Diplomarbeit: Geometrische Operationalisierung qualitativer räumlich-geografischer Relationen

an der

Universität Bremen
Arbeitsgruppe Cognitive Systeme

vorgelegt von

Stefan Rater

1.Gutachter: Dr. Thomas Barkowsky
2.Gutachter: Prof. Dr. Kerstin Schill

Vorwort

Die Zeit, in der ich diese Diplomarbeit geschrieben habe, war sehr interessant und lehrreich. Hoch motivierten, arbeitsreichen Phasen folgten weniger effizient Phasen und umgekehrt. Trotzdem liegt nun dieses umfangreiche Werk vor. Deswegen möchte ich mich bei einigen Leuten bedanken, die mir ein wenig geholfen oder mich unterstützt haben, damit diese Diplomarbeit so werden konnte, wie sie hier nun vorliegt.

Zuallererst bedanke ich mich bei meinem Betreuer Dr. Thomas Barkowsky für die Betreuung dieser Arbeit, für Ideen und Anregungen.

Danken möchte ich Professor Brauer von der TU München und seiner Sekretärin für die kostenlose Verfügbarkeit einer vor 14 Jahren angefertigten Diplomarbeit, die mir wichtige Aufschlüsse brachte.

Ein großes Lob und einen riesigen Dank schicke ich an meine Korrekturleser, die sich sowohl mit dem Inhalt der Arbeit, als auch mit meiner Rechtsschreibung auseinandersetzen durften. Danke vor allen Dingen Kai Hoffmann und Alexander Paffrath und natürlich auch den unzähligen weiteren Leuten, die auf einige Fehler hinwiesen.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei meinem Bruder (dem Kind), der meinen Bewegungsdrang während des Schreibens dieser Arbeit aushalten musste, sowie seiner Stoffkatze, die manche Gewaltentladungen ertragen musste.

Dankend erwähnt werden müssen selbstverständlich auch die zahlreichen Freunde, Bekannte und Verwandte, die immer an mich geglaubt haben und telefonisch, per Email oder persönlich seelisch unterstützten.

Außerdem bedanke ich mich natürlich auch bei meinen Eltern, die mir eine nun insgesamt 17,5 Jahre lange Ausbildungszeit ermöglichten und mich mit vielen, oft als selbstverständlich wirkenden Dingen stets unterstützen oder entlasteten, egal, ob es finanzielle Dinge, Essen, Unterkunft, Wäsche oder andere Sachen waren.

Und zu guter Letzt bedanke ich mich bei meiner Freundin Mareike, die mich während der gesamten Diplomantenzeit unterstützte, es mir immer verzieh, wenn ich gerade mehr Zeit mit oder bei dieser Arbeit verbrachte und mich dank ihrer lieben Art von den Problemen dieser Arbeit ablenkte.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Diplomarbeit selbständig verfasst und ausschließlich die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Verden, den 13. Juni 2006.

Stefan Rater

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation 1
1.2 Fragestellung der Arbeit 5
1.3 Zielsetzung 6
1.4 Methodisches Vorgehen 8
1.5 Aufbau und Übersicht der Arbeit 9

2 Qualitatives räumliches Schließen **11**
2.1 Einleitung 11
2.2 Qualitative Repräsentation der Objekte 12
2.3 Objektarten 14
2.4 Objekte und ihre Eigenschaften 15
2.4.1 Definition von Linie und Fläche 15
2.4.2 Grenze und Innenbereich eines Objekts 16
2.5 Bezugnahme auf Objekte 18
2.5.1 Das primäre Objekt 18
2.5.2 Das Referenzobjekt 18
2.6 Referenzrahmen 19
2.7 Weitere Begrifflichkeiten 20

3 State of the Art **21**
3.1 Topologie 21
3.1.1 Voraussetzungen und Definitionen 22
3.1.2 Topologie bei eindimensionalen Objekten 23
3.1.3 Topologie bei zweidimensionalen Objekten 25
3.1.4 Fazit 33
3.2 Richtung 35
3.2.1 Voraussetzungen und Definitionen 35
3.2.2 Himmelsrichtungen und alternative Richtungen 36

3.2.3 Richtungen zwischen nulldimensionalen Objekten . . . 37
3.2.4 Richtungsbestimmung bei Objekten mit Ausdehnung . 45
3.2.5 Richtungsbestimmung bei konkaven Objekten 53
3.2.6 Fazit 55
3.3 Entfernung 56
3.3.1 Grundlagen und Definitionen 56
3.3.2 Faktoren, die die Entfernungsbestimmung beeinflussen 56
3.3.3 Akzeptanzbereiche 59
3.3.4 Namen und Unterscheidungen der Relationen 60
3.3.5 Entfernungsbereiche 61
3.3.6 Frank's Entfernungssystem 63
3.3.7 Mavrovouniotis Größenvergleiche 67
3.3.8 Das Delta-Kalkül 68
3.3.9 Kritische Anmerkungen 69

4 Entscheidungen und Weiterentwicklungen 71
4.1 Vorraussetzungen 71
4.2 Topologie 73
4.2.1 Topologie bei nulldimensionalen Objekten 73
4.2.2 Senkung der Anzahl der Relationen 74
4.2.3 Vergleich des Modells von Egenhofer/Franzosa mit dem Kalkül von Randell, Cui und Cohn 77
4.2.4 Vorgehen zur Unterscheidung topologischer Relationen 77
4.2.5 Algorithmus zur Unterscheidung topologischer Relationen 78
4.3 Richtung 82
4.3.1 Richtungsbestimmung zwischen null-dimensionalen Objekten 82
4.3.2 Sektorenbestimmung bei Objekten mit Ausdehnung . 83
4.3.3 Richtungsbestimmung bei ausgedehnten Objekten . . 84
4.3.4 Richtungsbestimmung bei konkaven Objekten 85
4.3.5 Algorithmus zur Bestimmung von Richtungsrelationen 87
4.4 Entfernung 92
4.4.1 Die existierenden Ansätze 93
4.4.2 Grundlagen des Algorithmus 94
4.4.3 Der Algorithmus 96

5 Das praktische System 100
5.1 Beschreibung des allgemeinen Programmablaufs aus Benutzersicht 100

5.2 Technische Beschreibung des Programms 102
5.2.1 Programm vor der eigentlichen Relationsbestimmung . 102
5.2.2 Ermittlung der topologischen Relationen 104
5.2.3 Ermittlung der Richtungsrelationen 105
5.2.4 Ermittlung der Entfernungsrelation 105

6 Abschluss 107
6.1 Was wurde erreicht? 107
6.2 Wie könnte das System noch sinnvoll verbessert werden? . . . 108
6.3 Welche Erweiterungen sind noch denkbar? 110

A Algorithmus zur Erkennung topogischer Relationen 122

B Daten auf der CD-ROM 132

C Hinweise zur Benutzung der Software 133

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Räumlich-geografische Relationen sind für Menschen alltägliche Dinge, die in der Regel ohne Nachdenken verstanden oder angegeben werden können. Räumlich-geografische Relationen sind Beziehungen zwischen zwei Lokalitäten (z.B. Häuser, Wälder, Brunnen, Orte oder Länder), die einem umgangssprachlichen Ausdruck, wie z.B. nah, westlich oder berühren, zugeordnet werden können. Diese Relationen können in verschiedene Gruppen, wie z.B. Richtungsrelationen oder Relationen der Entfernung, aufgeteilt werden.

Für uns Menschen ist es nicht schwierig diese Relationen zu verstehen und zu interpretieren, ganz gleich, ob eine metrische oder qualitative Angabe vorliegt. Die Aussage "Noch 50 Meter bis zum Ziel!" kann auch qualitativ als "Das Ziel ist schon sehr nah!" formuliert werden. Ist der Mensch allerdings selbst gefordert eine Entfernungsangabe zu machen, so wird er vermutlich eine qualitative Aussage vorziehen, da Menschen nur schwer in der Lage sind metrisch korrekte Angaben zu machen (vgl. [Zim95]). Es wird aber auch nur in wenigen Fällen im Alltag eine metrische Entfernungsangabe benötigt. Oftmals sind solche Angaben nicht ohne weitere Hilfe möglich, weil einfach das genaue Wissen fehlt. Auch Relationen der Richtung werden oft benutzt und auch problemlos verstanden: Wenn uns beispielsweise die Richtungsangabe "westlich von Deutschland" genannt wird, so stellen wir uns normaler Weise eine Landkarte vor, auf der Deutschland liegt, stellen uns Deutschlands westliche Grenze vor und nennen die Niederlande, Belgien, Luxenburg und Frankreich als westlich gelegene Länder, da diese in den räumlich-geografischen Bereich fallen, den wir als "westlich von Deutschland" interpretieren.

Allerdings gibt es auch Relationen, die nicht so eindeutig zu bestimmen sind.

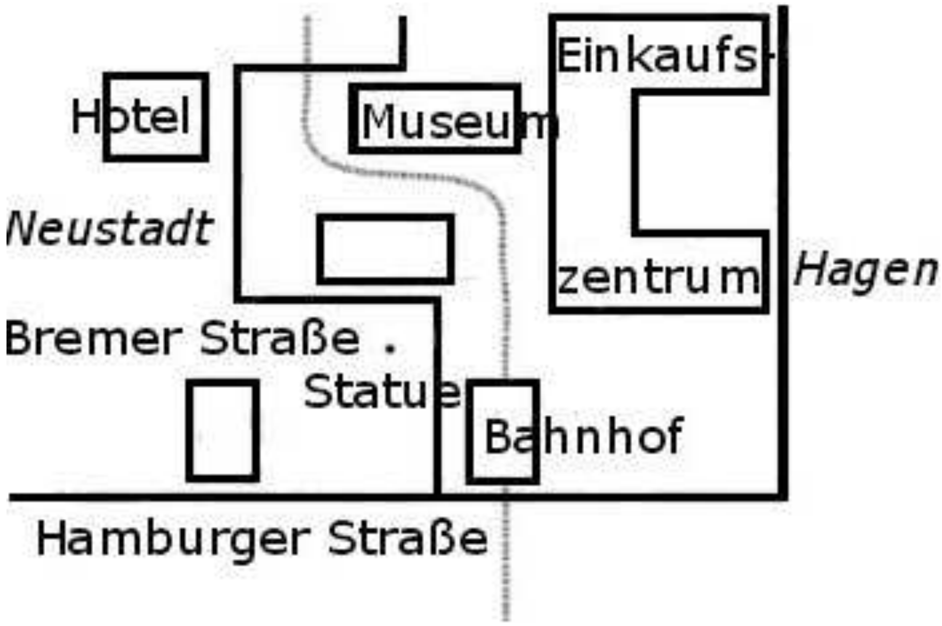


Abbildung 1.1: Geometrische Karte mit Objekten

Betrachten wir als ein Beispiel die Abbildung 1.1. Dargestellt ist ein Ausschnitt aus einer Stadtkarte. Darauf zu erkennen sind die beiden über die Jahre zusammengewachsenen Städte Neustadt und Hagen, die räumlich durch den Verlauf der Bahnschienen getrennt werden. Die Karte zeigt viele verschiedene Lokalitäten (im Folgenden "Objekte" genannt): Objekte, die nur durch einem Punkt repräsentiert werden wie die Statue, linienförmige Objekte wie Straßen und Bahnschienen und ausgedehnte Objekte wie Häuser oder Stadtflächen.

Hierbei ergeben sich viele Relationen, die nicht so einfach zu bestimmen sind:

- **Welches räumliche Verhältnis haben der Bahnhof und Neustadt?**
  Diese Frage lässt sich nicht ohne Weiteres beantworten. Hier werden Antworten oft nur mit Einschränkungen gegeben, wie "Der Bahnhof ist zum Teil in Neustadt gelegen".

- **In welcher Himmelsrichtung liegt die Statue vom Einkaufszentrum gesehen?**
  Auch hier ist die Antwort nicht ganz eindeutig. Das große Problem bei dieser Relationsbestimmung ist, dass das Einkaufszentrum ein sehr großes Objekt ist. Wäre es ebenfalls nur durch einen Punkt dargestellt, dann würde uns die Richtungsbestimmung wesentlich einfacher fallen. Bei diesem Beispiel muss aber überlegt werden, von welcher Stelle des Einkaufszentrums wir die Richtung bestimmen. Suchen wir uns einen Punkt, der im Zentrum des Objektes liegt oder einen Punkt, der der Statue besonders nah ist? Oder verlassen wir uns einfach auf unser Gefühl?

- **In welcher Relation stehen Statue und Bremer Straße zueinander?**
  Da die Bremer Straße praktisch nördlich und östlich der Statue entlang verläuft ist es auch hier schwierig eine eindeutige Richtung zu bestimmen, und das sowohl von der Statue zur Straße als auch von der Straße zur Statue. Eindeutige Relationen erhält man nur, wenn man in verschiedene Bereiche aufteilt. Das Gleiche gilt auch für die Entfernung zwischen den beiden Objekten.

- **Was ist der Statue näher? Das Hotel oder das Museum?**
  Mit einem Blick auf die Karte ist uns klar, dass das Museum auf jeden Fall dichter an der Statue gelegen ist. Wenn man sich aber direkt in Neustadt an der Statue wiederfindet, so wird aufgrund der Infrastruktur der Weg zum Hotel wesentlich kürzer erscheinen, als der Weg zum Museum.

- **Ist das Einkaufszentrum der Statue näher als das Kaufhaus?**
  Aufgrund der gewaltigen Größe des Einkaufzentrums erscheint es uns der Statue näher zu sein, als das Kaufhaus. Betrachtet man aber die metrisch kürzesten Wege von beiden Objekten zur Statue, so ist die Entfernung etwa gleich.

Alleine am Beispiel dieser fünf Fragen wird klar, dass qualitative räumlich-geografische Relationen nicht immer eindeutig sind, geschweige denn einfach zu bestimmen.

Allerdings ist eine eindeutige Zuordnung von qualitativen räumlich- geografischen Relationen zu sprachlichen Ausdrücken wünschenswert. Das Denken des Menschen stellt die Grundlage für computionale Modellierungen der realen Welt dar. Wenn wir uns in der Informatik mit dieser Modellierung beschäftigen (z.B. bei Roboternavigation oder digitalen Planungssystemen), benötigen wir eine plausible Grundlage für die jeweilige Modellierung. In dieser Diplomarbeit geht es speziell um die Modellierung der bereits erwähnten qualitativen räumlich-geografischen Relationen, wie den Relationen der Richtung und der Entfernung. Eine Maschine, die eine bestimmte Relation darstellt oder interpretiert, sollte dies so tun, dass es für einen menschlichen Betrachter richtig und nachvollziehbar wirkt. Folglich muss vor der Implementierung des Systems der Maschine als Grundlage untersucht werden, wann welche Relationen vorliegen und somit betrachtet werden, welche Faktoren die jeweilige Relation beeinflussen können.

Speziell bezogen auf das Thema und den Inhalt dieser Diplomarbeit, in der alle Richtungsrelationen Himmelsrichtungen sind, können hier beispielsweise Grundlagen für ein GIS (Geographic Information Systems) bereitgestellt werden. In GIS können räumliche Informationen angezeigt, verarbeitet oder organisiert werden. Die Abfragen, die der Benutzer dabei machen kann, beinhalten häufig räumliche Relationen. Diese Relationen schränken dann oft einen Raum ein, der dann den Ergebnisraum der Anfrage ergibt. Eine Anfrage könnte z.B. sein:

Suche in der Nähe der Schule alle bebaubaren Freiflächen, die mindestens 500 m^2 groß sind und ebenfalls westlich der Bahngleise liegen!

Um diese Anfrage bearbeiten zu können, muss das GIS wissen, welche Flächen zu dem Gebiet gehören, das nahe der Schule ist (*Was bedeutet also nah?*) und welches das Gebiet ist, das westlich der Bahngleise liegt (*Was bedeutet also westlich?*).

Wie wir bereits an unserer Beispielkarte gesehen haben, ist es manchmal schwierig Relationen genau zu ermitteln. Oft geht es aber nicht nur um Beispiele zwischen zwei Objekten, sondern um den Gesamtbereich einer Relation auf ein Objekt bezogen: Wenn man Menschen vor die Aufgabe stellt den genauen Bereich "westlich von der Statue" auf einer Karte zu zeigen, wird es für viele eine komplizierte Aufgabe werden. Klar dürfte sein, dass der Bereich, den man sieht, wenn man auf der Statue stehend und nach Norden schauen würde, sich um 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn dreht, auf jeden Fall westlich ist. Auch nach einer Drehung von 80 Grad würde man wahrscheinlich erfolgreich den Bereich als westlich interpretieren. Aber was wäre bei 50 Grad oder nur 20 Grad? Sicher angegeben werden könnte der Bereich, der nicht westlich ist (Drehung von 0 bis 180 Grad im Uhrzeigersinn). Aber den exakten Bereich anzugeben, der unter den sprachlichen Ausdruck "westlich" fällt, wird für den Laien oft unmöglich sein. Ist es überhaupt möglich?

Vor die gleichen Probleme wird ein System zur Raumplanung gestellt. Eine nicht unwahrscheinliche Planungsaufgabe könnte lauten:

Plane die Lage meines neuen Hauses so, dass es nicht in den heruntergekommenen Stadtteilen X, Y und Z liegt, dass die Schule der Kinder mit höchstens 20 Minuten Fußmarsch zu erreichen ist und dass es möglichst westlich der Innenstadt liegt, weil es da größtenteils verkehrsberuhigt ist.

Diese Planungsaufgabe enthält drei räumliche Relationen, die in verschiedene Relationsklassen unterteilt werden können ("in X gelegen", "westlich der Innenstadt" und "max. 20 Minuten entfernt"). Sie lassen sich alle so geometrisch umsetzen, dass sie für Menschen plausibel nachmodelliert werden können.

Wie man dies umsetzt wird das Hauptthema dieser Diplomarbeit sein.

1.2 Fragestellung der Arbeit

Meine Diplomarbeit soll folgende Hauptfrage beantworten:

`Wie kann man qualitative räumlich-geografische Relationen in computionaler Geometrie umsetzen?`

Um diese Frage beantworten zu können, müssen ebenfalls einige Unterfragen beantwortet werden:

- `Wie können die sprachlichen Ausdrücke der Relationen geometrisch interpretiert werden?`
- `Welche geometrischen Objekteigenschaften wirken sich wie auf die verschiedenen qualitativen räumlich-geografischen Relationen zwischen zwei Objekten aus?`
- `Welche bereits in der Wissenschaft beschriebenen Möglichkeiten können jeweils sinnvoll bei der Betrachtung/ Ermittlung der Relationen benutzt werden?`

Folglich sollen verschiedene Eigenschaften, die ein Objekt haben kann, das sich auf einer Landkarte befindet, betrachtet werden, wenn davon ausgegangen werden kann, dass sie Einfluss auf die jeweilige Relation haben.

Um diese Eigenschaften zu erfassen, sollen einige existierende wissenschaftliche Modelle untersucht werden, mit denen man die räumlich-geografischen Relationen ermitteln kann.

1.3 Zielsetzung

In meiner Diplomarbeit möchte ich Algorithmen erarbeiten, die qualitative räumlich-geografische Relationen auf drei verschiedenen Ebenen erkennen: Relationen der Topologie (Liegt die Stadt komplett, teilweise oder gar nicht im Gebirge?), der Richtung[1](In welcher Richtung liegt der Fluss zur Stadt?) und der Entfernung (Wie weit ist die Autobahn von der Stadt entfernt?). Diese Relationen sollen zwischen zwei vorgegebenen Objekten auf einer genordeten Landkarte erkannt werden. Die Objekte sind somit maximal zweidimensional, Objekte, die in der Realität dreidimensional sind, werden als zweidimensionale Objekte abgebildet. Die Grundlage sollen Algorithmen bilden, deren Grundgerüst vorrangig aus wissenschaftlichen Erkenntnissen bestehen soll. Diese theoretischen Grundlagen zur Erkennung der Relationen sollen zum Einen die in der wissenschaftlichlichen Literatur beschriebenen Möglichkeiten aus dem "Qualitativen räumlichen Schließen" ("Qualitative spatial reasoning") und zum anderen aber auch persönliche Weiter- bzw. Eigenentwicklungen bilden. Von diesen verschiedenen Modellen sollen für die jeweiligen Relationen und Situationen die plausibelsten ausgewählt und in Algorithmen umgesetzt werden. Daraus soll eine beispielhafte Software entwickelt werden, die Relationen der Topologie, der Richtung und der Entfernung zwischen zwei ausgewählten Objekten erkennt und einen zugehörigen sprachlichen Ausdruck widergibt.

Somit soll es mein Beitrag zur Wissenschaft sein, ein Verfahren zu ermitteln, mit dem alle Relationen der Topologie, der Richtung und der Entfernung zwischen zwei beliebigen Objekten richtig bzw. allgemein nachvollziehbar interpretiert werden können.

Die Diplomarbeit gilt somit als erfolgreich verlaufen, wenn ich die Fragestellungen schlüssig, klar und gut zu verstehend beantwortet habe. Folgende Teilziele sollen deshalb erreicht werden:

- Es sollen alle auffindbaren, zum Thema passenden und mir sinnvoll erscheinenden wissenschaftlichen Beschreibungen zur Relationsermitllung und -interpretation sowohl im Bereich der Topologie, der Richtung als auch der Entfernung vorgestellt und erläutert werden. Damit

[1] Als Richtungerelationen sollen nur Himmelsrichtungen benutzt werden.

werde ich verschiedene Herangehensweisen an die jeweilige Problematik aufführen.

- Wenn mir davon etwas (teilweise) nicht nachvollziehbar erscheint, werde ich ihre jeweiligen Probleme und/oder Fehler aufführen.

- Die zuvor kritisierten Problematiken sollen anschließend durch meine Verbesserungsvorschläge behoben werden. Wenn für eine Situation mehrere Möglichkeiten zur Verfügung stehen, wird eine Bewertung der einzelnen Möglichkeiten erfolgen. Das wissenschaftliche Vorgehen oder der Teil davon, das/der mir am einleuchtendsten oder am sinnvollsten erscheint, wird rausgesucht bzw. mehrere Teile verschiedener Modelle werden einer Situation zugeordnet.

- In Situationen, bei denen es kein Modell, kein Kalkül, Verfahren, System oder Ansatz gibt oder die vorgeschlagene Möglichkeit ungenügend ist, werde ich eigene Vorschläge zur Ermittlung der Relationen machen.

- Insgesamt soll jede räumliche Relation, die zwischen zwei Objekten eintreten kann, erkannt werden und ein sprachlicher Ausdruck dieser Relation aufgeführt werden können:
  - Topologische Relationen sollen zwischen Objekten beliebiger Form erkannt werden können.
  - Relationen der Richtung sollen sich generell auf die Himmelsrichtungen beschränken. Dabei wird hier ein besonderes Augenmerk auf die jeweiligen Objekte und ihre Eigenschaften gelegt, zwischen denen die Relation ermittelt werden soll.
  - Bei Entfernungsrelationen soll kurz untersucht werden, mit welcher in der Literatur als sinnvoll angesehenen Granularität in Entfernungsrelationen unterteilt werden kann. Des Weiteren soll auf die wichtigsten Faktoren eingegangen werden, die Einfluss auf die Entfernungswahrnehmung des Menschen haben und auf welche Art und Weise Entfernungen ermittelt werden können.

- Der praktische Teil soll auf der Grundlage der theoretisch erarbeiteten und für sinnvoll betrachteten wissenschaftlichen Beschreibungen zur Relationsermittlung arbeiten und sie demonstrieren können. Die Software soll nach Angabe von zwei Objekten und der Relationsart (Topologie, Richtung oder Entfernung) den sprachlichen Ausdruck der Relation zurückgeben.

Angesprochen werden sollen mit dieser Arbeit - neben allen grundsätzlich Interessierten - speziell Interessierte der Raumkognition und Personen, die an GIS oder GIS-artigen System arbeiten und versuchen sie weiterzuentwickeln und ihnen ggf. weitere Ideen und Anregungen liefern.

1.4 Methodisches Vorgehen

Um die Fragestellung der Diplomarbeit zu beantworten, muss in drei verschiedene Relationstypen unterschieden werden. Betrachten wir dazu noch einmal die Planungsaufgabe aus dem Kapitel 1.1:

Plane die Lage meines neuen Hauses so, dass es nicht in den heruntergekommenen Stadtteilen X, Y und Z liegt, dass die Schule der Kinder mit höchstens 20 Minuten Fußmarsch zu erreichen ist und dass es möglichst westlich der Innenstadt liegt, weil es da größtenteils verkehrsberuhigt ist.

Diese Planungsaufgabe deckt alle räumlichen Aspekte ab, die in dieser Arbeit genauer untersucht werden sollen:

- Topologie - (nicht) in X gelegen
- Richtung - westlich der Innenstadt
- Entfernung - max. 20 Minuten zu Fuß entfernt

Alle drei Bereiche werden wir zunächst theoretisch betrachten, um diese theoretischen Betrachtungen dann in die Praxis umzusetzen. Methodisch ist dies detailliert wie folgt geplant:

Zu den einzelnen Relationsarten, ihrer Ermittlung bzw. Interpretation und ggf. ihrer Herleitung soll wissenschaftliche Literatur hinzugezogen werden. Da es auf Grund der großen Menge nicht möglich sein wird alle existierenden Ansätze vorzustellen oder gar zu lesen, werde ich versuchen alle wissenschaftlich anerkannten[2] Möglichkeiten im Großen und Ganzen abzudecken. Diese vorgestellten Möglichkeiten werden dabei so ausgewählt, dass sie sich untereinander wesentlich unterscheiden, so dass möglichst wenig Redundanz entsteht.

Nach ihrer Vorstellung sollen die verschiedenen Möglichkeiten bewertet werden. Neben der Kritik an einzelnen Teilbereichen und der Beurteilung

[2] Um hier als wissenschaftlich anerkannt zu gelten, muss der Artikel zu der Möglichkeit der Relationsermittlung, ganz gleich, ob es sich um ein Modell, Kalkül, Verfahren o.ä. handelt, in einigen weiteren wissenschaftlichen Artikeln erwähnt werden.

welche Möglichkeit(en) am sinnvollsten erscheint/erscheinen, sollen auch Dinge aufgeführt werden, die ich in der wissenschaftlichen Literatur gar nicht finden konnte, die mir aber für ein vollständiges praktisches System erforderlich erscheinen.

Somit ergeben sich für den praktischen Entwurf pro Relationsart und ggf. bei verschiedenen Situationen einige endgültige Verfahren. Diese werden implementiert und können an Hand einer Beispielkarte ermittelt werden.

Methodisches Ziel ist es letztlich ein System zu entwickeln, das plausibele Algorithmen beinhaltet, die die Relationen bestimmen bzw. interpretieren, und das Ergebnisse liefert, die mir persönlich und, sofern möglich, auch anderen nachweisbar plausibel erscheinen.

1.5 Aufbau und Übersicht der Arbeit

In dem folgenden Kapitel werden zuerst ein paar Grundlagen gelegt, die für das Verständnis der weiteren Kapitel notwendig sind.

Das Kapitel 3 (State of the Art) beinhaltet den (wahrscheinlich) aktuellen Stand der Forschung. Zunächst geht es um das Thema Topologie sowie ein Modell und ein Kalkül zur Ermittlung der Relationen, die topologisch zwischen zwei Objekten bestehen können. Der Großteil dieses Abschnitts besteht zum Einen aus den zwei topologischen Vergleichen von Linien und Flächen und zum Anderen aus dem Vergleich von zwei Flächen untereinander.

Im zweiten Abschnitt der Kapitel geht des um das Thema Richtungsrelationsermittlung. Zunächst wird hier das Sektorenmodell vorgestellt und auf zwei nulldimensionale Objekt mit verschiedener Granularität angewandt. Dabei wird auch auf die mögliche Einführung einer neutralen Zone eingegangen. Weiter werden wir die Richtungsbestimmung bei konkaven Objekten mit Ausdehnung betrachten. Als Sonderfall wird auch auf die Richtungsbestimmung bei konkaven Objekten eingegangen.

Der dritte Abschnitt des Kapitels 3 widmet sich der Entfernungsrelationsbestimmung. Nach einen kurzen Abschnitt über verschiedene Faktoren, die die qualitative Entfernungsrelationsbestimmung beeinflussen, werden verschiedene Verfahren zur Ermittlung von Entfernungsrelationen vorgestellt: Es wird betrachtet, wie sich die Größen der einzelnen Relationsbereiche zueinander verhalten, wie aus der Kombination bereits bestimmter Entfernungsrelationen eine neue Relation ermittelt werden kann und wie durch Größenvergleiche neue Relationen aus alten abgeleitet werden können.

Jeweils zum Abschluss der drei Teilabschnitte werden Probleme der vorher aufgeführten Relationsbestimmungen beschrieben und fehlende Aspekte aufgezählt.

Im vierten Kapitel (Entscheidungen und Weiterentwicklungen) sollen die verschiedenen Vorgehensweisen zur Relationsermittlung aus dem dritten Kapitel bewertet und ggf. für die Diplomarbeit noch verbessert werden. Hier soll die Entscheidung fallen, welche der vorgestellten Möglichkeiten für die jeweilige Situtation die Beste ist und später im praktischen System integriert werden soll. Dabei werden verschiedene Teilaspekte miteinander kombiniert. Dabei ist es möglich, dass es zu bestimmten Situationen noch keinen Vorschlag zum Vorgehen gibt. In diesen Fällen werde ich meine persönlichen Gedanken dazu schreiben und später realisieren.

Im Kapitel 5 (Das praktische Vorgehen) wird zunächst eine grobe Beschreibung des praktischen Systems erfolgen. Dadurch soll der Benutzer erfahren, was er mit der Software tun kann und wie er dies macht.

Im zweiten Teil des Kapitels wird dann die Funktionalität des Systems aufgeschlüsselt. Man erfährt also wie die im vierten Kapitel vorgestellten Kapitel mit Verfahren der computionalen Geometrie realisiert wurden.

Das sechste Kapitel dient der kritischen Betrachtung der bisherigen Vorgehensweise und des Erreichten. Zunächst wird ein Fazit darüber gezogen, was erreicht wurde. Dabei werden auch Probleme und Mängel des Systems aufgezeigt. Zudem wird beschrieben was nicht erreicht werden konnte und warum. Das Kapitel enthält außerdem einen Ausblick auf das, was als Erweiterung dieser Arbeit noch gemacht werden könnte.

Kapitel 2

Qualitatives räumliches Schließen

2.1 Einleitung

In dieser Diplomarbeit sollen verschiedene Ansätze, Verfahren und Modelle untersucht werden, die in den Bereich des `Qualitativen räumlichen Schließens` eingeordnet werden können. Diese Einleitung soll einen kurzen Einblick in dieses Thema geben.

Physische Räume und ihre Eigenschaften spielen im täglichen Leben, bei Handlungen und Entscheidungen, eine wichtige Rolle (vgl. [Fre92]). Der Mensch denkt oft symbolisch und qualitativ (vgl.[Fra92]) und braucht deshalb nicht zwangsläufig exakte Angaben (im physischen Raum z.B. eine Meterangabe) um Entscheidungen zu fällen oder Schlüsse zu ziehen. Das räumliche Schlussfolgern muss dabei nicht zwischen den real existierenden Objekten stattfinden sondern kann zwischen den Abbildern der Objekte in einem mentalen Modell (z.B. eine kognitiven Karte) erfolgen (vgl. [Bar01]), das z.B. durch Wissen und Vorstellungen eines Sachverhaltes entsteht, und/oder mit Hilfe von Kartenmaterial o.ä., das den Sachverhalt darstellt.

Unter "qualitativem räumlichen Schließen" versteht man somit die Repräsentation von Informationen über die räumliche Lage und Form von Objekten (vgl. [Nie03]). Dabei wird die Verarbeitung von räumlichem Wissen ohne exakte metrische Angaben untersucht (vgl. [Bar01]), so dass aus den gegebenen oder bereits ermittelten Informationen weitere Schlüsse gezogen werden können.

Die Forschung im Bereich des "qualitativen räumlichen Schließens" stellt eine wichtige Grundlage der Modellierung der Welt und des menschlichen

Denkens in Maschinen dar (vgl. [Coh97]).

Die nun folgenden Abschnitte sollen Teilgebiete des "qualitativen räumlichen Schließens" erläutern, die wir im Laufe der Diplomarbeit als Grundlagen noch brauchen werden. Es wird dargelegt, wie Objekte repräsentiert werden, welche Arten von Objekten wir nutzen werden, welche Eigenschaften die Objekte haben werden, wie man bei der Relationsermittlung bestimmte Objekte benennt, und es wird erklärt, was ein Referenzrahmen ist und wofür er gebraucht wird.

2.2 Qualitative Repräsentation der Objekte

Wenn Relationen zwischen Objekten bestimmt werden sollen, so wird eine Menge von Objekten benötigt, die in einer bestimmten Art und Weise angeordnet sind. In der Realität könnten dies z.B. ein Dorf oder ein Wald sein. Da aber in unserem Fall keine Möglichkeit für unser maschinelles System besteht, die Ansammlung von Objekten direkt wahrzunehmen, wird eine Karte, auf der diese Ansammlung dargestellt wird, erstellt und die Informationen, die in der Karte enthalten sind, werden für die Karte verfügbar gemacht.

Bei der Projektion der Objekte aus der realen Welt, im Folgenden "`repräsentierte Welt`" genannt, auf die Karte, allgemein und im Folgenden "`präsentierende Welt`" genannt (vgl. [Pal78]), können mehrere Probleme auftauchen. Informationen können verloren gehen. Objekte einer realen Landschaft oder eines realen Dorfes, wie Häuser, Straßen oder Brunnen sind dreidimensional, während unsere präsentierende Welt, die Karte, zweidimensional ist. Logischer Weise ist es so nicht möglich Objekte der dritten Dimension einzufügen. Durch 2-D-Projektionen von 3-D-Szenen ergibt sich die einfachste Möglichkeit räumliche Konfigurationen darzustellen ohne die wesentlichen Informationen wie z.B. Abhängigkeiten der Objekte untereinander zu verlieren (vgl. [Her94]). Unter dieser Projektion können wir uns eine Fotografie (vgl. [FH90]) oder ein Satellitenbild vorstellen, das senkrecht über dem Grund der Objekte gemacht wurde. Dabei verbleiben letztlich nur die Umrisse der Objekte als wesentliche direkt dargestellte Information, also Polygone, Kreise und ähnliche Objektarten.

Somit werden aus dreidimensionalen Objekten der darstellenden Welt zweidimensionale Objekte der darstellenden Welt. Allerdings werden nicht alle nun zweidimensionalen Objekte als solche interpretiert. Objekte, die im Zweidimensionalen nur eine sehr geringe Ausdehnung haben (wie Brunnen, Statuen oder Türme), werden oft nulldimensional bzw. punktförmig interpretiert. Ihre Darstellung bleibt zweidimensional (zumeist als Kreis), damit sie besser wahrgenommen werden können. Sie werden aber nur als Punkt verarbeitet. Das gleiche Verfahren wird bei Wegen, Straßen oder Bahnlinien angewandt. Sie sind in der Realität dreidimensional, werden auf der Karte oft als zweidimensional visualisiert[1], vom Menschen zumeist nur als eindimensionale Objekte wahrgenommen.

Allerdings ist es nicht immer gewollt und auch nicht immer sinnvoll, die Objekte der repräsentierten Welt wie bei einer Fotografie in die präsentierende Welt zu übernehmen. Eine gute Repräsentation zeichnet sich durch verschiedene Aspekte aus. Wichtig ist, dass die Repräsentation an ihren jeweiligen Zweck angepasst wird und die Lösung eines gegebenen Problems möglichst sogar erleichtert. Im Voraus sollte geprüft werden, welche Eigenschaften der repräsentierten Welt und ihrer Objekte verfügbar sind. Bei der eigentlichen Repräsentation sollten diese Eigenschaften so eingesetzt werden, dass nur Aspekte mit Bedeutung eingesetzt werden. Dabei sollte sich auf die nötigsten Aspekte beschränkt werden. Dazu gehört auch die Granularität der Repräsentation. Um die Darstellung weiter möglichst einfach zu halten, sollten einheitliche Zeichen und Symbole für unterschiedliche Objektarten benutzt werden, so wie es z.B. bei physischen Landkarten gemacht wird (gesamter Abschnitt vgl. [Her94]).

Für eine gute räumliche Repräsentation formulierte Palmer 1978 eine Theorie (vgl. [Pal78]), basierend auf der repräsentierenden und der präsentierten Welt. Zuerst muss der Sinn bzw. die Aufgabe der Repräsentation formuliert werden. Danach müssen als Leitfaden die folgenden Fragen beantwortet werden und mit dieser Hilfe die präsentierende Welt modelliert werden.

1. Was ist die repräsentierte Welt?
2. Was ist die präsentierende Welt?
3. Welche Aspekte der repräsentierten Welt werden dargestellt?
4. Welche Aspekte der präsentierenden Welt werden dargestellt?
5. Was ist der Zusammenhang beider Welten?

