hp_2 , ein entsprechendes Basisereignis wird detektiert. Dieses Basisereignis wird, ebenso wie die Exploration von Tiefpunkt lp_2 , unter die laufende Exploration der Flanke $s/3$ subsumiert. Die Ereigniserkennung schließt, dass beide

Endpunkte der Flanke ls_3 exploriert worden sind und somit die Exploration der Flanke vollständig abgeschlossen wurde. Eine entsprechende Assistenz wird ausgelöst: „*Du hast die steile Flanke vollständig exploriert*“.

Gleichzeitig wird ein Explorationsereignis für den Hochpunkt erkannt. Intern werden Graphen-Landmarken als ausgedehnte Bereiche modelliert (siehe Kapitel 6), auf diese Weise kann erkannt werden, dass der Benutzer eine Folge kleiner Bewegungen in der Nähe einer Graphen-Landmarke ausführt, was eine typische haptische Explorationsbewegung für einen Punkt ist. Eine Interaktionsregel auf Grundlage eines Timers kann erkennen, dass der Benutzer eine Graphen-Landmarke exploriert, und nicht nur passiert. Die Regel wird aktiv, wenn die Exploration der Graphen-Landmarke mehr als 2 Sekunden anhält. Diese Bedingung ist im Anwendungsszenario erfüllt und dem Benutzer werden weitere Informationen zum Hochpunkt gegeben: „*Dies ist ein globales Maximum von $X=94$* “.

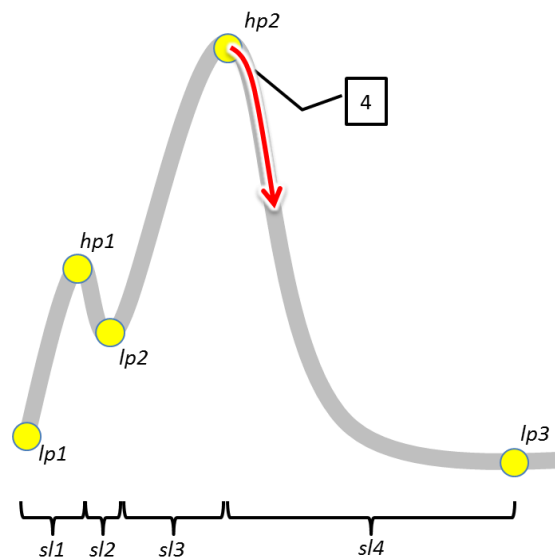


Abbildung 13.7: Vierte Phase der Exploration des Beispielgraphen: Abstieg der Flanke sl_4 ausgehend vom Hochpunkt hp_2 .

Phase 4: Der Benutzer bewegt sich über den Hochpunkt hinaus und die folgende Flanke hinab. Das Basisereignis des Verlassens der Hochpunktes hp_2 und Betreten der Flanke sl_4 wird detektiert. Ein ausgedehntes Explorationsereignis der Flanke sl_4 wird erkannt und der Wissensbasis hinzugefügt. Zusammen mit dem Wissen über die Bewegungsrichtung (rechtsgerichtet) wird folgende Assistenz ausgewählt: „*Du steigt eine sehr steile Flanke ab.*“

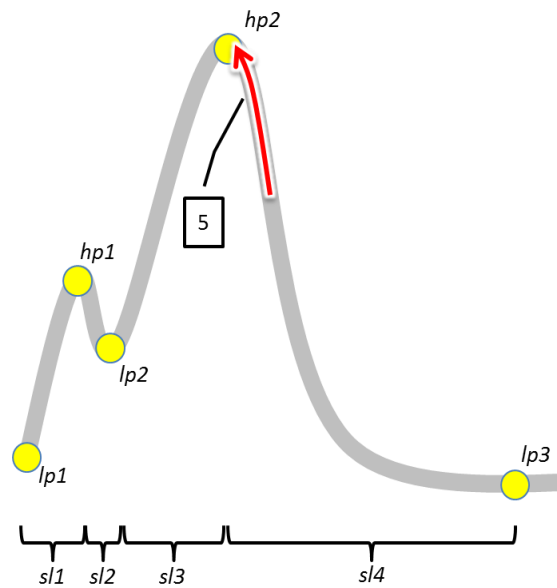


Abbildung 13.8: Fünfte Phase der Exploration des Beispielgraphen: Umkehr auf Flanke sl_4 und Rückkehr zum Hochpunkt hp_2 .

Phase 5: Der Benutzer stoppt den Abstieg und bewegt den HIP zurück zum Hochpunkt hp_2 . Eine Veränderung der Bewegung wird als Basisereignis erkannt. Wenn der Benutzer den Hochpunkt erreicht, ist die Exploration der Flanke sl_4 nicht abgeschlossen, da nur einer der Endpunkte exploriert wurde. Erneut wird eine Exploration des Hochpunktes hp_2 erkannt. Auf Grundlage des Gedächtnisses vergangener Explorationsereignisse kann das System eine passende Assistenz auswählen: „Dies ist wieder der zweite Hochpunkt des Graphen.“

	Explorations-Bewegung	Beobachtete Ereignisse	Erkannte Ereignisse	Assistenz (engl. Original)	Assistenz
1	Start der Exploration am lokalen Minimum lp_2	Betreten von Flanke sl_3 & lp_2	Exploration von Flanke sl_3 und Tiefpunkt lp_2	<i>You are exploring a very steep slope in the first quarter of the graph.</i>	<i>Du explorierst eine steile Flanke im ersten Viertel des Graphen</i>
2	Aufwärtsbewegung entlang von Flanke sl_3	Bewegungsereignis (aufwärts, rechts)	Bewegung in Richtung von Hochpunkt hp_2	<i>You approach the second maximum of the graph. It is the global maximum.</i>	<i>Du nährst Dich dem zweiten Maximum des Graphen, es ist das globale Maximum.</i>
3	HIP erreicht das Maximum hp_2	Betreten von hp_2	Vollständigkeit der Exploration von Flanke sl_3	<i>You fully explored the upward slope.</i>	<i>Du hast die Aufwärtsflanke des Graphen</i>

			Exploration von Maximum hp_2 (mit Timer)	<i>You reached the global maximum of 94.</i>	<i>vollständig exploriert.</i>
4	Abwärtsbewegung entlang Flanke sl_4	Verlassen von hp_2 , Betreten von sl_4	Exploration von sl_4 (zusammen mit Wissen über Bewegungsrichtung)	<i>You are now descending a steep slope.</i>	<i>Du steigst nun eine steile Flanke hinab.</i>
5	Stopp und Umkehr der Bewegungsrichtung, Betreten von Maximum hp_2	Bewegungsereignis (aufwärts, links) Betreten von hp_2	Exploration von Flanke sl_4 unvollständig Erneute Exploration von Hochpunkt hp_2	<i>This is the global maximum again.</i>	<i>Dies ist wieder das globale Maximum.</i>

Tabelle 13.5: Beispiel Exploration: Erkannte Explorationsereignisse und verbale Assistenz.

Tabelle 13.5 fasst die erkannten Ereignisse und die gegebene Assistenz zusammen. Die Beispielexploration zeigt mehrere Features des OBSERVINGASSISTANT:

Reaktion auf aktuelle Position: Der OBSERVINGASSISTANT kann auf die aktuelle Position der haptischen Exploration reagieren und verbale Assistenz zum aktuell explorierten Objekt geben. Dies geschieht zum Beispiel in Phase 1.

Vorausschauende Assistenz: Die Analyse von Bewegungsrichtung und aktueller Position kann genutzt werden, um vorausschauende Hinweise zu geben, die zum Beispiel Graphen-Landmarken betreffen, auf welche sich der Benutzer zubewegt. Der Vorteil vorausschauender Assistenzen ist, dass der Benutzer auf die kommende haptische Exploration vorbereitet wird. Ein Beispiel für vorausschauende Exploration findet sich in Phase 2.

Zeitverzögerte Assistenz: Als Gegenstück zur vorausschauenden Assistenz, welche vor der eigentlichen Exploration eines Elementes Informationen über dieses gibt, wird eine zeitverzögerte Assistenz erst dann gegeben, wenn eine Exploration eines Elementes eine festgelegte Mindestdauer überschritten hat. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass der Benutzer das betreffende Element auch tatsächlich intensiv exploriert. Ein Beispiel findet sich in Phase 3. Würde der Hochpunkt nur flüchtig passiert werden, würde eine einfache ortsbasierte Assistenz ausgelöst werden, da der Benutzer aber an diesem Punkt verweilt, wird eine umfangreichere Assistenz mit der genauen Position des Punktes gegeben. Es ist zu beachten, dass die Zeitmessung für die zeitverzögerte Assistenz bereits dann beginnt, wenn der Hochpunkt betreten wird, auch wenn auf Grund der Priorisierung der Assistenzen zunächst andere Informationen verbalisiert werden.

Gedächtnis der Exploration: Ein Rückgriff auf das Gedächtnis der Exploration führt zu anderen Assistenzoptionen bei erneuter Exploration gleicher Elemente der linienbasierten Graphik. Dies hat zum Ziel, dass dem Benutzer ein haptisches Wiedererkennen bereits

explorierter Elemente erleichtert werden soll. So wird der Benutzer in Phase 5 darauf hingewiesen, dass er den aktuell explorierten Hochpunkt erst kurz zuvor exploriert hat.

13.5 Evaluation

Der OBSERVINGASSISTANT dient als Prototyp in erster Linie als *Proof of Concept* für die entwickelten Formalismen und die Erweiterung der Systemarchitektur. Der Fokus liegt auf der Integration von Ereigniserkennung und Assistenzgenerierung, der Repräsentation und Steuerung von Interaktion als Ereignisse innerhalb eines regelbasierten Systems sowie der Nutzung von Wissen über die linien-basierte Graphik, um verbale Assistenz aus Textbausteinen zusammensetzen. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass sowohl die Wissensbasis über den Linien-Graphen als auch die Erstellung von haptischen Graphen aus plausiblen Quellenmaterial möglich ist.

Die gegebenen verbalen Assistenzen sind plausibel gestaltet, aber nicht auf der Grundlage empirischer Erhebungen entwickelt. Es ist auch nicht Ziel gewesen, eine Anwendung zu entwickeln, deren verbale Assistenz empirisch evaluiert wird. Es ist aber gezeigt worden, dass die Erweiterung der Systemarchitektur für die Generierung verbaler Assistenz möglich ist und dass das bestehende Rahmenwerk und der Formalismus für Ereigniserkennung und linien-basierte Graphiken an neue Domänen adaptiert werden können. Eine Demonstration des lauffähigen Systems wurde erfolgreich vor Fachpublikum vorgeführt (Kerzel, Alacam, Habel & Acartürk, 2014). Eine ebenfalls erfolgreiche empirische Evaluation der haptischen linien-basierten Graphiken wurde bereits in Kapitel 11 vorgestellt.

Der OBSERVINGASSISTANT erweitert den bestehenden State-of-the-Art zu verbal assistierter Exploration haptischer Linien-Graphen durch die Möglichkeit, proaktive und situative verbale Assistenz zu geben. So sind unter anderem Vorausschau auf kommende Elemente des Linien-Graphen und Rückgriffe auf bereits explorierte Elemente möglich. Die entwickelte Systemarchitektur bietet durch Modellierung von Interaktionsereignissen die Grundlage für dialogartige Interaktionsparadigmen in denen die verbalen Reaktionen des Systems sowohl auf dem gemeinsamen Kontext der haptischen Exploration als auch auf den bereits gegebenen Systemäußerungen basieren.

14 Konklusion

14.1 Zusammenfassung der Arbeit

Es gibt einen Bedarf, räumliche Informationen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich zu machen. Beispiele für solche Informationen sind Linien-Graphen, Karten und Abbildungen zur Geometrie. Die Möglichkeiten hierzu sind eingeschränkt: Sprachliche Beschreibungen der räumlichen Informationen sind aufwändig zu erstellen und umständlich in ihrer Benutzung. Taktile Darstellungen auf geprägtem Papier sind aufwändig zu produzieren, nicht interaktiv und auf Grund ihrer geringen Auflösung und des eingeschränkten Darstellungsumfang ebenfalls nicht immer eine zufriedenstellende Lösung.

Virtuelle haptische Darstellungen, welche mittels Force-Feedback-Geräten exploriert werden können, schaffen eine weitere Zugangsmöglichkeit zu räumlichen Informationen für blinde oder sehbehinderte Menschen. Virtuelle haptische Darstellungen können interaktiv sein und sie können vor allem automatisiert aus einer geeigneten Datenquelle erstellt werden. Aber auch diese Darstellungen sind durch den beschränkten Arbeitsbereich und die möglichen gestalterischen Mittel gegenüber visuellen Darstellungen defizitär. Durch die Ein-Punkt-Exploration, welche Force-Feedback-Geräte erlauben werden Probleme sogar verschärft (siehe Kapitel 3).

Eine Lösung für dieses Problem ist die Nutzung multimodaler Assistenz während der Exploration. Verschiedene empirische Arbeiten in der Literatur haben gezeigt, dass durch multimodale Assistenz eine signifikante Verbesserung der Exploration erzielt werden kann. Die Literatur zeigt ebenfalls ein großes Spektrum an möglichen sprachlichen Assistenzen auf, welche dem Benutzer während der Exploration helfen können. Hierdurch entsteht jedoch ein neues Problem: Je mehr Arten von Assistenz zur Verfügung stehen, und je umfangreicher diese Assistenzen ausfallen, desto besser kann ein System einen Benutzer potentiell unterstützen. Aber der Benutzer darf nicht von unnötigen Informationen überfordert werden. Der Benutzer darf nicht zu viel Zeit verbrauchen, alle verfügbaren Informationen anzuhören, insbesondere dann, wenn diese Informationen eventuell gar nicht benötigt werden. Es muss daher eine sorgfältige Auswahl der sprachlichen Assistenzen getroffen werden. Die sprachliche Assistenz muss passend zur Exploration des Benutzers sein und seinen Bedürfnissen entsprechen.

Ideal ist ein Assistent, der sich wie ein intelligenter, proaktiver Partner dem Explorierenden gegenüber verhält und die Informationsbedürfnisse des Explorierenden antizipiert. Genau für diese Herausforderung schafft eine wissensbasierte Erkennung von Explorationsereignissen neue Möglichkeiten: Ein assistierendes System auf Grundlage einer Ereigniserkennung kann die haptische Exploration beobachten und im Kontext der gesamten vergangenen Exploration und auch der bereits gegebenen Assistenz Hilfestellung geben.

Ein Rahmenwerk für ein assistierendes System auf der Grundlage von Ereigniserkennung ist in dieser Arbeit vorgestellt worden. Es ist nicht Ziel der Arbeit gewesen, bestehende haptische Assistenzsysteme in der Art der haptischen Darstellung, dem Umfang der Assistenz oder der empirischen Evaluation zu übertreffen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Möglichkeit aufzuzeigen, Ereigniserkennung zu realisieren und auf dieser Basis Assistenz auszulösen oder aus Satzbausteinen zu generieren. Diese Möglichkeit wurde mit den in Kapitel 11 und 12 vorgestellten Prototypen positiv evaluiert.

Zusammengefasst stellt diese Arbeit die Forschungsfrage: *Wie kann multimodale haptische Interaktion effizienter gestaltet werden?* Die Antwort auf diese Frage ist: *Eine wissensbasierte Erkennung komplexer Explorationsereignisse während der haptischen Exploration ermöglicht eine informierte Auswahl von situativer sprachlicher Assistenz und erweitert hierdurch den State-of-the-Art multimodaler haptischer Repräsentationen.*

14.2 Resultate

Der Fokus dieser Arbeit ist die wissensbasierte Ereigniserkennung während der haptischen Exploration von linien-basierten Graphiken mit dem Ziel der Auslösung und Generierung verbaler Assistenz. Dazu wurde ein System konzipiert und entwickelt welches in empirischen Studien einsetzbar ist. Die Resultate umfassen:

- Entwicklung einer Architektur für ein ereignisbasiertes assistierendes System.
- Automatische Erstellung der haptischen Repräsentationen und Software zur haptischen Exploration unter Nutzung handelsüblicher Forcefeedback-Geräte.
- Entwicklung einer Wissens-Repräsentation für linien-basierte Graphiken mit der Möglichkeit diese auf Anwendungsdomänen zu erweitern.
- Automatische Erstellung einer Wissensbasis über die linien-basierte Graphik aus Datenquellen und mit Hilfe von automatisierten Analyse-Methoden.
- Entwicklung einer Wissens-Repräsentation für haptische Explorationsereignisse bei der Erkundung linien-basierter Graphiken, ebenfalls mit der Möglichkeit diese auf Anwendungsdomänen zu erweitern.
- Erkennung von Explorationsereignissen durch inkrementellen Aufbau von Ereignissen. Dies wurde in einem regelbasierten Ansatz umgesetzt.
- In Prototypen verifizierte Integration von externen Verbalisierungskomponenten in die bestehende Systemarchitektur.