In unserem Fall ist die repräsentierte Welt ein Teil einer deutschen Kleinstadt. Sie besteht grundsätzlich aus Straßen, unterschiedlichen Gebäudear-

[1] Je nach Maßstab und realer Größe des Objekts erfolgt jedoch auch auf der Karte eine eindimensionale Darstellung. Z.B. werden Bahnlinien auf Landkarten, die einen größeren Maßstab als Stadtkarten haben, stets eindimensional dargestellt.

ten, einzelnen Bäumen, Statuen und Wäldern. Ein Teil der zu modellierenden Stadt besteht aus einer dicht bebauten Innenstadt, einer nicht ganz so dicht bebauten Vorstadt mit einem großen Krankenhausgebäude und einem kleinen Teil eines Wohngebietes.

Die präsentierende Welt ist eine Karte, die die dreidimensionale Objekte der Kleinstadt ins Zweidimensionale überführt. Dabei wird eine Aufsicht der Stadt modelliert.

Auf unserer Karte werden nur Objekte mit Bedeutung modelliert. Das sind in unserem Fall Straßen, Parkplätze, Gebäude, Garagen, Wälder, einzelne Bäume, Statuen und Bushaltestellen. Dabei werden die ausgedehnten Objekte durch ihre Grundrisse dargestellt. Es ergeben sich dadurch Polygone. Auch ausgedehnte Objekte, die in der repräsentierenden Welt keine feste Grenze haben, wie z.B. ein Wald, werden so dargestellt. Ihr Grenzbereich wird in der repräsentierten Welt festgelegt. Ausgedehnte Objekte, die in eine Richtung wesentlich stärker ausgedehnt sind, wie z.B. Straßen, werden eindimensional, also in Form einer Linie, dargestellt. Objekte, die in der repräsentierten Welt eine äußerst geringe Ausdehnung haben (Bäume oder Denkmäler), werden durch kleine Kreise repräsentiert.

Beide Welten hängen nun insofern zusammen, dass beide einen Teil einer Stadt auf ihre eigene Art und Weise repräsentieren. Aus beiden Welten ist es möglich räumlich-geografische und geometrische Relationen herauszufiltern. Dadurch sollte unser Ziel, räumlich-geometrische Relationen der repräsentierenden Welt zu bestimmen, erreicht werden. Auf Grund der Vereinfachung der präsentierenden Welt können die ermittelten Relationen nicht in hundert Prozent aller Fälle identisch mit denen aus der repräsentierten Welt sein, da oft auch Faktoren bei der Relationsbestimmung eine Rolle spielen, die nicht oder nur schwer darstellbar sind (z.B. Haustüren, unattraktive Straßen oder Stadtteile).

2.3 Objektarten

Da unsere Grundlage, wie bereits erwähnt, eine zweidimensionale Karte sein wird, wird es “nur” nulldimensionale, eindimensionale und zweidimensionale Objekte geben. Nulldimensionale Objekte sind beispielsweise Brunnen oder Statuen, eindimensionale Objekte fallen u.a. unter Straßen und Flüsse, zweidimensionale Objekte sind z.B. Häuser, Wälder oder Parkplätze. Zur Vereinfachung werden bei allen unseren Untersuchungen alle nulldimensionalen Objekte `Punkte`, alle eindimensionalen Objekte `Linien` und alle zweidimensionalen Objekte `Flächen` oder `Regionen` genannt. Natürlich sind dabei alle möglichen Objekte der jeweiligen Dimension gemeint, sofern sie unseren (im nächsten Kapitel folgenden) Definitionen genügen.

Die Objekte, die wir betrachten werden, können von beliebiger Form sein, also konkav und konvex. Sie müssen allerdings zusammenhängend sein. Zusammengefasste oder verteilte Objekte, wie z.B. Inselgruppen, werden ausgeschlossen bzw. jedes Teil des verteilten Objekts als eigenes Objekt betrachtet. Nicht betrachtet werden außerdem Objekte, die Löcher beinhalten. Ausgeschlossen werden ebenfalls die in [EH91] definierten komplexen (zweidimensionalen) Objekte und komplexen Linien. Letztere können (und werden im Folgenden) als zwei Linien betrachtet werden, bei denen eine Linie auf einer zweiten Linie beginnt oder endet. Die komplexen Objekte können ebenfalls in ihre Teilkomponenten aufgeteilt werden. Gleiches gilt für Polylinien.

2.4 Objekte und ihre Eigenschaften

Um überhaupt Relationen zwischen Objekten ermitteln zu können, müssen wir zuerst Grundlagen dafür schaffen. Die wichtigste Grundlage sind die Objekte selbst. Objekte haben einige Eigenschaften, die später für die Relationsermittlung benötigt werden. Einige dieser Eigenschaften sind abstrakt und auch für die Repräsentation auf der Karte wichtig. Sie existieren in der Realität nicht in dieser Art und Weise, sie sind für einige Relationen aber von enormer Bedeutung. Nulldimensionale Objekte (Punkte) bilden dabei einen Sonderfall. Während Linien und Flächen bestimmte Eigenschaften erfüllen müssen, können Punkte nicht weiter eingeschränkt werden. Die Eigenschaften, die im Folgenden für Flächen und Linien definiert werden, gibt es bei Punkten nicht.

2.4.1 Definition von Linie und Fläche

Für die weiteren Untersuchungen werden wir Linien und Flächen wie folgt definieren:

- Eine **Fläche** ist eine zweidimensionale Punktmenge, die auf jeden Fall zusammenhängend ist. Jede Fläche muss eine Grenze haben. Jede Fläche ist endlich. Flächen haben diskrete Grenzen, auch wenn diese (teilweise) in der Realität nicht erkennbar sind (wie z.B. bei der Nordsee). Bei Abbildungen von Objekten, die teilweise außerhalb des Betrachtungsraums liegen, wird der Teil der nicht einsehbaren Grenze durch den Abbildungsrand ersetzt.

- Eine **Linie** ist eine eindimensionale Punktmenge, bei der jeder Punkt (mit Ausnahme von genau zwei Endpunkten) zwei Nachbarpunkte hat. Linien werden als einfache "kürzeste Wege" von Endpunkt zu Endpunkt angesehen. Folglich schneidet sich eine Linie nicht mit sich selbst (vgl. [EH91], [EM95]). Linien sind zusammenhängend (eine Linie besteht nicht aus mehreren Teillinien) und bilden keine Kreise (vgl. [EH91], [EM95]). Folglich gilt: `Endpunkt 1` $\neq$ `Endpunkt 2` und `Endpunkt 1` $\neq$ `Nachbarpunkt(Endpunkt 2)`, wenn `#Punkte(Linie) > 2`.

So kann entgegen dem allgemein gebräuchlichen Begriff der "Linie" auch ein (nicht geschlossener) Kreisbogen gemeint sein. Alle Objekte haben dabei bestimmte weitere Eigenschaften, die wir für die Untersuchungen benötigen.

2.4.2 Grenze und Innenbereich eines Objekts

Um beispielsweise topologische Relationen zwischen Objekten besser untersuchen zu können, musste ein Objekt genauer definiert werden, als als eine einfache Punktmenge. 1988 erweiterte Pullar diesen Begriff der Punktmenge (vgl. [Pul88]). Um die Punktmenge besser aufzugliedern wurden die Begriffe der *Grenze* und des *Innenbereichs* für Flächen definiert (vgl. z.B. [Pul88], [EF91]):

Abbildung 2.1: Grenze, Innenbereich und Abschluss eines zweidimensionalen Objekts

- Der **Innenbereich** von Y (abgekürzt Y^0) ist wie folgt definiert:
  Sei y $\in$ Y beliebig. y $\in Y^0$, wenn gilt:
  $\forall$ Nachbarpunkte x von y gilt: x $\in$ Y.
  Mit anderen Worten: y darf nicht auf der Grenze der Objektes Y und nicht außerhalb von Y liegen.

- Die **Grenze** von Y (abgekürzt δY) ist folgender Maßen definiert: Alle y $\in$ Y für die nicht gilt, dass sie Y^0 sind, gehören zur Punktmenge der Grenze.

Die Gesamtmenge von Y - also Grenze und Innenbereich zusammen - wird als **Abschluss** $\overline{Y}$ definiert.

Egenhofer definierte zudem den Begriff des **Außenbereichs** (vgl. [EH91]):

- Der **Außenbereich** Y^- ist die gesamte Ebene abzüglich des Abschlusses der betrachteten Fläche.

Eine Fläche, wie sie hier betrachtet werden soll, muss dabei immer eine geschlossene Grenze haben, sowie einen nicht leeren Innenbereich. Eine "Fläche" ohne Innenbereich und mit geschlossener Grenze könnte als Linie, bei der Start- und Endpunkt gleich sind, gedeutet werden. Diese Möglichkeit wurde aber bereits ausgeschlossen. Man könnte es auch als Objekt mit Loch interpretieren. Diese Art von Objekten wird allerdings auch nicht betrachtet. Das theoretische "leere" Objekt (keine Grenze, kein Innenbereich) wird nicht untersucht.

Auf die gleiche Art und Weise wie Flächen können auch Linien definiert werden (vgl. [EM95]):

- Der **Innenbereich** X^0 ist folgender Maßen definiert:
  Sei x $\in$ X beliebig. x $\in X^0$, wenn gilt:
  $\forall$ x $\in$ X gilt: $\exists!$ zwei Nachbarpunkte y,z $\in$ X von x.
- Die **Grenze** δX einer Linie besteht aus den beiden Punkten einer Linie, die nur einen Nachbarn haben, der auch zur Linie gehört. Es gilt:
  $\forall$ x $\in$ X gilt: $\exists!$ ein Nachbarpunkt y $\in$ X in x.
  Somit bilden der Start- und der Endpunkt einer Linie ihre Grenze.
- Der **Abschluss** $\overline{X}$ ist die Vereinigung von Grenze und Innenbereich von X.
- Der **Außenbereich** X^- ist die gesamte Ebene abzüglich des Abschlusses der betrachteten Linie.

Eine Linie besteht dabei aus mindestens zwei Punkten (den Grenzpunkten).

2.5 Bezugnahme auf Objekte

Wenn Relationen zwischen Objekten bestimmt werden sollen ist es oft sinnvoll die beiden Objekte verschieden zu benennen, da sie oft unterschiedliche Funktionen haben oder verschiedene Aufgaben erfüllen. Deshalb gibt es bei jeder Relationsbestimmung zwei Objekte (vgl. [CFH97], [Coh97], [Her94], [HCF95]):

- Ein primäres Objekt[2] und
- ein Referenzobjekt

2.5.1 Das primäre Objekt

Das primäre Objekt ist das Objekt, dessen Lage oder Entfernung ermittelt werden soll. Zu ihm wird die Relation bestimmt.

2.5.2 Das Referenzobjekt

Das Referenzobjekt ist das Objekt zu dem der Bezug hergestellt wird. Es wird benötigt, um eine Richtung oder Entfernung bestimmen zu können. An ihm wird ausgerichtet, in welcher Richtung das primäre Objekt gelegen ist.

Eine Frage nach der Richtung zwischen den beiden Objekten würde wie folgt lauten:

`In welcher Richtung, vom Referenzobjekt gesehen, liegt das primäre Objekt?`

Die Unterscheidung in diese verschiedenen Objekte wird vorrangig bei der Richtungsbestimmung benötigt, da eine Vertauschung der Objekte zu einer andere Richtungsrelation führen würde. Aber auch bei der Entfernungsbestimmung kann eine solche Unterscheidung sinnvoll sein: Die Entfernung von einem Objekt A zu einem Objekt B kann unter Umständen (wie z.B. bei Entfernungen durch Benutzung von PKWs unter Benutzung von Straßen unter denen auch Einbahnstraßen sein können) unterschiedlich sein.

[2] In der englischen Literatur wird es “primary object” genannt. Leider konnte keine gute deutsche Übersetzung gefunden werden, so dass es hier als “primäres Objekt” bezeichnet wird.

2.6 Referenzrahmen

Um qualitativ Richtungen oder Entfernungen ermitteln zu können reicht es nicht aus, einfach zwei Objekte miteinander zu vergleichen. Zusätzlich wird etwas benötigt, das vorher eine Art Vergleichsrichtung oder eine Art von Maßstab vorgibt. Bildlich gesprochen muss eine Art Rahmen um das primäre und das Referenzobjekt gelegt werden, um die grundsätzliche Ausrichtung festzulegen oder um eine Bezugs- und Größenfestlegung zu haben. Auf ein und derselben Karte könnte ein primäres Objekt z.B. aus der einen Sicht südlich, aus einer anderen Sicht westlich zum Referenzobjekt gelegen sein, wenn es nicht anders festgelegt wird (z.B. die Richtung durch einen Nordpfeil). Man kann dabei allgemein zwischen drei verschiedene Referenzrahmen unterscheiden (vgl. [HCF95], [Coh97]):

- Beim **intrinsischen Referenzrahmen** werden Eigenschaften des Referenzobjektes beachtet. Wenn ein Ball vor ein Auto rollt dann ist es in diesem Fall so, dass der Ball dahin rollt, wo das Auto hinfahren würde, wenn es vorwärts losfährt. Dabei ist es egal, ob man als Betrachter auch vor dem Auto steht oder es sich von der Seite betrachtet. Vom Auto selbst würde auch bestimmt werden, was für es nah oder fern ist. Folglich bestimmt hier das Referenzobjekt mit seinen Eigenschaften den (intrinsischen) Referenzrahmen.

- Beim **extrinsischen Referenzrahmen** bestimmen externe Faktoren die Relationensgrößen. Beispielsweise kann bei der Richtungsbestimmung die Bewegung des Referenzobjekts beachtet, auch wenn sie untypisch ist. Wenn ein Auto beispielsweise rückwärts fährt, kann ein Kind vor das Auto laufen und trotzdem überfahren werden. Hier hat "vor das Auto laufen" die Bedeutung, dass das Kind dahin läuft, wo das Auto hinfährt. Externe Faktoren bei der Entfernungsbestimmung wären die Anordnung anderer Objekte, die Fahrzeit oder die anzunehmenen Kosten.

- Beim **deiktischen Referenzrahmen** kommt es auf den Betrachter selbst an. Sein Blick auf die Objekte bestimmt (interpretationslos) die Ausrichtung. Eine Ausnahme (wenn es also nicht vom Blick des Betrachters abhängt) besteht, wenn ein bestimmtes Objekt genannt wird, von dem aus betrachtet werden soll (Von der Kirche aus gesehen liegt das Restaurant hinter dem Rathaus).

2.7 Weitere Begrifflichkeiten

Um vom Menschen als eine bestimmte Relation erkannt zu werden, müssen das Referenz- und das primäre Objekt eine bestimmte Lage zueinander haben. Somit muss das primäre Objekt in einem Bereich liegen, den der Mensch als zu einer bestimmten Relation zugehörigen Bereich interpretiert. Dieser Bereich wird **Akzeptanzbereich** oder auch **Sektor** genannt. Er hat – je nach Relationsart – verschiedene Formen: Akzeptanzbereiche der Entfernung entsprechen oft (angenäherten) Kreisen oder Kreisringen, die mit Ausnahme des dem Referenzobjekt entferntesten Akzeptanzbereichs geschlossen sind. Bei der Richtungsbestimmung sind sie offen und haben die Form eines Winkels bzw. eines offenen Trapezes. Bei der Topologie gibt es keinen Akzeptanzbereich.

Kapitel 3

State of the Art

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft der Themen Topologie, Richtung und Entfernung, angepasst an die Relationsbestimmung zwischen zwei Objekten. Verschiedene zu diesem Thema passende Ansätze werden hier nach Themen geordnet vorgestellt. Die einzelnen Abschnitte schließen mit kurzen kritischen Anmerkungsunterabschnitten.

3.1 Topologie

Der Begriff der Topologie stammt urspünglich aus der Mathematik. Topologie ist eine Bezeichnung für bestimmte mathematische Strukturen (vgl. [Coh97]).

Aber auch die Informatik beschäftigt sich mit dem Thema Topologie. Für das "qualitative räumliche Schließen" ist die Topologie ein grundlegender Aspekt (vgl. [Coh97]). Dabei werden qualitative Unterscheidungen von Objekten ermittelt: Man ermittelt die relative Orientierung der Objekte bzw. von Räumen unabhängig von Winkeln und Entfernungen zueinander (vgl. z.B. [Her94], [Edg90]). Topologische Relationen bleiben nach bestimmten Veränderungen wie Rotation, Transformation und Skalierung unverändert (vgl. [KL05]). Im Vergleich zur Mathematik wird zwar nur auf einen Teilaspekt der Topologie eingegangen, allerdings wird auch Wert auf Aspekte gelegt, die in der Mathematik kaum beachtet werden: Bei topologischen Untersuchungen der Informatik geht es nicht nur um die Repräsentation von Räumen, sondern auch um das räumliche Schlussfolgern in diesen Räumen (vgl. [Coh97]). Wie bereits erwähnt wird das qualitative Verhältnis zwischen zwei (oder mehr) Objekten untereinander untersucht. Bei topologischen Untersuchungen erhält man allgemein die akstraktesten räumlichen Strukturen. Geometrisch gesehen bekommt man die schwächsten Ergebnisse bei der Ermittlung von räumlich-geometrischen Relationen (vgl. [Vie97]) Es wird dabei nicht auf Richtungen oder Entfernungen eingegangen. Das Ergebnis von einer topologischen Untersuchung könnte beispielsweise sein, dass zwei Objekte disjunkt sind, sich `überschneiden` oder `gleich` sind. Besagte Eigenschaften sind Grundeigenschaften von Objektrelationen. Sie werden vermutlich unterbewusst bei anderen Relationsuntersuchungen vorausgesetzt oder als gegeben hingenommen. Zumindest ist es nicht anders zu erklären, dass bei Aussagen wie "Die Objekte sind 20 km voneinander entfernt" nicht erwähnt werden muss, dass die beiden Objekte auch disjunkt sind.

Trotzdem kommen diesen Relationen auch immense praktische Bedeutungen zu. Schauen wir uns unser geografisches Beispiel an: Ohne topologische Eigenschaften könnte nicht bestimmt werden, dass eine bestimmte Stadt auf der Landkarte in einem bestimmten Land liegt oder sich Gebirgszüge über Ländergrenzen hinweg erstrecken.

Diverse Wissenschaftler haben sich in den vergangenen Jahrzehnten mit topologischen Relationen, ihrer Ermittlung und ihrer Herleitung beschäftigt. Neben den ermittelten Relationen zwischen den einzelnen Objektarten werden im Folgenden auch verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, wie man alle topologischen Relationen ermitteln kann.

3.1.1 Voraussetzungen und Definitionen

In Kapitel 2 haben wir schon die wichtigsten Eigenschaften von Objekten definiert. Es gilt nun diese für die topologischen Untersuchungen zu nutzen.

Grundlage vieler wissenschaftlicher Untersuchungen im Bereich der Topologie ist ein Artikel von Güting (vgl. [Güt88]). Um topologische Relationen zu beschreiben, definierte er die zu betrachtenden Objekte als Punktmengen. An Hand der Punktmengen kann mit Hilfe von mathematischen Operatoren die jeweilige topologische Relation festgestellt werden. Güting beschreibt die sprachlichen Relationen `gleich, ungleich, innerhalb, außerhalb` und `schneidet` mit den Punktmengen x und y:

$$
\begin{aligned}
\mathtt{x = y} &:= \mathtt{points(x) = points(y)} \\
\mathtt{x} \neq \mathtt{y} &:= \mathtt{points(x)} \neq \mathtt{points(y)} \\
\mathtt{x\ inside\ y} &:= \mathtt{points(x)} \subseteq \mathtt{points(y)} \\
\mathtt{x\ outside\ y} &:= \mathtt{points(x)} \cap \mathtt{points(y)} = \emptyset
\end{aligned}
$$

`x intersects y := points(x)` $\cap$ `points(y)` $\neq \emptyset$

Mit diesen fünf Formelm haben wir natürlich nicht alle möglichen Relationen aufgelistet. Genausowenig sind diese Definitionen in sich eindeutig. `points(x)` $\cap$ `points(y)` $\neq \emptyset$ beschreibt nicht nur die Relation `überschneidet`, sondern auch `berührt` oder `enthält`. Eine Definition für den Begriff `berührt` ist auf diese Weise nicht möglich.

Um topologische Relationen besser und präziser unterscheiden zu können, wurde die Gesamtpunktmenge des Objekts in die beiden Untermengen `Grenzen` und `Innenbereiche` unterteilt (vgl. Kapitel 2.4.2).

3.1.2 Topologie bei eindimensionalen Objekten

Linien spielen bei den abstrakten Betrachtungen von geometrischen Karten eine wichtige Rolle. Oft werden Flüsse, Straßen oder Wege als Linien oder als eine Menge verketteter Linien (Polylinien) skizziert. Linien treten dabei in verschiedenen Variationen und in verschiedensten Kombinationen auf. Linien werden in der Wissenschaft topologisch mit Flächen oder mit weiteren Linien verglichen.

Vergleich von Linien untereinander

Zwei einfache eindimensionale Objekte miteinander topologisch zu vergleichen ist eine sehr komplexe Aufgabe. Der topologische Vergleich zweier Objekte dieser Dimension liefert die größte Anzahl von Relationen, die wir in dieser Arbeit erhalten. Egenhofer und Herring ermittelten 1991 mit Hilfe des "9-intersection Modells" 33 verschiedene Relationen (vgl. [EH91])!

Im "9-intersection Modell" werden jeweils die Grenzen δA, der Innenbereich A^0 und der Außenbereich A^- eines Objektes A (hier eine Linie) mit den Grenzen δB, dem Innenbereich B^0 und dem Außenbereich B^- eines Objekts B verglichen. So ergeben sich neun Vergleichsmöglichkeiten, die entweder einen Schnitt oder keinen Schnitt aufweisen (Die Schnittmenge ist leer oder nichtleer).[1] Es ergibt sich folgende Matrix, die mit 128 verschiedenen Kombinationen gefüllt werden kann.

$$\mathrm{R(A,B)} = \begin{pmatrix} A^0 \cap B^0 & A^0 \cap \delta B & A^0 \cap B^- \\ \delta A \cap B^0 & \delta A \cap \delta B & \delta A \cap B^- \\ A^- \cap B^0 & A^- \cap \delta B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$

[1] Das "9-intersection Modell" ähnelt dem "4-intersection Modell", in dem allerdings der Außenbereich nicht beachtet wird. Eine detaillierte Beschreibung des "4-intersection Modells" ist im Kapitell 3.1.3 auf Seite 27 zu finden.

Dass diese Matrix mit 128 verschiedenen Kombinationen gefüllt werden kann, bedeutet aber nicht, dass zwei Linien topologisch gesehen praktisch in 128 verschiedenen Kombinationen zueinander angeordnet werden können. Filtert man die Ergebnisse aus, die ein und dieselbe Relation mehrfach ergeben oder die nicht möglich sind (z.B. müssen sich Außenbereiche der Linien immer schneiden – ansonsten ist eine Relation von Linien unmöglich), so verbleiben 33 Relationen (s. Abbildung 3.1).

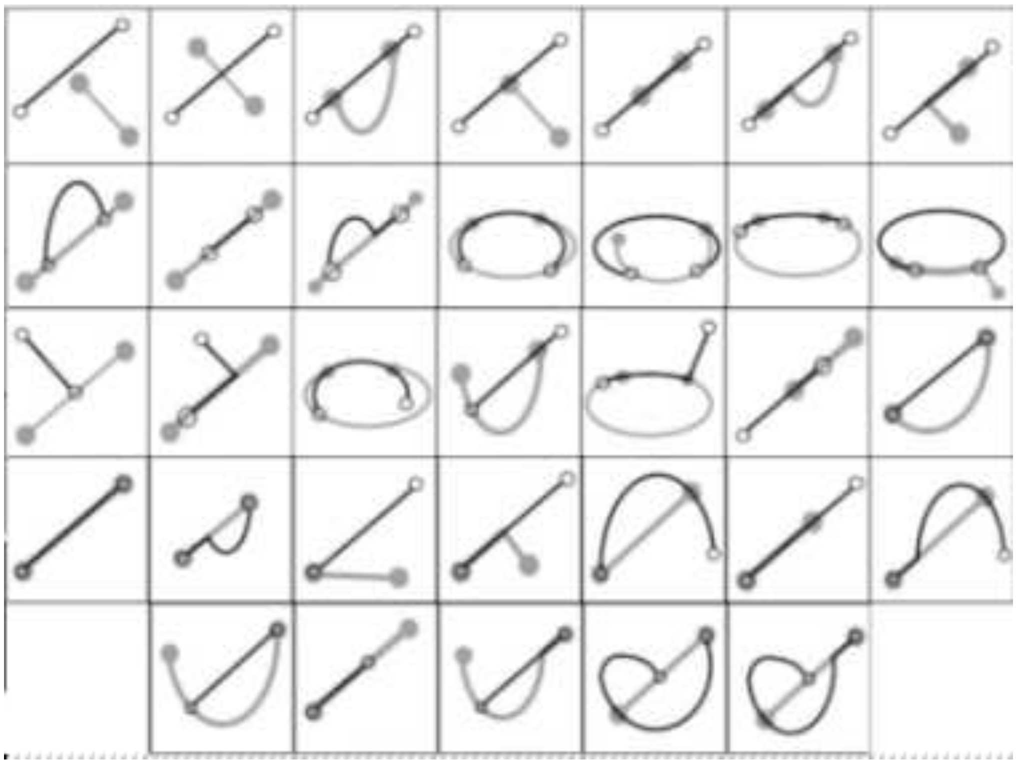


Abbildung 3.1: Alle 33 möglichen topologischen Relation zwischen zwei eindimensionalen Objekten

Vergleich von Linien und Fläche

Ebenfalls mit dem "9-intersection Modell" ermittelten Egenhofer und Herring 1991 19 topologische Relationen zwischen einer beliebigen Fläche A und einer beliebigen Linie B (vgl. [EH91]).

Von den 512 theoretisch möglichen Relationen können von vornherein einige ausgeschlossen werden: So muss sich laut Definition z.B. eine Fläche immer mit dem Außenbereich einer Linie schneiden. Ebenso muss sich die Grenze einer Fläche mit dem Außenbereich einer Linie schneiden, da die Linie sonst ein geschlossener Kreisring sein müsste, was aber bei der Definition ausgeschlossen wurde. Nach dem Aussortieren von doppelten Relationen und unmöglich darstellbaren Relationen verbleiben folgende 19 topologische Relationen (vgl. Tabelle 3.1):

Eine Linie kann somit - im topologischen Vergleich zu einer Fläche - (1) *disjunkt sein*, (2) *komplett enthalten sein*, (3) *die Region mit der Innenfläche von außen berühren*, (4) *innerhalb der Fläche verlaufen und trotzdem außerhalb beginnen und enden*, (5) *in der Fläche enthalten sein und die Flächengrenze mit dem Innenbereich berühren*, (6) *im Innenbereich der Fläche beginnen und enden, aber teilweise außerhalb verlaufen*, (7) *in der Fläche beginnen und außerhalb enden*, (8) *die Fläche mit ihren Grenzpunkten berühren und außerhalb verlaufen*, (9) *die Fläche mit einem Grenzpunkt berühren und außerhalb verlaufen*, (10) *die Fläche mit ihren Grenzpunkten berühren und innerhalb verlaufen*, (11) *die Fläche mit einem Grenzpunkt berühren und innerhalb verlaufen*, (12) *komplett auf der Flächengrenze verlaufen*, (13) *teilweise auf der Flächengrenze verlaufen und teilweise außerhalb der Fläche, sie beginnt und endet auf der Flächengrenze*, (14) *auf der Flächengrenze beginnen und verlaufen, dann außerhalb der Fläche verlaufen und enden*, (15) *auf der Flächengrenze beginnen, enden und teilweise verlaufen, dazu teilweise innerhalb der Fläche verlaufen*, (16) *auf der Flächengrenze beginnen und enden und außerhalb und innerhalb der Fläche verlaufen*, (17) *auf der Flächengrenze beginnen, außerhalb und innerhalb der Fläche verlaufen und außerhalb enden*, (18) *auf der Flächengrenze beginnen und teilweise verlaufen, dazu teilweise innerhalb der Fäche verlaufen und enden* und (19) *auf der Flächengrenze beginnen und außerhalb und innerhalb der Fläche verlaufen und innerhalb enden.*

3.1.3 Topologie bei zweidimensionalen Objekten

1991 veröffentlichten Egenhofer und Franzosa einen Artikel über topologischen Relationen und ihre Herleitung (vgl. [EF91]).

Eine Grundlage ist der Artikel von Güting (vgl. [Güt88]), der topologische Relatonen mit Hilfe von Punktmengen definiert (vgl. Kap. 3.1.1, Seite 22). Für das folgende Modell ist es aber wichtig ein Objekt nicht als einfache Punktmenge anzusehen, sondern die Punkte zu gruppieren. So ergeben sich die Definition von **Innenbereich**, **Grenze** und **Abschluss** (vgl. Kap. 2.4.2,

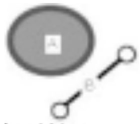
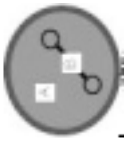
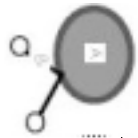
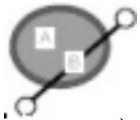
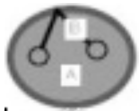
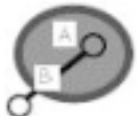
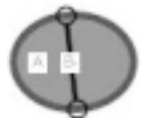
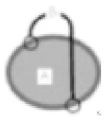
1  $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	 2 $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	3  $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	4  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
5  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	 6 $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	7  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	 8 $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
9  $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	10  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	11  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	12  $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
 13 $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	14  $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	15  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	 16 $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
17  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	18  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	 19 $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	

Tabelle 3.1: Übersicht über die sinnvollen Möglichkeiten, wie eine Linie topologisch zur Fläche ausgerichtet sein kann.

Seite 16).

Dank dieser Unterscheidung ist es nun z.B. möglich die Relationen `überschneidet` und `berührt` zu unterscheiden, da sich bei der `Berührung` lediglich die Grenzen schneiden, aber die Innenbereiche nicht. Bei der `Überschneidung` schneiden sich beide Bereiche. Legt man nur eine einzige Punktmenge pro Objekt zu Grunde, wäre diese Unterscheidung nicht möglich.

Somit werden folgenden Definitionen eingeführt:

`x überlappt y := Grenze(x)` $\cap$ `Grenze(y)` $\neq \emptyset$ `und Innenbereich(y)` $\cap$ `Innenbereich(y)` $\neq \emptyset$

`x berührt y := Grenze(x)` $\cap$ `Grenze(y)` $\neq \emptyset$ `und Innenbereich(y)` $\cap$ `Innenbereich(y) =` $\emptyset$

Modell von Egenhofer und Franzosa

Aufbauend auf die Definition von `überschneiden` und `berühren` und die Möglichkeit Grenzen und Innenbereiche unterscheiden zu können, entwickelten Egenhofer und Franzosa das sogenannte "4-intersection Modell" (vgl. [EF91]):

Bei zwei gegebenen Objekten (A und B) werden jeweils die Schnittmenge der Grenzen untereinander (δA $\cap$ δB), die Schnittmenge der Innenbereiche untereinander ($A^0 \cap B^0$) und die Schnittmenge der Grenze des einen Objektes zu dem Innenbereich des anderen Objektes (δA $\cap$ B^0 und $A^0 \cap$ δB) untersucht. Aufgrund dieser vier Betrachtungen ergibt sich der Name für dieses Verfahren ("4-intersection Modell"). Egenhofer veröffentlichte ebenfalls das "9-intersection Modell" (vgl. [EH91]), in dem neben den Verhältnissen von Grenze und Innenbereich auch zusätzlich der Außenbereich betrachtet wird. Das Verfahren ist sehr ähnlich, die Ergebnisse sind es ebenfalls[2].

Um nun die topologische Relation zwischen zwei Flächen zu ermitteln, betrachten wir die Kombinationen der Schnittmengen. Da die jeweilige Schnittmenge entweder leer oder nicht leer ist, ergeben sich theoretisch 16 Möglichkeiten wie Objekte zueinander in Relation stehen können.

Alle 16 Relationen können grafisch als Punktmengen gedeutet werden. Dies zeigt Abbildung 3.2.

[2] Das "9-intersection Modell" wurde bereits bei den Vergleichen zweier eindimensionaler Objekte und beim topologischen Vergleich eines zweidimensionalen mit einem eindimensionalen Objekt angewandt.

	δA $\cap$ δB	$A^0 \cap B^0$	δA $\cap$ B^0	$A^0 \cap \delta$B
r_0	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$
r_1	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$
r_2	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$
r_3	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$
r_4	$\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$
r_5	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$
r_6	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$
r_7	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$
r_8	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$
r_9	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$
r_{10}	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$
r_{11}	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$
r_{12}	$\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$
r_{13}	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$
r_{14}	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$
r_{15}	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$

Tabelle 3.2: Übersicht der möglichen Schnittmengen von Grenzen und Innenbereichen von Flächen.

Wie man sehen kann, ist es zwar möglich alle 16 Relationen darzustellen, allerdings machen manche Relationen keinen Sinn oder sind keine Flächen im von uns definierten zweidimensionalen Sinne mehr. Letztlich bleiben nur neun Relationen übrig, die wirklich zwischen zwei zweidimensionalen Objekten auftreten können. Die restlichen sieben Relationen müssen aus verschiedenen Gründen entfallen: So kann Relation r_2 nur durch zwei Objekte, die einzig aus Innenbereichen bestehen dargestellt werden, da nur die Innenbereiche sich schneiden, aber keine Grenze mit einem Innenbereich und auch die beiden Grenzen nicht miteinander. Somit liegt hier kein Objekt im Sinne unserer Definitionen vor. Das Gleiche gilt für die Relationen r_4, r_5, r_8 und r_9. Hier besteht ein Objekt nur aus einer Grenze. Somit ist es nur eindimensional und wird hier nicht betrachtet. Und bei r_{12} und r_{13} gibt es zusätzlich zu den Objekten noch eine weitere Grenze, so dass zwei komplexe Objekte vorliegen. Diese Art von Objekten wurde aber als zwei Objekte definiert.

Es verbleiben neun Relationen, die wie in Tabelle 3.3 sprachlich benannt

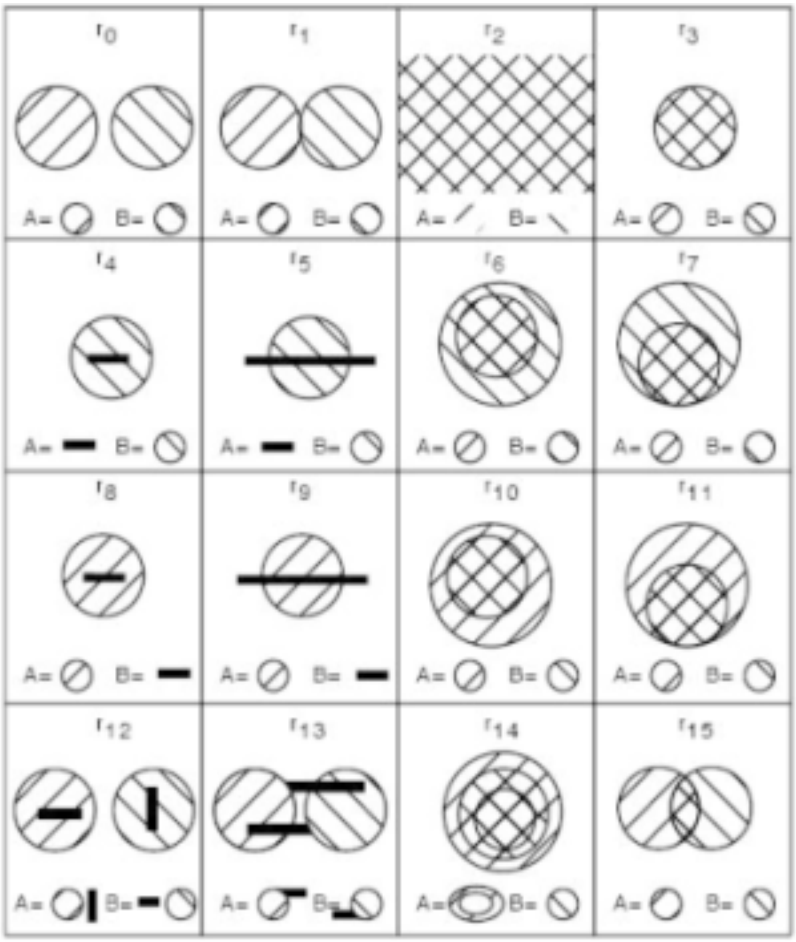


Abbildung 3.2: Die 16 theoretischen Relationen grafisch dargestellt.