- In Prototypen verifizierte Erweiterung der bestehenden Systemarchitektur zur Generierung verbaler Assistenz auf Grundlage der Wissensbasis über die explorierte linien-basierte Graphik.

Damit wird der bestehende State-of-the-Art zu verbal assistierten haptischen Repräsentationen, insbesondere im Bereich der Straßenkarten und Linien-Graphen durch eine leistungsfähige Ereigniserkennung erweitert. Durch die Möglichkeit, komplexe Explorationsereignisse zu erkennen, dass sprachliche Assistenz nicht nur durch die Berührung von Objekten in der virtuellen haptischen Umgebung ausgelöst wird, sondern es können auch komplexe Explorationsereignisse zur Steuerung der Interaktion zwischen dem explorierenden Benutzer und dem assistierenden System genutzt werden. Die Möglichkeiten dieser Option sind vielfältig: Das System kann den Benutzer auf noch nicht explorierte Objekte hinweisen, es kann in seinen Beschreibungen aber auch sicherstellen, dass räumliche Relationen in Bezug zu bereits explorierten Elementen beschrieben werden. Das assistierende System kann versuchen, vorausschauende Assistenz zu geben, in dem es dem Benutzer Informationen über Objekte gibt, auf die er bei anhaltender Explorationsbewegung stoßen wird. Selbst in den Formulierungen der sprachlichen Assistenz kann auf die genauen Explorationsbewegungen eingegangen werden, um dem Benutzer zu vermitteln, auf welchen Abschnitt einer Exploration sich eine sprachliche Assistenz bezieht. Die ereignisbasierte sprachliche Assistenz erlaubt neue Interaktionsparadigmen zwischen System und Benutzer, die bis hin zu einem Dialogsystem gehen.

Ein Großteil der Resultate dieser Arbeit ist in den Bereich der symbolischen Wissensverarbeitung einzuordnen. Dazu zählen die entwickelten Repräsentationen für linien-basierte Graphiken und Explorationsereignisse, Systemarchitektur und Regeln zur Ereigniserkennung. Es ist ebenfalls gezeigt worden, dass der algorithmische Aufbau haptischer Repräsentationen aus verschiedenen Datenquellen nicht nur möglich ist, sondern auch die Grundlage der für die Ereigniserkennung notwendige Wissensbasis schafft. Als konkrete Ergebnisse haben sich hieraus ergeben:

- Der VAVETaM-Prototyp zur verbal assistierten haptischen Exploration von Straßenkarten in Kooperation mit Lohmann (Lohmann, Kerzel & Habel, 2012), der erfolgreich empirisch evaluiert wurde.
- Der OBSERVINGASSISTANT als Prototyp für verbal assistierte Exploration von Linien-Graphen, welcher erfolgreich vor Fachpublikum demonstriert wurde (Kerzel, Alacam, Habel & Acartürk, 2014).
- Zwei Teilprogramme zur Generierung von haptischen Straßenkarten beziehungsweise haptischen Linien-Graphen aus typischen Datenquellen (geographischen Informationssystemen beziehungsweise Pixelbildern), welche unabhängig vom Rahmenwerk in empirischer Forschung eingesetzt worden sind.

- Ein lauffähiges Rahmensystem, das an spezielle Anwendungsdomänen angepasst werden kann. Der regelbasierte Mechanismus ist einfach zugänglich und kann auch von Wissenschaftlern und Entwicklern anderer Fachrichtungen nachvollzogen werden.

14.3 Ausblick

Die vorgestellte Arbeit hat ihr Ziel, die Konzeption und Realisierung von Wissensverarbeitung zur Erkennung von komplexen Ereignissen während der haptischen Exploration von linien-basierten Graphiken, erreicht. Es ist ein Rahmenwerk entstanden, aus dem zwei Prototypen hervorgegangen sind. Aus diesem Stand der Arbeit ergeben sich neue Forschungsfragen und Möglichkeiten für Forschungsprojekte:

14.3.1 Empirische Forschung in konkreten Anwendungsdomänen

Mit der entstandenen Systemarchitektur ist die Grundlage für weiterführende Forschung zur verbalen Assistenz in konkreten Anwendungsdomänen gelegt. Die verbale Assistenz für eine konkrete Anwendungsdomäne zu entwickeln, die Möglichkeiten der Ereigniserkennung auszuloten und die Resultate dieser Forschung empirisch zu evaluieren ist ein möglicher Ausblick dieser Arbeit.

Domänenspezifische Forschungsfragen umfassen die Analyse von domänenspezifischem Explorationsverhalten, sprachlichen Beschreibungen der Anwendungsdomäne und iterative Verbesserung der Interaktion durch Entwicklung und Evaluation von Prototypen. Dies sind keine rein informatischen Forschungsfragen, sie umfassen Fragestellungen, die ebenso in den Kommunikations- und Kognitionswissenschaften untersucht werden können. Die vorgelegte Arbeit stellt ein Rahmenwerk hierfür zur Verfügung. Anforderungen an das assistierende System, die Ereigniserkennung und die Wissensverarbeitung, die sich aus entsprechenden Ideen und Designzielen ergeben, können wiederum zu Weiterentwicklungen der informatischen Anteile eines solchen Projektes führen.

Gegenwärtig wird an der Entwicklung eines Systems zur verbal-assistierten Exploration von haptischen Liniengraphen auf Grundlage einer Korpusanalyse von Graphenbeschreibungen gearbeitet (Acartürk, Alaçam & Habel, 2014).

14.3.2 Dialog zwischen Benutzer und assistierendem System

Als ein mögliches Interaktionsparadigma zwischen explorierendem Menschen und assistierendem System ist in Kapitel 3 ein Dialogsystem vorgeschlagen worden. Bestehende Systeme zur verbal assistierten haptischen Exploration nutzen bereits Eingaben des Benutzers durch Druck von Tasten oder ähnliche Aktionen, aber es existiert noch kein System, das einen Dialog (in natürlicher Sprache) realisieren kann. Im Rahmen eines solchen Dialogs könnte ein Benutzer konkrete Fragen an das System stellen, um noch gezieltere Assistenz zu erhalten.

Eine leistungsstarke Ereigniserkennung mit der Möglichkeit die Interaktion zwischen System und Benutzer als Interaktionsereignisse zu repräsentieren und Schlüsse hierüber zu ziehen, kann als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines dialogbasierten Systems genutzt werden.

14.3.3 Aufbau eines Benutzermodells

Der Aufbau einer Repräsentation der haptischen Exploration eines Benutzers kann bereits als ein Benutzermodell angesehen werden. Implizit wird die Annahme getroffen, dass ein Benutzer weiß, welche Explorationsbewegungen er durchgeführt hat und gegebene Assistenz entsprechend zuordnen kann. Außerdem wird angenommen, dass ein Benutzer sukzessiv einzelne Teile der haptischen Repräsentation exploriert und zu einem kohärenten Modell zusammensetzt. Daher ist es sinnvoll, den Benutzer zum Beispiel darauf hinzuweisen, wenn er eine linien-basierte Graphik vollständig exploriert hat, oder wenn noch einzelne Bereiche exploriert werden sollten. Ein Benutzermodell kann aber noch weiter gehen. Zum einen kann auf individuelle Bedürfnisse des Benutzers in Bezug auf die Domäne eingegangen werden. In der Anwendungsdomäne der Straßenkarte kann es zum Beispiel sinnvoll sein, die Assistenz an die Mobilität und Sehfähigkeit des Benutzers anzupassen: Ist der Benutzer zu Fuss unterwegs oder nutzt er öffentliche Verkehrsmittel? Ist der Benutzer blind oder besitzt er eine Restsehfähigkeit? Was sind generelle persönliche Vorlieben des Benutzers, auf welche Arten von Geschäften soll das System hinweisen? All diese Fragen können im Vorfeld der Exploration geklärt werden und helfen, sprachliche Assistenz besser auf den individuellen Benutzer zuzuschneiden.

Während der Exploration kann ein verfeinertes Benutzermodell aufgebaut werden, indem nicht nur beobachtet wird, was der Benutzer exploriert hat und welche Assistenzen gegeben worden sind, sondern Annahmen darüber getroffen werden, welches Wissen der Benutzer tatsächlich erworben hat. Dazu kann zum Beispiel die Häufigkeit und Länge der Exploration einzelner Teile einer linien-basierten Graphik ausgewertet werden. Mit diesem Wissen kann die sprachliche Assistenz weiter verfeinert werden.