	δA $\cap$ δB	$A^0 \cap B^0$	δA $\cap$ B^0	$A^0 \cap$ δB	
r_0	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	A und B sind disjunkt
r_1	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	A und B berühren sich
r_3	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	A und B sind gleich
r_6	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	A ist innerhalb von B bzw. B enhält A
r_7	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	A ist innerhalb und am Rand von B bzw. B enhält A am Rand
r_{10}	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	A enthält B bzw. B ist innerhalb von A
r_{11}	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	A enthält B am Rand bzw. B ist innerhalb und am Rand von A
r_{14}	$\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	A überlappt B mit disjunkten Grenzen
r_{15}	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$	A überlappt B mit sich schneidenden Grenzen

Tabelle 3.3: Verbale Interpretation der Schnittmengen.

und werden können:

- `disjunkt`,
- `berührt`,
- `gleich`,
- `liegt innerhalb`,
- `liegt innerhalb und grenzt an`,
- `enthält`,
- `enthält an der Grenze`,
- `überlappt` und
- `überlappt ohne dass sich die Grenzen schneiden`.

Mehr Relationen können nach dieser Herleitung nicht möglich sein, da wir alle Kombinationen von Grenzen und Innenbereich betrachtet haben.

RCC-Kalkül

Einen ganz anderen Ansatz, um alle topologischen Relationen zu erhalten, beschreiben 1992 Randell, Cui und Cohn (vgl. [RZC92]), was auch als RCC-

System ("region connected calculus") bekannt ist (vgl. [Coh97]). Sie beschreiben eine Intervalllogik für räumliches Schließen. Eine auf "Clark's calculus" (vgl. [Cla81]) basierende Theorie von 1989 (vgl. [RC89]) wird hierbei weiterentwickelt. Sie bezieht sich bewusst verallgemeinert auf "Regionen". Eine Region kann in diesem Fall räumlich sein (also ein Objekt), sie könnte aber auch zeitlich interpretiert werden.

Die Grundlage dieser Theorie bildet die Relation C(x,y), die für "x ist mit y verbunden"("x connects with y") steht, wobei x und y Variablen für Regionen sind. Diese Relation C(x,y) ist sehr allgemein, da "verbunden sein" bedeuten kann, dass x und y nur einen gemeinsamen Punkt haben, es können aber auch mehrere Punkte oder alle Punkte einer Region sein. C(x,y) ist sowohl reflexiv als auch symmetrisch:

$$\forall \texttt{x: C(x,x)}$$
$$\forall \texttt{x,y: [C(x,y)} \rightarrow \texttt{C(y,x)]}$$

Aufbauend auf diese eine Relation können weitere topologische Relationen erstellt werden. Sie ergeben sich aus bereits definierten Relationen:

- Nicht verbunden: DC(x,y) ("x is disconnected from y")
  DC(x,y) := ¬ C(x,y)
- Teilmenge: P(x,y) ("x is part of y")
  P(x,y) := ∀z: [C(z,x) → C(z,y)]
- Echte Teilmenge: PP(x,y) ("x is a proper part of y")
  PP(x,y) := P(x,y) ∧′ ¬ P(y,x)
- Gleichheit: x = y ("x is identical with y")
  x = y := P(x,y) ∧ P(y,x)
- Überlappung: O(x,y) ("x overlaps y")
  O(x,y) := ∈ z: [P(z,x) ∧ P(z,y)]
- Getrennt: DR(x,y) ("x is discrete from y")
  DR(x,y) := ¬ O(x,y)
- Teilweise Überlappung: PO(x,y) ("x is partially overlapping y")
  PO(x,y) := O(x,y) ∧ ¬ P(x,y) ∧ ¬ P(y,x)
- Äußerlich verbunden: EC(x,y) ("x is externally connected with y")
  C(x,y) ∧ ¬ O(x,y)

- Echter berührender Teil: TPP(x,y) ("x is a tangential proper part of y")
  `TPP(x,y) := PP(x,y)` $\wedge \in$ `z: [EC(z,x)` $\wedge$ `EC(z,y)]`

- Nicht berührender echter Teil: NTPP(x,y) ("x is a nontangential proper part of y")
  `NTPP(x,y) := PP(x,y)` $\wedge \neg \in$ `z: [EC(z,x)` $\wedge$ `EC(z,y)]`

Die Relationen P, PP, TPP und NTPP sind im Gegensatz zu allen anderen oben erwähnten Relationen nicht symmetrisch, sie erlauben aber eine wirkliche Inversenbildung (bei der das Inverse nicht gleich der Ausgangsrelation ist). Das Inverse einer Relation ϕ wird als ϕ^{-1} definiert. Es gilt:

$$\phi^{-1}\texttt{(x,y) := }\phi\texttt{(y,x)}\ \forall\ \phi \in \{\texttt{P, PP, TPP, NTPP}\}$$

Es lassen sich natürlich noch weitere Relationen ermitteln[3]. Für unsere Zwecke genügen aber alle aufgeführten Relationen. Wie in Abbildung 3.3 grafisch dargestellt wird, können sieben dieser 15 Relationen noch weiter unterteilt werden. Somit ergeben sich acht Relationen, die man einem sprachlichen Ausdruck zuordnen kann, die jeweils zu exakt einer grafischen Situation passen. Dies sind

- `PO(x,y)` (`überlappen`),
- `TPP(x,y)` (`am Rand enthalten sein`),
- `NTPP(x,y)` (`enthalten sein`),
- `x=y` (`Gleichheit`),
- `NTPP`$^{-1}$`(x,y)` (`enthält`),
- `TPP`$^{-1}$`(x,y)` (`enthält am Rand`),
- `EC(x,y)` (`berührt`) und
- `DC(x,y)` (`disjunkt`).

[3]Weitere Relationen wie z.B. ein berührender Teil TP(x,y) werden noch in [RC89] erwähnt. Um diese aber sinnvoll von den bereits erwähnten Relationen zu unterscheiden, müsste noch eine weitere Unterscheidung der Regionen in offene, halb offene und geschlossene Regionen geführt werden. Verallgemeinert können diese Relationen aber auch durch die aufgeführten Relationen abgedeckt werden. Eine weitere Unterscheidung würde auch den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen.

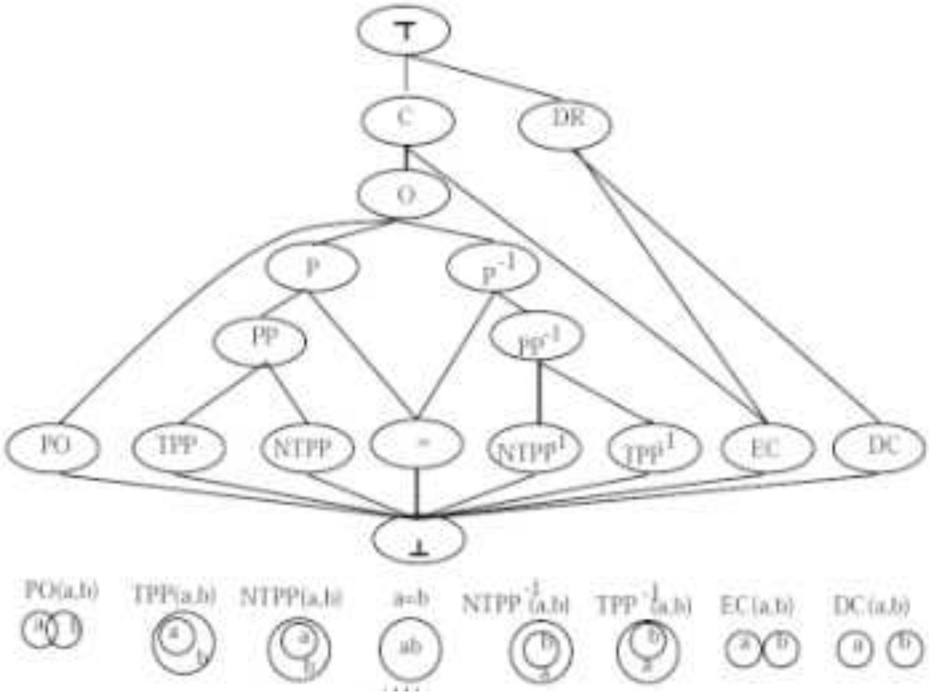


Abbildung 3.3: RCC-Kalkül: Möglichkeiten der Unterteilung der Grundrelationen.

Das Kalkül ist noch erweitert worden, u.a. auch deshalb, weil man manchmal nicht nur zwei feste Objekte x und y topologisch miteinander vergleichen will. So kann es durchaus vorkommen, dass man untersuchen möchte, wie ein Objekt w topologisch zu der Vereinigung der Objekte x,y und z gelegen ist ("Gibt es auf der Karte einen Spielplatz, der in einem der drei Wälder gelegen ist?"). Deshalb werden z.B. auch die Summe `sum(x,y)`, die Differenz `diff(x,y)`, das Komplement `compl(x)` und die konvexe Hülle `conv(x)` definiert. Als verallgemeinernde Alternative zu den acht Relationen werden zusätzlich auch die Relationen innerhalb `INSIDE(x,y)`, teilweise innerhalb `P-INSIDE(x,y)` und außerhalb `OUTSIDE(x,y)` definiert.

3.1.4 Fazit

Trotz zweier wesentlich verschiedener Modelle topologische Relationen zwischen zwei Flächen zu ermitteln, ergeben sich im Großen und Ganzen die selben Relationen. Auch die Relationen zwischen Linien und Flächen, sowie zwischen zwei Linien erscheinen komplett und unverwechselbar zu sein, obwohl dafür nur ein Modell betrachtet wurde (und werden konnte).

So ergibt sich schon jetzt eine große Anzahl verschiedener Relationen. Diese Anzahl würde sich noch erhöhen, wenn noch ein topologischer Vergleich zu punktförmigen Objekten gemacht werden würde. Dieser konnte allerdings in der wissenschaftlichen Literatur nicht gefunden werden. Dies scheint mir der einzige Schwachpunkt im aktuellen "State of the Art" der topologischen Relationsuntersuchung zu sein.

3.2 Richtung

Mit topologischen Relationen haben wir nun eine gute Grundlage für die Beschreibung von qualitativen räumlich-geografischen Verhältnissen geschaffen. Es ist nun schon möglich zu sagen, dass z.B. ein Hügel im Stadtwald gelegen ist. Allerdings sind die topologischen Relationen nicht die einzigen räumlich-geografischen Relationen. Oftmals reichen diese Relationen für eine ansprechende Beschreibung eines Szenarios nicht aus. Wenn vor dem Besuch eines Fußballspiels noch kurz eingekauft werden soll, wird niemanden alleine die Aussage zufriedenstellen, dass das Fußballstadion und die Einkaufstraße disjunkt sind. Hier besteht neben der Entfernung zwischen diesen beiden Stationen auch das Interesse nach der Richtung, die nach dem Einkauf zum Stadion eingeschlagen werden muss.

Richtungsrelationen beschreiben grundsätzlich, wo zwei Objekte relativ zueinander platziert sind (vgl. [Her94]). Es ist dabei möglich die Richtungen durch unterschiedliche sprachliche Ausdrücke zu bezeichnen. Die meisten Menschen werden dabei spontan an die sogenannten Himmelsrichtungen denken (nördlich, südlich, nordwestlich, südsüdwestlich, ...). Aber auch Ausdrücke wie "links", "rechts", "vor", "hinter", "über" oder "unter" können Richtungen bezeichnen. Im Alltag werden die Begriffe oft – meistens ohne Nachdenken – benutzt, teilweise auch in falschen Zusammenhängen ("Hamburg liegt über Bremen"). So stellt sich für viele Leute nicht die Frage, ob etwas nun eher nördlich, eher nordöstlich oder eher nordnordöstlich von etwas anderem liegt, da die Richtung "aus einem Gefühl heraus" bestimmt wird. Ein solches "Gefühl" kann eine Maschine allerdings nicht vorweisen.

Im Folgenden werden verschiedene bestehende Möglichkeiten zur richtigen Interpretation von Richtungsrelationen vorgestellt und untersucht.

3.2.1 Voraussetzungen und Definitionen

Um eine Richtung bestimmen zu können werden grundsätzlich drei Dinge benötigt (vgl. Kap. 2.5 und 2.6):

- Ein primäres Objekt
- ein Referenzobjekt und
- ein Referenzrahmen

Abbildung 3.4 zeigt, dass vom primären Objekt als eine Art Ankerobjekt die Richtung zum Referenzobjekt bestimmt wird. Setzt man die erhaltene Relation jetzt in Bezug zum Referenzrahmen, so erhält man die gesuchte

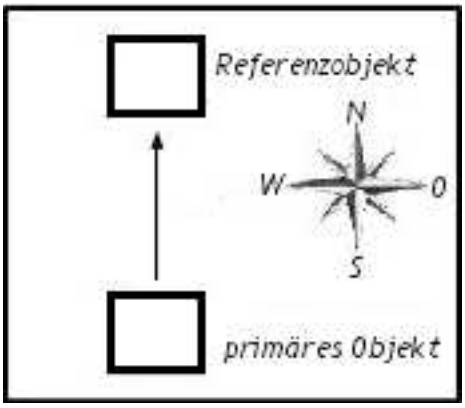


Abbildung 3.4: Allgemeine Richtungsbestimmung mit nach Norden ausgerichteten Referenzrahmen

Richtungsrelation. In diesem Beispiel, in dem der Referenzrahmen vorgibt, dass die Richtung vom unteren zum oberen Abbildungsrand “nördlich” ist, liegt das Referenzobjekt nördlich vom primären Objekt.

3.2.2 Himmelsrichtungen und alternative Richtungen

Da wir mit geografischen Karten arbeiten wollen, werden wir mit Himmelsrichtungen als Richtungsangaben arbeiten. Oftmals werden zwar auch in Karten andere Richtungsrelationen benutzt, als qualitative Angaben von Himmelsrichtungen[4], hier wird aber darauf verzichtet.

Aber natürlich gibt es noch weitere Richtungsrelationen, die auch im täglichen Leben regelmäßig benutzt werden. Es folgt nun eine nicht vollständige Auswahl an qualitativen Richtungsrelationen:

- “Links” und “rechts” sind Richtungsrelationen, die man häufiger benötigt. Sie werden nicht nur gebraucht, um die Welt um ein Referenzobjekt (das hierbei meistens der Mensch ist, der die Richtungsangabe macht) herum in zwei gerichtete Teile (inkl. der Referenzobjekts) zu teilen, sondern auch um umgangssprachlich Himmelsrichtungen zu ersetzen oder um Uferseiten bei fließenden Flüssen festzulegen.

[4]Man kann Richtungen z.B. mit Hilfe des Koordinatensystems der Erde bestimmen. Die Koordinaten des primären und des Referenzobjekts werden hier mit Hilfe des Nullmeridians und der geografischen Länge bzw. Breite ermittelt und dann zueinander in Beziehung gesetzt (vgl. [GS99]).

Bei der Betrachtung einer Karte werden "rechts" und "links" als Richtungsrelationen aber nicht gebraucht. Ein gutes Navigationssystem hingegen benötigt technisch gesehen diese beiden Richtungsangaben auf jeden Fall, da es ziemlich schwierig sein würde nur auf der Basis von Himmelsrichtungen einen Weg zu finden. Dies ist gleichzeitig der Vorteil dieser Richtungsangabe: Es gibt keinen globalen festen Referenzrahmen, wie bei den Himmelsrichtungen. Er ist in diesem Fall dynamisch und wird vom Referenzobjekt und der Blick- oder Bewegungsrichtung vorgegeben[5].

- Richtungsrelationen, die man im Leben bereits sehr früh lernt, sind die Höhenrelationen wie "über" und "unter", sowie die Relationen "vor" und "hinter". Wenn wir uns von der Umgangssprache trennen (in der bei Kartenbetrachtungen z.B. über auch gerne als Synonym für nördlich genommen wird), so haben diese vier Relationen für Richtungsangaben auf zweidimensionalen Karten keine Funktion.

  Bei der Routenfindung und dem darauf bezogenen Navigieren spielen die Höhenausdrücke und "über" und "unter" keine große Rolle wie "links", "rechts" oder die Himmelsrichtungen, da sie – wie bereits erwähnt – hier, wenn überhaupt, nur in der Umgangssprache benutzt werden. Routen sind in der Regel zweidimensional. Generell ist die Interpretation dieser Relationen aber ein umfangreiches und nicht-triviales Thema.

- Da in dieser Arbeit grundsätzlich nur Relationen betrachtet werden sollen, die zwischen zwei Objekten (dem primären und dem Referenzobjekt) vorhanden sind, ist es unmöglich Relationen wie "zwischen" oder "in der Mitte von" zu untersuchen, da mindestens drei Objekte benötigt werden, damit eine solche Relation existiert.

3.2.3 Richtungen zwischen nulldimensionalen Objekten

Betrachtet man eine Karte und zwei darauf liegende Objekte, so ist es oft schwierig sich auf eine bestimmte Richtung zwischen diesen Objekten festlegen zu müssen, denn es ist nicht immer eindeutig klar, welche Richtung die "richtige" ist. Oft kommen mehrere sich untereinander ähnelnde Richtungen in Frage. Es besteht zwar die Möglichkeit, dass ein primäres Objekt eindeutig nördlich des Referenzobjektes gelegen ist, es kann aber auch vorkommen, dass dieses Objekt, wenn man es ein wenig verschiebt, zwar immer

[5]Folglich liegt ein extrinsischer Referenzrahmen vor (vgl. Seite 19)

noch grob im Norden liegt, allerdings könnte man diesen Bereich auch schon als Nordwesten oder, um noch genauer zu sein, als Nordnordwesten bezeichnen.

Je feiner man die Unterteilung wählt, desto kleiner werden die Sektoren der einzelnen Relationen. Hernandez unterteilte dabei in verschiedene Level der Granularität und wies den einzelnen Richtungsrelationen in den Leveln Sektoren gleicher Größe zu (vgl. [Her94]):

Level 1

Im ersten Level ist nur eine sehr grobe Unterscheidung möglich. Das betrachtete Szenario wird dabei in zwei Teile aufgeteilt. Durch das Referenzobjekt wird eine Gerade gelegt. Ihre Lage ist davon abhängig in welche Richtungen aufgeteilt werden soll: Möchte man zwischen Westen und Osten unterscheiden, so muss die Referenzgerade parallel zum Nordvektor verlaufen, möchte man zwischen Norden und Süden unterschreiben, so muss sie orthogonal zum Nordvektor liegt.

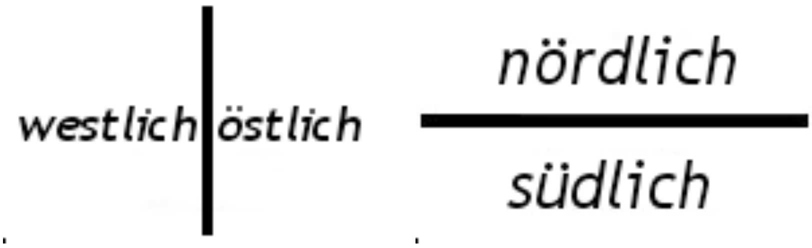


Abbildung 3.5: Beispielhafte Unterteilung der Richtungsrelationen in Level 1.

Für den Fall, dass das primäre Objekt weder auf der einen, noch auf der anderen Seite der Referenzlinie liegt (folglich liegt es auf der Referenzlinie selbst), wird das primäre Objekt als `kollinear` bezeichnet.

Eine ausschließliche Benutzung des Level 1 bei Richtungen ist allerdings eher selten. Eine Anwendung findet man fast nur dann, wenn eine Referenzgerade direkt vorgegeben ist. Dies könnte beispielsweise ein Fluß oder eine große Straße sein (auch wenn der Verlauf meistens nur bedingt dem einer Gerade entspricht). Hier macht eine weitere Unterteilung in mehr als zwei Bereiche keinen Sinn.

Für frei entscheidbare Richtungsbestimmungen kommt dieses Modell eigentlich nur selten in Frage. Der Mensch ist in der Lage in mehr als zwei

Bereiche zu selektieren. Wenn ein Objekt offensichtlich im Westen liegt, es nach Level 1, das in Norden und Süden unterteilt, aber noch oberhalb der Referenzgeraden liegt, klassifiziert werden soll, wird es in der Regel Verwunderung auslösen, wenn dieses primäre Objekt im Norden angesiedelt werden würde. Aber natürlich gibt es auch Beispiele in denen eine solche Aussage in ihrem Kontext sinnvoll ist und kein Objekt vorliegt, das die Relationsbestimmung beeinflusst (wie eine Straße (s. Beispiel im letzten Absatz)): "Der Bereich nördlich des Gasthauses ist das Überschwemmungsgebiet der Weser in diesem Ort."

Hernandez führte, um die Relationen aus Level 1 von denen aus den anderen Leveln unterscheiden zu können, Indizes ein (vgl. [Her94]). Somit beschreibt z.B. `südlich`$_1$ die Relation `südlich` aus der Level 1-Unterteilung.

Level 2

Im zweiten Level ist eine Unterteilung in vier Relationen möglich. Allerdings ist hier die Anordnung der Achsen nicht so klar, wie sie uns in Level 1 erschien. Es gibt allerdings nur zwei Möglichkeiten, die sinnvoll erscheinen.

Die erste Möglichkeit ergibt sich schlichtweg aus dem Überlagern der beiden Grafiken aus dem ersten Level. Man erhält so die vier Relationen `nord-westlich`$_2$, `nord-östlich`$_2$, `süd-westlich`$_2$ und `süd-östlich`$_2$ (s. Abbildung 3.6).

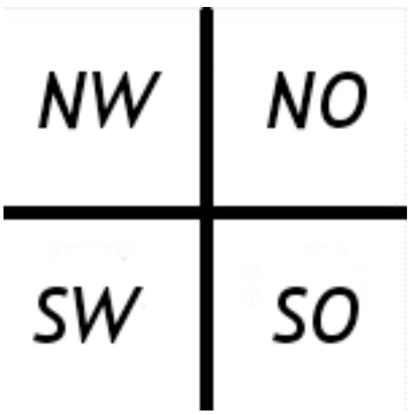


Abbildung 3.6: Richtungsrelationen im Level 2.

Die zweite Möglichkeit ist diejenige, die uns als am bekanntesten erscheinen sollte: Wir drehen die Achsen von der ersten Möglichkeit um 45 Grad.

Dadurch ergeben sich die Relationen `nördlich`$_2$, `westlich`$_2$, `östlich`$_2$ und `südlich`$_2$ (s. Abbildung 3.7).

Abbildung 3.7: Richtungsrelationen im Level 2.

Dieses Modell auf dem zweiten Level wird bei allgemeinen Richtungsangaben von den meisten Leuten benutzt und erscheint mir die für allgemeine Himmelsrichtungsangaben meist benutzte Unterteilung zu sein. Der Bereich, der eine Relation aus dem Level 2 abdeckt, ist dabei nur noch halb so groß wie der Bereich mit der gleichen Relationsbezeichnung aus Level 1.

Level 3

Einer Richtungsunterteilung nach Level 3 ist eine doppelt so genaue Unterteilung der Richtungsrelationsbereiche wie in Level 2. Hier werden acht Relationen abgedeckt. Wir haben hier somit eine Überlagerung der beiden vorgestellten Modelle aus Level 2. Dieses Modell deckt also alle Relationen ab, die im allgemeinen Sprachgebrauch verwendet werden, ohne dass darüber ernsthaft nachgedacht werden muss, wo der Bereich dieser Himmelsrichtung wirklich liegt.

Somit ergeben sich die Relationen `nördlich`$_3$, `nord-westlich`$_3$, `westlich`$_3$, `süd-östlich`$_3$, `östlich`$_3$, `südlich`$_3$, `süd-westlich`$_3$ und `nord-östlich`$_3$ (s. Abbildung 3.8).

Weitere Level

Natürlich gibt es auch Richtungen auf Level 4, Level 5 usw. Allerdings sind manche dieser dort vorkommenden Relationen für viele Menschen oh-

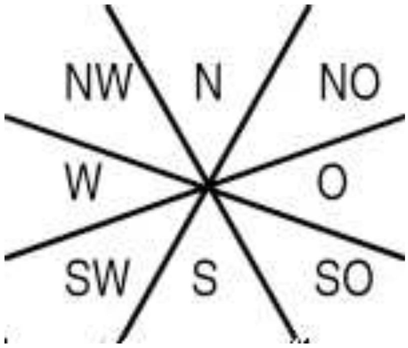


Abbildung 3.8: Richtungsrelationen im Level 3.

ne weiteres nicht mehr sinnvoll nutzbar. Allein das Zeigen der Richtung `west-nord-west` wird einige Leute vor ein unlösbares Problem stellen. Eine feinere Unterteilung als Level 3 ist also für den allgemeinen Sprachgebrauch nicht sinnvoll und wird nur in seltenen Fällen gebraucht (z.B. im Wetterbericht, wo die Windrichtungsangabe aber auch grafisch mit Pfeilen untermalt wird - so muss über eine Aussage wie "Wind aus west-nord-west" nicht nachgedacht werden").

Insgesamt haben alle Richtungsrelationen eine inverse Relation. Der Sektor der inversen Richtungsrelation liegt - unabhängig von Level - auf der gegenüberliegenden Seite des Referenzobjekts oder dort, wo der Ausgangsrelationssektor nach einer 180-Grad-Drehung um das Referenzobjekt liegt. Die Relation von Objekt A zu B ist äquivalent zu der inversen Relation von Objekt B zu A (vgl. [Fra92]).

Somit gilt z.B.:

- $\texttt{nördlich}_1\texttt{(A,B)} \Leftrightarrow \texttt{südlich}_1\texttt{(B,A)}$
- $\texttt{nord-westlich}_3\texttt{(A,B)} \Leftrightarrow \texttt{süd-östlich}_3\texttt{(B,A)}$
- $\texttt{west-nord-westlich}_4\texttt{(A,B)} \Leftrightarrow \texttt{ost-süd-östlich}_4\texttt{(B,A)}$

Neutrale Zone

In einem anderen Modell baute Frank neben den Himmelsrichtungen noch eine "neutrale Zone" ein (vgl. [Fra92], [Fra96]).

Wie Abbildung 3.9 zeigt, wird der Raum in neun Bereiche unterteilt: Zu den vier Grundrichtungen und den vier zusammengesetzten Himmelsrichtungen wird eine sogenannte neutrale Zone hinzugefügt. Die Idee der neutralen Zone basiert auf der Annahme, dass es nahe dem Referenzobjekt einen Bereich gibt, bei dem der Mensch für gewöhnlich nicht nach Himmelsrichtungen unterscheidet – auch wenn er theoretisch dazu in der Lage ist. Auf Fragen, in welche Richtung man vom Referenzobjekt gehen müsse, um das primäre Objekt zu finden, reagiert man normaler Weise mit Anworten wie "Das ist da ganz in der Nähe!". In dieser Zone können Richtungen zwar bestimmt werden, auf Grund der Nähe der Objekte zwischen denen die Richtung bestimmt werden soll und der daraus folgenden Möglichkeit das primäre Objekt schnell zu finden, wird die Richtung selten angegeben.

Als einen weiteren Vorteil dieses Modells nannte Frank die Tatsache, dass man sich nicht entscheiden muss, ob ein Punkt mehr westlich oder östlich oder mehr westlich oder nördlich liegt. Wenn nicht eindeutig bestimmt werden kann, dass ein primäres Objekt in einer Richtung liegt, die mit einem Symbol abgekürzt wird, so besteht hier die Möglichkeit die Richtungsrelation auszuwählen, die in den Bereich zwischen diesen Grundhimmelsrichtungen gelegen sind (z.B. nordwestlich).

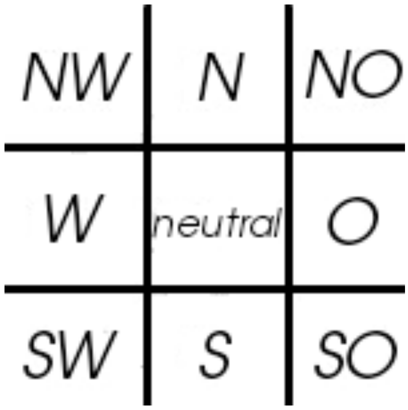


Abbildung 3.9: Richtungsrelationen mit neutraler Zone.

Abbildung 3.9 zeigt, dass alle Himmelsrichtungen aus der Level 3-Unterteilung um die im Zentrum gelegene neutrale Zone platziert wurden. Allerdings ist diese Grafik mehr eine Skizze als eine genaue Vorlage zur Richtungsbestimmung. Die neutrale Zone ist oft nicht ohne weiteres zu bestimmen. Frank gab keine ungefähre Größenangabe an, sondern beschrieb sie als die Zone, in der keine Himmelsrichtungsbestimmung gemacht wird.

Ansatz von Freksa

Einen anderen Ansatz als Hernandez und Frank wählte Freksa 1992 (vgl. [Fre92]). Der Ansatz bezieht sich zwar nicht direkt auf Himmelsrichtungen, lässt sich aber auch darauf anwenden.

Bei diesem Ansatz gibt es kein Referenzobjekt, das so ist, wie wir es bisher kannten. Bei der Richtungsbestimmung wird hier der Bezug zum primären Objekt durch einen Vektor hergestellt. Das Referenzobjekt ist folglich ein Referenzvektor.

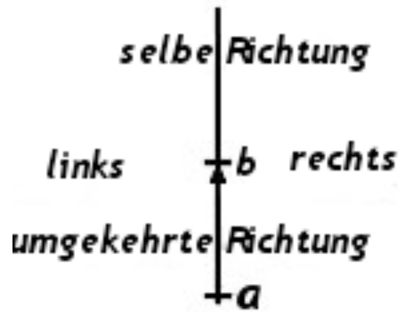


Abbildung 3.10: Richtungsrelationen vom Vektor ab.

Wie in Abbildung 3.10 zu sehen ist, wird eine Gerade durch zwei Punkte a und b gelegt. Der Bereich zwischen a und b ist gerichtet. Diese gerichtete Strecke ist nun unser Referenzvektor[6]. Daraus lassen sich bereits vier Richtungsrelationen ableiten: Ein primäres Objekt c kann in der `gleichen Richtung` liegen (sofern es auf der Geraden ab liegt und von a aus gesehen hinter b), in der `umgekehrten Richtung` (wenn c auf ab liegt, aber auf der anderen Seite von b), `links` von b und `rechts` von b.

Dass statt eines Referenzpunktes wie bisher ein Referenzvektor benutzt wird liegt weniger daran, dass Menschen zwischen hinten und vorne unterscheiden können[7], sondern weil viele Objekte (Menschen, Gebäude, ...) "intrinsische Vorderseiten" haben. Sie haben somit – ähnlich wie bei der Windrose bei Himmelsrichtungen – exakte Ausrichtungen, die als vorne, hinten, rechts und links bezeichnet werden können.

[6] Er kann natürlich auch in die andere Richtung zeigen.

[7] Wobei dies beim direkten Anwenden nicht so einfach handhabbar ist wie eine links-rechts-Unterscheidung, da ein "Nach-Hinten-Blicken" oft mir zusätzlicher körperlicher Arbeit verbunden ist und da eine visuelle Wahrnehmung ohne Drehen des Körpers überhaupt nicht möglich ist.

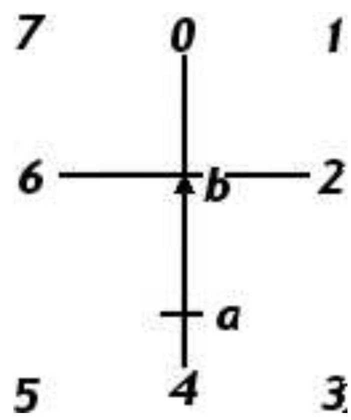


Abbildung 3.11: Freksas Richtungsrelationen mit Referenzvektor ab.

Freksa zeigt am Beispiel eines intrinisch ausgerichteten Objekts insgesamt acht Relationen auf (s. Abb 3.11): `exakt geradeaus` (0), `rechts vorne` (1), `neutral rechts` (2), `hinten rechts` (3), `exakt nach hinten` (4), `hinten links` (5), `neutral links` (6) und `links vorne` (7).

Dabei fällt auf, dass manche Relationen Räume abdecken (1,3,5,7), während andere nur eine Strecke beschreiben (0,2,4,6). Dies ist bei dieser qualitativen Unterscheidung allerdings nicht anders möglich und sinnvoll.

Die einzelnen Relationen werden dabei nicht durch den Vektor selbst, sondern durch seine Länge und seinen Start- und Endpunkt – also in diesem Fall durch die Punkte a und b bestimmt. Wenn wir den Vektor in die entgegengesetze Richtung zeigen lassen, so haben wir zwar die gleichen Relationen und die gleiche Anzahl an Relationen, sie sind aber anders angesiedelt (s. Abbildung 3.12).

Pro Richtung ergeben sich also die acht Richtungsrelationen sowie die leere Richtung, wenn das primäre Objekt c direkt auf b liegt. Abbildung 3.13 zeigt nun eine Matrix, die eine Überlagerung der Abbildungen 3.11 und 3.12 beinhaltet. Es ergeben sich 15 verschiedene Regionen, die jeweils einer Relation bezogen auf b und/oder a zugeordnet werden. Sie beinhaltet somit eine qualitative Beschreibung der Regionenen in denen das primäre Objekt c betrachtet von a und der Orientierung von b nach a oder von b mit der Orientierung von a nach b liegen kann.

Der Ansatz von Freksa untersucht – wie bereits erwähnt – sowohl Richtungen zwischen zwei Punkten als auch zwischen einem Objekt mit Ausdehnung und einem Punkt. Von vornherein ist das Referenzobjekt ein Re-

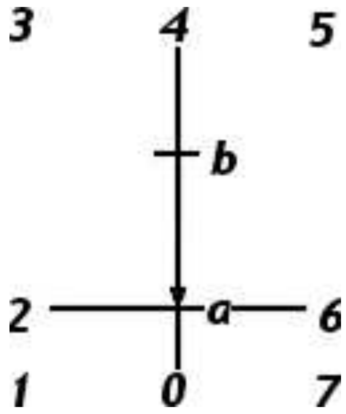


Abbildung 3.12: Freksas Richtungsrelationen mit Referenzvektor ba.

ferenzvektor. In manchen Fällen aber ist das Referenzobjekt allerdings ein Punkt, der in dem Objekt mit Ausdehnung (Referenzvektor) liegt. Da die Richtungsbestimmung aber von einem festen Punkt (Anfang oder Spitze des Vektors) aus geschieht, ist die Ausdehnung des Objekts von keiner Bedeutung für die Richtungsbestimmung.

Vergleicht man nun den Referenzvektor mit dem Nordvektor, so ist es möglich Freksas Verfahren auf Himmelsrichtungen zu übertragen. Verlaufen beide Vektoren z.B. parallel und zeigen in die gleiche Richtung, so kann die Relation `links` mit der Relation westlich gleichgesetzt werden, `rechts` mit `östlich`, `selbe Richtung` oder `vorne` mit `nördlich` und `entgegengesetzte Richtung` oder `hinten` mit `südlich`.

3.2.4 Richtungsbestimmung bei Objekten mit Ausdehnung

Natürlich werden nicht nur Richtungen zwischen nulldimensionalen Objekten wie zwischen Brunnen und Statuen bestimmt, sondern auch von Objekten, die (auf der Karte) aus mehr als aus einen Punkt bestehen.

Die bereits beschriebenen Möglichkeiten zur Richtungsbestimmung der nullten Dimension können wir bei unseren weiteren Betrachtungen als Grundlage nehmen. Ohne Änderung kann beispielsweise die Relationsherleitung aus dem dritten Level benutzt werden, wenn die Richtung von einem Brunnen zu einer nahe gelegenen Imbißbude ermittelt werden soll und diese Imbißbude mit ihrer gesamten Ausdehnung in einem der Sektoren liegt (z.B. westlich). Problematischer wird die Richtungsbestimmung, wenn die Imbißbude in zwei oder mehr Sektoren liegt: Sie liegt entweder westlich oder

Abbildung 3.13: Freksas 15 Richtungsrelationen.

nord-westlich (oder beides?). Ein weiteres Problem entsteht, wenn das Referenzobjekt nicht mehr nulldimensional ist ("In welcher Richtung liegt die Imbißbude von der großen Einkaufspassage aus gesehen?"). Von welchem Punkt oder von welchen Punkten des Referenzobjektes muss nun die Richtung bestimmt werden?

Grundlegende Arbeit von Haar

Schon 1976 beschäftigte sich Haar mit der Richtungsbestimmung von Objekten mit Ausdehnung (vgl. [Haa76]). In seinem so genannten "Dreicksmodell" ("Triangular model") legte er die Schwerpunkte der beiden betrachteten Objekte zugrunde. Vom Schwerpunkt des Referenzobjektes beginnend verlaufen zwei Halbgeraden. Der Bereich zwischen ihnen ist der Akzeptanzbereich einer Richtung. Liegt der Schwerpunkt des primären Objektes in diesem Akzeptanzbereich, so liegt die zugehörge Relation vor.

Im Prinzip liegt hier wieder das Sektorenmodell für nulldimensionale Objekte vor, da die Relationen durch die beiden nulldimensionalen Schwerpunkte bestimmt werden. Somit sind hier alle Akzeptanzbereiche gleich groß und folglich sind auch die Winkel der aufspannenden Geraden der Relationen gleich groß (also 180 Grad bei Level 1, 90 Grad bei Level 2 usw.).

Ein großer Vorteil dieses Modells ist, dass intuitive Entscheidungen des

Menschen zugrunde gelegt werden: Wenn der Schwerpunkt eines Objektes im Akzeptanzbereich liegt, so liegen auch mindestens 50 Prozent der Objektfläche im Akzeptanzbereich. Wenn ein Mensch ohne Vorkenntnisse eine Richtungsbestimmung durchführen soll und das Objekt im Grenzbereich zweier in Frage kommenden Relationen liegt, so wird er sich nach dem Bereich orientieren, in welchem Bereich das Objekt eher liegt. Dieser Bereich befindet sich da, wo der größte Teil des Objekts gelegen ist (vgl. [Haa76]).

Allerdings hat dieses Modell auch Nachteile: Sind beide Objekte nahe beisammen und mindestens eins der Objekte hat keine gleichmäßige Form[8], so kann es sein, dass manche richtige Relationsbestimmung nicht möglich. Warum das der Fall ist, wird aus einigen Beispielen des nächsten Kapitels klarer.

Wir beginnen mit der Relationsbestimmung bei ausgedehnten Referenzobjekten.

Verfahren von Peuquet und Ci-Xiang

1987 nahmen sich Peuquet und Ci-Xiang dem oben beschriebenen Problem an (vgl. [PZ87]).

Die Hauptproblematik ist dabei Folgende: Liegt nun ein primäres Objekt nahe an dem ausgedehnten Referenzobjekt, so ist es basierend auf dem Haar-Dreiecksmodell leider möglich, dass die richtige Richtung gar nicht erkannt wird.

An Hand der Abbildung 3.14 sieht man, dass das Dreiecksmodell hier eine Falschaussage liefert. Das Objekt B ist mit absoluter Sicherheit östlich vom Objekt A. Da der Akzeptanzbereich aber am Schwerpunkt beginnt, kann das Objekt B nicht in diesen Bereich fallen. Mit diesem Verfahren würde es vermutlich als nördlich erkannt werden. Somit muss der Akzeptanzbereich für die Relation östlich auf jeden Fall vergrößert werden.

Auch das zweite Beispiel zeigt, dass Haar's Dreiecksmodell bei langgezogenen Objekten nicht immer richtige Ergebnisse liefert. Bei Abbildung 3.15 sehen wir, dass Objekt B nach diesem Modell östlich wäre, obwohl die Relation nördlich auf jeden Fall besser zutrifft.

Man kann durch diese beiden Beispiele gut erahnen, dass bestimmte Eigenschaften des Referenzobjektes Einfluß auf die Relationen haben, die von ihm ausgehen. Eine dabei besonders herausragende Eigenschaft ist die Länge der dem Akzeptanzbereich zugewandten Seite. Ist diese Seite im Vergleich zu den angrenzenden Seiten besonders lang, so ist der Akzeptanzbereich der

[8]Z.B. ein Quadrat

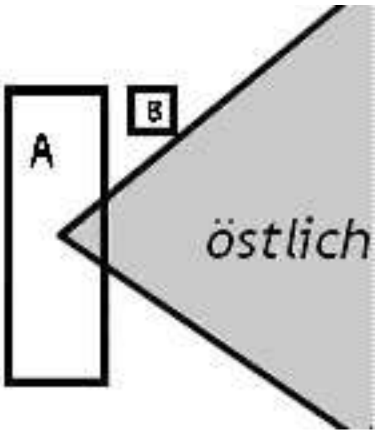


Abbildung 3.14: Richtungsbestimmung nach dem Haar'schen Modell: Ein östlich gelegenes Objekt wird nicht als östlich erkannt

Relation an dieser Seite auch größer. Ist die Seite kleiner, ist folglich auch der Akzeptanzbereich kleiner.

Peuquet und Ci-Xiang versuchten die Probleme des Haar'schen Dreiecksmodells auf zwei verschiedene Weisen zu lösen:

- Änderung des aufspannenden Winkels.
- Wahl eines anderen Startpunktes der winkel-aufspannenden Geraden als den Schwerpunkt.

Beide Verfahren sollen nun erläutert werden und ihre Vor- und Nachteile sollen aufgeführt werden.

Änderung des aufspannenden Winkels

Die erste Möglichkeit die oben genannten Fehler zu vermeiden ist es, den aufspannenden Winkel der jeweiligen Relation zu ändern. Wie von Haar beschrieben (vgl [Haa76]), ist der Winkel bei nulldimensionalen und gleichseitigen Objekten bei einer Einteilung in vier Relationsbereiche (Level 2 bei [Her94]) immer neunzig Grad. Ist die Seite des Referenzobjekts, die in die gesuchte Richtung gewandt ist, größer als der Bereich der Seite, der von dem aufgespannten Akzeptanzbereichs geschnitten wird, so muss der Winkel vergrößert werden (s. Abbildung 3.16).

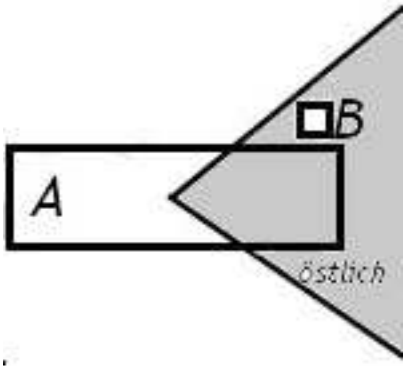


Abbildung 3.15: Richtungsbestimmung nach dem Haar'schen Modell: Ein nördlich gelegenes Objekt wird als östlich erkannt

Um auszuschließen, dass einer der beiden oben genannten Fälle auftritt, müssen die beiden aufspannenden Halbgeraden durch die Eckpunkte des Referenzobjektes verlaufen.

Um hier nun richtige Akzeptanzbereiche zu erhalten müssen aber bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein:

- Das Referenzobjekt muss diese Eckpunkte besitzen.
- Mindestens die Seite des Referenzobjekts, die in die gesuchte Richtung zeigt, muss orthogonal zu den jeweiligen Richtungsvektor liegen.
- Der Schwerpunkt des Referenzobjekts muss auf der Höhe des Mittelpunktes dieser Seite liegen.

Um diese Vorraussetzungen zu erfüllen legten Peuquet und Ci-Xiang eine Art "boundig box" um das Referenzobjekt: Man nimmt die größte Ausbreitung in Nord-Süd-Richtung und in West-Ost-Richtung und bettet das Objekt in ein Rechteck mit der Höhe der Nord-Süd-Richtung und der Breite der West-Ost-Richtung.

Allerdings bleibt dieses Modell weiterhin eingeschränkt, da es nicht möglich ist, in mehr als vier Richtungen zu unterscheiden und dabei die Winkel anzupassen. Zudem ist es bei einem eindimensionalen Objekt, das parallel oder orthogonal zum Nordvektor verläuft nur insofern anwendbar, dass man nur in zwei Richtungen unterscheiden kann.

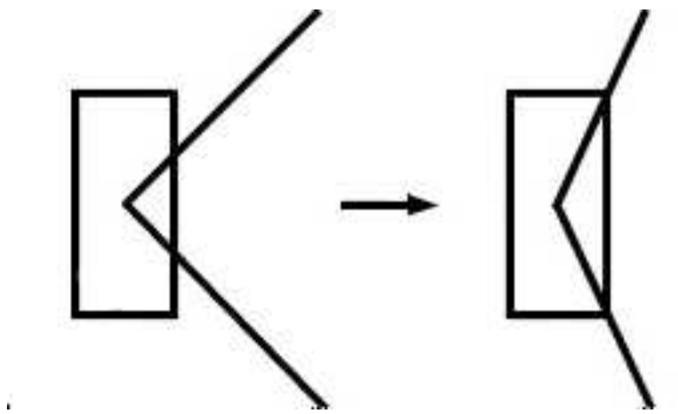


Abbildung 3.16: Das erste Modell nach Peuquet und Ci-Xiang: Änderung des Winkels zur korrekten Richtungserkennung.

Wahl eines anderen Startpunktes der winkel-aufspannenden Geraden als den Schwerpunkt

Dieses Modell ähnelt dem Winkeländerungsmodell in einigen Aspekten, denn letztlich schneiden die den Winkel aufspannenden Halbgeraden auch hier die Eckpunkte des Referenzobjekts. Allerdings ist dieses Modell anders und auch die Akzeptanzbereiche sind unterschiedlich im Vergleich zu den oben beschriebenen Modell.

Die Grundidee ist, dass der Akzeptanzbereich so verschoben wird, dass die beiden den Winkel aufspannenden Geraden durch die beiden Grenzpunkte der dem Akzeptanzbereich zugewandten Seite verlaufen (s. Abbildung 3.17). Dabei muss darauf geachtet werden, dass diese Halbgeraden ihren Winkel auf der Grundfläche nicht verändern. Das heisst, dass der Winkel von der Seite zu jeder der Geraden 135 Grad beträgt.

Leider ist auch dieses Modell lediglich bis zur Unterteilung in vier verschiedene Relationen geeignet. Ansonsten ist auch hier eine sinnvolle Unterteilung in Akzeptanzbereiche möglich.

Vergleich dieser beiden Modelle

Beide Modelle sind sich sehr ähnlich. Bei beiden Modellen ergibt sich ein am Nordvektor ausgerichtetes Rechteck an dessen Eckpunkten sich die Referenzgeraden zur Unterteilung in die einzelnen Akzeptanzbereiche anschließen. Unterschiedlich sind aber die Winkel zwischen dem Referenzrechteck und den Referenzgeraden. Während bei der Möglichkeit den Akzeptanzbereich

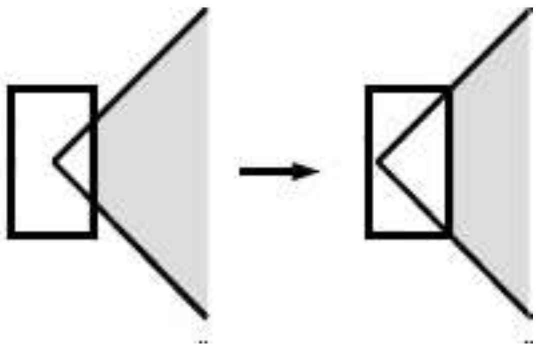


Abbildung 3.17: Das zweite Modell nach Peuquet und Ci-Xiang: Änderung des Startpunktes der winkel-aufspannenden Geraden.

zu verschieben jeder Außenwinkel 135 Grad beträgt variieren die Winkel beim Winkeländerungsmodell.

Zweck der Modelle

Diese zwei verschiedenen Modelle sind entstanden, da zwei verschiedene Anwendungsbeispiele zu Grunde gelegt werden. Peuquet und Ci-Xiang unterscheiden, wie weit das primäre und das Referenzobjekt von einander entfernt liegen. Wenn beide Objekte weit auseinander liegen, dann soll das Modell der Winkeländerung benutzt werden. Nach Definition von Peuquet und Ci-Xiang liegen Objekte weit auseinander, wenn die Entfernung der beiden Schwerpunkte der Objekte größer ist als die größte Entfernung des entferntesten Punktes vom Schwerpunkt seines Objekts. Nah beieinander sind Objekte dann, wenn sie nicht weit auseinander sind. In diesem Fall soll das Modell "Verschieben des Akzeptanzbereiches" angewandt werden.

Modell nach Kobler

Kobler zeigt in seiner Diplomarbeit (vgl. [Kob92]) ein Modell, welches an die Sektoreneinteilung von Hernandez im Level 3 für nulldimensionale Objekte angelehnt ist. Dabei wurden die Bereichstrennlinien der Relationen `nordwestlich`$_3$, `südwestlich`$_3$, `nordöstlich`$_3$ und `südöstlich`$_3$ an den Eckpunkt gesetzt, der in der selben Richtung des Objekts liegt. Die acht Relationen aus dem nulldimensionalen Modell bleiben erhalten, ihre Größe ist nun allerdings unterschiedlich. Informell werden aus dem Mittelpunkt beim Sektorenmodell bei nulldimensionalen Objekten vier Punkte mit einer Referenzgeraden gemacht, die jeweils auf die Ecken der Referenzobjekts

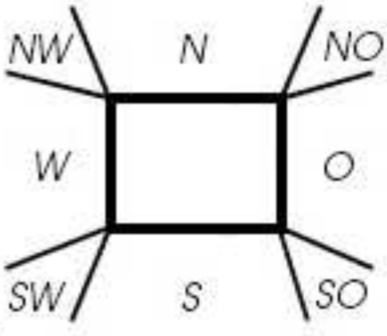


Abbildung 3.18: Objekt mit Ausdehnung und Akzeptanzbereichen

projeziert werden.

Es folgt eine Möglichkeit Richtungsrelationen zu bestimmen, wenn das primäre Objekt ausgedehnt ist.

Erweiterte Richtungsbestimmung

Haar bestimmte die Richtung zwischen zwei Objekten, indem er untersuchte, in welchem Akzeptanzbereich sich der Schwerpunkt des primären Objekts befindet. Peuquet und Ci-Xiang wählten ein anderes Modell (vgl. [PZ87]):

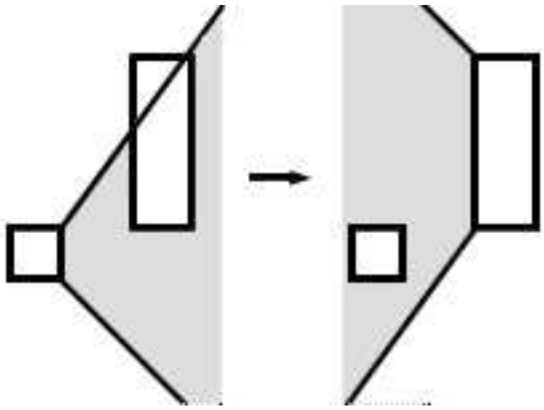


Abbildung 3.19: Bildung der inversen Relation zur Bestimmung der Richtung.

Befindet sich das primäre Objekt mit seiner gesamten Ausdehnung in einem einzigen Akzeptanzbereich, so ist auch hier die Relation klar. Befindet es sich aber gleichzeitig in zwei Akzeptanzbereichen, so wird die Eigenschaft der inversen Relationen ausgenutzt. Wie bereits in Kapitel 3.2.3 erwähnt wurde, hat jede Relation ihre inverse Relation (z.B. gilt $\texttt{nördlich}_1\texttt{(A,B)}$ $\Leftrightarrow$ $\texttt{südlich}_1\texttt{(B,A)}$ – vgl. Seite 40) . Diese Eigenschaft wird hier ausgenutzt, indem wir das primäre Objekt zum Referenzobjekt machen und das Referenzobjekt zum primären Objekt und auf dieser Grundlage die Richtung bestimmen. Oft ergibt sich hier eine eindeutige Zuordnung zu einer Relation. Um Arbeit zu vermeiden sollte man darauf achten, dass das Objekt zum Referenzobjekt gemacht wird, dessen dem anderen Objekt am meisten zugewandte Seite die längere Seite ist. Dadurch ist es wahrscheinlicher eine eindeutige Richtungsrelation zu erhalten.

Sollte auch dies keine eindeutige Relation ergeben, so muss man über eine Alternative nachdenken. Man könnte z.B. wie bei Haar dann nachschauen, wo sich der Schwerpunkt des primären Objektes befindet oder sagen, dass sich das primäre Objekt in zwei möglichen Relationen zum Referenzobjekt befindet (Der See ist sowohl nördlich als auch östlich vom Dorf).

3.2.5 Richtungsbestimmung bei konkaven Objekten

Probleme

Um einiges schwieriger wird es, wenn mindestens eines der Objekte eine sehr unregelmäßige Form hat. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn ein Objekt sehr langgezogen ist, es eine langgezogene und gleichzeitig verwinkelte Form hat oder sich gar teilweise um ein anderes Objekt "herumwickelt" (vgl. Abbildung 3.20).

In Abbildung 3.20 sehen wir ein Beispiel. In Bezug auf diese Abbildung können sich zwei Fragen stellen.

- **1.Fall: In welcher Richtung liegt B von A aus gesehen?**
  Legen wir die beiden Verfahren von Peuquet und Ci-Xiang zu Grunde, so liegt B in mehr als in einer Richtung: Es liegt auf jeden Fall nördlich und westlich, aber auch in der südlichen Region und auch ein wenig im Osten.

- **2.Fall: In welcher Richtung liegt A von B aus gesehen?**
  Hier entsteht nun ein Problem. Ist hier überhaupt eine Richtungsbestimmung möglich? Wenn ja, wie ermittelt man die Richtung?

Man sieht, dass sich im ersten Fall noch auf verschiedene Richtungen spekulieren lässt, im zweiten Fall ist dies wesentlich schwieriger.

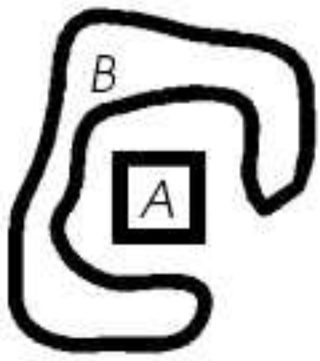


Abbildung 3.20: Verwinkeltes Objekt

Woran liegt das?

Alle wissenschaftlich beschriebenen Möglichkeiten, die wir bisher genutzt haben, um Richtungen zu bestimmen, sind hier nicht anwendbar oder liefern falsche Ergebnisse: Die Dreiecksmethode von Haar funktioniert hier nicht: Um die Akzeptanzbereiche aufspannen zu können wird der Schwerpunkt des Referenzobjektes gebraucht. In unserem Beispiel liegt dieser Schwerpunkt unglücklicher Weise aber mitten im primären Objekt. Dies würde eine Relationsbestimmung unmöglich machen. Die Methoden von Peuquet und Ci-Xiang setzen beide voraus, dass, bevor eine Richtungsbestimmung durchgeführt wird, um das Objekt eine "bounding box" gelegt wird, an die die jeweiligen Akzeptanzbereiche angelegt werden. Unser Beispiel zeigt hier das Problem auf, dass das primäre Objekt in keinen einzigen der Akzeptanzbereiche fallen kann, da es sich komplett in der "bounding box" befindet.

Finden wir die Situation vor, dass das Referenzobjekt ein Objekt mit konkaver Form (wie Objekt B in Abb. 3.20) und das primäre Objekt ein Objekt mit regelmäßiger Form, das komplett außerhalb der "bounding box" des Referenzobjekts liegt, ist, dann würden die Modelle von Peuquet und Ci-Xiang richtige Ergebnisse liefern. Ist das Referenzobjekt bzw. dessen "bounding box" quadratisch und zwei Seiten verlaufen parallel zum Nordvektor, dann würde auch das Dreiecksmodell von Haar funktionieren. Ist das primäre Objekt allerdings auch ein Objekt mit unregemäßiger Form und/oder es liegt teilweise oder komplett in der "bounding box", so liefern alle erwähnten Verfahren in vielen Fällen ungenaue oder falsche Ergebnisse.

Modell von Peuquet und Ci-Xiang

Da auch die Antwort auf die Frage in unserem 1.Fall eher unbefriedigend ist, entwickelten Peuquet und Ci-Xiang einen Ansatz zur richtigen Interpretation der Relationen (vgl. [PZ87]). Um nachzuprüfen, ob ein Objekt in der vorggeschlagenen Richtung liegt, stellten sie vier Aussagen auf[9], die entweder in der gegebenen Situation wahr oder falsch sind. Durch logische Verknüpfungen wurden die Aussagen wie folgt miteinander verbunden

$$((A1 \cap A2) \cap (A3 \cap A4))$$

und mit Wahrheitswerten belegt. Insgesamt ergibt sich ein Wahrheitswert, der aussagt, ob das primäre Objekt in der gesuchten Richtung liegt.

3.2.6 Fazit

Mit den vielen unterschiedlichen Möglichkeiten zur Richtungsrelationsbestimmung haben wir einige gute Grundlagen für unser praktisches Modell erhalten.

Bei den Modellen und Kalkülen zwischen nulldimensionalen Objekten gibt es drei einleuchtende Ansätze. Allerdings ist Freksas Modell eher eine Kombination aus zwei Bereichen: Das Referenzmodell ist ein Objekt mit Ausdehnung, wird aber wie ein punktförmiges behandelt. Alle drei Modelle zeigen gewisse Parallelen und können sich ggf. vereinigen lassen.

Bei den Modellen zwischen ausgedehnten Objekten hingegen ist eine Vereinigung unmöglich, da sich die Akzeptanzbereiche in allen drei Ansätzen in ihrer Größe und Form wesentlich unterscheiden.

Einen akzeptablen Ansatz zur Ermittlung der Richtungsrelationen bei "unförmigen" Objekten scheint es bis jetzt aus meiner Sicht noch nicht zu geben.

[9] Z.B.: Wenn B in der gesuchten Richtung zu A liegt, dann muss die Richtungslinie der inversen Richtung, die im Mittelpunkt von B beginnt, A auf jeden Fall schneiden

3.3 Entfernung

Eine weitere räumlich-geografische Relationsart ist die Entfernung. Neben der Möglichkeit Entfernungen metrisch ("Hamburg ist von Bremen 100 km entfernt.") oder gar zeitlich anzugeben ("Zu Fuß braucht man etwa 20 Minuten bis zur Kirche."), können sie auch qualitativ angegeben werden ("Hamburg ist von Bremen weit entfernt."). Metrische Angaben fehlen oft oder können in vielen Situationen nicht gemessen werden. Qualitative Entfernungsangaben hingegen können immer gemacht werden, wenn zumindest vages Wissen über die Lage der Objekte vorhanden ist, und sind für viele Menschen problemlos nachvollziehbar. Dies ist auch deswegen ein Vorteil, weil Meschen nur eingeschränkt in der Lage sind exakte Längenangaben auch exakt zu verarbeiten (vgl. [Her94]). Generell schätzen Menschen Entfernungen nicht in Zahlen, sondern qualitativ (vgl. [SS05]). Nach Translationen und Rotationen bleiben Entfernungsrelationen unverändert (vgl. [KL05]). Die qualitative Entfernungsbestimmung unterliegt dabei vielen verschiedenen Faktoren, die nun im Folgenden betrachtet werden sollen.

3.3.1 Grundlagen und Definitionen

Um eine Entfernung (ganz gleich welcher Art) bestimmen zu können, werden – ähnlich wie bei der Richtungsbestimmung – drei Dinge benötigt (vgl. [HCF95], [CFH97]):

- Ein primäres Objekt
- ein Referenzobjekt und
- ein Referenzsystem

Während das Referenzobjekt als Ausgangspunkt und das primäre Objekt als Endpunkt der Relationsbestimmung die gleiche Bedeutung haben wie z.B. bei der Richtungsbestimmung, muss beim Referenzobjekt bei der Entfernungsbestimmung auch auf andere Dinge geachtet werden.

3.3.2 Faktoren, die die Entfernungsbestimmung beeinflussen

Referenzsystem

Um eine qualitative Entfernungsrelation plausibel angeben zu können, muss vorher festgelegt werden in welchem Referenzsystem sich die beiden Objekte, zwischen denen die Entfernung bestimmt werden soll, befinden. Dabei ist es in diesem Fall vorher schwierig sich auf exakt einen Referenzrahmen (vgl.

Kap. 2.6) festzulegen. Da wir externe Beobachter einer Karte sind würde der deiktische Referenzrahmen passen, da aber auch Eigenschaften der Karte und der darauf befindlichen Objekte mit einbezogen werden sollen, könnte auch der instrinsische und der extrinsische Referenzrahmen benutzt werden. Es wird also versucht die drei Arten in gewisser Weise zu vereinigen. Grundsätzlich wird der deiktische Ansatz gewählt. Wenn wir Eigenschaften der Objekte betrachten, müssen auch der intrinsische und extrinsische Ansatz integriert werden.

Neben dem eigentlichen Typ des Referenzsystems ist auch die Skalierung der Karte von einer großen Bedeutung. Nehmen wir z.B. eine vergleichsweise kleine Skalierung wie den Bremer Stadtkern, so können wir sagen, dass der Zugbahnhof *nahe* dem Busbahnhof ist. Nehmen wir eine Skalierung der Größe von Europa, so ist Bremen *nahe* Hamburg. Folglich ist "nah" nicht gleich "nah". Dies liegt am Betrachtungszusammenhang. Wenn wir eine große Skalierung wie Europa haben, dann wäre z.B. die Entfernung von zehn Kilometern ziemlich gering (qualitativ: Nahbereich), während sie bei einer Karte der Größe von Bremen recht groß wäre (qualitativ: Fernbereich).

Verschiedene Wissenschaftler haben Einteilungen in Räume (Größe der Skalierung) aufgestellt. In den Fünfziger Jahren erschienen erste Publikationen zu diesem Thema. Es wurde lediglich zwischen dem "nahen" Raum und dem "entfernten" Raum unterschieden (vgl. [San51], [She61], [Mon93]). 1973 veröffentlichte Ittelson einen sehr einflussreichen Artikel (vgl. [Mon93]), in dem er den von ihm definierten "umgebenden" Raum mit dem Objektraum der klassischen Raumwahrnehmungsforschung (vgl. [Itt73]), verglichen. Dies ist Grundlage für viele weitere Artikel, die nun in "klein-skalierte" und "grob-skalierte" Räume (vgl. [PL81]) und zusätzlich in "mittel-skalierte" Räume oder Umgebungen (vgl. [Man83]) unterteilten.

Montello beschrieb 1993 (vgl.[Mon93]) ein Modell, das viele Theorien und Einteilungen älterer Modelle enthält und sie erweitert. Er unterteilt in vier Hauptklassen des psychologischen Raums, die er "`figural space`", "`vista space`", "`environmental space`" und "`geographical space`" nannte:

- `Figural space`
  Dies ist der kleinste der vier Räume. Er ist kleiner als der menschliche Körper und kann ohne Bewegung eingesehen werden. Es ist der Raum in dem z.B. Bilder und kleinere Objekten von entscheidender Größe sind. Meist genügt eine Berührung eines Objekts, um diesen Raum wesentlich zu verändern.

- `Vista space`
  Dieser Raum ist größer oder genauso groß wie der menschliche Körper.

Der Raum ist etwa von der Größe von Zimmern, Stadtplätzen oder kleinen Tälern.

- `Environmental space`
  Dieser Raum umgibt den menschlichen Körper (und ist somit größer als er). Er ist so groß wie Gebäude, die Nachbarschaft oder Städte. Räumliche Eigenschaften können nur durch eigene Wahrnehmung und Bewegung innerhalb dieses Raumes erfahren werden.

- `Geographical space`
  Dies ist der größte der vier Räume. Räumliche Eigenschaften können nur durch symbolische Darstellungen auf Landkarten oder ähnlichem dargestellt und wahrgenommen werden. Dieser Raum erstreckt sich über Länder, Kontinente oder das Sonnensystem.

Weitere Faktoren

Wenn wir Entfernungen qualitativ bestimmen wollen, so können wir nicht einfach die absolute Position zwischen den beiden Objekten nehmen, die metrische Entfernung zwischen den zwei Objekten bestimmen und sie auf einen qualitativen Ausdruck wie z.B. fern abbilden. Metrisch gleiche Distanzen können qualitativ unterschiedlich interpretiert werden.

Eine bestätigte These ist z.B., dass das Wissen und die Interpretation von allgemeinen Entfernungen des Menschen stark durch bekannte Entfernungen von Objekten untereinander beeinflusst wird (vgl. [BJO97]). Ferner gibt es einige weitere Faktoren, die unsere Entfernungswahrnehmung beeinflussen. Neben dem bereits erwähnten Referenzsystem beeinflussen auch

- die relative Größe und die Form der Objekte,
- die Lage von anderen Objekten,
- die Dauer um vom Objekt A zu Objekt B zu gelangen,
- die metrische Distanz,
- die zu investierenden Kosten (alle vgl. [CFH97]),
- Kultur und Erfahrung (vgl. [LM75]),
- eine Menge von Strukturrelationen, die weitere Informationen darüber geben, wie sich andere Entfernungsrelationen zueinander verhalten (vgl. [Coh97]),

- die Sichtbarkeit der Objekte,
- die Eigenschaften semantischer Distanzen (beide vgl. [SS05]) und
- die Bekanntheit und Attraktivität der Route, die der Entfernungsbestimmung zu Grunde liegen kann (vgl. [Mon97a])

unsere qualitative Entfernungswahrnehmung oder -bestimmung.

Leider liegen nicht für alle genannten Faktoren nähere Untersuchungen vor. Der einzige tiefer untersuchte Faktor ist als "Feature-Akkumulations-Effekt" bekannt (vgl. [Mon97b]). Er besagt, das Menschen Entfernungen als umso kürzer einschätzen, je mehr Objekte sich in der Umgebung zwischen den beiden Objekten, zwischen denen die Entfernung ermittelt wird, befinden.

3.3.3 Akzeptanzbereiche

Analog zu den Akzeptanzbereichen bei der Richtungsbestimmung wird der Raum um das Referenzobjekt in Regionen verschiedener Größe eingeteilt (vgl. [HCF95]), die dann den jeweiligen Entfernungsrelationen zugeteilt werden können.

Isotropische und anisotropische Flächen

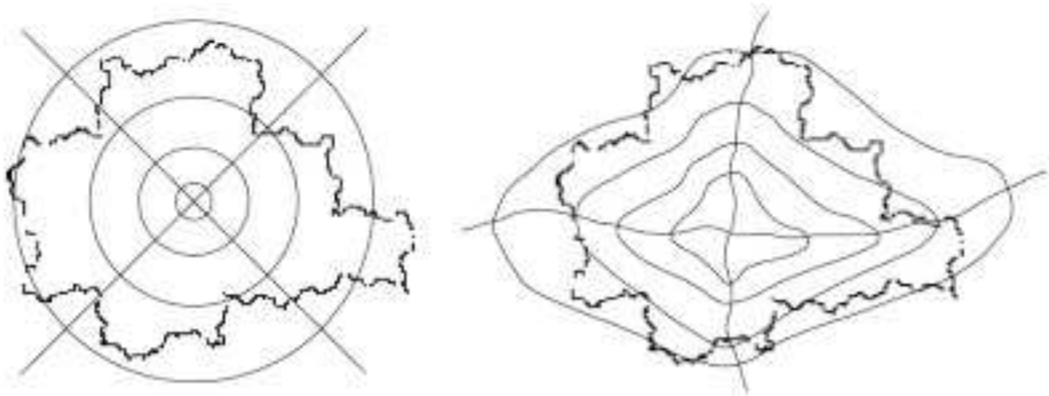


Abbildung 3.21: Isotropische und anisotropische Fläche

Bei den Akzeptanzbereichen gibt es zwei verschiedene Konzepte: Die isotropischen und die anisotropischen Flächen. Bei isotropischen Flächen sind die einzelnen Bereiche so um den Mittelpunkt bzw. das Referenzobjekt verteilt, dass sie in jede beliebige Richtung die gleiche Entfernung haben. Gleiche metrische Entfernungen sind folglich auch gleiche qualitative Entfernungen. Bei anisotropischen Flächen ist es möglich, dass ein Punkt A, der metrisch gesehen genauso weit wie ein Punkt B vom Mittelpunkt entfernt ist, in einen anderen Bereich fällt als Punkt B (und es sich somit um eine qualitativ andere Entfernungsrelation handelt) (s. Abb. 3.21). Die Linien, die die einzelnen Bereiche voneinander trennen werden Isolinien genannt. Im isotropischen Fall sind diese Isolinien konzentrische Ringe, im anisotropischen Fall sind es flexible verlaufende geschlossene Kurven (vgl. [CFH97]).

Die Bereiche, die von den Isolinien begrenzt werden, stellen jeweils den Bereich einer Entfernungsrelation dar[10]. Nur im einfachsten Fall können die Bereiche isotropisch eingeteilt werden, da viele Faktoren dazu beitragen, dass bestimmte Bereiche weiter entfernt wirken, als andere, die metrisch und direkt gemessen genau gleichweit entfernt sind.

3.3.4 Namen und Unterscheidungen der Relationen

Auch bei den Entfernungsrelationen kann unterschiedlich fein unterschieden werden. Die einfachste Art und Weise zu unterscheiden ist die Einteilung in die beiden Relationen `nah` und `fern`. Je feiner unterteilt wird, desto mehr Bereiche, Relationen und Relationennamen gibt es: Bei einer Unterscheidung in drei Bereiche entstehen die Relationen `nah`, `mittel` und `fern`, vier Bereiche würden in `sehr nah`, `nah`, `fern` und `sehr fern` unterschieden, bei fünf Unterscheidungen gibt es die Relationen `sehr nah`, `nah`, `mittel`, `fern` und `sehr fern`. Die einzelnen Relationennamen könnten auch anders benannt werden. Theoretisch ist es natürlich auch möglich in noch feinere Bereiche zu unterscheiden (vgl. [CFH97], [HCF95]).

Frank führt – abgeleitet aus der mathematischen Algebra – den Definitionsbereich für Relationen D ein. Dabei definiert der Index von D die Menge der Elemente des Definitionsbereichs. Die Elemente selbst werden in geschweiften Klammern durch Kommata getrennt aufgeführt. So beschreibt $D_2 = N, F$ eine zweielementige Menge, die die Relationen `nah`(N) und `fern`(F) beinhaltet (vgl. [Fra92]).

Da eine Entfernungsbestimmung zumeist mit nur zwei Objekten beginnt, wird grunsätzlich der einfachste Ansatz gewählt, also die Unterteilung in Nah- und Fernbereich. Sobald dann ein Objekt hinzugezogen wird, dass nicht eindeutig einem der beiden Bereiche zugeordnet werden kann, so wird eine

[10]Mehr dazu im Kapitel 3.3.4.

Entfernungsrelation mehr in die bildliche Vorstellung aufgenommen. Dies kann auch passieren, wenn durch die Hinzunahme eines Objekts ein Objekt, das vorher dem Nah- oder Fernbereich zugeordnet war, nun nicht mehr in diesen Bereich passt, da das neue Objekt dem Referenzobjekt wesentlich näher oder ferner ist als das bisher nächste oder entfernteste (vgl. [HCF95]).

3.3.5 Entfernungsbereiche

Neben den Namen der Relationen ist es zusätzlich wichtig zu sehen, wie sich die einzelnen Relationen größenmäßig zueinander verhalten. Clementini et al (vgl. [CFH97]) entwickelten dazu eindimentionale Systeme, die die Abgrenzungen der einzelnen Bereiche darstellen.

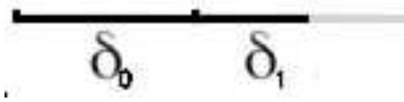


Abbildung 3.22: Ein einfaches Entfernungsbereichssystem

An Hand von Abbildung 3.22 soll dieses System beispielhaft erklärt werden. Alle Systeme beinhalten nicht-überlappende Bereiche (bzw. Intervalle), so dass jeder Punkt innerhalb des Systems eindeutig einem Bereich zugeordnet werden kann. Die einzelnen Relationen werden einem Interval δ_n zugeordnet. Dabei ist δ_0 das Intervall, das direkt an das Referenzobjekt angrenzt und folglich der Bereich, der dem Referenzobjekt am nächsten ist. Das Intervall mit dem höchsten Index (in diesem Fall δ_1) ist das Intervall, das dem dem Referenzobjekt am weitesten entfernten Bereich zugeordnet wird. Es ist nach hinten hin offen, da dieser Bereich unendlich groß ist. Clementini et al. definieren diese Systeme als homogen. Das bedeutet, dass es ein immer wiederkehrendes Muster gibt (z.B. $\delta_x * 2 = \delta_{x+1}$).

Δ_n beschreibt den Bereich vom Referenzobjekt bis zum Ende des Relationsintervalls mit dem gleichen Index ($\Delta_n = \delta_0 + \delta_1 + ... + \delta_n$). Δ_n beschreibt folglich ein Intervall einer Länge der Summe aller unter Δ_n liegenden Intervalle δ. Dieser Länge kann dann (in diesem homogenen System) eine Relation und ein Relationenname zugeordnet werden (In Abbildung 3.22 entspricht jede Länge, die länger ist als Δ_0 der Relation `fern`).