14.3.4 Inkrementelle Generierung von verbaler Assistenz

Bei der Evaluation des VAVETaM-Prototypen (Lohmann, Kerzel & Habel, 2012) hat sich gezeigt, dass das Fortsetzen der verbalen Assistenz zu einem Element der linien-basierten Graphik, zu einem Zeitpunkt wenn der Benutzer die Exploration dieses Elements bereits beendet hat, als verwirrend empfunden werden kann. Dies ist ein Problem auf der Ebene der Assistenzgenerierung. Die Ereigniserkennung kann das Beenden eines Explorationsereignisses zuverlässig erkennen und diese Information an die Verbalisierungskomponente weitergeben. Eine einmal begonnene verbale Assistenz kann als Reaktion darauf natürlich einfach abgebrochen werden. Eine bessere Lösung wäre es, analog zum Verhalten von menschlichen Sprechern, Korrekturen und spontane Änderungen zu nutzen, um auf die veränderte Situation zu reagieren. Diese Aufgabe fällt in den Bereich der inkrementellen Sprachverarbeitung, siehe u.a. Baumann (2013).

14.3.5 Adaption des Systems an taktile Karte auf Touchpad

Bei der Analyse der Literatur zu multimodal assistierten haptischen Explorationen wurden für die haptische Realisierungen vor allem zwei Möglichkeiten gewählt: Entweder wurden haptische Darstellungen in virtuellen Umgebungen mit Force-Feedback-Geräten exploriert, oder es wurden geprägte taktile Darstellungen auf einem Touchpad genutzt. Der Vorteil der geprägten taktilen Darstellungen ist, dass sie nicht nur mit einem einzelnen haptischen Interfacepunkt sondern flächig mit beiden Händen oder zumindest mit mehreren Fingern erkundet werden können. Eine Ereigniserkennung für eine derartige Exploration stellt nicht nur die Herausforderung eine Mehrpunktexploration zu analysieren, sondern lässt möglicherweise neuartige Explorationsmuster beobachten, welche nur mit mehreren Fingern möglich sind.

Die Konzeption des ereigniserkennenden Systems ist generell darauf ausgelegt, parallel ablaufende Explorationsereignisse zu erkennen. Mit einer Adaption auf die Analyse einer Mehrpunktexploration ist es daher nicht notwendig, die Systemarchitektur und die Konzeption von Wissensbasis und Explorationsereignissen wesentlich zu verändern. Trotzdem müssten neue Regeln zur Ereigniserkennung entwickelt und getestet werden.

14.3.6 Produktreife Anwendungen für blinde und sehbehinderte Menschen

Die vorgelegte Arbeit zeigt plausible und funktionierende Verarbeitungsabläufe von einer gegebenen Datenquelle bis hin zur verbal assistierten Exploration auf. Die entstandene Software löst die dabei anfallenden informatischen Fragen: Wie können Daten eingelesen und analysiert werden, wie wird eine haptische Repräsentation erstellt, wie wird eine Wissensbasis aus Informationen der Datenquelle und mit Hilfe von Analysemethoden aufgebaut? Jedoch sind die entstandenen Softwarekomponenten immer noch auf sehende Benutzer ausgelegt, die Dateien kopieren und Menues bedienen. Für die Durchführung von empirischen Versuchen ist dies kein Hindernis. Trotzdem kann es als eine wissenschaftliche Herausforderung angesehen werden, Prototypen zu entwickeln, die von blinden und sehbehinderten Menschen im Alltag ohne fremde Hilfe genutzt werden können.

Eine solche Weiterentwicklung erfordert es, sich intensiv mit den Möglichkeiten nicht visueller Mensch-Computer-Interaktion auseinander zu setzen und insbesondere auf mögliche Endnutzer entsprechender Programme zuzugehen, ihre Wünsche und Bedürfnisse zu analysieren und mit ihrer Hilfe Anwendungen zu entwickeln, die nicht nur einen hohen Grad an Benutzbarkeit aufweisen, sondern auch tatsächlich für konkrete, alltägliche Situationen eingesetzt werden können.

Vielleicht können die in dieser Arbeit entwickelten Konzeptionen auf diese Weise dazu beitragen die alltägliche Interaktion blinder und sehbehinderter Menschen mit Computern zu erleichtern.

15 Appendix A: Introduction to the rule language Drools

This appendix is taken from the technical report *Rule Patterns for Event Recognition during the Exploration of Line-Based Graphics in Virtual Haptic Environments* (Kerzel 2013). It is intended to give an international audience an introduction to the rule language used in the developed system for event recognition during haptic exploration of line-based graphics.

A set of rule patterns for event recognition during the exploration of line-based graphics in virtual haptic environments is provided in the Drools Expert rule language. In this section, a short introduction to this language is given, which focuses on those language elements that occur in the presented rule patterns. For a complete introduction and documentation see the drools expert documentation³⁵.

Rule structure. A rule specification starts with the keyword “rule” followed by a string specifying its unique name. The keyword “when” marks the beginning of the left hand side of a rule that specifies when the conditions of that rule are satisfied. These conditions are given as a list of conjunctively linked logical statements. I.e. given the current state of the knowledge base, each condition given on the left hand side has to evaluate to *true*, for the rule to successfully “match” against that knowledge base. Furthermore, if this rule is selected during the “select” step of the match-select-execute cycle, its consequence will be executed during the last step of the cycle. The right hand part of the rule specifies these consequences as a list of imperative statements that either modify the knowledge base or send commands to components outside the rule-based system. Finally, a rule specification ends with the keyword “end”. Figure 4 shows this rule structure.

```
rule "name"
when
    condition_1
    condition_2
    ...
then
    consequence_1
    consequence_2
    ...
end
```

Fig. A.1: Structure of a rule.

Simple Conditions. The knowledge base consists of Java objects, see sect. 3.3. The simplest condition is to ask whether there is (at least) one object that is an instance of a specific class in the knowledge base. Figure 5 shows a condition which asks if there is (at least) one object of the type “line” in the knowledge base. This condition equals the condition of a line-based graphic not being empty, as in this case, there is at least one line in the graphic.

```
when
    Line()
then
```

Fig. A.2: Simple condition: Is there an instance of the class Line in the knowledge base?

³⁵ <http://www.jboss.org/drools/documentation.html>

Properties of the requested object can be specified to form more complex conditions. These additional constraints on the requested objects are written in parenthesis behind the class-name of the requested object. Figure 6 shows a condition that requests an enter-event in the knowledge base which has the property that an element (of a line-based graphic) was entered that is of the type “c-segment”. As can be seen from this example, the object-based approach is utilized to formulate conditions in a convenient and concise manner. Any number of additional constraints may be added inside the parenthesis in an arbitrary order.

```
when
    Enter(element.type == "csegment")
then
```

Fig. A.3: Properties of objects in conditions: Is there an instance of an Enter object in the knowledge base that describes the entering of an element of a line-based graphic that is of the type *c-segment*?

Pattern Binding. Each single condition of a rule asks for a single object in the knowledge base that fulfills certain constraints. In order to define rule conditions based on the relation of two objects, pattern bindings can be used to bind an object to a variable. In figure 7, a c-segment exploration event that has the property *open* (implemented as a Boolean property) is bound to the variable *\$e1*. (Using dollar symbols to designate variables is a convention suggested by the Drools developers, which is adapted throughout this document.) In the next condition, the variable *\$e1* is used in a temporal constraint.

The two conditions shown in figure 7 can be expressed in natural language as: There is an open exploration event of a c-segment. And there is an enter event to a c-segment that takes place after the start of the aforementioned open exploration event.

```
when
    $e1 : CSegmentEx(open==true)
    Enter(element.type == "csegment" , this after $e1)
then
```

Fig. A.4: Pattern binding: Is there an enter event of a c-segment that takes place after the beginning of an ongoing (open) c-segment exploration event?

Pattern bindings can also be used to bind the property of an object to a variable. In figure 8, the first condition asks for an open exploration of a configuration point *c*; this configuration point *c* is then bound to the variable *\$cp*. The second condition asks for an exit event that fulfills two properties: The individual name of the exited element (*id*) has to equal the name (*id*) of the configuration point stored in variable *\$cp* and the exit event takes place after the exploration event of the configuration point has begun.

In other words, if there is a representation of an ongoing (*open*) exploration event of a configuration point *c* in the knowledge base, and there is also an exit event of the same exploration point *c* that takes place after the open exploration event started, then the exploration event ends, i.e. it is no longer open. This is for instance used to make sure that exit events already in the knowledge base from previous explorations do not close an ongoing exploration.

Note, that the variable binding *\$e2* is not required for the rule to work.

```

when
    $e1 : CpEx($cp : c, open==true)
    $e2 : Exit(element.id == $cp.id, this after $e1)
then

```

Fig. A.5: Pattern binding using properties: Is there an exit event regarding an element of a line-based graphic with the same id as a currently explored configuration point and is the exit event taking place after the start of the aforementioned exploration event?