Wenn wir Abbildung 3.23 betrachten, so bemerken wir viele verschiedene Möglichkeiten wie die Intervalle zueinander stehen können. Allgemein ist zu sagen, dass Menschen dazu neigen, eher im bekannten Bereich (also beim Referenzobjekt) feiner zu unterscheiden, als im weit entfernten. Das führt

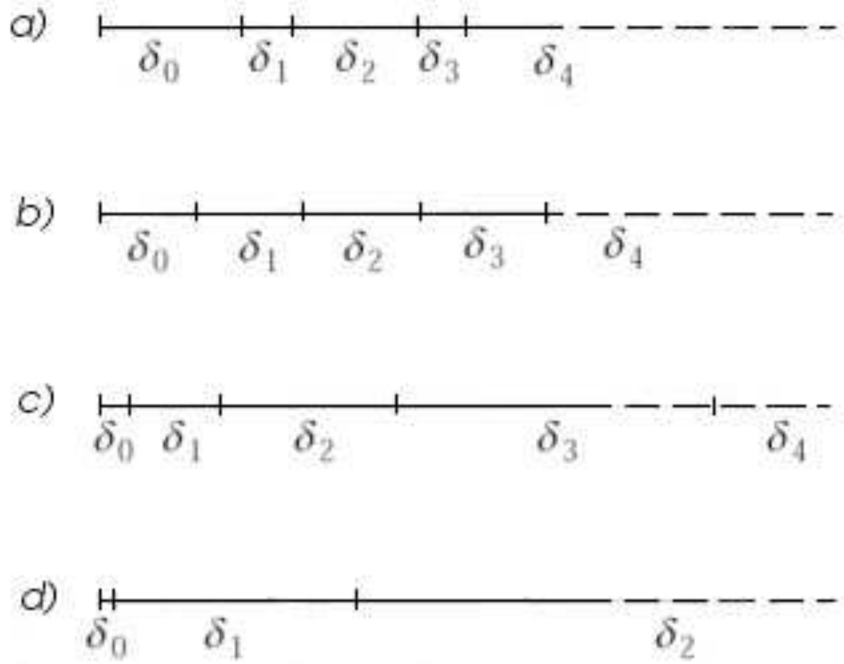


Abbildung 3.23: Entfernungsbereichssysteme, die verschiedenen Theorien unterliegen

dazu weniger entferntere Bereiche eher klein zu halten (siehe Abbildung 3.23 a)).

Die weiteren drei Darstellungen lassen sich jeweils unter einem Schlagwort zusammenfassen:

- **Monotonie**
  Abbildung 3.23 b) zeigt von der Länge monoton steigende Intervalle. Somit gilt:

$$\delta_0 \leq \delta_1 \leq \delta_2 \leq ... \leq \delta_n$$

- **Bereichseinengung**
  Wie an Abbildung 3.23 c) zu sehen ist, ist jeder Bereich größer als alle seine Vorgänger zusammen:

$$\delta_n \geq \Delta_{n-1}, \forall \text{ n} > 0$$

Dem kognitiven Konzept der Entfernung ist diese Darstellung besser angepasst, da feiner Unterscheidungen eher nahe dem Referenzobjekt gemacht werden als in weiter entfernten Bereichen.

- **Ordnung nach Größe**
  Im Vergleich zur Bereichseinengung werden die Intervalle hier noch größer je weiter man sich vom Referenzobjekt entfernt (siehe Abbildung 3.23 d)). Das nachfolgende Intervall (also das, das weiter vom Referenzobjekt entfernt ist) ist wesentlich größer als sein Vorgänger. Dies kann formal wie folgt dargestellt werden:

  Für den Unterschied p zwischen zwei Ordnungszahlen der Relationen q_i und q_j mit $1 \leq$ p $\leq$ (j-i) gilt:

  $$(\text{ ord}(q_i) \text{ - ord}(q_j)) \geq \text{p} \Rightarrow \delta_j >> \delta_i, \forall i, j \geq 0, i < j$$

  Hernandez et al. (vgl. [HCF95]) stellten dazu eine noch schärfere Gleichung auf:

  $$\delta_j \pm \delta_i \simeq \delta_j$$

3.3.6 Frank's Entfernungssystem

1992 veröffentlichte Frank eine Möglichkeit zur Ermittlung von qualitativen Entfernungsrelationen aus zwei (oder mehr) gegebenen qualitativen Entfernungsrelationen (vgl. [Fra92]).

"Addition" von Entfernungsrelationen

Qualitative Entfernungsangaben können nicht wie Zahlen aufaddiert werden. Entfernungsrelationen entsprechen Vektoren, da sie an einem Punkt (dem Referenzobjekt) beginnen und an einem Punkt (dem primären Objekt) enden und als gerichtet betrachtet werden können[11]. Eine Richtungsaddition $+_d$ ist folglich eine Vektoraddition, also die Verkettung mehrerer (Richtungs-)Vektoren. Vorausgesetzt werden muss allerdings, dass die Vektoren auf einer Linie liegen und in die selbe Richtung zeigen.

[11] Qualitative Entfernungsrelationen sind in der Regel nicht gerichet, da sie in der Richtung vom Referenzobjekt zum primären Objekt die gleiche qualitative Entfernungsrelation haben wie in der Gegenrichtung. Frank definierte auf Basis der metrischen Gleichung dist(P_1,P_2) = dist(P_2,P_1) für zwei Objekte P_1 und P_2 weitere qualitative Gleichungen und setzte die Gültigkeit dieser metrischen Gleichung auch für den qualititiven Bereich fest.

Zweiteiliger Entfernungsbereich

Als Einstieg beginnen wir mit den beiden Relationen $D_2 = \{N,F\}$ mit N für `nah` und F für `fern`. Dabei ist alles, was nicht `nah` ist `fern` und alles, was nicht `fern` ist `nah`. Nun betrachten wir jede Kombination der beiden Entfernungsrelationen bei der Relationenaddition:

$$\mathrm{N} +_d \mathrm{N} = \mathrm{N},\ \mathrm{F} +_d \mathrm{N} = \mathrm{F},\ \mathrm{N} +_d \mathrm{F} = \mathrm{F},\ \mathrm{F} +_d \mathrm{F} = \mathrm{F}.$$

Man kann also zur Relation `fern` beliebige Relationen addieren, es bleibt bei `fern`. Addiert man die Relation `nah` mit sich selbst so erhält man wieder `nah`.

Dreiteiliger Entfernungsbereich

Wir erweitern unseren Definitionsbereich um die Relation `mittel` M zu $D_3 = \{N,M,F\}$. Dabei gilt: N < M und M < F. N wird dabei als neutrales Element der Relationenaddition angesehen. Eine Addition mit F ergibt in jedem Fall wieder F. Die einzige Summe, die noch offen ist, ist die der Addition zweier M. Hier muss man zwischen M oder F als Lösung auswählen.

$+_d$	N	M	F
N	N	M	F
M	M	M oder F	F
F	F	F	F

Tabelle 3.4: Relationenaddition bei dreiteiligen Entfernungsbereichen

Entfernungsbereiche mit beliebig vielen Teilen

Das Problem, dass beim dreiteiligen Entfernungsbereich exemplarisch mit "M $+_d$ M = M oder F" dargestellt wurde, setzt sich bei noch feinerer Unterteilung der Relationen fort.

Tabelle 3.5 mit $D_4 = \{N, n, f, F\}$ mit N = sehr nah, n = nah, f = fern und F = sehr fern zeigt, dass bei einer Vierteilung schon bei vier der 16 Kombinationen nicht eindeutig bestimmbar sind. Ist z.B. n $+_d$ n = n? Oder = f?

$+_d$	N	n	f	F
N	N	n	f	F
n	n	?	?	F
f	f	?	?	F
F	F	F	F	F

Tabelle 3.5: Relationenaddition bei vierteiligen Entfernungsbereichen

Geometrische Interpretation

Frank interpretiert seine Relationenaddition geometrisch und möchte damit deren Gültigkeit unterstreichen. Die Intervalle, die bisher nur durch Begriffe wie `nah`, `fern` oder `sehr fern` charakterisiert waren und so beliebig frei interpretiert werden konnten, werden jetzt zusätzlich durch einen Zahlenbereich definiert. So hat die Relation `nah` nun nicht nur die Bedeutung, dass es der Bereich ist, der dem Referenzobjekt nah ist, sondern es wird festgelegt, dass es z.B. nur der Bereich von 0 bis 2 als nah-Bereich gilt.

Diese Bereiche werden als mathematische Intervalle notiert. Die Intervalle sind immer so angelegt, dass es keine Überschneidungen zwischen ihnen geben kann. Bei jedem Intervall, das benutzt wird, gehört die erste Entfernungsangabe nicht zum Intervall hinzu, die zweite Entfernungsangabe schon. [0,2) bedeutet, dass das Intervall zwischen null exklusive bis 2 inklusive gelegen ist.

Die geometrische Interpretation soll nun kurz am Beispiel des vierteiligen Entfernungsbereichs erläutert werden. Zuerst wird das Entfernungssystem beispielhaft durch die vier Intervalle [0,1), [1,2), [2,3) und [3,∞) beschrieben. Das Intervall, das bei 0 beginnt ([0,1)) beschreibt dabei den Bereich, der dem Referenzobjekt am nächsten ist (hier: `sehr nah`), das Intervall, das bis ins Unendliche reicht([3,∞)), ist vom Referenzobjekt am weitesten entfernt (hier: `sehr fern`). Jedem der Intervalle wird nun ein Relationenname zugeordnet. Jeder Entfernungswert gehört zu einem Intervall und man erhält den dazugehörigen Relationennamen. Die Relationenaddition von zwei Relationen R lässt sich nun noch genauer formalisieren:

$$R_1 +_d R_2 = [a_1, e_1) +_i [a_2, e_2) = [a_1 + a_2, e_1 + e_2)^{12}$$

Aus dem Intervall der Relationensumme $[a_1 + a_2, e_1 + e_2)$ wird dann der Mittelpunkt berechnet, durch den die Zugehörigkeit zu einer Relation

[12] Dabei steht $+_i$ für Vektoraddition.

ermittelt wird. Tabelle 3.6 zeigt die Ergebnisse beim vierteiligen Entfernungsbereich.

$+_i$	[0,1) → N	[1,2) → n	[2,3) → f	[3,∞) → F
[0,1) → N	[0,2) → N	[1,3) → n	[2,4) → f	[3,∞) → F
[1,2) → n	[1,3) → n	[2,4) → f	[3,5) → F	[4,∞) → F
[2,3) → f	[2,4) → f	[3,5) → F	[4,6) → F	[5,∞) → F
[3,∞) → F	[3,∞) →F	[4,∞) →F	[5,∞) →F	[6,∞) → F

Tabelle 3.6: Geometrische Interpretation der Relationenaddition beim vierteiligen Entfernungsbereichen

Wie schon angedeutet, ist die Belegung der Intervalle variabel durchführbar. Es ergibt sich die Möglichkeit die Intervalle den Entfernungsbereichssystemarten (vgl. Kapitel 3.3.5) anzupassen. Eine mögliche Belegung der Intervalle nach dem Monotonieprinzip zeigt Tablle 3.7

$+_i$	[0,1) → N	[1,3) → n	[3,8) → f	[8,∞) → F
[0,1) → N	[0,2) → N	[1,4) → n	[3,9) → f	[8,∞) → F
[1,3) → n	[1,4) → n	[2,6) → f	[4,11) → f	[9,∞) → F
[3,8) → f	[3,9) → f	[4,11) → f	[6,16) → F	[11,∞) → F
[8,∞) → F	[8,∞) →F	[9,∞) →F	[11,∞) →F	[16,∞) → F

Tabelle 3.7: Geometrische Interpretation der Relationenaddition beim vierteiligen Entfernungsbereichen nach dem Monotonieprinzip

Je nach Belegung der Intervalle ergeben sich nach der Relationenaddition unterschiedliche Ergebnisrelationen. Beim Vergleich der beiden Beispieltabellen fällt auf, dass in Tabelle 3.6 die Addition des `nah`- und des `fern`-Bereichs den `sehr fern`-Bereich ergibt. In Tabelle 3.7 ergibt sich der `fern`-Bereich.

Abschließendes

Frank bewertet die Ergebnisse seiner Modelle als “recht gut”. Dabei ist zubeachten, dass mehrere Entfernungsintervalle alle auf der gleichen Gerade liegen müssen, um für dieses Modell in Frage zu kommen. Frank behauptet, dass seine Ansätze im dreiteiligen Entfernungssystems zu mehr als 80 Prozent richtigen Ergebnissen führen, beim zweiteiligen sogar zu 85 Prozent korrekten Lösungen.

3.3.7 Mavrovouniotis Größenvergleiche

Qualitative Entfernungsangaben können auch aus Vergleichen zu anderen bereits vorgenommenen Entfernungsbestimmungen entstehen. Mavrovouniotis et al. erstellten 1990 ein System, um Größen verschiedener Art miteinander in Beziehung zu setzen. Sie nannten es "Schließen nach Größenordnung" (vgl. [MS90]).

Relation	Verbaler Ausdruck
$r_1 : A << B$	A ist viel kleiner als B
$r_2 : A- < B$	A ist mäßig kleiner als B
$r_3 : A\ \ < B$	A ist ein wenig kleiner als B
$r_4 : A == B$	A ist genau gleich zu B
$r_5 : A >\ \ B$	A ist etwas größer als B
$r_6 : A > -B$	A ist mäßig größer als B
$r_7 : A >> B$	A ist viel größer als B

Tabelle 3.8: Die sieben Ausgangsrelationen des "Schließen nach Größenordnung"

Tabelle 3.8 zeigt die sieben primitiven binären Relationen, die als Startrelationen aufgestellt wurden. Sie können teilweise untereinander kombiniert werden, um so weitere Relationen zu erhalten. Beispielsweise kann man $<<$, $-<$ und $-<$ zu $<$ kombinieren und erhält so die allgemeine Relation `kleiner als`. Nicht kombiniert werden können z.B. $<<$ und $>>$.

Die primitiven Relationen r_m und r_n können durch den ..-Operator verbunden werden. "A ist kleiner als B" würde formal "$A << ..\ \ < B$" sein. Nicht verbunden werden sollen Relationen, die sich gegenseitig ausschließen: Ein Objekt kann z.B. nicht als "viel kleiner" oder als "etwas größer" als ein anderes Objekt angenommen werden. Ebenso ausgeschlossen sind Verneinungen: "nicht viel größer" gibt es formal nicht, allerdings können manche verneinte Relationen durch Kombination anderer dargestellt werden.

Zusammengesetzt werden kann so z.B. die Relation "kleiner als oder etwa gleich" durch $<< .. >$ oder die Relation "etwa gleich" durch $< .. >$. $<< .. >$ kann negiert werden, $< .. >$ nicht.

Auf diese Art und Weise können zu den sieben Grundrelationen 21 weitere Relationen hinzugefügt werden.

Mit diesen qualitativen Vergleichsrelationen ist es nun möglich nach Angabe einer qualitativen Entfernungsrelation weitere Entfernungen im Vergleich zu der gegebene Relation qualitativ anzugeben.

Klassische Vergleichsrelation	Darstellung von Mavrovouniotis
Kleiner als ($<$)	$<<$ .. $\sim<$
Kleiner als oder gleich ($\leq$)	$<<$ .. $==$
Größer als ($>$)	$>\sim$ .. $>>$
Größer oder gleich ($\geq$)	$==$ .. $>>$
Gleich ($=$)	$==$
Etwa gleich ($\approx$)	$\sim<$ .. $>\sim$
Kleiner als oder etwa gleich ($\sim<$)	$<<$ .. $>\sim$
Größer als oder etwa gleich ($\sim>$)	$\sim<$ .. $>>$
Viel kleiner als	$<<$
Viel größer als	$>>$

Tabelle 3.9: Gängige Vergleichsrelationen und ihre Notation beim "Schließen nach Größenordnung"

3.3.8 Das Delta-Kalkül

Zimmermann entwickelte ebenfalls ein Kalkül, um qualitative Relationen miteinander zu vergleichen. Er nannte es das "Delta-Kalkül" (vgl. [Zim95]). Genau wie bei Mavrovouniotis kann es auf unterschiedliche Relationsarten angewandt werden (so auch auf Entfernungsrelationen) und benötigt als Vorraussetzung eine gegebene Relation.

Die Grundüberlegung des Delta-Kalküls ist, dass Menschen Strecken, die nicht gleich groß sind, als unterschiedlich erkennen und wissen, dass es einen Größenunterschied gibt. Formal gibt es also zwei Strecken a und b, wobei a größer als b und der Unterschied Δ zwischen a und b x sei. Somit gilt:

$$(\mathrm{a} > \mathrm{b}) \wedge (\mathrm{a} = \mathrm{b}+\mathrm{x})$$

Im Delta-Kalkül wird dies wie Folgt dargestellt:

$$\mathrm{a}(>, x)\mathrm{b}$$

x stellt dabei einen exakten Wert dar. Wenn dieser exakte Wert nicht bekannt ist, kann statt des exakten Wertes x das Unterschiedssymbol Δ benutzt werden. a$(>, \Delta)$b bedeutet dann, dass a größer als b ist. Wie groß der Unterschied ist, kann aus dem Δ nicht abgeleitet werden.

Prinzipiell werden nur drei Relationen unterschieden: $>$, $<$ und $=$ (formal: a$(=, \emptyset)$b). Eine Kombination mehrerer Aussagen ist aber auch möglich, wie z.B.:

$$\mathrm{a}(>, x)\mathrm{b} \wedge \mathrm{b}(>, y)\mathrm{c} \Rightarrow \mathrm{a}(>, \ll x, y \gg)\mathrm{c}$$

Das Schlussfolgern aus mehreren Formel kann auch dazu genutzt werden, um ungenaues Wissen über Streckenlängen anzugeben. Bisher konnten wir nur exakt oder gar nicht angeben, um wie viel sich die Strecken a und b unterscheiden. Dazu ein Beispiel:

Wir wissen, dass a größer ist als b und nennen den Unterschied zwischen a und b x. Von den Strecken haben wir keine genauen Angaben. Unser Empfinden sagt uns aber, dass b auf jeden Fall größer als x ist. Formal ergibt sich:

$$\mathrm{a}(>, x)\mathrm{b} \wedge \mathrm{x}(<, \Delta)\mathrm{b}$$

Analog zu Mavrovouniotis wird bei der Ermittlung von Entfernungen eine vorgegebene oder zuvor ermittelte Entfernung benötigt, die dann als Referenzrelation genutzt wird. Andere Entfernungsrelationen können jetzt dadurch ermittelt werden, indem sie mit der Referenzrelation (oder den Referenzrelationen) in Beziehung gesetzt werden. Daraus ergibt sich eine Vergleichsrelation, die dann z.B. mit einem monotonen Entferungsbereichssystem als Hilfsmittel zur Relationsbestimmung benutzt wird.

3.3.9 Kritische Anmerkungen

Im Gegensatz zu den aktuellen Verfahren bei Topologie und Richtung ist hier leider das größte Defizit zu beklagen. Neben der persönlichen Erfahrung nur wenige Artikel überhaupt finden zu können, zeigten einige Bemerkungen innerhalb dieser Texte diesen Mangel auf. So behaupten Hernandez et al., dass bis jetzt noch kein befriedigendes qualitatives Modell für Entfernungen entwickelt wurde (vgl. [HCF95]). Frank bestätigt diese Behauptung und merkt an, dass alle Entfernungsbestimmungen der Euklidischen Geometrie angenähert sind (vgl. [Fra92]). Allerings lassen sich qualitative Entfernungswahrnehmungen des Menschen nicht durch Formeln darstellen (vgl. [SS05]).

Es gibt noch ein paar Artikel, die sich mit qualitativen Entfernungen beschäftigen (vgl. [Zim93], [ZF96]). Sie passen aber nicht ansatzweise oder nur äußerst peripher zu dem Gebiet der qualitativen Entfernungsbestimmung zwischen zwei gegebenen Objekten.

Viele Faktoren, die die qualitative Entfernungsbestimmung beeinflussen (vgl. Kapitel 3.3.2), werden in der Literatur genannt, allerdings nicht weiter vertieft.

Franks System zur Entfernungsbestimmung aus zwei gegebenen Relationen beschränkt sich – wie erwähnt – auf Intervalle, die auf einer Linie liegen und, als Vektoren betrachtet, in die gleiche Richtung zeigen. Ein solches Szenarion ist auf Karten aber natürlich nur in den wenigsten Fällen gegeben.

Zudem bleibt anzuzweifeln, ob die dargestellten Entfernungsbereiche auch so real von Menschen verwendet werden. Dass es eine feste Grenze in Form einer Linie o.ä. gibt, die zwischen zwei Relationen liegt, klingt nicht plausibel. Des Weiteren behaupten Hernandez et al., dass die heterogenen Entfernungsbereichssysteme – im Gegensatz zu den beschriebenen homogenen – wesentlich besser zur kognitiven Denkweise der Menschen passen, dazu aber noch überhaupt keine Nachforschungen angestellt worden sind (vgl. [HCF95]).

Zudem werden nur punktförmige Objekte untersucht. Einige Wissenschaftler kritisieren, dass kaum ausgedehnte Objekte in Bezug auf Entfernung untersucht werden (vgl. [Vie97], [HCF95]). Hernandez et al. nennen dazu einen kurzen Ansatz: Bei Objekten, die in etwa die gleiche Entfernung zueinander haben wie ihre eigene Ausdehnung groß ist, misst bzw. bestimmt man die Entfernung zwischen den Grenzen der Objekte. Bei Objekten mit geringer Ausdehnung wird dies außer Acht gelassen. Und bei verbundenen Objekten kann die Entfernung der Objekte auf die Entfernung ihrer Schwerpunkte abgebildet werden (vgl.[HCF95]).

Leider ist auch keine der aufgeführten Möglichkeiten soweit ausgereift, dass man sie direkt anwenden bzw. sogar implementieren könnte.

Die Verfahren von Frank (Kap. 3.3.6), Mavrovouniotis (Kap. 3.8) und Zimmermann (Kap. 3.3.8) brauchen auf jeden Fall Vergleichswerte. Aus Clementinis Entfernungsbereichssystemen (Kap. 3.3.5) muss vor einer Implementierung untersucht werden, welches der Systeme (hier) das geeigneteste ist und die Größe eines Intervalls muss ebenfalls vorher festgelegt werden.

Kapitel 4

Entscheidungen und Weiterentwicklungen

Diese Kapitel dient der bewertenden Betrachtung des `State of the Art` aus dem vorherigen Kapitel. Aufgeteilt nach Topologie, Richtung und Entfernung werden die einzelnen im vergangenen Kapitel vorgestellten Möglichkeiten auf ihre Eignung hinsichtlich des praktischen Systems analysiert. Darauf aufbauend soll für jede Situation ein endgültiges Vorgehen erstellt werden, das beispielhaft implementiert werden soll. In manchen Fällen wird es nicht möglich sein eine Möglichkeit aus der wissenschaftlichen Literatur zu benutzen (bzw. eine Möglichkeit, die sich aus mehreren Ansätzen zusammensetzt), so dass meine eigenen Ideen und Vorstellungen einfließen werden.

4.1 Vorraussetzungen

Neben den Definitionen aus dem zweiten Kapitel (Definition der Objekte, ihrer Eigenschaften) müssen für Algorithmen noch weitere Aspekte betrachtet werden:

Die Algorithmen sollen auf einer fest vorgegeben statischen Karte arbeiten. Alle Objekte liegen mit ihren Eigenschaften vor. Zu ihren Eigenschaften gehören u.a. ihre Lage und Ausbreitung. Die Lage wird durch Koordinaten angegeben, die bei der Implementierung Pixeln entsprechen. Neben einer "Startkoordinate", die den Punkt des Objekts angibt, der sich am nächsten am Ursprung des Koordinatensystems befindet, sind für die Objekte mit Ausdehnung weitere Daten angegeben, die entweder weitere Koordinaten beschreiben oder die Länge und Breite eines rechteckigen Objekts, das selbst bzw. dessen "bounding box" parallel zu den Koordinatenachsen gelegen ist. Auf Basis der Koordinaten werden dann die Berechnungen für die Relationen zwischen den Objekten erfolgen.

4.2 Topologie

4.2.1 Topologie bei nulldimensionalen Objekten

In Kapitel 3.1 wurden die Modelle von Egenhofer und Herring, Egenhofer und Franzosa und das RCC-Kalkül von Randell, Cui und Cohn vorgestellt. Alle Ideen und ihre Artikel bezogen sich auf Objekte mit Ausdehnung und ihre topologischen Relationen untereinander. Neben diesen ein- und zweidimensionalen Objekten fanden die nulldimensionalen Objekte leider kaum Erwähnung. Das einzige Material dazu war bei Barkowsky (vgl. [Bar02]) in Form einer kaum kommentierten Tabelle zu finden, die topologische Relationen zwischen punktförmigen und ausgedehnten Objekten auflistet. Hier fehlt die Unterscheidung der ausgedehnten Objekte Linie und Fläche. Da aber auch sie für eine vollständige Untersuchung topologischer Relationen relevant sind, werden sie im Folgenden von mir definiert. Ohne all diese Definitionen wäre es uns beispielsweise nicht möglich herauszufinden, wie nulldimensionale Objekte topologisch gesehen gelegen sind und wichtige Informationen über Brunnen, Statuen o.ä, gingen verloren.

Als Vorteil erweist sich hier, dass wir weniger Voraussetzungen betrachten müssen, als bei den ausgedehnten Objekten. Punkte können nicht weiter unterteilt werden, so dass es hier keine Grenzen und keinen Innenbereich gibt. Der Abschluss wiederum ist der Punkt selbst. Ein Außenbereich ließe sich dadurch definieren, dass man den Punkt von der gesamten Ebene abzieht. Dies ist aber für die weiteren Betrachtungen nicht nötig.

Punkte untereinander

Dies ist der trivialste Fall. Zwei Punkte können entweder "`gleich`" oder "`ungleich`" sein. Eine direkte Nachbarschaft ist laut Definition nicht möglich, da hier ein Berührung vorliegen muss, was mathematisch gesehen bedeutet, dass jeweils ein Punkt aus der Objektmenge gleich sein müsste. Dies würde aber wieder die Gleichheit bedeuten.
Hierzu gibt es leider kein sinnvolles praktisches Beispiel.

Punkt und Linie

Auch hier verbleiben topologisch gesehen nur zwei Möglichkeiten:

1. Der Punkt liegt auf der Linie (bzw. die Linie auf dem Punkt).

2. Der Punkt liegt nicht auf der Linie (bzw. die Linie nicht auf dem Punkt).

Praktisch gesehen sind sowohl der Vergleich Punkt zu Linie ("Liegt ein Brunnen auf dem Wanderweg?") als auch der Vergleich Linie zu Punkt ("Liegt auf dem Wanderweg ein Brunnen?") sinnvoll.

Noch genauer kann unterschieden werden, wenn wir die Definition einer Linie aus dem Kapitel 2.4 beachten. Hier wird die Linie selbst in Grenze und Innenbereich unterteilt. Somit können wir die erste Möglichkeit noch weiter unterteilen:

- Der Punkt liegt auf einem Ende (einem Grenzpunkt) der Linie.
- Der Punkt liegt im Innenbereich der Linie.

Dadurch besteht nun auch die Option einen Brunnen am Ende des Weges zu haben.

Punkt und Fläche

Hier ergeben sich drei Möglichkeiten:

- Punkt und Fläche sind disjunkt.
- Der Punkt liegt auf der Flächengrenze bzw. die Fläche enthält den Punkt auf ihrer Grenze.
- Der Punkt liegt auf der Fläche (und nicht auf der Flächengrenze) bzw. die Fläche enthält den Punkt im Inneren.

Durch diese topologische Ermittlung ist es möglich herauszubekommen, ob z.B. ein Brunnen im Stadtwald gelegen ist.

4.2.2 Senkung der Anzahl der Relationen

Egenhofer und Herring ermittelten 33 Relationen, die zwischen zwei Linien möglich sind (vgl. Kap. 3.1.2 und [EH91]). Allerdings sind für unsere Betrachtungen nicht alle 33 Relationen von Nöten. Vielmehr machen manche von ihnen nur in der Theorie Sinn, praktisch kommen sie gar nicht vor oder nur so selten, dass wir sie trotzdem ignorieren können:

Abbildung 4.1 zeigt zwei dieser Relationen. Auf der linken Seite sieht man eine topologische Relation, die sich geografisch nicht sinnvoll darstellen lässt. Auf der rechten Seite befindet sich eine Relation, die sich nur schwer räumlich-geografisch deuten lässt. Es könnte sich um zwei Straßen handeln, bei denen eine bereits in der anderen anfängt (bzw. endet), wobei die Hausnummern auf der rechten Seite zu der einen Straße und die Häuser auf der

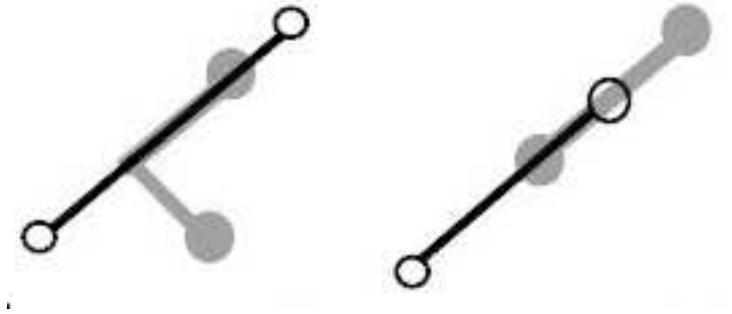


Abbildung 4.1: Zwei von zwölf topologischen Relationen, die hier keine praktische Bedeutung haben.

linken Seite zur anderen Seite gehören. Da solche Szenarien aber sehr selten sind, werden sie in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Eine praktische Bedeutung haben demnach 21 der 33 ermittelten Relationen, die man der Tabelle 4.1 entnehmen kann:

(1) *disjunkt*, (2) *scheidende Innenbereiche*, (3) *A beginnt und endet auf B*, (4) *A beginnt auf dem Innenbereich von B*, (5) *A ist Teilmenge vom Innenbereich von B*, (6) *A beinhaltet nur die Grenzen von B*, (7) *A beinhaltet B im Innenbereich*, (8) *A beginnt und endet auf dem Innenbereich von B, B beginnt und endet auf dem Innenbereich von A*, (9) *A beginnt und endet auf dem Innenbereich von B, B beginnt auf dem Innenbereich von A*, (10) *A beginnt auf B, B beginnt und endet auf A*, (11) *As Grenzen liegen auf dem Innenbereich von B, ein Grenzpunkt von B liegt auf dem Innenbereich von A*, (12) *A beginnt im Innenbereich von B und läuft durch einen Grenzpunkt von B*, (13) *A und B haben gleiche Grenzen und disjunkte Innenbereiche*, (14) *Gleichheit*, (15) *A und B haben nur einen gleichen Grenzpunkt*, (16) *A und B haben einen gleichen Grenzpunkt und daran anschließend einen gleichen Innenbereich, der danach disjunkt ist*, (17) *A und B haben einen gleichen Grenzpunkt und disjunkte Innenbereiche und B verläuft durch den zweiten Grenzpunkt von A*, (18) *A und B haben einen gleichen Grenzpunkt und disjunkte Innenbereiche und A verläuft durch den zweiten Grenzpunkt von B*, (19) *A und B haben einen gleichen Grenzpunkt, As Innenbereich und der zweite Grenzpunkt sind Teilmenge vom Innenbereich von B*, (20) *A und B haben einen gleichen Grenzpunkt, Bs Innenbereich und der zweite Grenzpunkt sind Teilmenge vom Innenbereich von A* und (21) *A und B haben einen gleichen Grenzpunkt, aber disjunkte Innenbereiche, B verläuft*

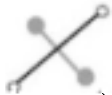
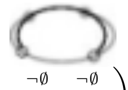
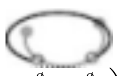
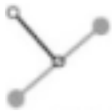
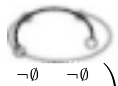
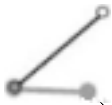
 1 $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	2  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	 3 $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	4  $\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
5  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	6  $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	7  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	8  $\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
9  $\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	 10 $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	11  $\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	12  $\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
13  $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	14  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	15  $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	16  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
17  $\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	18  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	19  $\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	20  $\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
21  $\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$			

Tabelle 4.1: Übersicht über die 21 topologischen Relationen, die zwischen zwei Linien möglich und praktisch nutzbar sind.

durch den zweiten Grenzpunkt von A und endet auf dem Innenbereich von A.

Alle genannten Relationen kann man auf einer Karte finden - manche häufiger (*A und B haben nur einen gleichen Grenzpunkt* – Am Ende der Straße beginnt ein Weg) als andere (*A beginnt und endet auf dem Innenbereich von B, B beginnt und endet auf dem Innenbereich von A* – seltsame Straßenverläufe), manche treffen mehr auf Flüsse zu (*A und B haben gleichen Grenzpunkt und daran anschließend einen gleichen Innenbereich, der danach disjunkt ist*), manche mehr auf Strassen (*A beginnt und endet auf B*).

4.2.3 Vergleich des Modells von Egenhofer/Franzosa mit dem Kalkül von Randell, Cui und Cohn

Egenhofer/Franzosa (Kapitel 3.1.3) und Randell/Cui/Cohn (Kapitel 3.1.3) benutzten überaus verschiedenen Ansätze um topologische Relationen zwischen zwei zweidimensionalen Objekten zu ermitteln. Insgesamt ist aber zu sagen, dass sich die daraus resultierenden Relationen sehr ähneln. Bis auf die Relation "`Überlappen mit disjunkten Grenzen`", die Egenhofer und Franzosa zusätzlich mit aufführten, sind alle anderen acht Relationen gleich. Die Relation "`Überlappen mit disjunkten Grenzen`" kann aber als Sonderfall von "`enthalten sein`" betrachtet werden. Hier ist ein Objekt B in einen Objekt A enthalten, wobei der Objekt B eine besondere Form (Kreis mit Loch) hat. Randell, Cui und Cohn verzichteten wie bereits erwähnt absichtlich auf Objekte mit seltener Form. Des Weiteren wurde bereits festgelegt, dass in dieser Diplomarbeit Objekte mit Löchern nicht betrachtet werden sollen.

Eines der beiden Verfahren zu bevorzugen ist nicht nötig: Wichtig sind die Relationen, die im Großen und Ganzen gleich sind. Die Sonderrelation "Überlappen mit disjunkten Grenzen" wird, da es einen Sonderfall darstellt, nicht weiter beachtet.

4.2.4 Vorgehen zur Unterscheidung topologischer Relationen

Eine topologische Relation zu erkennen und von einer anderen zu unterscheiden erscheint trivial. Allerdings gilt diese Trivialität nur für Lebewesen. Maschinen hingegen sind – ohne Programmierung in diesem Bereich – nicht in der Lage topologische Relationen zu unterscheiden (oder gar zu erkennen).

Alle vorgestellten Möglichkeiten zur Relationsbestimmung im Bereich der Topologie haben das Ziel alle möglichen topologischen Relationen zu ermitteln. Während es sehr schwierig ist das RCC-System in einen Algorithmus zu formen, erscheinen Egenhofer's intersection-Modelle dazu besser geeignet. Allerdings erscheint es mir sehr schwierig den Außenbereich und den Innenbereich eines Objekt formal und gut handhabbar für Rechenanweisungen zu nutzen. Folglich wird eine Algorithmus benutzt, der nicht das intersection-Modell als Grundlage hat. Es werden aber einige Ideen benutzt, die dieses Modell liefert: Beispielsweise die grundsätzliche Unterscheidung in Grenz- und Innenbereiche oder die Ermittlung der Schnittmenge der Grenzbereiche.

4.2.5 Algorithmus zur Unterscheidung topologischer Relationen

In diesem Unterabschnitt wird ein Algorithmus zur Erkennung von topologischen Relationen zwischen beliebigen Objekten (null-, ein- oder zweidimensional) vorgeschlagen. Mit ihm ist es möglich die 57 in dieser Arbeit ermittelten topologischen Relationen voneinander zu unterscheiden. Dieser Algorithmus ist Grundlage des Programms. Dieser komplett selbst entwickelte Algorithmus ist auch der für dies Diplomarbeit endgültige Vorschlag für die computionale Erkennung topologischer Relationen, auch weil die einzige Alternative (Egenhofer's intersection-Modell) nur sehr schwer umzusetzen ist.

Im Folgenden werden nur die wichtigsten Grundzüge des Algorithmus skizziert, die Komplettfassung befindet sich im Anhang.

Voraussetzungen und Annahmen

Damit der Algorithmus funktioniert müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Objekte müssen als Objekte ihrer Dimension erkannt werden.
- Für alle Objekte gelten die Definitionen, die in dieser Arbeit festgelegt wurden (s. Kap. 2.4). Besonders wichtig sind die Definition einer Linie (Es gibt keine Polylinien!) und die Unterscheidungen in Grenze und Innenbereich eines Objekts. Die Grenze einer Fläche kann dabei ein Kreis oder eine Polylinie sein. Zusätzlich gilt hier zur Vereinfachung, dass eine Linie mindestens aus fünf Punkten (inkl. Grenzen) besteht. Wie zuvor definiert dürfen Linien auch keinen Kreisring bilden.