Logic operators and quantifiers. Conditions can be combined with Boolean operators. If nothing else is specified, all conditions are implicitly linked conjunctively. Other logical connectives have to be specified explicitly. The second and third condition in figure 9 are lined by an “or”. The condition requires an enter event to an element of a line-based graphic of the type c-segment or of the type region which takes place after the beginning of an ongoing (*open*) c-segment exploration event.

```

rule "CSegmentEx Close"
when
    $e1 : CSegmentEx(open==true)
    $e2 : ( Enter(element.type == "csegment" , this after $e1)
           or
           Enter(element.type == "region" , this after $e1)
         )
then

```

Fig. A.6: Logical connectives in rules: Is there an entering event regarding an element of the type c-segment or an entering event regarding an element of the type region which takes place after the beginning of an open c-segment exploration?

Logical quantifiers can be used to form more complex conditions. Figure 10 shows an example for the usage of universal quantification. The condition checks whether all (*forall*) c-segments that meet in a configuration point are explored in an exploration event that is part of (subordinated to) an incomplete exploration event of that configuration point. This rule also demonstrates the use of the *memberOf* operator for quick access to the list data structure.

```

rule "CpEx Complete"
when
    $e1 : CpEx($cp : c, $subevents : sub, completed ==false)
    forall ( $cs : CSegment(this memberOf $cp.cSegments_P)
            CSegmentEx( s ==$cs, this memberOf $subevents)
          )
then

```

Fig. A.7: Universal quantification: Given an incomplete exploration event of a configuration point, is there a subordinated exploration event for all c-segments that meet in this configuration point?

Negation: Negation can both be used to negate a condition (see figure 11) as well as a constraint inside a condition (see figure 12). In figure 11, the third condition asks for the non-existence of an ongoing (*open*) line exploration of a line specified by the variable *\$l*. The condition can be paraphrased, as “there must be no line exploration fulfilling certain criteria in the working memory” Drools syntax allows omitting the existential quantifier (*exists*), but in the presented examples it is kept for ease of reading.

The keyword “*not*” can also be used to negate any constraint within a single condition.

```
rule "LineEx Start"  
when  
    $l : Line($csegments : this.cSegments)  
    $e1 : CSegmentEx(s memberOf $csegments, open == true)  
    not (exists LineEx(l == $l, open == true)  
then
```

Fig. A.8: Negated existential quantification: Given an ongoing (*open*) exploration of a c-segment which is part of l , is there no line exploration event for line l ?

16 Appendix B: Specification of Rules for complex event recognition in the language Drools

This appendix is taken from the technical report *Rule Patterns for Event Recognition during the Exploration of Line-Based Graphics in Virtual Haptic Environments* (Kerzel, 2013). The specification of the rules is given to provide international domain experts with detailed knowledge about the recognition process.

For each type of extended exploration event outlined in chapter 7 a set of four rule patterns governs the creation and update of an event. A *start rule* specifies when an extended event is first recognized and inserted into the knowledge base. A complementary *closure rule* specifies when an extended exploration event is not going on any longer. A *completion rule* updates the *completed* property of an event when the list of subordinated events satisfies a set of conditions. Finally, a *subordination rule* defines how the hierarchical structure of an extended event is build up by subsuming recognized events via a subordination relation.

Multiple exploration events might occur and even begin at the same time. Deciding which event is most suitable for assistance generation or how a human observer might most likely describe a given exploration does not fall under the purview of event recognition as understood in this article.

The remainder of this appendix details the rule patterns for extended exploration events of line-based graphics specified by Kerzel and Habel (2013). The rule patterns are implemented in the Drools Expert system, as explained above. The formal specification of line-based graphics and their exploration events are implemented as Java objects, as required by Drools Expert. Explanations for the first sets of rules are provided.

C-Segment Exploration: $cSegmentEx(e, s, open, completed, [e_1, \dots, e_n])$

Extended event e describes the exploration of a c-segment s . Event e starts, when an enter event for s is detected. Event e is completed once both configuration points at the ends of the c-segment have been explored, that is exploration events for both configuration points are contained in $[e_1, \dots, e_n]$. During e no element of the line-based graphic that is not part of s or one of its configuration points may be entered, otherwise e is closed.

```
rule "CSegmentEx Start"
when
    $e1 : Enter(element.type == "csegment")
then
    CSegmentEx csegmentex = new CSegmentEx((CSegment)$e1.getElement());
    csegmentex.addSub($e1);
    insert( csegmentex );
end
```

Fig. B.1: Rule for the recognition of the start of a c-segment exploration.

When an enter event occurs, i.e. it is inserted into the knowledge base, it is bound to the variable $\$e1$. Then a new c-segment exploration event is created and inserted into the knowledge base with the enter event $\$e1$ as the first subordinated event.

```

rule "CSegmentEx Close"
when
    $e1 : CSegmentEx(open==true)

    $e2 : ( Enter(element.type == "csegment" , this after $e1)
           or
           Enter(element.type == "region" , this after $e1)
         )
then
    modify($e1){setOpen(false)}
end

```

Fig. B.2: Rule for the recognition of the end of a c-segment exploration.

When there is an ongoing, i.e. *open*, c-segment exploration $\$e1$ and either another c-segment or a region is being entered after c-segment exploration $\$e1$ has begun, then $\$e1$ has ended and its variable *open* is set to *false* accordingly.

```

rule "CSegmentEx Subordinate"
when
    $e1 : CSegmentEx($segment : s, $subevents : sub, open==true)

    $e2 : ( CpEx(open == true, c.id == $segment.endPoint1.id, this
                not memberOf $subevents)
           or
           CpEx(open == true, c.id == $segment.endPoint2.id, this
                not memberOf $subevents)
         )
then
    modify($e1){addSub($e2)}
end

```

Fig. B.3: Rule for subordinating the exploration of a configuration point to the exploration of a c-segment of which this configuration point is one of the endpoints.

```

rule "CSegmentEx Complete"
when
    $e1 : CSegmentEx($segment : s, $subevents : sub,
                    completed == false)

    $e2 : CpEx(this memberOf $subevents,
                c.id == $segment.endPoint1.id)

    $e3 : CpEx(this memberOf $subevents,
                c.id == $segment.endPoint2.id)
then
    modify($e1){setCompleted(true)}
end

```

Fig. B.4: Rule for the recognition of the completed exploration of a c-segment, including both configuration points that form the ends of the c-segment.

Configuration Point Exploration: $cpEx(e, c, open, completed, [e_1, \dots, e_n])$

Extended event e describes the exploration of a configuration point c . The event starts, when an enter event for c is detected. The event is completed once $[e_1, \dots, e_n]$ contains explorations of all c-segments meeting in c . During e the exploration may not exit c , otherwise e is closed.

The types “end”, “turn” and “crossing” denote special subtypes of configuration points. An “end” is an endpoint of a c-segment without any connection to another c-segment. A “turn” is a configuration points where exactly two c-segments meet and a “crossing” is a configuration point where three or more c-segments meet. Although the terminology was chosen with the domain of street maps in mind, the presented rule is not specific to this domain.

```

rule "CpEx Start"
when
    $e1 : ( Enter(element.type == "end")
            or
            Enter(element.type == "turn")
            or
            Enter(element.type == "crossing")
          )
then
    CpEx cpex = new CpEx((ConfigurationPoint)$e1.getElement());
    cpex.addSub($e1);
    insert( cpex );
end

```

Fig. B.5: Rule for the recognition of the start of a configuration point exploration.

```

rule "CpEx Close"
when
    $e1 : CpEx($cp : c, open==true)
    $e2 : Exit(element.id == $cp.id, this after $e1)
then
    modify($e1){setOpen(false)}
end

```

Fig. B.6: Rule for the recognition of the end of an configuration point exploration.

```

rule "CpEx Subordinate"
when
    $e1 : CpEx($cp : c, $subevents : sub, open==true)
    $e2 : CSegmentEx( open == true, s memberOf $cp.cSegments,
                      this not memberOf $subevents)
then
    modify($e1){addSub($e2)}
end

```

Fig. B.7: Rule for subordinating the exploration of a configuration point to the exploration of a c-segment of which this configuration point is one of the endpoints.

```

rule "CpEx Complete"
when
    $e1 : CpEx($cp : c, $subevents : sub, completed == false)
    forall ( $cs : CSegment(this memberOf $cp.cSegments_P)
            CSegmentEx( s == $cs, this memberOf $subevents)
          )
then
    modify($e1){setCompleted(true)}
end

```

Fig. B.8: Rule for the recognition of the completed exploration of a configuration point, including all c-segments that meet in this configuration point.