- Jedes ein- und zweidimensionale Objekt hat einen Mittelpunkt. Dieser Mittelpunkt sollte, sofern möglich, den mathematischen Gesetzen eines Mittelpunktes genügen, muss aber innerhalb des Objekts liegen.

- Geraden müssen zwischen zwei beliebigen Punkten gelegt werden können. Aus dieser Gerade wiederum müssen Strecken extrahiert werden können.

- Schnitte zwischen Objekten müssen erkannt werden können. Berührungen gelten allgemein als Schnitte. Die Anzahl der Schnittpunkte zwischen zwei Objekten muss ermittelt werden können, wobei bei der Ermittlung, ob etwas innerhalb oder außerhalb eines Objekts ist, zwischen Berührung und Schnitt unterschieden werden muss.

- Punkte werden durch Koordinaten repräsentiert.

Ferner wird angenommen, dass Objekte sich maximal an zwei unterschiedlichen Stellen berühren, sich an maximal zwei verschiedenen Stellen überlappen und an maximal vier Stellen schneiden. Diese Annahme wird aus Gründen der Vereinfachung für den Algorithmus gemacht, sie erscheint mir aber auch ziemlich realistisch. Gäbe es mehr als zwei Berührstellen oder mehr als vier Schnittpunkte, so wäre es sehr aufwendig direkt aufeinander folgende Mehrfachberührungen an verschiedenen Bereichen von mehreren Berührpunkten nebeneinander zu unterscheiden.

Der Algorithmus muss in der Lage sein, Berührungen und Schnitte zu unterscheiden, da es manchmal notwendig ist, Schnittpunkte zu zählen, wobei Berührungen nicht mitgezählt werden dürfen.

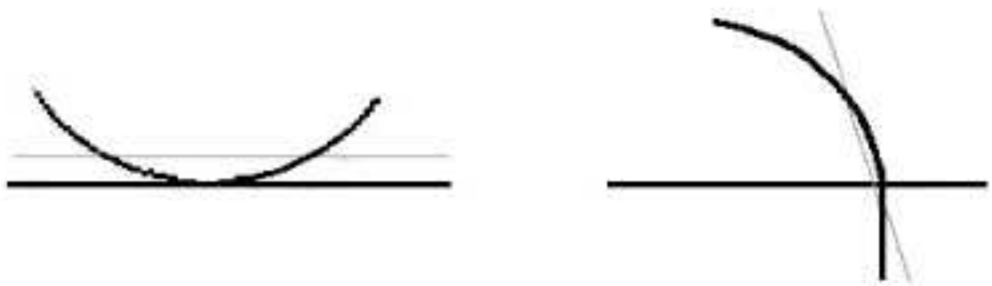


Abbildung 4.2: Links liegt ein Berührpunkt vor, rechts ein Schnittpunkt.

Grundzüge des Algorithmus

Die Ermittlung mancher topologischer Relationen erscheint trivial: Sobald ein nulldimensionales Objekt beteiligt ist, muss dessen Koordinate mit den Koordinaten der Grenze und des Mittelpunkts verglichen werden, um festzustellen, wo der Punkt liegt.

Der topologische Vergleich von Linie bzw. Fläche mit Linie oder Fläche ist aber wesentlich komplexer. Ist eine Fläche beteiligt, so wird zuerst geprüft, ob es sich dabei um einen Kreis handelt, da in dem Fall die Relationsermittlung einfacher verläuft. Der restliche Algorithmus benötigt letztlich nur noch die Möglichkeiten Berührungen zu ermitteln, Schnitte zu ermitteln und zu zählen, Koordinaten zu vergleichen und Geraden durch Punkte zu legen. Nur wenige Relationen sind allein mit diesen Hilfsmitteln nicht eindeutig zu ermitteln. In dem Fall benutzen wir eine Heuristik.

Die meisten Relationen können ermittelt werden, indem man die Anzahl der Berührpunkte und Schnittpunkte analysiert. Vergleicht man zwei Linien reicht dies meistens schon aus. Zusätzlich muss nur noch herausgefunden werden, ob und wie viele Schnitt- oder Berührpunkte gleichzeitig Grenzpunkte sind.

Vergleicht man zwei Flächen, wird auch die Anzahl der Schnitte der Grenzen benötigt. Wenn es einen oder keinen Schnittpunkt gibt, werden außerdem die Mittelpunkte und der Flächeninhalt der Flächen gebraucht, um zu ermitteln, ob ein Objekt im anderen liegt (und welches in welchem), oder ob sie disjunkt sind. Wenn es zwei Schnittpunkte oder nur Berührpunkte gibt, stehen die Relationen fest.

Am kompliziertesten ist der topologische Vergleich von einer Fläche und einer Linie. Hier muss ermittelt werden, ob sich die Grenzpunkte innerhalb oder außerhalb der Fläche befinden oder auf der Flächengrenze. Anschließend lässt sich an Hand der Anzahl der Schnitt- und Berührpunkte der Verlauf der Linie ermitteln. Wenn es mehr als drei Schnittpunkte (keine Berührpunkte) gibt, gehen wir davon aus, dass die Linie teilweise auf der Flächengrenze verläuft. Um den genauen Verlauf der Linie zu ermitteln wird die Heuristik angewandt: Es wird eine beliebige Auswahl an Punkten auf der Linie gemacht. Diese Punkte werden überprüft, ob sie innerhalb oder außerhalb der Fläche oder ob sie auf der Grenze liegen. Dies wird gemacht, um den Aufwand zu verringern. Wir nehmen an: Das, was für die Auswahl der Punkte gilt, gilt für die gesamte Linie.

Vor- und Nachteile des Algorithmus

Da fast alle der 57 möglichen topologischen Relationen individuell unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, ist es kaum besser möglich sie anders zu ermitteln, als es im Algorithmus vorgeschlagen wird. 55 der 57 Relationen werden dabei eindeutig erkannt. Die restlichen zwei Relationen könnten eindeutig untereinander nur unterschieden werden, wenn alle Grenzpunkte der Objekte miteinander verglichen werden würden. Auf Grund des zu großen Aufwands wird dabei nur eine Heuristik benutzt.

4.3 Richtung

4.3.1 Richtungsbestimmung zwischen null-dimensionalen Objekten

Grundlagen

Zunächst geben wir an, welches Referenzsystem wir für unser weiteres Vorgehen benutzen wollen. Wir werden grundsätzlich den deiktische Referenzrahmen (vgl. Kap. 2.6) und somit die externe Variante ohne die exakte Kenntnis von Eigenschaften der Objekte oder Faktoren, die zusätzlich vorhanden sind, benutzen. Die Nordrichtung wird immer implizit angeben sein. Sie wird grundsätzlich nach "oben" zeigen, praktisch orthogonal zur Beschriftung der Objekte. Damit folgen wir dem Beispiel von standartisieren Landkarten, bei denen die Ausrichtung in gleicher Weise vorgenommen wird.

Neutrale Zone

Frank beschrieb in [Fra92] und [Fra96] die Richtungsbestimmung, in der eine Zone betrachtet wird, in der keine Richtungsbestimmung vorgenommen wird (s. Kap. 3.2.3, S. 41).

Frank macht keine exakte Angabe darüber, wie groß die neutrale Zone ist und welche Faktoren die Größe dieser Zone beeinflussen. Die Abbildung 3.9 lässt annehmen, dass Frank die Himmelsrichtungen direkt an die quadratische neutrale Zone angliederte und jeweils ausschließlich mit 90 Grad-Winkeln austattete.

Sinnvoller würde mir eine Unterteilung in eine kreisförmige neutrale Zone (mit dem Referenzobjekt als Mittelpunkt) und einer Anordnung der Himmelsrichtungen nach Art der Hernandez'schen Herleitung im Level 3 (s. Kap. 3.2.3, S. 37) außerhalb dieser Zone erscheinen.

Die Einführung einer neutralen Zone erscheint auch bei Richtungsbestimmungen zwischen Objekten verschiedener Dimensionen sinnvoll. Auch bei Objekten mit Ausdehnung ist eine (Himmels-)Richtungsangabe bei Objekten in der unmittelbaren Umgebung nicht von Nöten, da direkt auf die nahe Lage, eventuell mit Hilfe eines Fingerzeigs, verwiesen werden kann.

Ansatz von Freksa

Freksas Modell zur Richtungsbestimmung (vgl. [Fre92]) benutzte als Referenzobjekt einen Vektor (s. Kap. 3.2.3, S. 43). Als Richtungsrelationen wurden z.B. "links", "rechts", "hinten" oder "geradeaus" genommen. Durch

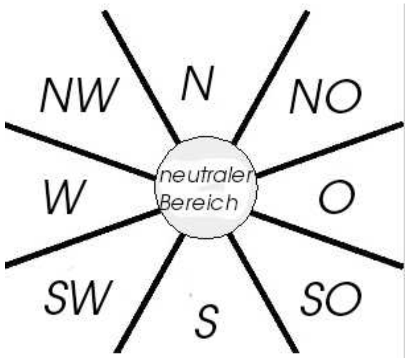


Abbildung 4.3: Richtungsrelationen nach dem Modell aus dem Level 3 mit neutraler Zone.

Bestimmung der Richtung des Referenzvektors ist es möglich alle gegebenen Richtungsrelationen in Himmelsrichtungen anzugeben.

Werden hier die Richtungsrelationen als Himmelsrichtungen angegeben, ist die Richtung des Referenzvektors nicht mehr entscheidend, da sich die Himmelsrichtung nicht durch Änderung der Ausrichtung eines Objektes, bei gleichzeitiger Beibehaltung der Lage, ändert. Folglich ergeben sich keine 15 Richtungsrelationen, sondern sieben. Abbildung 4.4 zeigt ein Beispiel, bei dem der Referenzvektor nach Norden zeigt. Der Referenzvektor ist hier nicht mehr und nicht weniger als ein eindimensionales Objekt.

4.3.2 Sektorenbestimmung bei Objekten mit Ausdehnnung

Vergleicht man die beiden Modelle von Peuquet und Ci-Xiang (vgl. [PZ87]) zur Ermittlung der Sektorengröße einer Richtungsrelation, so ergeben sich unterschiedlich große Sektoren (s. Kap. 3.2.4, S. 47). Beide Modelle sollen abhängig von der Entfernung der involvierten Objekte zueinander benutzt werden. Dies erscheint mir nicht plausible. Aus meiner Sicht ist das Modell "Wahl eines anderen Startpunktes der winkel-aufspannenden Geraden als den Schwerpunkt" insgesamt besser: Oft wird nicht von dem Gesamtobjekt als Referenzobjekt zur Richtungsbestimmung ausgegangen, sondern von einem bestimmten Punkt dieses Objektes. In der Regel ist dieser Punkt der Eckpunkt der Objekts, der dem primären Objekt am nächsten ist. Dies ist der Fall, wenn man keine weiteren Informationen über das Objekt hat oder

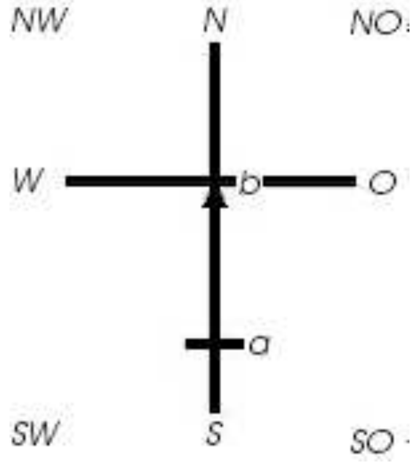


Abbildung 4.4: Freksas Modell mit Himmelsrichtungen. Referenzvektor nach Norden ausgerichtet.

es überhaupt nicht kennt[1]. Folglich ergibt sich wieder die (bereits bekannte) Richtungsbestimmung zwischen zwei nulldimensionalen Objekten bzw. die Bestimmung zwischen einem nulldimensionalen Objekt und einem Objekt mit Ausdehnung. Im zweiten Fall sind die Sektoren gleichgroß wie die Sektoren im ersten Fall[2]. Somit sind alle Winkel, die die Sektoren aufspannen, gleich groß. Folglich ergibt sich das Modell, dass Kobler aufzeigte (vgl. [Kob92], s. Kap. 3.2.4, S. 52). Dieser auf ein zweidimensionales Referenzobjekt bezogene Ansatz kann auch auf ein eindimensionales Objekt übertragen werden: Die im Zweidimensionalen ausgedehnten Strecken der Objektränder, werden auf Punkte projiziert. Die dazugehörigen Sektoren verkleinern sich entsprechend. In dem Fall ergibt sich fast der bereits oben beschriebene Ansatz von Freksa, lediglich die Sektorenwinkel müssen geändert werden.

4.3.3 Richtungsbestimmung bei ausgedehnten Objekten

Neben der Anordnung der einzelnen Sektoren ist natürlich die Lage des primären Objekts entscheidend für die Richtungsbestimmung. Ist das Objekt nulldimensional, so ist die Bestimmung der Richtung trivial. Bei Objek-

[1]Wenn das Objekt bekannt ist oder weitere Informationen bekannt sind, kann auch von bestimmten Teilen oder Bereichen des Objekts die Richtungsbestimmung gestartet werden: Häuser haben einen Frontbereich oder Geschäfte einen Eingangsbereich.

[2]Dazu später mehr.

ten mit Ausdehnung ist dies oft schwieriger. Eindeutig bestimmen lässt sich die Richtung nur, wenn das Objekt komplett in einem Sektor liegt. Ist dem nicht so, so erscheint mir der Vorschlag von Peuquet und Ci-Xiang am sinnvollsten: Wir bilden die inverse Richtungsrelation, indem wir das Referenz- und das primäre Objekt vertauschen und prüfen, ob sich hier die Richtung eindeutig bestimmen lässt (vgl. [PZ87], s. Kap. 3.2.4, S. 52). Funktioniert auch dies nicht, so empfiehlt es sich, dass vereinfachte Verfahren von Haar anzuwenden, bei dem die Richtung zum Schwerpunkt des primären Objekts bestimmt wird und/oder vom Mittelpunkt des Referenzobjekts die Richtung bestimmt wird.

4.3.4 Richtungsbestimmung bei konkaven Objekten

Leider hat auch das Modell von Peuquet und Ci-Xiang zur Bestimmung von Richtungen von unförmigen Objekten (s. Kapitel 3.2.5 auf Seite 55) seine Nachteile. Negative Belegungen der Formel wirken sich schnell fatal aus. Liegt z.B. ein Objekt zwar offensichtlich im Osten, wird es aber nicht von der Ostlinie geschnitten, so liefert dieses Modell direkt die Aussage, dass es nicht im Osten liegt.

Vorschläge für Merkmale einer genaueren Relationsbestimmung

Bei der Richtungsrelationsbestimmung bei konkaven Objekten kann eine große Anzahl an Aspekten beachtet werden. Es folgen ein paar persönliche Vorschläge, worauf geachtet werden kann oder wie man bei der Relationsbestimmung vorgehen könnte. Viele Vorschläge sind nur bei bestimmten Situationen möglich. Manche Vorschläge schließen sich gegenseitig aus.

- **Unterteilung der Objekts**
  Oft können langgezogene unförmige Objekte in mehrere Teile unterteilt werden. Beispielsweise werden Straßen, die auf der Karte aussehen wie ein Objekt, von Menschen unterteilt, z.B. bei Kurven oder Kreuzungen (Die Straße nach Dorf 1 und die Straße zur Autobahn sind oft die gleichen, nur verschiedene Teile) oder durch ortsabhängige Unterteilungen (Die Straße im Dorf und außerhalb des Dorfes). Da in den meisten Fällen nicht das gesamte Objekt, ganz gleich ob als Referenz- oder primäres Objekt, gemeint ist, sondern ein besonderer Punkt bzw. Teil des Objekts, muss dieser Teil als Referenz- oder primäres Objekts gewählt werden.

- **Wahl einer markanten Stelle eines Objektes**
  Dieser Möglichkeit liegt die gleiche Idee zu Grunde wie bei der "Unterteilung der Objekte". Wird ein konkaves Objekt gewählt, so wird nicht die Gesamtfläche des Objekts bei der Relationsermittlung berücksichtigt, sondern ein markanter Teil des Objekts. Dies könnte z.B. der Eingangsbereich bei einem großen Gebäude sein oder bei einer Ortschaft der Straßenbereich, der am schnellsten zu erreichen ist, sein. Der Unterschied zur ersten Idee ist, dass der Teil automatisch erkannt wird, während er im ersten Fall vom Benutzer bestimmt werden und dabei nicht automatisch ein besonders markanter Punkt sein muss.

- **Nächste Bereiche der Objekte auswählen**
  Ähnlich wie die zuvor genannte Idee wird nicht die Gesamtfläche in die Richtungsrelationsbestimmung mit einbezogen, sondern nur ein bestimmter Teil. In diesem Fall ist dieser Teil der Bereich des Objekts, der dem Objekt mit dem die Relation hergestellt werden soll am nächsten ist. Diese Idee basiert darauf, dass wenn man ein Objekt erreichen will und nach der Richtung fragt, im Normalfall auch den schnellsten Weg dahin wählen möchte.

- **Nennung mehrerer Relationen**
  Es gibt Fälle in denen das primäre Objekt in mehreren Akzeptanzbereichen liegt. Die Angabe einer richtigen Richtungsrelation wäre zwar nicht verkehrt, allerdings wirkt eine solche Angabe oft befremdlich. Man könnte also alle Richtungen nennen, in denen das Objekt liegt oder das Gesamtobjekt unterteilen und die Richtungen in Bezug zu dem jeweiligen Teil nennen.

- **Beschreibung der Situation**
  Liegt das primäre Objekt innerhalb der "bounding box" des Referenzobjekts, besteht die Möglichkeit dies näher zu beschreiben. Es könnte beispielsweise sein, dass sich das primäre Objekt auf dem Innenhof des konkaven Objekts befindet oder zwischen zwei Flügeln des komplexen Referenzobjekts.

  Liegt es nur teilweise innerhalb der "bounding box", so kann neben der Beschreibung noch zusätzlich die grobe Richtung angegeben werden. Als primäres Objekt dient dabei der Teil, der außerhalb der "bounding box" liegt.

- **Neutrale Zone**
  Wenn das konkave Objekt nicht zu groß ist, dann muss, wenn es

sich dabei um das Referenzobjekt handelt, nicht über eine Richtungsbestimmung nachgedacht werden, wenn das primäre Objekt in der "bounding box" liegt. Es liegt dann in der neutralen Zone (s. Kap 4.3.1, S. 82) und ist dem Referenzobjekt nah.

- **Beibehalten des sonstigen Vorgehens**
  Ist das konkave Objekt das primäre Objekt, nicht zu groß und liegt nicht in der "bounding box", könnte auch das bisherige Vorgehen gewählt werden.

Wegen der Komplexität dieses Themas der konkaven Objekte und aus dem Grund, dass über vieles nur spekuliert werden kann, gehen wir wie folgt vor:

Die konkaven Objekte werden so gehalten, dass sie maximal so groß sind, dass sie ...

- als primäres Objekt maximal in zwei Sektoren fallen.
- als Referenzobjekt nur so groß sind, dass wenn ein primäres Objekt innerhalb ihrer "bounding box" liegt, dieses im Nahbereich liegt.

Folglich wird hier vorgegangen wie bei konvexen Objekten: Um jedes konkave Objekt wird eine "bounding box" gelegt und die Richtung von bzw. zu ihr ermittelt.

4.3.5 Algorithmus zur Bestimmung von Richtungsrelationen

In diesem Abschnitt wird nun das endgültige Vorgehen zur Ermittlung von Himmelsrichtungen zwischen zwei beliebigen Objekten beschrieben. Der Algorithmus baut auf den in diesem Abschnitt erläuterten Ideen auf. Grundlage des gesamten Algorithmus ist die Bestimmung der Richtung zwischen zwei Punkten. Diese Punkte stammen aus den beiden Objekten, zwischen denen die Richtung bestimmt werden soll. Sie werden unterschiedlich ermittelt (s.u.). Der Algorithmus wird in neun Teile aufgeteilt: Jedes primäre Objekt aus einer der drei Dimensionen wird mit jedem Referenzobjekt aus einer der drei Dimensionen richtungsmäßig verglichen. Jeder Teil ist der Vergleich eines Objekts aus einer Dimension mit einem anderen Objekt aus einer Dimension. Die Richtungsrelationsbestimmung von Objekten höherer Dimension wird dabei in gewisser Weise auf die Richtungsrelationsbestimmung von Objekten niederer Dimension abgebildet. Detailliert funktioniert der Algorithmus wie folgt:

Referenzobjekt: Punkt, primäres Objekt: Punkt

Als Granularität wird im Voraus die Einteilung in Level 3 nach Hernandez gewählt. Somit gibt es acht mögliche qualitative Richtungsrelationsangaben. Um eine solche Richtung angeben zu können müssen die einzelnen Sektoren numerisch realisiert werden. Jeder Richtungsrelation wird ein Intervall von zwei Winkelwerten zugewiesen. Die Intervalle sind dabei nahezu gleich groß: Die Grenzen, die einen Akzeptanzbereich abgrenzen, bilden jeweils einen 45-Gradwinkel auseinander. Akzeptanzbereiche der Relationen, die mit einem Buchstaben abgekürzt werden (N, O, W, S) beinhalten diese Grenzlinien, die anderen Sektoren nicht. Zur Bestimmung des Winkels wird eine Halbgerade, beginnend am Referenzobjekt, ermittelt, die parallel zum Nordvektor verläuft und deren Anfang "im Süden" der Halbgerade liegt. Dann wird eine zweite Halbgerade ermittelt. Sie beginnt ebenfalls beim Referenzpunkt und verläuft durch das primäre Objekt. Es muss der Winkel zwischen den beiden Halbgeraden bestimmt werden. Anhand dieses Winkels kann die Richtungsrelation ermittelt werden.

Zur Realisierung der neutralen Zone wird vor der Richtungsbestimmung die Entfernung der beiden Objekte zueinander bestimmt. Mit Hilfe der Entfernungsbestimmung wird der direkte Nahbereich ermittelt[3]. Liegt das primäre Objekt in diesem Bereich, wird keine Richtung bestimmt, sondern angegeben, dass die Objekte sich in unmittelbarer Nähe zueinander befinden.

Die Prüfung, ob die Objekte zueinander in unmittelbarer Nähe liegen, wird nur hier geprüft, da die Bestimmung jeder anderen Richtungsrelation letztlich auf die Relation zwischen zwei Punkten aufbauen wird.

Referenzobjekt: Punkt, primäres Objekt: Linie

Von der Linie müssen die Grenzpunkte bestimmt werden. Von beiden Grenzpunkten werden die Richtungen zum primären Objekt bestimmt. Sind sie gleich, so wird davon ausgegangen, dass auch das Gesamtobjekt in dieser Richtung liegt. Bei "geraden Linien"[4] ist dies auch definitiv der Fall, Ausnahmen können Linien mit einer in der Realität eher selten vorhanden Form sein. Sind die beiden Richtungen unterschiedlich, so wird die Richtungsrelation von der Linie zum Punkt bestimmt, diese ist eindeutig. Die davon inverse Relation ist nun die endgültige Richtungsrelation.

[3]Es handelt sich dabei um den "sehr nah"-Bereich des Entfernungsalgorithmus. Später dazu mehr.

[4]Damit sind z.B. Strecken und Geraden wie sie aus der Mathematik bekannt sind gemeint.

Referenzobjekt: Punkt, primäres Objekt: Fläche

Der Vergleich von Fläche und Punkt wird vereinfacht auf den Vergleich von Strecke und Punkt reduziert. Dazu werden die Entfernungen von den Eckpunkten der Fläche zum Punkt berechnet und die beiden Punkte, die dem Punkt am nächsten sind als Grenzpunkte der Strecke betrachtet. In den meisten Fällen führt dies zu einer richtigen Relationsbestimmung. Bei Objekten mit konkaven Formen oder einer unglücklichen Anordnung der Objekte, kann die letztlich ermittelte Richtungsrelation ungenau sein. Bei Objekten mit unregelmäßigen Formen, wie z.B. einem Polygon mit 13 Eckpunkten, ausgedehnten Objekten ohne Eckpunkte (Ellypsen), sollte eine sogenannte "bounding box" um das Objekt gelegt werden und die Richtung der "bounding box" zum Punkt ermittelt werden.

Referenzobjekt: Linie, primäres Objekt: Punkt

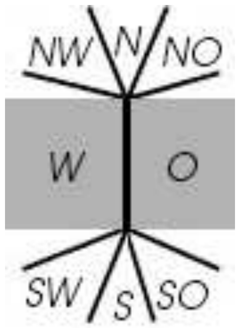


Abbildung 4.5: Richtungsbestimmung mit einem eindimensionalen Referenzobjekt.

Liegt ein eindimensionales Referenzobjekt vor, so teilen wir es in die beiden Grenzpunkte, sowie den Innenbereich auf. Um nun die Richtungsrelation zu ermitteln, muss zuerst ermittel werden, ob der Punkt des primären Objekts, dessen Richutng ermittelt werden soll, "auf Höhe" des Innenbereiches der Linie liegt, oder nicht. "Auf Höhe" des Innenbereiches liegt er, wenn er zwischen den beiden Geraden liegt, die orthogonal zur Ausgangslinie und durch die beiden Grenzpunkte verlaufen (Z.B. in Abbildung 4.5 im grauen Bereich). Wenn er da nicht liegt, muss bestimmt werden, zu welchem Grenzpunkt die Entfernung des Punktes die Kürzeste ist. Zwischen diesem Grenzpunkt und dem Ausgangspunkt kann dann in bekannter Weise die

Richtung bestimmt werden. Liegt der Punkt aber “auf Höhe” des Innenbereiches, so wird der Punkt der Gerade bestimmt, der dem Ausgangspunkt am nächsten ist. In diesem Fall, wird eine Gerade bestimmt, die orthogonal zur Ausgangsgeraden verläuft und durch den Ausgangspunkt geht. Der Schnitt der beiden Linien ist der gesuchte Punkt. Die Richtungsbestimmung wird wieder durch den Vergleich dieses Punktes und des Ausgangspunktes erfolgen.

Referenzobjekt: Linie, primäres Objekt: Linie

Zuerst werden die Grenzpunkte des primären Objekts und jeweils ihre Richtung zur Referenzlinie bestimmt. Sind beide Richtungsrelationen gleich, so ist dies auch die endgültige Richtung. Im anderen Fall wird das Referenzobjekt zum primären Objekt und umgekehrt. Ergibt sich auch hier keine eindeutige Lösung so wird der Mittelpunkt des (ursprünglichen) primären Objekts bestimmt und die Richtungsrelation als die Endgültige angenommen, die zwischen diesem Mittelpunkt und dem Referenzobjekt vorliegt.

Referenzobjekt: Linie, primäres Objekt: Fläche

Von der Fläche bzw. ihrer “bounding box” werden die beiden Eckpunkte, die dem Mittelpunkt der Linie an nächsten sind, ermittelt und als Grenzpunkte eine Strecke betrachtet, die zwischen beiden verläuft. Nun kann die Richtungsrelation zwischen ihr und der Referenzlinie ermittelt werden.

Referenzobjekt: Fläche, primäres Objekt: Punkt

Hier wird der Abstand vom Punkt zu den Eckpunkten berechnet und die drei dichtesten Punkte ermittelt. Da der Punkt aber je nach Form “auf Höhe” der Linie zwischen den beiden nächsten Punkten liegen kann oder zwischen dem nächsten und dem drittnächsten, wird dies geprüft und die Relation der Strecke zwischen den beiden gefundenen Punkten und dem Ausgangspunkt bestimmt. Liegt der Punkt nicht “auf Höhe” von einer der beiden Strecken, so wird die Richtung vom Punkt zum nächsten Eckpunkt der Fläche bestimmt.

Referenzobjekt: Fläche, primäres Objekt: Linie

Diese Richtungsrelationsbestimmung verläuft analog zu der, bei der das Referenzobjekt eine Linie und das primäre Objekt eine Fläche ist. Gesucht werden die beiden Punkte der Fläche, die dem Mittelpunkt der Linie am nächsten sind. Sie bilden eine neue Linie. Nun kann die Richtung zwischen der neuen und der Ausgangslinie bestimmt werden.

Referenzobjekt: Fläche, primäres Objekt: Fläche

Um die Richtung zwischen zwei Flächen zu ermitteln muss zuerst der Mittelpunkt des Referenzobjekts bestimmt werden (vgl. Abb. 4.6 b)). Zu diesem Mittelpunkt werden die jeweiligen Entfernungen der Eckpunkte des primären Objekts bestimmt und die beiden Eckpunkte bestimmt, deren Entfernung zum ermittelten Mittelpunkt des Referenzobjekts am geringsten ist (vgl. Abb. 4.6 d)). Diese Punkte und die Strecke zwischen ihnen bilden eine Linie (vgl. Abb. 4.6 e)). Nun kann auf bekannte Weise die Richtungsrelation zwischen dieser Linie und dem Referenzobjekt ermittelt werden.

Vor- und Nachteile des Algorithmus

Im Großen und Ganzen arbeitet der Algorithmus korrekt. Richtungen zwischen zwei Objekten werden – sofern es sich nicht um zwei zweidimensionale Objekte handelt – richtig erkannt. Leider ergibt sich ein Problem, wenn zwei zweidimensionale Objekte in einer bestimmten Konstellation beieinander liegen:

Hier sollten die zwei Kanten des Objekts bestimmt werden, die dem anderen Objekt am ehesten zugewandt sind. Da dies dadurch erfolgt, dass die beiden Eckpunkte ermittelt werden, die dem Mittelpunkt des anderen Objekts am nähesten sind, kann auch eine falsche Kante ermittelt werden (s. Abb. 4.7, S. 99). Daraus kann sich eine falsche bzw. ungenaue Richtungsrelation ergeben.

4.4 Entfernung

Wie schon in den vorherigen Kapiteln erwähnt, liegen in diesem Bereich – im Gegensatz zu Topologie und Richtung – anscheinend keine konkreten Möglichkeiten vor, wie zur Ermittlung von qualitativen Entfernungsrelationen zwischen zwei Objekten vorgegangen werden kann: Ein konkretes Verfahren konnte in der wissenschaftlichen Literatur nicht gefunden werden. Da in den gefundenen Artikeln auch kein Hinweis auf ein solches bereits existierendes Verfahren zu finden ist und sogar Aussagen darüber gefunden werden konnten, dass der Bereich der qualitativen Entfernungen nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen aufweist, ist anzunehmen, dass es ein gesuchtes Verfahren (noch) nicht gibt. Ob es so etwas jemals geben wird und ob es überhaupt möglich ist ein konkretes Verfahren zu ermitteln oder gar zu implementieren, bleibt zu bezweifeln.

Die wissenschaftliche Literatur nennt einige Faktoren, die uns bei der Interpretation von Entfernungsrelationen in gewisser Weise beeinflussen. Leider wurden diese Faktoren nur erwähnt und nicht oder nur sehr wenig untersucht. Somit ist nicht klar ob, und wenn überhaupt wie stark die Faktoren Einfluss haben haben.

Ein weiterer Faktor, den ich nicht finden konnte, der aber in der Realität sicherlich sehr wichtig ist, ist der Einfluß der Höhe eines Objekts. Allerdings kann dies in unserer zweidimensionalen Darstellung keine Rolle spielen.

Viele verschiedene Ansätze und einige Faktoren, die bisher noch nicht oder nur sehr wenig untersucht wurden, ergeben ein äußerst komplexes Feld, dass der Ermittlung von qualitativen Entfernungsrelationen zwischen zwei Objekten zu Grunde liegt. Von diesen Ansätzen weisen einige kleinere Fehler auf, andere sind nur in bestimmten und nur selten vorkommenden Situationen anwendbar, andere schließen sich gegenseitig zumindest teilweise aus. Allerdings gibt es auch einige Verfahren, die gut als Grundlagen für die gesuchte Relationsermittlung dienen können und miteinander kombinierbar sind.

Im Folgenden werden nun zuerst die aufgeführten Verfahren bewertet. Daran wird anschließend ermittelt, was wie in einem endgültigen Algorithmus zusammengefasst werden kann. Zum Schluss wird dann der Algorithmus selbst kurz erläutert. Dabei muss von Anfang an erwähnt werden, dass diese Diplomarbeit natürlich keinen komplexen allumfassenden Algorithmus für ein in der Wissenschaft nicht sehr umfangreich erforschtes Problem liefern kann. Vielmehr soll ein erster nachvollziehbarer Algorithmus vorgestellt werden, der einige bekannte Faktoren und Verfahren beinhaltet, auf den dann weiter aufgebaut werden kann.

4.4.1 Die existierenden Ansätze

Franks Entfernungssystem

Frank beschreibt ein System, das aus zwei gegebenen eine qualitative Entfernungsrelation ableitet (vgl. [Fra92], s. Kap. 3.3.6 auf S. 63). Dazu wird eine Richtungsaddition eingeführt und die resultierenden Ergebnisse durch eine geometrische Interpretation nachgewiesen.

Manche Ergebnisse dieser Richtungsaddition können aber mit Logik angezweifelt werden: So kann es passieren, dass wenn man zwei qualitative Entfernungsangaben aus der dem Referenzobjekt nächsten Region addiert, nicht eine Entfernungsangabe aus dieser Region erhält, sondern eine Entfernung bekommt, die dem nächst gelegenen Akzeptanzbereich zugeordnet werden kann. Allein dieses Beispiel zeigt, dass es falsch zu sein scheint, dass die qualitative Entfernungsangabe des dem Referenzobjekt nächsten Akzeptanzbereich, als neutrales Element der Richtungsaddition benutzt werden kann.

Des Weiteren gibt es zwei sehr große Mankos: Zum Einen müssen bei diesem System schon vorher (mindestens zwei) Angaben über Entfernungen vorhanden sein müssen, damit es angewandt werden kann. Zum Anderen müssen die Entfernungsrelationsstrecken, die weiter verarbeitet werden sollen, alle in die gleiche Richtung verlaufen.

Mavrovouniotis Größenvergleiche

Auch bei Mavrovouniotis (vgl. [MS90], s. Kap. 3.3.7 auf S. 67) wird zu Beginn ein vorgegebener Wert benötigt. Wird dieser entsprechend gewählt, so ist es dank der 21 Vergleichsrelationen sogar möglich die qualiativen Entfernungsrelationen ziemlich genau anzugeben.

Delta Kalkül

Das wesentlich formalere Delta Kalkül (vgl. [Zim95], s. Kap. 3.3.8 auf S. 68) ist dem eher allgemein gefassten Größenvergleich von Mavrovouniotis sehr ähnlich. Allerdings ist es hier möglich den qualitativen Vergleich genauer zu erstellen. Während Mavrovouniotis nur zwei Strecken qualitativ miteinander vergleichen kann, bietet das Delta-Kalkül die Möglichkeit, eine dritte Strecke miteinzubinden, die den qualitativen Unterschied zwischen den beiden Strecken angibt.

Der Nachteil ist hier, wie bei den beiden anderen Ansätzen, dass es ohne Vorgabe einer Entfernung nicht möglich ist eine Entfernungsbestimmung durchzuführen.

4.4.2 Grundlagen des Algorithmus

Als psychologischer Raum wird der “`Environmental space`” genommen, da alle Objekte eine gebäudeähnliche Größe aufweisen und die gegebene Karte ein Ausschnitt einer Stadt ist.

Grundsätzlich ist es keinem Menschen möglich ohne jegliches Vorwissen eine Entfernungsbestimmung durchzuführen. Oft unbewusst wird die neu zu bestimmende Strecke mit einer vorher bekannten Entfernung verglichen, die in einem ähnlichen Größenverhältnis steht. Da Entfernungen von Menschen qualitativ zumindest immer als ähnlich ermittelt werden, wird die Größe des dem Referenzobjekt am nächsten liegenden Bereich vorgegeben.

Als nächstes muss überlegt werden in welche und in wie viele Akzeptanzbereiche unterschieden werden soll. Wir werden in vier Bereiche unterteilen, da es mir sinnvoll zu sein scheint, in Nah- und Fernbereich zu unterteilen und dort wiederum die Möglichkeit zu haben erneut zu unterteilen. Die Unterteilung noch weiter aufzugliedern erscheint nicht sinnvoll, da eine Unterscheidung der einzelnen Bereiche ohne weitere Hilfsmittel dann nur schwer handhabbar sein würde. Einen Medium- oder Mittelbereich einzuführen unterlassen wir, da ich es bisher nur selten erlebt habe, dass Menschen eine Entfernung als “mittel-weit” oder “nicht mehr nah, aber auch noch nicht fern” oder ähnlich angegeben haben. Somit werden wir in die Bereiche **`sehr nah`**, **`nah`**, **`fern`** und **`sehr fern`** unterscheiden (D_4 = N, n, f, F).

Diese vier Entfernungsrelationen müssen nun einem Entfernungssystem (s. Kap. 3.3.5, S.61) zugeordnet werden. Aus Plausibilitätsgründen gehen wir von einem monotonen Entfernungsbereichssystem aus, dessen Bereiche größer werden, je weiter der Bereich vom Referenzobjekt entfernt ist. Diese Plausibilität stützt sich auf Clementinis Aussage, dass der Mensch desto gröber unterscheidet, je weiter etwas von ihm entfernt gelegen ist (vgl. [CFH97]). Für den Algorithmus setzen wir voraus, dass die Unterscheidung in die Bereich sich so sehr vergröbert, dass die Breite eines Bereichs wesentlich größer ist, als der seiner Vorgängers, der näher am Referenzobjekt liegt. Einen Faktor, um wie viel sich dieser Bereich vergrößert, festzulegen ist sehr schwierig, da dieser auf Grund verschiedener Faktoren (z.B. Bebauungsdichte) variieren kann. Für einen funktionierenden Algorithmus sollte man sich aber auf einen festen Faktor einigen.

Somit vereinen wir drei von Clementinis Entfernungsbereichssystemen: Die Länge der Intervalle steigt monoton (Monotonie), es liegt eine Bereichseinengung vor, ein Bereich ist also größer als alle seine Vorgänger zusammen (startend beim Referenzobjekt) und es liegt die "Ordnung nach Größe" vor, ein Bereich ist also viel größer als seine Vorgänger zusammen. Somit ist auch klar, dass wir das Prinzip der isotropischen Flächen zu Grunde legen. Folglich können bestimmte Einflussfaktoren auf die Entfernungswahrnehmung, wie Dauer und Kosten um eine Strecke zurückzulegen, nicht integriert werden.

Die Größe bzw. die Breite des Akzeptanzbereichs des "sehr nah"-Bereichs ist zwar festgelegt, variiert aber je nach Objektdimension. Ein nulldimensionales Objekt hat einen kleineren "sehr nah"-Bereich als ein zweidimensionales Objekt. In dem Algorithmus wird davon ausgegangen, dass null- und eindimensionale Objekte als Referenzobjekte dabei einen gleich großen "sehr nah"-Akzeptanzbereich haben, da bei den eindimensionalen Objekten meistens an einen bestimmten Punkt dieses Objektes gedacht wird. Dieser Punkt ist der nächste Punkt zum primären Objekt[5]. Dabei spielt es keine Rolle, ob das Objekt nun zwei oder 2000 Kilometer lang ist. Entscheidend ist die Breite dieses auf der Karte eindimensional dargestellten Objekts. Da aber die Breite von eindimensionalen Objekten hier auf Grund der Darstellung der Karte keine Rolle spielt, wird dieser Punkt nicht weiter beachtet. Bezogen auf unsere Karte sollte der "sehr nah"-Bereich bei null- und eindimensionalen Objekten auf einen bestimmten Wert festgelegt werden. Bei zweidimensionalen Objekten hingegen, kann der Aspekt der Länge nicht übergangen werden. Hier spielt die Gesamtausbreitung des Objekts eine wichtige Rolle. Je größer ein Objekt im Vergleich zu einen anderen wirkt, desto kleiner wirkt die Entfernung zu einen anderen Objekt, auch wenn sie metrisch gleich ist. Somit ist die maximale Entfernung vom Referenzobjekt, um in den "sehr nah"-Bereich zu fallen, eines zweidimensionalen Objekts größer als die eines nulldimensionalen Objekts. Da diese aber auch dann variiert, wenn Objekte verschiedene Ausmaße haben, wird der Flächeninhalt des Objekt berücksichtigt und in den Algorithmus integriert. Leider konnte in der Literatur nur gefunden werden, dass die Größe eines Objekts die Entfernungswahrnehmung beeinflusst, aber nicht wodurch dies so ist und wie stark es sich auswirkt. Für einen Algorithmus muss dies allerdings in einer gewissen Art und Weise festgelegt werden.

[5]So kann man sich direkt neben einem Fluss befinden; die Aussage, dass man vom Fluss sehr weit entfernt ist, ist zwar richtig, wenn man sich auf einen Punkt des Flusses, der einige Kilometer entfernt ist, bezieht, wird aber in diesem Kontext als falsch angesehen.

4.4.3 Der Algorithmus

Im Folgenden soll nun beschrieben werden, wie ein Algorithmus arbeiten kann, um qualitative Relationen zwischen zwei Objekten zu bestimmen. Wir beschränken uns dabei auf Objekte im Bereich des "`Environmental space`" (vgl. Kap. 3.3.2, S. 57). Dabei werden einige Apekte beachtet:

Als erstes muss überprüft werden, ob die beiden Objekte zwischen denen die Entfernung ermittelt werden soll, disjunkt sind. Sind sie es nicht, so ist eine Entfernungsbestimmung unnötig. Anschließend folgt die Überprüfung von welcher Dimension das Referenzobjekt ist. Liegt ein zweidimensionales Referenzobjekt vor, dann wird nicht der definierte Wert für die maximale Ausbreitung des "sehr nah"-Bereichs für null- und eindimensionale Objekte genommen, sondern der Wert mit Hilfe der oben genannten Formel berechnet. Danach wird die Dimension des primären Objekts ermittelt und beide Objekte miteinander verglichen, um die Entfernung zu ermitteln.

Dabei wird analog zur Richtungsbestimmung jede Entfernungsbestimmung auf die Bestimmung der Entfernung zwischen zwei Punkten abgeleitet. Dabei werden, da keine weiterführenden Informationen über die Objekte vorhanden sind (wie Vorderseite oder Eingangsbereich), die beiden Punkte der Objekte ermittelt, die dem jeweils anderen Objekt am nächsten sind.

Um die qualitative Entfernung zu bestimmen, wird die metrische Entfernung zwischen den beiden Punkten bestimmt und verglichen, in welchem Intervall der Entfernungsrelationen sie sich befindet. Es kommen vier Bereiche in Frage, wobei die Bereiche, je weiter sie vom Referenzpunkt des Referenzobjekt entfernt sind im Vergleich zum Vorgänger viermal so groß sind – unabhängig von der Größe des "sehr nah"-Bereichs bzw. der Dimension des Referenzobjekts. Der Faktor 4 wird hier beispielhaft benutzt, da er mir persönlich nachvollziehbare Ergebnisse lieferte. Da es keine tieferen Untersuchungen zu diesem Wert gibt, kommen auch andere Werte in Frage.

Vor- und Nachteile des Algorithmus

Unter den drei Algorithmen, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, ist dies derjenige mit dem geringsten Aufwand. Außerdem ergibt sich hier kein Problem, dass die Richtigkeit des Algorithmus anzweifeln lässt, sofern nur die zugrunde gelegten Faktoren betrachtet werden. Dadurch, dass einige der Faktoren, die die Entfernungswahrnehmung und -bestimmung beeinflussen, können einige Entfernungsrelationen allerdings realitätsfern wirken. Bei eindimensionalen Objekten ist die Entfernungsrelationsbestimmung von der Art des Objektes abhängig. Bei Flüssen wird z.B. der nahste Punkt benötigt, während bei Straßen der nächst erreichbare Punkt gesucht wird. Die leistet der Algorithmus leider nicht.

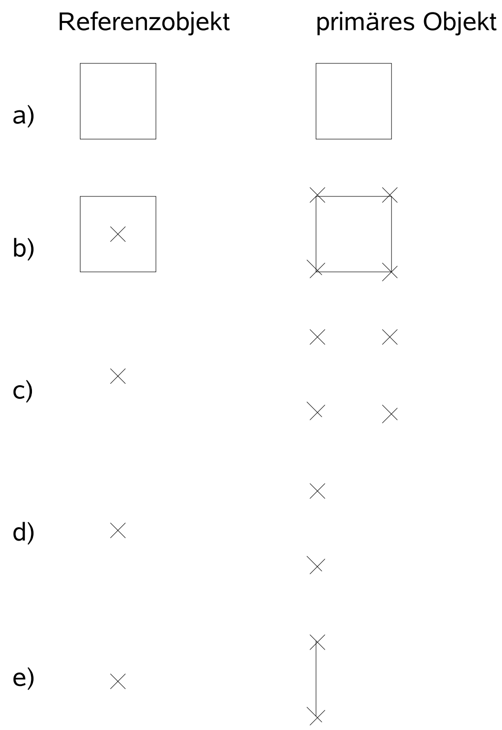


Abbildung 4.6: Schritte bei der Richtungsbestimmung bei zwei zweidimensionalen Objekten.

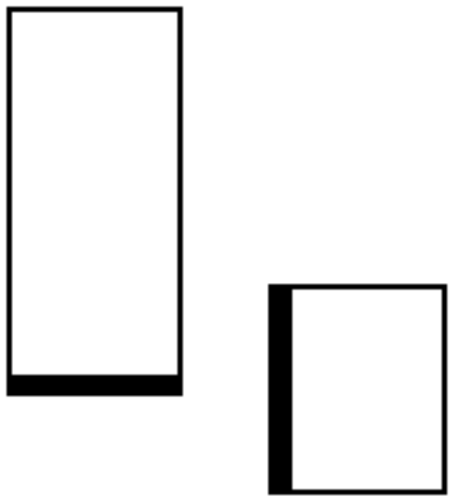


Abbildung 4.7: Objektanordnung, die zu einer falschen Relationsermittlung führen kann.

Kapitel 5

Das praktische System

5.1 Beschreibung des allgemeinen Programmablaufs aus Benutzersicht

Nach dem Starten des Programms muss der Benutzer zwischen den drei Relationsarten Topologie, Richtung und Entfernung wählen. Nach dieser Wahl erscheint eine Karte, auf der nun die räumlich-geografischen Relationen der ausgewählten Art ermittelt werden können.

Abbildung 5.1: Auswahlmenü der Relationsarten

Die Karte, die nun geöffnet wurde, zeigt einen Kartenausschnitt. Er beinhaltet eine Menge verschiedener Objekte aller drei Dimensionen, die so angeordnet sind, dass sie den Grundriss eines Stadtteils darstellen. Dabei entspricht ein Pixel ca. 25 cm in der “Realität”. Die Karte soll beispielhaft zeigen, dass das System in der Lage ist, die beschriebenen qualitativen räumlich-geografischen Relationen zu erkennen. Es handelt sich dabei um ein festes Szenario: Die Objekte sind nur anklickbar, aber weder verschieb-, noch löschbar.

Fährt man nun mit dem Mauszeiger über ein Objekt, so erscheint der dazugehörige Name und das Objekt kann angeklickt werden. Nachdem man dann zwei Objekte per Mausklick ausgewählt hat, erscheint ein Pop-Up-Fenster, das einen Satz widergibt, wie die angeklickten Objekte in der gewählten Art und Weise zueinander stehen.

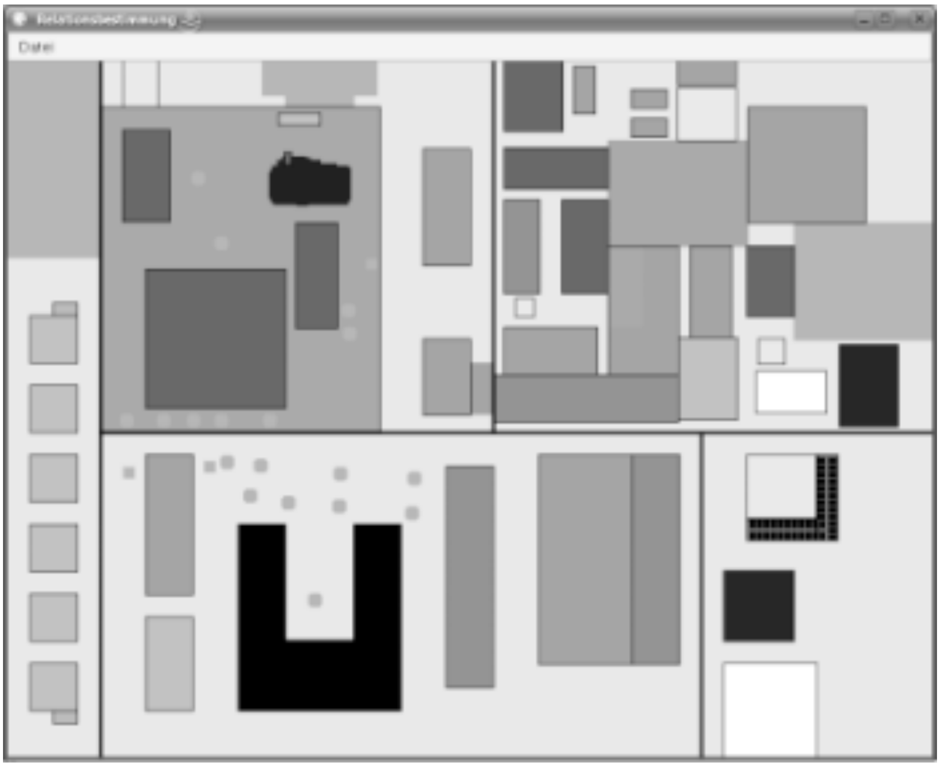


Abbildung 5.2: Die Karte

Möchte man eine andere Relationsart benutzen, dann wählt man in der Menüleiste den Punkt “Relationsart - Neu”. Nun muss man ich erneut – wie schon zu Programmbeginn – zwischen den drei Relationsarten entscheiden. Wenn das Programm beendet werden soll, kann dies entweder durch dass Kreuz am oberen rechten Rand geschehen oder durch den Menüpunkt “Datei

- Beenden" erfolgen.

5.2 Technische Beschreibung des Programms

Das praktische Programm wurde in JAVA geschrieben. Ein paar der folgenden Ideen entnahm ich dabei [Fis01]. Zur weiteren praktischen Realisierung wurden verschiedene Packages importiert[1]

Zur grafischen Darstellung wurde als Grundlage ein "`JFrame`"[2] genutzt, auf dem verschiedene "`JPanels`"[3] angeordnet wurden. Dabei gibt es ein Grundpanel, das als Hintergrund für die Karte fungiert und mehrere kleine Panel, die die Objekte auf der Karte darstellen. Über dem Grundpanel ist eine "`MenuBar`" zu finden, die die einzelnen Menüpunkte enthält. Sowohl zu diesen Einträgen als auch zu den meisten der kleinen Panel werden sogenannte "`ActionListener`" zugeordnet. Wird eine Aktion bei/an/über einem Panel mit "`ActionListener`" ausgelöst (Z.B.: Maus bewegt sich über dem Panel), so wird ein sogenanntes "`event`"(Ereignis) ausgelöst, auf das reagiert werden kann. In diesem Fall wird nur das Anklicken eines Panels eine Reaktion des Programms bewirken.

5.2.1 Programm vor der eigentlichen Relationsbestimmung

Zum Start des Programms werden in der Klasse RelationsBestimmung eine "`JList`"[4] mit den Einträgen "Topologie", "Richtung" und "Entfernung" und einem "`JButton`"[5] zur Bestätigung der Auswahl erstellt. Dem Bestätigungsbutton wird dazu ein "`ActionListener`" zugeordnet. Wenn auf den Button geklickt wird, wird – sofern ein Menüpunkt ausgewählt wurde – ein "`event`", das von dem aus der Liste ausgewählten Punkt bestimmt ist, ausgelöst, welches daraufhin ausgewertet wird. Für den Benutzer ist sichtbar, dass das Auswahlfenster geschlossen und die grafische Oberfläche sichtbar wird.

[1] Dies sind vorrangig `java.awt`, `java.swing` und `java.awt.event`.

[2] Frame aus dem `swing`-Paket von Java.
Ein Frame ist ein rechteckiges Fenster mit Titelleiste und Schaltflächen (Schließen, Minimieren) mit einer Grundfläche zur Einbettung von Komponenten

[3] Panel aus dem `swing`-Paket von Java.
Ein Panel ist eine wichtige Komponente zur Darstellen und Verarbeiten von Information. Es kann als Zeichenfläche zur Darstellung von Grafik genutzt werden und weitere Bedienelemente enthalten.

[4] Liste aus dem `swing`-Paket von Java.
Eine JList stellt Textinformationen zeilenweise dar, die weiterverarbeitet werden können.

[5] Button/Knopf zum Anklicken aus dem `swing`-Paket von Java.

Programmiertechnisch wird dabei eine neue Instanz des MouseEventFrame erzeugt und ein integer-Wert als Parameter übergeben. Der Wert richtet sich dabei nach der ausgesuchten Relationsart. In der Klasse `MouseEventFrame` erfolgen verschiedene Dinge: Zum Einen wird eine "`MenuBar`" implementiert, bei der alle Menüpunkte einem "`ActionListener`" zugeordnet werden. Des weiteren wird der zentrale Panel hinzugefügt. Auf ihm werden später die einzelnen Objekte angeordnet. Zusätzlich wird eine Instanz der Klasse `MouseEvertPanel` erstellt.

In der aufgerufenen Klasse werden die einzelnen Informationen über die Objekte definiert. Die Größe und Form der Objekte wird dadurch festgelegt, dass die Koordinaten eines "Startpunktes" und die Breite und Höhe des Objekts angegeben werden. Die Koordinaten des "Startpunktes" geben dabei den kleinsten x- und den kleinsten y-Wert des Objekts an, die Breite ist die Ausdehnung in die positive x-Richtung (parallel zur x-Achse), die Höhe ist die Ausdehnung in die positive y-Richtung (parallel zur y-Achse). Eindimensionale Objekte haben dabei entweder eine Höhe oder eine Breite vom Wert 1. Nulldimensionale Objekte haben sowohl eine Höhe als auch eine Breite vom Wert 10, damit sie von der Maus einfacher anklickbar sind. Die Objekte werden dann initiiert, wobei es die drei verschiedenen Arten "Haus", "Linie" und "Punkt" gibt. Jede Objektart hat ihre festgelegte Grundfarbe, die aber durch Parameterangabe variieren kann. Mit der Methode `setBounds` werden anschließend die Grenzen des Objekts definiert. Die Objekte werden dann der Karte hinzugefügt. Mit der Methode `setToolTipText` erhält jedes Objekt einen sogenannten "`Tooltiptext`"[6], der auf der Karte den Namen des Objekts widergibt. Die Objekte, die anklickbar sein sollen, erhalten einen `MouseListener`. Je nach ausgewählter Relationsart bekommt die Methode `addMouseEventListener` eine Instanz der Klasse `ObjektBeeinflusser` (bei Topologie), `Rich` (bei Richtung) oder `Ent` (bei Entfernung) als Parameter übergeben. Wird nun ein Objekt mit einem `MouseListener` angeklickt, so reagiert das Programm in der Art und Weise, wie es die Klasse des Parameters vorsieht.

Zur grafischen Untermalung der Objekte werden die sonst einfarbigen Objekte durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben. Nulldimensionale Objekte sollen durch einen Kreis dargestellt werden. Deshalb wird ein gefüllter Kreis, der das Objekt beinhaltet, um den Mittelpunkt gelegt.

[6]Ein Tooltiptext erscheint umrandet auf der Höhe des Mauszeigers, wenn der Mauszeiger über dem Panel liegt, dem der Tooltiptext zugeordnet ist.

5.2.2 Ermittlung der topologischen Relationen

Es gibt viele `MouseEvents`, die berücksichtigt werden können. Interessant ist es für uns aber nur, wenn ein Objekt angeklickt wird. Das Anklicken löst ein `event` aus. Mit Hilfe der `event`-Nachricht kann jetzt erkannt werden, welches unserer vielen Objekten angeklickt wurde. Dem erkannten Objekt wird nun eine feste ID, ein Name und eine Art (null-, ein- oder zweidimensional?) zugeordnet. Die ID wird in ein zweielementiges Array eingetragen. Name und Art werden in ein vierelementiges Array eingetragen. Wenn nun zwei Objekte angeklickt wurden, sind beide Arrays gefüllt und die Ermittlung der topologischen Relation beginnt.

Ergibt die Prüfung der beiden IDs, dass es sich um das selbe Objekt handelt, so wird dies direkt ohne weitere Berechungen ausgegeben. Ansonsten werden die Objekte (sofern möglich) in ihre Einzelkanten unterteilt und die dazugehörigen y-Achsenabschnitte und Steigungen ermittelt. Basierend auf Fallunterscheidungen (Dimensionen der Objekte) werden nun Schnitte und Überlappungen[7] ermittelt und zusammenaddiert. Hierauf basiend arbeitet der Algorithmus wie in Anhang A auf Seite 133 beschrieben. Die erkannte Relation wird dann durch einen integer-Wert symbolisiert. Mit Hilfe dieses Wertes und des Arrays, das die Namen beinhaltet, wird dann über einen `MessageDialog` (vgl. Abb. 5.3) ausgegeben, wie die zwei angeklickten Objekte sich topologisch zueinander verhalten.

Abbildung 5.3: Ein MessageDialog

[7]Überlappungen sind in disem Fall Situatiouen, in deren zwischen zwei Strecken mehr als ein Schnittpunkt zu Stande kommt. Es liegt also die gleiche Steigung und – wenn die Strecke als Gerade betrachtet werden würde – der gleiche Schnittpunkt mit der y-Achse (bzw. beide verlaufen parallel zur y-Achse) vor.

5.2.3 Ermittlung der Richtungsrelationen

Analog zur Topologie gibt es wieder zwei Arrays und die Abprüfung, ob zweimal das gleiche Objekt angeklickt wurde. Danach wird geprüft, ob sich beide Objekte in unmittelbarer Entfernung befinden. Dies geschieht, indem bestimmt wird, ob das primäre Objekt im "sehr nah"-Bereich des Referenzobjekts liegt. Falls dem so ist, wird ein `MessageDialog` mit einem Satz, der aussagt, dass die beiden Objekte "zu nah" beieinander liegen, angezeigt. Ansonsten läuft das Programm weiter. Es beginnt eine Fallunterscheidung, die sich auf die Dimensionen der Objekte bezieht. Im Gegensatz zur Topologie muss hier zwischen dem Referenz- und dem primären Objekt unterschieden werden, da Richtungsrelationen nicht reflexiv sind. Die genaue Ermittlung der Richtungen sind in Kap. 4.3.5 ab Seite 87 beschrieben. Jeder möglichen Relation wird ein integer-Wert zugewiesen, der einer bestimmten Richtungsrelation zugeordnet ist. Wie bei den topologischen Relationen wird diesem Wert und den Namen der Objekte ein `MessageDialog` eingeblendet, der einen Satz beinhaltet, der angibt in welcher Richtung das primäre Objekt, vom Referenzobjekt aus gesehen, liegt.

5.2.4 Ermittlung der Entfernungsrelation

Auch hier gibt es die beiden Arrays und die Prüfung, ob zweimal das gleiche Objekt angeklickt wurde. Der Rest des Programms kann technisch nicht detaillierter erläutert werden, als der eigentlich zugehörige Algorithmus im Kap. 4.4.2 ab Seite 94. Ist die qualitative Entfernungsrelation bestimmt, so verläuft die Ergebnisausgabe wie bei den beiden anderen Relationsarten: In einem `MessageDialog` wird unter Benutzung der Arrays und des der Relation zugeordneten integer-Werts ein aussagekräftiger Satz ausgegeben.

Als wichtige Vorüberlegung muss zuvor noch ein Faktor festgelegt werden, um den sich die Entfernungsbereichsdurchmesser vergrößern, je weiter das primäre Objekt vom Referenzobjekt entfernt ist. In diesem Programm wird der Faktor auf den Wert 4 gesetzt. Dieser Wert hat leider keinen wissenschaftlichen Hintergrund: Bei der Anwendung auf verschiedene Beispiel erschien mir dieser Wert als am realistischten.

Gleiches gilt für den "sehr nah"-Bereich. Auch hier konnten keine ungefähren Werte gefunden werden, was Menschen im "`Enviromental Space`" als "sehr nah" empfinden. So wird als "sehr nah"-Bereich befindlich in unserem Programm alles bezeichnet, das 15 Meter oder weniger vom Referenzobjekt entfernt ist.

Zudem muss die Auswirkung der Größe eines Objekts integriert werden. Da keine Aussagen in der Wissenschaft gefunden werden konnten, muss auch hier eine Eigenkonstruktion weiterhelfen: Die Breite des "sehr nah"-Akzeptanzbereichs berechnen wir wie folgt:

$$\text{Max. Breite}_{2D} = \sqrt{area_{2D}} * 30$$

Diese Formel lieferte plausibele Ergebnisse bei Beispielen. Sie kann universell bei jeder Form des Objekts angewandt werden. Andere Formeln, die z.B. den Schnitt der maximale Breite und Länge des Objekts berechneten, lieferten vor allen Dingen bei langgezogenen Objekten falsch wirkende Werte. Dies wird hier durch Ziehen der Quadratwurzel vermieden.

Kapitel 6

Abschluss

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblich darüber verschaffen, was in dieser Arbeit erreicht wurde: Konnten die Fragen komplett und zufriedenstellend beantwortet werden? Welche Aspekte konnten nicht erreicht oder realisiert werden und warum? Außerdem werden mögliche Verbesserungen und Erweiterungen aufgeführt die aus verschiedenen Gründen (z.B. Komplexität, keine Literatur) nicht vorgenommen werden konnten.

6.1 Was wurde erreicht?

Grundsätzlich ist festzustellen, dass alle gesteckten Ziele im Großen und Ganzen erreicht wurden und alle (Teil-)Fragen beantwortet werden konnten. Im Detail ist folgendes zu sagen:

Die geometrische Interpretation der sprachlichen Ausdrücke konnte vollzogen werden. Bei den topologischen Relationen war dies problemlos in der wissenschaftlichen Literatur zu finden. (Himmels-)Richtungsrelationen können mit Hilfe von Akzeptanzbereichen ermittelt werden, die sich durch Unterteilung des umgebenden Raumes des Referenzobjekts durch Winkel ergeben, abzüglich eines Nahbereichs, in dem keine Himmelsrichtungsbestimmung vorgenommen wird. Befindet sich das zu lokalisierende Objekt in einem Akzeptanzbereich, so liegt die dazugehörige Relation vor. Bei der Ermittlung der Entfernungsrelation gibt es ebenfalls diese Akzeptanzbereiche. Sie haben die Form von Kreisringen, die, je weiter sie vom Referenzobjekt entfernt sind, größere Durchmesser haben.

Es wurden ein paar geometrische Eigenschaften herausgefunden, die sich auf die Relationen auswirken: Lage, Größe und Form der Objekte. Topologische Beziehungen sind dabei vor allem von der Lage abhängig, in gewisser

Weise aber auch von der Form und der Größe. Zur Richtungsbestimmung benötigt man in erster Linie auch die Lage beider Objekte. Sie bestimmt auf jeden Fall die grobe Richtung. Form und Größe beeinflussen schließlich die exakte Richtungsangabe. Bei der Entfernungsbestimmung ist die Lage der Objekte nur insofern wichtig, dass die metrische Entfernung zwischen ihnen bestimmt werden kann. Viel wichtiger ist hier die Ausbreitung des Objekts. Dabei ist hier zum Einen die maximale Ausbreitung zum anderen Objekt wichtig und auch der Flächeninhalt der Grundfläche des Referenzobjekts: Je größer dieser ist, desto näher wirken andere Objekte.

Die Erkennung von allen qualitativen räumlich-geografischen Relationen wurde realisiert: Für die Topologie wurde ein Erkennungsalgorithmus entwickelt, zur Richtungserkennung wurden verschiedene Aspekte bereits existierender Verfahren zusammengefasst und bei der Ermittlung der Entfernung wurde aufbauend auf bestehende Modelle und bekannter Faktoren ein Algorithmus, der leider nur mit spekulativen Werten arbeiten kann, erstellt.

Unbefriedigend hingegen verlief die Analyse der Interpretation der Richtungsrelationen bei konkaven Objekten. Da es in der Literatur keine tiefergehenden Untersuchungen bezüglich dieses Themas zu geben scheint, war es für mich allein schwierig, eine akzeptable Lösung zu finden. Die Vorschläge, die ich unterbreite, sind letztlich eine lose Sammlung von Möglichkeiten. Ich bin mir sicher, dass jeder dieser Vorschläge auch einen praktischen Nutzen hat. Allerdings ist nicht klar, in welcher Situation welcher Vorschlag verwendet werden kann. Dazu werden empirische Studien benötigt, die ich in dieser Arbeit leider nicht leisten konnte.

Insgesamt wurden die gesetzen Ziele zu meiner Zufriedenheit erreicht. Es ist aber auf jeden Fall möglich die Verfahren zu verbessern und weiterzuentwickeln.

6.2 Wie könnte das System noch sinnvoll verbessert werden?

Die beschriebenen Algorithmen können auf verschiedene Art und Weise verbessert werden. Es folgt nun eine Auswahl weiterer Möglichkeiten:

- **Variation der Granularität**
  Jedes Mal, wenn die Richtung oder Entfernung zwischen zwei Objekten bestimmt wird, haben wir eine vorher festgelegte Genauigkeit der Relationen benutzt. Für Richtungsrelationen kommen grundsätzlich immer acht verschiedene Möglichkeiten in Frage, bei der Entfernungsbestimmung sind es vier. Nun kommt es bei der Richtungsbestimmung

aber auch vor, dass man z.B. auf Grund der Form des Objekts nur zwei Möglichkeiten zulassen möchte, da der Mensch in solchen Fällen in der Regel nur zwei Himmelsrichtungen benutzt (Z.B. bei langgezogenen Objekten: "Nördlich oder südlich vom Deich"). Gleichzeitig befinden sich auf der Karte aber auch Objekte, bei denen eine Zweiteilung der Region nur bedingt sinnvoll ist. Man kann sich z.B. sowohl nördlich als auch östlich von einem Leuchtturm befinden. Ähnlich ist es bei der Entfernungsbestimmung. Ein möglicher Faktor zur Variation der Granularität ist die Anzahl der betrachteten Objekte. Je mehr Vergleichswerte für die qualitative Entfernungsbestimmung vorliegen, desto genauer können die einzelnen Angaben werden, da es auch mehr Einordnungsmöglichkeiten gibt.

- **Einführung einer Breite für eindimensionale Objekte**
  Alle Objekte, die wir hier als eindimensional bezeichnen, sind auf einer Karte oder ähnlichen Abbildung zweidimensional. Objekte wie Wege, Straßen oder Flüsse haben nicht nur eine Länge, sondern auch eine (an verschiedenen Stellen oft unterschiedliche) Breite. Bei der Bestimmung einer Richtungsrelation ist die Einbeziehung der Breite offensichtlich nicht entscheidend, bei der Bestimmung der Entfernung spielt die Breite allerdings eine wesentlich wichtigere Rolle. Hier würde die Einführung der Breite zu genaueren Ergebnissen führen.

- **Richtung bei konkaven Objekten besser bestimmen**
  Die Richtungsbestimmung bei konkaven Objekten wurde wissenschaftlich anscheinend kaum untersucht. Die Ideen in dieser Arbeit sind Vermutungen, wie in einzelnen Teilbereichen vorgegangen werden könnte. Dies ist aber eher spekulativ als wissenschaftlich begründet.

- **Mehr Informationen über die Objekte integrieren**
  Die Objekte auf unseren Beispielkarten sind nur dadurch beschrieben, dass sie eine Form haben, null-, ein- oder zweidimensional sind, eine Farbe und einen Namen haben. Für genauere Richtungs- und Entfernungsbestimmungen ist es aber nötig auch weitere Eigenschaften der Objekte zu kennen. Markante Punkte am/im Objekt können dabei sehr wichtig sein. In dieser Arbeit sind wir davon ausgegangen, dass Eckpunkte, die Form der Objekte, die Grenzlinien der Objekte und ihre Mittelpunkte (bei Richtungsrelationsbestimmung), sowie die Punkte, die dem anderen betrachteten Objekte am nächsten sind (bei Entfernungsrelationsbestimmung), entscheidend für die Richtung oder Entfernung sind. Es ist klar, dass dies nicht immer richtig ist. So

ist es beispielsweise bei sehr großen Objekten wie z.B. einem großen Schloss nicht wichtig zu wissen, wo sich da nächste Punkt des Schlosses zur Position des Referenzobjekts befindet oder in welcher Richtung der Mittelpunkt des Schlosses liegt. Wichtig ist hier im Regelfall, wo sich der Eingang befindet. Kein potentieller Besucher des Schlosses ist zufrieden, wenn er sich nah am Schloss befindet, der Eingang des Schlosses aber noch weit entfernt ist. Hier könnte sich z.B. der Ansatz von Freksa auszeichnen (vgl. Kap. 3.2.3, S.43).

- **Verbesserung des Entfernungsalgorithmus**
  Wie im Hauptteil schon angeklungen ist, ist der Algorithmus zur Bestimmung qualitativer Entfernungsrelationen nur ein Ansatz und muss, um komplett nachvollziehbare Ergebnisse zu liefern, weiter verbessert werden. Neben der Integration der bereits aufgezählten Faktoren (s. Kap. 3.3.2, S. 58), die nicht beachtet werden konnten, ist es dazu notwendig tiefergehende Untersuchungen anzustellen. Wichtig sind dabei Forschungen zu den anisotropischen Flächen[1], die es bis jetzt kaum gibt: Wie entstehen anisotropische Flächen? Welche Faktoren beeinflussen ihre Form? Generell sind tieferführende Experimente und/oder Studien der psychologischen Literatur notwendig. Dabei gilt es zu ermitteln, welche Faktoren die Entfernungswahrnehmung und -bestimmung des Menschens wirklich beeinflussen und auf welche Weise bzw. wie stark sie dies tun. Wie wichtig ist dabei der nächste Punkt im Vergleich zu markanten Stellen der Objekte?

6.3 Welche Erweiterungen sind noch denkbar?

Neben den Aspekten, die das bisherige System noch direkt verbessern, gibt es auch Faktoren, mit denen das System noch erweitert werden könnte.

- **Einbindung verteilter Objekte und Objekten mit Löchern**
  In diesem System wurden die sogenannten “verteilten Objekte”, wie z.B. Inselgruppen, gar nicht beachtet, da nur zusammenhängende Objekte betrachtet wurden. Dieses Problem ließe sich z.B. durch eine Art “bounding box”, die um alle zugehörigen Objekte gelegt wird umgehen. Ein Problem könnte dabei die Unterscheidung zwischen der Gesamtmenge der verteilten Objekte und einer Teilmenge davon sein. (Sind alle ostfriesischen Insel gemeint, oder nur Wangerooge? Ist mit ostfriesischen Inseln die Gesamtmenge aller dieser Inseln gemeint, oder

[1] Mehr zu isotropischen und anisotropischen Flächen im Kap. 3.3.3, S. 59.

nur eine vorher bestimmte Teilmenge?) Nicht betrachtet wurden außerdem Objekte, die ein Loch beinhalten. Sofern sich das andere Objekt, das an der gesuchten Relation beteiligt ist nicht in einem dieser Löcher befindet, ändert sich bei der Richtungs- und Enfernungsbestimmung nichts. Bei der topologischen Relationsbestimmung würden zusätzliche Relationen zu den bestehenden hinzugefügt werden.

- **Einführung komplexer Objekte**
  Egenhofer und Herring brachten 1991 die Idee auf, dass auch äußerst komplexe Objekte topologisch untersucht werden müssten (vgl. [EH91]). Sie meinten damit z.B. Objekte, die aus einer Fläche und einer Strecke bestehen (s. Abbildung 6.1). Dies könnte z.B. ein Fluss mit angebundenem See sein. Bei der Richtungs- und Enfernungsbestimmung würde man dieses komplexe Objekt vermutlich in zwei Teile aufteilen.

Abbildung 6.1: Ein komplexes Objekt.

- **Bessere Kombination der Teilbereiche**
  In dieser Diplomarbeit werden die einzelnen Teilbereiche (Topologie, Richtung und Entfernung) nahezu unabhängig voneinander betrachtet. Die zwei Ausnahmen sind der Nahbereich bei der Richtungsbestimmung, in dem keine Richtungsbestimmung notwendig ist, und die disjunkt-Prüfung bei der Entfernungsbestimmung. Es sind aber auch weitere Kombinationen der drei Disziplinen untereinander möglich. In der wissenschaftlichen Literatur findet man die Kombination von Topologie und Richtung (vgl. [Her94]) und – vergleichsweise häufig untersucht – die Kombination von Richtung und Entfernung (vgl. z.B. [Fra92], [ZF96], [CFH97]). In den meisten Situationen reicht es nicht, nur eine Entfernungsrelation anzugeben. Um das entfernte Objekt zu finden, ist zusätzlich zumindest eine Richtungsangabe nötig.

- **Alternative Richtungsrelationen**

Beim Betrachten von Richtungsrelationen auf einer Karte scheint es ausreichend nur mit Himmelsrichtungen zu arbeiten. Versetzt man sich aber direkt in die dargestellte Welt, dann erscheint es ungewöhnlich Richtungen an Hand von Himmelsrichtungen anzugeben. Oft werden hier Richtungsrelationen durch andere sprachliche Ausdrücke angegeben. Es werden dabei z.B. "links" und "rechts" oder Ausdrücke wie "der Straße folgen" benutzt. Allerdings werden teilweise auch in diesen Situationen die Himmelsrichtungsrelationen genommen. Jedoch bedarf es einer tiefergehenden Untersuchung in welchen Situationen welche sprachlichen Ausdrücke benutzt werden – die gefühlsmäßige Nachahmung wäre größtenteils Spekulation.