Line Exploratin: $lineEx(e, l, open, completed, [e_1, \dots, e_n])$

Extended event e describes the exploration of line l . The event starts, when a c-segment belonging to l is entered. The event is completed once $[e_1, \dots, e_n]$ contains completed

explorations of all c-segments belonging to l . During e no element that is not part of l maybe explored, otherwise e is closed.

```

rule "LineEx Start"
when
    $l : Line($csegments : this.cSegments)
    $e1 : CSegmentEx(s memberOf $csegments, open == true)
    not (exists LineEx(l == $l, open == true))
then
    LineEx lex = new LineEx($l);
    lex.addSub($e1);
    insert( lex );
end

```

Fig. B.9: Rule for the recognition of the start of a line exploration.

```

rule "Line Close"
when
    $e1 : LineEx($l : l, $csegments : l.cSegments,
    $configurationpointids : l.configurationPointIds, open == true)
    ( not (exists (CSegmentEx(open == true, s memberOf $csegments)))
    and
    not (exists (CpEx(open == true, c.id memberOf $configurationpointids)))
    )
then
    modify($e1){setOpen(false)}
end

```

Fig. B.10: Rule for the recognition of the end of a line exploration.

```

rule "Line Subordinate"
when
    $e1 : CSegmentEx(open == true, $csegment : s)
    $e2 : LineEx( open == true, $csegment memberOf l.cSegments,
    $e1 not memberOf sub)
then
    modify($e2){addSub($e1)}
end

```

Fig. B.11: Rule for subordinating the exploration of a c-segment to the exploration of a line to which this c-segment belongs.

```

rule "LineEx Complete"
when
    $e1 : LineEx($l : l, $subevents : sub, completed ==false)
    forall ( $cs : CSegment(this memberOf $l.cSegments)
    CSegmentEx( s ==$cs, completed == true,
    this memberOf $subevents)
    )
then
    modify($e1){setCompleted(true)}
end

```

Fig. B.12: Rule for the recognition of the completed exploration of a line, including all c-segments that are part of the line.

Line Complex Exploration: $LineComplexEx(e, lc, open, completed, [e_1, \dots, e_n])$

Extended event e describes the exploration of line complex lc . The event is completed once $[e_1, \dots, e_n]$ contains completed exploration events of all c-segments in line complex lc . During e no element that is not part of lc may be explored, otherwise e is closed. The list of events $[e_1, \dots, e_n]$ lists all line and c-segment exploration events that are part of e .

```

rule "LineComplexEx Start"
when
    $lc : LineComplex($csegments : this.cSegments)
    $e1 : CSegmentEx(s memberOf $csegments, open == true)
    not (exists LineComplexEx(lc == $lc, open == true))
then
    LineComplexEx lcx = new LineComplexEx($lc);
    lcx.addSub($e1);
    insert( lcx );
end

```

Fig. B.13: Rule for the recognition of the start of a line complex exploration.

```

rule "LineComplex Close"
when
    $e1 : LineComplexEx($lc : lc, $csegments : lc.cSegments,
        $configurationpointids : lc.configurationPointIds,
        open == true)
    ( not (exists (CSegmentEx(open == true, s memberOf $csegments)))
      and
        not (exists (CpEx( open == true,
            c.id memberOf $configurationpointids)))
    )
then
    modify($e1){setOpen(false)}
end

```

Fig. B.14: Rule for the recognition of the end of a line complex exploration.

```

rule "LineComplex Subordinate"
when
    $e1 : CSegmentEx(open == true, $csegment : s)
    $e2 : LineComplexEx( open == true,
        $csegment memberOf lc.cSegments,
        $e1 not memberOf sub)
then
    modify($e2){addSub($e1)}
end

```

Fig. B.15: Rule for subordinating the exploration of a line to the exploration of a line complex to which this line belongs.

```

rule "LineComplexEx Complete"
when
    $e1 : LineComplexEx( $lc : lc, $subevents : sub,
        completed ==false)
    forall ( $cs : CSegment(this memberOf $lc.cSegments)
        CSegmentEx( s ==$cs, completed == true,
            this memberOf $subevents)
    )
then
    modify($e1){setCompleted(true)}
end

```

Fig. B.16: Rule for the recognition of the completed exploration of a line complex, including all lines that are part of the line complex.

Area Exploration: *AreaEx(e, a, open, completed, [e1, ..., en])*

Haptic exploration of line-based graphics is an exploration by line following. The exploration of areas being part of the haptic representation of a line-based graphic for the space between lines is not intended. Areas are supposed to be conceptualized by the user by following the contours of these areas, which are represented as lines. Still, the system must be able to handle non-intended exploration behavior, thus the two following rules recognizing the exploration of areas are provided. As areas outside of the network of lines are not in the focus of the

analyzed exploration behavior, no rules for the detection of the completion of an area exploration or the subordination of other exploration events are provided.

The extended event e describes the exploration of an area a . As areas are no linear structures, no completion criterion is defined. During e no element that is not part of e may be explored, otherwise e is closed.

```
rule "AreaEx Start"
when
    $e1 :Enter(element.type == "area")
then
    AreaEx aex = new AreaEx((Area)$e1.getElement());
    aex.addSub($e1);
    insert( aex );
end
```

Fig. B.17: Rule for the recognition of the start of an area exploration.

```
rule "AreaEx Close"
when
    $e1 : AreaEx($area : a, open==true)
    $e2 : Exit(element.id == $area.id, this after $e1)
then
    modify($e1){setOpen(false)}
end
```

Fig. B.18: Rule for the recognition of the end of an area exploration.

17 Referenzen

- Aaron, A., & Davis, R. (2009). Symmetric Multimodal Interaction in a Dynamic Dialogue. In *Intelligent User Interfaces Workshop on Sketch Recognition*. ACM.
- Abu Doush, I., Pontelli, E., Simon, D., Son, T. C., & Ma, O. (2009, October). Making Microsoft Excel™: multimodal presentation of charts. In *Proceedings of the 11th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, 147-154. ACM.
- Acartürk, C. (2010). Multimodal comprehension of graph-text constellations: An information processing perspective. Dissertation, Universität Hamburg, Hamburg.
- Acartürk, C., Alaçam, Ö., & Habel, C. (2014). Developing a Verbal Assistance System for Line Graph Comprehension. In A. Marcus (eds.): *Design, User Experience and Usability (DUXU/HCI 2014)*, Part II, LNCS 8518, 373–382. Springer-Verlag, Berlin.
- Alaçam, Ö., Habel, C., & Acartürk, C. (2013). Towards designing audio assistance for comprehending haptic graphs: a multimodal perspective. In *Universal Access in Human-Computer Interaction. Design Methods, Tools, and Interaction Techniques for eInclusion*, 409–418. Springer.
- Allen, J. F. (1981). An interval-based representation of temporal knowledge. In *IJCAI*, 81, 221–226.
- Allen, J. F. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. In *Communications of the ACM*, 26(11), 832–843.
- Anderson, J. R. (1996). Act: A simple theory of complex cognition. In *American Psychologist*, 51(4), 355.
- Anderson, J. R. (2007). How can the human mind occur in the physical universe? Oxford University Press.
- Arditi, A., Holmes, E., Reedijk, P., & Whitehouse, R. (1999). Interactive tactile maps, visual disability, and accessibility of building interiors. In *Visual Impairment Research*, 1(1), 11-21.
- Bali, M. (2009). *Drools JBoss Rules 5.0: Developer's Guide*. Packt Publishing.
- Barrass, S., & Kramer, G. (1999). Using sonification. In *Multimedia systems*, 7(1), 23-31.
- Baumann, T. (2013). Incremental spoken dialogue processing: architecture and lower-level components. Dissertation, Universität Bielefeld.
- Beaudouin-Lafon, M. (2004). Designing interaction, not interfaces. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, 15–22. ACM.