- **Integration von vagem bzw. unsicherem Wissen**
  Auf unserer Karte findet man, genau wie bei GIS, nur Objekte, die aus dem euklidischen Raum stammen und auf Basis kartesischer Koordinaten dargestellt werden. Ungenaue oder unsichere Angaben über Objekte können nicht integriert werden. In der Realität gibt es allerdings eine Menge von Objekten, deren Grundriss sich nicht durch exakte Koordinaten darstellen lässt: Meere, Wälder und Gebirge haben keinen festen Grenzbereich, wie er hier definiert ist (s. Kap 2.4, S.15). Dies hat auf alle hier untersuchten Relationsarten Auswirkungen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Integration, beispielsweise mit der Fuzzy-Set-Theorie (vgl. [Zad65]) oder der Verankerungstheorie (vgl. [GH05]).

- **Erweiterung des Modells ins Dreidimensionale**
  Interessant und aufwendig zugleich wäre es das gesamte System ins dreidimensionale zu erweitern. Bei der Entfernungsbestimmung spielt sicherlich nicht nur der Flächeninhalt des Grundrisses eine wichtige Rolle, sondern auf die Höhe des Objekts. Dies beeinflusst auch die Richtungsbestsimmung: (Himmels-)Richtungen müssen nicht zwingend angegeben werden, wenn ein Objekt, auch wenn es weit entfernt ist, durch seine Höhe aus anderen herausragt und direkt von einem beliebigen Ort aus erblickt werden kann. Topologisch gesehen scheint es im Vergleich zum Zweidimensionalen keine weiteren Relationen zu geben.

  Insgesamt muss im Dreidimensionalen zuvor eine wichtige Frage geklärt werden: Gibt es weiterhin null-, ein- und zweidimensionale Objekte, die in der Realität dreidimensional sind? Dies macht ein paar Objekten Sinn (z.B. bei Pfaden, Landstrichen oder Gullideckeln), bei anderen aber nicht (z.B. Gebäude). Andere (z.B. breite Flüsse) könnten einer höheren Dimension zugeordnet werden.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Geometrische Karte mit Objekten 2

2.1 Grenze, Innenbereich und Abschluss eines zweidimensionalen Objekts 16

3.1 Alle 33 möglichen topologischen Relation zwischen zwei eindimensionalen Objekten 24
3.2 Die 16 theoretischen Relationen grafisch dargestellt. 29
3.3 RCC-Kalkül: Möglichkeiten der Unterteilung der Grundrelationen. 33
3.4 Allgemeine Richtungsbestimmung mit nach Norden ausgerichteten Referenzrahmen 36
3.5 Beispielhafte Unterteilung der Richtungsrelationen in Level 1. 38
3.6 Richtungsrelationen im Level 2. 39
3.7 Richtungsrelationen im Level 2. 40
3.8 Richtungsrelationen im Level 3. 41
3.9 Richtungsrelationen mit neutraler Zone. 42
3.10 Richtungsrelationen vom Vektor ab. 43
3.11 Freksas Richtungsrelationen mit Referenzvektor ab. 44
3.12 Freksas Richtungsrelationen mit Referenzvektor ba. 45
3.13 Freksas 15 Richtungsrelationen. 46
3.14 Richtungsbestimmung nach dem Haar'schen Modell: Ein östlich gelegenes Objekt wird nicht als östlich erkannt 48
3.15 Richtungsbestimmung nach dem Haar'schen Modell: Ein nördlich gelegenes Objekt wird als östlich erkannt 49
3.16 Das erste Modell nach Peuquet und Ci-Xiang: Änderung des Winkels zur korrekten Richtungserkennung. 50
3.17 Das zweite Modell nach Peuquet und Ci-Xiang: Änderung des Startpunktes der winkel-aufspannenden Geraden. 51

3.18 Objekt mit Ausdehnung und Akzeptanzbereichen 52
3.19 Bildung der inversen Relation zur Bestimmung der Richtung. 52
3.20 Verwinkeltes Objekt 54
3.21 Isotropische und anisotropische Fläche 59
3.22 Ein einfaches Entfernungsbereichssystem 61
3.23 Entfernungsbereichssysteme, die verschiedenen Theorien unterliegen 62

4.1 Zwei von zwölf topologischen Relationen, die hier keine praktische Bedeutung haben. 75
4.2 Links liegt ein Berührpunkt vor, rechts ein Schnittpunkt. . . 79
4.3 Richtungsrelationen nach dem Modell aus dem Level 3 mit neutraler Zone. 83
4.4 Freksas Modell mit Himmelsrichtungen. Referenzvektor nach Norden ausgerichtet. 84
4.5 Richtungsbestimmung mit einem eindimensionalen Referenzobjekt. 89
4.6 Schritte bei der Richtungsbestimmung bei zwei zweidimensionalen Objekten. 98
4.7 Objektanordnung, die zu einer falschen Relationsermittlung führen kann. 99

5.1 Auswahlmenü der Relationsarten 100
5.2 Die Karte 101
5.3 Ein MessageDialog 104

6.1 Ein komplexes Objekt. 111

A.1 Linien A und B mit gleichen Grenzen und disjunkten Innenbereichen 124
A.2 (a)Ein gemeinsamer Grenzpunkt und ein Grenzpunkt von A auf dem Innenbereich von B, (b) Jeweils ein Grenzpunkt einer Linie auf dem Innenbereich der anderen Linie 125
A.3 Beispiele für Anordnungen von Linien bei drei Schnittpunkten 126
A.4 Beispiele für Anordnungen von Linien bei mehr als vier Schnittpunkten 126

Tabellenverzeichnis

3.1 Übersicht über die sinnvollen Möglichkeiten, wie eine Linie topologisch zur Fläche ausgerichtet sein kann. 26
3.2 Übersicht der möglichen Schnittmengen von Grenzen und Innenbereichen von Flächen. 28
3.3 Verbale Interpretation der Schnittmengen. 30
3.4 Relationenaddition bei dreiteiligen Entfernungsbereichen . . . 64
3.5 Relationenaddition bei vierteiligen Entfernungsbereichen . . . 65
3.6 Geometrische Interpretation der Relationenaddition beim vierteiligen Entfernungsbereichen 66
3.7 Geometrische Interpretation der Relationenaddition beim vierteiligen Entfernungsbereichen nach dem Monotonieprinzip . . 66
3.8 Die sieben Ausgangsrelationen des "Schließen nach Größenordnung" 67
3.9 Gängige Vergleichsrelationen und ihre Notation beim "Schließen nach Größenordnung" 68

4.1 Übersicht über die 21 topologischen Relationen, die zwischen zwei Linien möglich und praktisch nutzbar sind. 76

Literaturverzeichnis

[Bar01] Thomas Barkowsky. Mental processing of geographic knowledge. In *COSIT 2001: Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory*, pages 371–386, London, UK, 2001. Springer-Verlag.

[Bar02] Thomas Barkowsky. *Mental representation and processing of geographic knowledge.* Springer, Berlin, 2002.

[BJO97] Bettina Berendt and Petra Jansen-Osmann. Feature accumulation and route structuring in distance estimations - an interdisciplinary approach. In *COSIT '97: Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory*, pages 279–296, London, UK, 1997. Springer-Verlag.

[CFH97] Eliseo Clementini, Paolino Di Felice, and Daniel Hernández. Qualitative representation of positional information. *Artif. Intell.*, 95(2):317–356, 1997.

[Cla81] B. L. Clarke. A calculus of individuals based on 'connection'. *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 22(3):204–218, 1981.

[Coh97] A.G. Cohn. Qualitative spatial representation and reasoning techniques. In *Artificial intelligence*, pages 1–94, 1997.

[Edg90] G.A. Edgar. *Measure, topology, and fracta geometry.* Springer-Verlag, New York, 1990.

[EF91] Max J. Egenhofer and Robert D. Franzosa. Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991.

[EH91] Max J. Egenhofer and John R. Herring. Categorizing binary topological relations between regions, lines, and points in geographic databases, 1991. Technical Report, Department of Surveying Engineering, University of Maine.

[EM95] Max J. Egenhofer and David M. Mark. Modeling conceptual neighborhoods of topological line-region relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9:555–565, 1995.

[FH90] Christian Freksa and Christopher Habel. Warum interessiert sich die kognitionsforschung für die darstellung räumlichen wissens? In Christian Freksa and Christopher Habel, editors, *Repräsentation und Verarbeitung räumlichen Wissens*, pages 1–15. Springer, Berlin, 1990.

[Fis01] Paul Fischer. *Grafik-Programmierung mit Java-Swing*. Addison-Wesley, München, 2001.

[Fra92] Andrew U. Frank. Qualitative spatial reasoning about distances and directions in geographic space. *Journal of Visual Languages and Computing*, 3:343–371, 1992.

[Fra96] A. U. Frank. Qualitative spatial reasoning: Cardinal directions as an example. *International Journal of Geographic Information Systems*, 10(3):269–290, 1996.

[Fre92] Christian Freksa. Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In *Spatio-Temporal Reasoning*, pages 162–178, 1992.

[GH05] Antony Galton and James Hood. Anchoring: A new approach to handling indeterminate location in gis. In *COSIT*, pages 1–13, 2005.

[GS99] Kurt Graf and Dietrich Steinicke. *Der amtliche Sportbootführerschein - See*. Busse Seewald - DSV Verlag, Deutschland, 1999.

[Güt88] Ralf Hartmut Güting. Geo-relational algebra: A model and query language for geometric database systems. In *EDBT '88: Proceedings of the International Conference on Extending Database Technology*, pages 506–527, London, UK, 1988. Springer-Verlag.

[Haa76] R. Haar. Computational models of spatial relations. Technical Report TR-478 MCS-72-0361-10, Dept. of Computer Science, University of Maryland, 1976.

[HCF95] Daniel Hernandez, Eliseo Clementini, and Paolino De Felice. Qualitative distances. In *Spatial Information Theory: a theoretical basis for GIS*, pages 45–57, 1995.

[Her94] Daniel Hernandez. *Qualitative Representation of Spatial Knowledge*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 1994.

[Itt73] W.H. Ittelson. Environmental perception and contemporary perceptual theory. In *Environment and Cognition*, pages 186–255, 1973.

[KL05] Eva Klien and Michael Lutz. The role of spatial relations in automating the semantic annotation of geodata. In *COSIT*, pages 133–148, 2005.

[Kob92] Daniel Kobler. Visualisierung qualitativer repräsentationen räumlichen wissens, 1992. Diplomarbeit, Technische Universität München.

[LM75] J.C. Lowe and S. Moryadas. *The Geography of Movement.* Houghton Mifflin, Boston, 1975.

[Man83] J.M. Mandler. Representation. In *Handbook of child psychology*, Essex, UK, 1983. Elsevier Science Publishers Ltd.

[Mon93] Daniel Montello. Scale and multiple psychologies of space. In *Spatial Information Theory: a theoretical basis for GIS*, pages 312–321, 1993.

[Mon97a] Daniel R. Montello. The perception and cognition of environmental distance: Direct sources of information. In *COSIT*, pages 297–311, 1997.

[Mon97b] Daniel R. Montello. Route information and travel time as bases for the perception and cognition of environmetal space., 1997. Ph.D. Thesis.

[MS90] M. L. Mavrovouniotis and G. Stephanopoulos. Formal order-of-magnitude reasoning in process engineering. In D. S. Weld and J. de Kleer, editors, *Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems*, pages 323–336. Kaufmann, San Mateo, CA, 1990.

[Nie03] Georg Niemeyer. Einführung in die mentale repräsentation und verarbeitung geographischen wissens, 2003. http://wwwmath.uni-muenster.de/SoftComputing/lehre/seminar/ss2003/vortraege/-niemeyer/MRP1-Praesentation.pdf - besucht am 16.12.2005.

[Pal78] S. E. Palmer. Fundamental aspects of cognitive representation. In *Cognition and categorization*, pages 259–303. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NY, 1978.

[PL81] H.L Pick and J.J. Lockman. From frames of reference to spatial representations. In *Spatial representation and behavior across the life span*, pages 39–61, 1981.

[Pul88] D. Pullar. Data definition and operators on a spatial data model. In *Proceedings of the ACSM-ASPRS Annual Convention, St. Louis, Missouri*, pages 197–202, 1988.

[PZ87] D. J. Peuquet and Ci-Xiang Zhang. An algorithm to determine the directional relationship between arbitrarily-shaped polygons in the plane. *Pattern Recogn.*, 20(1):65–74, 1987.

[RC89] D. A. Randell and A. G. Cohn. Modelling topological and metrical properties in physical processes. In *Proceedings of the first international conference on Principles of knowledge representation and reasoning*, pages 357–368, San Francisco, CA, USA, 1989. Morgan Kaufmann Publishers Inc.

[RZC92] D. A. Randell, Z.Cui, and A. G. Cohn. A spatial logic based on regions and connection. In *Proceedings of KRâ92, knowledge representation and reasoning*, pages 394–398. Morgan Kaufmann, Los Altos, 1992.

[San51] C.I. Sandström. *Orientation in the present space.* Almqvist and Wiksell, Stockholm, 1951.

[She61] F.N. Shemyakin. Orientation in space. In *Psychological science in the UDSSR*, pages 186–255, 1961.

[SS05] Kersten Sommer-Schmidt. Was ist nähe? ein ansatz zur ausschnittsbestimmung für routenkartentravel time as bases for the perception and cognition of environmetal space., 2005. Bachelor Report.

[Vie97] Laure Vieu. Spatial representation and reasoning in artificial intelligence. In *Spatial and Temporal Reasoning*, pages 5–41, 1997.

[Zad65] L.A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information an Control*, 8:338–353, 1965.

[ZF96] Kai Zimmermann and Christian Freksa. Qualitative spatial reasoning using orientation, distance, and path knowledge. *Applied Intelligence*, 6:49–58, 1996.

[Zim93] Kai Zimmermann. Enhancing qualitative spatial reasoning - combining orientation and distance. In *Proc. International Conference on Spatial Information Theory. A Theoretical Basis for GIS*, pages 69–76, Italien, 1993. Elba.

[Zim95] Kai Zimmermann. Measuring without measures - the delta-calculus. In *Spatial Information Theory: a theoretical basis for GIS*, pages 59–67, 1995.

Anhang A

Algorithmus zur Erkennung topogischer Relationen

Hier ist der ausführliche Algorithmus zu finden, der im Hauptteil nur angeschnitten wurde.

Es gelten die Voraussetzungen, die im Kapitel 4.2.4 gemacht wurden.

Bevor beschrieben wird, wie eine topologische Relation gefunden werden kann, wird beschrieben, wie zwischen Schnitt- und Berührpunkten unterschieden werden soll.

Berührpunkt prüfen

Wie bereits in Kapitel 4.2.4 beschrieben wird, wird generell keine Unterscheidung zwischen Schnittpunkt und Berührpunkt erfolgen. Allerdings gibt es Situationen, in denen es wichtig ist, dass ein Berühr- und kein Schnittpunkt vorliegt.

Um dies zu prüfen werden auf der Linie, auf der sich der zu prüfende Punkt befindet, die beiden Nachbarpunkte des zu prüfenden Punkts gesucht. Falls es einen der Punkte nicht gibt, liegt auf jeden Fall eine Berührung vor. Gibt es beide, so wird eine Gerade durch beide Punkte gelegt. Gibt es nun exakt einen Schnittpunkt mit der Geraden, die berührt oder geschnitten wird, zwischen den beiden Punkten (exklusive), dann liegt ein Schnittpunkt vor (s. Abb. 4.2 rechts). In allen anderen Fällen ist es ein Berührpunkt. Es könnte sein, dass beide Nachbarpunkte nicht auf der Berührgeraden liegen (s. Abb. 4.2 links), dann gibt es gar keinen Schnittpunkt. Ein Nachbarpunkt könnte Berührpunkt sein, dann gibt es zwischen den Nachbarpunkten keinen Schnittpunkt mit der Berührgeraden. Dieser Schnittpunkt ist dann der benachbarte Berührpunkt. Hat der Ausgangsberührpunkt zwei Nachbarn, die selbst Berührpunkte sind, so gibt es mindestens drei Schnittpunkte der Prüfgeraden mit der Berührgeraden.

Nun folgt die konkrete Beschreibung der Algorithmen. Wir unterschreiden dabei alle möglichen Kombinationen, die zwischen null-, ein- und zweidimensionalen Objekten auftreten können.

Punkt A zu Punkt B

Haben Punkt A und Punkt B die gleichen Koordinaten, so sind sie "`gleich`", sonst sind die "`disjunkt`".

Punkt A zu Linie B

Hat der Punkt A die gleichen Koordinaten wie einer der beiden Endpunkte der Linie B, so ist "`A am Rand von B gelegen`". Hat A die gleichen Koordinaten wie ein Punkt des Innenbereichs von B, dann "`liegt A auf dem Innenbereich von B`". Ansonsten sind A und B "`disjunkt`".

Punkt A zu Fläche B

Prüfe, ob B ein Kreis ist.

- Wenn B ein Kreis ist, dann ermittle den Abstand von Punkt A zum Mittelpunkt der Fläche B.
  - Ist dieser Abstand kleiner als der Radius von B, so liegt "`A in B`".
  - Ist der Abstand genauso groß wie der Radius, dann liegt A auf dem Kreisring. Folglich ist "`A am Rand von B enthalten`".
  - Ist der Abstand größer, so liegt "`A außerhalb von B`"
- Ist B kein Kreis wird zuerst überprüft, ob A ein Eckpunkt der Grenzpolylinie ist. Wenn dem so ist oder wenn A auf der Polylinie liegt, dann ist "`A am Rand von B gelegen`". Wenn beides nicht der Fall ist, dann wird hier eine Gerade durch den Mittelpunkt von B und A gelegt und die Anzahl der Schnitte (ohne Berührung) mit der Grenze von B gezählt. Ist diese Anzahl gerade, so liegt "`A außerhalb von B`", sonst liegt "`A in B`".

Linie A zu Linie B

An dieser Stelle sei noch einmal auf die Definition einer Linie hingewiesen: Eine Linie in dieser Diplomarbeit kann nicht mit einer Strecke oder Gerade aus der Mathematik gleichgesetzt werden: Eine Linie hat hier nicht an jeder Stelle die gleiche Steigung, sondern kann in jedem Punkt eine andere Steigung aufweisen (womit sich z.B. “Kurven” ergeben können.). Folglich können sich im Gegensatz zu Strecken und Geraden Linien auch öfter als einmal schneiden, ohne gleich zu sein oder gleiche Teilstrecken zu haben.

Zur Ermittlung der Relation zähle zuerst die Anzahl der Schnittpunkte der beiden Linien:

- **A und B schneiden sich gar nicht**
  In diesem Fall sind A und B “`disjunkt`”.
- **A und B schneiden sich einmal**
  Ermittle, wie viele Grenzpunkte gleichzeitig Schnittpunkte sind.
  - Wenn kein Grenzpunkt in den Schnitt involviert ist, dann liegt die Relation “`schneidende Innenbereiche`” vor.
  - Schneiden sich dabei zwei Grenzpunkte, so haben “`A und B den gleichen Grenzpunkt`”.
  - Wenn nur eine Grenze von A, aber kein Grenzpunkt von B schneidet, dann “`beginnt A auf dem Innenbereich von B`”, ansonsten “`beginnt B auf dem Innenbereich von A`”.
- **A und B schneiden sich zweimal**
  Sind beide Schnittpunkte aus Schnitten der Grenzpunkte der Linien

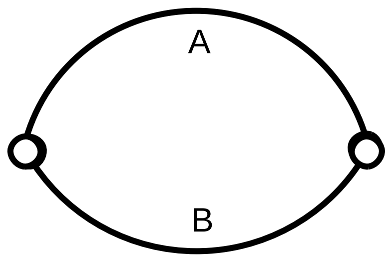


Abbildung A.1: Linien A und B mit gleichen Grenzen und disjunkten Innenbereichen

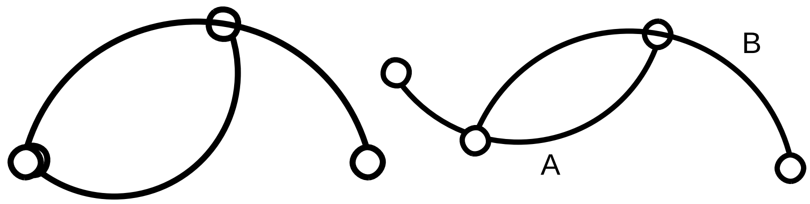


Abbildung A.2: (a)Ein gemeinsamer Grenzpunkt und ein Grenzpunkt von A auf dem Innenbereich von B, (b) Jeweils ein Grenzpunkt einer Linie auf dem Innenbereich der anderen Linie

entstanden, so haben "`A und B gleiche Grenzen und disjunkte Innenbereiche`" (s. Abb. A.1).

Ist nur ein Schnittpunkt dadurch entstanden, dass zwei Grenzpunkte sich schneiden, so muss - wenn man ein sinnvolles Szenario haben möchte – der zweite Grenzpunkt einer Linie die andere schneiden und ein Grenzpunkt ungeschnitten bleiben. Gehört dieser Punkt zu A, so haben "`A und B einen gleichen Grenzpunkt, der zweite Grenzpunkt von A ist Teilmenge vom Innenbereich von B`". Gehört der Punkt zu B, dann haben "`A und B einen gleichen Grenzpunkt und disjunkte Innenbereiche und B verläuft durch den zweiten - Grenzpunkt von A`" (beide s. Abb. A.2(a)). Wenn die Schnittpunkte nicht durch das untereinander schneiden zweier Grenzpunkte entstanden sind, sollte überprüft werden, ob beide Grenzen einer Linie auf dem Innenbereich der anderen Linie gelegen sind. Wenn nicht, handelt es sich um die Relation "`A beginnt im Innenbereich von B und läuft durch einen Grenzpunkt von B`" bzw. der dazu inversen Relation (s. Abb. A.2(b)). Wenn doch wird nachgeschaut, ob die geschnittenen Grenzen zu A gehören, denn dann "`beginnt und endet A auf dem Innenbereich von B`", ansonsten "`beginnt und endet B auf dem Innenbereich von A`".

- **A und B schneiden sich dreimal**

  Die Relation "`A und B haben einen gleichen Grenzpunkt, aber disjunkte Innenbereiche, B verläuft durch den zweiten Grenzpunkt von A und endet auf dem Innenbereich von A`" (s. Abb. A.3 links) ergibt sich, wenn sämtliche Grenzpunkte die gleichen Koordina-

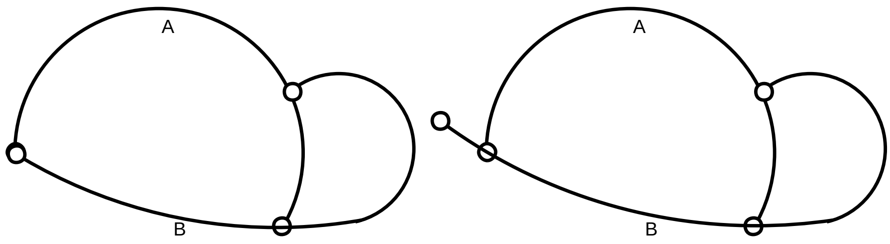


Abbildung A.3: Beispiele für Anordnungen von Linien bei drei Schnittpunkten

ten haben wie die Schnittpunkte. Wenn dies für einen Grenzpunkt nicht gilt und dieser zu A gehört, ergibt sich die Relation “`A beginnt und endet auf dem Innenbereich von B, B beginnt auf dem Innenbereich von A`”, im anderen Fall “`As Grenzen liegen auf dem Innenbereich von B, ein Grenzpunkt von B liegt auf dem Innenbereich von A`” (s. Abb. A.3 rechts).

- **A und B schneiden sich viermal**
  Dadurch ergibt sich einzig die Relation “`A beginnt und endet auf dem Innenbereich von B, B beginnt und endet auf dem Innenbereich von A`”.

- **A und B schneiden sich mehr als viermal**

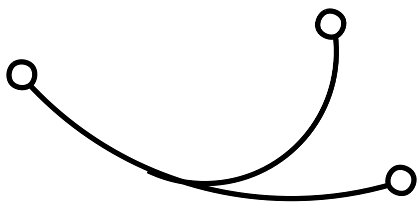


Abbildung A.4: Beispiele für Anordnungen von Linien bei mehr als vier Schnittpunkten

Für den Fall, dass A und B gleiche Grenzpunkte haben, gilt die “`Gleichheit`”. Wenn ein Grenzpunkt bei A und B gleich ist und keiner der beiden übrigen Grenzpunkte auf dem jeweils anderen Innenbereich liegt,

liegt die Relation "`A und B haben einen gleichen Grenzpunkt und daran anschließend einen gleichen Innenbereich, der danach disjunkt ist`" vor. Sofern die andere Grenze auf dem anderen Innenbereich liegt, gilt folgendes: Gehört dieser Grenzpunkt zu A, dann "`haben A und B einen gleichen Grenzpunkt, Bs Innenbereich und der zweite Grenzpunkt sind Teilmenge vom Innenbereich von A`" (s. Abb. A.4), gehört er zu B, dann "`haben A und B einen gleichen Grenzpunkt und disjunkte Innenbereiche und A verläuft durch den zweiten Grenzpunkt von B`".

Schneiden sich keine Grenzpunkte untereinander muss ein Grenzpunkt einer Linie auf dem Innenbereich der anderen Linie liegen. Wenn der Grenzpunkt zu A gehört, ist "`A Teilmenge vom Innenbereich von B`", gehört er zu B, "`beinhaltet A B im Innenbereich`".

Alle weiteren geometrisch möglichen topologischen Relationen wurden voher ausgeschlossen, womit nun alle auf der Karte möglichen Relationen abgedeckt sind.

Linie A zu Fläche B

Der topologische Vergleich von einer Linie und einer Fläche ist der einzige, bei dem manche Relationen nur sehr schwer voneinander unterschieden werden können. Um sicher unterscheiden zu können, müsste jeder Punkt der Linie untersucht werden, was aber zu einem erheblichen Aufwand führen würde. Daher wird eine Heuristik benutzt: Eine beliebige Anzahl an Punkten der Linie wird ausgewählt und die jeweilige Prüfung mit dieser Teilmenge statt mit der Gesamtmenge durchgeführt und angenommen, dass das, was für diese Auswahl an Punkten gilt, für alle Punkte gilt.

Wir beginnen hier, indem zuerst bestimmt wird, wie oft sich die Linie A und die Grenze der Fläche B schneiden.

- **Es gibt gar keinen Schnitt**
  Als nächstes wird eine Gerade durch den Mittelpunkt von B und einen beliebigen Punkt von A gelegt. Ist die Anzahl der Schnitte (nicht Berührungen) zwischen den beiden Punkten gerade, so liegt "`A außerhalb von B`", ist die Anzahl ungerade, so liegt "`A in B`".

- **A und B schneiden sich einmal**
  Nun wird getestet, ob ein Grenzpunkt der Linie gleichzeitig Schnittpunkt ist.

- Ist dies der Fall, so wird eine Gerade durch den zweiten Grenzpunkt und den Mittelpunkt von B gelegt. Ist die Anzahl der Schnitte (nicht Berührungen) zwischen den beiden Punkten ungerade, handelt es sich um die Relation "`die Linie berührt die Fläche mit einem Grenzpunkt und verläuft außerhalb`". Ist sie gerade, so liegt die Relation "`die Linie berührt die Fläche mit einem Grenzpunkt und verläuft innerhalb von ihr`" vor.
- Ist ein Grenzpunkt nicht gleichzeitig Schnittpunkt, so wird eine Gerade durch den ersten Grenzpunkt von A und den Mittelpunkt von B und eine Gerade durch den zweiten Grenzpunkt von A und den Mittelpunkt von B gelegt und jeweils gezählt wie oft sich die Gerade zwischen den beiden Punkten mit der Grenzfläche von B schneidet (ohne Berührungen). Sind beide Zahlen ungerade "`berühren sich die Region und die Linie von außen`". Ist nur eine Zahl ungerade "`beginnt die Linie in der Fläche und endet außerhalb`". Ist keine der Zahlen ungerade "`ist die Linie in der Fläche enthalten und berührt mit dem Innenbereich die Grenze der Fläche`".

- **A und B schneiden sich zweimal**
  Nun muss zuerst gezählt werden, wie viele der Schnittpunkt durch einen Schnitt mit den Grenzpunkten von A zustande kamen.

  - Liegen beide Grenzpunkte auf der Grenze von B, dann kann der Rest der Linie nur noch komplett außerhalb oder komplett innerhalb der Fläche verlaufen. Um dies unterscheiden zu können, legen wir eine Gerade durch die Mittelpunkte der beiden Objekte. Ist die Anzahl der Schnitte (ohne Berührungen) zwischen den beiden Punkten gerade, so "`beginnt und endet die Linie auf der Grenze von der Fläche und verläuft nur in ihr`", im ungeraden Fall "`beginnt und endet die Linie auf der Grenze von der Fläche und verläuft nur außerhalb von ihr`".
  - Befindet sich nur ein Grenzpunkt auf der Grenze von B, dann liegt entweder die Relation "`die Linie beginnt auf der Flächengrenze, verläuft außerhalb und innerhalb der Fläche und endet außerhalb`" oder "`die Linie beginnt auf der Flächengrenze und verläuft außerhalb und innerhalb der Fläche und endet innerhalb`" vor. Um sie auseinanderzuhalten, prüfen wir, wo der Grenzpunkt, der nicht auf der Flächengrenze liegt,

sich befindet. Deshalb legen wir eine Gerade durch den Mittelpunkt der Fläche und den Grenzpunkt. Ist die Anzahl der Schnitte zwischen den beiden Punkten gerade, liegt der Grenzpunkt innerhalb der Fläche und die zweitgenannte Relation liegt vor. Ist die Anzahl der Schnitte ungerade, dann endet die Linie innerhalb der Fläche.

  - Ist kein Grenzpunkt von A gleichzeitig Schnittpunkt, dann liegen hier beide Grenzpunkte in B oder außerhalb von B. Wir testen dies, indem wir eine Gerade durch den Mittelpunkt von B und einen der Grenzpunkte von A legen und die Schnittpunkte (nicht die Berührungen) der Gerade mit der Grenze von B zählen. Erhalten wir dabei eine gerade Anzahl, dann "`beginnt und endet die Linie im Innenbereich der Fläche, sie verläuft aber teilweise außerhalb`". Ist die Anzahl ungerade , ergibt sich die Relation "`die Linie beginnt und endet außerhalb und verläuft teilweise innerhalb der Fläche`".

- **A und B schneiden sich dreimal**
  Hier kommt nur die Relation "`die Linie beginnt und endet auf der Flächengrenze und verläuft außerhalb und innerhalb der Fläche`" in Frage.

- **A und B schneiden sich mehr als dreimal**
  Als erstes müssen die Schnittpunkte der Grenzpunkte von A mit der Grenze von B gezählt werden.

  - Es gibt einen Schnittpunkt. Nun wird eine Gerade zwischen dem Mittelpunkt von B zum Schnittpunkt von A, der nicht Schnittpunkt ist, gelegt. Ist die Anzahl der Schnitte (darunter keine Berührungen) von Grenze B und der Geraden zwischen den beiden Ausgangspunkten ungerade, liegt die Relation "`die Linie beginnt auf der Flächengrenze und verläuft dort teilweise, dann verläuft sie außerhalb der Fläche und endet dort`", im anderen Fall "`beginnt die Linie auf der Flächengrenze und verläuft dort teilweise, dazu verläuft sie innerhalb der Fäche und endet dort auch`" vor.
  - Bei zwei Schnittpunkten wird erneut die Heuristik benutzt. Wir wählen eine Anzahl von Punkten auf der Linie. Wir beginnen mit dem ersten (beliebigen) Punkt und legen eine Gerade durch den Mittelpunkt von B und den gewählten Punkt, ermitteln die

Schnittpunkte mit der Grenze von B und ermitteln dadurch, ob unser Prüfpunkt auf der Grenze liegt. Liegt er auf der Grenze wird das Verfahren mit dem nächsten gewählten Punkt auf der Linie wiederholt. Sobald erkannt wird, dass ein Punkt nicht auf der Grenze liegt, wird geprüft, ob er sich innerhalb oder außerhalb der Fläche befindet. Dazu werden die Schnitte auf der Geraden gezählt. Haben wir eine ungerade Anzahl, so "`verläuft die Linie teilweise auf der Flächengrenze und teilweise außerhalb der Fläche, beginnt und endet auf der Flächengrenze`". Ist die Anzahl gerade, dann "`beginnt, endet und verläuft die Linie teilweise auf der Flächengrenze, verläuft aber auch teilweise innerhalb der Fläche`". Wenn letztlich alle Punkte der Linie auf der Grenze liegen, gehen wir davon aus, dass "`die Linie komplett auf der Flächengrenze verläuft`".

Fläche A zu Fläche B

Wir schneiden beide Grenzen und zählen die Schnittpunkte:

- **Es gibt keinen Schnittpunkt.**
  Das kann entweder daran liegen, dass beide Objekte disjunkt sind oder ein Objekt im anderen enthalten ist.

  Um dies herauszubekommen berechnen wir den Flächeninhalt beider Objekte. Nun wird getestet, ob der Mittelpunkt des kleineren Objekts auch im größeren Objekt liegt. Wenn das der Fall ist, sind beide Objekte "`disjunkt`". Wenn sie nicht disjunkt sind, wird ermittelt, welche Fläche in der anderen enthalten ist. Ist der Flächeninhalt von A kleiner als der von B, dann ist "`A in B enthalten`", ist B's Flächeninhalt kleiner ist "`B in A enthalten`".

- **Es gibt einen Schnittpunkt.**
  Hier liegt eindeutig eine Berührung vor. Aber resultiert diese Berührung daraus, dass ein Objekt an der Grenze des anderen enthalten ist? Oder liegt die Berührung von außen vor? Um dies zu überprüfen, wählen wir den Mittelpunkt von Objekt A und prüfen, ob es auch in dem Bereich von Objekt B liegt. Ist dem nicht so, "`berühren sich A und B`". Ansonsten liegt eines der Objekte im Anderen am Rand. Dafür berechnen wir als Grundoperation den Flächeninhalt der Flächen. Logischerweise ist das kleinere Objekt im größeren enthalten. Wenn A

größer ist, dann ist "`B in A am Rand enthalten`", ansonsten ist "`A in B am Rand enthalten`".

- **Es gibt zwei Schnittpunkte.**
  Prüfe einen Schnittpunkt, ob er ein Berührpunkt ist. Wenn das so ist, ist auch der andere Schnittpunkt ein Berührpunkt und die Relation ist eine "`Berührung`". Sind die Schnittpunkte keine Berührpunkte, dann ist die Relation eine "`Überlappung`".

- **Es gibt mehr als zwei Schnittpunkte.**
  Zuerst überprüfen wir den Flächeninhalt beider Flächen. Sind sie gleich können wir davon ausgehen, dass "`A und B gleich sind`". Bei drei oder vier Schnittpunkten ist es möglich, dass eine oder zwei Überlappungen oder eine oder zwei Berührungen vorliegen. Es wird getestet, ob mindestens drei Berührpunkte vorliegen. Falls ja, liegt eine "`Berührung`" vor, falls nicht liegt eine "`Überlappung`" vor.

  Trifft alles nicht zu, so liegt eine große Berührfläche vor. Wir prüfen welche Fläche die größere ist. Als nächstes wird geprüft, ob der Mittelpunkt der kleineren Fläche in der größeren Fläche enthalten ist. Wenn ja, dann ist "`A in B am Rand enthalten (oder B in A)`", ansonsten "`berühren sich A und B`".

Anhang B

Daten auf der CD-ROM

Auf der CD-ROM, die auf der letzten Seite zu finden ist, findet sich folgendes:

- Die Diplomarbeit als pdf-Datei (im Ordner `diplomarbeit`)
- Die beschriebene Software (im Ordner `software`, wobei
  - die ausführbaren class-Dateien im Unterordner `programm` liegen
  - und die Quellcode-Dateien im Unterordner `quellcode` zu finden sind.

Anhang C

Hinweise zur Benutzung der Software

Das angesprochene beispielhafte Programm befindet sich auf der CD-ROM. Es handelt sich dabei um ein `Java`-Programm. Um es starten zu können, muss auf dem zu benutzenden Rechner eine `Java Runtime Environment` funktionsfähig installiert sein.

Zum Starten des Programmes muss in den Ordner `software/programm` gewechselt werden und in der Eingabeaufforderung/Terminalfenster nun

```
java Start
```

eingegeben werden.