- Bernstein, G., & Fussell, D. (2009). Fast, exact, linear booleans. In *Computer Graphics Forum*, 28(5), 1269-1278. Blackwell Publishing Ltd.
- Bischel, D. T., Stahovich, T. F., Peterson, E. J., Davis, R., & Adler, A. (2009). Combining Speech and Sketch to Interpret Unconstrained Descriptions of Mechanical Devices. In *IJCAI*, 9, 1401-1406.
- Browne, P. (2009). *JBoss Drools Business Rules*. Packt Publishing.
- Card, S. K. (1996). Visualizing retrieved information: A survey. In *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 16(2), 63–67.
- Conti, F., Barbagli, F., Morris, D., & Sewell, C. (2005). CHAI an open-source library for the rapid development of haptic scenes.
- Cooper, L. A. (1989). Mental models of the structure of visual objects. In *Object perception: Structure and process*, 91–119.
- De Felice, F., Renna, F., Attolico, G., & Distanto, A. (2007). A haptic/acoustic application to allow blind the access to spatial information. In *EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007, Second Joint*, 310–315. IEEE.
- Delaunay, B. (1934). Sur la sphere vide. In *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk*, 7(793-800), 1-2.
- Denis, M. (1997). The description of routes: A cognitive approach to the production of spatial discourse. In *Cahiers de psychologie cognitive*, 16(4), 409-458.
- Domiter, V., & Žalik, B. (2008). Sweep-line algorithm for constrained Delaunay triangulation. In *International Journal of Geographical Information Science*, 22(4), 449-462.
- Drewing, K., & Gießen, U. (2008). Hautsinne. Retrieved from <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/Wahrnehmung/Wahr-12-haut.pdf>
- Red Hat (2013). Drools expert documentation. Retrieved from <http://www.jboss.org/drools/documentation.html>.
- Red Hat (2013). Drools expert system. Retrieved from <http://www.jboss.org/drools/>.
- Eckert, M., & Bry, F. (2009). Complex event processing (cep). In *Informatik-Spektrum*, 32(2), 163-167.
- Eschenbach, C., Habel, C., Kulik, L., et al. (1999). Representing simple trajectories as oriented curves. In *FLAIRS Conference*, 431–436.
- Eschenbach, C., & Kulik, L. (1997). An axiomatic approach to the spatial relations underlying left-right and in front of-behind. In *KI-97: Advances in Artificial Intelligence*, 207-218. Springer.

- Forgy, C. L. (1982). Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem. In *Artificial intelligence*, 19(1), 17-37.
- Garrod, S., & Pickering, M. J. (2004). Why is conversation so easy? In *Trends in cognitive sciences*, 8(1), 8-11.
- Guhe, M., Habel, C., & Tappe, H. (2000). Incremental Event Conceptualization and Natural Language Generation in Monitoring Environments. In *Proceedings of the first international conference on Natural Language Generation*, 85-92.
- Habel, C. (2003). Representational commitment in maps. In Duckham, M., Goodchild, M., and Worboys, M., editors, *Foundations of Geographic Information Science*, 69-93. London: Taylor and Francis.
- Habel, C., Kerzel, M., & Lohmann, K. (2010). Verbal assistance in tactile-map explorations: A case for visual representations and reasoning. In *Proceedings of AAAI workshop on visual representations and reasoning*.
- Habel, C., Alaçam, Ö., & Acartürk, C. (2013). Verbally Assisted Comprehension of Haptic Line-Graphs: Referring Expressions in a Collaborative Activity. In *Proceedings of the CogSci 2013 Workshop on the Production of Referring Expressions: Bridging the Gap between Computational and Empirical Approaches to Reference (PRE-CogSci 2013)*
- Hahn, V. (2010) Der Geometrie-Atlas. Didaktikpool – Inklusion von Schülerinnen und Schülern mit einer Sehschädigung an Regelschulen. Retrieved from http://www.isar-projekt.de/portal/1/uploads/didaktikpool_423_1.pdf
- Halverson, J. (1992). The first pictures, perceptual foundations of paleolithic art. In *Perception*, 21(3), 389-404.
- Hayes-Roth, F. (1985). Rule-based systems. *Communications of the ACM*, 28(9), 921- 932.
- Hincapié-Ramos, J. D., Guo, X., Moghadasian, P., & Irani, P. (2014). Consumed Endurance: A metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems*, 1063-1072. ACM.
- Hermann, T., & Hunt, A. (2005). An introduction to interactive sonification. In *IEEE multimedia*, 20-24.
- Jacobson, R. D. (1998). Navigating maps with little or no sight: An audio-tactile approach. In *Proceedings of the workshop on Content Visualization and Intermedia Representations (CVIR)*.
- Jaques, P. A., Seffrin, H., Rubi, G., Morais, F. d., Guilardi, C., Bittencourt, I. I., & Isotani, S. (2013). Rule-based expert systems to support step-by-step guidance in algebraic problem solving: the case of the tutor pat2math. In *Expert Systems with Applications*.
- Kaklanis, N., Votis, K., Moschonas, P., & Tzovaras, D. (2011). HapticRiaMaps: towards interactive exploration of web world maps for the visually impaired. In *Proceedings of the International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility*. ACM.

- Kass, M., Witkin, A., & Terzopoulos, D. (1988). Snakes: Active contour models. In *International journal of computer vision*, 1(4), 321-331
- Kaye, H. S. (2000). *Computer and Internet use among people with disabilities*. In *Disability Statistics Report*, 13. US Department of Education, National Institute on Disability and Rehabilitation Research, Washington, DC.
- Kerzel, M. (2008). *Verarbeitung diskontinuierlicher Segmente natürlichsprachlicher Routenbeschreibungen*. Diplomarbeit, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Hamburg.
- Kerzel, M., & Habel, C. (2011). Monitoring and Describing Events for Virtual-Environment Tactile-Map Exploration. In Galton, A., Worboys, M., & Duckham, M. (eds.), *Proceedings of Workshop on 'Identifying Objects, Processes and Events'*, 13-18. 10th International Conference on Spatial Information Theory. Belfast, ME.
- Kerzel, M., & Habel, C. (2012). Ereigniserkennung während der Exploration audio-taktiler Karten. In Reiterer, H. & Deussen, O. (eds.), *Mensch & Computer 2012, interaktiv informiert—allgegenwärtig und allumfassend!?*, 365-368. Oldenbourg Verlag, München.
- Kerzel, M., & Habel, C. (2013). Event Recognition during the Exploration of Line-Based Graphics in Virtual Haptic Environments. In Tenbrink, T., Stell, J., Galton, A. & Wood, Z. (eds.), *Spatial Information Theory, 11th International Conference, COSIT 2013*, LNCS 8116, 109-128. Springer International Publishing, Berlin.
- Kerzel, M. (2013). Rule patterns for event recognition during exploration of haptic virtual environment line-based graphics (Technical report). Retrieved from Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, <http://www2.informatik.uni-hamburg.de/wsv/pub/Kerzel-COSITsupplemental-2013.pdf>
- Kerzel, M., Alaçam, Ö., Habel, C., & Acartürk, C. (2014). Producing Verbal Descriptions for Haptic Line-Graph Explorations. To be published in Rieser, V., & Muller, P. (eds.), *Proceedings of the 18th Workshop on the Semantics and Pragmatics of Dialogue. SemDial 2014 – DialWatt*.
- Kessenich, J., Baldwin, D., & Rost, R. (2004). The OpenGL shading language. Retrieved from <https://www.opengl.org/registry/doc/GLSLangSpec.4.40.pdf>
- Klippel, A. (2003). Wayfinding choremes. In *Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science*, 301-315. Springer.
- Kosslyn, S. M. (1989). Understanding charts and graphs. In *Applied cognitive psychology*, 3(3), 185-225.
- Kostopoulos, K., Moustakas, K., Tzovaras, D., Nikolakis, G., Thillou, C., & Gosselin, B. (2007). Haptic access to conventional 2D maps for the visually impaired. In *Journal on Multimodal User Interfaces*, 1(2), 13-19.
- Kruchten, P. B. (1995). The 4+1 view model of architecture. In *Software, IEEE*, 12(6), 42-50.

- Lahav, O., & Mioduser, D. (2005). Blind persons' acquisition of spatial cognitive mapping and orientation skills supported by virtual environment. In *International Journal on Disability and Human Development*, 4(3), 231-238.
- Lakoff, G. (2008). The neural theory of metaphor. *The Cambridge handbook of metaphor and thought*, 17-38.
- Lederman, S., & Klatzky, R. (2009). Haptic perception: A tutorial. In *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(7), 1439-1459.
- Loomis, J. M., & Lederman, S. J. (1986). Tactual perception. *Handbook of perception and human performances*, 2, 2.
- Loomis, J. M. (2002). Sensory replacement and sensory substitution: Overview and prospects for the future. *Converging Technologies for Improving Human Performance*, 213.
- Lohmann, K., & Habel, C. (2012). Extended verbal assistance facilitates knowledge acquisition of virtual tactile maps. In *Spatial Cognition VIII*, 299-318. Springer.
- Lohmann, K., Kerzel, M., & Habel, C. (2012). Verbally Assisted Virtual-Environment Tactile Maps: A Prototype System. In *Proceedings of The Workshop on Spatial Knowledge Acquisition with Limited Information Displays*. Kloster Seon, Germany.
- Lohmann, K. (2013). Verbal assistance with virtual tactile maps: a multi-modal interface for the non-visual acquisition of spatial knowledge. Dissertation, Universität Hamburg. Hamburg.
- Lohmann, K., Yu, J., Kerzel, M., Wang, D., & Habel, C. (2014). Verbally assisting virtual-environment tactile maps: A cross-linguistic and cross-cultural study. In *Foundations and Practical Applications of Cognitive Systems and Information Processing*, 821-831. Springer.
- Loomis, J. M. (2002). Sensory replacement and sensory substitution: Overview and prospects for the future. *Converging Technologies for Improving Human Performance*, 213-224.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1991). Similarity of tactual and visual picture recognition with limited field of view. *Perception*, 20(2), 167-177.
- Luckham, D. C. (2002). *The power of events*, volume 204. Addison-Wesley Reading.
- Mackworth, A. K. (1988). Adequacy criteria for visual knowledge representation. In Pylyshyn, Z. (eds.), *Computational Processes in Human Vision*, 464-476. Ablex Publishers, Norwood, NJ.
- Magnusson, C., & Rasmus-Gröhn, K. (2004). A dynamic haptic-audio traffic environment. In *Proc. of Eurohaptics*, 5-7.
- Massie, T., & Salisbury, J. (1994). The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, 55, 295-300. IOS Press.

- McCloskey, D. I. (1978). Kinesthetic sensibility. In *Physiol Rev*, 58(4), 763-820.
- Miele, J. A., Landau, S., & Gilden, D. (2006). Talking TMAP: Automated generation of audio-tactile maps using Smith-Kettlewell's TMAP software. In *British Journal of Visual Impairment*, 24(2), 93-100.
- Monmonier, M. (1991). How to lie with maps. 1991. *Chicago UP*.
- Moustakas, K., Nikolakis, G., Kostopoulos, K., Tzovaras, D., & Strintzis, M. G. (2007). Haptic rendering of visual data for the visually impaired. In *MultiMedia, IEEE*, 14(1), 62-72.
- Parente, P., & Bishop, G. (2003). BATS: the blind audio tactile mapping system. In *Proceedings of the ACM Southeast Regional Conference*, 132-137.
- Parkes, D. (1988). Nomad: An audio-tactile tool for the acquisition, use and management of spatially distributed information by visually impaired people. In *Proc. of the Second International Symposium on Maps and Graphics for Visually Handicapped People*.
- Petrie, H., Johnson, V., Strothotte, T., Raab, A., Fritz, S., & Michel, R. (1996). MoBIC: Designing a travel aid for blind and elderly people. In *Journal of Navigation*, 49(01), 45-52.
- Pfoser, D., & Jensen, C. (2003). Indexing of network constrained moving objects. In *Proceedings of the 11th ACM international symposium on Advances in geographic information systems*, 25-32. ACM.
- Proctor, M., Neale, M., Lin, P., & Frandsen, M. (2008). Drools documentation (Technical report), JBoss org.
- Pylyshyn, Z. (2003). Return of the mental image: are there really pictures in the brain? In *Trends in cognitive sciences*, 7(3), 113-118.
- Ramloll, R., Yu, W., Brewster, S., Riedel, B., Burton, M., & Dimigen, G. (2000). Constructing sonified haptic line graphs for the blind student: first steps. In *Proceedings of the fourth international ACM conference on Assistive technologies*, 17-25. ACM.
- Rasmus-Gröhn, K., Szymczak, D., Magnusson, C., Jonsson, K., Fahlstrom, I., & Bjork, K. (2013). Non-visual Drawing with the HIPP Application.
- Rasmus-Gröhn, K., Szymczak, D., Fahlström, I., & Björk, K. (2012). Learning to draw with the HIPP application. In *The Seventh International Workshop on Haptic and Audio Interaction Design-HAID*, 13-15.
- Reiter, R. and Mackworth, A. K. (1989). A logical framework for depiction and image interpretation. In *Artificial Intelligence*, 41(2), 125-155.
- Schloerb, D. W., Lahav, O., Desloge, J. G., & Srinivasan, M. A. (2010). BlindAid: Virtual environment system for self-reliant trip planning and orientation and mobility training. In *Haptics Symposium, 2010 IEEE*, 363-370. IEEE.

- Schneider, M., Velten, M., and Hauptert, J. (2010). The objectrules framework - providing ad hoc context-dependent assistance in dynamic environments. In *Intelligent Environments (IE), 2010 Sixth International Conference*, 122–127. IEEE.
- Selke, M. (2014). Haptische Diskriminierung von Extrempunkten bei m-förmigen Liniengraphen. Bachelorarbeit, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Hamburg.
- Shinohara, M., Shimizu, Y., & Mochizuki, A. (1998). Three-dimensional tactile display for the blind. In *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 6(3), 249-256.
- Shimomura, Y., Hvannberg, E. T., & Hafsteinsson, H. (2013). Haptic cues as a utility to perceive and recognise geometry. In *Universal Access in the Information Society*, 12(2), 125-142.
- Shiple, T. (2008). An invitation to an event. In *Understanding events. From perception to action*, 3-30. Oxford.
- Shiple, T., & Maguire, M. (2008). Geometric information for event segmentation. In *Understanding events: How humans see, represent, and act on events*, 415–435.
- Sjöström, C., Danielsson, H., Magnusson, C., & Rasmus-Gröhn, K. (2003). Phantom-based haptic line graphics for blind persons. In *Visual Impairment Research*, 5(1), 13-32.
- Stegen, M. (2011). Erzeugung von 3D-Objekten zur Kartenexploration mit Phantomschnittstellen. Bachelorarbeit, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Hamburg.
- Stein, B. E., & Arigbede, M. O. (1972). A parametric study of movement detection properties of neurons in the cat's superior colliculus. In *Brain research*, 45(2), 437-454.
- Tietze, U., & Schenk, C. (1974). *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer.
- Tversky, B. (1993). Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models. In *Spatial information theory A theoretical basis for GIS*, 14–24.
- Tversky, B., & Lee, P. U. (1999). Pictorial and verbal tools for conveying routes. In *Spatial information theory. Cognitive and computational foundations of geographic information science*, 51-64. Springer.
- Tversky, B. (2000). Some ways that maps and diagrams communicate. In *Spatial Cognition II*, 72–79. Springer.
- Tversky, B., Zacks, J., Lee, P., & Heiser, J. (2000). Lines, blobs, crosses and arrows: Diagrammatic communication with schematic figures. In *Theory and application of diagrams*, 221- 230. Springer.
- Tversky, B. (2005). Some ways images express and promote thought. In P. Grialou, G. Longo, & M. Okada (eds.), *Image and reasoning*, 15–29.

- Tversky, B. (2011). Tools for thought. In *Benedetti, B. and Cook, V. (eds.), Language and bilingual cognition*, 131-139. Psychology Press, New York
- Tversky, B. (2011). Visualizing thought. In *Topics in Cognitive Science*, 3(3), 499-535.
- Walzer, K., Breddin, T., & Groch, M. (2008). Relative temporal constraints in the rete algorithm for complex event detection. In *Proceedings of the second international conference on Distributed event-based systems*, 147-155. ACM.
- Wang, Z., Li, B., Hedgpeth, T., & Haven, T. (2009). Instant tactile-audio map: enabling access to digital maps for people with visual impairment. In *Proceedings of the 11th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, 43-50. ACM.
- Wood, J., Magennis, M., Arias, E., Gutierrez, T., Graupp, H., & Bergamasco, M. (2003). The design and evaluation of a computer game for the blind in the grab haptic audio virtual environment. In *Proceedings of Eurohaptics*.
- Yu, J. and Habel, C. (2012). A haptic-audio interface for acquiring spatial knowledge about apartments. In *Haptic and Audio Interaction Design*, 21-30. Springer.
- Yu, W., Ramloll, R., & Brewster, S. (2001). Haptic graphs for blind computer users. In *Haptic Human-Computer Interaction*, 41-51.
- Yu, W., & Brewster, S. (2002). Comparing two haptic interfaces for multimodal graph rendering. In *Proceedings of 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 3-9. IEEE.
- Yu, W. and Brewster, S. (2003). Evaluation of multimodal graphs for blind people. In *Universal Access in the Information Society*, 2(2), 105-124.
- Zeng, L., & Weber, G. (2012). Building Augmented You-are-here Maps through Collaborative Annotations for the Visually Impaired. In *SKALID 2012-Spatial Knowledge Acquisition with Limited Information Displays*, 7.